

Treball de Fi de Grau
Grau d'Enginyeria en Tecnologies Industrials

Estudi de viabilitat d'autoabastiment elèctric al poble de Casserres

MEMÒRIA

Autor:
Director/s:
Convocatòria:

Eduard Cirera Riu
Oriol Gomis i Eduardo Prieto
Gener 2016



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Aquest treball presenta un estudi de la viabilitat d'autoabastiment elèctric al poble de Casserres, a la comarca del Berguedà.

Per tal de dur a terme aquest estudi, primerament, s'ha obtingut el consum elèctric del poble, que és d'uns 8 500 MWh/any, la major part del qual és domèstic i amb pic de consum a l'hivern.

Tot seguit, s'han analitzat l'aprofitament del recurs eòlic i solar de la zona per tal de dimensionar l'aerogenerador i el mòdul fotovoltaic que millor s'adapten a les condicions del terme municipal.

Un cop s'ha realitzat aquest estudi preliminar, amb l'ajuda del programa *Homer Energy*[®] s'ha simulat la situació actual del poble i s'han contemplat diferents possibilitats per tal de combinar els generadors elèctrics de la millor manera. També s'han comprovat les implicacions legals i administratives de fer servir generadors propis per l'autosuficiència energètica si es connecten a la xarxa.

Així doncs, s'ha contemplat la idea d'aïllar-se de la xarxa i fer servir la combustió de dièsel com a generació de suport, ja que no seria possible satisfer la totalitat de la càrrega només amb fonts renovables.

D'aquesta manera, s'han valorat i comparat les diferents alternatives en cada situació per tal d'extreure'n conclusions.

Índex

RESUM	2
ÍNDEX	3
ÍNDEX DE TAULES	5
ÍNDEX DE FIGURES	7
1. PREFACI	10
1.1. Motivació	10
2. INTRODUCCIÓ	11
2.1. Objectius del projecte	11
2.2. Abast del projecte.....	11
3. OBTENCIÓ DEL CONSUM ELÈCTRIC DE CASSERRES	13
3.1. Consum domèstic.....	13
3.2. Consum terciari	15
3.3. Consum industrial.....	16
3.4. Consum públic.....	18
3.5. Consum total	19
4. VIABILITAT DE L'APROFITAMENT DEL RECURS EÒLIC	21
4.1. Estudi del recurs eòlic de la zona.....	21
4.2. Predimensionament d'un aerogenerador	24
4.3. Estudi econòmic	28
4.3.1. Plantejament empresarial	28
4.3.1.1. Ingressos.....	28
4.3.1.2. Costos	29
4.3.1.3. Anàlisi financer	30
4.3.2. Plantejament d'autoabastiment.....	32
4.3.2.1. Ingressos.....	32
4.3.2.2. Costos de la instal·lació i anàlisi financer	32
4.4. Dimensionament de l'aerogenerador	35
4.5. Viabilitat ambiental	38
4.6. Conclusions.....	40

5. VIABILITAT DE L'APROFITAMENT DEL RECURS SOLAR	41
5.1. Estudi del recurs solar de la zona	41
5.2. Funcionament d'un mòdul fotovoltaic a Casserres	44
5.3. Dimensionament de mòduls fotovoltaics	46
5.4. Estudi econòmic	47
5.4.1. Costos.....	47
5.4.2. Ingressos i anàlisi financer	48
5.5. Conclusions.....	48
6. OPTIMITZACIÓ DEL MÈTODE D'ABASTIMENT	49
6.1. Observació de la situació actual.....	49
6.2. Autoabastiment connectat a la xarxa	52
6.2.1. Adhesió de generadors fotovoltaics	52
6.2.2. Adhesió de generadors eòlics.....	54
6.2.3. Sistema combinat	57
6.2.4. Estudi econòmic.....	60
6.2.5. Normativa: el Reial Decret d'Autoconsum.....	62
6.3. Autoabastiment de forma aïllada a la xarxa	66
CONCLUSIONS	73
AGRAÏMENTS	75
BIBLIOGRAFIA	76
ANNEX I	78

