Anàlisi i disseny de les operacions marines d`instal·lació d'una plataforma eòlica flotant tipus SPAR (WINDCRETE)

Treball Final de Grau

Facultat de Nàutica de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya

Treball realitzat per:
Pere Oliver Verdaguer

Dirigit per:
Pau Trubat
Climent Molins

Grau en Enginyeria en Sistemes i Tecnologia Naval

Barcelona, 09/07/2021

Agraïments

Per la realització del projecte de final de grau he tingut el suport incondicional de moltes persones. Primer de tot m'agradaria agrair als meus tutors, Pau Trubat i Climent Molins per la manera en que hem van acollit i ajudar.

En segon lloc, agrair als meus pares pel constant suport que m'han donat tots aquests anys i donar-me la possibilitat d'estudiar.

Finalment m'agradaria dedicar la tesi a la meva parella Inès, a la meva germana i als amics per totes les vegades que m'han ajudat en els moments difícils, sense ells no hagués sigut capaç de compaginar el treball laboral i la realització del TFG amb tanta alegria i il·lusió.

Acrònims i abreviacions

AHV	Anchor Handling Vessel
BMl	Longitudinal Metacentric radius
BMt	Transversal Metacentric radius
CAPEX	Capital Expenditure
Cb	Block Coeficient
CL	Centerline
CLV	Cable Lay Vessel
COB	Center of Bouyancy
COG	Center of Gravity
Cp	Prismatic Coefficient
CTV	Crew Transfer Vessel
DNVGL	Det Norske Veritas Germanischer Lloyd
EMODnet	European Marine Observation and Data Network
FOWT	Floting Offshore Wind Turbine
GM	Metacentric Height
H	Height
HLV	Heavy Lift Vessel
Ixx	Moment of inertia along horitzontal axis
Iyy	Moment of inertia along vertical axis
Izz	Moment of inertia along the axis perpendicular to x and y axis.
K	Keel
KB	Height of Center of Buoyancy
KG	Heigh of CoG above keel
KM	Metacentric Height
L	Lenght
L/2	Mid-lenght of Lpp
LCB	Longitudinal Center of Buoyancy
LCF	Longitudinal Center of Flotation
LCOE	Levelized Cost of Energy

Lpp	Lenght between perependiculars
MBES	Multi beam echo sounder
MBP	Maximum Bollard Pull
MCT	Moment to Change Trim 1 cm
MSL	Mean Sea Level
NREL	National Renewable Energy Laboratory
O&M	Operations & Maintenance
OPEX	Operational Expendidures
OWF	Offshore Wind Farm
RM	Righting Moment
ROV	Remotely Operated Vehicle
TLP	Tension Leg Platform
TPC	Tonnes per centimeter immersion
W	Width
WL	Waterline
WPA	Water Plane Area
IMR	Inspecció, Manteniment i Reparació
SEA	Sea Embedded Anchor
SEPLA	Suction Embedded Plate Anchor
OSS	Offshore Sub Station
NWL	Normal Working Load
MBL	Mínimum Breaking Load
SMC	Sub Sea Mooring Connector
SS.CC	Societats de Classificació
LR	Lloyd’s Register

RESUM:

Anàlisi i disseny de les operacions marines d'instal·lació d'una plataforma eòlica flotant tipus SPAR

Autor: Pere Oliver Verdaguer

Tutor: Pau Trubat

Tutor Extern: Climent Molins i Borrell (Facultat de Camins)

Paraules clau: Wind, Floating, FOWT, ConCrete, Offshore...

Per poder accedir a un ple potencial de l'energia eòlica cal anar a zones marítimes on no es efectiva la instal·lació de turbines eòliques amb els mètodes convencionals. Fins aquesta última dècada les turbines eòliques s'instal·laven mitjançant una estructura de cimentació fitxada al fons marí, per utilitzar aquest mètode es necessita grans àrees de aigües poc profundes prop de grans centres poblacionals, desgraciadament a la major part del món no és així.

Degut al ràpid augment de les profunditats on es troben les grans zones de més densitat i estabilitat del vent aquest mètode ja no resulta eficient, ja que el cost de instal·lació no es viable. Davant aquesta problemàtica es va introduir com a possible solució el concepte de turbines flotants, per tenir accés al potencial eòlic d'una manera més eficient. Aquestes turbines flotants estan compostes d'una turbina a la part superior de la torre, la qual està connectada a una plataforma de flotació ancorada al fons marí mitjançant línies d'amarres.

Aquesta tesi es basa en l'estudi operacional del disseny WindCrete, aquest prototip planteja una torre i plataforma integral d'una sola peça de formigó pretesat. D'aquesta manera s'evita la junta, la qual simbolitza una zona on es potencien futures adversitats. D'aquesta manera, s'aconsegueix un model que consta amb un cost efectiu de producció menor i el seu manteniment és menys intensiu, ja que, l'estructura no es veuria afectada per la corrosió, podent prescindir d'ànodes de sacrifici.

Per tal de disminuir el cost operacional (OPEX) de la instal·lació del prototip WindCrete, en aquesta tesi es plantegen alternatives de transport i instal·lació de la plataforma, on s'estudiarà la viabilitat de transport i instal·lació sense l'ús de grans vaixells grua per una turbina de 2 MW.

Abstract

Author: Pere Oliver Verdaguer

Tutor: Pau Trubat

External Tutor: Climent Molins i Borrell (Faculty of Roads)

Keywords: Wind, Floating, FOWT, ConCrete, Offshore ...

In order to achive the full potential of wind energy, it is necessary to go to maritime areas where the installation of wind turbines is not carried out with conventional methods. Until the last decade, wind turbines were installed using a foundation structure plugged into the seabed, using this method requires large areas of shallow water near large population centers, unfortunately most of the world is not.

Due to the rapid increase in depths where the largest areas of higher density and wind stability are located this method is no longer efficient, as the cost of installation is not viable. Faced with this problem, the concept of floating turbines was introduced as a possible solution, in order to have access to wind potential in a more cost-effective way. These floating turbines consist of a turbine at the top of the tower, which is connected to a floating platform anchored to the seabed by mooring lines.

This thesis is based on the operational study of the WindCrete design, this prototype proposes a tower and integral platform of a single piece of prestressed concrete. This avoids the board, which symbolizes an area where future truths are promoted. In this way, a model is achieved that has a lower effective cost of production and its maintenance is less intensive, since the structure would not be affected by corrosion, and can do without slaughter anodes.

In order to reduce the operational cost (OPEX) of the installation of the WindCrete prototype, this thesis proposes alternatives for transport and installation of the platform, where the feasibility of transport and installation without the use of large crane ships for a 2 MW turbine.

Taula de continguts

Agraïments 1

Acrònims i abreviacions 3

RESUM: 5

Abstract 6

Taula de continguts 7

Llistat de Figures 10

Llistat de Taules 13

CAPÍTOL 1. CONTINGUTS DEL PROJECTE 16

CAPÍTOL 2. ESTAT DE L'ART DE LES OPERACIONS MARINES 18

2.1. Introducció 18
2.1.1. Resum procés instal·lació 18

2.2. TIPUS DE PLATAFORMES FLOTANTS 20
2.2.1. General 20
2.2.2. SPAR 22
2.2.3. SEMI-SUB 23
2.2.4. TLP 23

2.3. PROCEDIMENTS INSTAL·LACIÓ CABLEJAT 25

2.4. SUBSISTEMA DE FONDEIG. 28
2.4.1. Tipus de connectors del sistema d'ancoratge 29
2.4.2. TIPUS D'ÀNCORES 31
2.4.3. TIPUS DE LÍNIES D'ANCORATGE 34
2.4.4. Procediments instal·lació sistema de fondeig 37

2.5. Vaixells comuns per dur a terme l'operativa 38

CAPÍTOL 3. NORMATIVA APLICABLE 40

CAPÍTOL 4. ESTUDI DE L'EMPLAÇAMENT I LES SEVES CONDICIONS AMBIENTALS 42

4.1. INTRODUCCIÓ 42

4.2. Característiques de la ruta de remolc programada 43

4.3. Determinació de les especificacions de l'emplaçament per les condicions de disseny 44

4.3.1. Condicions del vent 45

4.3.2. BATIMETRIA 52

4.3.3. Onatge significatiu i de disseny 53

CAPÍTOL 5. DEFINICIÓ MODEL D'ESTUDI: WINDCRETE 2MW 60

5.1. Característiques principals 60

CAPÍTOL 6. INTRODUCCIÓ A LA HIDRODINÀMICA 70

6.1. Equilibri 70

6.2. Altura metacèntrica 71

6.3. Matriu hidroestàtica de rigidesa 73

6.4. Estabilitat dinámica (a grans angles) 73

CAPÍTOL 7. OPERACIONS MARINES 74

7.1. Introducció 74

7.2. Condicions meteorològiques durant l'operativa 76

7.3. Operació de transport 79

7.3.1. Transport en horitzontal 81

7.3.2. Transport en vertical 94

7.4. Fase operacional d'instal·lació 97

CAPÍTOL 8. DISSENY SISTEMA DE BOMBEIG DEL SISTEMA D'AIGUA DE LLAST 103

CAPÍTOL 9. CONCLUSIONS I LÍNIES FUTURES 109

BIBLIOGRAFIA 111

ANNEX A1. INFORMACIÓ ADDICIONAL 113

A1.1. Maxsurf - Hidrostàtiques i anàlisis d'estabilitat 113

Llistat de Figures

Il·lustració 1. Espiral de projecte 17

Il·lustració 2. Programari utilitzat 17

Il·lustració 3. Etapes de projecte d'una OWF 18

Il·lustració 4. Fases de la vida útil d'una plataforma eòlica flotant 19

Il·lustració 5. Esquema d'una FOWT tipus SPAR, SEMI-SUB I TLP 20

Il·lustració 6. Mecanismes de restauració d'una FWT. 21

Il·lustració 7. Key steps SPAR 22

Il·lustració 8. WindFloat Atlantic project 23

Il·lustració 9. Key steps TLP 24

Il·lustració 10. Geophysical survey (MBES) 25

Il·lustració 11. MacArtney connector 26

Il·lustració 12. Cable path layout 27

Il·lustració 13. OS's and RP's Mooring Systems 28

Il·lustració 14. MoorLOK Connector 29

Il·lustració 15. Detail BTC Connector // 30

Il·lustració 16. Left: In-line connector Balltec RigLock // Right side: In-line tensioner. Vryhof 30

Il·lustració 17. Drag anchor 31

Il·lustració 18. Àncora per gravetat 32

Il·lustració 19. Diagrama àncora de succió. Abans i després 32

Il·lustració 20. Instal·lació àncora placa plana 33

Il·lustració 21. Catenary and taut mooring 34

Il·lustració 22. Stud-Link and Studless Chain 34

Il·lustració 23. Wire ropes types in offshore mooring 35

Il·lustració 24. Materials of mooring lines Left: Chain Middle: Wire rope Right: Fibre Rope 36

Il·lustració 25. Vaixells comuns per les operacions de FWTs 39

Il·lustració 26. Posició GPS de l'emplaçament 43

Il·lustració 27. DLC's Transport, installation, maintenance and repair 45

Il·lustració 28 Mean Power Density 47
Il·lustració 29. Mean Wind Speed 47
Il·lustració 30. Perfils de vent 50
Il·lustració 31. Rosa del vent 51
Il·lustració 32. Freqüència de la velocitat mitja i direcció del vent a GC 52
Il·lustració 33. Batimetria de GC 53
Il·lustració 34. Distribució de període de pic i altura significativa 55
Il·lustració 35. 2MW WindCrete Schematic w/ windturbine. Units [m] 60
Il·lustració 36. Esquema aerogenerador offshore 63
Il·lustració 37. Modelat 3D WindCrete 2MW 65
Il·lustració 38. Eixos de referencia 66
Il·lustració 39. Palfinger Stiff Boom Crane Hydraulic PSM 69
Il·lustració 40. Detall plataforma d'accés 69
Il·lustració 41. Modelatge 3d WindCrete 2MW 79
Il·lustració 42. Esquema del procediment d'estudi de l'estabilitat estàtica 80
Il·lustració 43. Estat de mar durant el transport 84
Il·lustració 44 Resistance vs Speed LC1.1 85
Il·lustració 45. Estela per formació d'ones LC1.1 86
Il·lustració 46. GA 52TBP Tug boat 89
Il·lustració 47. Tug boat selected main characteristics 90
Il·lustració 48. Hydrostatic situation LC2 95
Il·lustració 49. Cross curves KN 98
Il·lustració 50. GZ Values 100
Il·lustració 51. Posicionament de la plataforma durant l'operació de llastrat 101
Il·lustració 52. Layout sistema de llast 103
Il·lustració 53. DSL Pump 104
Il·lustració 54. Relació espessor i diàmetre exterior canonada 105
Il·lustració 55. Sistema de llast 106
Il·lustració 56. Recorregut del desllastament 107

Llistat de Taules

Taula 1. Vaixells comuns en les operacions de FWTs 38
Taula 2. Standards and guidlines for OWTs installation (DNVGL & ISO) 40
Taula 3. Paràmetres utilitzats per l'obtenció del perfil de velocitats 48
Taula 4. Obtenció Constant de Charnock 49
Taula 5. Resultats perfils de vent 50
Taula 6. Significant waves height 53
Taula 7. Scatter Diagram GC (D1.2 Design Basis) 54
Taula 8. Probabilitat d'ocurrència Hs i Tp (Font: Pròpia) 54
Taula 9. Perfil de vent, marea i corrents 57
Taula 10. Resultats rellevants de l'emplaçament 59
Taula 11. Característiques principals VESTAS V80 2MW 61
Taula 12. Dimensions de la torre WindCrete 2MW 63
Taula 13. Estimació de potencia per el generador d'emergència 64
Taula 14. Propietats hidrodinàmiques bàsiques 65
Taula 15. Materials WindCrete 2MW 66
Taula 16. Centres de gravetat en posició vertical 67
Taula 17. Inèrcies de la plataforma 68
Taula 18. Estabilitat estàtica 71
Taula 19. Procediment d'estudi operació de remolc 74
Taula 20. Paràmetres ambientals per la instal·lació 78
Taula 21. WindCrete 2 MW area curve 79
Taula 22. Load Cases 80
Taula 23. Hydrostatics LC1 81
Taula 24. Render LC1 81
Taula 25. Hydrostatics LC1.1 82
Taula 26. LC1.1 render 83
Taula 27. LC1.1 Resistance vs speed 85
Taula 28. Wind Load 1.1 87

Taula 29.Total calm water resistance formula 91
Taula 30. Compton Resistance Bounds..... 96
Taula 31. Forces de remolc LC2 97
Taula 32. KN Values LC2..... 99

Llistat d'equacions

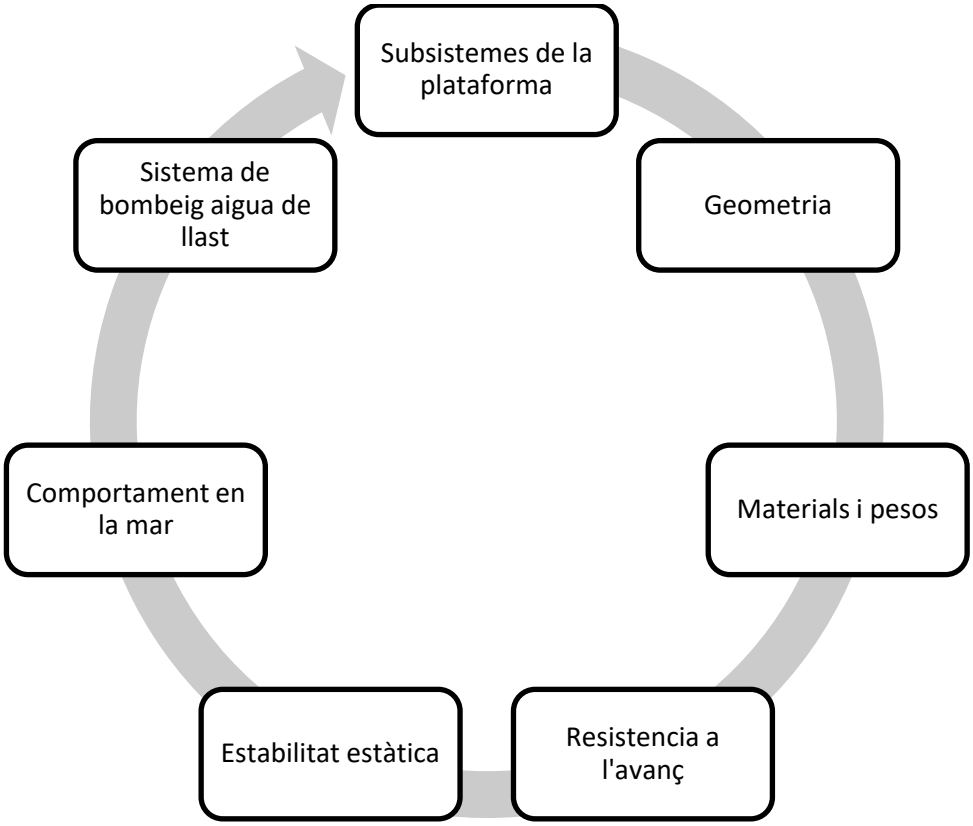
Equació 1. Temperature profiles at diferent heights 45
Equació 2. Pressure profiles at diferent heights 46
Equació 3. Air density equation 46
Equació 4 48
Equació 5. Roughness parameter equation 48
Equació 6. Equació onatge de disseny 55
Equació 7. Rang períodes 55
Equació 8. Període de disseny 56
Equació 9 70
Equació 10 70
Equació 11 71
Equació 12 72
Equació 13 72
Equació 14 72
Equació 15. Equació de Morison adaptada 87
Equació 16. Current Load 1.1 87
Equació 17. TPR 88
Equació 18. GZ vàlues 99
Equació 19. Equació de conservació de l'energia 108

Capítol 1. Continguts del projecte

Aquesta primer capítol té la intencionalitat de presentar l'estat de l'art del procés d'instal·lació de turbines eòliques flotants. Seguidament, es resumeixen els punts clau del procés d'instal·lació independentment del tipus de plataforma. Tot seguit, en el Cap. 2 es troba una classificació dels tipus de FOWTs, vaixells i equipament utilitzats en la operativa. El Cap. 3 presenta un recull de la normativa i estàndards aplicables a les operacions marines a tenir en compte. Després es procedeix a definir el model d'estudi del treball (Cap.5), on més endavant es du a terme l'anàlisi hidrodinàmic del procés operatiu del transport i la instal·lació (Cap.6 i Cap. 7). Per dur a terme l'estudi es important tenir clares les condicions externes a les que estarà sotmesa la OWT, la definició dels mateixos es troba en el Cap. 4. En el Cap. 8 es planteja una proposta de disseny per un sistema de bombeig de aigua de llast per poder dur a terme la posada en vertical de la plataforma. Per acabar s'hi troben les conclusions del projecte.

Estructura de descomposició del projecte

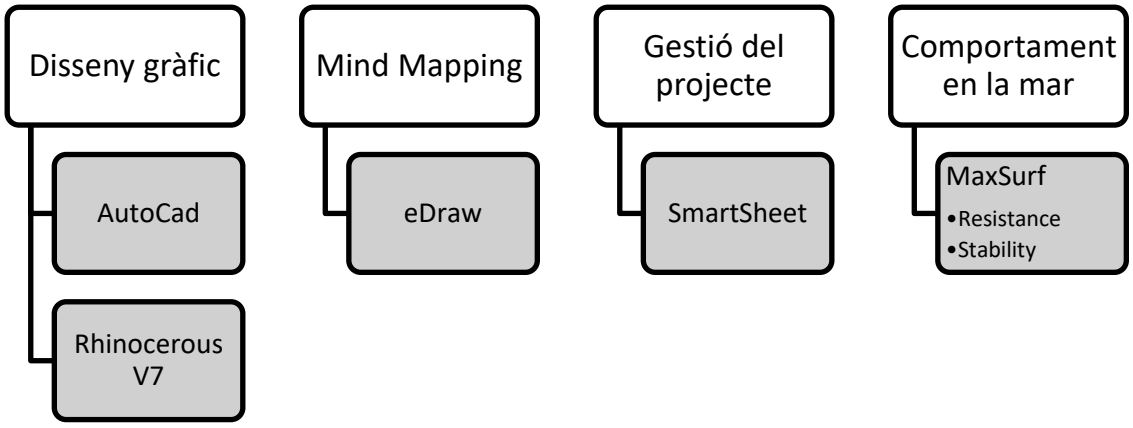
A continuació es presenta l'espiral de projecte de les diferents fases d'estudi de la plataforma WindCrete per una turbina de 2MW.



Il·lustració 1. Espiral de projecte

Font: Pròpia

<u>Eines informàtiques utilitzades</u>



Il·lustració 2. Programari utilitzat

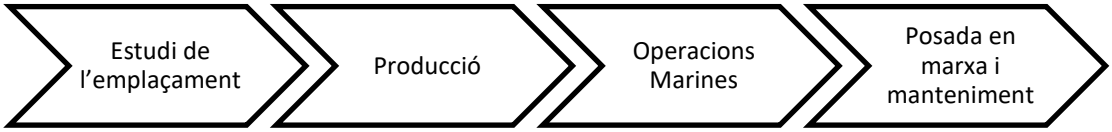
Font: Pròpi

Capítol 2. Estat de l'art de les operacions marines

2.1. Introducció

La tecnologia actual de les turbines eòliques flotants segueix tenint un índex *Levelised cost of energy* (LCOE) considerablement elevat en comparació als resultats que es coneixen sobre l'energia eòlica *onshore* i altres fonts d'energia renovables. Per augmentar la capacitat de competència de la eòlica *offshore* s'han d'identificar i analitzar els costos més importants durant el cicle de vida d'una *Offshore wind farm* (OWF).

En el cicle de vida útil d'un projecte d'una OWF es poden considerar quatre etapes diferenciades. Així s'il·lustra a la Il·lustració 3. La primera etapa abarca la selecció del lloc d'emplaçament, considerant alguns paràmetres com la velocitat del vent, la profunditat i les condicions del fons marí. La segona etapa fa referencia al procés de producció. La tercera etapa estudia les operacions marines, activitats com el transport de la drassana al lloc d'emplaçament i l'adreçament de la plataforma. En aquesta tesis es desenvoluparan aquestes dues operacions amb més detall. La quarta etapa de projecte es basa en la monitorització de les dades i amb la realització de rutines d'inspecció i manteniment (Ghigo et al., 2020).



Il·lustració 3. Etapes de projecte d'una OWF

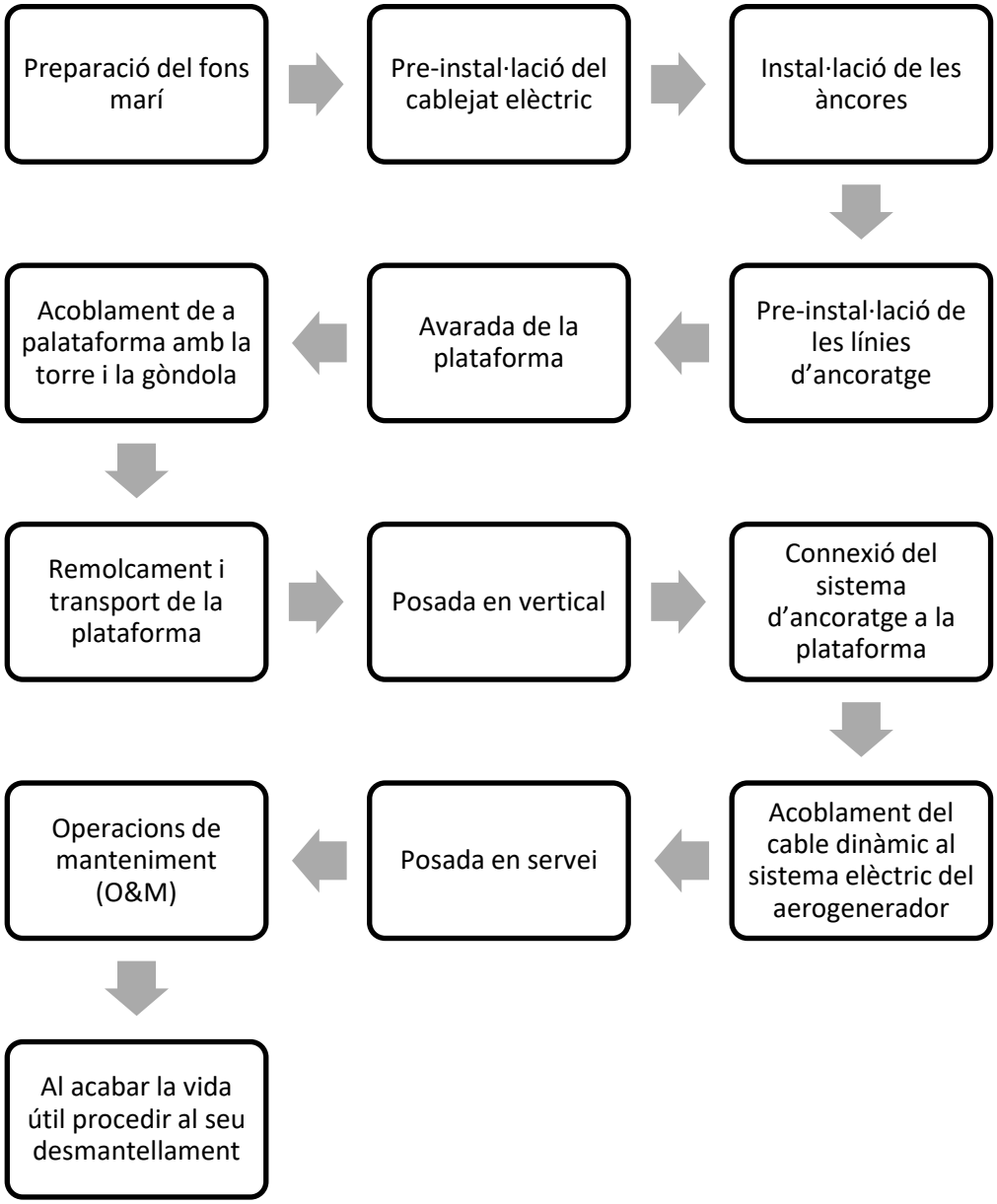
Font: Elaboració pròpia

2.1.1. Resum procés instal·lació

En conseqüència de les complexitats involucrades, la instal·lació de plataformes *offshore* no son considerades com operacions estàndards. Depenent de factors com les dimensions del rotor, el tipus de base, la tecnologia usada i les condicions externes del lloc, de manera que cada OWF té uns requeriments únics per a la instal·lació. Els costos operacionals d'aquesta poden arribar a ser molt elevats i influenciar en una gran mesura el cost total del projecte.

Per aquets motiu, les operacions marines necessiten estar ben optimitzades per tal que les fer les *Floating Offshore Wind Turbines* (FOWT) siguin més factibles (Gómez et al., 2015).

