

Estudi de la implantació de parcs eòlics *offshore*

*Noelia Olmedo Torre, Jordi Ivern Cacho, Oscar Farrerons Vidal,
Cèdric Ros Adellach i Lluís Alonso Falip*



Barcelona, maig 2015

Escola Universitària d'Enginyeria Tècnica Industrial de Barcelona.
Consorti Escola Industrial de Barcelona.
C/ Comte d'Urgell 187. BARCELONA 08036.
Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona TECH.
Departament Expressió Gràfica a l'Enginyeria
Teléfono [+34] 93 413 73 77, Fax [+34] 93 413 74 01
olmedo@ege.upc.edu



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorti Escola Industrial de Barcelona

SUMARI

1. L'EMPLAÇAMENT.....	4
1.1 RUTES MARÍTIMES	4
1.2 ESTUDI DE LES ÀREES PROTEGIDES	5
1.3 ESTUDI DE LES FONDÀRIES DEL FONS MARÍ	7
1.4 ESTUDI DELS VENTS	9
1.5 ESTUDI DE L'ONATGE	12
2. POTÈNCIA A GENERAR.....	15
2.1 CONSUM LOCAL	15
2.2 SUBESTACIONS.....	16
3. ELECCIÓ DELS AEROGENERADORS.....	18
3.1 PLATAFORMA FLOTANT	21
3.2 CARACTERÍSTIQUES DE LA LÍNIA D'EVACUACIÓ	22
3.3 DISTRIBUCIÓ DEL PARC I LOCALITZACIÓ	24
3.4 DISPOSICIÓ DEL PARC EÒLIC MARÍ	25
4. CÀLCULS D'ESFORÇOS DELS AEROGENERADORS.....	28
4.1 JUSTIFICACIÓ DE LES FORCES DEL VENT	28
4.2 PERFIL DE VELOCITATS DEL VENT	28
4.3 ÈNERGIA DEL VENT DISPONIBLE	34
4.4 CÀLCULS D'ESFORÇOS	35
5. REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES.....	39

INTRODUCCIÓ

l'objectiu d'aquest document és l'estudi de la instal·lació d'un parc eòlic al litoral català amb l'objectiu de generar electricitat mitjançant una font d'energia renovable com ara el vent. Es justificarà l'emplaçament escollit pel que fa la localització geogràfica tenint en compte tots els factors limitants existents ja siguin normatius, topogràfics, ambientals, marítims, etc.

1. L'emplaçament

1.1 Rutes marítimes

Un dels aspectes importants a tenir en comte a l'hora de decidir la implantació d'un parc d'aquestes característiques són les rutes marítimes. Són rutes marítimes marcades per la circulació de grans vaixells de manera que sigui conegut per on solen transitar i evitar que es col·loquin infraestructures marines en mig d'aquestes vies de pas ja que aquest tipus de vaixells tenen dificultats pel que respecta a la maniobrabilitat.

Amb la finalitat de conèixer les rutes marítimes s'ha recorregut a un programari disponible de la Unió Europea anomenat "Maratlas" que es pot trobar a la plana web de la Unió Europea a l'apartat d'affers marítimes.

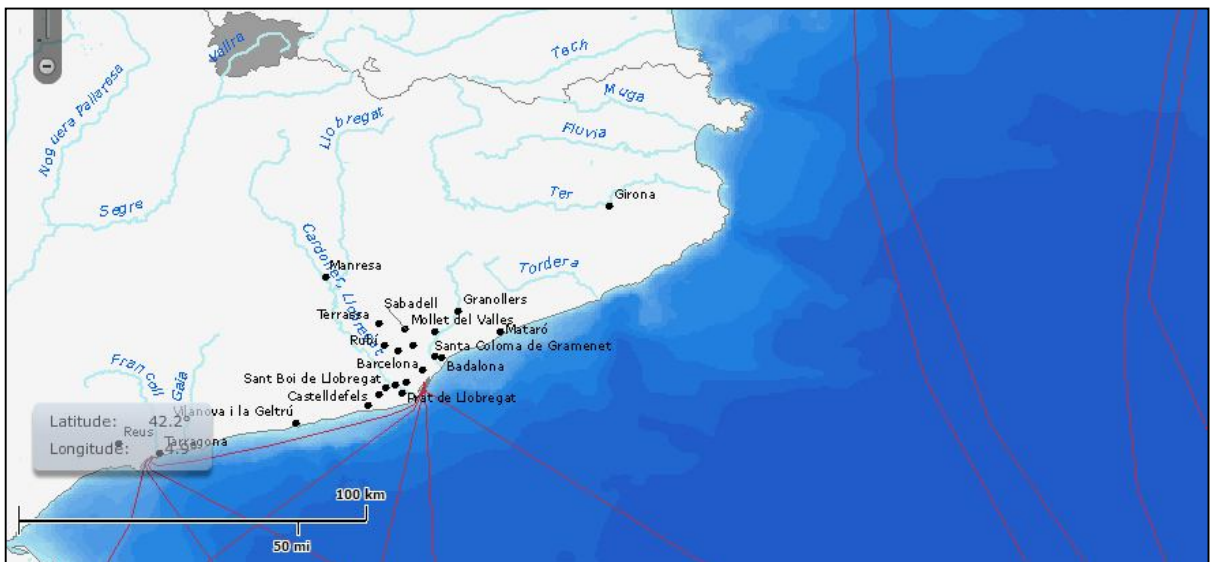


Figura 1. *Transport marítim de passatgers.*¹

Es pot observar a la Figura 1 com les rutes marítimes importants trobades amb el programa permeten identificar que no existeixen més de dues rutes que passen pròximes als 35 km de la costa catalana, on es vol implantar el parc eòlic marí, a l'alçada de les Illes Medes. Tant mateix també s'ha recorregut al programari "Google Earth" per identificar que no hi hagués cap altra ruta marítima existent que pogués passar per la zona.

¹ Font: Maratlas

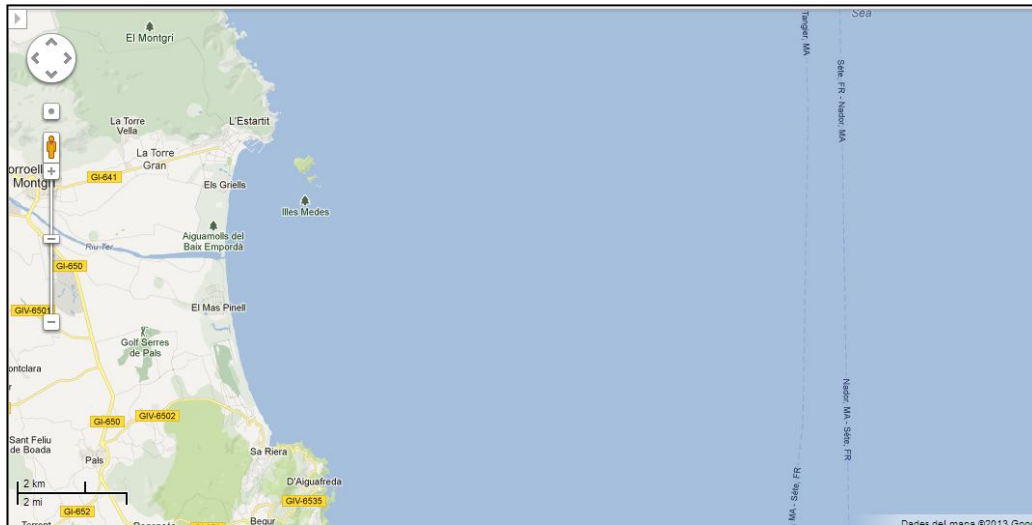


Figura 1. *Transport marítim proper a les illes Medes.*²

La Figura 1 permet confirmar la hipòtesis anteriorment esmentada, ja que es pot apreciar la ruta marítima (Sète FR –Tànger MA) que passa a 16 km de la costa catalana i una segona a 20 km (Nador MA – Sète FR), aproximadament, limitant la zona d'implantació del parc eòlic o bé abans de les rutes marítimes o bé després d'elles. D'aquesta forma les rutes de navegació no es veuran afectades per la implantació del parc.

1.2 Estudi de les àrees protegides

En aquest apartat s'analitzaren les àrees protegides properes a la zona que es pretén instal·lar el parc d'aerogeneradors *offshore*, així com la propera a la costa i a terra (per la instal·lació de la línia elèctrica d'evacuació). Per portar a terme aquest estudi s'ha recorregut als mapes disponibles de la Xarxa Natura 2.000 on es recullen totes les zones protegides i també el mapa d'implantació eòlica a Catalunya.

