

Treball de Fi de Grau  
Enginyeria en Tecnologies Industrials

**Viure de l'Aire del Cel**  
Memòria

**Autor:** Adrià Serarols Llorens

**Director/s:** Lluïsa Jordi

**Convocatòria:** Juny 2016



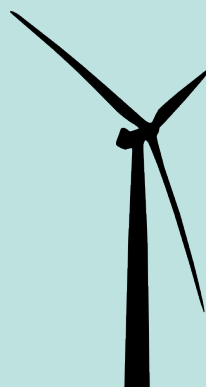
Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





# **Viure de l'Aire del Cel** Memòria

Adrià Serarols Llorens





## Resum

Aquest treball queda emmarcat dins del projecte *Viure de l'Aire del Cel*, que inicià l'empresa Eolpop SL a finals del 2009. Es tracta del primer aerogenerador a Catalunya de propietat col·lectiva, finançat mitjançant les aportacions de les persones participants en el projecte, amb la col·laboració de SomEnergia; inversions que seran retornades a partir de la venda d'electricitat produïda mitjançant el molí, és a dir, provinent de fonts renovables.

Inicialment s'havia pensat en utilitzar un model dels que ofereix la empresa Alstom per a la realització del molí que preveu el projecte, i se'ls s'havia sol·licitat una oferta. Donat que l'empresa Alstom ja no existeix, ja que actualment forma part de General Electric, i els seus anteriors productes han quedat descatalogats, s'ha hagut de buscar alternatives a la proposta inicial, i arrel d'això sorgeix aquest treball.

El treball consisteix en un estudi entre les diferents opcions que ofereixen les principals empreses europees que es dediquen al sector eòlic, a fi de trobar quin és el model més òptim, segons les condicions de l'emplaçament i els permisos dels que es disposa. Per fer-ho, ha estat necessari realitzar un anàlisi de l'energia que podria produir cada tipus d'aerogenerador, així com el balanç econòmic al llarg de tota la vida útil de les màquines, per tal de determinar quina és la opció més rentable i que serà instal·lada dins del projecte *Viure de l'Aire del Cel*.



*Imatge 1. Operari realitzant el manteniment d'un aerogenerador.*



# Índex

1. Antecedents	06
2. Introducció	
2.1 Objectius	09
2.2 Abast del projecte	09
3. Condicions de l'emplaçament	11
4. Models d'estudi	
4.1 Introducció i restriccions	15
4.2 Empreses estudiades	16
4.3 Models d'aerogenerador	18
5. Càlcul de la potència	
5.1 Paràmetres	20
5.2 Llei de Betz	22
5.3 Resultats	24
6. Viabilitat econòmica	
6.1 Cost total de la instal·lació	31
6.2 Preu de venda de l'electricitat	32
6.3 Ingressos	33
6.4 Cost de generació del kWh	34
6.5 Rendibilitat i retorn de la inversió	35
7. Impacte ambiental	39
8. Conclusions	40
9. Bibliografia	
8.1 Llibres i Articles	42
8.2 Webgrafia	43
Annex	45

# 1. Antecedents

Tothom ha sentit a parlar del canvi climàtic alguna vegada. La crema de combustibles fòssils i el carbó són, i han estat des de fa temps, els mètodes més usuals d'obtenció d'energia per a l'ús de la comunitat arreu del món. No obstant, la combustió d'aquests materials no tan sols és perillosa, sinó que genera una sèrie de gasos contaminants, com el CO<sub>2</sub>, que avui dia és una de les principals problemàtiques a resoldre a nivell ambiental. Cal modernitzar-se, i no seguir basant-nos en un principi que l'home coneix des del paleolític: el foc.

En un planeta com el nostre, els recursos que la natura ens ofereix són més dels que necessitem per abastir la població mundial, i hem estat molts anys desaprofitant-los. Avui dia, les energies renovables són una alternativa que proposa un canvi, amb un impacte ambiental molt menor. Un canvi, però, que està sent frenat per les empreses petrolíferes que controlen el mercat del sector energètic i se'n lucren. Empreses que no tan sols tenen poder monetari, sinó que poden exercir fortes influències polítiques. És fàcilment reconeixible en el cas d'Espanya on, pel fet d'haver-hi centrals tèrmiques més que suficients, algunes encara per amortitzar, no es va dur a terme cap instal·lació d'energies renovables al 2015, per exemple. Sovint hom s'interessa més pels diners que pot obtenir, i es deixen de banda les qüestions ètiques.

És per això, que cal informar a la població de les possibilitats que avui dia les noves tecnologies presenten, i els avantatges que suposen en tots els aspectes. Per exemple, una central tèrmica produeix l'energia amb un rendiment dels voltants d'un 30%, mentre que l'energia eòlica és capaç actualment de obtenir-se amb un rendiment d'un 50%, que podria seguir pujant fins a un 60% (lleï de Betz). Cal conscienciar a la població del ventall d'opcions existents, a fi que es deixi de banda la postura conformista amb la que s'ha actuat durant tants anys, limitant-se a pagar els rebuts sense parar-se a analitzar què indiquen i perquè. L'autogestió i l'autoconsum de l'energia pròpia hauria de ser un dret humà tant important com qualsevol altre, i les institucions haurien de oferir facilitats envers aquesta postura, enlloc de complicades gestions burocràtiques.

És per això, que l'empresa Eolpop va decidir fa uns anys (2009) iniciar el projecte *Viure de l'Aire del Cel*. Un projecte que vol mostrar la disconformitat d'un col·lectiu de persones implicades envers la situació actual, impulsant la democratització del sistema energètic, i demostrar el poder de la gent per poder realitzar conjuntament projectes de gran envergadura, i que alhora poden ser un negoci més rentable que qualsevol pla d'inversions que pugui oferir una entitat bancària, i amb l'avantatge de conèixer en tot moment, on, i de quina manera es generen els ingressos del projecte, i poder-ne fer un seguiment. El projecte vol servir també com a motivació per a la població i/o entitats per realitzar en un futur proper rèpliques del projecte, o altres projectes col·lectius de caràcter similar relacionats amb les energies renovables.



El projecte *Viure de l'Aire del Cel*, és el primer projecte espanyol que suposa un aerogenerador de propietat col·lectiva, i es desenvolupa a Catalunya. El projecte consisteix en la instal·lació d'un aerogenerador de classe IEC IIIa, de propietat en cooperativa al municipi de Pujalt (Anoia), amb la finalitat d'obtenir energia provinent de fonts renovables, que abastirà la xarxa elèctrica. El seu finançament s'aconseguirà mitjançant les aportacions de les persones i/o entitats interessades en participar en el projecte, i en col·laboració amb SomEnergia. Els beneficis que es generin seran íntegrament per als participants en el projecte. Dels ingressos obtinguts cada any, se'ls retornarà la part proporcional a la inversió que hagi fet cadascun d'ells, al llarg de tota la vida útil de la màquina.

L'empresa Eolpop, com a entitat gestora, és l'encarregada de tramitar els permisos necessaris, escollir i negociar el model d'aerogenerador que s'adapti millor a les condicions ambientals de l'emplaçament escollit, realitzar l'estudi econòmic pertinent conforme el projecte és viable, garantir la realització de l'obra civil referent al punt de connexió amb la xarxa, per després encarregar-ne el muntatge i posada en funcionament, i garantir-ne el seu manteniment i bon funcionament. S'ha establert un període de vida base de 20 anys de la màquina, que intentarà allargar en la mesura que sigui possible.



*Imatge 2. Aerogenerador en estat previ al seu muntatge.*



*Imatge 3. Vista de terra d'un aerogenerador.*

## 2. Introducció

### 2.1 Objectius

Donat que els tràmits administratius del projecte per obtenir tots els permisos han estat molt llargs, i en vista que l'empresa Alstom, amb qui s'havia establert un tracte anteriorment (2010), actualment ja no funciona com a empresa independent, sinó que durant aquests anys ha passat a formar part de General Electric, Eolpop SL s'ha vist obligada a replantejar el model de l'aerogenerador a escollir, ja que el model que s'havia establert per al projecte ha quedat descatalogat, malauradament. Aquest treball es constitueix d'un estudi de mercat que compara les diferents opcions de les principals empreses que es dediquen a la fabricació d'aerogeneradors, per tal de decidir quina és la opció més rentable pel projecte.

És per això, que ha estat necessari investigar quines són les diferents empreses europees que treballen en el sector de l'energia eòlica, per trobar quina és la opció d'entre les que aquestes puguin oferir, que millor s'adapti a les condicions del projecte, tant a nivell de producció d'energia com a nivell econòmic, i que posteriorment Eolpop s'encarregarà d'instal·lar. S'han analitzat models pertanyents a les empreses Vestas, Nordex, Enercon i Gamesa. Tanmateix, s'ha considerat oportú incloure en l'estudi comparatiu el model que s'havia considerat a l'inici del projecte (Alstom ECO122) com també alguns dels models que ofereix el catàleg de General Electric actualment, a fi de fer una comparativa més exhaustiva.

Així doncs, l'estudi consta fonamentalment de dues parts: el càlcul de l'energia que podria produir cada model d'aerogenerador donades les condicions de l'emplaçament, i la viabilitat econòmica de cadascuna de les màquines al llarg de tota a seva vida útil, d'acord amb la producció d'energia estimada, per finalment poder concloure afirmant quin dels models estudiats és el que caldrà instal·lar.

### 2.2 Abast del projecte

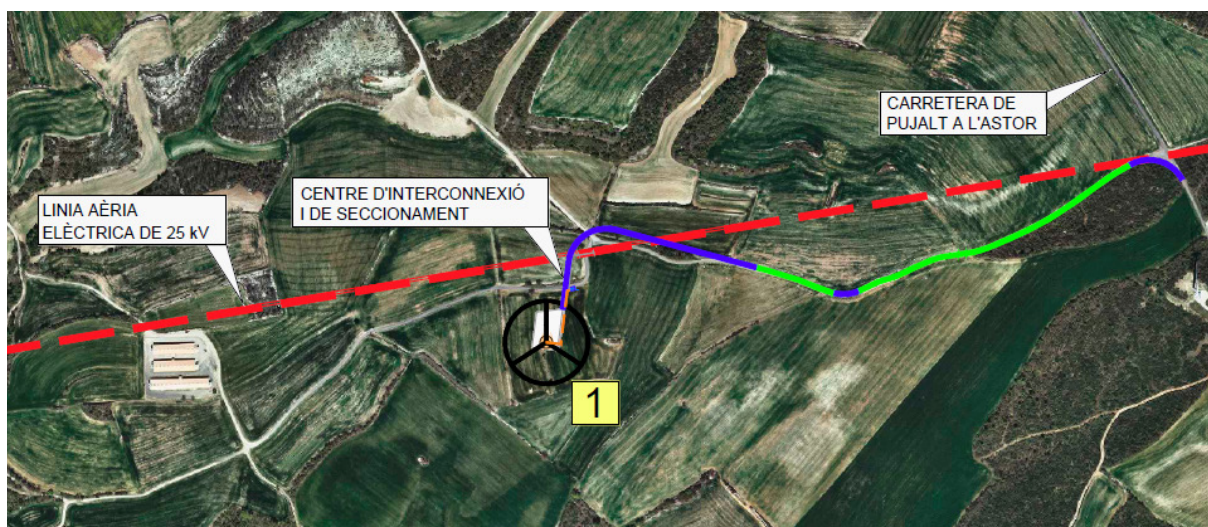
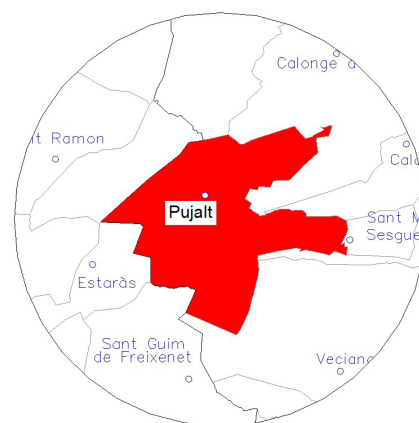
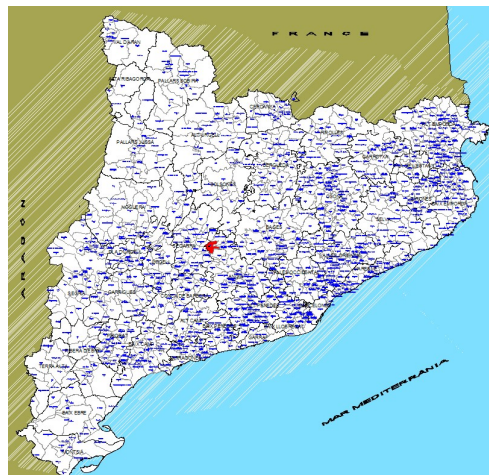
El treball, però, no abasta les qüestions administratives referents als permisos i autoritzacions per a la instal·lació de la màquina, ni un anàlisi de seguiment de la opció que finalment s'ha escollit, ja que, actualment, encara no ha estat instal·lada. El treball es limita a l'estudi dels diferents models, malgrat que durant les pràctiques s'hagin tractat altres qüestions com ho són tramitar el contracte de l'obra civil o organitzar l'esdeveniment per a la posada de la primera pedra del projecte, per exemple. Actualment s'estan començant a dur a terme els treballs d'obra civil i del punt de connexió amb la xarxa in situ.