Seguidament, es troben els procediments indispensables de les operacions marines d'un projecte eòlic flotant:

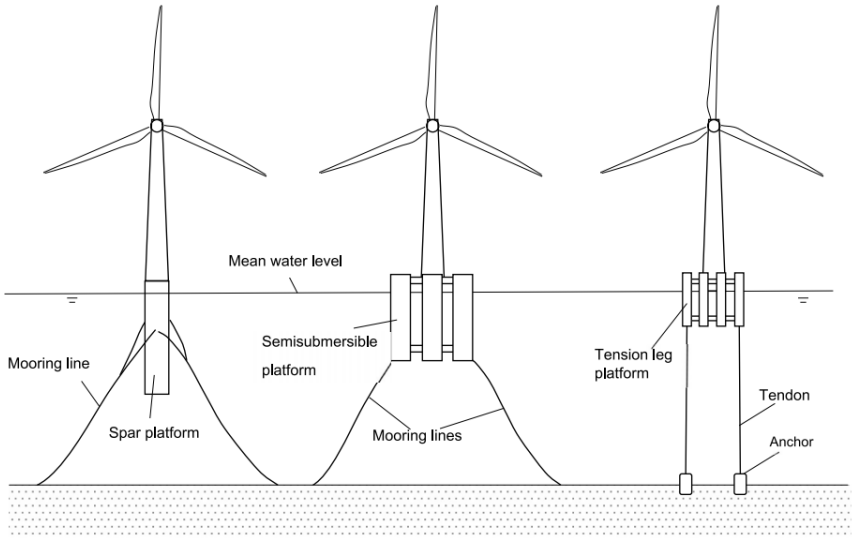


Il·lustració 4. Fases de la vida útil d'una plataforma eòlica flotant
Font: Elaboració pròpia

2.2. TIPUS DE PLATAFORMES FLOTANTS

2.2.1. General

Les turbines eòliques flotants poden es poden classificar a partir de diferents criteris. Es poden distingir turbines depenent de si el seu eix de rotació és vertical o horitzontal. Un altre criteri molt emprat és també el tipus d'estructura d'aquestes plataformes. Es troben estructures de tipus Spar Buoy (SPAR), Semi-Submergibles (Semi-Sub) i Tension Leg (TLP). A continuació és troba il·lustrada la classificació:

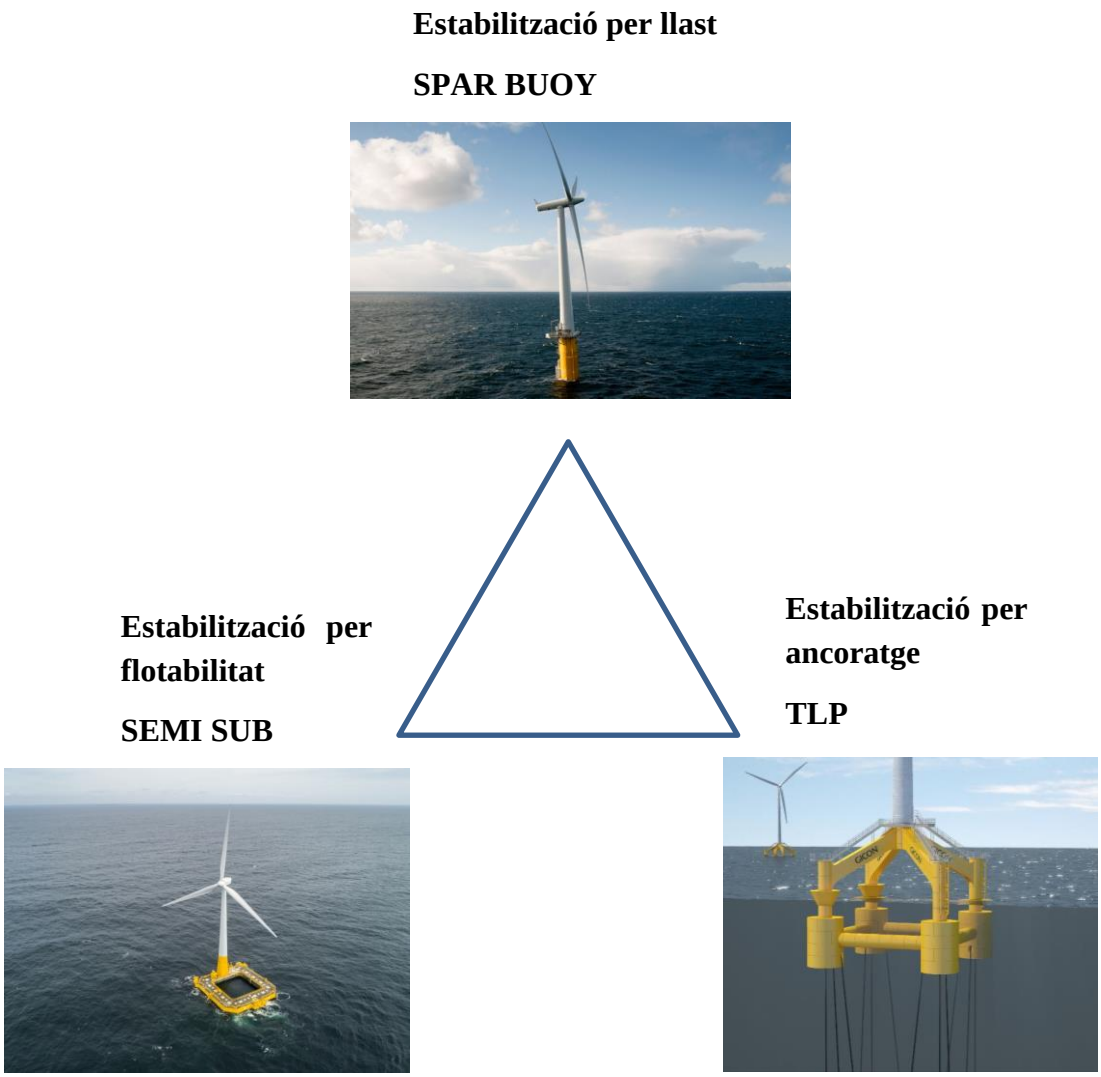


Il·lustració 5. Esquema d'una FOWT tipus SPAR, SEMI-SUB I TLP

Font: Ghigo et al., 2020

Una altra manera de distingir les plataformes eòliques offshore anteriorment presentades és la seva classificació basada en el mecanisme de forces restauratives, es a dir, en la tècnica que empren per retornar a la posició inicial d'estabilitat. Per aconseguir aquest equilibri hidrostàtic les FWTs poden usar la estabilització per llast, tant com per flotabilitat o per l'ancoratge.

A continuació es presenta de manera gràfica els tres sistemes d'estabilització acompanyats d'un exemple d'una FWT existent.



Il·lustració 6. Mecanismes de restauració d'una FWT.

Font: HyWind, FloatGen platform i Gicon, 2021

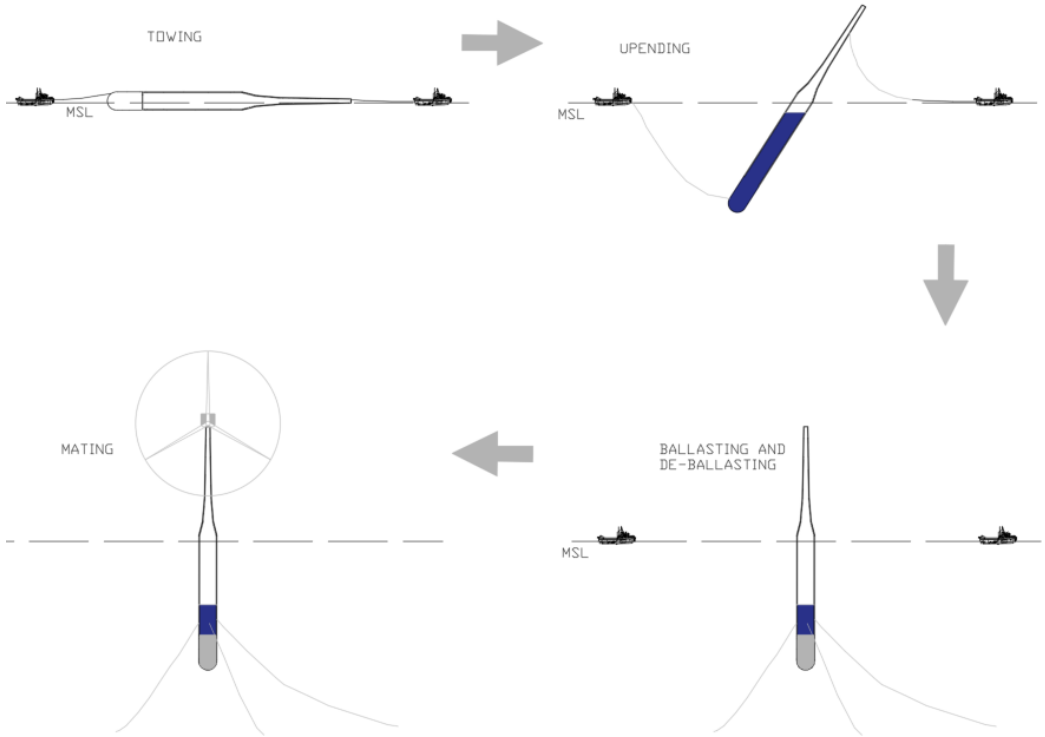
2.2.2. SPAR

Una plataforma flotant tipus SPAR està formada per un cilindre amb bona estabilitat hidrostàtica i amb àrees de flotació petites. La primera instal·lació d'una plataforma tipus va tenir lloc al mar del nord al 2009 amb el projecte Hywind Demo. El procediment per instal·lar aquests tipus de plataformes va ser el següent:

1. Transport mitjançant via humida
2. Posada en vertical de la plataforma
3. Connexió del sistema d'ancoratge
4. Incorporació de llast sòlid
5. Assemblatge de la torre
6. Assemblatge del rotor
7. Ajustaments finals del llast

Aquest procediment ha estat proposat per l'equip WinCrete de la UPC.

El transport de la plataforma en via humida es posta a terme mitjançant remolcadors i la posada en vertical s'aconsegueix mitjançant el bombeig d'aigua dins de la plataforma spar. Un cop es troba en vertical, un vaixell especialitzat carrega la part baixa de la plataforma de llast sòlid, i a la mateixa vegada es bombeja l'aigua de llast usada per l'adrissament cap a l'exterior, d'aquesta manera es manté el calat desitjat. Els passos d'instal·lació es troben il·lustrats a la Il·lustració 7.



Il·lustració 7. Key steps SPAR

Font: Elaboració pròpia

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Facultat de Nàutica de Barcelona

2.2.3. SEMI-SUB

Una plataforma Semi-sub està composta per tres o quatre columnes situades a la mateixa distància entre elles i connectades mútuament. En comparació a les plataformes tipus SPAR, aquestes posseeixen una WPA *(Water Plane Area*) major el que els hi proporciona una major estabilitat hidrodinàmica i una rigidesa estructural més elevada per resistir les carregues de l'onatge.

Un punt a destacar és la seva capacitat superior d'habilitat per ser remolcada i instal·lada respecta als altres tipus. Un punt a favor d'aquest tipus de plataformes és que l'assemblatge complet de la plataforma amb la torre i la turbina pot tenir lloc a dic sec, únicament caldria remolcar l'estructura a l'emplaçament i connectar-la a les línies d'ancoratge pre-instal·lades.

Un clar exemple es el projecte WindFloat (turbina TLP instal·lada a la costa portuguesa al 2011) on únicament es varen necessitar 3 vaixells remolcadors per el transport, i per l'operació d'ancoratge un *Anchor Handling Vessel* (AHV).

Il·lustració 8. WindFloat Atlantic project

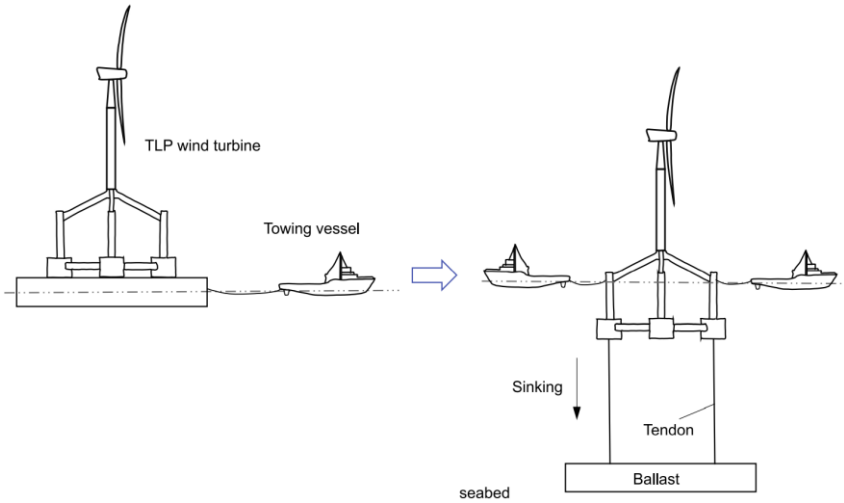
Font: EDP Renováveis

2.2.4. TLP

Les plataformes TLP consisteixen en una estructura amb gran flotabilitat que es troba semi-submergida mitjançant línies d'ancoratge tensades, aquestes línies estan ancorades al fons formant línies amb funció de tendó. D'aquesta manera s'aconsegueixen millors resultats i una millor resposta dels moviments. Es troben dissenys de nombrosos prototips, ja que, entre ells varia el desplaçament de la plataforma, l'estabilitat, el numero de tendons, la forma i el número de columnes.

Comparat amb les plataformes SPAR i SemiSub les plataformes TLP es troben menys comercialitzades. Això s'explica per les complexitats del sistema d'ancoratge on es necessiten unes àncores de succió especials que més endavant s'explicaran (Jiang, Zhiyu, 2021) .

Les TLP també es poden ensamblar completament a les instal·lacions costeres usant una grua. Amb l'assistència de remolcadors se la pot remolcar fins a la ubicació desitjada. Un cop a la localització, la plataforma es llastra des d'un punt on el calat de flotació inicial és suficient per aconseguir el calat de fixació dels tendons. Un cop els tendons es troben fixats, es desllasta la plataforma per tal de tensar els tendons a la càrrega de disseny.



Il·lustració 9. Key steps TLP

Font: Sclavounos et al.

Comparació dels passos clau i la profunditat d'instal·lació

Tipus	**Spar**	**Semi-sub**	**TLP**
Passos clau	Adriçament, desllast i connexió de les línies d'ancoratge	Connexió de les línies d'ancoratge	Connexió dels tendons pretensats
Dificultat tècnica	Mitja	Baixa	Alta
Profunditat d'instal·lació	>100m	>50m	>80m

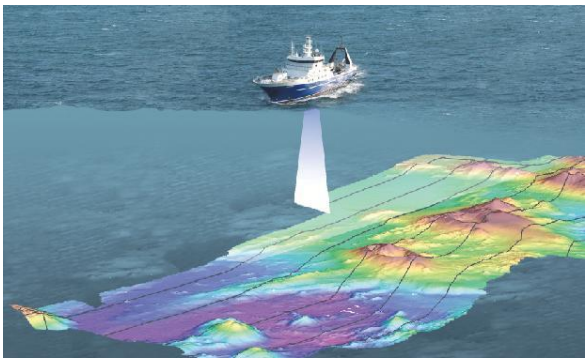
Font: Elaboració propia

2.3. PROCEDIMENTS INSTAL·LACIÓ CABLEJAT

Sovint, el cablejat de connexió de la plataforma *offshore* a terra és prèviament instal·lat, i si el sol marí del terreny ho permet, sol estar enterrada. El principal motiu del seu enterrament és la possibilitat de reduir càrregues de fatiga al restringir el seu moviment i protegir el cablejat de factors externs.

La part més pròxima a la turbina roman desenterrada. De forma comú s'anomena cablejat dinàmic ja que aquest està estès per sobre del fons marí mitjançant boies per evitar el fregament del cablejat amb el fons, d'aquesta manera es pot deixar a la pèndula per poder aguantar els grans desplaçaments, majoritàriament horitzontals, de la part baixa de la plataforma, on va connectat.

Abans de procedir a l'operació, cal fer una inspecció geofísica. Aquesta es porta a terme mitjançant assajos no penetrants, com podrien ser: usant un sonar *sidescan*, mitjançant batimetria *multibeam* o amb magnetometria marina. D'aquesta manera es poden identificar diferents capes del fons marí, permetent cartografiar el que hi ha sota i sobre del fons marí. Aquesta tecnologia resulta molt útil a l'hora de buscar rutes potencials d'instal·lació.



Il·lustració 10. Geophysical survey (MBES)

Font: GNS (2017)

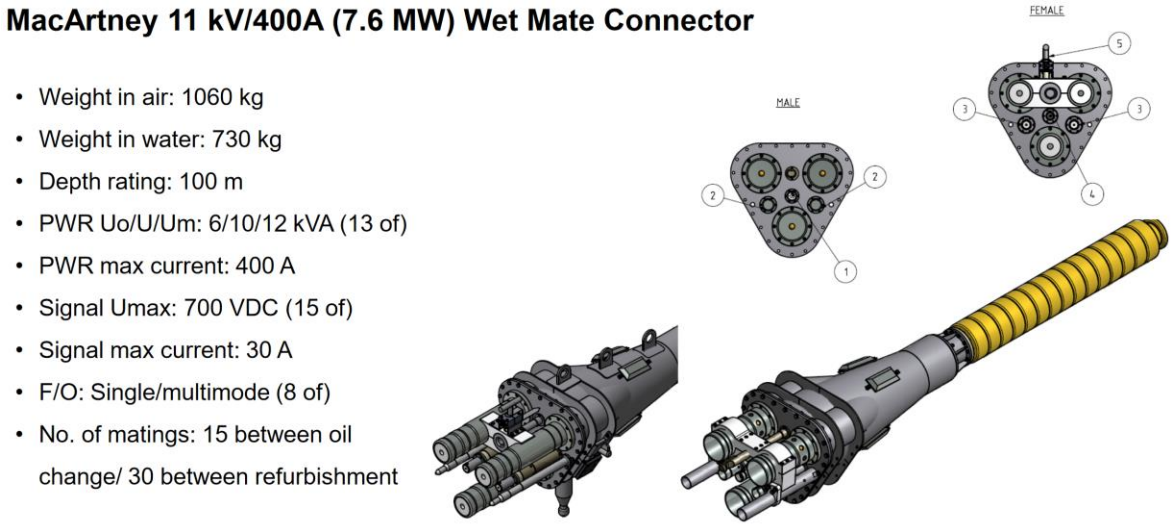
També es realitza una inspecció geotècnica on realitzen mostrejos del fons marí. Sovint, es perfora el fons per extreure exemplars a 6 m de profunditat, posteriorment aquests són analitzats al laboratori per determinar les seves propietats. A més, es realitzen penetracions còniques per determinar la resistència del fons, especialment per determinar el sistema d'ancoratge a utilitzar i desenvolupar la ruta del segment estàtic del cablejat.

Una vegada s'ha estudiat el fons i la ruta a seguir, i contemplats els requeriments reguladors, es procedeix a la fabricació del cablejat i al seu transport per una futura instal·lació.

Pel que fa als terminals de connexió del cablejat, existeixen empreses que ofereixen solucions per tots els tipus de estructures *offshore*, proporcionant terminacions entre línies

per aguantar les tensions, cablejat amb protecció mecànica, cablejat amb mòduls de flotació, reforços per el doblegament, connectors, tubs J amb boquilla de campana i caixes de connexions.

A continuació, es presenta un dispositiu que s'instal·la al fons de la plataforma. Aquest ha estat dissenyat per l'empresa *MacArtney Underwater Solutions*. Es tracta d'un sistema capaç d'absorbir els moviments relatius entre la plataforma i el cablejat, minimitzant els increments de tensió en el cable de transmissió submarina i les càrregues que actuen sobre la plataforma flotant. Aquest dispositiu, compta amb tots els certificats d'aprovació de la DNV-GL.

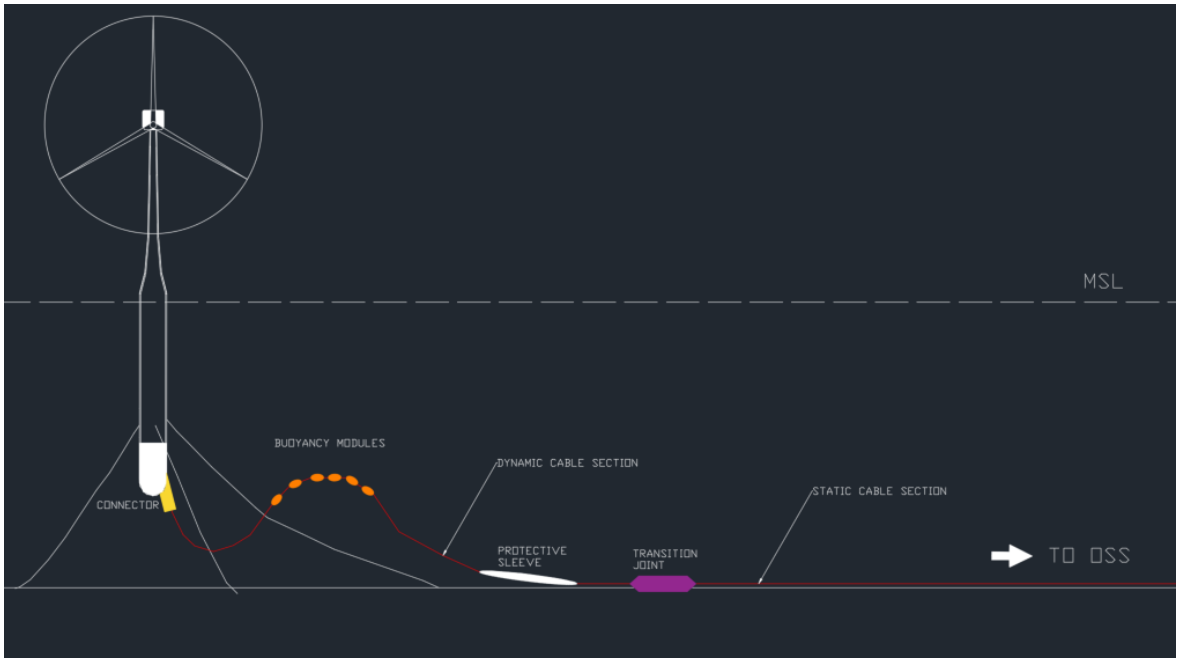


Il·lustració 11. MacArtney connector

Font: MacArtney Renewable Energy Catalog

Sistema d'estesa del cablejat

El moviment de la plataforma fa indispensable disposar d'un sistema que esmorteeixi els increments de tensió en el cablejat de transmissió. De manera que per solucionar-ho existeixen distintes configuracions, totes elles usen boies submarines per esmorteir els moviments i aquestes han de aportar una força vertical d'empenta equivalent al pes del cable. Simplificant, es pot concloure que, el funcionament d'aquestes es basa en: com més s'eleva la secció on es troben les boies, més amortiment disposarà el sistema. No obstant, el radi de curvatura de la secció on el cable entra en contacte amb el fons té uns valors mínims imposats pel fabricant.



Il·lustració 12. Cable path layout

Font: Pròpia

Al fons de la plataforma hi trobem el connector del cap del cablejat. Després s'ubica el començament del tram de cablejat dinàmic, el qual esmorteeix els moviments horitzontals mitjançant unes boies de flotabilitat. En el tram on el cablejat entra en contacte amb el fons, està recobert d'unes mànigues que li aporten protecció mecànica, un cop superat aquest punt es troba el connector entre el tram dinàmic i estàtic i després el cablejat estàtic es dirigeix a la subestació Offshore (OSS), la qual es troba equipada amb un transformador i els equips necessaris per exportar l'energia a alta tensió (HV).

2.4. SUBSISTEMA DE FONDEIG.

En el cas d'una plataforma eòlica flotant tipus SPAR els elements que integren el subsistema de fondeig són els següents:

- Connectors
- Línies d'ancoratge en catenària
- Àncores

El procediment comú d'instal·lació de les línies d'ancoratge és preinstal·lar-les a l'emplaçament, deixant-les amarrades a una bolla i un pic remolcada la plataforma a la ubicació d'instal·lació es procedeix a connectar-la. Aquest procediment sol durar unes 9 – 12 hores (Gómez et al., 2015).

Per actuar d'acord a les normes de la societat de classificació DNV s'han de tenir en compte una sèrie d'estàndards *offshore* (OS), els quals contenen els requeriments tècnics, principis i criteris d'acceptació. A continuació es troben llistats els més destacats:

DNV-OS-E301	Position Mooring, 2018
DNV-OS-E302	Offshore Mooring Chain, 2015
DNV-OS-E303	Offshore Mooring Fibre Ropes, 2015
DNV-OS-E304	Offshore Mooring Steel Wire Ropes, 2015
DNV-RP-C205	Environmental conditions and environmental loads, 2015

Il·lustració 13. OS's and RP's Mooring Systems

Font: DNV-GL

En el següent subapartat s'expliquen en més profunditat els elements que integren el sistema de fondeig.

2.4.1. Tipus de connectors del sistema d'ancoratge

Degut a les nombroses solucions que es troben en el mercat s'han classificat en connector entre línia-àncora, connector de línia-plataforma i connectors *in-line.* Tots els exemples de solucions d'ancoratge presentats a continuació són els de l'empresa pionera *Balltec Mooring Solutions*, que ofereix productes personalitzats per cada projecte.

SMC (SUBSEA MOORING CONNECTOR)

Aquets tipus de connectors són els encarregats de unir l'àncora amb la línia, normalment porten un sistema d'auto-alineament i la connexió del mascle i la femella es sol du a terme mitjançant un senzill passant, d'aquesta manera es pot usar un ROV per la instal·lació submarina si es precisa.

Un exemple de connector pioner és el *MoorLOK* de l'empresa *Balltec* que ofereix solucions d'ancoratge per tot tipus de plataformes *offshore*. Aquest sistema consta de més de 300 punts de connexió, i degut a la senzillesa d'operació és una bona solució per les FOWTs, ja que ajuda a reduir significativament el temps d'instal·lació associat a la connexió d'amarratge. Una altre avantatge és la possibilitat de desconnectar el connector en qualsevol moment en cas de manteniment o substitució de les línies. En quant a les característiques tècniques el dispositiu posseeix un MBL de fins a 30000 KN, amb una vida de servei de 52 anys i sense limitació de profunditat d'operació. A més a més compta amb els certificats de conformitat de les SS.CC següents: ABS, DNV GL, BV i LR.

Il·lustració 14. MoorLOK Connector

Font: Balltec Mooring Solutions

BTC (Pull-Through connector)

Permet la unió de la plataforma amb les línies d'ancoratge. Actualment en el mercat es poden trobar tant connectors rígids com flexibles. A continuació, es troba el detall d'un sistema de connexió flexible de l'empresa Balltec anteriormente presentada.

Il·lustració 15. Detail BTC Connector //

Font: Balltec Mooring Solutions

ILMC (In line Mooring connector)

Els connectors en línia estan dissenyats per oferir solucions al tensionament i desconnexió de les línies d'ancoratge, el connector que s'observa a continuació permet alliberar les línies encara que aquestes es trobin sotmeses a càrrega.

Il·lustració 16. Left: In-line connector Balltec RigLock // Right side: In-line tensioner. Vryhof

Font: Balltec Mooring Solutions i Vryhof

2.4.2. TIPUS D'ÀNCORES

Existeixen diferents sistemes d'ancoratge utilitzats per plataformes eòliques. A continuació, es troben les més utilitzades:

- Àncores d'arrossegament
- Àncores per gravetat
- Àncores de succió
- Àncores SEPLA (*Suction Embedded Plate Anchor*)

Ancoratge d'incrustació mitjançant arrossegament

Normalment, s'usen sistemes d'amarratge en catenària, això es degut a que no suporten forces d'aixecament verticals. Per la seva instal·lació s'alquilen vaixells anomenats AHV *(anchor handling vessel).* Aquests vaixells presenten una espaiosa àrea a la coberta per poder dipositar les àncores i les seves línies per el posterior transport, una vegada a l'emplaçament es comprova la geolocalització exacte per poder anar lliurant l'àncora connectada a la cadena (o corda sintètica) mitjançant el cabrestant del vaixell situat a la popa. A vegades, per assegurar la direcció correcta de l'àncora s'usa una línia auxiliar que pot ser alliberada posteriorment mitjançant un ROV *(remote operating vehicle).* Un cop enterrada en la direcció correcte, la part final de la línia es connectada a una boia per facilitar la recollida de la mateixa a l'hora de connectar-se a la subestructura de la plataforma (Gómez et al., 2015).

Il·lustració 17. Drag anchor

Font: VRYHOF

Àncores per gravetat

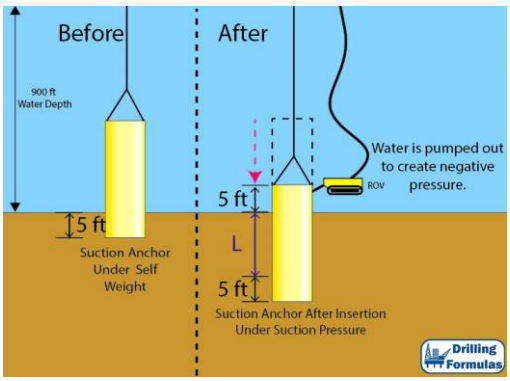
Les àncores per gravetat estan conformades per un mort de formigó i tampoc són un bon model per suportar forces d'aixecament verticals.

Il·lustració 18. Àncora per gravetat

Font: DB GROUP

Àncores de succió

Es tracten de les més utilitzades per plataformes tipus TLP ja que ofereixen un excel·lent ancoratge per sistemes de tensions verticals. Es tracta d'un cilindre buit que penetra al fons marí pel seu propi pes i un pic "clavat" al terra es posen en funcionament un conjunt de bombes de succió per crear una depressió i acabar d'endinsar el piló a la profunditat desitjada.



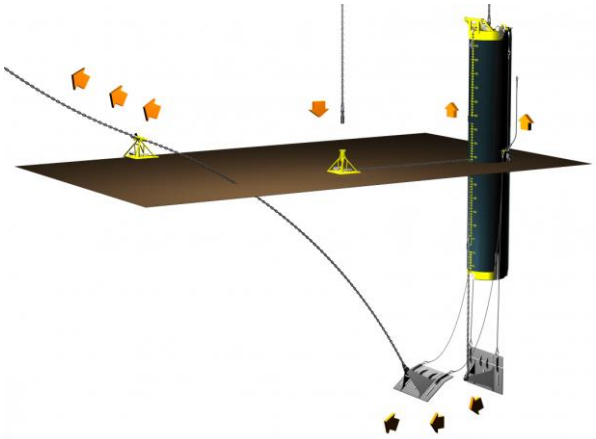
Il·lustració 19. Diagrama àncora de succió. Abans i després

Font: Drilling Formulas

Àncores d'incrustació de placa plana

En cas de necessitar més capacitat de amarratge, les àncores de placa plana poden ser una bona solució. És un sistema innovador, on la instal·lació es duu a terme mitjançant l'enfonsament de la mateixa en posició vertical en el fons marí i després es rota el plat perquè quedi ortogonal a la línia d'ancoratge. Per poder enfonsar-les en el fons es solen utilitzar pilons de perforació. Degut a la gran capacitat de mantenir l'ancoratge ferm, aquest tipus es sol utilitzar en sistemes en tensió o semi tensió.

L'avantatge més rellevant d'aquest sistema d'ancoratge és la precisió en quant a l'emplaçament de l'àncora en el fons marí, ja que tant en el pla vertical com horitzontal se sap exactament allà on es quedarà ferm. També és més eficient que les àncores de succió ja que disposa d'una molt bona relació de capacitat de subjecció/pes i la capacitat d'ancoratge no varia amb l'angle d'inclinació. En quant a les desavantatges, la instal·lació és més complicada, de manera que també augmentarà l'OPEX del projecte i es precisa de tecnología ROV.

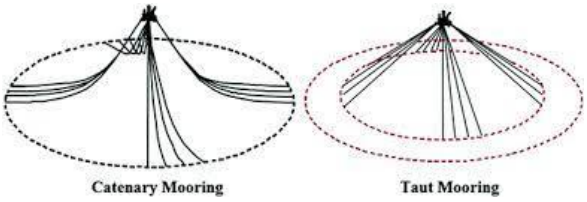


Il·lustració 20. Instal·lació àncora placa plana.