² Font: Google Earth

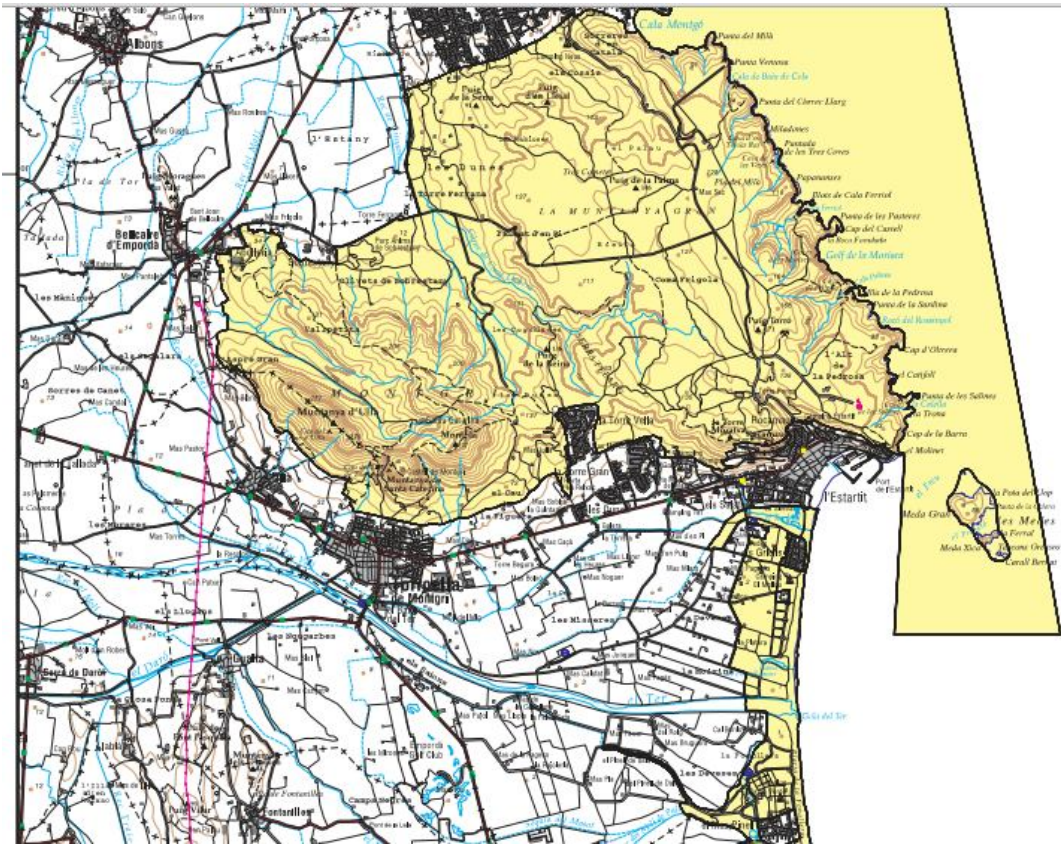


Figura 2. Àrea protegida Xarxa Natura 2.000 de les Illes Medes.³

Com s'aprecia a la Figura 2 l'àrea protegida de la Xarxa Natura 2000 inclou tota l'àrea de les Illes Medes així com la zona propera a la costa, aquesta zona s'anomena: El Montgrí – Les Medes – El Baix Ter amb el codi identificatiu ES5120016. També existeix una altra zona propera a la zona costera de Palafrugell, no surt a la imatge anterior. Aquesta es coneix amb el nom: Litoral del Baix Empordà i té el codi identificatiu ES5120015. Per tant, no hi han limitants d'aspecte mediambiental pel que fa a zones protegides sempre i quan el parc s'implanti en zones superiors als 3 km de la costa. Però sí que s'hauran de tenir en compte en el que fa la previsió del traçat de la línia d'evacuació.

³ Font: Xarxa Natura 2.000

1.3 Estudi de les fondàries del fons marí

Pel que fa a la ubicació és important també conèixer la topografia marítima de la zona per tal de tenir una estimació lo més acurada possible, ja que per l'estudi de la instal·lació del cable marí i la implantació del parc eòlic aquestes dades seran imprescindibles.

Tant mateix abans de dur a terme la implantació s'haurien de fer una sèrie de mesures in situ a fi d'esbrinar el tipus de fons marí (geomorfologia), fondàries i d'altres mesures per tal de tenir dades exactes i poder ajustar al màxim els càlculs.

Per obtenir les dades en el nostre cas i poder realitzar uns càlculs preliminars s'ha recorregut al Institut Cartogràfic de Catalunya ICC, obtenint així un mapa del relleu submarí de Catalunya 1:250000, 1a ed.

La zona on es troba la implantació del parc eòlic (requadre vermell que es pot apreciar a la Figura 4).

Tendria una fondària entre els 650 i 900 metres de profunditat. Per a més precisió es procedirà a superposar el mapa amb la localització exacte del parc eòlic amb l'objectiu de tenir dades més exactes.

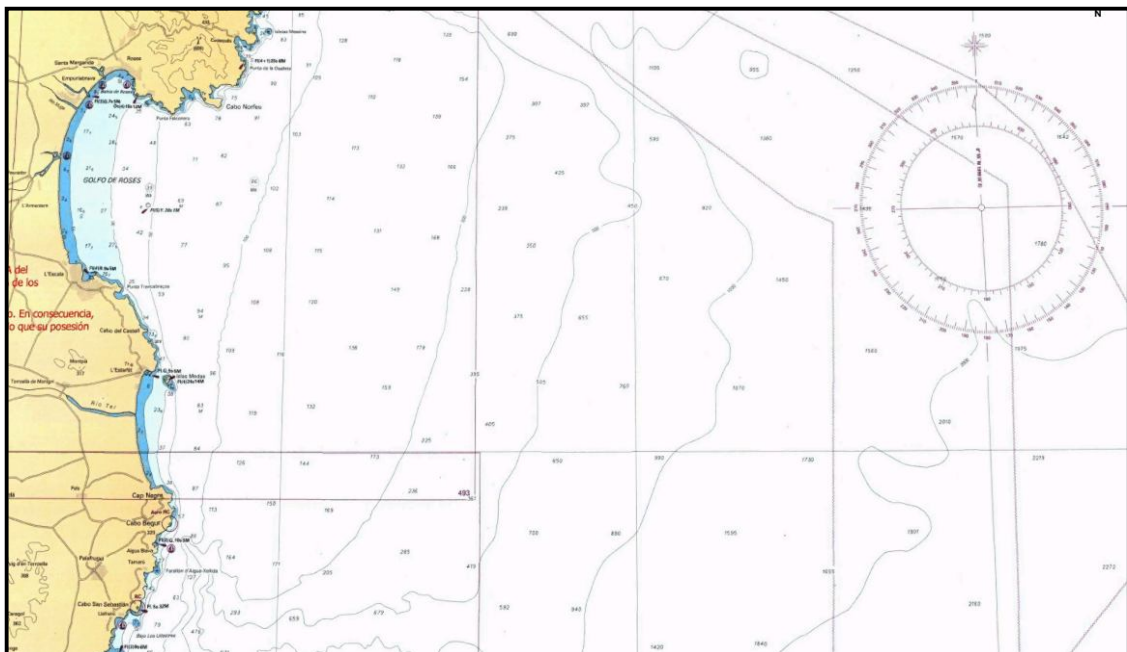


Figura 4. Mapa batimètric zona costanera de l'Estartit.⁴

⁴ Fonte: <http://www.olajedatos.com/cartas/49a9.png>

Com ja s'ha esmentat anteriorment, les profunditats en la zona varien dels 50 a 1000 m. segons la distància de la costa que s'implanti el parc eòlic. S'ha de tenir en compte la tipologia de fons marí que presenta el Mar Mediterrani, que acostuma a ser molt abrupte amb descens de les fondàries molt acusades en distàncies curtes referides a la costa; també la presència de canyons submarins. En general una orografia molt abrupte, el que fa que l'estudi batimètric de la zona sigui molt complicat. Per tant s'haurà d'escollir un emplaçament que es trobi sobre un fons el més pla possible i evitar les proximitats als canyons on són més acusades les variacions de fondària del fons marí.

Així doncs tenint en compte l'àrea reservada per a la implantació d'energia eòlica, que es descriu en el punt d'estudi normatiu en el capítol anterior, s'ha corroborat que tot i que el fons acusi un descens important és més moderat que en zones properes als canyons. A l'emplaçament escollit pels aerogeneradors s'aprecien les fondàries següents (Taula 1), a causa de la poca precisió de la cartografia aconseguida resulta impossible assignar una profunditat exacta, per això s'ha procedit a assignar un rang de valors aproximat. Cal recalcar que seria imprescindible efectuar un estudi batimètric exacte in situ amb l'objectiu de realitzar càlculs fiables a l'hora del dimensionat i longitud dels cables i materials a utilitzar.

Taula 1. Rang de fondàries de les posicions dels aerogeneradors.

Fondàries dels elements del Parc Eòlic Marí	
Element Instal·lat	Profunditat en metres
Aerogenerador – A1	650-700
Aerogenerador – A2	650-700
Aerogenerador – A3	650-700
Aerogenerador – A4	650-700
Aerogenerador – A5	650-700
Aerogenerador – A6	650-700
Aerogenerador – A7	650-700

Aerogenerador – A8	650-700
Aerogenerador – A9	650-700
Subestació Col·lectora	650-700

1.4 Estudi dels vents

Per la implantació d'un parc eòlic és vital un coneixement exacte possible dels vents a la zona on s'implantarà. És necessari que el vent sigui el més constant possible, així com que el rang de velocitats es mantinguin al màxim possible dintre del rang de funcionament de l'aerogenerador. Així doncs s'ha recorregut al programari *MiraMon* que disposa d'una cartografia de mitjanes anuals de vents al territori català expressats en m/s, corroborant les dades obtingudes amb el programari disponible de la pàgina web del Ministeri de Foment dels ports de l'Estat.

A la Figura 3 es pot apreciar que existeixen dos punts de monitorització de les dades, en el nostre cas ens interessen les dades del punt de la dreta que correspon al punt SIMAR-44 amb la posició corresponent (Latitud 42° N, Longitud 3.50° E) que és el punt més proper on s'ubicarà el parc eòlic. És imprescindible abans d'implantar el parc eòlic fer un estudi, amb una torre meteorològica per tal de corroborar les dades obtingudes prèviament i confirmar la viabilitat del projecte.



Figura 3. Punts de monitorització per l'extracció de dades dels vents. Boia SIMAR 44.⁵

⁵y⁶ http://www.puertos.es/oceanografia_y_meteorologia/redes_de_medida/index.html

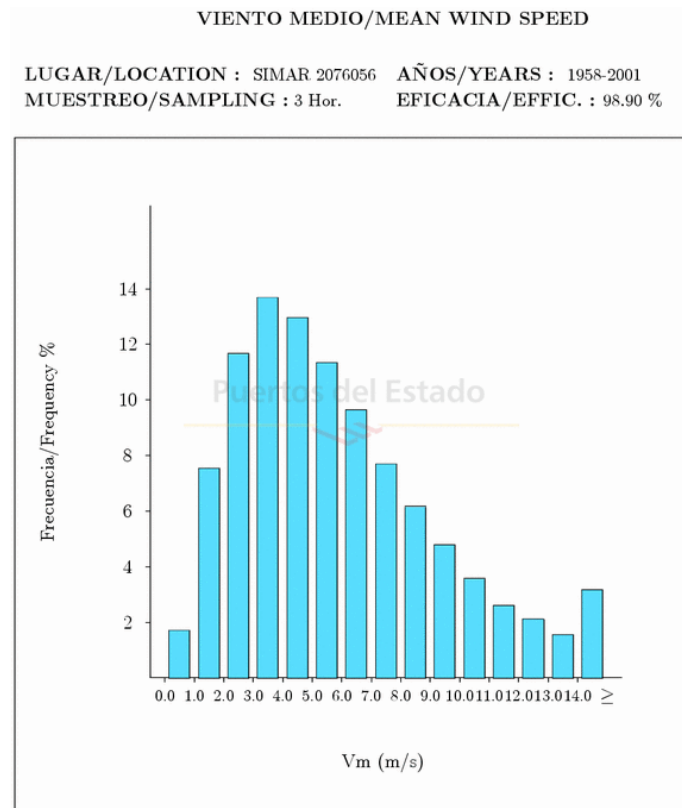


Figura 6. Gràfica de freqüència presència anual del vent.⁶

A la figura anterior es pot apreciar la distribució de *Weibull* amb els vents mitjos existents a la zona durant els períodes d'hivern del 1958 al 2001, on apareixen vents amb velocitats compresos entre 3 i 6 m/s el 54% del temps.