Índex de taules

Taula 1. Consum domèstic de Catalunya l'any 2014, distribuït per mesos.....	13
Taula 2. Consum domèstic de Casserres l'any 2014 distribuït per mesos.	14
Taula 3. Consum terciari de Catalunya l'any 2014, distribuït per mesos.	15
Taula 4. Consum terciari de Casserres l'any 2014, distribuït per mesos.	16
Taula 5. Consum industrial de Catalunya l'any 2014, distribuït per mesos.....	17
Taula 6. Consum industrial de Casserres l'any 2014, distribuït per mesos.....	17
Taula 7. Consum públic de Casserres l'any 2014, distribuït per càrregues.	18
Taula 8. Consum total de Casserres l'any 2014, distribuït per mesos.	19
Taula 9. Densitat de l'aire ambient en funció de l'altura [4]	21
Taula 10. Preus de l'electricitat al mercat a l'any 2015.....	28
Taula 11. Cost de la instal·lació de l'aerogenerador V100-2.0MW, distribuït per components.	29
Taula 12. Anàlisi financer de la instal·lació d'una turbina V100-2.0MW a Casserres, amb una taxa d'interès del 3%	30
Taula 13. Càlcul del VAN de la inversió amb una taxa d'interès del 10%, valors en €.	31
Tabla 14. Anàlisi financer de la inversió amb una taxa d'interès del 3% (autoabastiment)...	32
Taula 15. Càlcul del VAN de la inversió amb una taxa d'interès del 3% (autoabastiment)...	33
Taula 16. Dades tècniques del mòdul A-250P donades pel fabricant.	46
Taula 17. Despeses del sistema actual, de forma anual. Extreta del Homer.....	49
Taula 18. Emissions de gasos atribuïbles a la procedència de l'electricitat de la xarxa. Extreta del Homer.	51
Taula 19. Resum de despeses del sistema proposat al llarg dels 20 anys de projecte. Extreta del Homer.....	54

Taula 20. Ús de l'energia produïda. Extreta del Homer.....	55
Taula 21. Comparativa dels resultats amb N aerogeneradors instal·lats.....	56
Taula 22. Emissions de gasos atribuïbles a la procedència de l'energia de la xarxa. Extreta del Homer.....	59
Taula 23. Resum de despeses del sistema proposat duratn 20 anys. Extreta del Homer....	59
Taula 24. Càlcul del VAN del sistema proposat amb una taxa d'interès del 3%.....	61
Taula 25. Peatges d'accés per potència contractada, terme fix. [18].....	64
Taula 26. Peatge d'accés per energia consumida, terme variable (any 2016). [18]	64
Taula 27. Peatge d'accés en el sistema proposat, termes fix i variable, segons període.	65
Taula 28. Paràmetres a tenir en compte en les simulacions. Extreta del Homer.....	66
Taula 29. Resultats en funció del nombre d'aerogeneradors i la capacitat de les bateries... 69	
Taula 30. Percentatge de producció elèctrica segons procedència. Extreta del Homer.	70
Taula 31. Emissions de gasos anuals del sistema proposat. Extreta del Homer.....	71
Taula 32. Resum de despeses del projecte distribuïdes per components, durant la vida útil. Extreta del Homer.	71