Font: SEPLA INTERMOON

2.4.3. TIPUS DE LÍNIES D'ANCORATGE

Podem classificar els sistemes d'ancoratge en 2 grans tipus: sistemes en catenària i sistemes en tensió. La principal diferència entre elles és que, el sistema en catenària les forces restauradores es deuen principalment al resultat de un canvi en el pes suspès de les línies, que solen ser d'acer. Mentre que en els sistemes en tensió les forces de recuperació es deuen a les generades per l'elasticitat de les línies (normalment de fibres sintètiques). Encara que en el sistema en catenària les línies són més llargues, el cost associat a aquest tipus, sovint és més reduït que en els sistemes en tensió, això es deu al cost de les àncores, ja que aquestes han de suportar tensions tant horitzontals com verticals. Normalment, els sistemes en tensió s'usen per profunditats elevades (>200 m). Durant el procés d'instal·lació, s'han de monitoritzar les tensions de les línies d'ancoratge al ser un requeriment dels OS de la DNVGL.



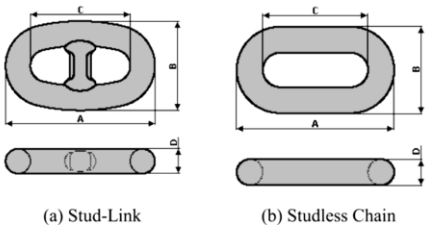
Il·lustració 21. Catenary and taut mooring

Font: Corewind D1.2

El nombre de línies, els seus paràmetres (materials, diàmetres i longituds) o angles de distribució estan determinats principalment per les condicions ambientals de l'emplaçament.

Pel que fa al material de les línies, podem distingir línies de cadenes d'acer, cordes de filferro, i cordes sintètiques de fibra.

- Les cadenes son el tipus de línia més usada i les podem trobar tant sense travesser com amb travesser, es important que la cadena a usar estigui construïda respectant els estàndards de la ISO 1704: 2008, on s'especifica la forma, les proporcions, dimensions i toleràncies de les parts de la cadena.

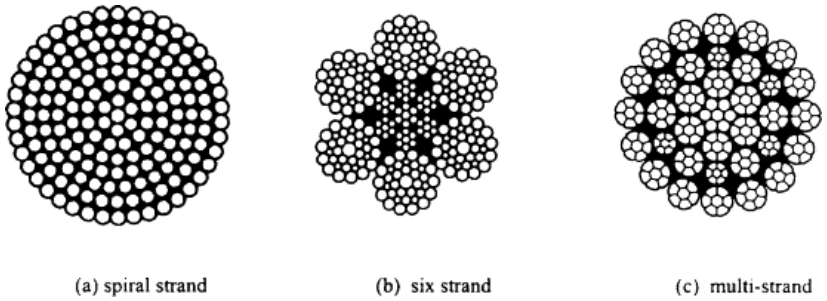


Il·lustració 22. Stud-Link and Studless Chain

Font: (Re, 2018)

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Facultat de Nàutica de Barcelona

- Les línies de filferro, més enllà dels amarratges, es poden utilitzar per a altres tasques, com a guia o per línies de retenció del moviment de la plataforma, etc. En comparació amb la cadena, un dels avantatges que podem trobar és que les cordes de filferro d'acer tenen una relació resistència/pes més elevada, cosa que les fa més fàcils d'instal·lar i més lleugeres a l'estructura flotant. Les cordes de filferro d'acer es construeixen generalment amb molts fils d'acer prims enrotllats, que després s'enrotllen al voltant d'un nucli central. La configuració més utilitzada per a aquest tipus de construcció de filferro és de sis cadenes. El nombre de fils es regeix pels requisits de resistència, fatiga i rigidesa de flexió requerits per a cada aplicació. La corda de filferro també es pot construir només amb fils individuals enrotllats, coneguts com a filferro en espiral. Aquesta construcció sol utilitzar una funda per protegir-la, ja que és molt més susceptible a danys.
  En quant als desavantatges, la corda de cable té una vida de fatiga inferior i és més sensible als danys i a la corrosió en comparació amb la cadena. Segons la DNV-OS-E304, els segments de corda de filferro en les línies d'amarratge s'han de protegir contra atacs de corrosió durant tota la vida del disseny, ja sigui mitjançant el recobriment dels fils o el revestiment de la corda. Es recomanen inspeccions periòdiques durant tota la vida del disseny per garantir que la protecció està intacta i que la corrosió es troba dins dels límits acceptables.



Il·lustració 23. Wire ropes types in offshore mooring

Font: Chakrabarti, 2015

- Finalment trobem les línies de fibres sintètiques, tenen l'avantatge que el material és més lleuger i té una gran elasticitat. Els tres material més comuns per aquests tipus de línies són el nylon, el polipropilè i el polièster. Tot i així la DNVGL al OS E303 contempla també els següents materials com a candidats: aramides, HMPE *(High modulus polyethylene)* com el dyneema, spectrao el PBO i LCAP *(liquid crystal aromatic polyester)* conegut com Vectran. Els materials no esmentats anteriorment diu que s'han de tractar cas per cas i dur a terme un estudi apropiat per ser acceptats pel seu ús.

A continuació és troba una breu introducció als materials sintètics més usats:

Nylon: Té el mòdul de rigidesa més baix i, per tant, es adequat quan l'extensió de les línies és elevada. És la més forta de les fibres comunes quan està seca. No obstant això, la fibra de niló humida perd aproximadament el 10% de la seva resistència i les cordes de niló mullades poden perdre fins al 20% de la seva resistència.

Polyester: Les cordes són molt duradores en la càrrega de fatiga cíclica per tracció (Parsey, 1985). Es pot fabricar una corda de polièster molt forta amb mòduls relativament elevats amb les noves fibres de polièster d'alta qualitat disponibles. Per tant, les cordes de polièster substitueixen el niló en moltes aplicacions marines convencionals i són bons candidats per als sistemes d'amarratge en aigües profundes.

Polypropylene: La fibra de polipropilè és més lleugera que l'aigua. Per aquest motiu s'elegeixen aquest tipus de cordes i també perquè tenen un cost més baix. No obstant això, el polipropilè és més feble que el niló o el polièster. Per tant, el polipropilè no és adequat generalment per a amarratges en aigües profundes.

Il·lustració 24. Materials of mooring lines Left: Chain Middle: Wire rope Right: Fibre Rope

Font: Maritim executive magazinem, InterMoor and Lankhorst offshore n.d.

2.4.4. Procediments instal·lació sistema de fondeig

Depenent dels components a utilitzar i les característiques de l'emplaçament aquest procediment ha d'estar adaptat a cada projecte. Tot i així, podem distingir un seguit d'operacions comunes en tots els procediments. Aquestes operacions són: pre-assemblatge de les línies amb les àncores i els connectors, posicionament i estesa de les línies d'ancoratge i finalment la connexió de la plataforma amb les línies.

Els passos previs a la línia d'amarratge son els següents:

1. Pre-mobilització de línies d'amarratge.
2. Mobilització d'embarcacions instal·ladores al port, d'equips permanents i d'equips temporals.
4. Instal·lació, tensió i abandonament de totes les línies d'amarratge.
5. Retirada del vaixell d'instal·lació.

Els passos principals de la connexió de la línia d'amarratge es resumeixen de la següent de manera:

1. Preparació de remolcador *offshore* i preparar el vaixell de treball.
2. Posicionament del flotador.
3. Connexió de les línies d'amarratge.
4. Desconnexions del remolcador *offshore*.
5. Desconnexió del remolcador del port.
6. Desconnexió de les línies de remolc principals de la coberta flotant.
7. Desconnexió de les cordes de remolc del port.
8. Operacions de busseig.

2.5. Vaixells comuns per dur a terme l'operativa

La selecció dels vaixells involucrats en l'operativa es basa bàsicament en raons econòmiques, de disponibilitat, del tipus de turbina eòlica, de les dimensions de la plataforma i del nombre de components (Jiang, 2021).

A continuació es presenta una taula resum dels vaixells que es solen usar per a dur a terme aquets tipus d'operacions amb les característiques i el propòsit més rellevants.

Taula 1. Vaixells comuns en les operacions de FWTs

Vaixell	Propòsit i característiques
Tugboat	Maniobra de sortida del port i remolcament. En funció de la resistència de la plataforma, s'elegirà el remolcador, en funció del seu MBP. Aquests vaixells haurien de tenir eines de posicionament dinàmic.
Heavy lift vessel	Transport en sec, de forma comú usats per llargues distàncies.
AHV's	Usats per l'operació d'instal·lació de les àncores i de les línies d'ancoratge.
Utility vessel	Vaixell multi propòsit de suport. Solen tenir una coberta espaiosa i la capacitat d'efectuar maniobres que impliquin l'ús de grues.
Crew Transfer Vessel	És el vaixell encarregat de transportar els tècnics fins a la plataforma d'accés per realitzar tasques de O&M i reparacions.
Crane vessels	Es solen utilitzar en les operacions de posada en vertical i per l'assemblatge de la plataforma i la torre.
Cable laying vessel	Utilitzats per l'estesa del cablejat al fons mar. Aquets cablejat submarí s'enterra al fons mitjançant una arada especial. El sistema ha de ser capaç de mantenir la posició precisa per sobre de la ruta de disseny definida.
Jackup barge	Vaixell equipat amb llargues potes de suport que es poden aixecar o baixar. La maniobra (de forma autopropulsada o remolcada) cap a la ubicació amb els suports hidràulics aixecats i el casc flotant sobre l'aigua. En arribar al lloc de treball, les cames es posicionen al fons del mar. Aquests s'utilitzen per les operacions d'instal·lació on la profunditat ho permet.

Font: Gómez et al., 2015 i Jiang, 2021.

Il·lustració 25. Vaixells comuns per les operacions de FWTs

1. HLV – Heavy Lift Vessel (Van Oord n.d.)
2. Crane Vessel (Damen n. d.)
3. Jackup barge (Ulstein n.d.)
4. CLV – Cable Laying Vessel (Nexus, Van Oord n.d.)
5. AHV – Anchor Handling Vessel (Vard Marine n.d.)
6. Tug Boat (MacGregor n.d.)
7. Utility Vessel (Damen n.d.)
8. CTV – Crew Transfer Vessel (Nava n.d.)

Capítol 3. Normativa aplicable

Les operacions marines per les OWT han de seguir una sèrie d'estàndards per garantir la seguretat de les mateixes. Aquests estàndards tenen en compte aspectes com criteris operacionals, gestió dels riscs, guies i pràctiques recomanades per les distintes condicions meteorològiques i la integritat de l'estructura.

Al voltant del món actualment s'estan desenvolupant uns 40 conceptes d'energia eòlica flotant. Per aquest motiu hi ha molta variabilitat i és necessari tenir un estàndards comuns per avançar i aportar confiança i comoditat als nous inversors. (DNV Webinar, 2021)

Generalment, pels projectes comercials, les normes reguladores locals de cada lloc són les que es tenen en més consideració. Tot i això, és important tenir en compte els estàndards reguladors de la societat de classificació corresponent. Els estàndards més rellevant pel que fa al disseny de la plataforma, son el DNVGL-ST-0119 o el IEC TS 61400-3-2.

A continuació, es troba una taula amb un recull dels estàndards més importants a tenir en compte a la hora de dissenyar i planificar operacions marines de FWTs.

Taula 2. Standards and guidlines for OWTs installation (DNVGL & ISO)

Standard	Title
DNVGL-ST-N001	Marine operations and marine warranty
ISO 29400:2015	Ships and marine technology – Offshore wind energy – Port and marine operations
DNV-RP-H103	Modelling and analysis of marine operations
DNVGL-ST-0378	Standard for offshore and platform lifting appliances
DNVGL-ST-0054	Transportation and installaltion of wind power plants
DNVGL-ST-0437	Loads and site conditions for wind turbines
DNV-RP-C205	Environmental conditions and loading
DNV-RP-H101	Risk management in marine and subsea operations
DNV-OS-C301	Stability and watertight integrity
DNV-RP-H104	Ballast, stability and watertight integrity-Planning and operations guidance
DNVGL-OS-E301	Mooring design
DNVGL-ST-0119	Floating wind turbines structures & Dynamic cable

Procés d'autorització d'un projecte eòlic offshore

Pel que fa al procés d'autorització d'instal·lació d'una FOWT, un cop el promotor fa la sol·licitud, es realitza un procediment de concurrència de la zona determinada. A més, s'haurà de presentar tota la documentació tècnica relativa al projecte. Un comitè de valoració dels organismes administratius afectats avaluarà la sol·licitud. I en el cas d'acceptar-la, la Direcció General de la Política Energètica i Mines, la Direcció General de Sostenibilitat de la Costa i del Mar i la Direcció General de Qualitat i Avaluació Ambiental tramitaran la concessió del domini públic i l'avaluació de l'impacte ambiental.

Capítol 4. Estudi de l'emplaçament i les seves condicions ambientals

4.1. INTRODUCCIÓ

La demanda total anual d'electricitat a GC (Gran Canaria) es del voltant de 3500 GWh. A Canàries actualment hi ha 3.308,6 MW de potencia instal·lada, d'aquests aproximadament un 80% prové de generació tèrmica, mentre l'altre 20% prové d'energies renovables (429 MW són eòlics i 167 MW de la fotovoltàica). Si tot segueix segons el previst, el 2022 la potència eòlica instal·lada a les illes s'aproximarà gairebé als 600 megawatts, una vegada que estiguin en funcionament els últims 184 MW assignats pel Ministeri per a la Transició Ecològica i el Repte Demogràfic.

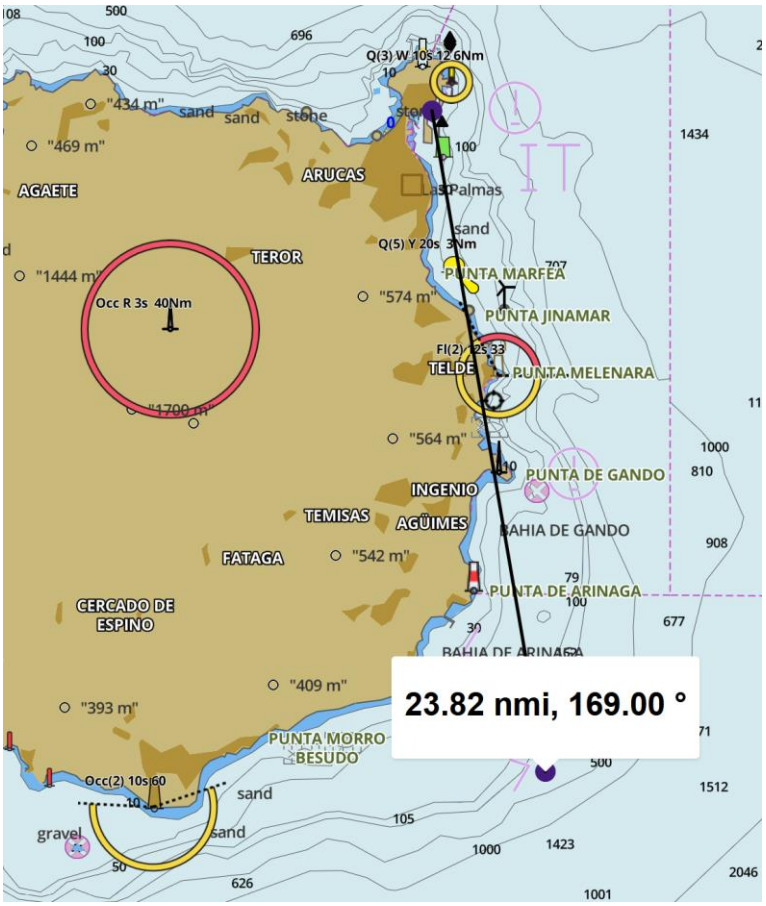
De manera que *l'offshore wind* a Canàries pareix estar en una bona situació per unir-se a les energies renovables de l'arxipèlag.

Per realitzar l'estudi de l'emplaçament, s'han exportat les dates anemomètriques de la web de *Puertos del Estado* proporcionades per *SIMAR* i per la pàgina web *Global Wind Atlas*.

Com es pot observar a les Il·lustracions 28 i 29, la millor font eòlica de l'illa es situa al SE i a l'Oest de GC i per raons d'onatge i facilitats es va elegir el SE com a punt d'instal·lació a prop del projecte de la plataforma oceànica de Canàries 'PLOCAN'.

4.2. Característiques de la ruta de remolc programada

La ruta seleccionada surt del *Puerto de la Luz* i va fins les coordenades 15º19'48.00" W 27º45'0.00"N.



Il·lustració 26. Posició GPS de l'emplaçament

Font: Portal web Gps nautical charts

Per l'estudi d'aquesta possible ruta s'han tengut en compte els següents paràmetres:

- Una profunditat de 200m ha estat assumida com a constant.
- Distància de la ruta aproximada: 28.00 mn
- Distància de la costa: 5.5 mn
- Densitat de l'aire: 1.226 kg/m3
- Densitat de l'aigua: 1025 kg/m3

4.3. Determinació de les especificacions de l'emplaçament per les condicions de disseny

L'estàndard de la DNVGL ST 0437 fa constar que per el disseny de operacions marines en un cert emplaçament s'han de determinar una sèrie de paràmetres bàsics de les condicions de l'emplaçament. Els paràmetres bàsics a conèixer es troben a continuació:

Mean sea level - MSL	1.58 m
Lowest Astronomical Tide - LAT	0.00 m
Highest Astronomical Tide - HAT	3.11 m
Highest still water level - HSWL	3.19 m
Lowest still water level - LSWL	0.13 m

A més dels anteriors, d'arcord amb la normativa ST 0437 també s'han de conèixer els següents paràmetres, aquests s'aniran definint en els pròxims fulls:

- Densitat de l'aire a l'altura del rotor
- Altura significant de l'onatge (50-anys i 1-any període recurrent)
- Altura de disseny de l'onatge (50-anys i 1-any període recurrent)
- Període de l'onatge de diseny (50-anys i 1-any període recurrent)
- Espectre d'ona i paràmetre
- Distribució del vent i l'onatge i el seu desalineament (Hs, Tp, V)

Els DLC's *(design load cases)* a aplicar per el prediseny de les operacions marines són els 8.1 i 8.2 de la *DNVGL-ST-0437 Loads and site conditions for wind turbines* [12].

EL DLC 8.1 fa referencia als casos on l'inversor compra una FWT comercial i es deixa constància que el fabricant de la mateixa ha de proveir tota la informació en quant a les condicions de disseny rellevants per les operacions marines de transport, instal·lació, manteniment i reparació per la localització desitjada.

De manera que al haver de definir el perfil de vents i l'onatge de disseny, s'aplicarà el DLC 8.2.

Design Situation	DLC	Wind Condition	Marine Condition				Other Conditions:	Type of Analysis		Partial safety factor
			Waves	Wind and wave directionality	Sea Currents	Water Level		Onshore	Offshore	
7) Parked and fault conditions:	7.1	EWM $V_{hub} = V_1$	ESS $H_s = H_{s,1}$	MIS, MUL	ECM $U = U_1$	NWLR	Fault that produces deviations from the normal turbine behaviour while parked; including loss of electrical network	U	U	A
	7.2	NTM $V_{hub} < V_{out}$	NSS Joint prob. distribution of H_s, T_p, V_{hub}	COD, MUL	No currents	NWLR or ≥ MSL		-	F/U	F/N
8) Transport, installation, maintenance and repair	8.1	NTM $V_{hub} = V_T$ *to be stated by the manufacturer*	NSS $H_s = H_{sT}$ *to be stated by the manufacturer*	COD, MUL	No currents	NWLR	Design conditions shall be stated by the manufacturer	U	U	N
	8.2	EWM $V_{hub} = V_1$	ESS $H_s = H_{s,1}$	COD, MUL	No currents	NWLR	Transport, installation, maintenance and repair	U	U	A
	8.3	EWM $V_{hub} = V_1$	ESS $H_s = H_{s,1}$	COD, UNI	ECM $U = U_1$	NWLR	Vortex-induced vibrations due to wind, waves or currents	F/U	F/U	F/N
	8.4	NTM $V_{hub} < 0,7V_{ref}$	NSS Joint prob. distribution of H_s, T_p, V_{hub}	COD, MUL	No currents	NWLR or ≥ MSL	No grid during installation period	-	F/U	F/N
	8.5	NTM $V_{hub} = V_T$	ESS $H_s = H_{sT}$	COD, MUL	ECM $U = U_1$	NWLR	Service vessel impact and helicopter loads – normal event	-	U	N
	8.6	NTM $V_{hub} = V_T$	ESS $H_s = H_{sT}$	COD, MUL	ECM $U = U_1$	NWLR	Supply vessel impact – abnormal event	-	U	A

Il·lustració 27. DLC's Transport, installation, maintenance and repair

Font: DNV ST 0437

4.3.1. Condicions del vent

Densitat de l'aire a l'altura del rotor

Un dels paràmetres que la norma anterior obliga a definir és la densitat de l'aire a l'altura del rotor. A continuació, figuren els càlculs realitzats per determinar la densitat de l'aire a 131.3 m des de la MSL *(main sea level).*

En efecte, la pressió i la temperatura dels gasos també varien amb la altitud i per tant, la densitat es veu alterada. Per calcular la temperatura a l'altura del rotor s'ha d'aplicar la següent fórmula:

$$T = T_0 - z \times L$$

Equació 1. Temperature profiles at diferent heights

On:

To= 21ºC= 294ºK

Z= 131.3 m

L= 0.0065 K/m

Al substituir s'obté una temperatura al rotor de 293.146 ºK

El següent pas és calcular la pressió de l'aire al rotor mitjançant la següent fórmula:

$$p = \rho_0 \left(1 - \frac{zL}{T_0}\right)^{\frac{gM}{RL}}$$

Equació 2. Pressure profiles at diferent heights

On:

Po= 101325 Pa **g**= 9.81 m/s2 **L**= 0.0065 K/m **R**= 8.31 J/(mol·K) **M**= 0.0289 kg/mol

Substituint les dades trobem que a 131.3 m del MSL es troba una pressió de 99788.31 Pa.

Un pic obtinguda tant la temperatura com la pressió, només cal aplicar l'equació que relaciona les variables anteriors amb la densitat:

$$\rho = \frac{pM}{RT}$$

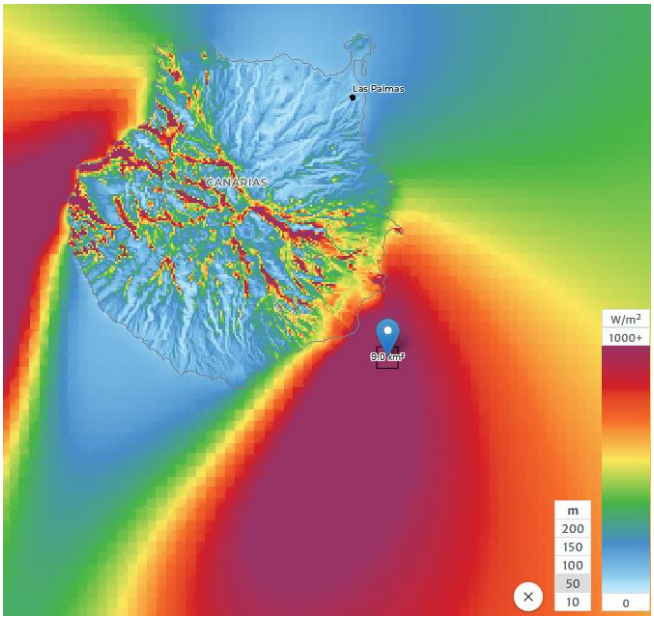
Equació 3. Air density equation

De manera que $\boldsymbol{\rho(z = 131,3) = 1,186\ kg\ /\ m^3}$

Patró de vents de Gran Canaria

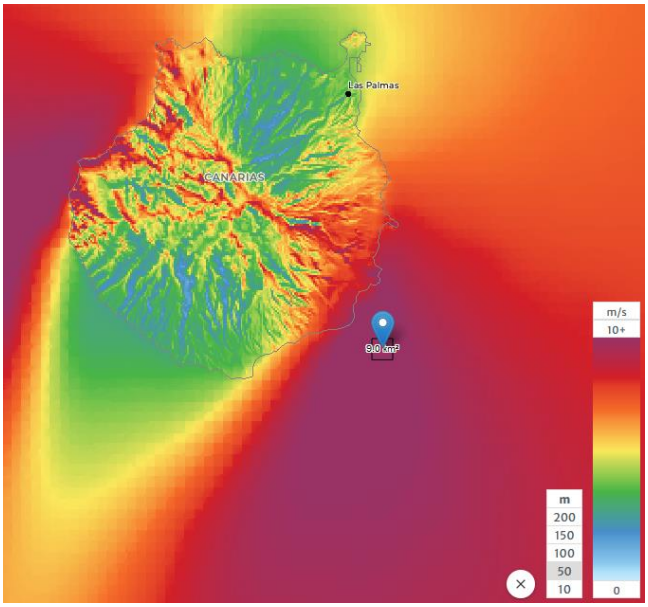
El patró de vents a les Illes Canàries està influït pels vents alisis que bufen constantment cap a l'oest. A causa de l'efecte de l'illa sobre els vents alisis, el flux de vent experimenta una acceleració, deixant zones amb una velocitat mitjana anual del vent al voltant de 9 m/s a la costa est de Gran Canària a una altura del MSL de 50 m.

A continuació, es mostra la mitjana anual de la velocitat i la densitat de potencial del vent a 50 m d'altura.



Il·lustració 28 Mean Power Density

Font: Global Wind Atlas, 2021



Il·lustració 29. Mean Wind Speed

Font: Globas Wind Atlas, 2021

Per ajustar la velocitat del vent a les altures que ens interessen s'usarà la següent fórmula logarítmica:

$$v(z) = v_{z\,ref} x \frac{\ln\left({}^{z}/_{z_0}\right)}{\ln\left(z_{ref}\ /\ z_0\right)}$$

Equació 4

Velocitat del vent de referencia:

10-minute mean wind speed a 10 m del MSL: 9.83 m/s.

Aleshores ens interessa saber el perfil de vent per les altures sobre la MSL de 5 m pel transport en horitzontal i de 130 m pel transport, manteniment i reparació en vertical.

Taula 3. Paràmetres utilitzats per l'obtenció del perfil de velocitats.

Height above MSL	**z**	5 i 130	m
Roughness length:	**z0**	0,0006	m
Reference height:	**zref**	10	m
Reference speed:	**Vref (z=10)**	9,83	m/s
Shear exponent:	**α**	0,2	
Graph Type	z(m) - v(z)		

Per obtenir el paràmetre z_0 s'utilitzarà l'equació extreta de l'apartat 2.3.2 de la DNV GL ST-0437, l'expressió és la següent:

$$z_0 = \frac{A_C}{g} \times \left(\frac{k\ x\ v_{ref}}{\ln\left({}^{zref}/_{z_0}\right)}\right)^2$$

Equació 5. Roughness parameter equation

On:

g= 9,81 m/s2 Acceleració de la gravetat.

K= 0,4 Karman's constant.

Ac= 0,014 Charnock's constant.

Els valors de la constant de Charnock depenen del tipus de FOWT, aquests es poden trobar a la Taula 2-1 del ST 0437 de la DNV.

De manera que com es pot veure a la Taula 4 que s'adjunta a continuació, a la plataforma a estudiar, al tenir una categoria OB *(category for medium turbulence intensity and significant wave height)*, el valor de la constant de Charnock a utilitzar és de 0,014.

Taula 4. Obtenció Constant de Charnock

Wind turbine class			*I*	*II*	*III*
V_{ref} [m/s]			50	42,5	37,5
V_{ave} [m/s]			10	8,5	7,5
Onshore	A + I_{ref} [-]		0,18		
	A I_{ref} [-]		0,16		
	B I_{ref} [-]		0,14		
	C I_{ref} [-]		0,12		
Offshore	OA	H_{ref} [m]	10		
		T_{ref} [s]	12,5		
		I_{ref} [-]	0,14		
		t_a [$\frac{m}{s}$]	10		
		t_b [-]	0,566		
		A_C [m]	0,018		
	OB	H_{ref} [m]	6		
		T_{ref} [s]	10,0		
		I_{ref} [-]	0,12		
		t_a [$\frac{m}{s}$]	10,5		
		t_b [-]	0,561		
		A_C [m]	0,014		
	OC	H_{ref} [m]	2		
		T_{ref} [s]	5,5		
		I_{ref} [-]	0,10		
		t_a [$\frac{m}{s}$]	11		
		t_b [-]	0,556		
		A_C [m]	0,011		

Font: DNV GL ST 0437 taula 2-1

Amb aquest valor ja es pot aplicar l'Equació 5 d'on s'obté un valor de Zo de 0,0006.

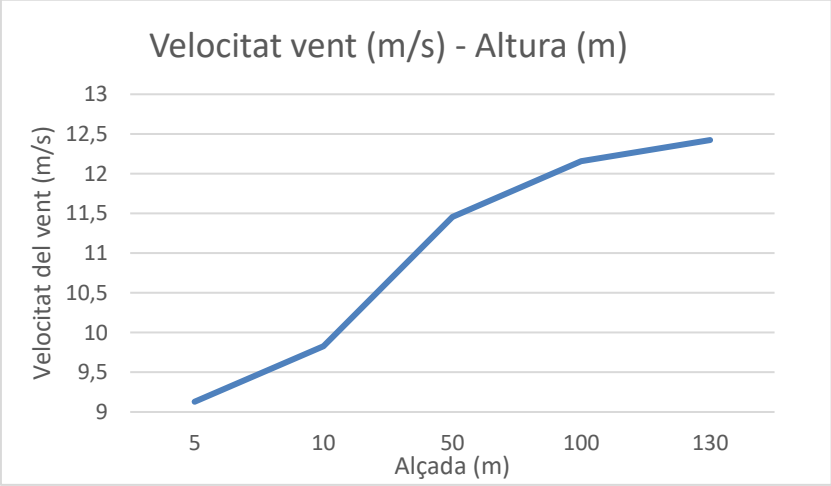
Ja només caldria utilitzar l'Equació 1 per obtenir els perfils de vent desitjats.