Per altra banda a la Taula 2 queden recollides les dades de vents mitjanes màximes registrades dintre del període 1958-2001 amb la finalitat de conèixer els vents màxims al que poden estar sotmesos els aerogeneradors. Aquestes dades s'utilitzaran per determinar de forma bàsica els esforços que poden patir els aerogeneradors i les seves estructures.

Taula 2. Històric dades de vents mitjanes màximes període (1958-2001).

Velocitats mitjanes màximes més altes registrades			
Mes	V Max. [m/s]	Rumb [°]	Any
Gener	24.0	348	1958
Febrer	23.2	348	1958
Març	20.8	343	1977
Abril	20.7	346	1989
Març	18.1	338	1963
Juny	15.6	349	1959
Juliol	16.7	339	1970
Agost	16.4	349	1973
Setembre	16.8	342	1984
Octubre	21.4	349	1962
Novembre	23.8	62	2001
Desembre	23.5	11	1980

A la Figura 7 queda recollida una rosa dels vents amb la direcció d'aquest amb la finalitat de conèixer l'orientació predominant i esbrinar així la distribució òptima en la que s'hauran d'instal·lar els aerogeneradors.

Es pot observar com els vents predominants són d'origen Nord, tenen una probabilitat d'ocurrència del 17%, les provinent del Nord-oest un 19% i tot i que hi ha altres orientacions de vents menys freqüents quedarien les orientacions de vent Sud-oest que tenen una probabilitat no menys important de l'orde del 20%.

Així doncs, segons les dades recollides es pot corroborar que aquesta és una zona òptima per l'emplaçament del parc eòlic pel que fa als vents, ja que gran part de les velocitats registrades es troben per sobre dels 3 m/s, aproximadament, sent aquest, el límit d'encesa de l'aerogenerador.

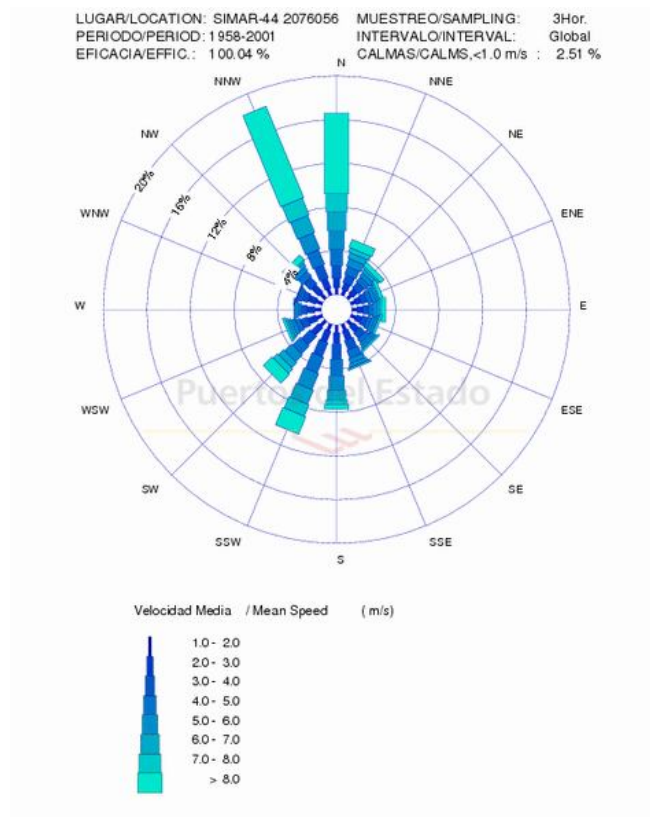


Figura 7. Rosa dels vents i velocitat dels vents.⁷

1.5 Estudi de l'onatge

Pel que fa al recull de dades d'onades s'ha recorregut a la xarxa XIOM que disposa de varies boies marines al llarg del litoral català, en concret ens basarem amb les dades de la boia del golf de Roses. Taula 3.

⁷ Font: http://calipso.puertos.es/tmp/d.html/VientoRos_26958.html

Taula 3. Recull valors mitjans alçada onades boia golf de roses.

Valors mitjans històrics 1992-2001	
Tipus	Valors [cm]
Hmàx	1043.00
Hmàx	96.11
H1/3 màx	597.00
H1/3 med	57.04
Tmed màx	11.40
Tmed med	3,78
Hmo màx	600.00
Hmo med	61.14

A la Taula 3 es pot veure que l'alçada màxima registrada per la boia del Golf de Roses és de 10,43 metres d'alçada, per tant aquests paràmetres s'hauran de tenir en compte a l'hora de calcular els esforços que s'exerciran sobre els cables d'ancoratge així com per altres elements, aquests càlculs no es realitzaran en aquest document ja que s'entén que aquesta part quedaria atribuïda a una empresa que realitzés aquest estudi amb més profunditat.

També s'ha corroborat la informació obtinguda amb la Xarxa XIOM amb el programa disponible a la pàgina web de "Puertos del Estado" i s'ha obtingut la Figura on està recollida la informació de la mitjana dels corrents marins a la zona així com de l'alçada d'onades.

Es pot apreciar que els corrents dominants són de component Nord com els vents tot i que en segon lloc els corrents provinent de component Sud – Sud-oest, també es pot observar que el 55% restant es distribueix per a components que van de la component Nord – Nord-est a Sud.

Donat que les dades recollides ressalten vents i corrents de component Nord, aquest aspecte tot i que s'hauria de confirmar amb un estudi més acurat, és convenient que la plataforma flotant amb els ancoratges estiguin col·locats amb orientació Nord-sud, tot i que el dimensionat dels cables hauria de ser per igual en tots els costats amb la finalitat de prevenir ràfegues de vent més importants a les registrades fins a les hores en qualsevol dels components.

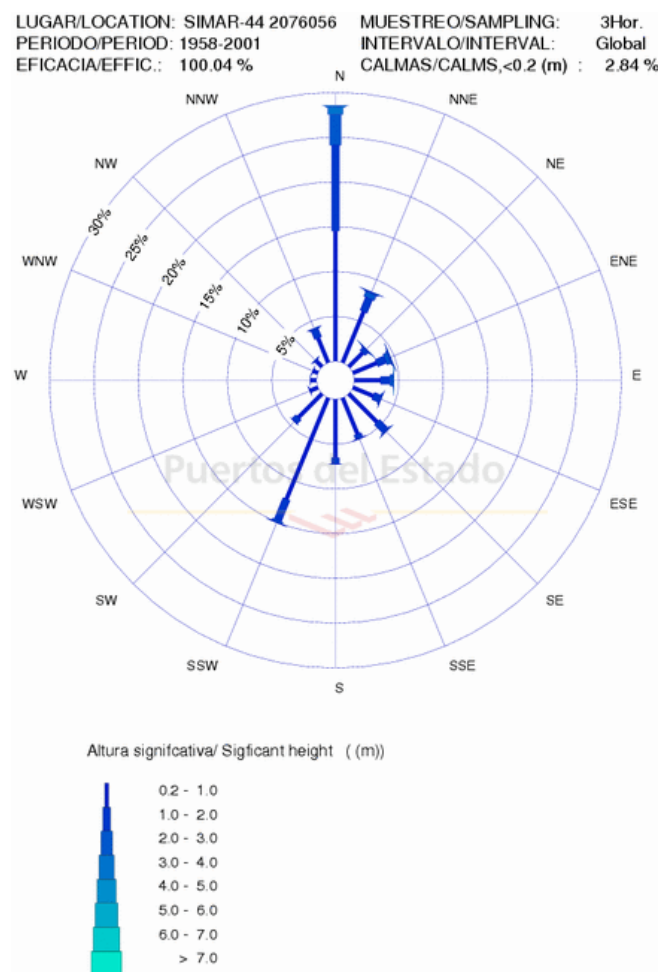


Figura 8. Històric XIOM de les onades a la boia de Roses des del 1992 al 2011.⁸

⁸ Font: http://www.puertos.es/oceanografia_y_meteorologia/redes_de_medida/index.html

2. Potència a generar

La potència total estimada a generar ve fixada per un mínim normatiu de 50 MW (Reial Decret 1028_2007) i havent escollit el model d'aerogenerador que s'utilitzaria en aquest parc (*Haliade* 150 - 6MW) s'ha decidit realitzar un parc d'una potència no molt superior al mínim imposat.

Així doncs amb la finalitat de generar l'energia suficient que permeti complir amb el límit fixat a nivell normatiu s'instal·laran un total de 9 aerogeneradors assolint així una potència màxima total generada de 54 MW.

Aquesta instal·lació permetrà generar la suficient energia per abastir la totalitat del municipi de Torroella de Montgrí així com els municipis que l'envolten. L'energia generada s'injectarà a la subestació de Bellcaire on serà distribuïda i transportada.

Amb la finalitat de poder garantir que l'energia generada és suficient per alimentar el municipi de Torroella de Montgrí on s'ha pogut constatar que el seu consum té un màxim es de 6 MWh en èpoques d'estiu.

També es té constància que a la zona existeixen 3 subestacions que converteixen tensions de transport de 110 kV a 25 kV per a la seva distribució i posterior consum.

2.1 Consum local

L'energia generada s'aportarà a la subestació de Bellcaire, per altra banda al aportar l'energia a la subestació farà que es consumeixi localment o amb una zona molt propera.

Taula 4. Consums Municipi Torroella de Montgrí.