Índex de figures

Figura 1. Consum elèctric domèstic de Casserres l'any 2014, distribuït per mesos.	14
Figura 2. Consum elèctric terciari de Casserres l'any 2014, distribuït per mesos.....	15
Figura 3. Consum elèctric industrial a Casserres l'any 2014, distribuït per mesos.	16
Figura 4. Consums de Casserres l'any 2014, distribuïts per mesos i per sectors ⁽¹⁾	19
Figura 5. Consum elèctric total de Casserres l'any 2014, distribuït per mesos.....	20
Figura 6. Mapa eòlic de Catalunya.....	22
Figura 7. Funció de probabilitat de Weibull amb $c = 3,95 \text{ m/s}$ i $k = 1,756$	23
Figura 8. Funció de probabilitat de Weibull amb $c = 4,05 \text{ m/s}$ i $k = 1,756$	24
Figura 9. Nombre d'hores en què el vent bufa en una velocitat en concret a Casserres durant 20 anys.....	25
Figura 10. Potència aprofitable per un aerogenerador.	26
Figura 11. Energia aprofitable per un aerogenerador durant la seva vida útil.....	26
Figura 12. Contrast de la potència aprofitable i l'aprofitada per la turbina V100-2.0MW	27
Figura 13. Contrast de l'energia aprofitable i l'aprofitada per la turbina V100-2.0MW durant la seva vida útil.....	27
Figura 14. Cost de l'aerogenerador V100-2.0MW desglossat per components ⁽²⁾	35
Figura 15. Cost d'un aerogenerador d'1,2 MW de potència nominal, diàmetre del rotor de 100 m i altura de 95 m, desglossat per components.	36
Figura 16. Cost d'un aerogenerador d'1,2 MW de potència nominal, diàmetre del rotor de 60 m i altura de 95m, desglossat per components.	37
Figura 17. Mapa de compatibilitat eòlica a la província de Barcelona, el terme de Casserres encerclat en blau.	38
Figura 18. Escala de contaminació acústica [26].....	39

Figura 19. Escala de contaminació acústica en funció de la distància	39
Figura 20. Irradiància mitjana captada per la superfície inclinada a Casserres l'any 2014, distribuïda per mesos.	42
Figura 21. Hores de llum mensuals a Casserres l'any 2014.....	42
Figura 22. Irradiació mensual captada per la superfície inclinada a Casserres l'any 2014. ...	43
Figura 23. Inclinació òptima β i orientació azimuthal α	43
Figura 24. Corba $U_{oc} - I_{sc}$, indica la potència en el punt de funcionament.	44
Figura 25. Potència mitjana mensual generada per un mòdul A-250P a Casserres l'any 2014	46
Figura 26. Energia mensual generada per un mòdul A-250P a Casserres l'any 2014.	47
Figura 27. Producció elèctrica mensual mitjana segons la seva procedència. Extretra del Homer	50
Figura 28. Cost anual de l'abastiment amb xarxa segons el preu de compra.	50
Figura 29. Esquema conceptual del sistema proposat. Extretra del Homer.	52
Figura 30. Sistema recomanat pel Homer en funció de les condicions de contorn. Extretra del Homer	53
Figura 31. Producció elèctrica mensual mitjana segons la seva procedència. Extretra del Homer.	53
Figura 32. Esquema conceptual del sistema proposat. Aerogenerador doblement alimentat d'1,2 MW. Extretra del Homer	54
Figura 33. Producció elèctrica mensual mitjana segons la seva procedència. Extretra del Homer	55
Figura 34. Esquema conceptual del sistema proposat. Aerogenerador doblement alimentat d'1,2 MW i mòduls A-250P. Extretra del Homer.	57
Figura 35. Producció elèctrica mensual mitjana segons la seva procedència. Extretra del Homer.	58
Figura 36. Esquema conceptual del sistema proposat. Extretra del Homer.	67

Figura 37. Producció elèctrica mensual mitjana segons la seva procedència. Extreta del Homer. 70

Figura 38. Despeses al llarg de la vida útil del projecte distribuïdes per components. Extreta del Homer..... 71

1. Prefaci

Des de fa anys, la societat és conscient de la necessitat d'una transició energètica cap a un model més net i eficient.

Tot i que es podria aconseguir un abastiment més ampli d'energia verda a partir de fonts renovables, caldria, a més, fer un procés de descentralització de la generació d'electricitat per tal d'abastir d'una forma més local, ajustant-se més a les necessitats de cada zona i incrementant, d'aquesta manera, l'eficiència del nou model energètic.

Cada vegada són més comuns els casos en què es decideix dependre menys de la xarxa elèctrica i generar-se la pròpia energia com a conseqüència dels abusos que es produeixen per part de la generació centralitzada. La dificultat d'obtenció dels combustibles fòssils, les grans instal·lacions tecnològiques que requereixen la seva conversió en electricitat, així com el cost del seu manteniment i transport, són factors que provoquen que la generació energètica mitjançant fonts no renovables estigui a l'abast de ben pocs, per la qual cosa, essent l'energia un producte bàsic en la societat occidental actual, es pot considerar una situació injusta.