Els resultats són els següents:

Taula 5. Resultats perfils de vent

Normal Wind Profile	
Height [m]	**Speed [m/s]**
5	**9,12909264**
10	9,83
50	11,4574565
100	12,1583638
130	**12,4236654**

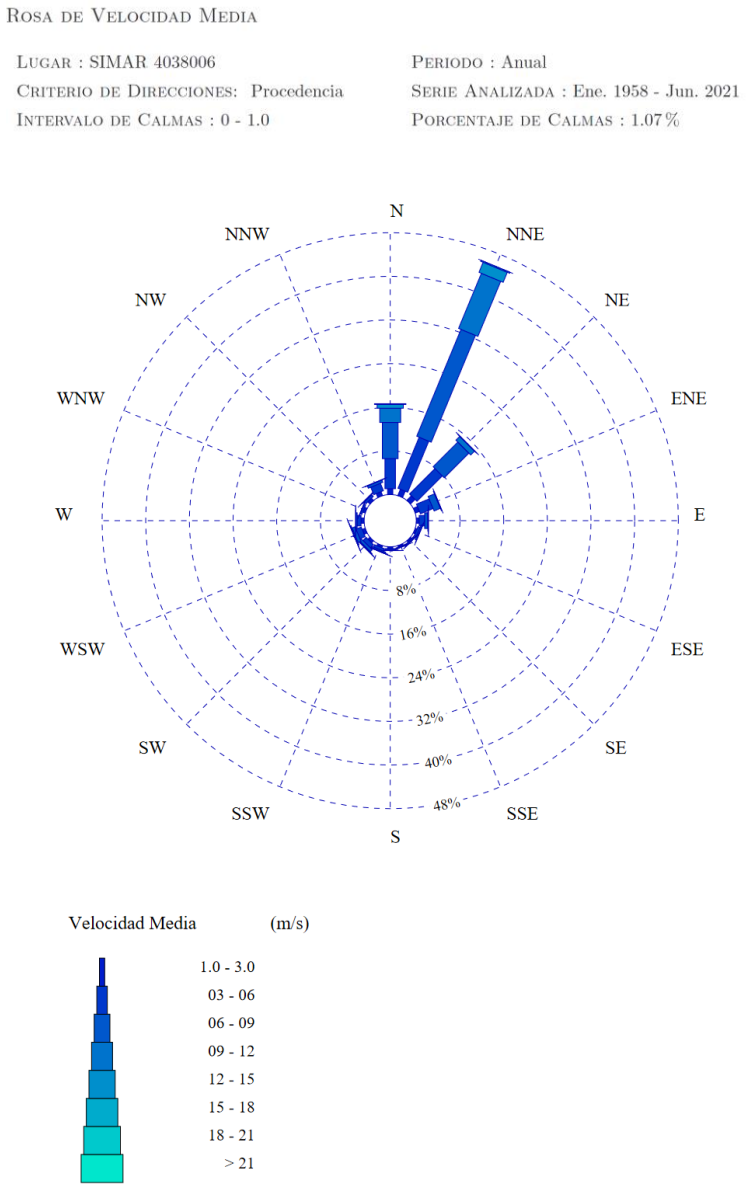
Gràfica dels perfils de vent obtinguts



Il·lustració 30. Perfils de vent.

Font: Pròpia

Distribució de la direcció del vent de l'emplaçament a 50m del MSL



Il·lustració 31. Rosa del vent

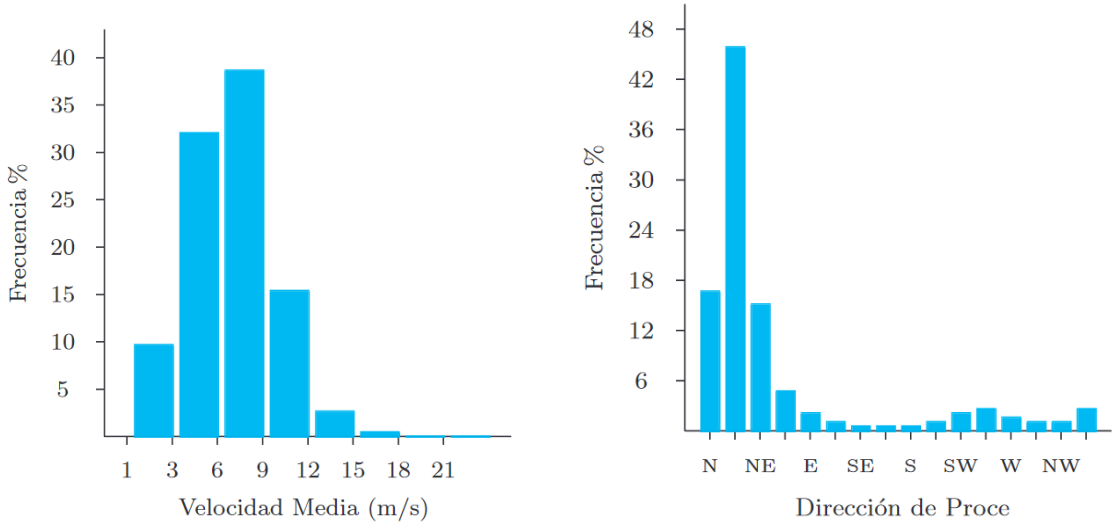
Font: Puertos del Estado

A la gràfica anterior s'observa com, el vent predominant de l'emplaçament es de component NNE. Aquesta informació ens serà d'utilitat al definir el desalineament entre el vent i l'onatge en el següent apartat. També s'hauran de tenir en compte a l'hora de dissenyar l'operació de transport i instal·lació.

Freqüència de la velocitat mitjana i direcció del vent en un període anual

Sèries analitzades: Gener 1958 – Jun 2021

Emplaçament: Boia SIMAR 4038006



Il·lustració 32. Freqüència de la velocitat mitja i direcció del vent a GC

Font: Puertos del Estado, 2021

4.3.2. BATIMETRIA

En l'apartat actual s'han usat les dades relatives a la batimetria de la costa de GC extretes de l'Institut Hidrogràfic de la Marina i la Direcció General de Costes de l'Estat. Les cartes batimètriques de les que disposen, permeten a qualsevol usuari saber la profunditat exacte d'una posició en concret, usant isogrames per definir on la profunditat es constant.

La profunditat de l'emplaçament és un paràmetre crític pel sistema d'ancoratge, ja que com més profunditat hi ha, més car és el material i l'operativa.

Com es pot observar a la Il·lustració 33, al SE de la costa de Gran Canaria trobem una àrea d'uns 200km2 amb profunditats de menys de 300 m i a una distancia de la costa de 2 a 13 km.

La profunditat de la posició fixada per dur a terme la instal·lació de la plataforma es troba entorn als 200 m i el fons està majoritàriament constituït per grava.

Il·lustració 33. Batimetria de GC

Font: Instituto Hidrográfico de la Marina y Dirección General de Costas

4.3.3. Onatge significatiu i de disseny

A continuació, es troba la taula resum amb l'onatge significatiu i el període de pic per un període de retorn de 50, 20, 10 i 1 any.

Taula 6. Significant waves height

Return period [years]	Hs [m]	Tp [s]
50	5.11	9.0 – 11.0
20	4.69	9.0 – 11.0
10	4.40	9.0 – 11.0
1	3.35	8.0 – 10.0

Els valors mostrats a la Taula 6 corresponen als obtinguts en el diagrama *Scatter*, aquest diagrama de dispersió resumeix la probabilitat de ocurrència per distints estats del mar, tenint en compte combinacions entre l'alçada de l'ona i el seu període. Les dades utilitzades estan recollides en un període de temps determinat, normalment anual o estacional.

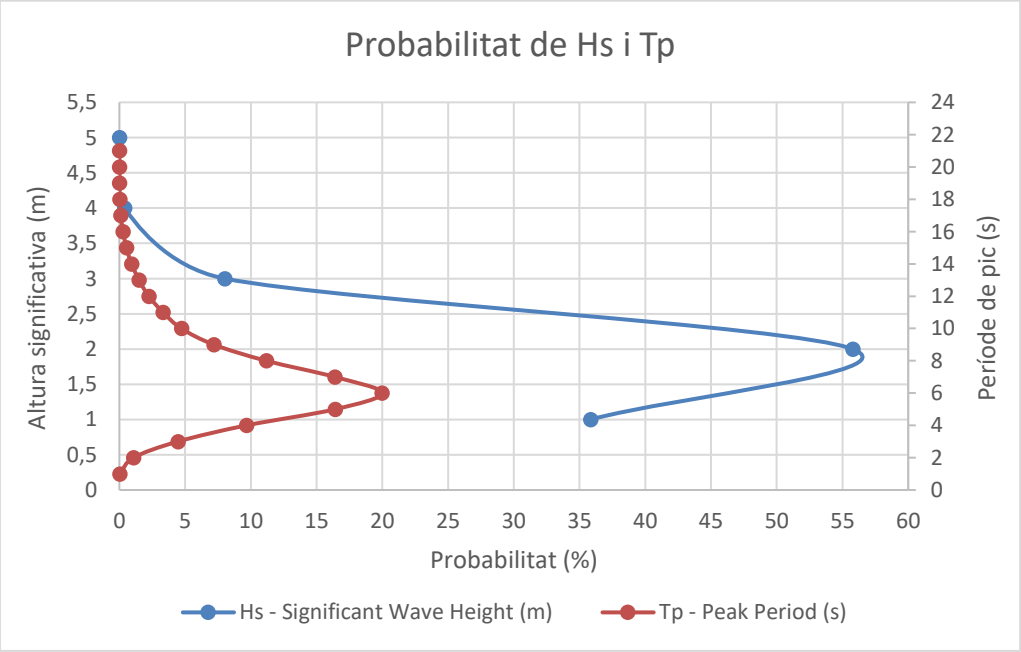
Els períodes de pic de l'ona (Tp) estan definits en segons, en intervals de 1 s i van des de 1 s fins a 22 s. L'altura significativa (Hs) de l'ona esta definida en m, en intervals d'1 m i van de 1 m fins a 5 m. El diagrama *Scatter* per GC es representa a la taula 7.

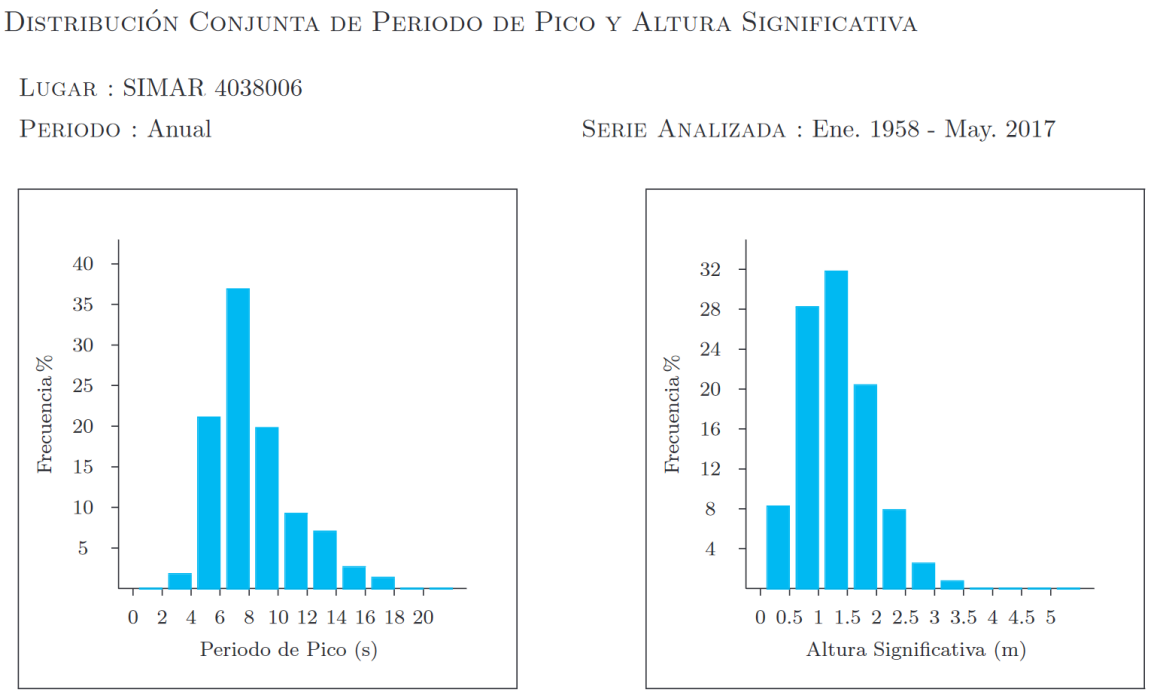
Taula 7. Scatter Diagram GC (D1.2 Design Basis)

%		Hs - Significant Wave Height (m)					
		0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	Total
Tp - Peak Period (s)	1 - 2	0,037	0,001	0	0	0	**0,038**
	2 - 3	0,771	0,3	0	0	0	**1,071**
	3 - 4	2,603	1,845	0	0	0	**4,448**
	4 - 5	4,524	5,132	0,003	0	0	**9,659**
	5 - 6	5,392	10,973	0,049	0	0	**16,414**
	6 - 7	4,907	14,608	0,465	0	0	**19,98**
	7 - 8	4,211	9,569	2,593	0,012	0	**16,385**
	8 - 9	3,504	5,006	2,552	0,11	0	**11,172**
	9 - 10	2,836	3,119	1,087	0,147	0,001	**7,19**
	10 - 11	2,252	1,865	0,522	0,073	0,003	**4,715**
	11 - 12	1,766	1,25	0,275	0,028	0	**3,319**
	12 - 13	1,244	0,823	0,161	0,005	0	**2,233**
	13 - 14	0,827	0,542	0,12	0,001	0	**1,49**
	14 - 15	0,512	0,326	0,085	0,002	0	**0,925**
	15 - 16	0,27	0,21	0,052	0,003	0	**0,535**
	16 - 17	0,129	0,119	0,034	0,001	0	**0,283**
	17 - 18	0,04	0,058	0,005	0	0	**0,103**
	18 - 19	0,01	0,018	0	0	0	**0,028**
	19 - 20	0,002	0,006	0,001	0	0	**0,009**
	20 - 21	0	0,002	0	0	0	**0,002**
	21 - 22	0	0,001	0	0	0	**0,001**
	Total	**35,837**	**55,773**	**8,004**	**0,382**	**0,004**	**100**

A la seguent gràfica s'observa la probabilitat d'ocurrència a l'eix horitzontal i als eixos verticals, l'altura significativa de l'ona i el període de pic.

Taula 8. Probabilitat d'ocurrència Hs i Tp (Font: Pròpia)





Il·lustració 34. Distribució de període de pic i altura significativa

Font: Puertos del Estado

Un cop obtingut l'onatge significatiu per els distints períodes de temps es procedeix a calcular l'onatge de disseny. L'altura de l'ona de disseny es pot aproximar en base a la fórmula proposta per la DNV GL, mitjançant l'expressió:

$$H_D = H_{s\,max} = 1.86 \times H_{s,50} = 1{,}86 \times 5{,}11 = 9{,}5046 \text{ m}$$

Equació 6. Equació onatge de disseny

Un requisit de la normativa a complir es que el període d'onatge de la ona de disseny compleixi la següent desigualtat:

$$11{,}1 \times \sqrt[2]{Hs\,max/g} \leq T_D \leq 14{,}3 \times \sqrt[2]{Hs\,max/g}$$

Equació 7. Rang períodes

De manera que el rang de períodes d'onatge que s'ajusta a la normativa és el següent:

$$8{,}00s \leq T_D \leq 10{,}32s$$

Expressió per calcular període de disseny:

$$\boldsymbol{T_D} = 5{,}23 \times H_s^{0,4} = \mathbf{10{,}045}$$

Equació 8. Període de disseny

Comparant el període de disseny amb el rang imposat per la normativa de la DNV es pot veure que està dins del rang.

<u>Rosa d'altura significativa</u>

Lloc: Simar 4038006

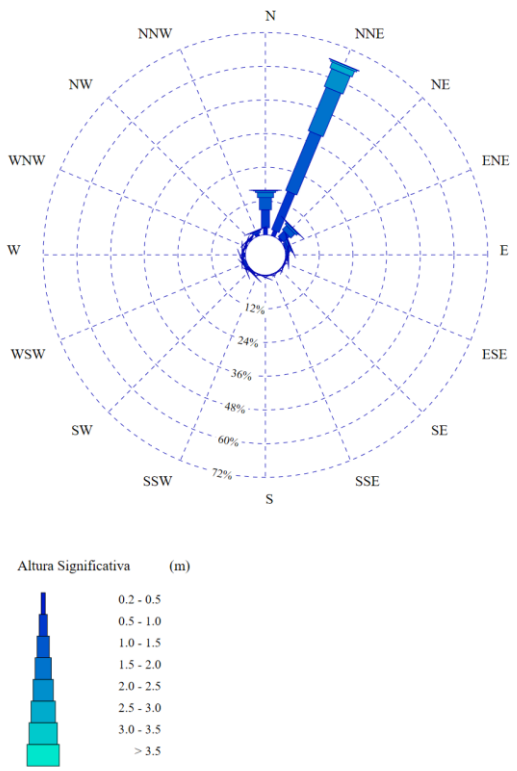
Criteri de direccions: Procedència

Interval de calmes: 0-0.02

Període: Anual

Sèrie analitzada: gener 1985- maig 2017

Percentatge de calmes: 0.59%



Corrent induïda pel vent:

$$v_{c,wind}(z) = v_{c,wind}(0) \cdot \left(\frac{d_0 + z}{d_0}\right) \; for - d_0 \leq z \leq 0$$

On d0 és la profunditat de referència del corrent generat pel vent, presa com, d0 = 50 m

Corrent de la marea:

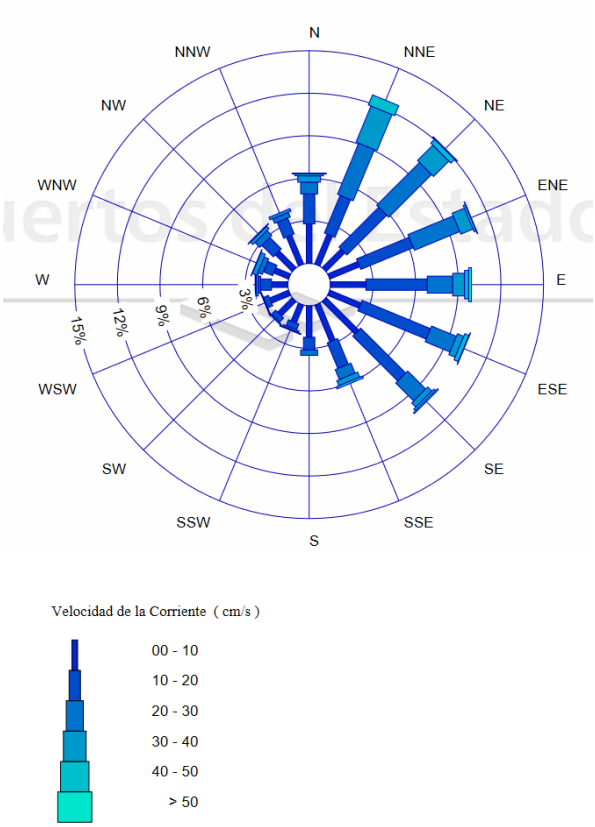
$$v_{c,tide}(z) = v_{c,tide}(0) \cdot \left(\frac{d + z}{d}\right)^{\alpha} \; for \; z \leq 0$$

Els perfils de velocitat actuals resultants per a cadascun dels corrents definits en seccions anteriors es donen a la taula següent del període de retorn de 50 anys actual. L'última columna d'aquesta taula representa la suma vectorial del component esmentat. Atès que tots dos components funcionen paral·lels a la costa, els seus valors s'afegeixen directament.

Taula 9. Perfil de vent, marea i corrents

Depth (m)	Wind component (m/s)	Tidal component (m/s)	Total current speed (m/s)
0.00	0.57	0.49	1.06
-10.00	0.52	0.49	1.01
-20.00	0.48	0.48	0.96
-30.00	0.43	0.48	0.91
-40.00	0.39	0.48	0.87
-50.00	0.34	0.47	0.82
-60.00	0.30	0.47	0.77
-70.00	0.25	0.47	0.72
-80.00	0.21	0.46	0.67
-90.00	0.16	0.46	0.62
-100.00	0.11	0.46	0.57
-110.00	0.07	0.45	0.52
-120.00	0.02	0.45	0.47
-130.00	0.00	0.44	0.44
-140.00	0.00	0.44	0.44
-150.00	0.00	0.43	0.43
-160.00	0.00	0.42	0.42
-170.00	0.00	0.42	0.42
-180.00	0.00	0.41	0.41
-190.00	0.00	0.40	0.40
-200.00	0.00	0.39	0.39
-210.00	0.00	0.38	0.38
-220.00	0.00	0.36	0.36
-230.00	0.00	0.34	0.34
-240.00	0.00	0.31	0.31
-250.00	0.00	0.00	0.00

Direccionalitat de la corrent:



Distribució conjunta de la intensitat i la direcció de la corrent:

Lloc: Gran Canaria

Sèrie Analitzada: desembre 2016- novembre 2017

Nombre de dades: 3127

Intensitat de resistència mitja: 8.85 (cm/s)

Velocitat mitjana: 16.45 (cm/s)

Període: anual

Freqüència: 1 dada per hora

Velocitat màxima: 6.80 (cm/s)

Resum dels resultats d'interès

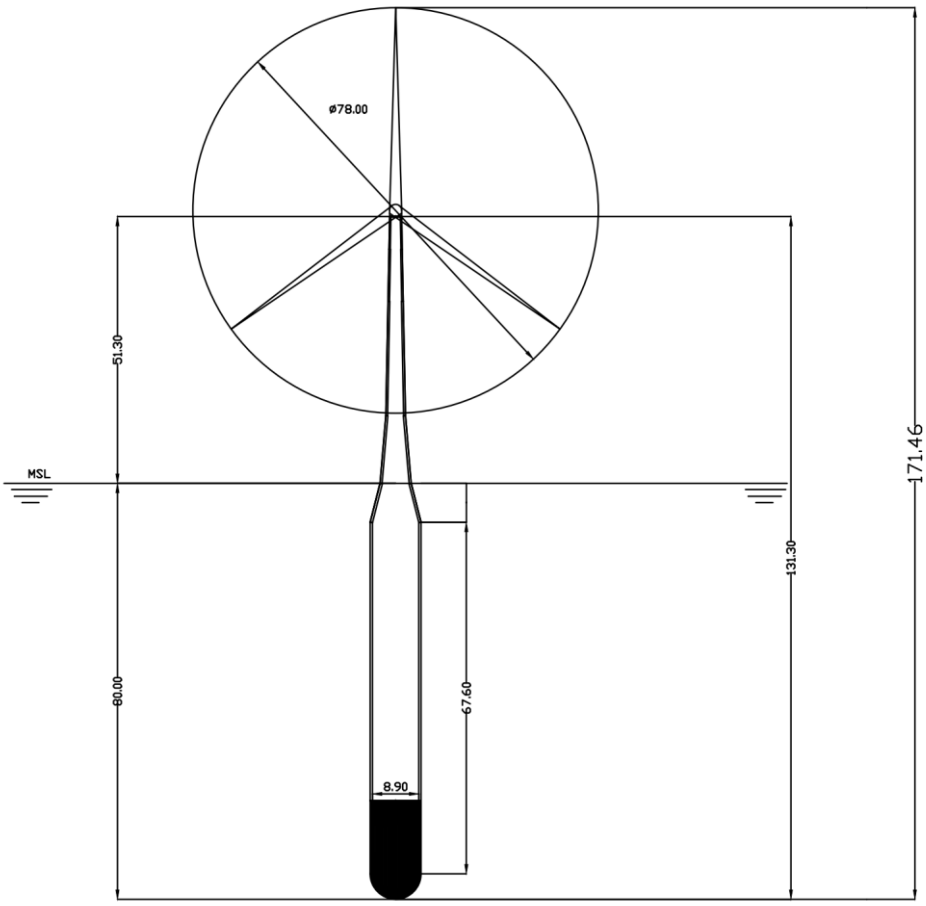
Localització	**Plocan, GC**
Coordenades	15º19'48.00" W 27º45'0.00"N
Profunditat mitjana	200 m
Velocitat mitjana del vent a 130 m	12.42 m/s
Velocitat mitjana del vent a 5 m	9.13 m/s
Direcció predominant del vent	NE/NNE
Altura significativa de l'onatge (Tr=50 anys)	5.11 m
Període de pic (Tp)	9.0 – 11.0 s
Hs en operació (s'especificarà en el capítol 6)	1 – 2 m
Tp en operació (s'especificarà en el capítol 6)	5-7 s
Energia mitja	1153 W/m2
Distancia de la costa	5.5 mn
Velocitat mitja de la corrent	49.2 cm/s

Taula 10. Resultats rellevants de l'emplaçament

Capítol 5. Definició model d'estudi: WindCrete 2MW

La plataforma WindCrete 2MW es un disseny SPAR tipus monolític, on la plataforma i la torre formen una sola peça. El cos està fet de formigó pretesat i té una longitud total de 131,3 m. A continuació es presenten els components principals que l'integren i les seves característiques bàsiques.

5.1. Característiques principals



Il·lustració 35. 2MW WindCrete Schematic w/ windturbine. Units [m]

Font: Pròpia

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Facultat de Nàutica de Barcelona

A continuació es troben les característiques del aerogenerador que portarà, el VESTAS V80 de 2.0MW

Taula 11. Característiques principals VESTAS V80 2MW

Potencia	**2.0 MW**
Orientació rotor, configuració	Barlovent, 3 pales
Rotor diàmetre	80 m
***Hub* (max dia./max. W/L)**	3.3/4/4.2
***Nacelle* (H/L/W)**	5.4/10.4/3.4
Blade length (m)	39
Velocitat d'arrancada del vent (cut-in)	4 m/s
Velocitat nominal del vent (rated)	16 m/s
Velocitat d'aturada del vent (cut-out)	25 m(s
***Hub mass* (kg)**	17000
***Nacelle* (kg)**	61200
***Blades* (kg)**	19500
Total mass (kg)	***97700***
C.d.G del conjunt	***(-0.2m; 0,0m; 51.3m)***

Font: WindCrete V80 (Trubat and Molins, 2021) i (A/S, Vestas Wind Systems, 2011)

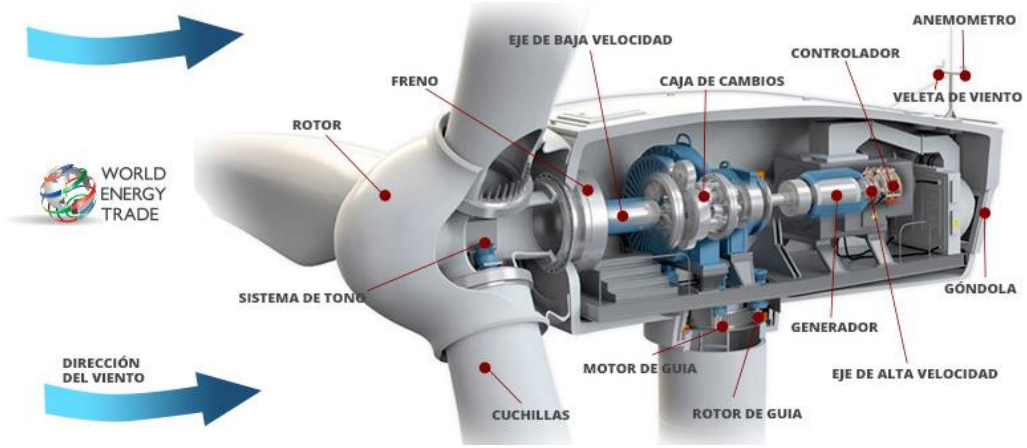
*A la taula anterior l'origen del centre de gravetat (CdG) s'ha fixat a la intersecció de l'eix vertical de la torre amb el nivell del mar MSL.

Els principals components de l'aerogenerador son els següents:

- Pales. Compten amb un sistema de control de l'angle de pas, per adaptar la potència de l'aerogenerador a cada situació de carga.
- Protecció contra llamps. El propi fabricant de les pales ha de subministrar el sistema de parallamps complint amb la normativa IEC i assegurant la integritat del sistema en el 98% dels impactes. El sistema està composat de receptors posicionats per tota la pala amb un conducte de transmissió comú, s'utilitza el mateix mètode que en la industria de l'aviació.
- Boixa
- Bastidor de la gòndola. Esta construït en acer i està dissenyat de forma que minimitzi el pes del conjunt i absorbeixi les vibracions originades per el sistema.