Consums								
Mesos	CR1		CR2		CR3		Consum Mensual Total	
	[MWh]	[MW]	[MWh]	[MW]	[MWh]	[MW]	[MWh]	[MW]
Gener	1.179	2.689	1.465	3.002	3.002	3.002	3.666	8.693
Febrer	1.132	2.763	1.296	3.017	3.017	3.017	3.307	8.797
Març	1.219	2.470	1.424	3.234	3.234	3.234	3.541	8.938
Abril	1.044	1.914	1.540	4.199	4.199	4.199	3.316	10.312
Maig	1.120	2.245	1.616	3.471	3.471	3.471	3.530	9.187
Juny	1.122	2.402	2.211	4.928	4.928	4.928	4.455	12.258
Juliol	1.451	2.966	2.983	6.608	6.608	6.608	5.122	16.182
Agost	1.943	4.074	2.930	6.552	6.552	6.552	5.748	17.178
Setembre	1.477	3.651	2.045	5.074	5.074	5.074	4.383	13.799
Octubre	1.096	2.738	1.400	3.433	3.433	3.433	3.261	9.604
Novembre	1.055	2.420	1.187	2.473	2.473	2.473	3.057	7.366
Desembre	1.207	2.459	1.366	2.918	2.918	2.918	3.530	8.295

2.2 Subestacions

Les subestacions són punts dintre la xarxa de transport que serveixen per elevar o baixar la tensió i permetre la distribució d'energia elèctrica, ja que el transport es sol fer amb línies de 110 kV i la distribució amb 25 kV fins als centres de distribució.

A la zona existeixen 4 subestacions amb una potència nominal de 130 MW per subestació.

Aquests punts són importants ja que s'han de tenir en compte a l'hora de calcular la línia d'evacuació, ja que s'hauria de conduir la mateixa fins a la subestació més propera i accessible.

A la següent taula es disposa de la ubicació exacte de les subestacions de la zona on es podria injectar l'energia produïda pel parc eòlic marí a la xarxa de distribució i transport.

Taula 5. *Ubicació per coordenades geogràfiques de les subestacions.*

Localització geogràfica Subestacions		
Estació	Latitud	Longitud
BELLCAIRE	42° 4'21.82"N	3° 5'54.88"E
EMPORDANET	41°55'47.21"N	3° 9'3.56"E
FORALLAC	41°56'34.15"N	3° 3'8.09"E
PALAFRUGEL	41°55'17.23"N	3° 9'55.66"E

3. Elecció dels aerogeneradors

Per dur a terme l'elecció de l'aerogenerador a instal·lar s'ha recorregut a un nou model d'aerogenerador *offshore* fabricat per l'empresa Alstom Wind anomenat *Haliade 150*.

S'ha recorregut a aquest model ja que disposa d'un generador d'energia elèctrica d'imants permanents i segons el constructor aquest model és capaç de generar un 15% més d'energia a l'any i, també, de generar un 40% més d'energia per quilo respecte els seus competidors.

Aquest aerogenerador al disposar d'un nombre reduït de peces en l'eix de transició també ofereix uns estalvis a nivell de costos de manteniment ja que no disposa de caixa reductora i l'eix de l'aerogenerador es troba directament acoblat amb el generador.

Aquest generador de nova tecnologia d'imants permanents acoblat directament sobre l'eix s'anomena *Advanced High Densiti* sent el més lleuger de la seva generació.

A la Taula 6 es poden observar dades de dimensions, pes, potència, etc de l'aerogenerador.

Taula 6. Característiques genèriques del fabricant Alstom Wind.

Dades tècniques Haliade 150	
Dades d'explotació	
Potència	6 MW
Velocitat d'encesa	3 m/s
Velocitat del vent màxima	25 m/s
Freqüència de la xarxa	50/60 Hz
Pes	1.500 Tones
Rotor	
Diàmetre del rotor	150 metres
Longitud de les pales	73,5 metres
Superfície de treball	17 860 m ²

Dades tècniques Haliade 150	
Velocitat de gir del rotor	entre 4 et 11 tr/min
Velocitat a l'extrem de la pala	90,8 m/s
Alternador	
Tipus	Imants permanents d'acoblament directe
Tensió nominal	900 V _{AC} (per fase)
Número de fases	3 X 3
Índex de protecció	IPP 55
Convertidor	
Tipus	CA/CA (Trifàsic dos a dos)
Tensió de sortida	900 V _{AC}
Torre	
Tipus	Tub d'acer
Alçada del nucli	100 metres
Color estàndard	RAL 7035
Sistema del control de potència elèctrica	
Tipus	Velocitat variable, control individual del pas de cada pala.
Característiques de l'entorn	
Temperatures normals de l'aire	Entre -10 et +40°C
Temperatures extremes de l'aire	Entre -20 et +50°C
Protecció contra els llamps	Classe I segons la norma IEC 62305-1

Cal esmentar també que aquest aerogenerador està estudiat per instal·lar-se en un principi sobre una plataforma de gelosia i no una plataforma flotant, per això s'haurà de procedir a un estudi del dimensionat d'una plataforma flotant capaç de suportar el pes d'aquest aerogenerador.



Figura 9a. Imatge primera Haliade 150 instal·lada a Carnet, França.⁹



Figura 9b. Imatge primera Haliade 150 instal·lada a Carnet, França.

Segons les dades consultades, el cost de la primera comanda que rebrà Alstom per a construir diversos parcs eòlics amb un total de 240 aerogeneradors pujarà a més de 2 miliards d'euros per lo que s'estima que un aerogenerador té un cost aproximatiu de 8,34 milions d'euros aproximadament.

⁹ Font: Alstom_haliade_150_6mw.pdf (Alstom Wind).

3.1 Plataforma flotant

Un element imprescindible en els parcs eòlics instal·lats a alta mar, on les profunditats són superiors als 50 metres, és la plataforma flotant. Al no ser objecte d'aquest projecte el disseny d'aquesta, s'ha optat per un model ja dissenyat, en concret es tracta d'un model patentat i estudiat per a suportar un aerogenerador amb un pes de 945 tones per lo que s'hauria de fer un estudi previ per adaptar-lo al aerogenerador escollit fent que suporti les 1.500 tones.

Tal i com s'ha esmentat al punt on es tracta de l'estudi d'onatge serà necessari que l'empresa que s'encarregui de la fabricació d'aquesta base flotant realitzi els càlculs i assajos necessaris per a garantir la compatibilitat d'aquesta base flotant amb l'aerogenerador escollit entenent que l'empresa en qüestió haurà de disposar dels coneixements tècnics i les capacitats tècniques per a dur a terme aquesta estructura.

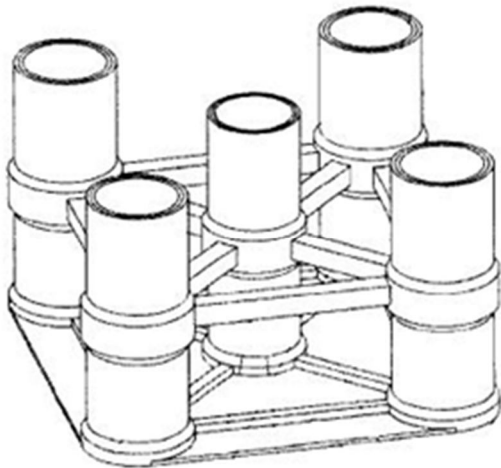


Figura 10a. Il·lustració de la plataforma flotant escollida.¹⁰

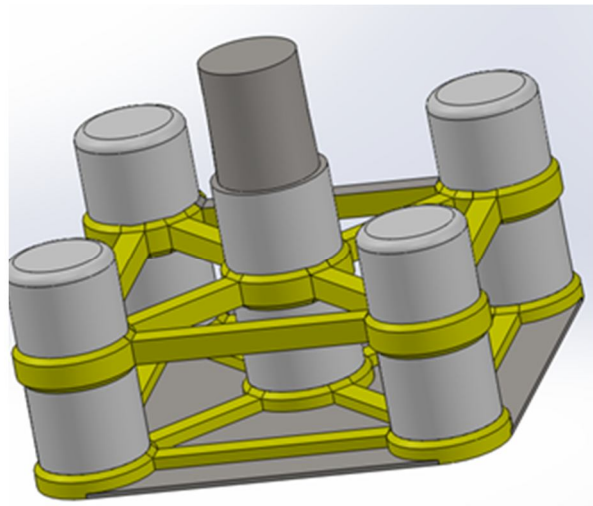


Figura 10b. Il·lustració de la plataforma flotant escollida.

¹⁰ Font: Plataforma semisumergible para aplicaciones en mar abierto, Número de publicación: 2387232

3.2 Característiques de la línia d'evacuació

En aquest apartat s'intenta donar una primera visió. Aquesta haurà de seguir un traçat que sigui compatible i no interfereixi sobre zones reservades o parcs naturals garantint així un dels aspectes de l'impacte ambiental de la instal·lació, però també haurà de complir la normativa d'alta tensió compatible i trobar-se protegida per una protecció elèctrica adient.

Tant mateix en un primer temps s'ha procedit a fer una primera hipòtesis mesurant la distancia del traçat sobre la cartografia estudiada veient que el traçat es caracteritza de dos trams, un tram submarí de 35 km i d'un altre soterrat a terra ferma de 11,5 km.

A la següent il·lustració es pot apreciar una il·lustració de la part del traçat submarí ja que es el que pot patir més error donat que la batimetria del terreny presenta unes variacions de profunditats bastant acusades.