### 3. Condicions de l'emplaçament

Com ja és conegut en el projecte *Viure de l'aire del cel*, l'aerogenerador serà instal·lat al municipi de Pujalt, que pertany a la comarca de l'Anoia, a una altura aproximada d'uns 750 metres per sobre el nivell del mar. Les imatges que apareixen en aquesta pàgina mostren la ubicació del molí, que concretament s'instal·larà a les coordenades següents: UTM (ETRS89) X= 369723, Y = 4618198.

Es va considerar que aquest és un emplaçament adequat per a la instal·lació de l'aerogenerador per diversos motius: el fet que és una zona de camps força planera, implica que la rugositat en el terreny sigui molt petita, i conseqüentment la capa límit del vent també ho és, cosa molt favorable, ja que s'assoleix una velocitat major del vent a menys altura. També pel fet que per la zona es poden trobar altres aerogeneradors instal·lats anteriorment, i això aporta que es puguin facilitar dades sobre la distribució de velocitats del vent de la zona i, en cas d'utilitzar una màquina pertanyent a la mateixa empresa que les màquines ja existents a la zona, abaratir considerablement els costos de manteniment. No obstant, es parla d'un emplaçament amb vents que es consideren baixos (velocitat mitjana del vent = 6,7 m/s), i és per això que és convenient utilitzar una màquina optimitzada per aquestes condicions, de classe IEC IIIa.



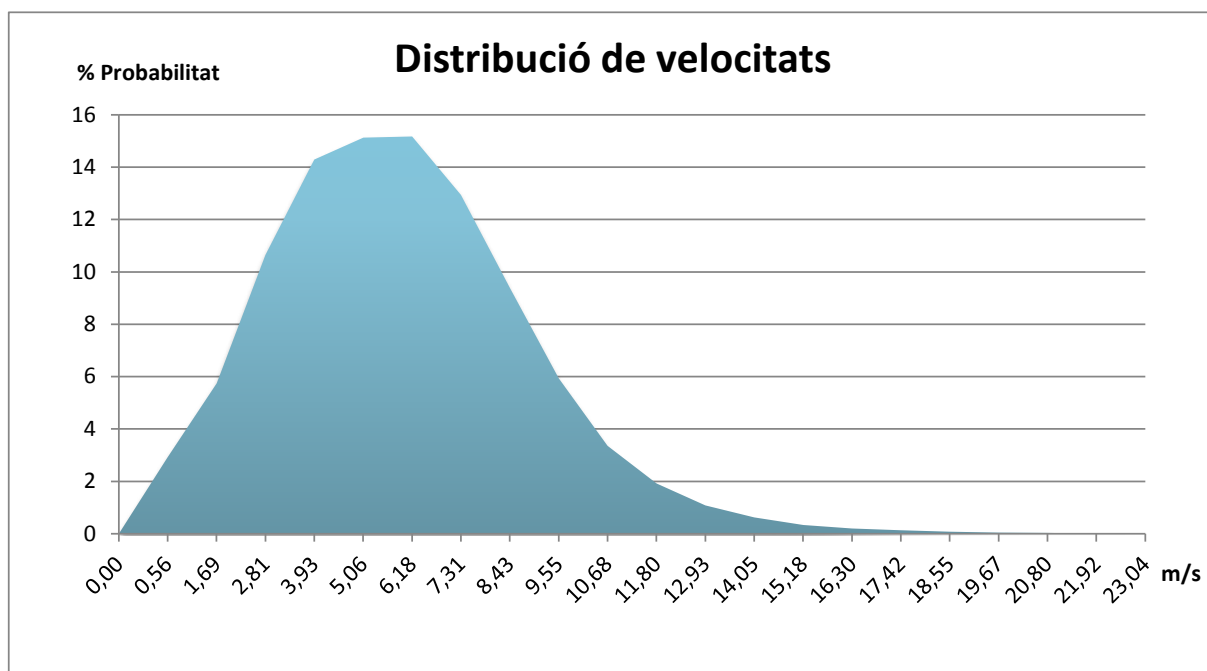
Imatges 4, 5 i 6. Emplaçament del molí.

Pel que fa a les dades pertanyents a l'estudi de la velocitat del vent de la zona, s'han utilitzat dues fonts diferents a fi de poder contrastar millor la informació, en cas que cap de les dues fonts fos del tot precisa. D'una banda, per fer l'estudi s'han utilitzat els valors que aporta la web d'ús lliure de l'IDAE, on se'ns dona una distribució de velocitats, tot i que és d'esperar que difereixi lleugerament envers les dades de les que disposen les empreses que treballen amb energia eòlica, ja que les dades que obtenim són calculades a partir de interpolacions entre els punts dels que sí que disposen de mesures reals. D'altra banda, s'ha recollert informació de la base de dades d'un molí existent, proper a l'emplaçament de l'estudi. No obstant, aquest molí té una altura de tan sols 40 metres, i el fet d'haver de corregir la velocitat a més del doble d'altura pot donar lloc a imprecisions. És per això que s'ha decidit treballar amb les dues distribucions i finalment comparar els resultats obtinguts a partir dels dos mètodes. A continuació es mostren dues taules amb les dades esmentades:

Dades del IDAE ( 80 m d'altura)			Dades del molí existent (80 m d'altura)		
Direcció	Freqüència %	Velocitat m/s	Direcció	Freqüència %	Velocitat m/s
N	1,45	4,118	N	1,10	4,946
NNE	1,17	3,184	NNE	0,7	3,597
NE	1,78	3,745	NE	1	3,709
ENE	5,36	6,748	ENE	1,6	5,845
E	5,83	6,362	E	4,8	7,981
ESE	4,68	5,427	ESE	4,3	6,520
SE	4,64	4,969	SE	11,8	6,969
SSE	4,81	4,908	SSE	7,4	5,171
S	4,77	4,945	S	4,6	4,496
SSW	4,87	5,083	SSW	3,6	4,946
SW	4,46	4,667	SW	2,1	3,372
WSW	7,94	5,312	WSW	7,6	4,721
W	25,22	7,357	W	34,9	6,632
WNW	14,97	6,711	WNW	10,2	5,171
NW	5	5,379	NW	2,6	3,934
NNW	3,05	5,584	NNW	1,5	5,171

Taules 1 i 2. Velocitats del vent estimades de l'emplaçament, en funció de la direcció.

A continuació es mostra la corba de densitat de probabilitat de les velocitats del vent en l'emplaçament, on es pot observar més detalladament la tendència que segueixen les condicions ambientals del punt on s'instal·larà l'aerogenerador.

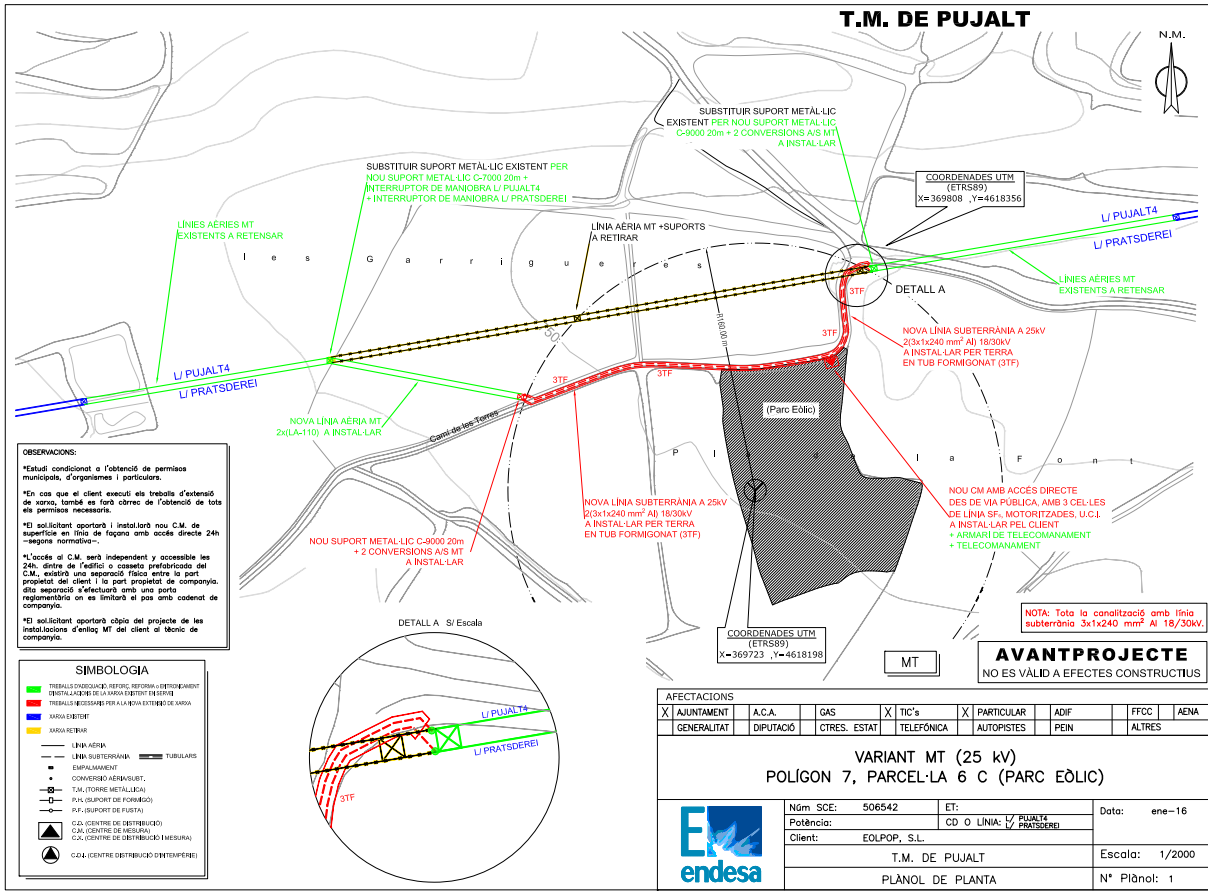


Gràfic 1. Distribució probabilística de la velocitat del vent.

Com es pot observar, la corba descriu una cua amb un pendent més suau a la dreta que a l'esquerra. És quelcom d'interès, doncs molts dels molins comencen a actuar als 3 m/s (*cut-in speed*), i per tant convé que les velocitats inferiors es produeixin amb poca freqüència. D'altra banda, el fet que ocasionalment hi hagi vents més elevats, no suposa cap problema, ans el contrari. Donat que en cap cas la velocitat del vent supera els 20 m/s, cap dels molins d'estudi es veuria obligat a aturar-se degut a un excés de vent (*cut-out speed*).

Pel que fa a la densitat de l'aire, s'ha tingut en compte la seva variació segons l'altura de cada aerogenerador, la temperatura mitjana de l'ambient i la humitat relativa. Els càlculs i resultats pertinents es poden trobar més endavant, en l'apartat de càlcul de la potència (veure pàg.21).

Pel que fa a la connexió del molí amb la xarxa elèctrica, donat la seva proximitat amb les línies de tensió existents, que es troben dins del perímetre de seguretat, no només cal realitzar un cablejat entre el molí i la xarxa, sinó que en aquest cas també és necessari soterrar parcialment els cables per on circula la electricitat actualment, per raons de seguretat. Es recalca que Eolpop actualment (juny 2016), ja disposa dels permisos necessaris per a la construcció de l'aerogenerador i la connexió a la xarxa, complint amb la normativa establerta que es requereix per a aquest projecte, i és per això que en aquest estudi no es contemplaran aquestes qüestions.



Imatge 7. Projecte d'obra previ a la instal·lació de l'aerogenerador.

En aquesta imatge es pot observar l'avantprojecte proporcionat per Endesa, on es pot veure l'emplaçament del molí, i un esquema del projecte d'obra que caldrà dur a terme prèviament a la seva instal·lació. El cercle negre indica el perímetre de seguretat del molí. La franja verda correspon a la línia de tensió actual, que caldrà desviar lleugerament en el tram de l'esquerra, obra civil que durà a terme ENDESA. La franja vermella es correspon amb la part que haurà d'anar soterrada, resseguint el paviment ja existent que voreja els camps agrícoles. Aquesta part es realitzarà mitjançant la subcontractació de l'empresa SELCAT, afincada a Vilafranca del Penedès, que realitzaran l'obra juntament amb la connexió des del molí fins a la línia de tensió nova (vermella) incloent el centre de mesures que cal col·locar-hi.