- Engranatges
- Sistema contra incendis. Es tracta d'un sistema de detecció i extinció automàtic del foc. Normalment es tracta d'un sistema de nitrogen liqüat a alta pressió que protegeix els components electrònics i un sistema de aigua en esprai que protegeix els elements estructurals.
- Aerogenerador. És l'element encarregat de convertir l'energia mecànica generada per les pales en energia elèctrica. Normalment son generadors asíncrons de 6 pols.
- Multiplicadora: És el component encarregat de elevar les revolucions de l'eix per adequar-les a les revolucions de treball del generador.
- Convertidor de potència. Regula el par i redueix les fluctuacions de potencia, de manera que el punt de funcionament sigui el de màxim rendiment dins el rang de funcionament.
- SAI (sistema d'alimentació ininterrompuda). Per assegurar el subministre d'energia ininterromput d'elements com el sistema de control i el sistema de abalisament, gracies a un conjunt de bateries el SAI és capaç d'alimentar-los en cas d'una aturada.
- Transformadors. L'energia de sortida dels convertidors es transforma en HV (Alta tensió) en els transformadors. D'aquesta manera l'energia elèctrica no ha de passar per una OSS i es redueix notablement el cost del transport de l'energia.
- Sistema de control electrònic. Sistema de ordinadors centrals, sensors i actuadors. Disposa de software que simula el funcionament de l'aerogenerador en funció de paràmetres com poden ser la velocitat del vent incident o la potencia entregada.
- Sistema de control de pas. Cada pala compta amb un motor elèctric que segons les ordres del sistema de control electrònic regula l'angle de pas de la pala, d'aquesta manera s'aconsegueix entregar una potencia més constant.
- Sistema d'orientació. Motor azimutal que orienta el rotor en funció de la direcció del vent.
- Sistema de mesura i abalisament. Format per una estació meteorològica i sistema de mesura de les revolucions del generador. El abalisament consta de senyals lluminoses distribuïdes per la torre, normalment situades a la mitat de la torre i a la part més alta de la gòndola.
- Sistema de frenada. En cas de superar la velocitat d'aturada o en situacions de reparacions i manteniment, el sistema frena el rotor i el sistema d'orientació.
- Grua, sistema d'accés i muntacàrregues. Els aerogeneradors més grans actuals compten amb una grua a la part superior de la gòndola. El sistema d'accés a la gòndola es fa mitjançant una escala interior a la torre i un muntacàrregues.

A la Il·lustració 34 es presenta un aerogenerador de forma esquemàtica per poder visualitzar com estan integrats dins la góndola els elements anteriorment definits.



Il·lustració 36. Esquema aerogenerador offshore

Font: World Energy Trade n.d.

A continuació es troben les dimensions principals de la plataforma:

Taula 12. Dimensions de la torre WindCrete 2MW

Material	**Concrete**
Tower height (m)	51.3
Tower base radius (m)	3
Top tower thickness	1.158
Tower thickness (m)	0.35-0.20
Draft (m)	80
Buoy radius (m)	4.9
Buoy thickness (m)	0.45
Tapper length (m)	7.5
Cylinder length (m)	67.6

La plataforma consta de menys components que l'aerogenerador. Els components principals es troben a continuació:

- Senyalització: La plataforma d'accés compta amb 4 llums que indiquen la posició del conjunt, senyalitzant els quatre punts cardinals.

- Il·luminació exterior i interior: Utilitzada en maniobres de reparació i manteniment.
- Il·luminació d'emergència
- Sistema contra incendis: S'usa el mateix sistema que el de l'aerogenerador, anteriorment descrit. A més del sistema automàtic de ruixadors també es disposa de extintors a la zona d'accés i la zona central de la plataforma.
- Sistema de comunicacions: Connectat al lloc de control i al sistema d'alarma vinculat al parc eòlic. També es disposa de radio VHF.
- Grup generador d'emergència: Aquest generador ha de ser capaç de subministrar corrent a l'estació de ràdio, l'alarma, els detectors CI i la il·luminació d'emergència.

A continuació es troba una estimació de la potencia necessària que ha d'entregar:

Taula 13. Estimació de potencia per el generador d'emergència

Item	Qty	Potencia unitaria (W)	Potencia (W)
VHF	2	180	360
Alarma	1	230	230
Il·luminació d'emergència	20	60	1200
Detector contra incendi	25	15	375
Total			**2165**

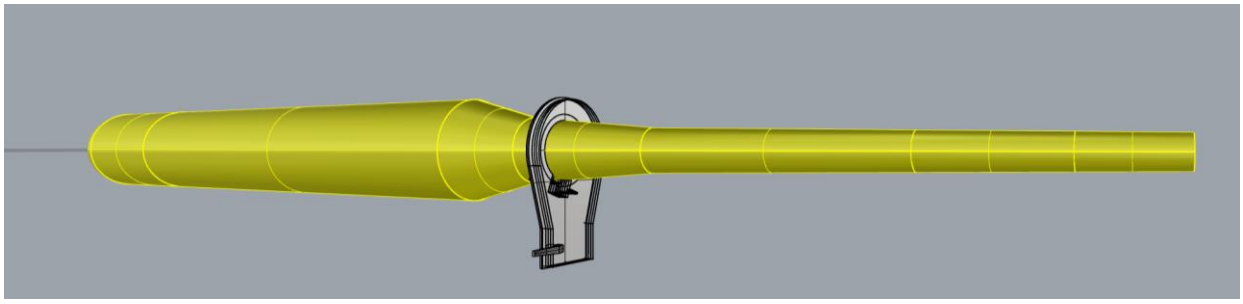
Font: Elaboració pròpia

De manera que el consum total que ha de poder subministrar és de 2165 W. Per calcular el grup de bateries necessàries bastaria aplicar la següent fórmula i el factor de seguretat de nivell de descàrrega.

$$q = \frac{P}{V} \text{ [Ah]}$$

- Elements de seguretat definits en el SOLAS: Kit de salvament, kit de senyalització pirotècnic i farmaciola degudament homologats.
- Sistema d'estesa i connexions del cablejat
- Sistema de fondeig
- Plataforma d'accés

Als tres últims elements es defineixen amb més detall a les pàgines futures.



Il·lustració 37. Modelat 3D WindCrete 2MW
Font: Elaboració pròpia

Item	WindCrete 2MW
Displaced vol. (m^3)	5.713e+03
Center of buoyancy Height (m) from MSL	-40.47
c_{33} (N/m)	2.843e+05
c_{44} $(N \cdot \frac{m}{rad})$	-2.324e+09
c_{55} $(N \cdot \frac{m}{rad})$	-2.324e+09

Taula 14. Propietats hidrodinàmiques bàsiques
Font: Elaboració pròpia

MASES

Per calcular la massa total de la torre i la plataforma es necessari conèixer el volum i la densitat de cada una de les parts que la conformen.

$$M = V \times \rho$$

El disseny monolític està compost de formigó pretesat, format per estructures de formigó sotmesos intencionadament a esforços de compressió previs a la seva posada en servei. Aquests esforços s'aconsegueixen mitjançant reforços d'acer que són tibats i ancorats al formigó.

Aquesta tècnica s'empra per superar la debilitat natural del formigó enfront esforços de tracció. Aquesta va ser patentada per Eugène Freyssinet en el 1920 (Lacroix, R., & Fuentes, A. (1970). *Hormigón pretensado*. Reverte).

A continuació s'exposa una taula amb les diferents masses obtingudes:

Taula 15. Materials WindCrete 2MW

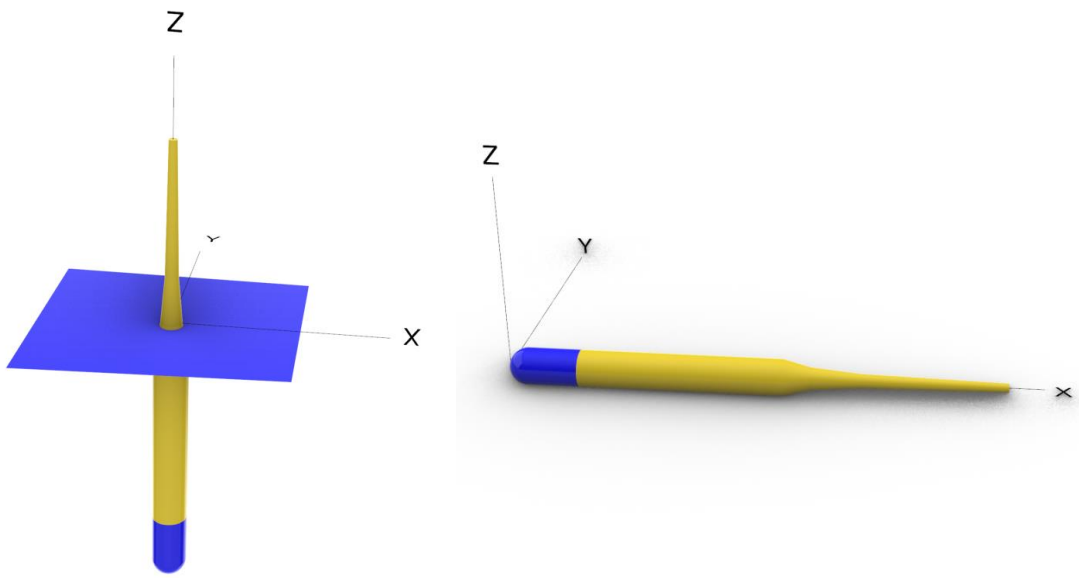
Item	Density (kg/m3)	Volum (m3)	Mass (ton)
Concrete HP-60	2400	1.2064e+03	2894.4
Ballast	2500	1.088e+03	2719
Passive Steel B-500-S	7850	10.77	84.6
Active steel Y-1860-S7	7850	5.3121	41.7
Total mass			**5739.7**

Font: Elaboració pròpia

De manera que a la torre trobem 1.2e+03 m3 de formigó HP-60 amb una densitat de 2400 Kg/m3, acer passiu B-500-S amb un volum de 10.77 m3, acer actiu Y-1860-S7 amb un volum de 5.3121 m3 i una densitat de 7850 kg/m3 i finalment un llast sòlid de 1088 m3 amb una densitat de 2500 kg/m3.

Taula de centres de gravetat

Per calcular els centres de gravetat es necessari situar primer els eixos de referencia a partir dels quals es mesuren les coordenades dels diferents punts. Aquests eixos de referència estan situats de tal manera:



Il·lustració 38. Eixos de referencia

Font: Pròpia

Quan la plataforma es troba en posició vertical, el centre d'abscisses s'ha fixat a l'altura de la MSL (80m des de la part més baixa de la plataforma) i al centre geomètric del cilindre.

Mentre que, quan la plataforma es troba en posició horitzontal (durant l'operació de transport), l'origen de coordenades s'ha posicionat a la perpendicular de popa on talla el MSL amb el centre geomètric del cilindre.

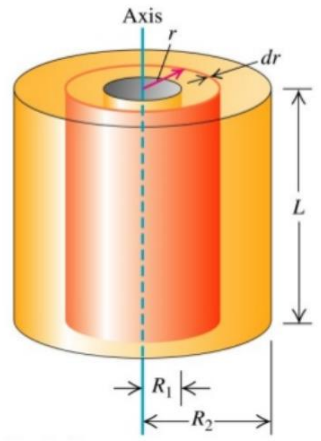
Taula 16. Centres de gravetat en posició vertical

Part de la FWT	**CX**	**CY**	**CZ**
Plataforma amb llast sòlid	0	0	-49.67
Aerogenerador VESTAS V80 2MW	-0.2	0	51.3

Font: Elaboració pròpia

Una vegada obtingut els centres de gravetat procedim a calcular els moments d'inèrcies.

Per calcular el moment d'inèrcia d'un cilindre foradat s'ha de considerar la massa, el radi interior, el radi exterior i la altura. Un pic definits els següents paràmetres ja es procedeix a calcular el moment de inèrcia respecte al seu eix de simetria (eix Z) mitjançant la següent fórmula:



$$I = \int r^2 \, dm$$

És a dir, com es pot observar a la fórmula, la inèrcia del nostre volum dependrà de la distància a l'eix de simetria i del seu diferencial de massa. I el *dm* per un volum es pot descriure com $dm = \rho \, dV$.

Si es desenvolupa l'integral s'arriba a la següent expressió:

$$\boldsymbol{I} = \int_{R_1}^{R_2} r^2 \rho (2\pi r L) \, dr = \frac{2\pi\rho L}{4}(R_2^4 - R_1^4) = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}\boldsymbol{M}\left(\boldsymbol{R_1^2} + \boldsymbol{R_2^2}\right)$$

El cos de la plataforma, al no ser un únic cilindre definit i al tenir radis exteriors i interiors que varien (així com també els espessors), es podria fer una bona estimació dividint la

plataforma en porcions similars i després interpolar-los, per facilitar i guanyar precisió en el càlcul s'ha utilitzat el software *Maxsurf* d'on hem obtingut els següents resultats:

Taula 17. Inèrcies de la plataforma

Item	WindCrete 2MW
Mass (kg)	5.736×10^6
Ixx $(kg \times m^2)$ from CM	4.926e+09
Iyy $(kg \times m^2)$ from CM	4.926e+09
Izz $(kg \times m^2)$ from CM	8.159e+07

Font: Elaboració pròpia

Subsistema Plataforma de Accés

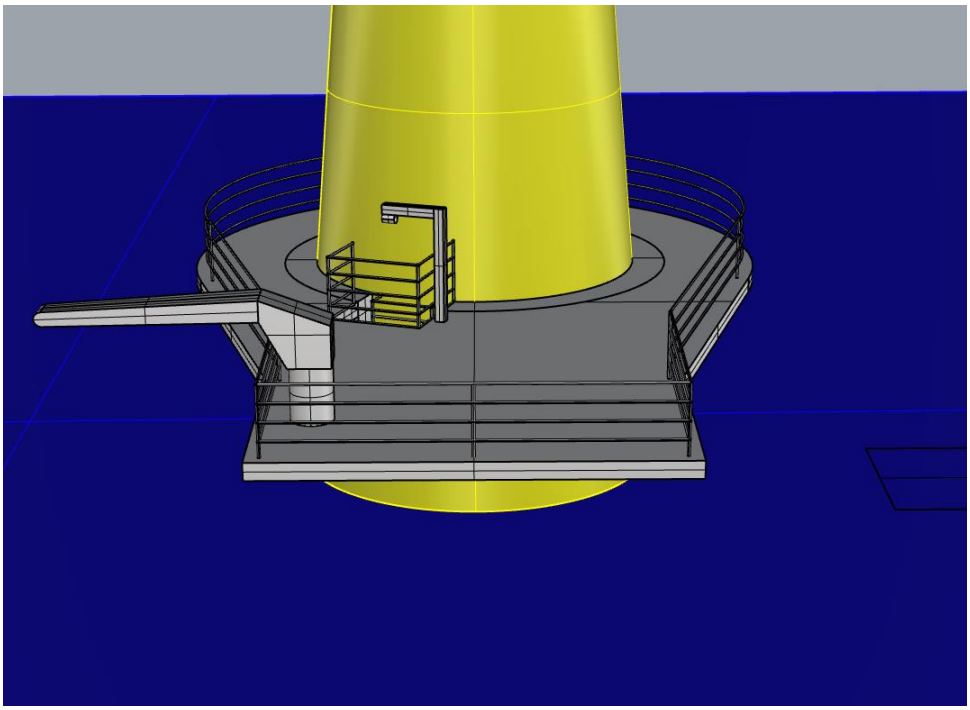
La plataforma esta composta principalment per els següents components:

- Plataforma: Consisteix en una superfície de 75.25 metres quadrats. Aquesta es troba a una altura del MSL de 3.5 m. I s'utilitza com a mitjà d'accés a la turbina per tasques d'IMR (Inspecció, Manteniment i Reparació).
- Barana: Es troba situada a l'extrem de la plataforma amb una altura d'1 m.
- Escala d'accés a la plataforma: S'utilitza per accedir del vaixell CTV a la plataforma.
- Muntacàrregues: A sobre de l'escotilla de l'escala d'accés es troba un muntacàrregues compost per una biga en forma de "L" equipada amb un motor elèctric.
- Grua hidràulica: S'ha seleccionat l'opció comercial d'una grua *Palfinger* especialment dissenyada per descarregar els vaixells de subministrament de recanvis, de manera ràpida i segura en qualsevol condició del mar. La grua disposa de llibertat de moviment rotacional, elevació/descens i entrada i sortida de la secció telescòpica. El rang d'abast del braç telescòpic va de 0.5 a 4 m. El control és manual amb cablejat resistent a l'aigua i la càrrega màxima de treball és de 3000 kg.

Il·lustració 39. Palfinger Stiff Boom Crane Hydraulic PSM

Font: Palfinger n.d.

- Elements d'amarrament: Es troben norais i bites per amarrar qualsevol vaixell durant les tasques d'IMR.
- Senyalització lluminosa.
- Il·luminació de treball i d'emergència.



Il·lustració 40. Detall plataforma d'accés

Font: Pròpia

Capítol 6. Introducció a la Hidrodinàmica

6.1. Equilibri

Força gravitacional i de flotació

L'equilibri flotant s'aconsegueix mitjançant l'equilibri entre el pes del sistema i la força de flotabilitat. La força de flotabilitat deriva del principi d'Arquímedes, dient que qualsevol objecte que estigui parcialment o totalment immers en un fluid està afavorit per una força igual al pes del fluid que el cos desplaça. El pes del volum desplaçat és igual a la multiplicació entre el volum, la densitat del fluid i l'acceleració gravitatòria. L'equació 9 mostra la relació entre la força de flotabilitat (Fb) i el pes del sistema (Fg), que actuen en direccions oposades:

$$F_B - F_G = \rho \omega g V - mg = 0$$

Equació 9

El pes del sistema comprèn la subestructura, incloent material d'acer i formigó, i la turbina en el cas de trobar-se acoblada. Un cop conegut el pes total, és possible estimar el volum submergit, sabent que la densitat de l'aigua del mar és de 1025 kg / m3 i l'acceleració per gravetat 9,81 m / s2.

El següent pas consisteix en el càlcul del centre de gravetat. El COG, es pot determinar per la suma de la massa única multiplicada per la seva posició, dividida per la suma de masses. Tots els conceptes de plataformes *offshore* tipus SPAR són simètrics, de manera que només s'hauria d'estimar la posició vertical al llarg de l'eix z del centre de massa. L'equació 10 mostra com es pot calcular la posició vertical del centre de massa.

L'índex n indica les diferents parts del sistema, z és la coordenada al llarg de la vertical, Zn és la posició de COG d'una part específica i *dmn* és la massa d'una part específica.

$$COG_z = \frac{\sum_{i=1}^{n} z_n \, dm_n}{\sum_{i=1}^{n} dm_n}$$

Equació 10

La posició de la força de flotabilitat ve determinada pel centre de massa del fluid desplaçat, en aquest cas l'aigua de mar. El centre de flotabilitat es defineix com la multiplicació entre el centre volumètric de cada part submergida i el volum submergit, dividit pel desplaçament total del volum. L'índex n indica les parts submergides de l'estructura, dVn és el volum d'una part específica i zbn és la coordenada del centre volumètric de la peça.

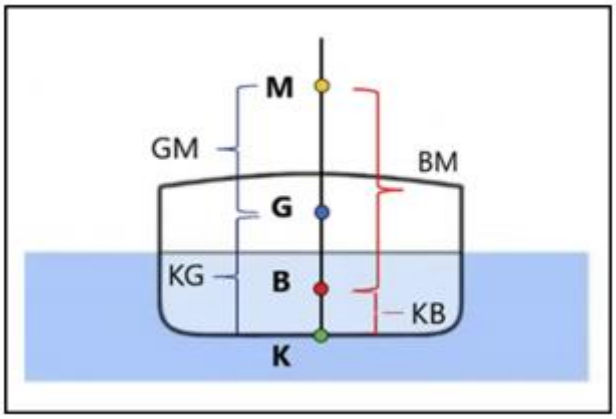
$$COB_z = \frac{\sum_{i=1}^{n} z_{bn}\, dV_n}{\sum_{i=1}^{n} dV_n}$$

Equació 11

6.2. Altura metacèntrica

L'estabilitat es defineix com la capacitat d'un sistema per gestionar les pertorbacions, com les ones, el corrent i el vent. El paràmetre més significatiu d'estabilitat estàtica és l'altura metacèntrica, denominada GM, que es defineix com la distància entre el centre de gravetat i el metacentre. A la figura 6, hi trobem una representació de la secció transversal de la plataforma. On, G és el centre de gravetat, B és el centre de flotabilitat, K és la quilla (línia base) de l'estructura i M és el metacentre. El metacentre és un punt fictici situat a la intersecció entre la línia central de l'estructura i una línia vertical des del centre de flotabilitat.

Taula 18. Estabilitat estàtica



Font: apunts de l'assignatura Teoria del Vaixell

Si l'alçada metacèntrica és positiva, el cos flotant es caracteritza per una estabilitat estàtica inicial i, en presència de forces pertorbadores, torna a la posició original. En canvi, si l'alçada metacèntrica és negativa, l'estructura no pot tornar a la posició original i continua girant-se. En conseqüència, l'estructura és inestable i s'ha de modificar.

L'estàndard de la DNVGL, OS-C301 estableix que per al concepte de plataforma SPAR, l'alçada metacèntrica ha de ser superior a un metre, per tal de garantir una estabilitat estàtica suficient. Per a angles d'escora petits, inferiors a 10 graus, es suposa que GM és constant i ve donada per l'Equació 12:

$$GM = BM + KB - KG$$

Equació 12

On BM és la distància del metacentre al COB, també anomenat radi metacèntric, i ve donada per l'equació 13; KB és la distància de la quilla a COB; i KG és la distància de la quilla al COG.

El radi metacèntric es pot calcular mitjançant:

$$BM = \frac{I}{V}$$

Equació 13

On I és el segon moment de l'àrea del pla de flotació i V és el volum desplaçat de l'estructura. El segon moment d'àrea, sovint anomenat moment d'inèrcia, ve donat per l'equació 14:

$$I = \int_A x^2 \, dA = I_0 + d^2 A$$

Equació 14

El terme Io descriu el moment d'inèrcia d'un element amb l'eix de referència en el seu centroide; el segon terme és la contribució de *Steiner* i prové del desplaçament entre el punt central real i la part considerada.

6.3. Matriu hidroestàtica de rigidesa

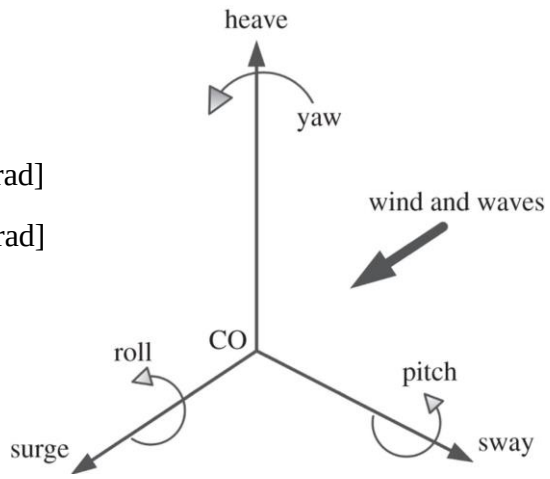
La matriu de rigidesa hidrostàtica defineix la capacitat de moviment de un cos submergit en torn als seus eixos. A continuació és troba una il·lustració on es defineixen els moviments i els graus de llibertat de l'estructura.

Cada una de les components, es poden calcular mitjançant les següents fórmules:

HEAVE (Z AXIS)→ $C_{33} = \rho w g A_{WL}$ [N/m]

ROLL (X AXIS)→ $C_{44} = \rho w g V \cdot GM$ [Nm/rad]

PITCH (Y AXIS)→ $C_{55} = \rho w g V \cdot GM$ [Nm/rad]



On;

- P_w, és la densitat de l'aigua del mar, assumida com a 105 kg / m^3.
- g és l'acceleració per gravetat, assumida com a 9,81 m / s^2
- A és l'àrea del pla de flotació de l'estructura
- V és el volum submergit.
- GM, és l'altura metacèntrica

6.4. Estabilitat dinámica (a grans angles)

L'estabilitat inicial ha de ser prèviament assegurada mitjançant un GM >1. Pel que fa a l'estabilitat a grans angles, s'ha de complir la condició que el braç d'adreçament correspongui amb l'angle de l'escora amb una dinàmic màxima menor al 60% del màxim d'aquest braç d'adreçament. Així ho explica la següent formula.

$$GZ(\theta_{din}) \leq 0,6 \cdot GZ_{max}$$

En el nostre cas, la normativa DNV, així com ABS, BV, API exigeixen un GM mínim de 1 metre per a la realització de qualsevol operació a alta mar.

Capítol 7. Operacions marines

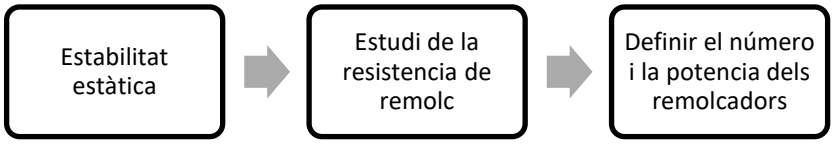
7.1. Introducció

L'objectiu d'aquest capítol és definir el procés de transport, instal·lació, manteniment i reparació de la plataforma. Una vegada analitzades les operatives s'establirà la seqüencia temporal dels passos a seguir.

El remolcament d'estructures *offshore* és una de les operacions marines més comunes, ja que tots els projectes *offshore* involucren l'operació de transport en una de les seves fases.

Tota vegada ja s'han definit els DLC's a estudiar es procedirà a fer l'estudi comparatiu de transport i estabilitat de la plataforma WindCrete 2MW tenint en compte una series de condicions de disseny. El transport de la plataforma tipus SPAR es realitzarà a través de remolcament per via humida ja que la seva integritat estructural garanteix la flotació i estanqueïtat per si sola.

De manera que per estudiar el seu transport es seguiran les següents pautes:



Taula 19. Procediment d'estudi operació de remolc
Font: Elaboració pròpia

L'estratègia del transport i la instal·lació és el factor crític del desenvolupament del TFG. Per tal de garantir l'estabilitat del sistema durant el transport es sol usar llast, tant fix com temporal, de manera que una cosa condiciona a l'altra. Per aquesta raó, s'ha decidit estudiar el transport en varies condicions de llast, a les següents pàgines és defineixen els casos d'estudi.

En quant a la pregunta de si serà possible transportar la plataforma directament en vertical, amb la turbina muntada, està clar que des del punt de vista econòmic seria una gran avantatge, ja que ens podríem estalviar grans costos de grues flotants i estalviar el número d'operacions. Per altra banda des del punt de vista tècnic, instal·lar la turbina a un lloc resguardat a prop de la costa i després remolcar tot el conjunt a alta mar és més còmode, ràpid i segur. Així i tot, transportar el conjunt complet en posició vertical, condueix a un major risc, ja que el conjunt en la seva totalitat serà més inestable que per separat. A aquest capítol mirarem d'obtindre les respostes a aquesta qüestió, comparant les posicions

resultants de la plataforma i els radis metacèntrics (GM's) de cada cas per tal de prendre una bona decisió.

Una cosa que està clara i s'ha de tenir en compte des del principi, és que és imprescindible minimitzar al màxim el número i duració de les operacions realitzades a alta mar, bàsicament pel cost que impliquen i la dificultat de treballar en les condicions del medi, les quals augmenten el risc considerablement.

En quant al llast a usar, la idea és dotar a la plataforma d'un sistema de bombeig d'aigua de llast per poder regular el calat i la inclinació durant l'operació del transport, i un pic arribat a l'emplaçament, al tenir la plataforma en vertical, dotar-la de llast sòlid a mesura que es treu aigua de llast.

Finalment s'establiran els períodes d'inspecció i manteniment d'acord amb la normativa de la DNVGL *" Periodic Monitoring of FOWTs".*

7.2. Condicions meteorològiques durant l'operativa

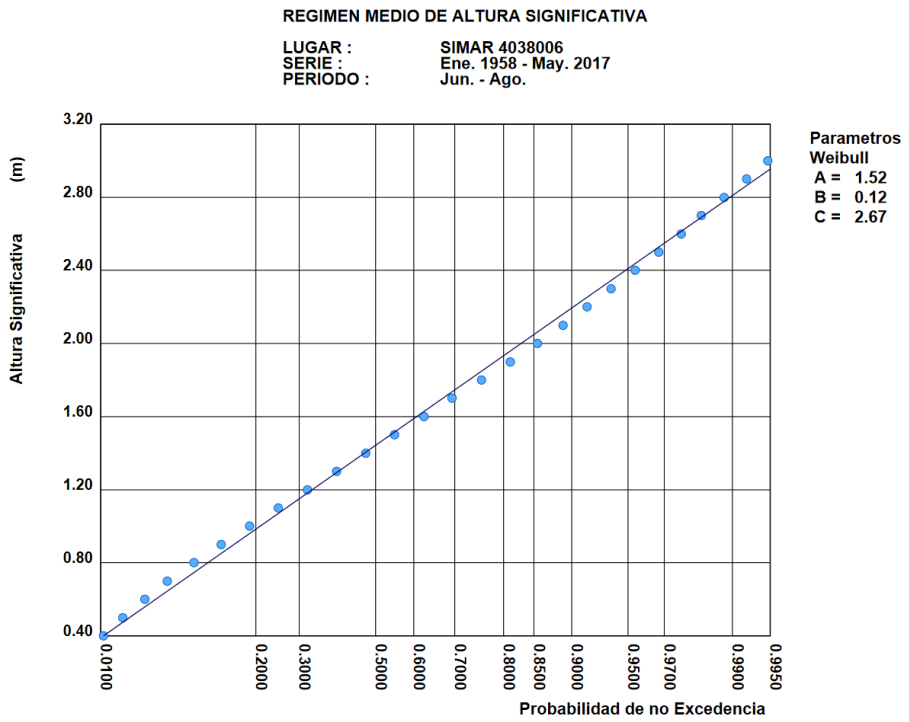
Supòsits, constants i notes que s'han tingut en compte durant el capítol:

- Gravetat de 9.8 m/s2
- Profunditat uniforme de 200m
- Seguiment dels estàndards de la DNV GL *"Sea Transport and Offshore installation"*
- No es té en compte l'efecte del fons marí a la resistència.
- No es tenen en compte les corrents

Per poder realitzar l'operació de transport s'haurà de seleccionar un període de temps en que s'asseguri la integritat de l'operació a costa d'unes condicions meteorològiques suaus.

Per un règim normal d'onatge, el període de condicions més suaus és l'època estival entre juny i agost.