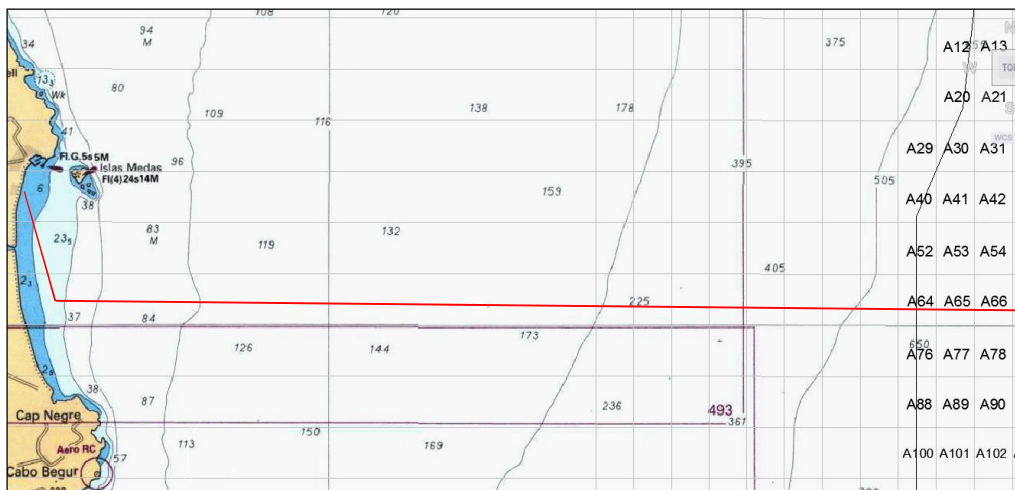


Figura 11. Traçat de la línia d'evacuació (part marítima).¹¹

Amb la finalitat de determinar la desviació de distància establerta dintre de la primera hipòtesis pel que fa la part submergida del traçat establert anteriorment s'ha procedit a realitzar una representació gràfica i esbrinar així quina afectació té el perfil submarí sobre la distància del traçat.

¹¹ Font: Font pròpia mitjançant cartografia real i AutoCAD.

Tal i com es pot apreciar a la Figura 12 la part final on es troba el parc eòlic es una zona on els pendents en un primer, en una primera instància, són forts, encara que si es té en compte l'escalat, no es considera significatiu respecte al fondeig dels aerogeneradors.

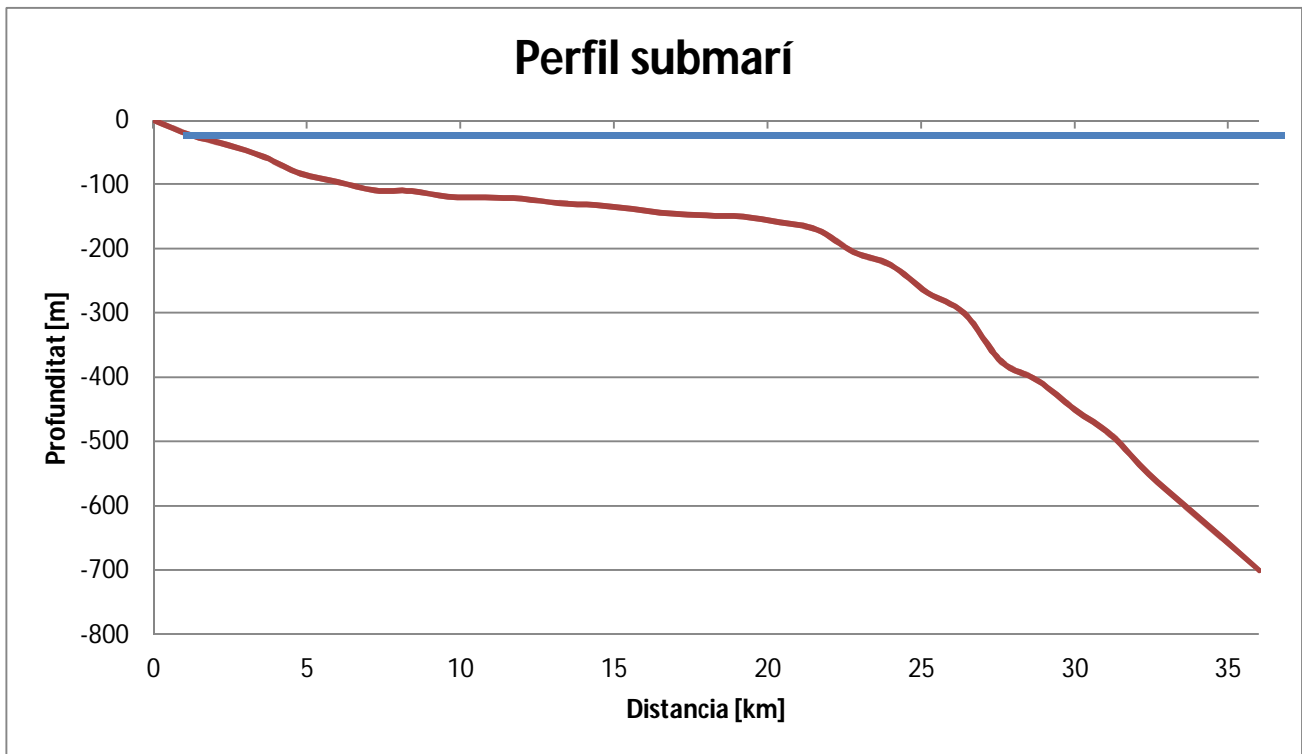


Figura 12. Gràfica del perfil submarí.

Veient la Figura es pot apreciar en vermell el perfil, aproximat, del fons i en blau el que representaria la lamina d'aigua del mar, amb la finalitat d'extreure de la gràfica les distàncies pertinents s'ha procedit a dividir la gràfica en 3 parts. La primera de 0 a 6 km de fondària, la segona de 6 a 22,8 km i la darrera dels 22,8 km fins als 36 km de distància que separen el parc i la costa.

Així doncs, aplicant regles de trigonometria i assimilant els pendents a la hipotenusa d'un triangle rectangle obtenim les següents dades:

Taula 7. Recopilació de dades calculades.

	Distància [m]	Profunditat [m]	Distància del pendent [m]
Tram 1	6000	83	6000,57
Tram 2	16600	122	16600,45
Tram 3	13200	495	13209,28

A partir de les dades recollides a la Taula 7 es pot veure que no hi ha una variació significativa de les distàncies tot i que seria convenient tenir en comte l'increment total de 10,3 metres sobre la llargada de la línia d'evacuació el que implica un increment del cost i de la caiguda de tensió tot i que segurament no siguin significatius.

3.3 Distribució del parc i localització

Amb la finalitat de que el vent abraçat per l'aerogenerador anterior no afecti amb turbulències a l'aerogenerador següent s'han de respectar els següents punts:

- Les turbines hauran d'estar separades entre sí tres diàmetres de rotor de l'aerogenerador, com a mínim.
- A la pràctica s'utilitza un espaiat de 5 a 9 rotors en el sentit del vent predominant (en el cas del present projecte de component Nord) i de 3 a 5 diàmetres de rotor en direccions perpendiculars als vents predominants.
- En el cas d'aprofitaments i optimització del terreny a ocupar es fan servir distàncies del doble del diàmetre del rotor.
- S'estimen en un 5% les pèrdues causades per l'efecte ombra.
- Els càlculs de l'efecte ombra es poden realitzar segons els models de *Parc Turbine Wake*, *GH WindFarmer*.

En aquest cas es tindran en compte els condicionants mencionats anteriorment per al que fa a la disposició del parc eòlic. Sabent que al mar territorial no hi ha problemes d'espai com podrien haver-hi a terra, s'ha optat per la separació suficient dels aerogeneradors perquè no s'interfereixin en la captació del màxim vent possible.

3.4 Disposició del parc eòlic marí

Així doncs, tenint en compte que l'aerogenerador escollit té un diàmetre del rotor de 150 metres, s'obté que l'espaiat haurà de ser en el sentit del vent predominant (component Nord) de 1.350 metres entre aerogeneradors i en el sentit perpendicular al vent predominant de 750 metres entre aerogeneradors.

Tenint en compte l'anterior espaiat i les distàncies de l'àrea deduïda segons la zona reservada pels parcs eòlics definida dintre de la normativa, sent de 1.550 m x 2.145 m per àrea, amb l'objectiu de limitar l'efecte ombra i veient que els vents predominants tenen una orientació Nord, Nord-oest s'ha optat per seleccionar 3 zones coincidents, concretament les àrees 52, 53 i 54, les més properes a la costa, per evitar costos addicionals en la instal·lació del cable d'evacuació submarí. A la Figura 13 es mostra l'àrea seleccionada.

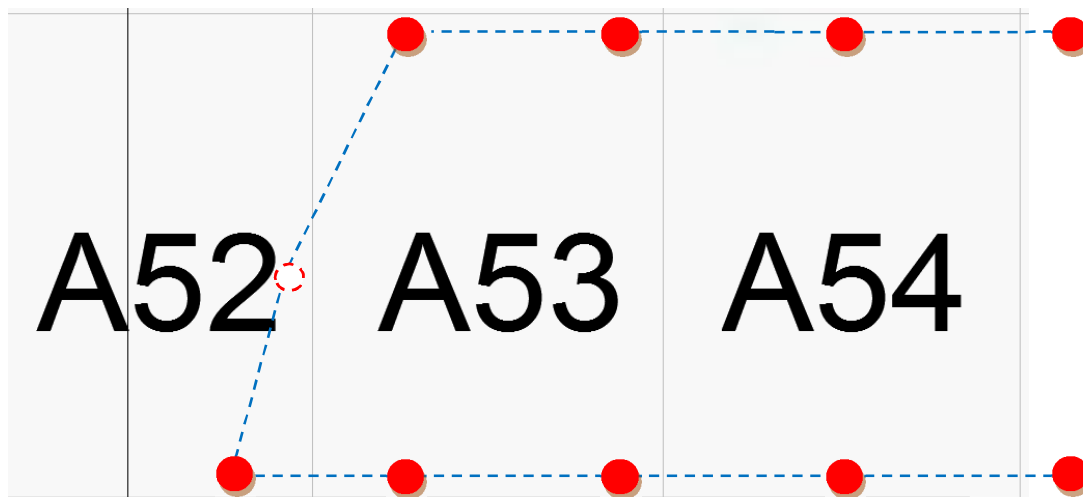


Figura 13. Representació gràfica de la disposició dels aerogeneradors i la subestació col·lectora del parc en les tres àrees seleccionades.

A la Figura es pot apreciar la representació gràfica de la disposició dels aerogeneradors, amb una separació entre aerogeneradors en l'eix horitzontal de com a mínim 850 metres i amb l'eix vertical de 1.700 metres, aproximadament. Es pot veure que per geometria es compleix amb molt marge el que descriu la bibliografia permetent limitar al màxim l'efecte s'ombra entre aerogeneradors.