En canvi, les fonts d'energia renovables, com el vent i la radiació solar, són a l'abast de tothom, amb instal·lacions de generació més flexibles que faciliten la producció local. Aquesta idea pot induir a la gent a voler-se apoderar d'aquest producte bàsic i relegar l'ús de la producció centralitzada a la funció de suport, obtenint com a resultat un consum més eficient i respectuós amb el medi ambient.

1.1. Motivació

El cas de l'illa de Samsø (Dinamarca) és un dels exemples que mostren que l'autoabastiment elèctric és possible, on el 100% de l'energia consumida prové de fonts renovables. Així, no només s'ha assolit la sostenibilitat del sistema elèctric a Samsø, sinó que els habitants de l'illa també se n'han apoderat, la qual cosa els fa independents energèticament. A més, la seva xarxa està integrada a la xarxa continental, de manera que poden vendre el seu excedent.

Altres casos com l'illa d'Eigg a Escòcia, també de producció 100% renovable, o l'illa de Kythnos a Grècia, són més exemples que fan palès que l'autosuficiència elèctrica és possible.

Aquests casos han servit d'inspiració per estudiar la mateixa idea portada a una localitat de Catalunya.

2. Introducció

El que es pretén en aquest treball és fer un estudi de viabilitat de l'autoabastiment elèctric a una localitat catalana, concretament, Casserres, una vila de 1569 habitants situada a la comarca del Berguedà.

El treball conté un anàlisi del funcionament de generadors eòlics i fotovoltaics, que s'han adaptat a les condicions meteorològiques i als consums elèctrics del municipi per tal d'obtenir-ne un dimensionament adequat.

A més, s'ha fet servir el programa *Homer Energy*[®] per simular diferents combinacions i opcions per la generació elèctrica, observant-ne la viabilitat econòmica, legal i ambiental en cada situació, ja sigui l'actual o la d'alternatives proposades.

Al final del treball es pretén haver determinat si és possible l'autoabastiment energètic dels habitants del municipi de Casserres i en quines condicions es podria donar si la resposta fos afirmativa.

2.1. Objectius del projecte

L'objectiu del projecte és comprovar la viabilitat de l'autoabastiment elèctric en el municipi de Casserres. La idea és fer-ho el més sostenible possible, mitjançant fonts d'energia renovables.

Per tal d'assolir-ho, s'estudien les condicions actuals en què es troba el poble, és a dir, preus actuals de l'energia a l'estat espanyol, regulacions legals i administratives de cara a l'autoconsum energètic i els problemes que hi pot haver si es vol connectar a la xarxa, en cas que sigui necessària la seva funció de suport.

Amb aquesta informació obtinguda, els consums elèctrics del poble i el dimensionament adequat dels generadors, es pretén conèixer la viabilitat d'aquest projecte i, en cas negatiu, quines condicions s'haurien de donar perquè ho sigui.

2.2. Abast del projecte

L'abast tècnic d'aquest treball es limita al funcionament dels sistemes de generació elèctrica per tal d'adaptar-los a les condicions del terme municipal de Casserres, no s'ha contemplat un anàlisi profund d'altres components necessaris en una xarxa elèctrica.

El que sí que s'ha analitzat en detall és la viabilitat econòmica i legal de la seva instal·lació i

s'han realitzat comparatives de diferents situacions per determinar les condicions que s'haurien de donar per tal que el projecte d'autoabastiment elèctric al poble de Casserres sigui possible.

3. Obtenció del consum elèctric de Casserres

Primerament, s'han obtingut els consums elèctrics de Casserres per tal de poder dimensionar els generadors. El consum s'ha desglossat en quatre sectors: el domèstic, tant el total com el de cada llar, el terciari, és a dir, els petits negocis com bars, fleques, quioscos, etc, el sector industrial i el sector públic.

El mètode emprat es basa en l'extrapolació a partir de dades genèriques de Catalunya extretes de l'Institut Català d'Estadística [1]. Així doncs, s'ha agafat un any de referència, en aquest cas el 2014 i a partir de les mitjanes catalanes s'ha adaptat a les dimensions de Casserres.