Per un període de retorn de 3 mesos, l'ajustament de l'altura significativa de l'onatge és el següent:



L'altura de l'ona significativa associada a la probabilitat de no excedència, amb l'ajustament de Weibull, ve donada per la següent fórmula:

$$H_s(P) = A - ln\,1 - P^{1/c} + B$$

P= Probabilitat de no excedència= 0.99

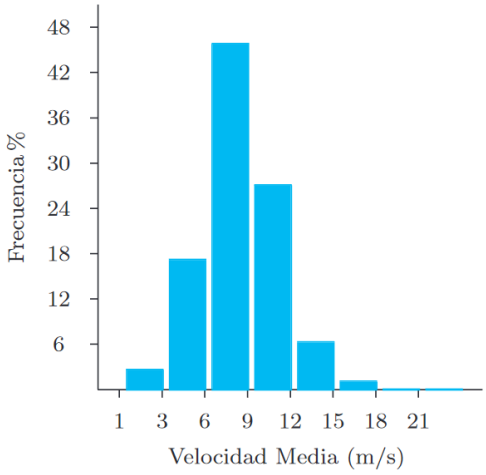
Probabilitat ocurrència= 1%

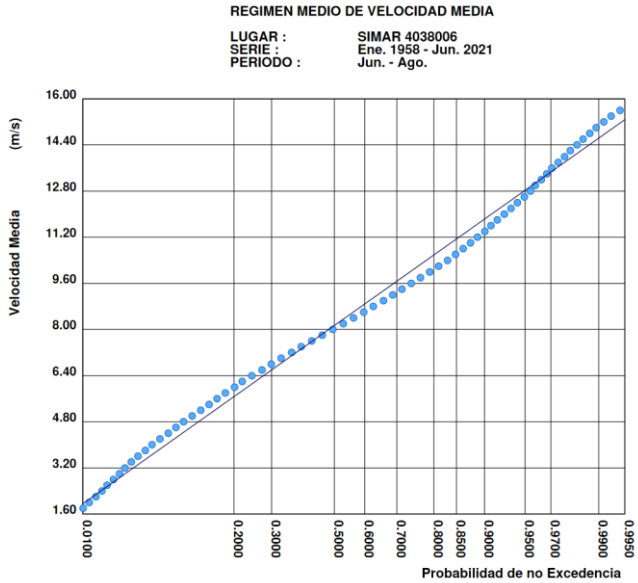
$$H_s(0{,}99) = 0.644\ m$$

De manera, que l'ona màxima esperada durant el període estival de 3 mesos serà:

$$\boldsymbol{H_{max,T}} = 1.86 \times H_{s,T} = 1.86 \times 0.644 = 1.197\ m \sim \mathbf{1.2\ m}$$

El període associat a aquesta altura significativa a GC és de 5.6 s i la distribució de probabilitat del vent serà un perfil NNE. Per determinar la velocitat del vent durant el mateix període, a continuació es troba la freqüència de distribució de vent mitjà pel període de Juny a Agost:





Paràmetres	Valor
A	1.52
B	0.12
C	2.67

Aplicant la fórmula de l'ajustament de Weibull es determina que la velocitat esperada serà de Vs= 8.13 m/s

De manera que seguint la normativa de la DNVGL "*Design Load Cases*", les condicions de transport i instal·lació del DLC 8.2, els paràmetres seran els següents:

Paràmetre		**Magnitud**
Altura màxima d'onatge	Hs,t	1.2 m
Període de l'onatge	Tt	5.6 s
Període de retorn	Trt	3 mesos
Finestra de temps	t	Juny - Agost
Direcció predominant de l'onatge		NNE (22.5º)
Velocitat mitjana del vent	v	8.13 m/s
Direcció predominant del vent		NNE (22.5 º)
Velocitat corrent mitjana	Uc	49.2 cm/s
Direcció predominant de la corrent		NNE-SE (~65º)

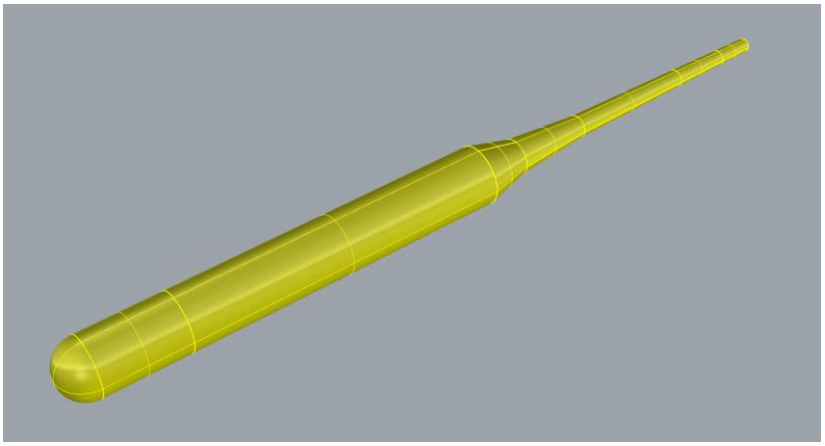
Taula 20. Paràmetres ambientals per la instal·lació

Font: Elaboració pròpia

7.3. Operació de transport

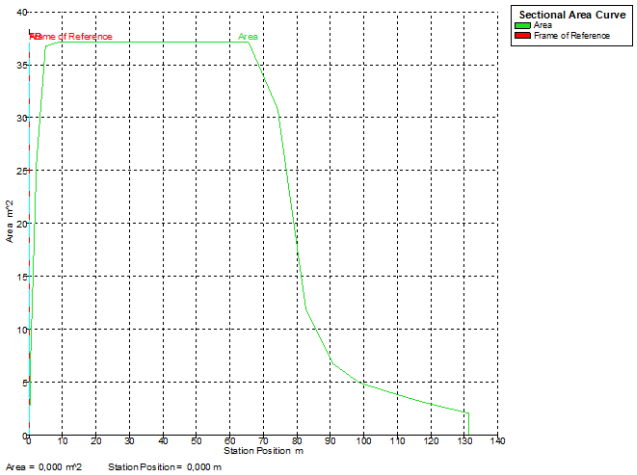
A priori, el transport per via humida sembla ser el sistema més convenient, ja que, l'estructura presenta formes relativament hidrodinàmiques per ser remolcada i les condicions ambientals de l'emplaçament, com s'ha vist en els apartats anteriors no són molt adverses. Un altra punt a favor, és que la distància de la ruta és bastant curta. Sortint de la drassana ASTICAN, s'ha comprovat que la distància a recórrer és de 28.0 milles nàutiques.

Per tal d'estudiar la resistència que oposa al remolcament, es procedirà a modelar les formes de la plataforma mitjançant l'eina informàtica Rhinocerous.



Il·lustració 41. Modelatge 3d WindCrete 2MW
Font: Elaboració pròpia

Una vegada obtingut el model en tres dimensions es procedeix a exportar les formes al programa *MaxSurf*, en aquest apartat s'han usat els quatre mòduls del programa: *Modeler, Resistance, Stability i Motions.* Un cop exportada al programa, mitjançant la gràfica de corba d'àrees es comprova que s'ha importat adequadament la superfície creada.

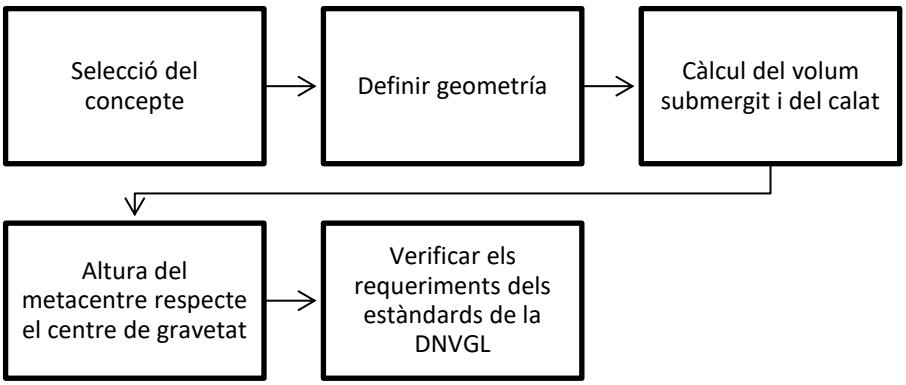


Taula 21. WindCrete 2 MW area curve
Font: Elaboració pròpia mitjançant el programa MaxSurf

El primer pas a seguir es calcular les hidrostàtiques inicials de la plataforma sense llast (ni líquid ni sòlid) el que ens permetrà verificar l'estabilitat estàtica resultant.

L'esquema del procediment de càlcul es troba a la Figura 42. Aplicant el principi d'Arquímedes anteriorment explicat, es determina el volum submergit i el calat. Desprès s'estimen les coordenades del centre de gravetat (COG) i finalment el centre de flotació (COB).

El primer paràmetre hidrostàtic de gran rellevància és l'altura metacèntrica transversal (GMt), si aquesta és major a zero el sistema es pot considerar estable, de no ser així, el sistema serà inestable i la geometria o la distribució de pesos haurà de ser modificada.



Il·lustració 42. Esquema del procediment d'estudi de l'estabilitat estàtica
Font: Elaboració pròpia

A continuació es troba una taula resum dels desplaçaments a tenir en compte per a cada situació de càrrega, LC1 correspon al transport en horitzontal i LC2 al transport en vertical sense turbina.

Load Case	Displacement [ton]	Description
LC1	3021	Platform w/out ballast
LC1.1	3621	Platform w/ 600t water ballast
LC2	5736	Platform w/ solid ballast (+2715,3 ton)

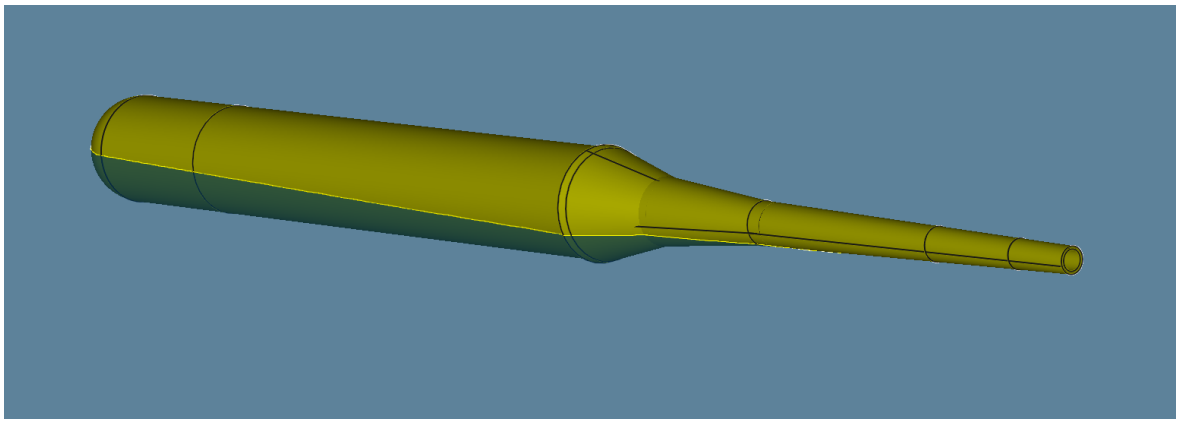
Taula 22. Load Cases
Font: Elaboració pròpia

7.3.1. Transport en horitzontal

A continuació es presenten els paràmetres rellevants de les hidrostàtiques obtingudes en posició horitzontal, la resta de paràmetres es completen als annexes.

LC1 - Estabilitat inicial sense llast	
Paràmetre	**Magnitud**
Vol. Desplaçat	2947
Desplaçament Δ	3020.7 ton
Calat	6.572 m
Trim (+ve by Stern)	4.158 m
WL lenght	105.049 m
KB	-1.802
BMt= Io/Δ	1.795 m
GMt	-0.008 m
TPc	7.201 ton/cm

Taula 23. Hydrostatics LC1
Font: Elaboració pròpia



Taula 24. Render LC1
Font: Elaboració pròpia

Analitzant els resultats, obtenim que el GMt (radi metacèntric transversal) és de -0.008 m de manera que al tenir un valor negatiu el sistema no serà prou estable. Per aconseguir augmentar el GM s'haurà de augmentar la inèrcia en la flotació o llastrar més la plataforma. Davant aquesta problemàtica es decideix llastrar el sistema amb llast líquid, la plataforma al tenir un TPc (Tones per cm de immersió) de 7.2 t/cm es prova a incorporar 600 tones de aigua de mar. El que representaria 585.36 m3 d'aigua amb una densitat de 1025 kg/m3.

L'opció de utilitzar llast líquid té la avantatge de ser fàcilment allotjat i desallotjat de la plataforma mitjançant l'ús de bombes, però també té la desavantatge de haver d'incorporar un sistema de llast i transvasament. El disseny del sistema de llast es presenta al Capítol 8.

Per altra banda, pel que afecta a l'estabilitat, aquesta també es veurà compromesa per l'efecte de superfícies lliures del fluid.

Després de varies proves, s'ha vist que per augmentar el radi metacèntric, calia disposar l'aigua de llast en una determinada zona estratègica dins la plataforma, de manera que s'ha disposat un compartiment estanc que va des de 44 m fins a 65 m de la Lpp (perpendicular de popa). Aquest compartiment disposa d'una capacitat de 1322.46 tones d'aigua de llast, dels quals s'han utilitzat per l'operació 600 ton, representant un 45.37% de la capacitat total disponible.

Una vegada incorporades les 600 tones d'aigua de llast els paràmetres hidrostàtics resultants són els següents:

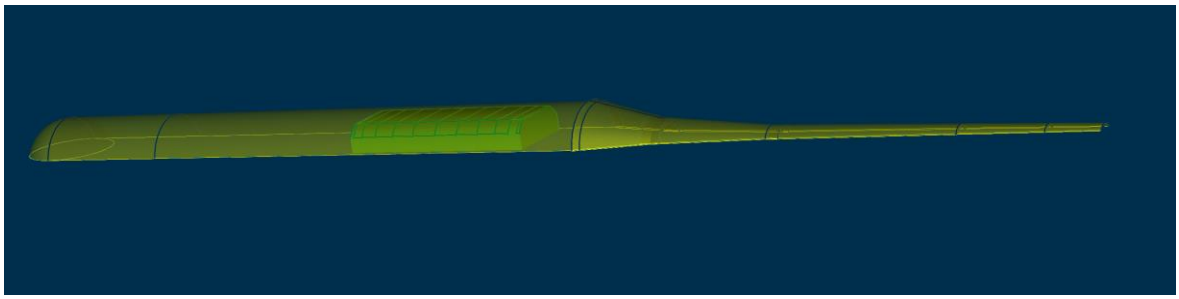
LC1.1 - Estabilitat inicial amb llast líquid	
Paràmetre	**Magnitud**
Desplaçament Δ	3620.7 ton
Calat	6.317 m
Trim (+ve by Stern)	0.830 m
WL lenght	131.09 m
KB	-1.441
BMt= Io/Δ	1.431 m
GMt	+0.086 m
TPc	7.201 ton/cm

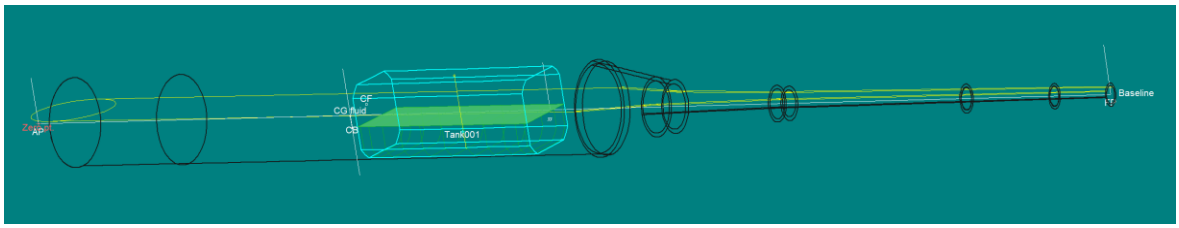
Taula 25. Hydrostatics LC1.1
Font: Elaboració pròpia

Com es pot observar tant de forma analítica, com gràfica (a la pàgina següent), la plataforma es troba casi en assentament zero, ja que l'eix central de la plataforma a proa únicament es troba 0.83 m per sobre de la MSL, mentre que anteriorment es trobava empopada, deixant una proa sobre el nivell del mar de 4.16 m. A conseqüència també s'ha augmentat la Lwl (eslora de flotació) de 105 m a 131.09 m, quasi la totalitat de la eslora total.

Amb la incorporació del llast, líquid també s'ha aconseguit augmentar el GM considerablement, passant de tenir un valor negatiu a +0.086 m. És a dir amb la modificació del llast, en la posició indicada, la plataforma serà més estable, de manera que davant una pertorbació la plataforma no tendirà a rotar sobre el seu eix.

Posició del comportament d'aigua de llast i trimatge de la plataforma per LC1.1





Taula 26. LC1.1 render
Font: Elaboració pròpia

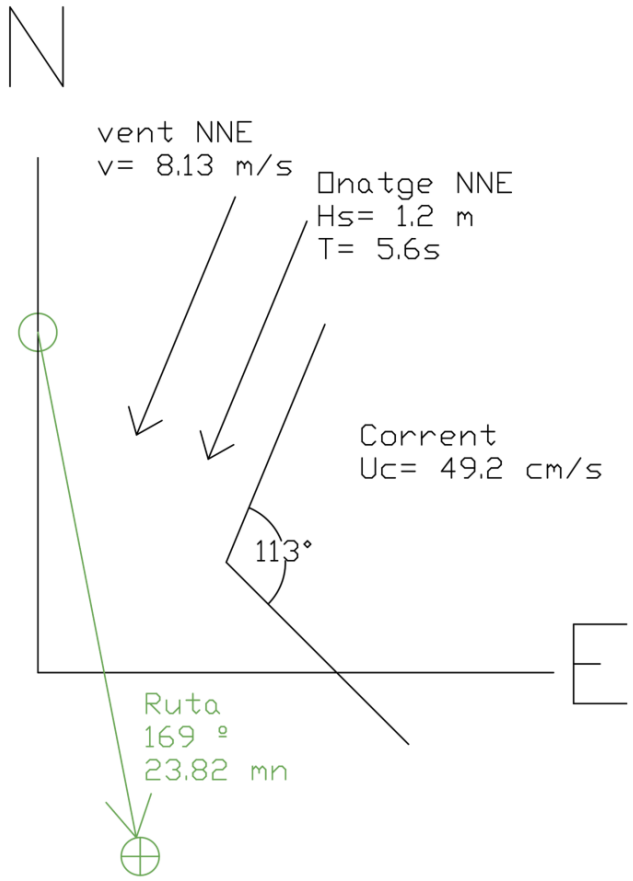
Càlcul de la resistència de remolc

El següent pas, és calcular la resistència que oposarà al remolc per calcular la tensió de tir que hauran d'aportar els remolcadors. Per això s'estudiarà la resistència a l'avanç de la plataforma en les condicions meteorològiques calculades a l'Apartat 7.1.

La resistència total per a diferents estats del mar es pot descriure mitjançant quatre tipus diferents de resistència: fricció superficial (d'origen viscos), pèrdua d'energia a causa de la generació d'ones de la plataforma, per l'onatge de disseny, pèrdua d'energia a causa del corrent i resistència al vent. Per al remolc a baixa velocitat, la fricció superficial és majoritària i la resistència per formació d'ones es casi negligible.

Per poder calcular la resistència que oposa l'efecte del vent sobre l'obra morta i el de la corrent sobre l'obra viva, s'ha de tenir en compte la direcció i el mòdul de cada una de les components.

A continuació, es presenten els angles d'incidència de les condicions meteorològiques esperades durant la ruta:



Il·lustració 43. Estat de mar durant el transport
Font: Elaboració pròpia

La major part de l'operació, el vent i l'onatge entrarà per l'aleta de babord, i la corrent al no estar del tot definida, podria venir tant de l'aleta de babord com de l'amura de babord. De manera que s'ha decidit estudiar 2 casos: el primer cas, on les tres components ens venen totalment a favor i el segon cas, tenint en compte les condicions més desfavorables possibles, de manera que totes les components vagin en sentit contrari al moviment.

En aquest document, la resistència al remolc es calcularà a partir des següents mètodes:

- Amb l'eina informàtica *Maxsurf*, mitjançant el mètode recomanat pel programa, en funció dels paràmetres geomètrics de la plataforma.
- Fórmules empíriques, mitjançant full de càlcul. (ITTC + Morison)

La força de remolc augmentarà exponencialment amb l'increment de la velocitat, de manera que s'estudiarà la resistència per les velocitats compreses entre 1 i 4 nusos, amb un interval de mig nus entre elles.

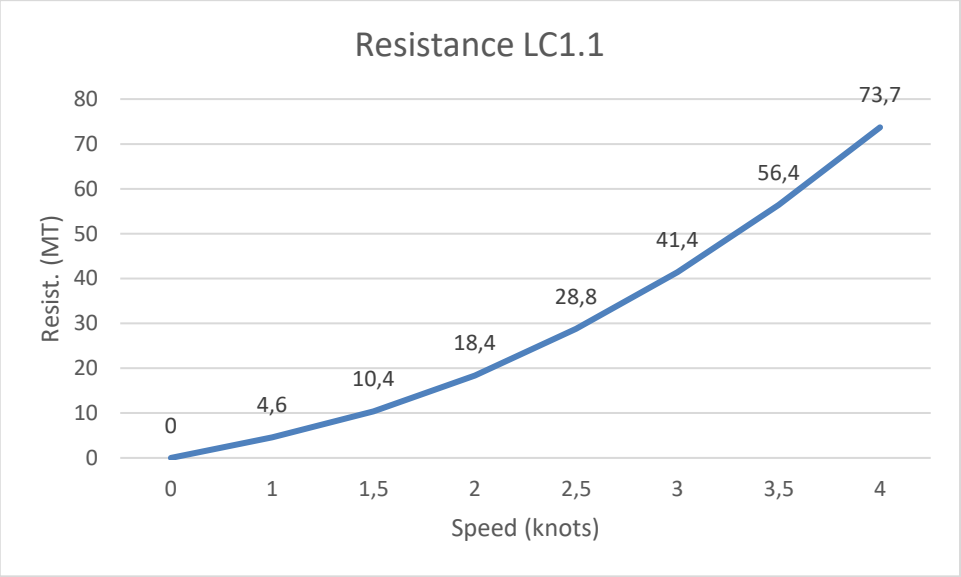
Mètode KR Barge – *MaxSurf Resistance*

A la gràfica inferior s'observa la relació entre la velocitat mitja en nusos a l'eix d'abscisses i la resistència en tones mètriques a l'eix d'ordenades, d'acord al mètode KR Barge. També es presenten els resultats del càlcul de la resistència superficial de la plataforma en forma de taula.

Forces de remolc mitjançant el Mètode KR Barge– LC1.1 Hydrostatics

KR Barge method			
Speed (knots)	**Froude No. LWL**	**Froude No. Vol**	**Resistance MT**
0	0	0	--
1	0,015	0,041	4,6
1,5	0,023	0,061	10,4
2	0,03	0,081	18,4
2,5	0,038	0,102	28,8
3	0,046	0,122	41,4
3,5	0,053	0,142	56,4
4	0,061	0,163	73,7

Taula 27. LC1.1 Resistance vs speed
Font: Elaboració pròpia



Il·lustració 44 Resistance vs Speed LC1.1

Font: Elaboració pròpia

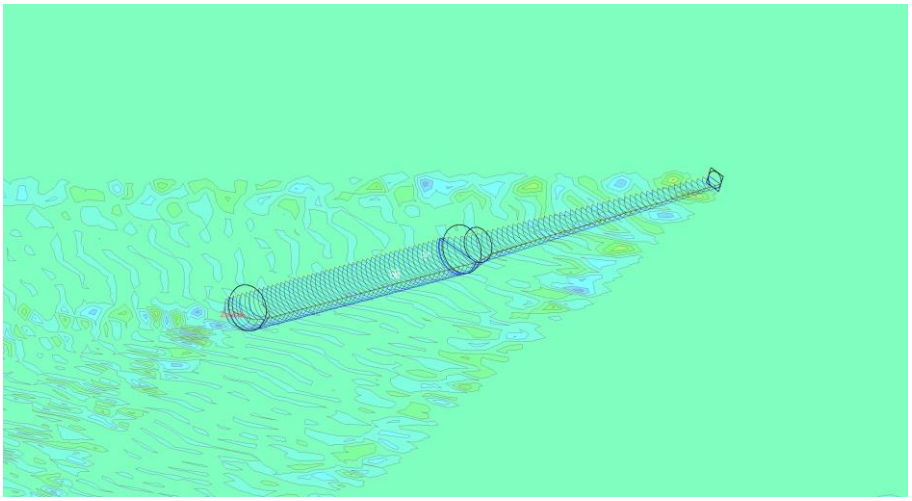
Observant els resultats obtinguts del perfil de resistències, s'elegeix a priori una velocitat de remolc per la situació de carga LC1.1 de 2.5 nusos, on la plataforma proporciona 28.8 KN (2.94 MT) de resistència superficial per aigües tranquil·les.

A continuació es consideraran les resistències per formació de trens de ones, de l'onatge de disseny, la corrent i el vent, per tal de poder deduir el MBP *(Maximum Bollard Pull)* i poder comprovar que la velocitat de remolc és l'adequada.

Un cop obtingut el BP efectiu per la velocitat de remolc de disseny, es definiran les característiques dels remolcadors i la longitud i pes de les línies de remolc.

Resistència per formació d'ones

Per una velocitat de servei de 2.5 nusos, s'obté el següent perfil d'estela:



Il·lustració 45. Estela per formació d'ones LC1.1

Font: Elaboració pròpia

A la il·lustració superior, s'observa el sistema d'ones divergents, que van de proa a popa, i les ones transversals que es generen.

La component que te més influència a la resistència és la transversal al moviment. Tot i que aquestes generen una pèrdua energètica, al ser tant baixes les velocitats de remolc estudiades, s'ha comprovat que els resultats de la resistència resultant són pràcticament negligibles, pel que no es tindran en compte.

Força que exerceix el vent sobre l'obra morta de la plataforma

A continuació, es calcula la força exercida pel vent. Aquesta força depèn de la velocitat d'avanç, de manera que es composen la velocitat relativa entre el vent i l'avanç de l'obra morta de la plataforma. Per el càlcul s'utilitza una reinterpretació de la fórmula de *Morison*, on per conèixer les càrregues exercides per el vent únicament s'ha de conèixer la velocitat en que incidirà sobra l'obra morta. [19]

L'equació és la següent:

$$Fwind = {}^{1}/_{2} \times Cd \times Ah \times \rho \times v^2$$

Equació 15. Equació de Morison adaptada

On:

- v és la velocitat del vent, en m/s.
- p és la densitat de l'aire, en aquest cas és de 0,00129 t/m3.
- Ah superfície de l'àrea enfrontada
- Cd *(Drag coefficent)* depèn de la geometria de l'objecte i del número de Reynolds, en aquest cas pren un valor de 0,56

Les forces obtingudes per una velocitat de la plataforma de 2.5 nusos i 8.13 m/s de vent són les següents:

Força del vent sobre la plataforma	
Situació 1. Vent de front (Ah=78,54 m2)	2.514 MT = 24,637 kN
Situació 2. Vent d'empopada (Ah=78,54 m2)	1.299 MT = 12,74 kN Per mantenir la posició
Situació 3. Vent incidint pel costat (Ah=527,5 m2)	12.59 MT= 123,382 kN

Taula 28. Wind Load 1.1

Font: Elaboració pròpia

Força que exerceix la corrent sobre l'obra viva de la plataforma

$$F_{current} = {}^{1}/_{2}\, C_D \times \rho_\omega \times V_c^2 \times A_C$$

Equació 16. Current Load 1.1

On:

- Cd és el coeficient adimensional del *drag coeficient*, pren un valor de 1.
- p és la densitat de l'aigua, és de 1,025 t/m3.

- Ac superfície de l'àrea enfrontada, en aquest cas 1898,25 m2.

Força de la corrent sobre la platafoma KN	
LC1.1 on Vc= 49,2 cm/s	0,23 MT= 2,254 KN

Font: Elaboració pròpia

Força màxima que exerceix l'onatge sobre l'obra viva de la plataforma

$$F_{current} = {}^{1}/_{16} \times \rho_{\omega} \times g \times Hs^2$$

On:

- g= 9.81 m
- Hs= 1.2 m

Força de l'onatge sobre la platafoma KN	
LC1.1	0.9 MT= 8.869 KN

Font: Elaboració pròpia

De manera que, el TPR *(Total Pull Required)* per una velocitat de 2.5 nusos és de:

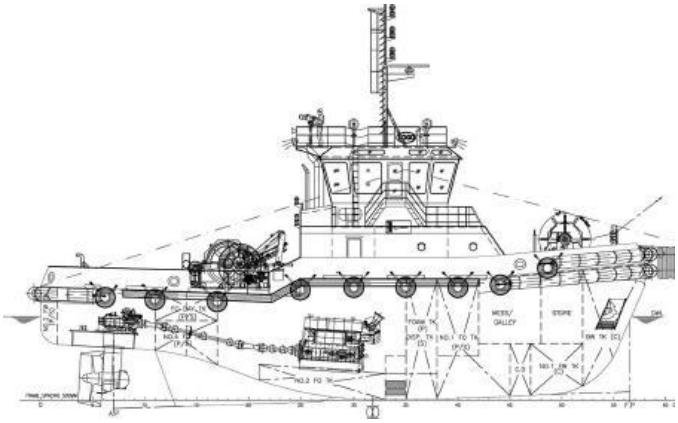
$$F_{Total} = F_{wind} + F_{waves} + F_{current} + F_{superficial}$$

Equació 17. TPR

	Força de remolc total (MT)				
V(Knots)	F vent	Fsup	Fonatge	F corrent	**F total**
2.5	2.514	28,8	0.9	0.23	**32.44 MT**

Càlcul de l'eficiència de remolc i el BP (Bollard Pull) efectiu

Per tal de calcular l'eficiència de remolc, cal elegir el remolcador, ja que aquesta depèn de l'eslora de l'embarcació. En aquest cas a priori s'ha seleccionat un remolcador de 52 TBP amb una eslora de 29.0 m, a continuació es troben el GA *(General Arrangement)* del vaixell i el càlcul de l'eficiència.