La disposició de les turbines eòliques en l'àrea eòlica disponible de la zona s'ha establert en forma de línies d'aerogeneradors, concretament en dues files, per tal d'ocupar un número menor d'àrees i també per si en un futur existeix alguna fallada en la línia d'evacuació de l'energia, perquè, com a mínim, puguin seguir produint energia la meitat d'aerogeneradors. A més entre ells s'ha deixat la suficient distància perquè no es provoquin l'anomenat efecte ombra. A continuació es mostra la Taula 8 amb les ubicacions reals en coordenades UTM ED50 de cada aerogenerador dintre les àrees escollides per la implantació del parc eòlic marí, igualment, també es mostren les coordenades de la subestació col·lectora del parc, des d'on sortirà la línia d'evacuació submarina cap a la costa.

Taula 8. Posicions dels elements del parc eòlic marí amb coordenades UTM ED50.

Ubicació dels elements del Parc Eòlic Marí		
Element del parc eòlic	Coordenades UTM ED50	
	X	Y
Aerogenerador – A1	549,608	4653,489
Aerogenerador – A2	550,482	4653,489
Aerogenerador – A3	551,335	4653,488
Aerogenerador – A4	552,210	4653,488
Aerogenerador – A5	548,796	4651,799
Aerogenerador – A6	549,607	4651,798
Aerogenerador – A7	550,482	4651,798

Aerogenerador – A8	551,335	4651,798
Aerogenerador – A9	552,210	4651,797
Subestació Col·lectora	549,089	4652,643

4. Càlculs d'esforços dels aerogeneradors

L'objectiu d'aquest capítol és calcular i justificar els esforços que transmet l'aire sobre l'estructura amb l'objectiu de corroborar si el material que compon l'estructura de l'aerogenerador és suficientment robust per suportar els esforços conseqüents, afegir que aquest capítol és un punt únicament indicatiu a nivell d'esforços i que s'hauria de realitzar un estudi complet d'esforços amb dades fiables del fabricant per al dimensionat exacte de tots els components mecànics.

4.1 Justificació de les forces del vent

S'estudiarà l'esforç que exerceix el vent sobre l'aerogenerador i s'exclouran els càlculs referents a l'onatge. Per a la realització dels càlculs s'ha procedit a consultar diverses bibliografies d'aeronàutica i de mecànica de fluids extraient-ne les equacions que serviran per calcular la força que exerceix el fluid i l'aire que incideix sobre l'aerogenerador.

Queden exclosos els càlculs referents a l'aerodinàmica del perfil de les pales, s'ha treballat sobre un model purament orientatiu i amb mesures aproximades, donat que no s'ha pogut tenir accés a les dimensions exactes del model ni a coeficients necessaris pels càlculs de mecànica de fluids, recorrent doncs a equacions genèriques.

4.2 Perfil de velocitats del vent

Un punt a tenir en compte a l'hora dels esforços que exerceix la massa del vent sobre una estructura és la quantitat de vent que rebrà l'estructura, consultant fons bibliogràfiques sobre mecànica de fluids s'ha vist que el vent considerat com a fluid compressible i, per tant, el perfil de velocitats depèn del terreny que estigui travessant, això comporta que les velocitats més properes al terra es veuen reduïdes a causa de la pèrdua energètica causada pel mateix.

Tenint present aquesta dada es vol conèixer la quantitat de vent i, per tant, l'esforç que s'aplicarà a l'alçada del rotor, amb la finalitat de conèixer aquesta dada es fa servir la llei exponencial de *Hellmann* del tipus estadístic.

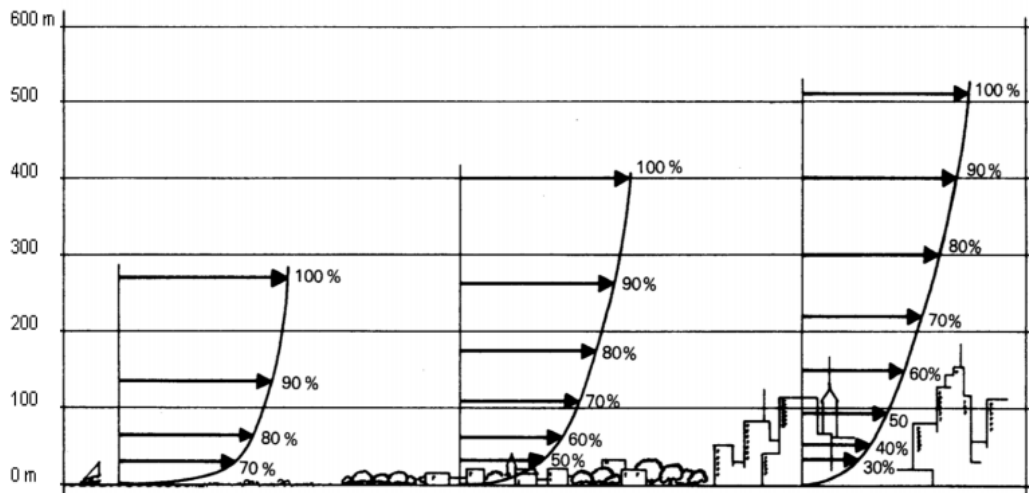


Figura 14. Perfil de velocitats segons la topografia del terreny.¹²

En la Figura 14 podem observar diferents perfils de vent depenent de la topografia del terreny. Així doncs, a la Figura 14 es pot apreciar que un perfil de velocitats ubicat al mar correspon al cas més favorable tot i que existeixen variacions a tenir en compte ja que els coeficients de rugositat i fricció varien segons l'estat del mar tal i com es pot apreciar a la Taula 9.

Per tant, sabent que la torre del nostre aerogenerador mesura 100 metres d'alçada amb un diàmetre del rotor de 150 metres, s'obté una alçada total màxima de 173,5 metres. Inicialment es procedirà a calcular la velocitat dels vents a diferents alçades obtenint així el perfil de velocitats del vent en el cas del present projecte. Per calcular les velocitats dels vents a diferents alçades es fa servir la llei exponencial de *Hellmann* per una alçada de 10 metres:

$$v_h = v_{10} \times \left(\frac{h}{10}\right)^\alpha$$

On a l'equació anterior v_h és la velocitat del vent i l'alçada h , v_{10} és la velocitat del vent a 10 metres d'alçada, i α és l'exponent de *Hellmann*.

També es pot fer servir la següent equació, coneguda amb el nom de la llei del perfil logarítmic:

¹² <http://soloenergia.com.ar/aprendamas/energiaeolica/principios.html>

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\ln(H/H_0)}{\ln(H_0/H_0)}$$

On:

Z_0 = Coeficient de longitud de rugositat en metres,

V_0 = Velocitat del vent a alçada H_0 ,

V = Velocitat del vent a alçada H ,

H_0 = Alçada de referència en metres,

H = Alçada en metres.

Per el que fa el coeficient de longitud de rugositat ve donat per la següent taula en funció de l'àrea on s'efectuï l'estudi.

Taula 9. Coeficients de longitud de rugositat.

Coeficients de longitud de rugositat		
Classe de Rugositat	Descripció	Longitud de la rugositat z [m]
0	Superfície del mar pla.	0,0002
	Superfície del mar picat.	0,0005
1	Àrees obertes amb molts pocs obstacles contra el vent.	0,03
2	Terreny agrícola amb alguns obstacles a més d'un quilòmetre de distància.	0,1
3	Districtes urbans i terrenys agrícoles amb molts obstacles contra el vent.	0,4
4	Ciutats grans o boscos.	1,6

Tenint en compte l'emplaçament escollit es procedirà a fer servir el coeficient de *Hellmann* corresponent a la rugositat 0 tenint un coeficient de 0,0005 ja que l'emplaçament es troba en alta mar i en condicions de vents importants el mar no es troba pla.

D'aquesta manera i utilitzant el coeficient de *Hellmann* anteriorment esmentat s'han extret els perfils de vents a la zona, dels 10 metres fins als 200 metres d'alçada, tal com s'aprecia a la Taula 10.

Taula 10. *Perfil de velocitats calculats.*

Taula dels perfil de velocitats calculats			
Alçada [m]	velocitat mitja [m/s]	velocitat mitja [m/s]	Promig [m/s]
200	9,004	9,504	9,254
180	9,004	9,504	9,254
170	9,003	9,504	9,253
160	9,003	9,503	9,253
150	9,003	9,503	9,253
140	9,003	9,503	9,253
130	9,002	9,502	9,252
120	9,002	9,502	9,252
110	9,001	9,502	9,251
100	9,001	9,501	9,251
90	9,001	9,501	9,251
80	9,000	9,500	9,250
70	8,999	9,499	9,249
60	8,999	9,499	9,249
50	8,998	9,498	9,248
40	8,997	9,497	9,247
30	8,996	9,495	9,245
20	8,994	9,493	9,244
10	8,991	9,490	9,240

Com es pot apreciar, la velocitat dels perfils de vents obtinguts varia poc en funció de l'alçada, de l'ordre de 0,004 a 0,01 m/s, ara bé, en aquest cas s'han exclòs del factor referent a la variació de la temperatura ja que es basen sobre una mitja anual de vents a una alçada determinada que varia entre 9 i 9,5 m/s.

A les imatges següents, Figura , Figura i Figura s'han representat els diferents perfils de velocitat per tal de poder observar la forma del perfil. S'observa que l'escalat és molt reduït ja que si es fes amb una escala de velocitats més gran no s'hagués pogut apreciar la forma del perfil ja que apareix com un front pla. Per tant, pel que fa les velocitats que arribarien al rotor de l'aerogenerador són de l'ordre de 9 i 9,5 m/s amb un promig de 9,25 m/s encara que en el cas del present projecte és interessant el cas màxim i, per tant, 9,5 m/s.