3.1. Consum domèstic

El consum domèstic a Catalunya l'any 2014 es mostra a la taula 1. Tenint en compte que es reparteix entre un total de 7 546 522 persones [1], s'ha pogut fer el càlcul del consum mitjà per persona al territori català. De totes maneres, s'ha valorat tenir en compte també la distribució per llars, ja que una bona part del consum elèctric és compartit en famílies. Així doncs, sabent que a Catalunya hi ha un total de 2 315 856 llars [1], s'ha pogut extreure el consum mitjà per llar.

Taula 1. Consum domèstic de Catalunya l'any 2014, distribuït per mesos.

Consum domèstic Catalunya 2014			
Mes de l'any	GWh	kWh/pers.	kWh/llar
Gener	1 030,40	136,53	444,93
Febrer	1 037,50	137,48	447,99
Març	901,70	119,48	389,35
Abril	841,20	111,46	363,23
Maig	785,20	104,04	339,05
Juny	767,10	101,64	331,23
Juliol	784,70	103,98	338,83
Agost	790,30	104,72	341,25
Setembre	825,30	109,36	356,36
Octubre	810	107,33	349,76
Novembre	762,30	101,01	329,16
Desembre	878,90	116,46	379,51
Mitjana	851,21	112,79	367,56
Total	10 214,60	1 353,55	4 410,72

Gràcies a les dades proporcionades per l'Ajuntament de Casserres [2] s'ha pogut conèixer el nombre de persones, que és de 1 569, i el nombre de llars, unes 820, que té el poble i, així doncs, fer l'extrapolació esmentada anteriorment, mostrada a la taula 2.

Taula 2. Consum domèstic de Casserres l'any 2014 distribuït per mesos.

Consum domèstic Casserres 2014		
Mes de l'any	Persones [kWh]	Llars [kWh]
Gener	214 230,82	364 844,79
Febrer	215 706,98	367 358,76
Març	187 472,75	319 274,60
Abril	174 894,18	297 852,71
Maig	163 251,20	278 024,19
Juny	159 488,02	271 615,33
Juliol	163 147,24	277 847,15
Agost	164 311,54	279 830,00
Setembre	171 588,40	292 222,83
Octubre	168 407,38	286 805,39
Novembre	158 490,05	269 915,74
Desembre	182 732,40	311 201,56
Mitjana	176 976,75	301 399,42
Total	2 123 721,02	3 616 793,10

S'observa que el consum de les llars a Casserres és d'uns 3 616,8 MWh a l'any 2014 i, segons la figura 1, els mesos d'hivern són els que tenen un valor més elevat.

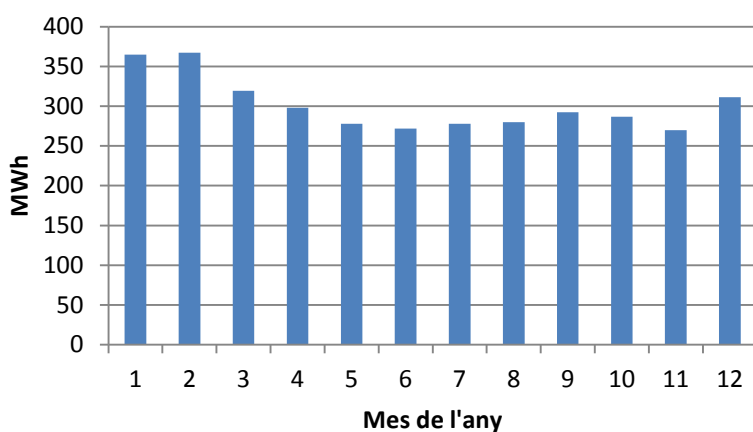


Figura 1. Consum elèctric domèstic de Casserres l'any 2014, distribuït per mesos.

3.2. Consum terciari

A Catalunya, el consum que va fer el sector terciari l'any 2014 és d'uns 13 919 GWh i d'uns 29 393 kWh per comerç, tenint en compte que hi ha un total de 473 558 negocis del sector terciari al territori català [1].

Taula 3. Consum terciari de Catalunya l'any 2014, distribuït per mesos.