Pressupostos estimats per a l'obra civil:

**ENDESA:** 114.796,11 € + IVA = 138.903,29 €

**SELCAT:** 145.377,77 € + IVA = 175.907,10 €



## 4. Models d'estudi

### 4.1 Introducció i restriccions

Per realitzar l'estudi comparatiu, s'han considerat diferents models de diversos fabricants. Tots els models contempnen un molí de tres pales, d'eix horitzontal, amb un sistema actiu d'orientació. Les pales dels molins s'instal·len cargolades a l'eix principal, quedant fortament assegurades, incloent a cada unió amb la caixa, la connexió a un sistema de frenat aerodinàmic. El multiplicador, fabricat a mida, és instal·lat darrera de l'eix principal, amb un suport que transfereix tots els moments des de la part frontal a la base del bastidor, per distribuir per igual les càrregues.

El fre de disc d'alta velocitat (de sortida) del multiplicador, consta d'un sistema hidràulic (mordassa de fre) amb pastilles de fre sense amiant. El generador és activat per l'eix de sortida del multiplicador mitjançant un acoblament.

L'orientació s'aconsegueix mitjançant tres sistemes de transmissió elèctrica, muntats a la base del bastidor. La transmissió engrana amb la corona d'orientació, cargolada a la part superior de la torre. L'orientació està controlada mitjançant un gallet optoelectrònic.

La turbina es munta sobre una torre tubular troncocònica habitualment d'acer, sobre la qual es munta la caixa, i que allotjarà al seu interior la unitat de control del sistema.

Tots els models estudiats compleixen les restriccions requerides en els permisos dels que disposa Eolpop per a la construcció de l'aerogenerador, que es corresponen als necessaris per poder instal·lar l'ECO122. Les condicions s'indiquen a continuació:

- Cap molí pot superar l'altura total de 150 metres. Actualment la normativa vigent ofereix condicions diferents per molins menors de 150 metres que per majors, que ja es consideren molt grans. Es va considerar en el seu moment que, ateses les condicions de l'emplaçament, és a dir, amb vents baixos i poca rugositat, no valia la pena demanar un permís per a una altura major, ja que l'augment de producció de electricitat tampoc no es compensaria amb l'augment del cost d'una torre més alta.
- No es poden superar els 2,7 MW de potència nominal, sinó caldria sol·licitar uns nous permisos. Al acordar primerament amb Alstom la instal·lació del ECO122, i demanar els permisos pertinents, va ser necessari abonar un aval de 54.000 € per la potència de 2,7 MW. Utilitzar una potència major requeriria fer una nova sol·licitud, pagar la diferència, i tot plegat suposaria un període de temps abans de procedir a la construcció, probablement llarg, que no es vol assumir altre cop.
- Per acabar, donada la distribució de velocitats de l'emplaçament escollit, és convenient la utilització d'un molí de classe IEC IIIa preferiblement, és a dir, un molí adaptat per a l'obtenció d'energia eòlica en emplaçaments amb vents baixos seguint el conveni que estableix la norma IEC-61400-1. Els models que componen l'estudi comparatiu es troben descrits més endavant (veure pàg. 18-19).

## 4.2 Empreses estudiades



És una de les primeres empreses que es van fundar a Alemanya de les que es dediquen a la fabricació d'aerogeneradors. El nom prové d'una barreja entre les paraules "Energy" i "Converter". La seva seu principal es troba a Aurich (Baixa Saxònia). La societat va ser fundada el 1984 per Aloys Wobben, tractant-se inicialment d'una empresa familiar, però que va créixer fins al punt que a l'any 2008 tenia més de 12.000 treballadors a tot el món i una facturació superior als 2.400 milions d'euros anuals. És per això que a Alemanya es situa com a la empresa amb més presència i, així mateix, posseeix més del 40% de totes les patents mundials en la fabricació d'aerogeneradors. Actualment té fàbriques arreu del món, com per exemple al Brasil, l'Índia, Portugal, Suècia i Turquia, a més de tres centres productius a Alemanya, a Aurich, Emden i Magdeburg.

La innovació tècnica més important que incorporen els aerogeneradors de la casa Enercon és que no utilitzen engranatges multiplicadors, i produeixen l'electricitat mitjançant un generador anular, de manera que resulten més simples i eficients. Els seus molins són fàcilment identificables ja que tenen pintada la base de la torre amb diferents tons de verd que la casa anomena Esquema de Color Natural, dissenyat per Norman Foster, amb la finalitat d'integrar-los millor a l'entorn.

El model d'Enercon que s'ha analitzat en l'estudi és:

E-115 amb motor de 2,5 MW. Preu aproximat: 2.550.000 €.



La empresa espanyola que ha aconseguit expandir-se fins a ser un dels líders mundials en tecnologia eòlica mundialment, amb presència en 55 països diferents, tot i que avui dia els seus dos principals focus de producció són a Espanya i a la Xina. L'empresa es fundà l'any 1976, començant dins el sector de la construcció i comercialització de maquinària en el sector industrial, i no va ser fins a principis dels anys 90 quan van decidir centrar-se en només dos àmbits: les energies renovables, i l'aeronàutica.

Actualment, el nombre d'aerogeneradors de Gamesa instal·lats i repartits pel món, suposen prop de 34.600 MW d'energia, que eviten l'equivalent a 52 milions de tones de CO<sub>2</sub> que serien emeses si l'energia provingués de fonts nuclears.

El model que s'inclou a l'estudi, el G126 2,5 o 2,625 MW, és un dels més novedosos del catàleg que ofereix Gamesa, doncs es va publicar l'any 2015, i encara no s'ha arribat a instal·lar-ne cap. D'entrada s'ha considerat una opció molt viable pel fet de poder-se fabricar a Espanya, i pel fet de complir amb els requisits necessaris, a més de tenir unes pales molt grans i per tant una àrea escombrada major per a la captació de l'energia del vent. La oferta que ha fet el fabricant és:

G126 amb motor de 2,5 o 2,625 MW, amb un preu aproximat d'uns 2.600.000 €



Nordex és l'altra gran empresa Alemanya, juntament amb Enercon, que té la seva seu principal de construcció a Rostock, i les oficines a Hamburg. Es va fundar l'any 1985, i ha anat creixent amb el temps fins a posicionar-se en una de les empreses cabdals del mercat, també amb presència a nivell mundial. Molt coneguda per la seva àmplia oferta d'aerogeneradors entre 1,5 MW i 3 MW, com és el cas del que s'estipula pel projecte *Viure de l'Aire del Cel*. Nordex ofereix molins tant per a *onshore* com *offshore*, és a dir, tant per terra com per mar.

Aquí a Catalunya es podria destacar el projecte Tortosa, que es va desenvolupar a finals del 2005, i que va consistir en instal·lar 37 turbines que avui dia es troben en funcionament per la zona del delta de l'Ebre, i que acumulen 48,1 MW de potència, podent alimentar l'equivalent a 32.000 famílies.

El model de Nordex que s'ha analitzat en l'estudi és:

N117 amb motor de 2,4 MW. Preu aproximat: 2.500.000 €.



La empresa danesa més important d'energies renovables i un dels primers pioners en energia eòlica. Va ser fundada l'any 1898 per Peder Hansen. Varen començar com a ferreteria, i posteriorment, a partir de l'any 1979 començaren a produir turbines de vent. Actualment l'empresa es dedica exclusivament a la instal·lació d'aerogeneradors, i s'ha estès fins al punt de tenir 74 GW de potència instal·lats arreu del món.

Es va considerar oportú contactar amb Vestas, per plantejar una possible oferta exclusiva pel projecte, i contrastar-la amb les opcions que ja es tenien. No tan sols pel fet de ser una de les empreses pioneres en energia eòlica a nivell europeu, sinó també pel fet que prop de la zona en la que s'instal·larà l'aerogenerador del projecte *Viure de l'Aire del Cel*, hi ha actualment altres molins fabricats per Vestas, cosa que podria reduir significativament els costos de manteniment de l'aerogenerador, ja que es podria realitzar el seu seguiment juntament amb les altres màquines que es troben al seu voltant. Després d'uns dies de realitzar la petició, a la qual Vestas s'hi van mostrar molt interessats, es van rebre dues propostes, adequades a les limitacions d'altura i de potència que Eolpop ja havia sol·licitat amb anterioritat a l'hora de demanar els permisos. S'esmenten a continuació, i es comenten més endavant amb més detall:

V110 amb motor de 2,2 MW, preu: 2.345.000 €  
 V126 amb motor de 3,45 MW (limitat a 2,7 MW), preu: 3.090.000 €

### 4.3 Models d'aerogenerador



*Conjunt d'imatges 8. Fotografies dels models estudiats.*

Nordex N117	
Potència	2,4 MW
Altura del hub	91   120   141 m
Diàmetre de les pales	116,8 m
Àrea escombrada	10.715 m <sup>2</sup>
Cut-in speed	3 m/s
Cut-out speed	20 m/s

Vestas V110	
Potència	2   2,2 MW
Altura del hub	80   95   125 m
Diàmetre de les pales	110 m
Àrea escombrada	9.503 m <sup>2</sup>
Cut-in speed	3 m/s
Cut-out speed	20 m/s

Vestas V126	
Potència	3,45 MW (limitador)
Altura del hub	87   117   137 m
Diàmetre de les pales	126 m
Àrea escombrada	12.469 m <sup>2</sup>
Cut-in speed	3 m/s
Cut-out speed	22,5 m/s

Enercon E-115 EP2	
Potència	2,5 MW
Altura del hub	92,5   149 m
Diàmetre de les pales	115 m
Àrea escombrada	10.387 m <sup>2</sup>
Cut-in speed	3 m/s
Cut-out speed	34 m/s

Alstom ECO122	
Potència	2,7 MW
Altura del hub	89 m
Diàmetre de les pales	122 m
Àrea escombrada	11.689 m <sup>2</sup>
Cut-in speed	3 m/s
Cut-out speed	34 m/s

General Electric GE120	
Potència	2,5 MW
Altura del hub	85   98,3   110 m
Diàmetre de les pales	120 m
Àrea escombrada	11.309,7 m <sup>2</sup>
Cut-in speed	3 m/s
Cut-out speed	25 m/s

General Electric GE130	
Potència	3,2 MW (limitador)
Altura del hub	85   110   131 m
Diàmetre de les pales	130 m
Àrea escombrada	13.273,2 m <sup>2</sup>
Cut-in speed	2 m/s
Cut-out speed	25 m/s

Gamesa G126	
Potència	2,5   2,625 MW
Altura del hub	84   102   129 m
Diàmetre de les pales	126 m
Àrea escombrada	12.469 m <sup>2</sup>
Cut-in speed	2 m/s
Cut-out speed	21 m/s

Conjunt de taules 3. Característiques generals dels aerogeneradors d'estudi.

## 5. Càlcul de la potència

### 5.1 Paràmetres

Pel càlcul de la potència generada hipotèticament per cada model d'aerogenerador, s'han tingut en compte diversos paràmetres. Tot seguit queden explicats:

#### Correcció de la velocitat:

S'ha corregit la distribució de velocitats del vent a l'altura del *hub* per cada model d'aerogenerador, tenint en compte la rugositat del terreny, donat que les dades extretes del IDAE donen la velocitat a 80 metres, i les del molí existent a 40 metres d'altura. És un càlcul important malgrat pugui no semblar-ho, ja que la velocitat està elevada a la tercera potència a l'hora de fer els càlculs, i petites variacions de velocitat poden modificar significativament el resultat. Per exemple, si es té un error d'un 3% en la velocitat del vent, l'error en la potència serà del 9%. És per això que interessa ser el més precís possible, i adequar la velocitat a l'altura de cada torre.

Per trobar la distribució correcta per cada tipus de aerogenerador, donat que cadascun té una altura determinada, s'ha utilitzat la fórmula següent:

$$V_{real} = V_{ref} \cdot \ln \frac{\frac{h_{real}}{Z_0}}{\frac{h_{ref}}{Z_0}}$$

On  $V_{ref}$  és la velocitat de referència (en un cas la velocitat a 80 m que ens proporciona l'IDAE, i en el segon cas la velocitat referent al molí existent, a una altura de 40 m),  $Z_0$  és la rugositat del terreny,  $h_{real}$  és l'altura a la que està la velocitat de referència (80 m o 40 m), i  $h_{ref}$  és l'altura del punt on es troba el *hub* de cada aerogenerador, és a dir, el centre de les pales.



Imatge 9. Representació del perfil de velocitats en funció de l'altura.