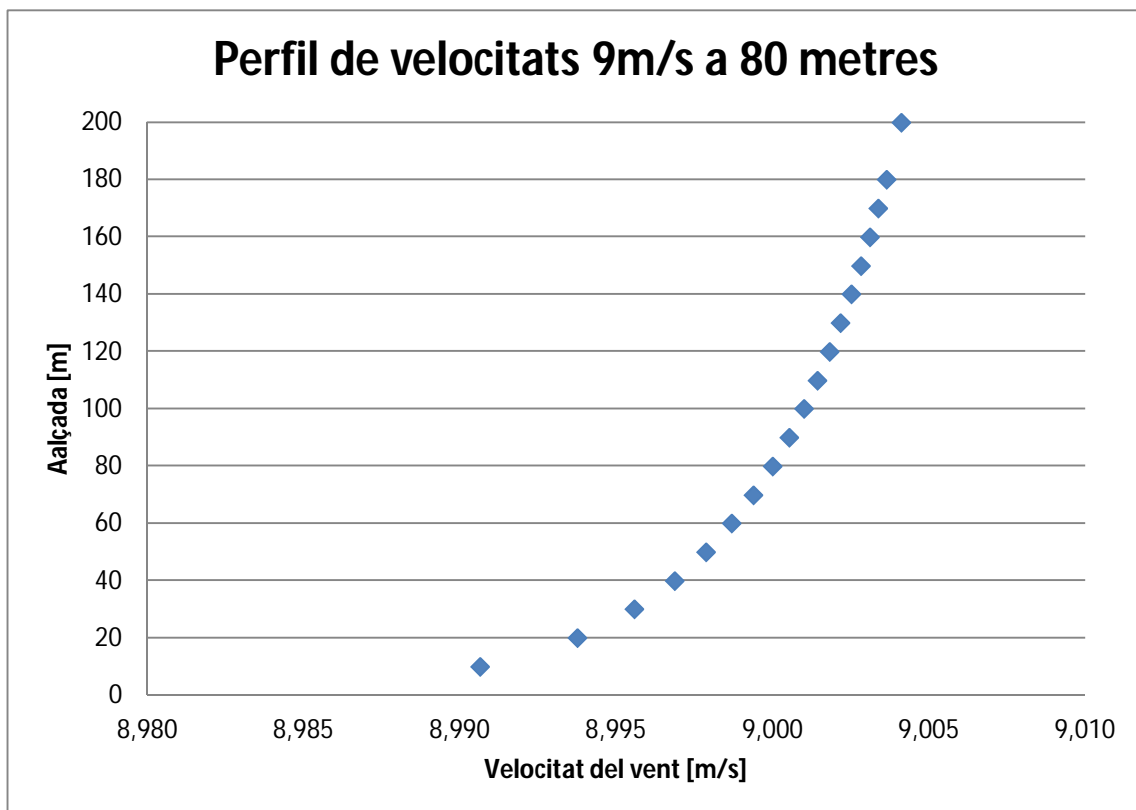


Figura 15. Perfil de velocitats calculats amb dada inicial 9 m/s a 80 m.¹³

¹³ Font pròpia mitjançant programari Excel.

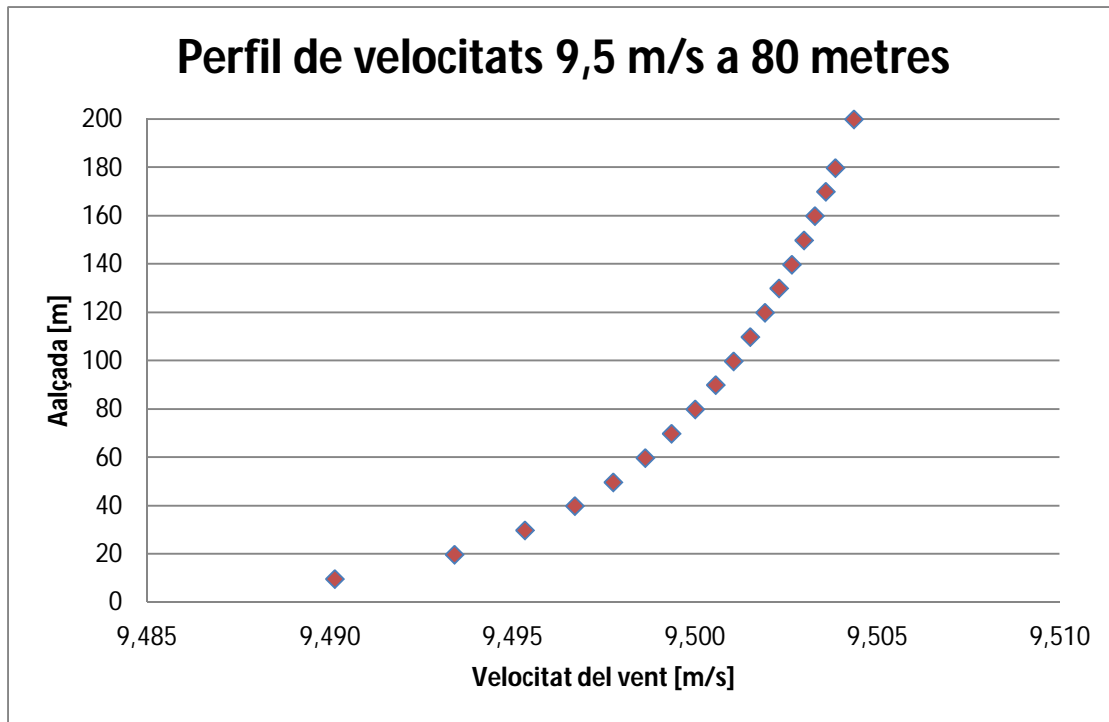


Figura 16. Perfil de velocitats calculats amb dada inicial 9,5 m/s a 80 m.¹⁴

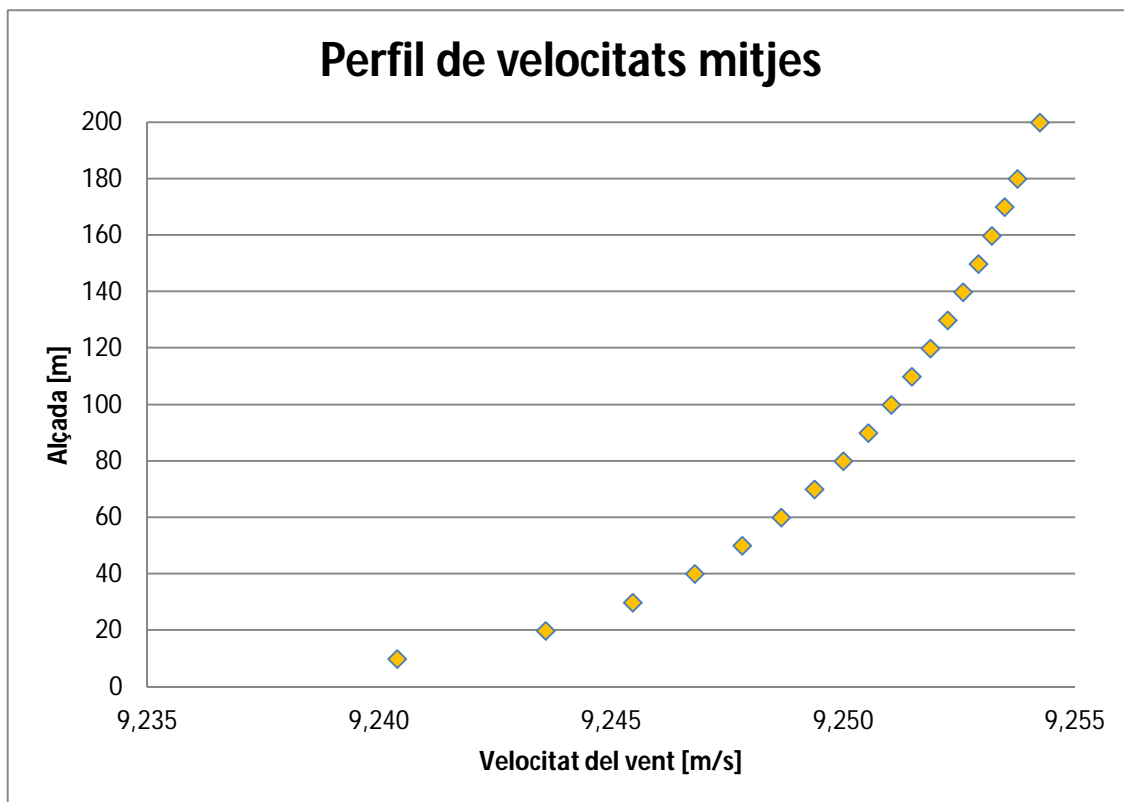


Figura 17. Perfil de velocitats mitja obtingut mitjançant càlcul.¹⁵

¹⁴ Y ¹⁵ Font pròpia mitjançant programari Excel.

4.3 Energia del vent disponible

Amb la finalitat de conèixer el recurs eòlic disponible a la zona es procedirà a calcular l'energia útil del vent, tant mateix la potència útil del vent varia al llarg de l'any tal i com ho fa la velocitat del vent, així doncs amb la finalitat de disposar d'un càlcul aproximat es pot fer servir la velocitat mitja al llarg de l'any que s'ha trobat a la cartografia emesa per l'IDAE i que correspon a un valor mig de 9,25 m/s.

La fórmula de la potència útil anual del vent ve donada per la següent fórmula:

$$N_{ventanual} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v_{anual}^3$$

A partir de l'equació anterior es pot dir, per tant, que si es fa servir una velocitat mitja anual s'obtindrà una potència útil mitja anual.

$$\bar{N}_{ventanual} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times \bar{v}_{anual}^3$$

Fent servir l'equació anterior i considerant una densitat de l'aire $\rho=1,225$ Kg/m³, una velocitat mitja de 9,25 m/s, una àrea amb un valor de 17.860 m² i implementant les dades a l'equació anterior s'obté la següent potència útil anual.

$$\bar{N}_{ventanual} = \frac{1}{2} \times 1,225 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 17860 \text{m}^2 \times 9,25_{anual}^3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\bar{N}_{ventanual} = 1059999353 \text{W}$$

Amb l'objectiu de corroborar les dades obtingudes s'ha realitzat un càlcul en base de la densitat de vent anual disponible de la zona, tot i que no s'ha pogut obtenir una densitat de potència en watts exacte disponible a l'any, sí que s'ha obtingut un rang de 600-800 W/m² obtenint així els següents valors de potència mitja disponible anual. Taula 11.

Taula 1. Potències de vent anual disponible.

Taula de les potències de vent anual disponible	
Densitat de potència disponible [W/m²]	Potència del vent anual disponible [W/any]
600	10 716 000
650	11 609 000
700	12 502 000
750	13 395 000
800	14 288 000

Així doncs fins que no s'obtinguin dades exactes amb mesuraments in situ es considerarà la menor potència útil anual disponible i, per tant, la que s'ha calculat en un primer temps que correspon a 10.599.993,53 W = 10 MW.