Consum terciari Catalunya		
Mes de l'any	GWh	kWh/negoci
Gener	1 164,00	2 457,99
Febrer	1 174,00	2 479,10
Març	1 076,80	2 273,85
Abril	1 092,40	2 306,79
Maig	1 055,80	2 229,51
Juny	1 082,10	2 285,04
Juliol	1 191,30	2 515,64
Agost	1 296,90	2 738,63
Setembre	1 306,30	2 758,48
Octubre	1 243,80	2 626,50
Novembre	1 170,50	2 471,71
Desembre	1 065,50	2 249,99
Mitjana	1 159,95	2 449,44
Total	13 919,40	29 393,23

Segons les dades proporcionades per l'ajuntament, a la vila hi ha un total de 53 comerços, així doncs, s'han fet els càlculs mitjançant la mitjana mensual. El total és de 1 557,8 MWh anuals i no sembla que hi hagi una fluctuació important segons les estacions de l'any (veure figura 2).

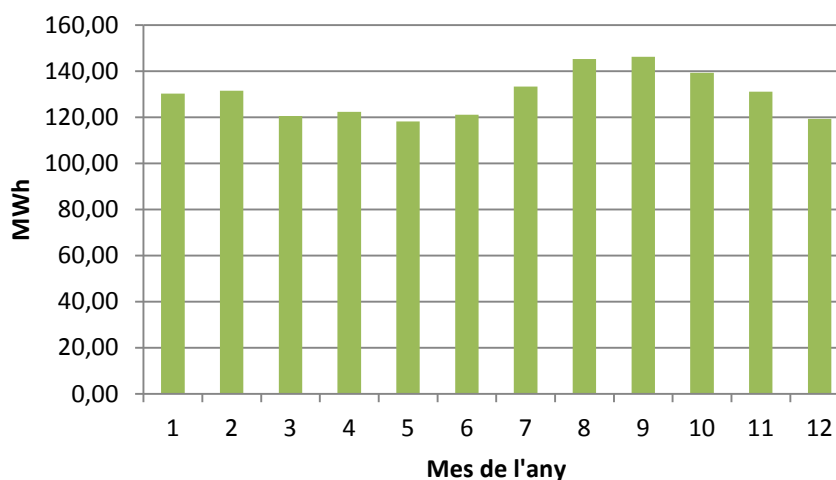


Figura 2. Consum elèctric terciari de Casserres l'any 2014, distribuït per mesos.

Taula 4. Consum terciari de Casserres l'any 2014, distribuït per mesos.

Consum terciari Casserres 2014	
Mes de l'any	Consum [kWh]
Gener	130 273,38
Febrer	131 392,56
Març	120 514,07
Abril	122 260,00
Maig	118 163,77
Juny	121 107,24
Juliol	133 328,76
Agost	145 147,37
Setembre	146 199,41
Octubre	139 204,49
Novembre	131 000,85
Desembre	119 249,38
Mitjana	129 820,11
Total	1 557 841,28

3.3. Consum industrial

El consum industrial a Catalunya a l'any 2014 va ser d'uns 14 917 GWh i, tenint en compte que hi ha un total de 37 977 plantes industrials al territori català [1] implica que de mitjana cada planta consumeix uns 392 808 kWh anuals.

A la localitat d'estudi hi ha un total de 7 plantes industrials, així doncs, s'obtenen les dades mitjançant les mitjanes anteriors, com es pot observar a la taula 6 on també es pot veure que el consum total anual pel sector és de 2 749,66 MWh. No sembla que hi hagi una fluctuació important segons el mes de l'any (veure figura 3).