Il·lustració 46. GA 52TBP Tug boat

Característiques principals del remolcador

52 tbp ASD Escort FiFi-1 (2 sisters)	
GENERAL	
Year Built	2015
Classification	Bureau Veritas
DIMENSIONS	
Length oa	29.00 m
Width	10.50 m
Depth	4.96 m
TONNAGE	
GT / NT	351 / 105
Displacement	665 ton
Lightship	480 ton
PERFORMANCE	
Bollard Pull	52 ton
Speed Vs	11.5 Knots
DECK EQUIPMENT	
Fwd Towing winch	5T @ 20m/min, low speed @ first layer
Brake Holding	115T @ first layer
Drum Capacity	1 x 12” Circ x 200 m working towing rope

Aft towing winch	55T Hydraulic Towing winch
Towing Hook	55T with remote pneumatic release
Deck Crane	1 x SWL 435kg. Outreach: 9.4M
Tugger winch	5T Hyd Tugger winch, dia 28mm x 200m

Il·lustració 47. Tug boat selected main characteristics

Càlcul del BP eff (Bollard Pull effective)

TOTAL PULL REQUIRED			
TPR= F_wind+F_waves+F_current+F_superficial		32,44	MT
TOWIND EFFICIENCY AND EFFECTIVE BP			
LOA Tug selected 29.0m	BPT tug boat	52 MT	
Teff (%) = 80-(18-0.0417xLOAxV(BP-20))x(Hs-1)		67.48%	
Bpeff= Bptotal x Teff/100		35.09 MT	
Bpeff > TPR ?	YES		

Font: Elaboració pròpia

Com es pot comprovar a la taula anterior, el remolcador seleccionat serà suficient. Tenint en compte els *towing RPs* de la DNVGL, s'usarà un factor de seguretat entre 1,5 i 2,3. En aquest cas, s'ha elegit un factor de seguretat de 2,00 per l'operació de transport, de manera que s'usaran 2 remolcadors de característiques similars d'almenys 32,44 BPeff cada un.

A la taula 2 de l'apartat 4 de les recomanacions de remolc de la DNV, s'especifica que, per un BP de 32 tones, la longitud mínima de la línia de remolc hauria de ser de 667 m. En quant al material de les línies, si son d'acer hauran de suportar una carrega mínima de trencament (MBL) de 90 tones i si son de fibres sintètiques haurien de presentar un MBL de 207 tones.

Resistència a través de fórmules empíriques – Holtrop i Menen 1978 – LC1.1

Total resistance	
R= Rf(1+k1)+Rapp+Rw+Rb+Rdw+Rc	
Rf= Frictional Resistance as per ITTC 1957 friction fórmula	Aplica
K1= Form Factor describing viscous resistance of the Hull Form in relation to Rf	Aplica
Rapp= Resistance of Appendages	N/A
Rw= Wave Train Resistance	N/A
Rb= Additional Pressure Resistance of Bulbous Bow near Water surface	N/A
Rdw= Design Wave Load Resistance	Aplica
Rc= Current Load Resistance	Aplica
Rw= Wind Load Resisitance	
R= Rf(1+k1)+Rdw+Rc+Rwind	

Taula 29.Total calm water resistance formula

PLATFORM INPUTS			
General Particulars			
Particulars		**Value**	**Units**
Acceleration due to Gravity	g	9,81	m/s2
Density of air	ρa	1,23	kg/m3
Density of water	ρw	1025	kg/m3
Viscosity of Water	v	0,0000012	m2/s
Platform Particulars			
Particulars		**Value**	**Units**
Vessel Name		WindCrete	
Principals dimensions			
Length between perpendiculars (LBP)	LBP	131,3	m
Length of Waterline (LWL)	L	131,1	m
Breadth	B	9,882	m
Depth	D	6,317	m
Longitudinal Center of Buoyancy fwd of Midship (+ve fwd and -ve aft of Midship)	LCB	-24,986	m

Floating Status			
Mean Draft at MidShip	T	6,046	m
Trim (trim by aft +ve, by fwd -ve)	Trim	0,85	m

Coefficients			
Block Coeficient	Cb	0,434	
Midship Section Coefficient	Cm	0,865	
Waterplane Coefficient	Cw	0,542	

Font: Elaboració pròpia

Càlcul de la resistència de fricció (Rf)

La resistència de fricció en un "cilindre" remolcat al mar és majoritàriament la resistència viscosa, la qual es determina mitjançant l'equació de *Morison*, aquesta consisteix en la combinació de la inèrcia i la resistència del mateix. A continuació es troba l'equació amb els valors i resultats corresponents. Cal destacar que el resultat, al dependre del número de Reynols, depèn també de la velocitat de remolc i de la corrent. S'ha utilitzat un mòdul de 1,52 m/s, corresponent a 2.5 nusos de velocitat per la velocitat de remolc i 0,492 cm/s per la corrent.

Calculation of Frictional Resistance			
Frictional Resistance RF=1/2*ρw*S*V^2*Cf			
Particulars	**Notation**	**Value**	**Units**
Density of water	ρw	1025	kg/m3
Viscosity of Water	v	0,0000012	m2/s
Length of Waterline	LWL	131,1	m
Wetted Surface Area	S	2414	m2
Vessel Fwd Speed (adding current)	V	1,521	m/s
Reynolds number (R=VL/v)			
Reynolds Number	Rn	166169250	
Friction Coefficient (Cf = (0.075)/(logRn - 2)2)			
Friction Coefficient (ITTC 1957)	Cf	0,00193822	

Frictional Resistance	**Rf**	**55,4744026**	**MT**

Font: Elaboració pròpia

Càlcul del factor de forma (1+k1)

Calculation of Form Factor			
Form Factor (1+k1)			
Particulars	**Notation**	**Value**	**Units**
Length of Waterline (LWL)	L	131,1	m
Breadth	B	9,882	m
Prismatic Coeficient	Cp=Cb/Cm	0,5017341	
Longitudinal Center of Buoyancy	LCB	-24,986	m
LCb as % of L		-0,3	
Lenght of Run (Lr= Lwl*(1-Cp+(0,06Cp*LCB)/(4*Cp-1))			
Lenght of Run	Lr	-32,72	
T/L		0,046	
Stern Type	U Shape		

Cstern type U		10	
C12 for 0,02<T/L<0,05 = 48,2*(T/L-0,02)^2,078+0,48			
C12		0,5045	
C13= 1+0,003*Cstern			
C13		1,03	

(1+k1)= C13(0,93+C12(B/Lr)^0,92*(0,95-Cp)^-0,52*(1-Cp+0,0225lcb)^0,69

Form Factor	**1+k1**	**0,7924**

Font: Elaboració pròpia

Força que exerceix el vent sobre l'obra morta de la plataforma

Calculada anteriorment:
Vent de front= **2.514 MT**

Força que exerceix la corrent sobre l'obra viva de la plataforma
Calculada anteriorment:

Força de la corrent sobre la platafoma	
LC1.1 on Vc= 49,2 cm/s	**0,23 MT**= 2,254 KN

Font: Elaboració pròpia

Força màxima que exerceix l'onatge sobre l'obra viva de la plataforma
Calculada anteriorment:

Força de l'onatge sobre la platafoma	
LC1.1	**0.9 MT**= 8.869 KN

Font: Elaboració pròpia

Total Pull Resistance

De manera que el TPR per una velocitat de 2.5 nusos calculat mitjançant les fórmules de l'ITTC és el següent:

R= Rf(1+k1)+Rdw+Rc+Rwind = 47.598 MT

El resultat obtingut es força superior a l'anterior, de manera que s'hauria de seleccionar un remolcador de més de 52 tones de BP. Com a estimació, es té en compte que el remolcador a seleccionar tindrà una eficiència de remolc similar a l'anterior (67.48%), de manera que el vaixell a contractar per l'operació de remolc hauria de tenir mínim un BP de 70.5 tones. A més a més, seguint les recomanacions de la DNV cal afegir el factor de seguretat (1.5-2.3)

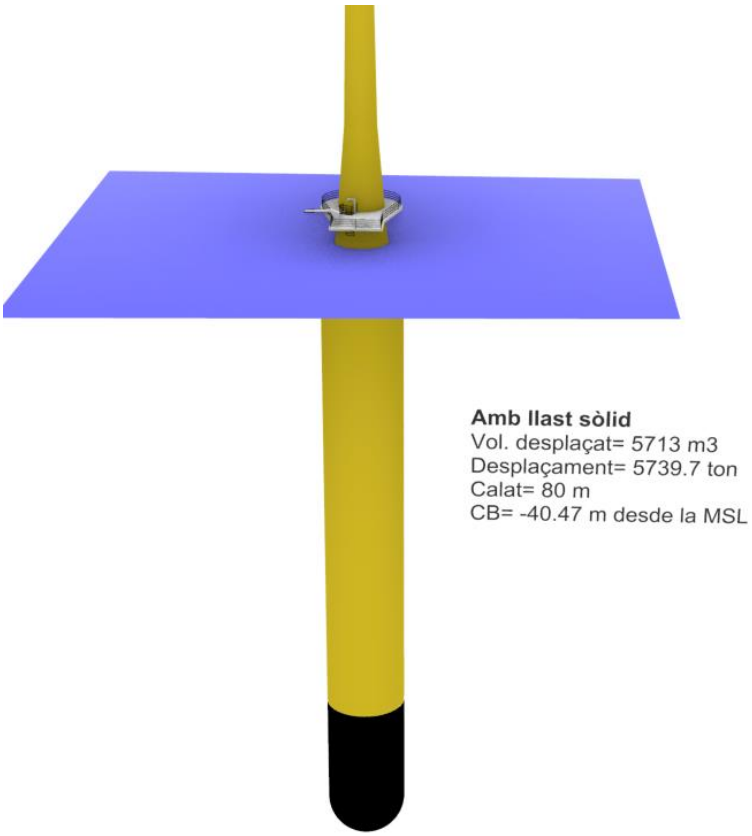
de manera que entre els dos remolcadors haurien de poder tenir un BP total d'entre 105.75 i 162.15 MT.

7.3.2. Transport en vertical

Les plataformes SPAR al estar caracteritzades majoritàriament per un cilindre amb una WPA *(Water Plane Area)* petita i un centre de gravetat baix en general podem dir que són estables, ja que gràcies al llast sòlid situat a la part baixa de la plataforma, el centre de gravetat es troba per sota del centre de flotació (fins a grans escores).

Transport en vertical sense turbina

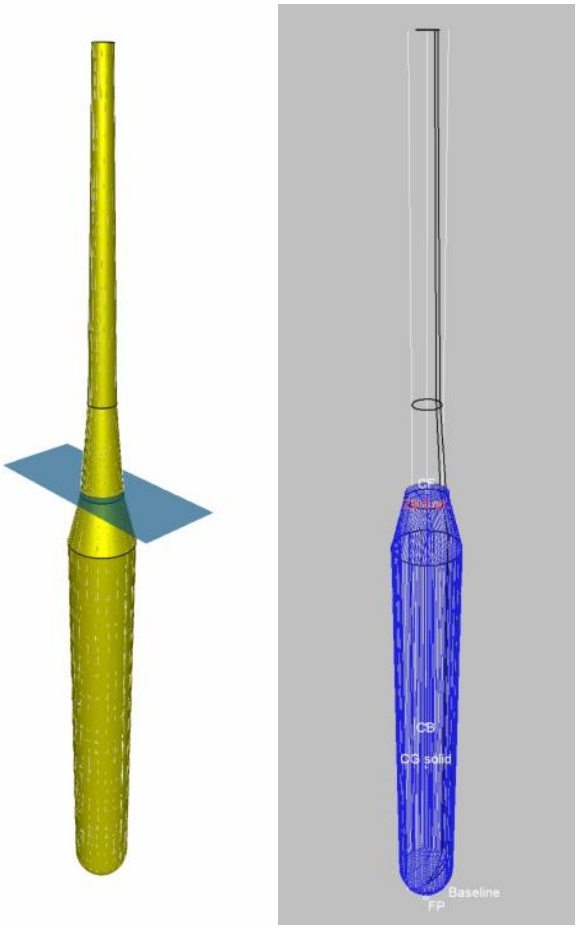
A continuació, es troba una taula amb els paràmetres que contribueixen a definir l'estabilitat estàtica de la plataforma en posició vertical acompanyada d'una representació de la situació de càrrega:



Font: Elaboració pròpia

El centre metacèntric es troba per aquesta situació de càrrega a 9.35 m per sobre del centre de gravetat, de manera que al ser superior a 1 m es complirà el requeriment d'estabilitat de l'estàndard de la DNV GL ST-0119, referent a plataformes de gran calat com les tipus SPAR.

LC2 - Estabilitat inicial amb llast sòlid I sense la turbina	
Paràmetre	**Magnitud**
Desplaçament Δ	5736.2 ton
Calat	80 m
Trim (+ve by Stern)	0 m
WL lenght	5.957 m
KB	39.67 m
BMt= Io/Δ	0.011 m
GMt	+9.351 m
TPc	0.275 ton/cm



Il·lustració 48. Hydrostatic situation LC2
Font: Elaboració pròpia

El següent pas és calcular la resistència que oposarà al remolc per calcular la tensió de tir que hauran de aportar els remolcadors. Es tindrà en compte els mateixos angles d'incidència de les càrregues dinàmiques (vent, onatge i corrent) que al transport en horitzontal anteriorment explicat.

En aquest cas**,** el càlcul de la resistència a través de les fórmules de la ITTC *(International Towing Tank Conference)* no són un bon mètode per estimar la força de remolc en posició vertical, ja que amb aquest mètode no es tenen en compte les formes de tota la superfície mullada, sinó que mitjançant els paràmetres de coeficients de formes de la quaderna mestra, els relaciona amb el vaixell model que es va usar per elaborar les regressions i equacions. De manera que els resultats obtinguts no són una bona aproximació per el remolc en vertical. En canvi en horitzontal, se similars les formes de la plataforma amb les formes del vaixell model al llarg de la seva eslora de flotació, els resultats si que es poden tenir en consideració.

En aquest cas, per calcular la resistència s'ha utilitzat el mètode *Compton*, aquest mètode de càlcul s'ha elegit degut a la seva viabilitat en el programa de càlcul i perquè és aplicable a vaixells de desplaçament, els quals presenten un número de Froude entre 0.1 i 0.6, és a dir, per a baixes velocitats. A més a més, el software MaxSurf en funció de les particularitats de la plataforma, et recomana el mètode que més s'ajusta a les formes. En aquest cas aquest ha estat el recomanat.

A la següent taula, es mostren les fronteres d'aplicació del mètode. D'aquesta manera podem comprovar que els paràmetres es troben dins el rang d'acceptació i el podrem aplicar. De no ser així, si algun dels paràmetres es troba fora de l'interval, s'hauria de cercar un altre mètode alternatiu més acurat.

COMPTON RESISTANCE BOUNDS	Lower Limit	Upper Limit	LC2 values at 2knots
Froude number	0.1	0.6	0.135
Speed (knots)/√LWL	0.35	2	0.8233

Taula 30. Compton Resistance Bounds

Font: Elaboració pròpia

A continuació es troba el resultat de la resistència obtinguda per una velocitat de 2.8 nusos:

Compton method			
Speed (knots)	**Froude No LWL**	**Froude No Vol.**	**Resistance MT**
2,8	0,168	0,098	37,07

Taula 31. Forces de remolc LC2
Font: Elaboració pròpia

La resistència superficial en aigües tranquil·les pel transport en vertical resulta ser significativament més elevada que pel transport en horitzontal. Per altra banda, la superfície d'incidència del vent és major, de manera que la càrrega del vent sobre la superfície suposarà un gran augment damunt la residència total. A més a més, el transport en vertical pren sentit si ja es duu la turbina muntada, i al tenir en compte el pes de la turbina la component vertical del CDG resultant augmentarà 1,86 m, afectant negativament a l'estabilitat transversal. Per aquests motius, es decideix utilitzar el mètode del transport en horitzontal.

7.4. Fase operacional d'instal·lació

Introducció

La fase d'instal·lació consistirà en, tota vegada arribada la plataforma a l'emplaçament mitjançant transport per via humida en horitzontal, aquesta presentarà un llast total de 3620 tones. El següents passos consistiran en desllastrar el compartiment de 1322,46 m3 que portarà aproximadament 600 tones d'aigua de llast. Un cop buida presentarà una lleugera posició apopada i es procedirà a començar a llastrar la part més baixa de la plataforma fins arribar a 5736 tones de desplaçament total.

L'objectiu d'aquest apartat es determinar els valors de les corbes KN i GZ durant l'operació de llast per la posada en vertical de la plataforma. Un cop obtinguts s'estudiarà el posicionament que prendrà la plataforma respecte la horitzontal per a cada situació de llast.

Braços d'estabilitat i braços restauradors per grans angles d'escora

Els valors KN o corbes d'estabilitat son realment útils si el VCG *(Vertical Center of Gravity)* es desconeix.

Els braços d'estabilitat que generarà la plataforma durant l'adrissament es poden obtenir a partir del gràfic següent, on l'eix d'abscisses representa el desplaçament total de la plataforma i l'eix d'ordenades representa els valors dels braços KN en metres. Cada una de les corbes representa un determinat angle d'escora.

Els inputs requerits pel programa per l'anàlisi dels valors KN, són els següents:

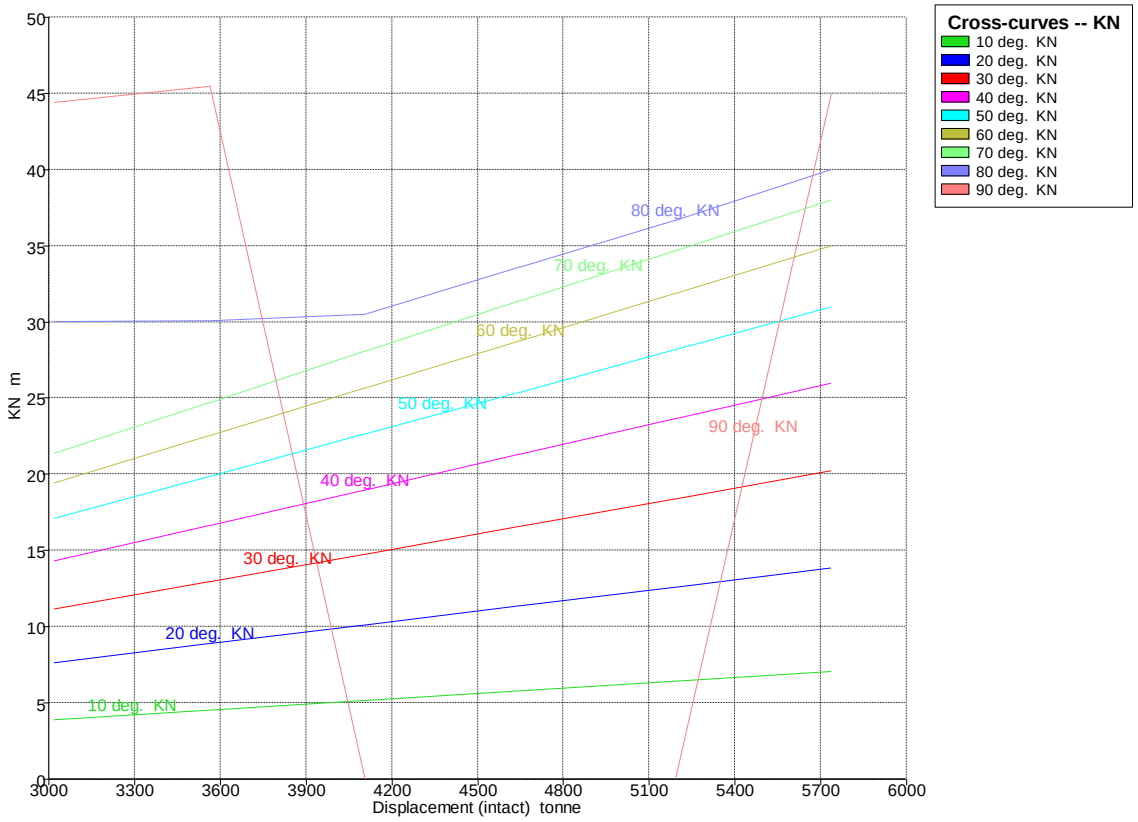
Requeriments anàlisis valors KN

- Rang de desplaçaments a analitzar
- Rang d'angles d'escora a analitzar
- Estimació del VCG
- TCG (si esau)

Opcions a tenir en compte per l'anàlisi

- Densitats dels fluids
- Forma de ona
- Definir els depòsits i compartiments

Un cop introduïts tots els valors necessaris, s'obté la següent corba KN (10º-90º).



Il·lustració 49. Cross curves KN

Font: Elaboració pròpia

	KN m								
Displacement	**10º**	**20º**	**30º**	**40º**	**50º**	**60º**	**70º**	**80º**	**90º**
3021,00	3,91	7,65	11,16	14,34	17,12	19,44	21,40	30,03	44,39
3564,00	4,54	8,88	12,97	16,67	19,88	22,55	24,72	30,06	45,45
4107,00	5,17	10,12	14,78	18,99	22,65	25,67	28,07	30,52	0,00
4650,00	5,80	11,36	16,59	21,32	25,42	28,79	31,41	33,59	0,00
5193,00	6,43	12,60	18,40	23,65	28,18	31,88	34,67	36,70	0,00
5736,00	7,06	13,86	20,23	25,99	30,96	34,99	37,99	40,01	44,98

Taula 32. KN Values LC2

Font: Elaboració pròpia

En el gràfic es representen les escores des de 10º fins a 90º, i el desplaçament engloba des de 3020 tones (que representa la situació de carga sense llast) fins a 5740, és a dir amb tot el llast de disseny. De manera que a l'hora d'utilitzar el gràfic cal saber el llast que hi ha a la plataforma i l'angle d'escora per obtenir el KN.

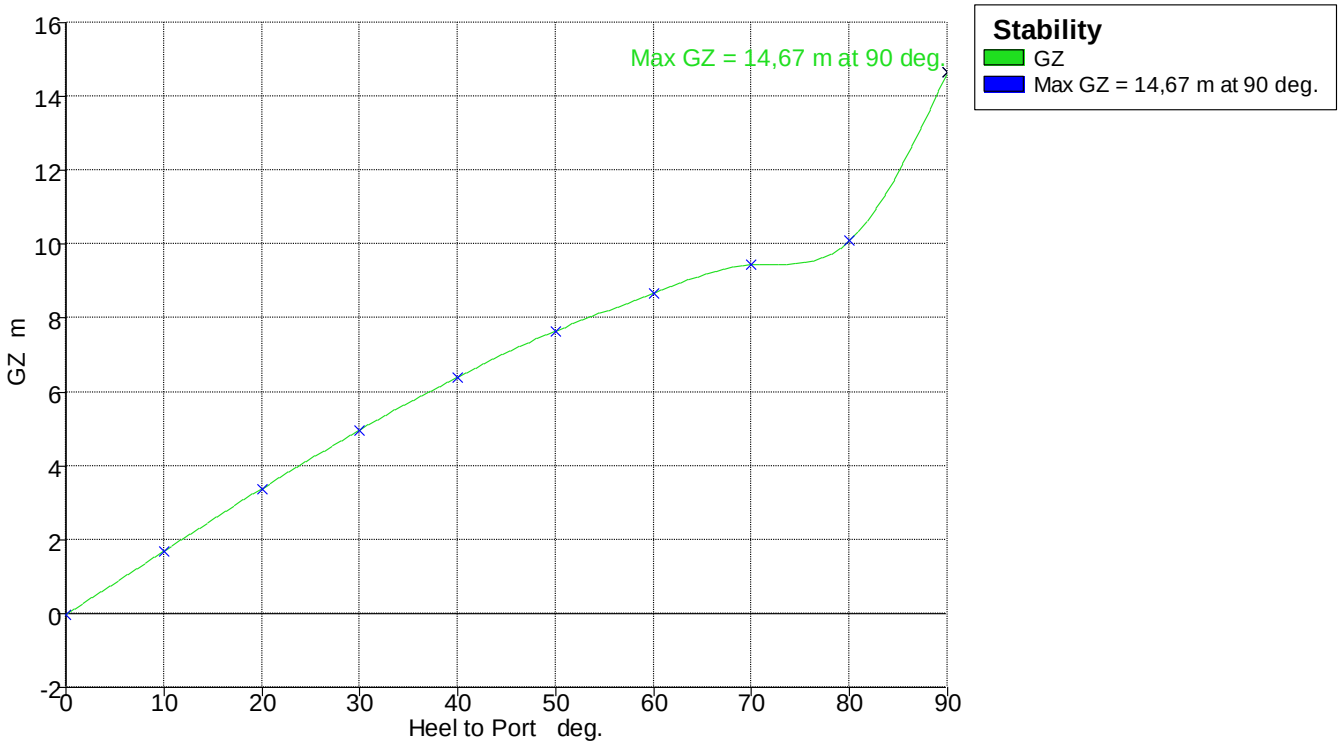
Mitjançant els valors del KN, per qualsevol condició de llast es pot obtenir la corba GZ usant la següent fórmula:

$$GZ = KN - KG * sin(Heel)$$

Equació 18. GZ vàlues

El GZ representa el braç restaurador mesurat transversalment entre el COB i el COG, i el KG és la distància des de la línia base fins el VCG efectiu.

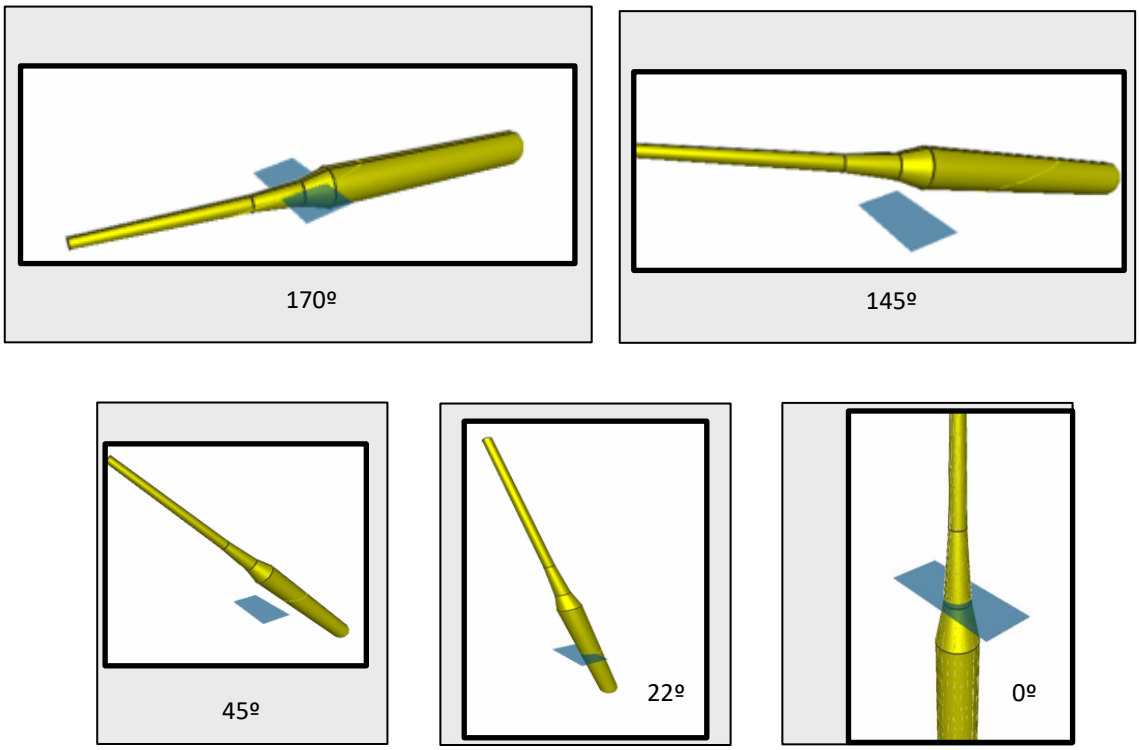
A continuació es troba la corba dels braços GZ resultants.



Il·lustració 50. GZ Values
Font: Elaboració pròpia

El GZ màxim es troba als 90º d'escora i pren un valor de 14,67 m.

Seguidament es calculen les posicions d'escora de la plataforma de manera cronològica a mesura que es va augmentant el llast.