### Càlcul de la densitat de l'aire:

S'ha calculat la densitat de l'aire per cada altura específica de cada aerogenerador, per tal d'aportar uns càlculs més fiables, donat que varia lleugerament però prou significativament per alterar els càlculs de la potència generada. Per fer-ho, s'ha tingut en compte la temperatura mitjana de l'ambient, així com la humitat relativa de l'aire, i l'altura respecte el nivell del mar de l'emplaçament. Els resultats, amb els que posteriorment s'ha fet el càlcul de la potència, es mostren a la taula següent:

Model d'aerogenerador	Altura del hub (m)	Densitat de l'aire (kg/m <sup>3</sup> )
Nordex N117	91	1,168
Vestas V110	95	1,166
Vestas V126	87	1,168
Enercon E-115 EP2	92,5	1,167
Alstom ECO122	89	1,168
General Electric GE120	85	1,169
General Electric GE130	85	1,169
Gamesa G126	84	1,169

*Taula 4. Densitats de l'aire.*

### Corba de potència i valors de Cp:

S'ha cercat la corba de potència referent a cada model, per tal de poder obtenir els resultats més acuradament coneixent la distribució que segueix la Cp per cada tipus de molí. La Cp, coneguda com el coeficient de potència, reflecteix el rendiment amb el qual el molí és capaç de captar l'energia de l'aire, que posteriorment es transforma en electricitat. És per això, que cal fixar-se en els aerogeneradors que ofereixin un millor rendiment per la distribució de velocitats que ofereix l'emplaçament escollit, a fi que finalment el cost per kW hora sigui el menor possible.

Cal destacar però, que en el cas de l'energia eòlica, donat que el combustible té un cost 0 (l'aire), la turbina òptima no necessàriament ha de ser la que tingui una major producció anual. Cal tenir en compte que com més gran sigui la turbina, bàsicament la torre i les pales, malgrat tingui la capacitat per generar més electricitat, més cara serà, i engrandir l'estructura només

és rentable fins a cert punt. Aquí també entra en joc el concepte de la paradoxa del factor de càrrega:

Utilitzant un aerogenerador més gran, tendim a disminuir el coeficient de potència, entre altres coses perquè apareixen més pèrdues d'energia. No obstant, al tenir una àrea escombrada major, la producció d'energia pot ser més alta. És per això que trobar el model òptim per al projecte és quelcom que cal analitzar, doncs depèn de múltiples factors.

Per conèixer les dades esmentades, donat que no sempre són a disposició pública, en alguns casos s'ha contactat amb el fabricant en qüestió perquè faciliti aquesta informació. Abans de mostrar els resultats però, es creu convenient dedicar un apartat a l'anomenada Llei de Betz, per facilitar la comprensió del fenomen d'obtenció de l'energia per a aquells que no hi estan familiaritzats.

## 5.2 Llei de Betz

Primerament, cal entendre que els aerogeneradors utilitzen l'energia cinètica de l'aire, frenant-lo, i convertint-la en la rotació de les pales, que posteriorment es transforma en energia elèctrica. És al captar l'aire on apareix el fenomen que es coneix com a tub de corrent. Aquest fenomen representa la secció d'aire que entra per les pales, i que s'eixampla un cop ha sobrepassat la màquina. S'eixampla donat que, per conservació de la massa, la quantitat d'aire que entra forçosament ha de ser la mateixa que surt, i l'aire que surt per darrere de les pales, que va a una velocitat menor, ho ha de fer mitjançant una secció més gran, i conseqüentment es crea l'anomenat "abric de vent", que descriu la distribució de velocitats del deixant del molí fins que l'aire s'estabilitza altre cop amb l'entorn.

Si s'intentés extreure tota la energia del vent, l'aire sortiria amb velocitat nul·la, és a dir, l'aire no podria abandonar la turbina. En aquest cas no s'extrauria gens d'energia, ja que òbviament també s'estaria impedit l'entrada d'aire al rotor de l'aerogenerador. En l'altre cas extrem, el vent podria passar a través del tub de corrent sense ser frenat ni destorbat. D'aquesta manera tampoc s'hauria extret cap energia del vent, ja que no se l'estaria frenant de cap manera.

Així doncs, podem assumir que hi ha d'haver alguna manera de frenar el vent que estigui entremig d'aquests dos extrems, i que sigui el punt més eficient pel que fa a la conversió d'energia del vent en energia mecànica útil. Betz diu que un aerogenerador ideal alentiria el vent fins a  $2/3$  de la seva velocitat inicial. La llei de Betz, concretament, diu que com a màxim pot convertir-se el  $16/27$  (el 59 %) de la energia cinètica del vent en energia mecànica mitjançant un aerogenerador, i això ho representa a partir del que s'anomena coeficient de potència ( $C_p$ ), present en el càlcul de la potència dels aerogeneradors. S'entén per tant, que interessa aconseguir tenir una  $C_p$  el més gran possible, per poder extreure més energia, però sense mai poder superar el valor de 0,6.

La llei de Betz va ser formulada per primera vegada pel físic alemany Albert Betz l'any 1919. De tota manera, en aquest treball no s'ha volgut fer més incís en la seva demostració matemàtica, ja que s'escapa de la temàtica del treball.





*Imatge 10. Exemplar d'eerogenerator.*

### 5.3 Resultats

Primerament, com ja s'ha comentat, ha estat necessari corregir les dues distribucions de velocitats per cada model d'aerogenerador, doncs cadascun té una altura lleugerament diferent, i aquesta variació comporta una diferència de velocitats prou significativa pel que fa als càlculs de l'energia que s'obté. Tot seguit es mostren aquests resultats, pel cas de la distribució de velocitats obtinguda segons les dades del IDAE, a mode d'exemple. S'ha considerat innecessari mostrar els resultats de l'altra distribució, donat que el procés de càlcul és exactament el mateix, i per tant, aporta informació al treball, però la seva explicació és redundant.

Velocitats corregides distribució de l'IDAE m/s								
	N117	V110	V126	E-115	ECO122	GE120	GE130	G126
N	4,202	4,230	4,173	4,213	4,187	4,157	4,157	4,149
NNE	3,249	3,271	3,226	3,257	3,238	3,214	3,214	3,208
NE	3,821	3,847	3,795	3,831	3,808	3,781	3,781	3,774
ENE	6,886	6,932	6,838	6,904	6,862	6,813	6,813	6,800
E	6,492	6,536	6,446	6,509	6,470	6,423	6,423	6,411
ESE	5,538	5,575	5,499	5,552	5,519	5,479	5,479	5,469
SE	5,070	5,104	5,035	5,083	5,053	5,016	5,016	5,007
SSE	5,008	5,042	4,973	5,021	4,991	4,955	4,955	4,946
S	5,046	5,080	5,011	5,059	5,028	4,992	4,992	4,983
SSW	5,187	5,222	5,150	5,200	5,169	5,132	5,132	5,122
SW	4,762	4,794	4,729	4,774	4,746	4,712	4,712	4,703
WSW	5,420	5,457	5,382	5,434	5,402	5,363	5,363	5,353
W	7,507	7,558	7,455	7,527	7,481	7,428	7,428	7,414
WNW	6,848	6,894	6,800	6,866	6,824	6,775	6,775	6,763
NW	5,489	5,526	5,450	5,503	5,470	5,430	5,430	5,420
NNW	5,698	5,736	5,658	5,713	5,678	5,637	5,637	5,627

*Taula 5. Velocitats del vent corregides a l'altura del hub de cada model.*

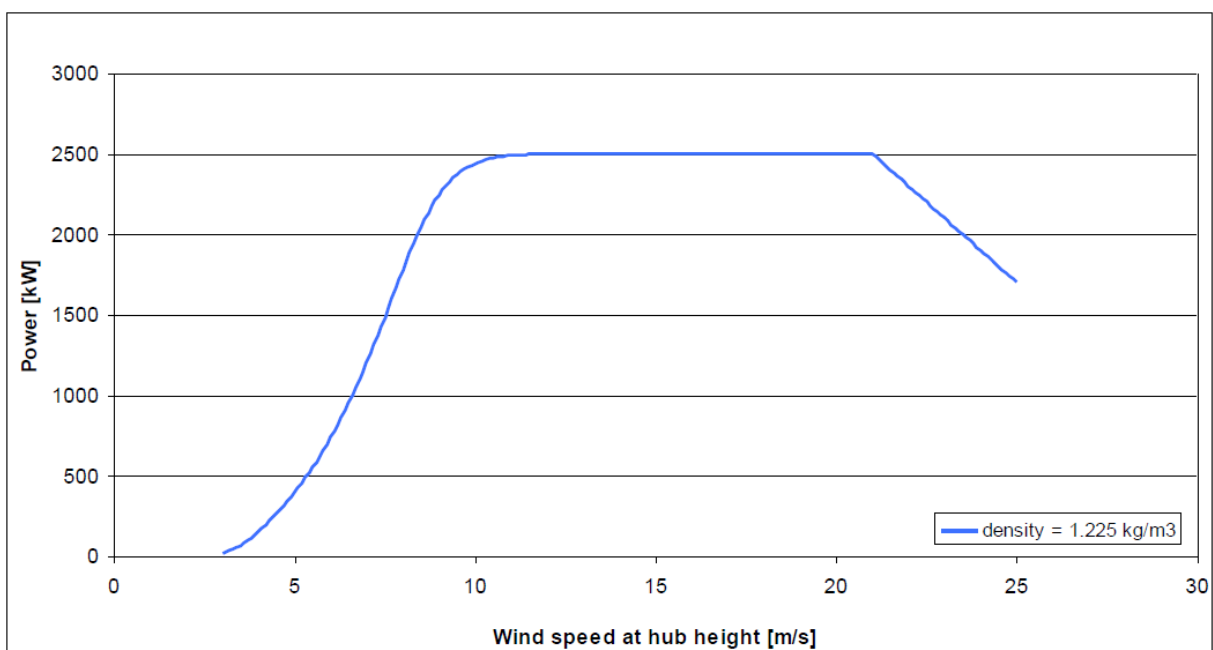
Velocitats corregides distribució a partir del molí existent m/s								
	N117	V110	V126	E-115	ECO122	GE120	GE130	G126
N	5,047	5,081	5,012	5,060	5,029	4,993	4,993	4,984
NNE	3,671	3,696	3,645	3,680	3,658	3,631	3,631	3,625
NE	3,786	3,811	3,759	3,795	3,772	3,745	3,745	3,738
ENE	5,965	6,005	5,923	5,980	5,944	5,901	5,901	5,890
E	8,144	8,199	8,087	8,165	8,116	8,058	8,058	8,043
ESE	6,653	6,698	6,606	6,670	6,630	6,582	6,582	6,570
SE	7,112	7,160	7,062	7,130	7,087	7,036	7,036	7,023
SSE	5,277	5,312	5,239	5,290	5,258	5,220	5,220	5,210
S	4,589	4,619	4,556	4,600	4,572	4,539	4,539	4,531
SSW	5,047	5,081	5,012	5,060	5,029	4,993	4,993	4,984
SW	3,441	3,464	3,417	3,450	3,429	3,404	3,404	3,398
WSW	4,818	4,850	4,784	4,830	4,801	4,766	4,766	4,757
W	6,768	6,814	6,721	6,785	6,744	6,696	6,696	6,683
WNW	5,277	5,312	5,239	5,290	5,258	5,220	5,220	5,210
NW	4,015	4,042	3,986	4,025	4,001	3,972	3,972	3,965
NNW	5,277	5,312	5,239	5,290	5,258	5,220	5,220	5,210

Taula 6. Velocitats del vent corregides a l'altura del hub de cada model.