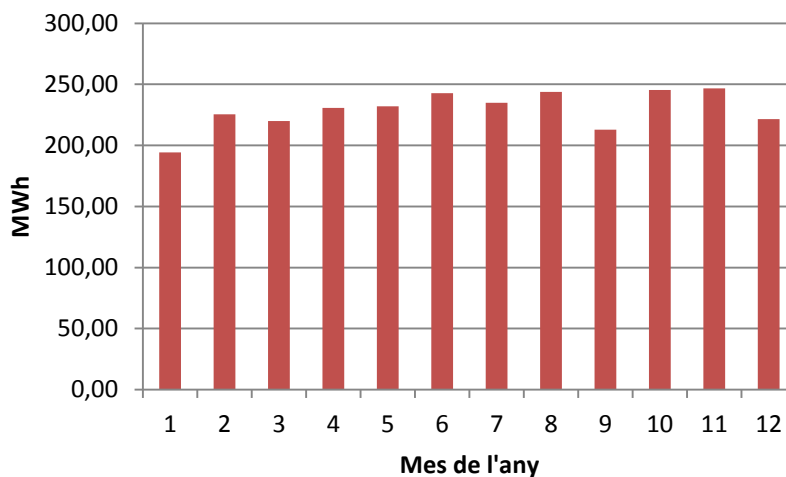


Figura 3. Consum elèctric industrial a Casserres l'any 2014, distribuït per mesos.

Taula 5. Consum industrial de Catalunya l'any 2014, distribuït per mesos.

Consum indústria Catalunya		
Mes de l'any	GWh	kWh/planta
Gener	1 053,80	27 748,37
Febrer	1 222,50	32 190,54
Març	1 192,70	31 405,85
Abril	1 251,20	32 946,26
Maig	1 259,00	33 151,64
Juny	1 316,20	34 657,82
Juliol	1 274,20	33 551,89
Agost	1 322,10	34 813,18
Setembre	1 155,20	30 418,41
Octubre	1 331,60	35 063,33
Novembre	1 338,10	35 234,48
Desembre	1 201,10	31 627,04
Mitjana	1 243,14	32 734,07
Total	14 917,70	392 808,81

Taula 6. Consum industrial de Casserres l'any 2014, distribuït per mesos.

Consum indústria Casserres 2014	
Mes de l'any	Consum [kWh]
Gener	194 238,62
Febrer	225 333,75
Març	219 840,96
Abril	230 623,80
Maig	232 061,51
Juny	242 604,73
Juliol	234 863,21
Agost	243 692,23
Setembre	212 928,88
Octubre	245 443,29
Novembre	246 641,39
Desembre	221 389,26
Mitjana	229 138,47
Total	2 749 661,64

3.4. Consum públic

Gràcies a les dades facilitades per l'ajuntament del poble s'ha pogut obtenir també el consum públic l'any 2014, distribuït en enllumenat, instal·lacions esportives, l'escola, el consultori, l'ajuntament i els locals culturals.

Les dades es van proporcionar en forma de pagament en euros. La companyia distribuïdora contractada per l'ajuntament de la vila és Endesa, la qual té varies tarifes a escollir. La tarifa que fa servir l'ajuntament és la de gran llar [2], que és per potències superiors a 10 kW i amb la qual l'energia es paga a 0,149733 €/kWh [3]. Així doncs, s'han pogut obtenir els kWh consumits pel sector públic, mostrats a la taula 7, on s'hi observa que el cost més elevat és el de l'enllumenat, seguit pel manteniment de les instal·lacions esportives.

Taula 7. Consum públic de Casserres l'any 2014, distribuït per càrregues.

Consum públic Casserres 2014		
	Despesa [€]	Consum [kWh]
Enllumenat	41 220,74	275 294,95
Ajuntament	9 331,77	62 322,73
Pavelló, piscines, camp futbol	10 351,76	69 134,79
Locals culturals	4 807,16	32 104,88
Escoles	4 514,70	30 151,67
Consultori	2 252,01	15 040,17
Total	72 478,14	484 049,20

3.5. Consum total

Així doncs, el consum total és la suma de tots els anteriors, el qual està expressat en la taula 8. Com es pot observar a la figura 4, l'única càrrega que fluctua significativament segons l'època de l'any és la domèstica, la qual és més alta durant l'hivern.

Taula 8. Consum total de Casserres l'any 2014, distribuït per mesos.