Il·lustració 51. Posicionament de la plataforma durant l'operació de llastrat
Font: Elaboració pròpia

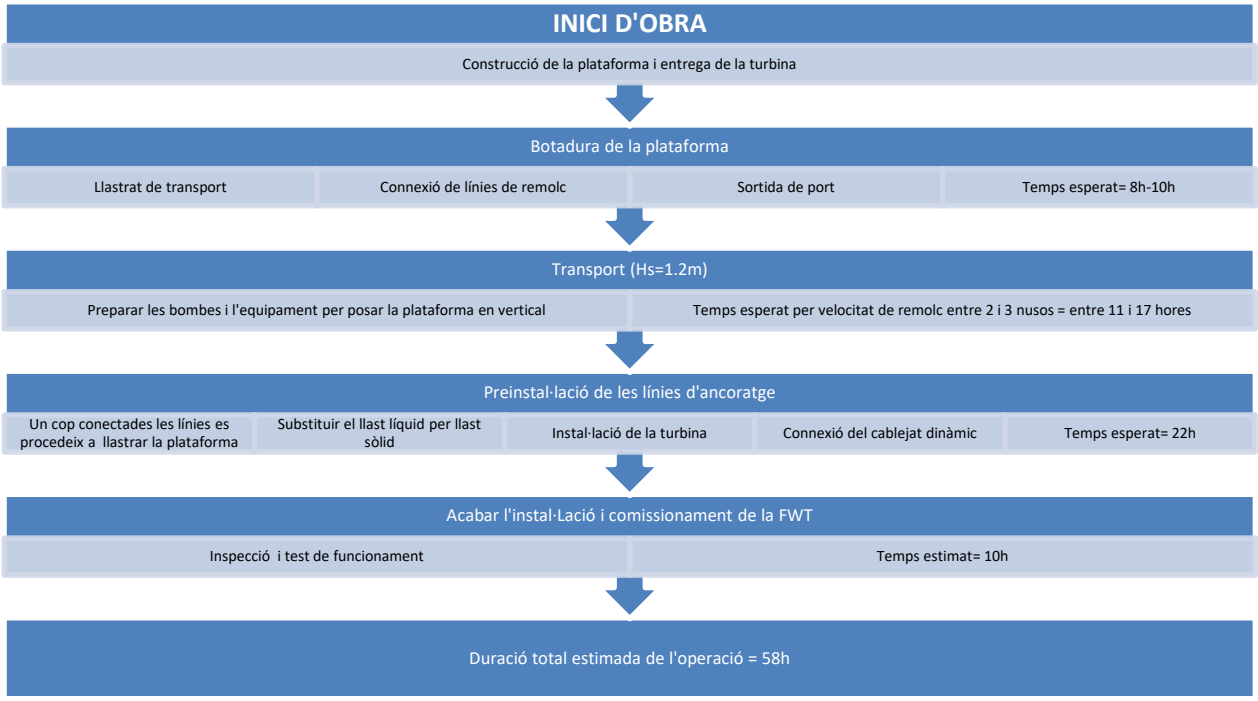
Les imatges anteriors representen la posició d'estabilitat estàtica per cada situació de llast. Primer la plataforma es trobarà en 3621 tones de desplaçament (situació LC1.1). El següent pas serà desllastrar les 600 tones d'aigua salada del compartiment utilitzat per el transport, de manera que el següent desplaçament rellevant serà de 3021 tones (plataforma sense llast) Com s'ha estudiat anteriorment en aquesta situació la plataforma ja presenta una lleugera inclinació respecte la MSL. Un cop arribats a n'aquest punt es procedeix a llastrar la plataforma mitjançant l'ús de bombes, i de manera controlada es llastrara fins obtenir un desplaçament de 5736 tones i trobar-se la plataforma perfectament adrissada (representant un desplaçament de llast total de 2715,3 tones). Per dur a terme la posada en vertical, hi ha un moment que la plataforma deixa d'adrissar-se de manera controlada, de manera que s'hauria de disposar de línies de remolc tant a la part més alta com més baixa per tal de controlar l'adrissament.

En el capítol següent, es troba el disseny del sistema de llast per dur a terme l'operativa.

Un cop en vertical, es procedirà a aportar el llast permanent (sòlid) a mesura que al mateix temps es va desllastant l'aigua salada per tal de conservar el mateix calat.

Procés d'instal·lació i inspeccions requerides per les SS CC (Societats de classificació)

Resum del procés d'instal·lació i duració total aproximada.



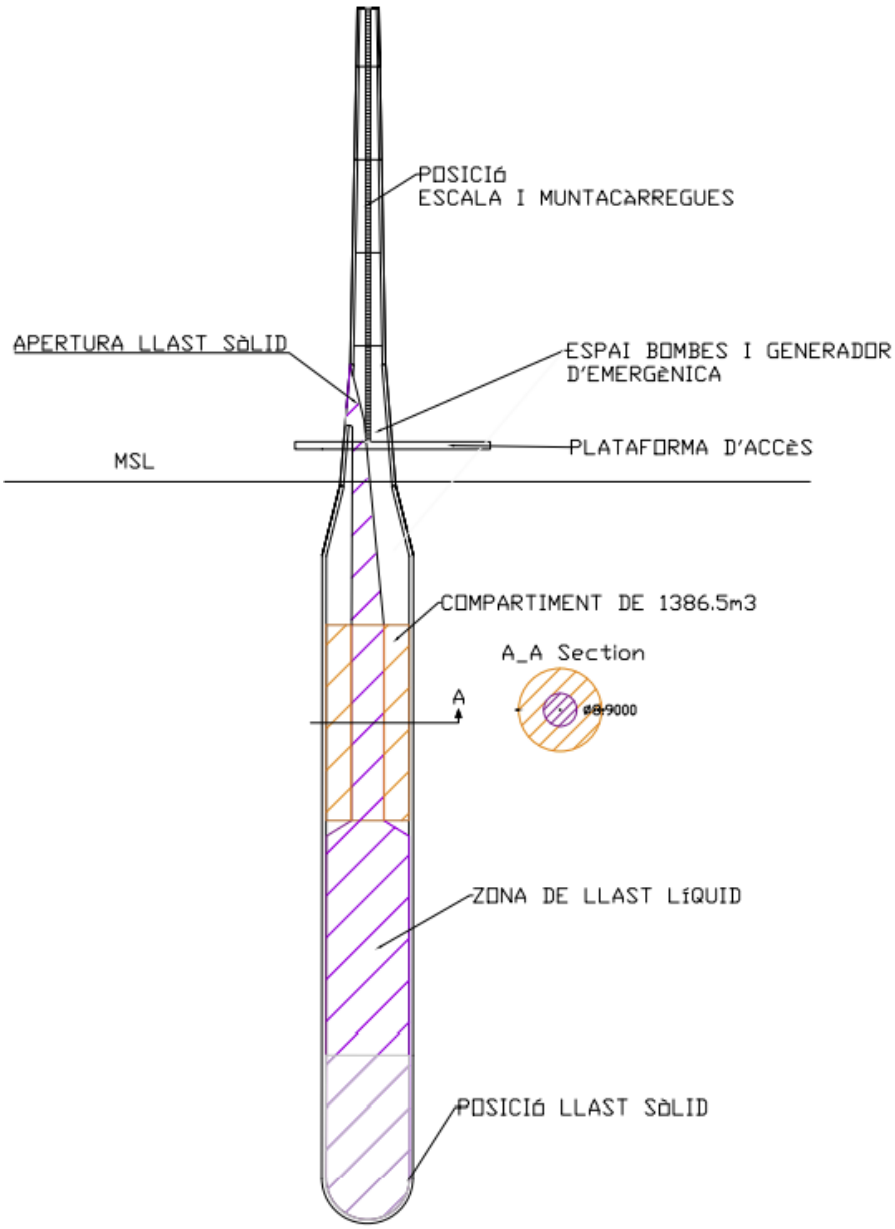
Font: Elaboració pròpia

La documentació requerida per les inspeccions periòdiques és la següent:

- Permisos de construcció i operació.
- Manual del fabricant.
- Certificats d'aprovació de la entitat certificadora (DNVGL).
- Registre complet de la posada en funcionament.
- Manual de manteniment.
- Informes tècnics de les inspeccions anteriors.
- Resultats de la inspecció d'olis anual.
- Inspecció anual exhaustiva de la turbina eòlica.
- Inspecció de la plataforma d'accés.
- Totes les modificacions o reparacions han d'estar registrades.

Capítol 8. Disseny sistema de bombeig del sistema d'aigua de llast

Dibuix esquemàtic dels compartiment de llast i les àrees lliures per instal·lar el sistema de bombeig i el generador d'emergència:



Il·lustració 52. Dibuix sistema de llast
Font: Elaboració pròpia

Dades de partida

La capacitat de carga màxima amb aigua de llast de la zona de llast líquid és de 2793 m3, el que representa un pes total d'aigua de 2862,97 tones. És a dir, la capacitat de llast líquid pot arribar a ser 70 tones superior al llast sòlid de disseny (2793 tones), per la qual cosa no hauria d'haver cap problema per falta de llast. Si es necessites llastrar més la plataforma, sempre es podria utilitzar el compartiment de 1386.5 m3 utilitzat per el transport.

Per dimensionar el sistema, primer cal conèixer el cabal i la altura necessària durant les operacions de llast i desllast.

Pe a tots els càlculs pròxims, els valors la densitat de l'aigua i la viscositat, s'han utilitzat 1,025 kg/L i 1,07e-03, respectivament.

Cabal de llastrar i desllastrar.

Per calcular el cabal s'ha de tenir en compte els temps necessaris de descàrrega i càrrega per realitzar l'operativa de manera segura i amb el temps previst.

Com hem mencionat anteriorment, la plataforma té una capacitat de càrrega de 2793 m3, amb els quals si són impulsats per una bomba centrífuga de 1000m3/h de capacitat nominal, es realitzaria la càrrega en un temps de 2,8h. Com l'ús d'aquesta bomba no serà de manera regular, sinó que únicament en operacions, s'aplicarà un factor de seguretat del 25%, de manera que s'elegirà una bomba que pugui funcionar fins a 1250 m3/h a plena càrrega.

La bomba seleccionada és la bomba centrífuga de una etapa i doble succió DSL en línia .

Il·lustració 53. DSL Pump
Font: DSL

Disseny de les canonades

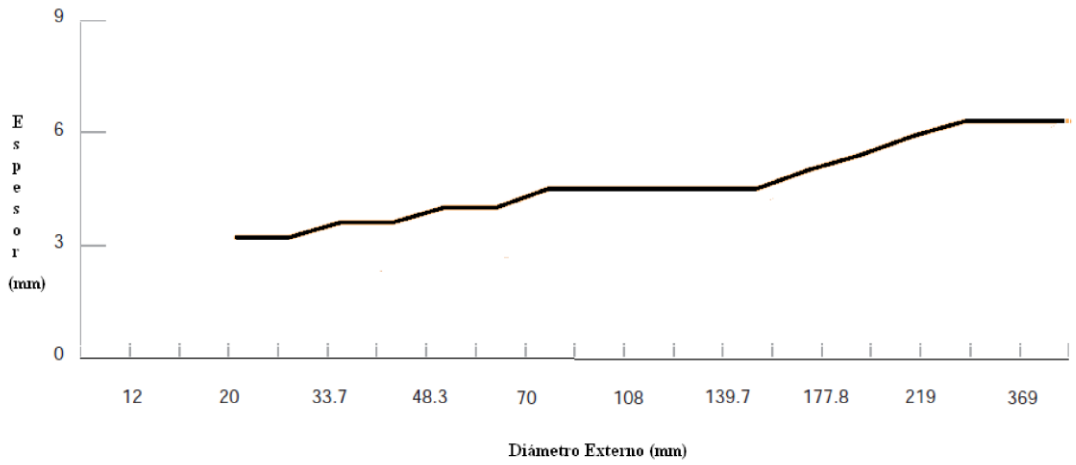
Per la línia de llast es treballarà a 1250m3/h, el següent pas es establir la velocitat del fluid i el diàmetre exterior i interior de les canonades.

Per una velocitat de disseny de 3.5 m/s el diàmetre interior de la canonada serà el següent:

$$s_{int} = \frac{Q}{v} = \frac{1250}{3.5 \times 3600} = 0.1m2$$

De manera que el diàmetre interior és de 0.357 m.

També es pot conèixer l'espessor per les parets de la canonada en funció del diàmetre exterior, utilitzant la gràfica proporcionada per RINA, presentada a continuació.



Il·lustració 54. Relació espessor i diàmetre exterior canonada
Font: RINA ST

Al no conèixer el diàmetre exterior, per trobar l'espessor requerit, es fa mitjançant prova-error. A la gràfica, sabem que el diàmetre exterior ha de ser superior a 357 mm de manera que es veu clarament que l'espessor mínim a utilitzar serà d'aproximadament 7 mm.

De manera que la canonada a utilitzar serà de DN350 (NPT14).

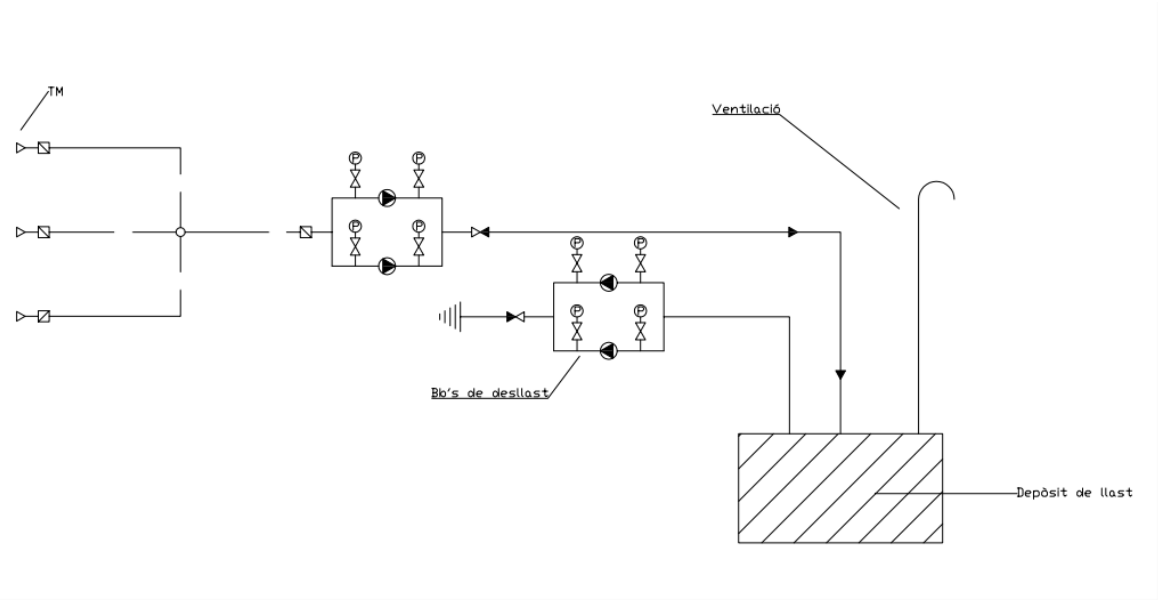
Disseny dels accessoris

Els accessoris com colzes, reduccions, vàlvules de tall, vàlvules antiretorn de regulació, mesuradors, ramals... es correspondran amb la canonada seleccionada, i aquests haurien de

ser del mateix material per evitar el problema de corrosió galvànica. Entre els perns i les brides es posarà una capa del lubricant *Tef Gel* per evitar els problemes de corrosió galvànica.

A continuació es definiran tots els elements que es trobaran a la línia de llast per tal de conèixer les pèrdues de càrrega totals.

<u>Esquema del sistema de bombeig</u>



Il·lustració 55. Sistema de llast
Font: Elaboració pròpia

Tant per el llastrat com per el desllast s'ha decidit instal·lar una bomba de cortesia.

A continuació es troba el càlcul de les pèrdues de càrrega aproximades.

$$\sum h_f = 4f \times \frac{L_e}{D} \times \frac{v^2}{2} = 65{,}9\frac{m2}{s2} \sim \mathbf{6{,}6\ m.c.a}$$

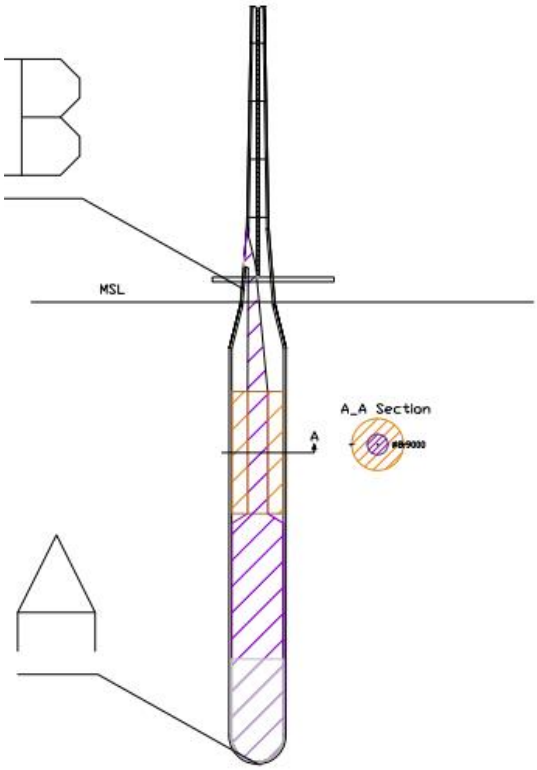
On,

- Hf representa el sumatori de pèrdues.
- 4f un factor de rugositat (depèn de Reynolds), en el nostre cas pren un valor de uns 0,025.
- Le representa la longitud equivalent tenint en compte els accessoris en la línia
- D: el diàmetre utilitzat serà de 0,360 mm i finalment la velocitat del fluid serà de 3.5 m/s.

Altura de les bombes en el sistema

La altura de les bombes de llastrat es pot trobar a uns 80 m de la línia base (a prop de la MSL), però en el cas de les bombes de desllast es necessita calcular l'altura de posicionament, ja que han de impulsar l'aigua una altura total de uns 62 m.

Una vegada calculades les pèrdues per fricció a la canonada i als accessoris, mitjançant l'equació de conservació de l'energia s'obtindrà l'altura de les bombes de desllast.



Il·lustració 56. Recorregut del desllastament
Font: Elaboració pròpia

El recorregut de l'aigua de llast serà des del punt A al punt B. El punt A es troba a la part més baixa de la plataforma i el punt B es troba entre la MSL i la plataforma d'accés, per on es descarregarà l'aigua.

Equació de conservació de l'energia

$$\frac{P_A}{\gamma} + z_A + \frac{vA^2}{2g} - h_2 + h_{Bomba} = \frac{P_B}{\gamma} + z_B + \frac{vB^2}{2g}$$

Equació 19. Equació de conservació de l'energia

Agafant l'origen del sistema de referència al punt A, els paràmetres a introduir seran els següents:

- ZA= 0m
- PA= 0 Pa
- PB= 101325 Pa (Patm)
- VB= 3.5 m/s
- ZB= 65 m
- H2 (pèrdues)= 6.6
- $\gamma\ (pes\ específic) = 10045\ N/m3$

$$h_B = \frac{101325}{10045} + 65 + \frac{3{,}5^2}{2 \times 9{,}81} + 6{,}6 = \mathbf{79.2\ m}$$

De tal manera, es disposarà de dues bombes centrífugues de 1250 m3/h cada una, a una altura de 79.2 m de la línia base. El temps d'us esperat per fer tot el procés de llastrat i desllast serà d'aproximadament de 5 hores i mitja.

Capítol 9. Conclusions i línies futures

1. Els tres grans conceptes actuals de plataformes eòliques flotants, són les Spar Buoy, les Semi sub i les tipus TLP. Al estudiar el concepte Spar s'ha vist des d'un principi que el factor de més influència en quant al seu comportament, és el llast i la posició del mateix en relació a la plataforma.
2. També s'ha realitzat una recerca de les diferents operacions marines en quant a la instal·lació del cablejat elèctric i de les línies d'ancoratge. Aquestes al principi pareixien que havien de ser operacions senzilles, però com s'ha vist aquests sistemes compten de nombrosos subcomponents en la línia, inclús a vegades es precisa de tecnologia ROV per dur a terme les instal·lacions d'acoblament submarines. En quant a l'estat del mercat davant aquestes tecnologies s'ha vist que hi ha nombroses companyies que ofereixen solucions personalitzades per cada tipus de plataforma i els seus requeriments.
3. Es pot afirmar que Gran Canaria és molt bona zona per instal·lar energia eòlica flotant, no només per la intensitat del vent, sinó també per la direccionalitat i estabilitat de la mateixa. Com s'ha vist al capítol 4 la direccionalitat del vent sempre sol ser la mateixa, facilitant el disseny de les operacions de transport i instal·lació.
4. És possible el remolcat controlat de la plataforma SPAR controlant el seu llast, essent el llast líquid el més funcional. Les plataformes SPAR al estar caracteritzades majoritàriament per un cilindre amb una WPA (*Water Plane Area*) petita i un centre de gravetat baix, en general podem dir que són estables, ja que gràcies al llast sòlid situat a la part baixa de la plataforma, el centre de gravetat es troba per sota del centre de flotació fins a grans escores.
5. El transport en horitzontal no suposa cap problema en quant a resistència. Davant la problemàtica de possible rotació de la plataforma sobre el seu propi eix, se li ha dotat a aquesta d'un desplaçament addicional de 600 tones que augmenta la distància metacèntrica millorant l'estabilitat transversal.
6. Pel que respecta a la instal·lació al punt de destí, l'adrissament de la plataforma es podrà efectuar de manera controlada només fins a un angle d'inclinació d'uns 68º respecta a la MSL. A partir d'aquest punt, la plataforma s'autoadrissaria de manera descontrolada, per la qual cosa serà necessari disposar de línies ancorades tant a la part baixa com a la zona elevada de la plataforma. Això ens permetrà controlar aquest moviment de pèndul.
7. També s'ha determinat que cal dotar a la plataformes de bombes, factor que no suposa cap gran inconvenient i que dota a la plataforma de completa autonomia pel control del llast.

Línies futures

1.-Per tal de controlar de manera més optimitzada el moviment rotatori de la plataforma en torn al seu eix, cal estudiar amb major profunditat el sistema de connexió entre les línies de remolc i la plataforma i efectuar una anàlisi pel mètode d'elements finits, per tal de calcular el seu dimensionament.

2.-El sistema d'accionament i control de les bombes de llast pot esser gestionat de forma remota des del vaixell de control. Caldria desenvolupar el sistema encarregat de dur a terme aquesta operativa.

3.-Caldria efectuar un estudi de selecció del material per les línies de remolc i les línies de fondeig.

Bibliografia

[1] Gómez, P., Sánchez, G., Llana, A., & Gonzalez, G. (2015). *Qualification of innovative floating substructures for 10MW wind turbines and water depths greater than 50m Start date 2015-06-01 Internal draft for feedback from the Consortium*. 1–23.

[2] Jiang, Z. (2021). Installation of offshore wind turbines: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *139*(April 2020), 110576. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110576

[3] Ikhennicheu, M., Lynch, M., Doole, S., Borisade, F., Wendt, F., Schwarzkopf, M.-A., Matha, D., Vincente, R. D., Habekost, T., Ramirez, L., & Potestio, S. (2020). *Corewind D3.1 - Review of the state of the art of dynamic cable system design*. *February*.

[4] Explore the Seafloor. (2018). *How do we study the seafloor*.

[5] GNS Sciencie Te Pu Ao. (2017). *Mapping the Ocean Floor*, Underwater Exploration.

[6] Leimeister, M., Kolios, A., & Collu, M. (2020). Development and verification of an aero-hydro-servo-elastic coupled model of dynamics for FOWT, based on the MoWiT library. *Energies*, *13*(8), 1974.

[7] DNV. (2011). Offshore Standard DNV-RP-H103 -Modelling And Analysis Of Marine Operations. *Det Norske Veritas*, *April*, 150.

[8] Ding, H., Hu, R., Le, C., & Zhang, P. (2019). Towing operation methods of offshore integrated meteorological mast for offshore wind farms. *Journal of Marine Science and Engineering*, *7*(4). https://doi.org/10.3390/jmse7040100

[9] Ghigo, A., Cottura, L., Caradonna, R., Bracco, G., & Mattiazzo, G. (2020). Platform optimization and cost analysis in a floating offshore wind farm. *Journal of Marine Science and Engineering*, *8*(11), 1–26.

[10] Luis, J., & Valdes, R. (2018). Dynamic response analysis of a catamaran wind turbine installation vessel with focus on the transportation stage.

[11] DNV-OSs

[12] DNV GL AS. (2016). DNVGL-ST-0437: Loads and site conditions for wind turbines. *DNV GL - Standard*, *November*, 108.

[13] Global wind atlas: https://globalwindatlas.info/

[14] López, N. (2020). *Canarias, ¿paraíso de la energía eólica?*. Energy News.

[15] Sclavounos P, Lee S, DiPietro J, Potenza G, Caramuscio P, De Michele G. Floating offshore wind turbines: tension leg platform and taught leg buoy concepts supporting 3-5 MW wind turbines. In: European wind energy conference EWEC; 2010. p. 20–3.

[16] Offshore hydromechanics jornee massie

[17] Joan Aymamí et al.;(2011) Análisis del recurso. Atlas eólico de España. Estudio Técnico PER 2011-2020

[18] Re, P., Passoni, G., & Gudmestad, O. T. (2019). Mooring systems analysis of floating wind turbines in Italian seas. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *700*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/700/1/012002

[19] Aranzadi de Miguel, Paula. Valoración del entorno del entorno de simulación SESAM para el diseño de una estructura marina de tipo celosía [en línea]. Dirigido por: Sanz Corretge, Francisco Javier. Proyecto fin de carrera. Universidad Pública de Navarra. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación. Septiembre de 2010.

Annex A1. Informació addicional

A1.1. Maxsurf - Hidrostàtiques i anàlisis d'estabilitat

Specified Condition- LC1

Stability 23.01.00.117, build: 117

Model file: D:\pereo\Documents\TFG\A1 Pere Oliver TFG Folder\MaxSurf\04-07-21 V2 Maxsurf 2MW (Medium precision, 56 sections, Trimming off, Skin thickness not applied). Long. datum: AP; Vert. datum: DWL. Analysis tolerance - ideal(worst case): Disp.%: 0,01000(0,100); Trim%(LCG-TCG): 0,01000(0,100); Heel%(LCG-TCG): 0,01000(0,100)

Free to Trim

Specific gravity = 1,025; (Density = 1,025 tonne/m^3)

Draft Amidships m	-0,407
Displacement t	3021
Heel deg	0,0
Draft at FP m	-2,486
Draft at AP m	1,672
Draft at LCF m	0,354
Trim (+ve by stern) m	4,158
WL Length m	105,049
Beam max extents on WL m	9,965
Wetted Area m^2	1693,721
Waterpl. Area m^2	702,493
Prismatic coeff. (Cp)	0,538
Block coeff. (Cb)	0,439
Max Sect. area coeff. (Cm)	0,876
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,671
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	36,553
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	41,598
KB m	-1,802
KG m	0,000
BMt m	1,795
BML m	123,620
GMt m	-0,008
GML m	121,817
KMt m	-0,007
KML m	121,756
Immersion (TPc) tonne/cm	7,201
MTc tonne.m	28,028

RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	-0,395
Max deck inclination deg	1,8138
Trim angle (+ve by stern) deg	1,8138

Key point	Type	Freeboard m
Margin Line (freeboard pos = 0 m)		-1,747
Deck Edge (freeboard pos = 0 m)		-1,671

Equilibrium calculation – LC1.1

Stability 23.01.00.117, build: 117

Model file: D:\pereo\Documents\TFG\A1 Pere Oliver TFG Folder\MaxSurf\04-07-21 V2 Maxsurf 2MW (Medium precision, 56 sections, Trimming off, Skin thickness not applied). Long. datum: AP; Vert. datum: DWL. Analysis tolerance - ideal(worst case): Disp.%: 0,01000(0,100); Trim%(LCG-TCG): 0,01000(0,100); Heel%(LCG-TCG): 0,01000(0,100)

Loadcase - Loadcase 2
Damage Case - Intact

Free to Trim Specific gravity = 1,025; (Density = 1,025 tonne/m^3) Fluid analysis method: Use corrected VCG

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m^3	Total Volume m^3	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM tonne.m	FSM Type
Lightship	1	3021,000	3021,000			37,940	0,000	0,000	0,000	User Specified
Tank001	45,37 %	1322,582	600,000	1290,324	585,366	54,434	0,000	-2,112	918,418	Maximum
Total Loadcase			3621,000	1290,324	585,366	40,673	0,000	-0,350	918,418	
FS correction								0,254		
VCG fluid								-0,096		

Draft Amidships m	1,002
Displacement t	3621
Heel deg	0,0
Draft at FP m	0,588
Draft at AP m	1,417
Draft at LCF m	1,146
Trim (+ve by stern) m	0,830
WL Length m	131,090
Beam max extents on WL m	9,882
Wetted Area m^2	2413,958
Waterpl. Area m^2	702,636
Prismatic coeff. (Cp)	0,529
Block coeff. (Cb)	0,434
Max Sect. area coeff. (Cm)	0,865
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,542
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	40,664
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	42,956
KB m	-1,441
KG fluid m	-0,096
BMt m	1,431
BML m	127,120
GMt corrected m	0,086
GML m	125,775
KMt m	-0,011

KML m	125,677
Immersion (TPc) tonne/cm	7,202
MTc tonne.m	34,686
RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	5,416
Max deck inclination deg	0,3621
Trim angle (+ve by stern) deg	0,3621

Key point	Type	Freeboard m
Margin Line (freeboard pos = 0 m)		-1,493
Deck Edge (freeboard pos = 0 m)		-1,417

Equilibrium calculation – LC2

Displacement	5643669	kg
Volume (displaced)	5505,043	m^3
Draft Amidships	80	m
Immersed depth	79,999	m
WL Length	5,957	m
Beam max extents on WL	5,958	m
Wetted Area	2557,786	m^2
Max sect. area	752,774	m^2
Waterpl. Area	26,855	m^2
Prismatic coeff. (Cp)	1,228	
Block coeff. (Cb)	1,939	
Max Sect. area coeff. (Cm)	1,595	
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,757	
LCB length	0,006	from zero pt. (+ve fwd) m
LCF length	0,005	from zero pt. (+ve fwd) m
LCB %	0,099	from zero pt. (+ve fwd) % Lwl
LCF %	0,085	from zero pt. (+ve fwd) % Lwl
KB	39,67	m
KG fluid	30,33	m
BMt	0,011	m
BML	0,011	m
GMt corrected	9,351	m
GML	9,351	m
KMt	39,681	m
KML	39,681	m
Immersion (TPc)	0,275	tonne/cm
MTc	88,133	tonne.m
RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1)	921016,175	kg.m
Length:Beam ratio	1	
Beam:Draft ratio	0,074	
Length:Vol^0.333 ratio	0,337	
Precision	Medium	68 stations