Seguidament, per realitzar el càlcul de la potència, ha estat necessari tabular els valors dels coeficients de potència de cada model per a les velocitats de vent obtingudes. És d'esperar que cada aerogenerador operi de maneres lleugerament diferents, i el rendiment de treball varia en funció de la velocitat del vent. Per fer-ho, s'han utilitzat dades extretes a partir de les corbes de potència que proporcionen els diferents fabricants. Les taules que es corresponen es mostren a continuació, juntament amb una de les corbes de potència d'un dels aerogeneradors, on s'observa la corba de la potència que s'extreu del vent així com la de la  $C_p$ , a mode d'exemple:

Cp segons la distribució de l'IDAE								
	N117	V110	V126	E-115	ECO122	GE120	GE130	G126
N	0,40	0,39	0,38	0,38	0,39	0,40	0,41	0,33
NNE	0,29	0,13	0,20	0,28	0,13	0,15	0,30	0,14
NE	0,37	0,37	0,30	0,36	0,37	0,37	0,40	0,30
ENE	0,46	0,46	0,44	0,47	0,46	0,48	0,45	0,46
E	0,46	0,46	0,44	0,46	0,46	0,48	0,45	0,455
ESE	0,45	0,44	0,43	0,43	0,44	0,47	0,45	0,43
SE	0,43	0,43	0,42	0,42	0,43	0,45	0,44	0,415
SSE	0,43	0,43	0,42	0,42	0,43	0,45	0,44	0,415
S	0,43	0,43	0,42	0,42	0,43	0,45	0,44	0,415
SSW	0,43	0,43	0,42	0,42	0,43	0,45	0,45	0,42
SW	0,43	0,40	0,41	0,40	0,40	0,44	0,44	0,40
WSW	0,45	0,44	0,425	0,43	0,44	0,46	0,445	0,43
W	0,46	0,46	0,44	0,47	0,46	0,48	0,45	0,465
WNW	0,46	0,46	0,44	0,465	0,46	0,48	0,45	0,455
NW	0,45	0,44	0,43	0,43	0,44	0,46	0,45	0,43
NNW	0,45	0,44	0,43	0,44	0,44	0,46	0,45	0,435

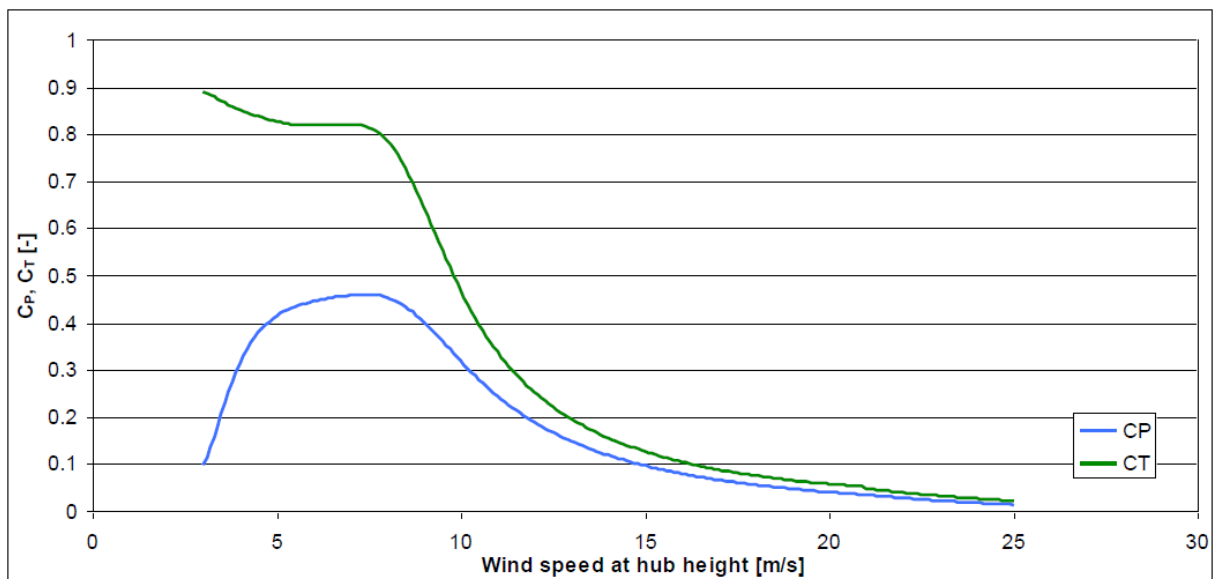
Taula 7. Cp corresponent per cada velocitat i en cada model.



Gràfic 2. Exemple d'una corba de potència (molí amb motor de 2,5 MW).

Cp segons la distribució del molí existent								
	N117	V110	V126	E-115	ECO122	GE120	GE130	G126
N	0,43	0,43	0,42	0,42	0,43	0,45	0,44	0,415
NNE	0,33	0,37	0,28	0,34	0,26	0,3	0,38	0,28
NE	0,35	0,37	0,31	0,38	0,32	0,35	0,38	0,3
ENE	0,45	0,45	0,43	0,45	0,45	0,47	0,45	0,44
E	0,46	0,46	0,44	0,47	0,46	0,47	0,45	0,454
ESE	0,46	0,46	0,44	0,465	0,455	0,48	0,45	0,45
SE	0,46	0,46	0,44	0,46	0,46	0,48	0,45	0,46
SSE	0,44	0,43	0,425	0,43	0,43	0,455	0,44	0,425
S	0,41	0,4	0,4	0,4	0,4	0,43	0,43	0,38
SSW	0,43	0,43	0,42	0,42	0,43	0,45	0,44	0,415
SW	0,29	0,25	0,25	0,32	0,25	0,28	0,36	0,18
WSW	0,42	0,42	0,41	0,4	0,42	0,44	0,435	0,4
W	0,46	0,46	0,44	0,47	0,46	0,48	0,45	0,45
WNW	0,44	0,44	0,425	0,425	0,435	0,455	0,445	0,43
NW	0,37	0,38	0,35	0,37	0,37	0,39	0,4	0,314
NNW	0,44	0,44	0,425	0,425	0,435	0,455	0,445	0,43

Taula 8. Cp corresponent per cada velocitat i en cada model.



Gràfic 3. Exemple de la corba que descriuen els paràmetres Cp i Ct.

Tot seguit, s'ha procedit al càlcul de la potència generada, per cada velocitat del vent corregida tenint en compte la seva freqüència (% de temps), per cada model, amb el seu radi específic de les pales i la seva densitat de l'aire corresponent. Els resultats es troben tabulats a continuació, i la fórmula utilitzada és la següent:

$$P = \frac{1}{2} \cdot C_P \cdot \rho \cdot (\pi \cdot r^2) \cdot V^3 \cdot \left(\frac{f}{100}\right)$$

Potència obtinguda, distribució de l'IDAE								
	N117	V110	V126	E-115	ECO122	GE120	GE130	G126
N	2693,62	2372,54	2915,70	2497,57	2835,62	2637,64	3315,05	2492,53
NNE	728,371	294,965	572,358	686,389	352,538	368,914	904,703	394,396
NE	2300,52	2078,25	2125,34	2184,67	2483,90	2252,71	2986,17	2092,16
ENE	50384,5	45516,6	54913,1	50245,3	54400,8	51482,6	59181,0	56512,9
E	45925,8	41488,6	50053,6	44824,4	49586,6	46926,7	53943,8	50951,9
ESE	22386,5	19774,2	24374,1	20878,6	23633,9	22895,6	26879,2	23993,5
SE	16279,5	14706,7	18117,8	15519,6	17577,2	16682,7	20001,2	17622,7
SSE	16262,1	14690,9	18098,4	15503,0	17558,3	16664,8	19979,8	17603,8
S	16494,3	14900,7	18356,9	15724,4	17809,1	16902,8	20265,1	17855,2
SSW	18289,7	16522,6	20355,0	17435,9	19747,6	18742,6	22981,7	20037,2
SW	12964,8	10895,1	14085,2	11771,1	13021,6	12990,6	15928,7	13527,2
WSW	35616,9	31460,8	38328,1	33217,8	37601,4	35651,8	42289,7	38173,6
W	307223	277541	334837	306374	331713	313919	360860	348337
WNW	138417	125044	150858	136566	149451	141434	162583	153565
NW	23288,2	20570,7	25355,7	21719,5	24585,8	23311,1	27961,9	24959,9
NNW	15892,7	14038,1	17303,6	15166,8	16778,2	15908,2	19082,2	17231,5
<b>Total</b>	<b>725149</b>	<b>651896</b>	<b>790650</b>	<b>710316</b>	<b>779137</b>	<b>738772</b>	<b>859144</b>	<b>805352</b>

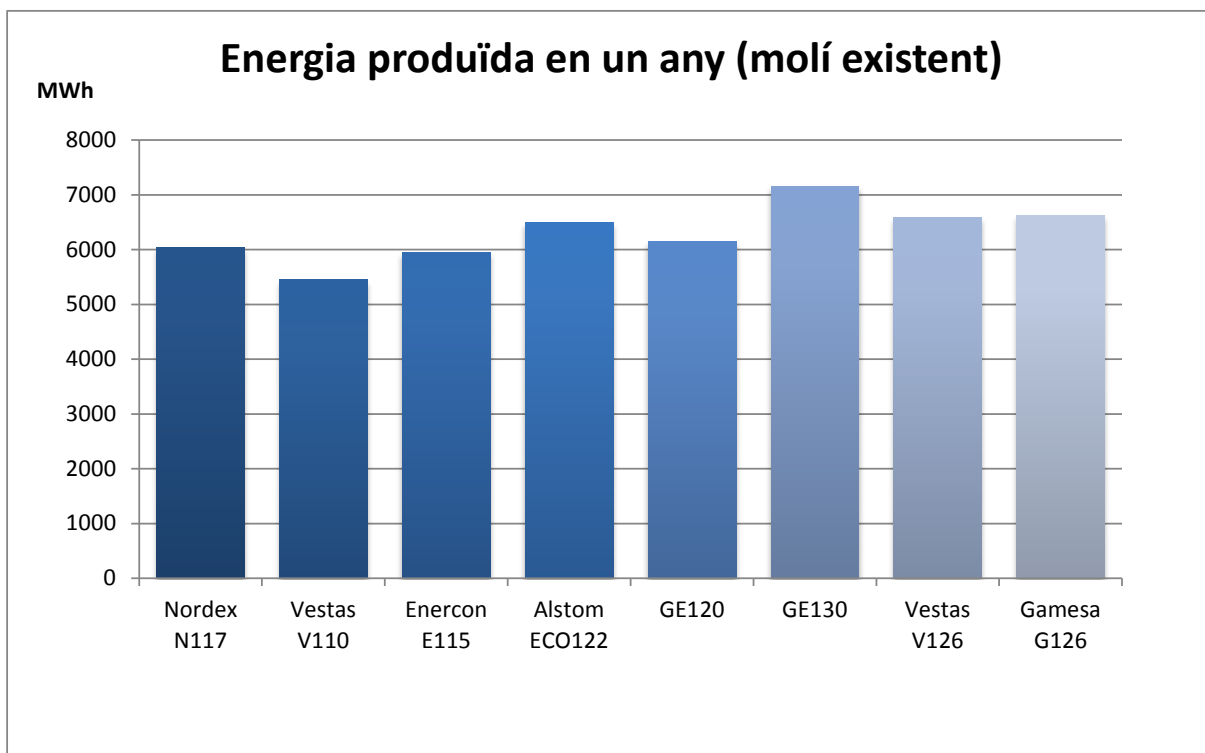
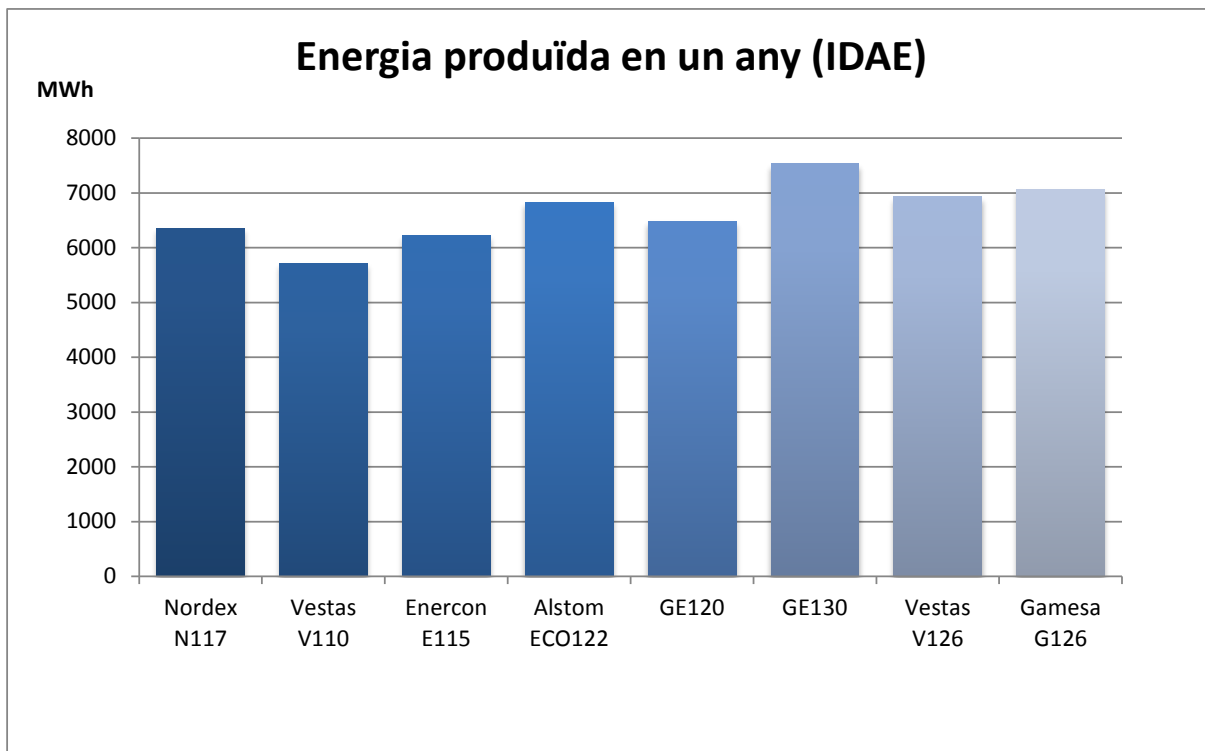
Taula 9. Potència estimada de producció anual per cada aerogenerador estudiat.