És important aclarir que la potència útil varia al llarg de l'any amb més o menys importància segons les estacions ja que es veu afectada pel valor de la densitat de l'aire i la temperatura. També és important recalcar que segons les diverses fonts consultades els aerogeneradors més moderns no solen poder absorbir més del 50% de l'energia útil del vent disponible, tot i que aquest aerogenerador permetria aprofitar fins un 65% de la potència útil, segons la informació publicada pel fabricant.

Així doncs, es pot deduir que aproximadament es podria aprofitar 6,5 MW d'energia útil disponible en sortida d'aerogenerador, però en el cas del projecte com l'aerogenerador escollit té una potència màxima de 6 MW neta es podria dir que l'aerogenerador escollit podria treballar a màxim rendiment bona part de l'any tot i que aquesta afirmació no és certa ja que probablement hi hagin dies que no es produeixi o es produeixi poc a causa d'un vent feble.

4.4 Càlculs d'esforços

Per tal de calcular els esforços que genera el vent sobre l'aerogenerador és necessari conèixer la velocitat màxima que pugui admetre l'aerogenerador, en aquest cas 25 m/s, per altra banda s'ha recorregut a consultar l'històric de vents que tinguin una velocitat mitja màxima al llarg del període 1959 - 2001 de 24 m/s, el que ens deixa intuir que els vents superen els 25 m/s.

Cal remarcar que per velocitats majors a 25 m/s l'aerogenerador disposa les aspes en "bandera" (posició paral·lela a la direcció del vent) evitant que es malmeti l'aerogenerador.

També es necessari conèixer l'àrea que escombra l'aerogenerador que es considera com un disc d'una àrea A que segons el fabricant és de 17.860 m², la densitat de l'aire ($\rho=1,225$ Kg/m³) també és un factor determinant així com un valor constructiu que normalment es facilita per part del fabricant que és el coeficient d'arrossegament (C_D fabricant) desconegut, per tant s'ha fet servir una dada d'un aerogenerador offshore genèric de 5 MW $C_D = 0,5$.

L'equació de la força que transmet el vent a l'estructura ve donada per la següent fórmula:

$$F = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^2 \times C_D$$

Substituint els valors que s'han pogut trobar dintre de l'equació anterior obtenim:

$$F_{vent} = \frac{1}{2} \times 1,225 \times 17860 \times 25^2 \times 0,5 = 3418,52 \text{ KN}$$

Segons el càlcul realitzat es pot dir que la força que realitza el vent sobre l'àrea que escombren les aspes de l'aerogenerador equival a una força central sobre l'eix de la mateixa intensitat, de 3.418,52 KN.

Coneixent doncs l'esforç del vent sobre l'aerogenerador s'ha de procedir a analitzar el moment d'inèrcia que es repercutirà sobre la base de l'aerogenerador segons la fórmula següent:

$$M = F \times d = 3418,52 \text{ KN} \times 100 \text{ m} = 341852 \text{ KN} \cdot \text{m}$$

D'aquesta forma és coneix el moment que realitza el vent sobre la base de l'aerogenerador en el sentit de l'avanç del vent, juntament al moment de l'aerogenerador també a la base hi ha una segona força que exerceix el propi pes de l'aerogenerador que es calcula de la següent manera:

$$F_{aerogenerador} = Pes \times gravetat = 1500000 \text{ Kg} \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$F_{aerogenerador} = 14715 \text{ KN}$$

Segons el càlcul realitzat la força que exerciria el pes del propi aerogenerador sobre la plataforma flotant en la direcció $-Y$ i d'una magnitud de 14 715 KN o que és el mateix $-14\ 715$ KN en l'eix "Y" segons un eix de coordenades X,Y,Z.

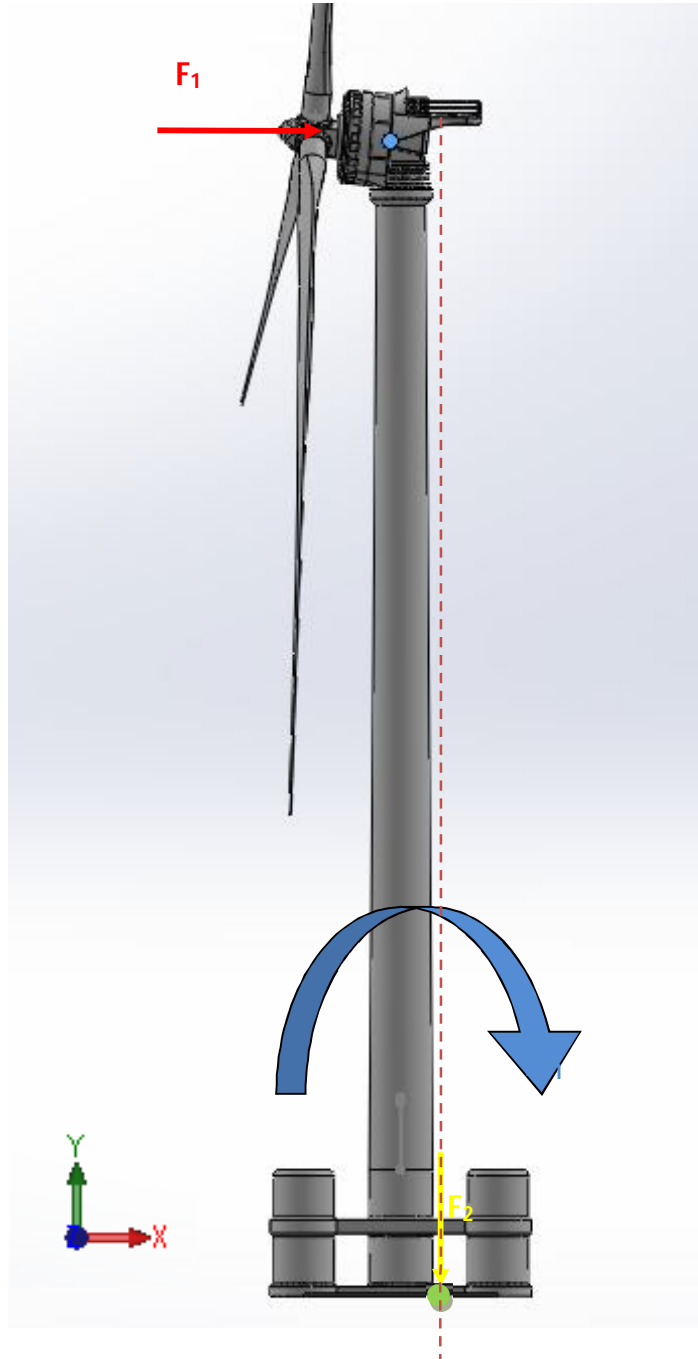


Figura 18. Esquema representatiu d'aplicacions d'esforços.¹⁵

¹⁵ Font pròpia mitjançant Solidworks

A la Figura 18 queden representades les forces que s'apliquen sobre l'aerogenerador on el punt verd representa el centre on s'apliquen els esforços sobre la plataforma flotant, F_1 eés la força del vent, F_2 la força resultant del pes de l'aerogenerador i M_1 és el moment resultant de la força F_1 .

5. Referències bibliogràfiques

Aerogeneradores; Creus Solé, Antonio. Editorial CEYSA. CANO PINA, S.L. EDICIONES

Bolzan, J.F. and K.C. Jezek. 2000. Accumulation rate changes in central Greenland from passive microwave data. *Polar Geography* 27(4): 277-319.

Cartwright, P., Xu, L., Saase, C. (2004) "Grid Integration of Large Offshore Wind Farms Using Hybrid HVDC Transmission", in Proceedings of the Nordic Wind Power Conference, Held at Chalmers University of Technology, Sweden, March 2004, CD produced by Chalmers University of Technology, Sweden.

Conferència Interconnexions Elèctriques Submarines REE 01 juny 2011.

Flinders, David J. and Geoffrey E. Mills, eds. 1993. *Theory and concepts in qualitative research: perspectives from the field*. New York: Teachers College Press.

Institut català de l'energia. Atlas eòlic de Catalunya. Resultats del primer any. Barcelona, 1988.

Kimble, John M., Rattan Lal, and Ronald F. Follett, eds. 2002. *Agricultural practices and policies for carbon sequestration in soil*. Boca Raton, Fla.: Lewis Publishers.

Kourik, Robert. 1998. *The lavender garden: beautiful varieties to grow and gather*. San Francisco: Chronicle Books.

Lundberg, S. (2003). *Configuration Study of Large Wind Parks*, Licentiate thesis, Chalmers University of Technology, School of Electrical and Computer Engineering, Technical Report No. 4741, Göteborg, Sweden, October 2003.

Manual de energía eólica - Colección energías renovables, J.M. Escudero López. Ediciones MundiPrensa 2008.

Offshore Wind Power, Edited by John Twidell and Gaetano Gaudiosi.

Ohio State University. Natural Resources Institute. 1959. *A directory of Ohio facilities and services for resource conservation*. Columbus: Natural Resources Institute.

Roach, John. 2005. *Journal Ranks Top 25 Unanswered Science Questions*. <http://news.nationalgeographic.com> (accessed July 7, 2005).

Rollin, Bernard E. 1998. *The Unheeded Cry: Animal Consciousness, Animal Pain, and Science*. Ames, Iowa. The Iowa State University Press. <http://www.netlibrary.com> (accessed June 30, 2005).

Sistemas de generación eléctrica para aerogeneradores – Curso RED RIGE-UTE Montevideo Uruguay.

Terborgh, J. 1974. Preservation of natural diversity: The problem of extinction-prone species. *BioScience* 24: 715-22.

Thomas, Trevor M. 1956. Wales: Land of Mines and Quarries. *Geographical Review* 46, no. 1: 59-81. <http://www.jstor.org/> (accessed June 30, 2005).

Wind Power in Power Systems, T. Ackermann [Editor], (c) John Wiley & Sons Limited.

Yow, Valerie Ralieg. *Recording oral history: a guide for the humanities and social sciences*. Walnut Creek, CA: Alta Mira Press, 2005.