Potència obtinguda, distribució del molí existent								
	N117	V110	V126	E-115	ECO122	GE120	GE130	G126
N	3805,99	3438,27	4235,77	3631,44	4109,37	3900,24	4676,08	4120,01
NNE	715,008	724,22	691,255	719,624	608,244	636,499	988,577	680,464
NE	1188,12	1134,66	1199,04	1260,10	1172,86	1163,42	1548,83	1142,25
ENE	9562,94	8639,01	10411,9	9341,60	10325,2	9780,39	11482,1	10487,7
E	74648,8	67436,6	81358,2	74506,3	80599,2	74686,6	87681,5	82636,3
ESE	36455,1	32933,0	39731,7	35998,4	38933,2	37249,6	42819,8	40000,3
SE	122197	110391	133181	119369	131938	124861	143532	137061
SSE	29936,9	26429,8	32947,8	28579,3	31588,6	30314,1	35944,8	32433,4
S	11401,7	10048,9	12674,4	10866,1	12010,3	11709,4	14357,7	11852,7
SSW	12455,9	11252,5	13862,5	11884,7	13448,8	12764,4	15303,5	13483,6
SW	1553,20	1209,60	1525,65	1674,21	1445,70	1468,48	2315,07	1081,32
WSW	22338,8	20180,5	24847,2	20782,6	24119,4	22916,2	27779,8	23862,7
W	311450	281359	339442	310855	336276	318237	365824	341737
WNW	41264,3	37277,6	45414,5	38935,1	44047,3	41784,3	50108,6	45231,5
NW	3896,08	3614,78	4199,31	3805,90	4206,64	4021,33	5057,27	3708,56
NNW	6068,29	5482,00	6678,61	5725,75	6477,54	6144,75	7368,92	6651,69
<b>Total</b>	<b>688939</b>	<b>621552</b>	<b>752402</b>	<b>677936</b>	<b>741307</b>	<b>701638</b>	<b>816789</b>	<b>756172</b>

Taula 10. Potència estimada de producció anual per cada aerogenerador estudiat.

Finalment, per a una lectura més senzilla, s'han traduït les dades de la potència obtinguda a l'Energia generada durant un any per cada model de l'estudi, en MWh. Tot seguit s'adjunta un gràfic on es pot veure i comparar els resultats d'aquest apartat. S'observa una tendència, en general, de proporcionalitat entre l'energia obtinguda i el diàmetre de les pales força considerable. L'altura de l'aerogenerador, i en conseqüència la velocitat del vent, influeixen però en una mesura menor.

S'ha considerat oportú fer el càlcul aproximat de les hores de funcionament en un any per cada model, com a informació complementària a utilitzar posteriorment. No obstant, cal fer finalment una valoració de la producció de cada model enfront el cost de la màquina total a assumir, per preveure quin model és el més adient donada la vida útil, que s'ha estimat de 20 anys. A mode de resum, s'adjunten a continuació uns gràfics on es poden veure contrastats els resultats obtinguts pel que fa a l'apartat de producció d'energia:



	N117	V110	V126	E-115	ECO122	GE120	GE130	G126
Energia total annual MWh	6352	5710	6926	6222	6825	6471	7526	7054
	6035	5445	6591	5939	6494	6146	7155	6624

Gràfics 4 i 5, Taula 11. Estimació de la producció d'energia anual per cada model.



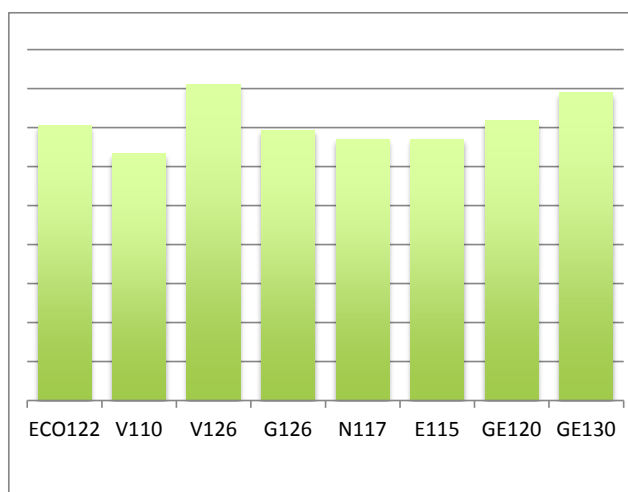
## 6. Viabilitat econòmica

### 6.1 Cost total de la instal·lació

Com és d'esperar, per complementar l'anàlisi dels diferents models d'aerogeneradors disponibles, hom no només pot fixar-se en la producció d'energia de cadascun d'ells. És necessari realitzar un balanç econòmic tenint en compte el cost de la màquina i els costos referents al seu manteniment al llarg de la seva vida útil, i d'aquesta manera avaluar la seva rendibilitat econòmica, i contrastar dades com ara el temps de retorn de la inversió, o el benefici net obtingut passats els 20 anys de funcionament.

Utilitzant els preus obtinguts a partir de les dades que han proporcionat els proveïdors, un cop obtinguts els permisos necessaris, s'han considerat els costos de la connexió a la xarxa (instal·lació elèctrica), fonaments, obra civil, gestió de residus, a més dels costos de la construcció i muntatge dels models que ofereixen una producció major, obtenint així el cost total del projecte a assolir mitjançant les aportacions dels participants. A continuació es mostra un gràfic on es pot veure el cost total del projecte segons quin aerogenerador s'esculli:

Cost total de la instal·lació (€)	
Nordex N117	3.349.839
Vestas V110	3.165.389
Vestas V126	4.051.939
Enercon E-115 EP2	3.409.339
Alstom ECO122	3.523.579
General Electric GE120	3.587.839
General Electric GE130	3.944.839
Gamesa G126	3.468.839



Taula 12 i Gràfic 6. Cost total de la instal·lació.

**Cost Obra Endesa:** 138.903,29 €

**Cost Obra Selcat:** 175.907,10 €

**Seguretat i salut laboral:** 17.187,91 €

**Serveis tècnics d'enginyeria i control de qualitat:** 23.084,52 €

**Gestió de residus:** 6241,31 €

- S'ha considerat un 13 % de Despeses Generals

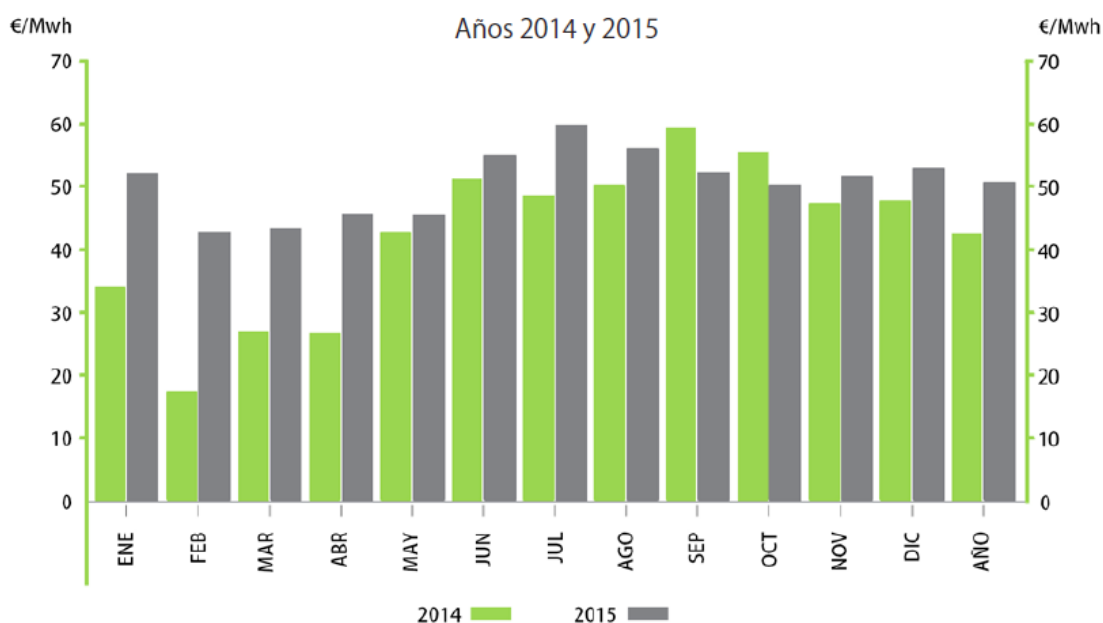
- S'ha considerat un 6 % de Benefici Industrial

D'entrada, és temptador pensar que la opció més barata és la millor, però cal contrastar aquests resultats amb la producció d'energia que fa cada molí, ja que en definitiva serà el que ens permetrà recuperar la inversió, sigui la que sigui.

## 6.2 Preu de venda de l'electricitat

A partir de les dades que proporciona la OMIE, on s'ha pogut observar la tendència que segueix el preu de l'electricitat en els últims anys, s'ha pogut establir de forma prudent una estimació real del preu de mercat, d'uns 0,05 €/kWh, estimació que s'ha considerat raonable en base als gràfics que apareixen a continuació, on es mostren els preus del 2014 i 2015 de l'electricitat a Espanya:

	PRECIO MEDIO MENSUAL (€/MWh)		ENERGÍA ADQUIRIDA (GWh)	
	2015	2014	2015	2014
Ene	51,60	33,62	15.445	16.647
Feb	42,57	17,12	13.966	17.072
Mar	43,13	26,67	13.743	15.167
Abr	45,34	26,44	12.815	11.927
May	45,12	42,41	14.107	13.113
Jun	54,73	50,95	15.172	13.639
Jul	59,55	48,21	16.952	16.010
Ago	55,59	49,91	14.892	14.518
Sep	51,88	58,89	13.667	13.960
Oct	49,90	55,11	14.410	13.489
Nov	51,20	46,80	15.041	13.954
Dic	52,61	47,47	15.759	14.405
<b>Año</b>	<b>50,32</b>	<b>42,13</b>	<b>175.968</b>	<b>173.902</b>



Gràfics 7 i 8. Dades de la OMIE sobre els preus del mercat energètic de l'electricitat.

## 6.3 Ingressos

Mitjançant la producció estimada trobada anteriorment per cada model diferent, seguidament s'ha realitzat el càlcul dels ingressos bruts que generaria cada any l'aerogenerador, que es corresponen als diners que serien retornats a tots els participants inversors del projecte de forma proporcional a l'aportació de cadascun d'ells, tot i que falta descomptar-hi les despeses.

Ingressos Anuals Bruts (€)	
Nordex N117	318.000
Vestas V110	285.560
Vestas V126	346.275
Enercon E-115 EP2	311.125
Alstom ECO122	341.280
General Electric GE120	317.655
General Electric GE130	317.520
Gamesa G126	352.750

*Taula 13. Ingressos Anuals Bruts.*

Per calcular els ingressos nets s'ha partit dels ingressos bruts calculats anteriorment. Cal tenir en compte, primerament, les despeses provinents del manteniment de l'aerogenerador, que té un cost diferent per cada model. Posteriorment, cal restar-hi l'assegurança, un impost del 7% que actualment és vigent per a instal·lacions d'energies renovables, i desgraciadament, un peatge que cal pagar per a activitats de generació d'energia, del 0,0005 % (€/kWh generat a l'any), i per acabar s'ha considerat un 5% de beneficis destinats a la gestió del projecte.

L'aerogenerador que interessi més als participants en el projecte serà, doncs, el que al final de la seva vida útil, hagi superat, a partir dels ingressos nets, la quantitat que calia invertir amb major diferència.

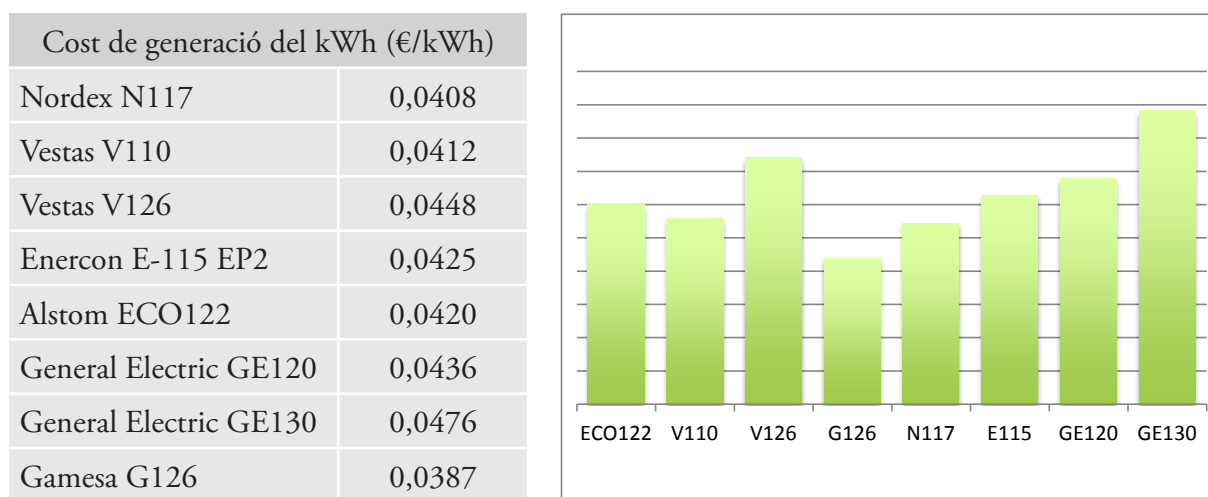
Ingressos Anuals Nets (€)	
Nordex N117	209.660
Vestas V110	194.437
Vestas V126	221.259
Enercon E-115 EP2	203.678
Alstom ECO122	229.913
General Electric GE120	204.359
General Electric GE130	196.242
Gamesa G126	234.892

*Taula 14. Ingressos anuals nets.*

## 6.4 Cost de generació del kWh

Tenint en compte el cost total del projecte, i afegint-hi els costos de manteniment orientatius que ens proporciona el fabricant, així com també la assegurança de la màquina, que cal pagar cada any (de l'ordre d'uns 12.000 €, dades proporcionades per la gestoria Invall), s'ha pogut calcular el cost de generació del kWh, així com els ingressos nets, ja esmentats en l'apartat anterior.

Aquesta és una de les dades més importants a tenir en compte, ja que ens dona una idea de la rendibilitat que ofereix cada molí. És clar que el molí amb un cost de generació d'energia més petit serà el més adequat, i mai podrà sobrepassar el llindar del preu que s'ha establert per a la venda, sinó, voldria dir que el projecte és totalment inviable. Tot seguit es pot veure els resultats obtinguts per a aquest paràmetre:



Taula 15 i Gràfic 9. Cost de generació del kWh.

## 6.5 Rendibilitat i retorn de la inversió

Tot seguit s'ha procedit al càlcul de la taxa de rendibilitat de cada aerogenerador pel primer any de funcionament, a partir dels ingressos nets i el cost total del projecte (sense IVA, ja que al tractar-se d'una empresa autònoma es pot desgravar i per tant és un import que és retornat al final de cada període). La taxa de rendibilitat és una dada clau a tenir en compte, ja que ens mostra quin percentatge de la inversió es recupera al primer any de funcionament, i que per tant, interessa maximitzar.

Seguidament, es poden veure les taxes de rendibilitat obtingudes:

	N117	V110	V126	E-115	ECO122	GE120	GE130	G126
Rendibilitat %	6,26	6,14	5,46	6,08	6,53	5,70	4,70	6,77

*Taula 16. Taxa de rendibilitat de cada model d'aerogenerador.*

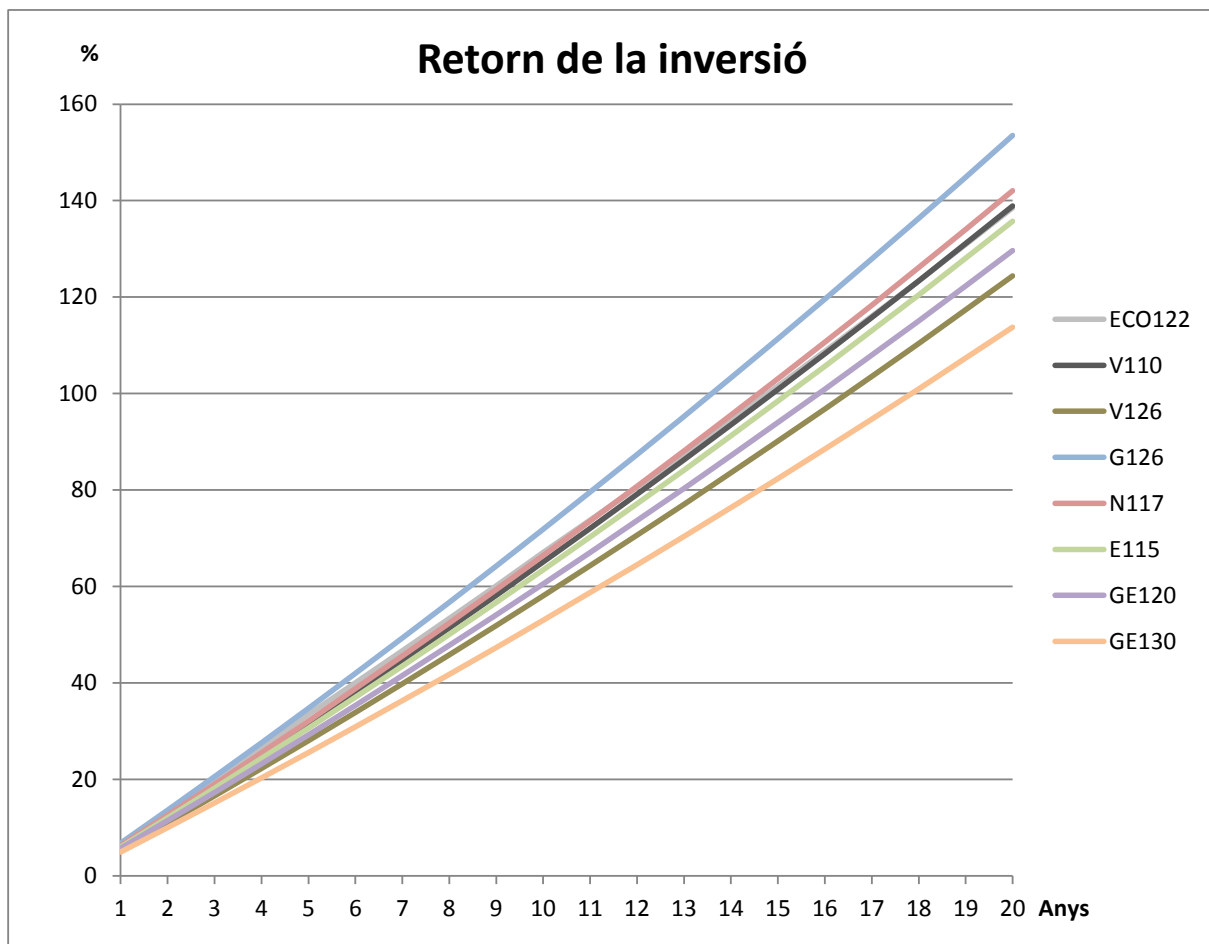
Finalment, s'ha realitzat el balanç econòmic durant els 20 anys de vida base que s'han establert per cada aerogenerador. En aquest balanç s'ha estimat que el preu de mercat de l'electricitat augmenti un 1% cada any, cosa que s'ha considerat molt raonable donada la tendència que ha seguit aquest paràmetre durant els últims anys.

Val a dir que, en molts casos, els costos de manteniment de l'aerogenerador no s'estimen iguals al llarg de tots els anys, sinó que poden augmentar lleugerament amb el pas del temps, ja que no suposa el mateix cost fer el manteniment d'una màquina que podem considerar nova, respecte al d'una màquina que ha estat en funcionament des de fa anys. El fet que el preu de l'electricitat també variï lleugerament amb el pas dels anys, fa que, en definitiva, al fer el balanç, el retorn de la inversió no sempre sigui el mateix. De fet, en gairebé tots els casos, s'observa una tendència a tenir uns ingressos cada cop lleugerament majors.

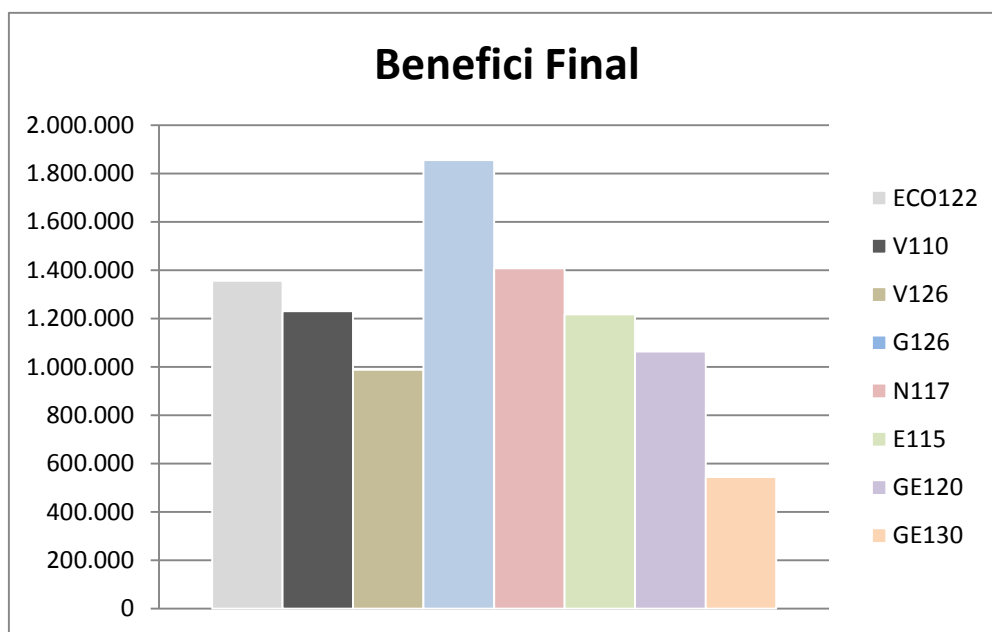
A partir d'aquest balanç econòmic al llarg dels primers 20 anys de funcionament, es pot observar en quin moment es recupera la inversió segons el model que s'esculli, i mostrar-ho també mitjançant paràmetres econòmics com per exemple el TIR de cada aerogenerador.

Tot seguit es mostra un gràfic on queda indicat percentualment com es va recuperant la inversió al llarg dels 20 anys per cadascun dels models. Val a dir que, com es pot veure, tots els molins són una inversió rentable, doncs recuperen la inversió abans dels 20 anys de funcionament però, com és deduïble, la corba que puja amb un pendent més pronunciat serà l'aerogenerador que ofereix una millor rendibilitat.

Una altra dada interessant a tenir en compte, sobretot de cara als possibles inversors en el projecte, és el benefici net total que s'estima que s'assolirà al cap dels 20 anys, essent un paràmetre que interessa maximitzar, i és una dada amb una informació molt directa. En definitiva, als inversors no tan sols els interessa recuperar la inversió el més ràpidament possible, sinó també conèixer el benefici final estimat que en poden arribar a treure com a partícips inversors en el projecte.



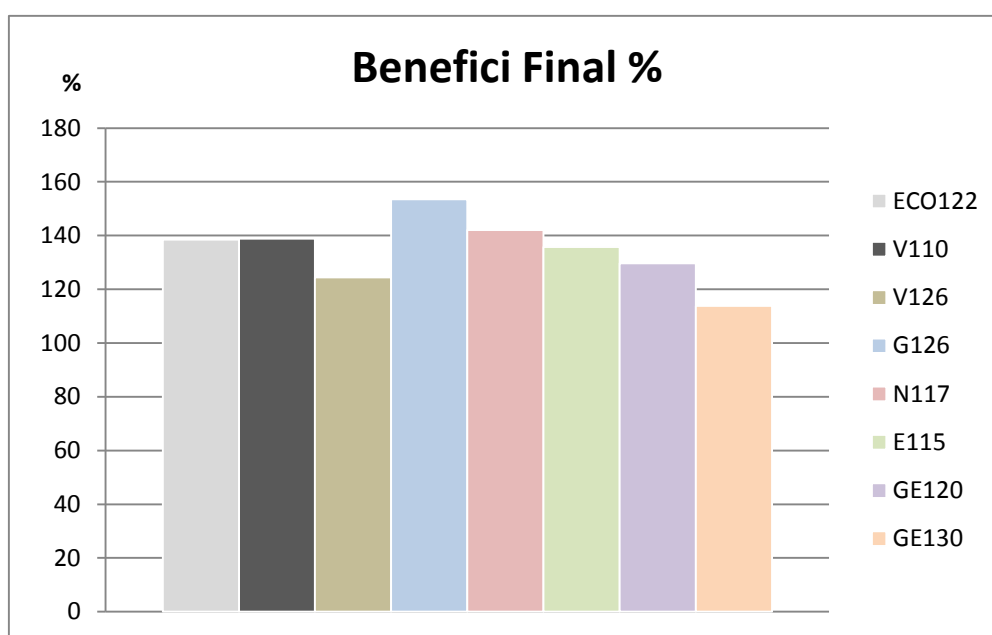
Gràfic 10. Retorn de la inversió al llarg dels primers 20 anys de funcionament.



Gràfic 11. Benefici final passats 20 anys de funcionament, expressat en €.

En el gràfic anterior es mostren els beneficis acumulats (en €), que s'obtidrien un cop passats els primers 20 anys de funcionament del molí. D'altra banda, també s'ha considerat interessant, a nivell dels partícips, mostrar el benefici en forma de percentatge respecte a la inversió que suposa la instal·lació del projecte, de manera que els inversors poden entreveure quin percentatge de beneficis podran treure de la seva aportació de capital.

Val a dir que, apart dels càlculs estimats pels 20 anys de funcionament, s'ha estimat que als 25 anys es podria arribar a recuperar la inversió en un 200%, és a dir, que se'ls hauria retornat als participants el doble de la quantitat aportada.



Gràfic 12. Benefici final passats 20 anys de funcionament, expressat amb % respecte la inversió inicial.





## 7. Impacte ambiental

Pel cas d'un aerogenerador, com en tots aquells projectes d'actuacions específiques d'interès públic, cal analitzar el impacte, tant a nivell ambiental com paisatgístic, que suposa la seva instal·lació i funcionament en l'entorn que l'envolta.

En primer lloc, cal tenir en compte quina és la principal funció d'un aerogenerador, doncs es basa en aquest principi: el de reduir les emissions de gasos contaminants a l'atmosfera durant el procés d'obtenció d'energia elèctrica. És clar que la fabricació dels components de la màquina suposen un impacte ambiental, però en la seva globalitat és molt menor que el que produeix una central nuclear amb el pas del temps, doncs un aerogenerador no genera residus un cop ha estat instal·lat. A més a més, últimament els fabricants intenten reduir encara més la petjada ecològica dels seus molins, utilitzant, gairebé en la seva totalitat, materials reciclables.

Pel que fa al impacte paisatgístic de l'aerogenerador, s'ha considerat que és molt baix pel fet de ser una zona on ja s'hi troben instal·lats altres molins, i únicament se n'està afegint un de més. Val a dir que és una zona no urbana, on concretament hi predominen camps dedicats al conreu de secà. El punt d'instal·lació de la màquina està prou allunyat dels nuclis urbans més propers, que es troben a 2 o més km de l'emplaçament, suficient com per no sobrepassar el llindar sonor que estableix la normativa vigent per als aerogeneradors. S'ha establert un conveni amb el propietari del terreny conforme dona el seu consentiment per a la seva instal·lació.

Es pot destacar també que el projecte contempla el màxim aprofitament de les infraestructures vials ja existents per accedir a l'aerogenerador, evitant pràcticament la construcció de nous vials. El cablejat subterrani necessari anirà dins d'uns tubs de formigó per assegurar que no hi hagi cap accident amb possibles rosegadors, etc.

Actualment l'execució de projectes eòlics amb aerogeneradors tripala a 120 graus és una mesura convencional atès que minimitza la seva visibilitat paisatgística, especialment en moviment. És quelcom que també potencia el rendiment, reduint els coeficients de resistència paràsita per fregament i redueix els nivells de soroll, en comparació amb configuracions multipolars. El color blanc del molí el converteix en un element visualment agradable i alhora discret, per a que quedi ben integrat en el paisatge.

En definitiva, el impacte del projecte es considera compatible amb els valors naturals i ecològics de l'entorn, doncs els espais protegits es troben a més de 5 km de l'emplaçament, i les zones d'arbres (pinedes) més properes es troben a més de 500 metres. El projecte també és compatible amb els valors històrics i estètics de l'entorn, doncs no afecta a cap element que se'l consideri com a tal.

## 8. Conclusions

En primera instància, cal dir que, com s'ha pogut veure al llarg del treball, realitzar projectes com *Viure de l'Aire del Cel* és quelcom totalment viable, i que per tant dur-lo a terme pot suposar un impacte molt positiu pel país, així com una nova porta oberta de cara a desenvolupar futurs projectes socials vinculats amb les energies renovables.

Pel que fa a la potència generada pels aerogeneradors, ha quedat demostrat en aquest estudi que, segons les condicions de l'emplaçament en que es realitzarà la instal·lació i les característiques de les màquines a instal·lar, el radi de les pales ha estat el factor més influent a l'hora de generar la potència, tot i que malauradament també suposa un augment de cost considerable. Com més superfície de captació tinguin les pales del molí, major serà la potència que es pot produir, i com a conseqüència, generarà més beneficis. Malgrat que la velocitat tingui un component cúbic, la diferència d'altures entre els diferents models no és prou significativa, en aquest cas, com per afectar de manera apreciable al càlcul de la potència, ja que és un terreny de vents baixos amb baixa rugositat, i això fa que tingui una capa límit petita. També pel fet que ens interessa treballar amb aerogeneradors de classe IEC IIIa, que estan optimitzats per vents baixos, fa que la velocitat, al ser menor, tingui menys pes dins del càlcul de la potència. És per això que, en segon terme, un altre punt molt important ha estat el rendiment que ofereix cada model en funció del rang de velocitats del vent amb que es treballi, cosa que es veu reflectida en els càlculs mitjançant la constant  $C_p$ , també anomenada coeficient de potència. És interessant doncs treballar amb l'aerogenerador que ofereixi un millor rendiment a les velocitats de més ocurrència en l'espai, per a obtenir una obtenció de l'energia major.



*Imatge 11. Paisatge amb molins.*

No obstant, ha quedat demostrat que el aerogenerador més òptim pel projecte no necessàriament és el que produeixi més energia, ja que alhora pot donar-se que sigui el més car. Aquest ha estat un punt interessant a tenir en compte, ja que donat que el combustible, és a dir, l'aire en aquest cas, és gratuït, en el cas dels aerogeneradors no és necessari extreure'n el màxim d'energia possible, sinó fer-ho amb el menor cost possible. És per això que el preu de generació del kWh és un bon indicador de la rendibilitat del projecte. Pel que fa als costos de construcció i instal·lació, era d'esperar que com més gran sigui el diàmetre de les pales i/o la torre, i més potència nominal ofereixi el model en qüestió, més costós és l'aerogenerador, no només pel que fa a la construcció de les pales i la torre, sinó també al muntatge de tota la màquina, i el seu manteniment. És per això que no es pot tan sols tenir en compte la producció d'energia en aquest estudi; ha estat important analitzar la rendibilitat dels models al llarg dels 20 anys, veient en quin període es recupera la inversió per cada una de les opcions, i quin benefici final pot aportar cada aerogenerador, tot plegat contrastat amb diferents índexs econòmics.

A la vista dels gràfics obtinguts, i segons els càlculs realitzats, aquest estudi afirma que l'aerogenerador que es considera òptim pel projecte *Viure de l'Aire del Cel*, i que ofereix una major rendibilitat pel projecte és el **G126 de Gamesa**.

Ha quedat demostrat que el **G126** és l'aerogenerador que ofereix una millor relació qualitat vs preu, ja que permet extreure molta energia del vent sense ser un molí excessivament car, cosa que fa que es pugui recuperar més ràpidament el cost total del projecte, i disposar d'un marge de beneficis més gran, com es pot veure en els gràfics de l'apartat de la viabilitat econòmica (veure pàg. 37). El fet de ser el molí més rentable es veu reflectit en el cost de generació que s'ha estimat del quilowatt hora, ja que és el menor de tots els molins que figuren en l'estudi (veure pàg. 34).

Val a dir també, que el fet de tenir una *cut-in speed* de 2 m/s, quan en molts dels models és de 3 m/s, fa que el molí pugui estar extraient energia del vent força més temps, ja que amb un vent molt petit ja s'engegarà, i és un punt que a la llarga és prou significatiu.

Pel que fa al cas del GE 130, malgrat ha estat el molí que produeix una energia major (veure pàg. 30), ja que les pales són de 130 metres de diàmetre, i el motor és adaptable a 2,7 MW, la màxima potència permesa, això no s'ha vist compensat amb el cost que suposaria comprar la màquina i el seu posterior manteniment. Possiblement amb uns vents una mica més elevats, els resultats, i conseqüentment les conclusions, podrien haver estat diferents.

També és interessant comentar el cas del V110, que ha resultat ser l'aerogenerador amb un cost menor. La quantitat d'energia que hauria produït aquest model no seria precisament la més alta, però el fet de tenir un baix cost tant de producció com de manteniment el situa com a una de les opcions més rentables a tenir en compte.

## 9. Bibliografia

### 8.1 Llibres i Articles

[1] MICHEL DERDEVET. *Energía, una Europa en Red*. Doce propuestas para una política común en materia de infraestructuras energéticas. La documentation Française, ISBN: 978-2-11-010275-1 21/3/2016

[2] JOSEP PUIG, CONRAD MESEGUER, MIGUEL CABRE. *El poder del viento*. Manual práctico para conocer y aprovechar la fuerza del viento. Ecotopía ediciones. 20/4/2016

[3] JOSEP PUIG I BOIX. *El passat i el futur de l'energia eòlica a Catalunya*. Auto-editat (Tesi Doctoral) 4/5/2016

[4] WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION *World Wind Energy Report 2014* 4/6/2016

[5] JANET BIEHL *Life of Murray Bookchin*. Oxford University Press, ISBN: 978-0-19-934248-8 13/4/2016



*Imatge 12. Paisatge amb molins.*

## 8.2 Webgrafia

- [6] SCIENTIFIC REPORTS. *The biological impacts of the Fukushima nuclear accident on the pale grass blue butterfly* <http://www.nature.com/articles/srep00570> 11/3/2016
- [7] WIKIPEDIA. *Accident nuclear de Fukushima* [https://ca.wikipedia.org/wiki/Accident\\_nuclear\\_de\\_Fukushima\\_I](https://ca.wikipedia.org/wiki/Accident_nuclear_de_Fukushima_I) 11/3/2016
- [8] IDAE. *Mapa eòlic del IDAE* <http://atlaseolico.idae.es/meteosim/> 8/3/2016
- [9] DENYSSCHEN. *Densitat de l'aire* <http://www.denysschen.com/denysschen/catalogue/density.aspx> 13/3/2016
- [10] NORDEX *Catàleg/Gamma de productes* [http://www.nordex-online.com/fileadmin/MEDIA/Gamma/Nordex\\_Gamma\\_en.pdf](http://www.nordex-online.com/fileadmin/MEDIA/Gamma/Nordex_Gamma_en.pdf) 6/4/2016
- [11] VESTAS. *Especificacions tècniques del model V110* [https://www.vestas.com/en/products\\_and\\_services/turbines/v110-2\\_0\\_mw#!technical-specifications](https://www.vestas.com/en/products_and_services/turbines/v110-2_0_mw#!technical-specifications) 20/4/2016
- [12] ENERCON *30 anys de Enercon* <https://www.youtube.com/watch?v=fMvF27Ha4io> 15/4/2016
- [13] ENERCON *Especificacions del model E-103 EP2* [http://www.enercon.de/fileadmin/Redakteur/Medien-Portal/broschueren/pdf/ENERCON\\_E-103\\_EP2\\_de.pdf](http://www.enercon.de/fileadmin/Redakteur/Medien-Portal/broschueren/pdf/ENERCON_E-103_EP2_de.pdf) 15/4/2016
- [14] GENERAL ELECTRIC. <https://renewables.gepower.com/wind-energy/turbines/275-120.html>  
<http://en.wind-turbine-models.com/turbines/310-general-electric-ge-2.5-120> 4/4/2016
- [15] GAMESA <http://www.gamesacorp.com/recursos/doc/productos-servicios/aerogeneradores/nuevas-fichas/g126-25-mw-esp.pdf> 1/5/2016
- [16] GAMESA <http://www.gamesacorp.com/recursos/doc/productos-servicios/aerogeneradores/nuevas-fichas/catalogo-plataformas.pdf> 2/5/2016
- [17] WIND-TURBINE-MODELS *Alstom ECO122* <http://en.wind-turbine-models.com/turbines/629-alstom-eco-122-2700> 1/4/2016
- [18] WIND-TURBINE-MODELS *General Electric GE130* <http://en.wind-turbine-models.com/turbines/1290-general-electric-ge-3.2-130> 4/4/2016
- [19] DANISH INDUSTRY ASSOCIATION <http://xn--drmsttre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/tour/wres/index.htm> 7/4/2016
- [20] GENERALITAT DE CATALUNYA. *Autorització del projecte Viure de l'Aire del cel* [http://dogc.gencat.cat/ca/pdogc\\_canals\\_interns/pdogc\\_resultats\\_fitxa/?action=fitxa&documentId=723195&language=ca\\_ES](http://dogc.gencat.cat/ca/pdogc_canals_interns/pdogc_resultats_fitxa/?action=fitxa&documentId=723195&language=ca_ES) 19/4/2016
- [21] OMIE. *Informe de precios 2015* <http://www.omie.es/files/dipticoVIGENTEes.pdf> 16/5/2016
- [22] FOLKECENTER. <http://www.folkecenter.net/gb/> 15/4/2016



# Annex

Fotografies de la visita a l'emplaçament del molí (30 de maig)









## Posada de la primera pedra, Viure de l'Aire del Cel (19 de juny)