Consum total Casserres 2014	
Mes de l'any	Consum [kWh]
Gener	729 694,22
Febrer	764 422,51
Març	699 967,05
Abril	691 073,94
Maig	668 586,91
Juny	675 664,73
Juliol	686 376,55
Agost	709 007,04
Setembre	691 688,55
Octubre	711 790,61
Novembre	687 895,41
Desembre	692 177,64
Total	8 408 345,22
Mitjana	700 695,43

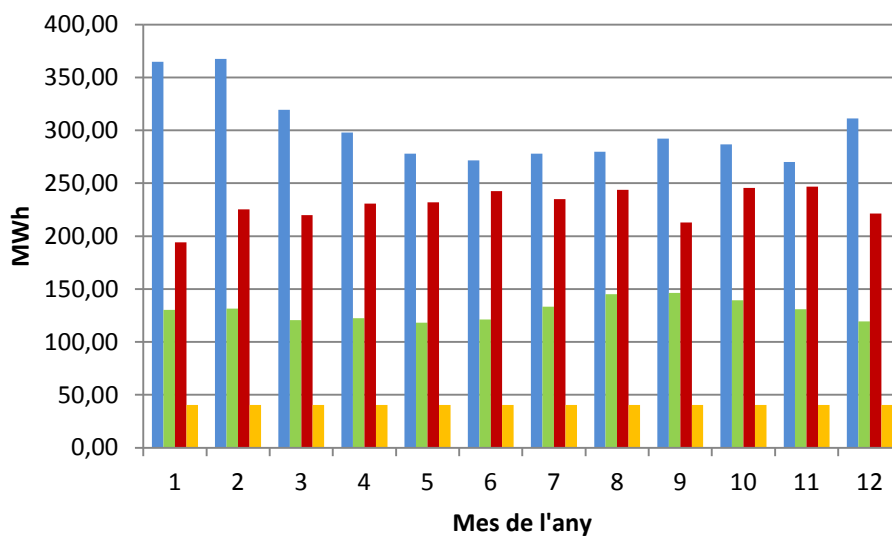


Figura 4. Consums de Casserres l'any 2014, distribuïts per mesos i per sectors⁽¹⁾.

⁽¹⁾. Sectors per colors: domèstic-blau, terciari-verd, industrial-vermell i públic-groc (té sempre el valor mitjà, a causa del format en què s'han obtingut les dades).

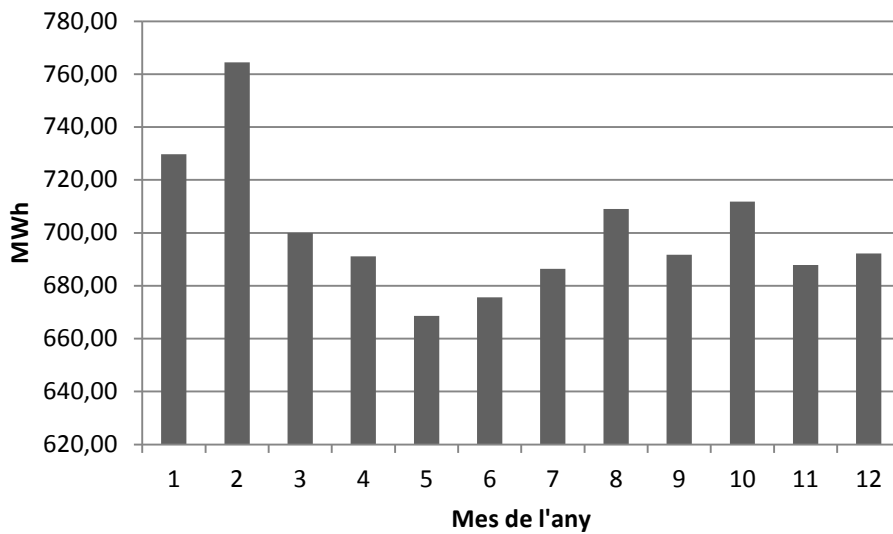


Figura 5. Consum elèctric total de Casserres l'any 2014, distribuït per mesos.

S'arriba, doncs, a la conclusió que els generadors haurien de ser capaços d'administrar uns 8 408,34 MWh l'any, i que el pic de consum es produeix en els mesos d'hivern.

Tot i així, cal tenir present que aquestes dades només són una aproximació de la realitat, ja que es basen en una adaptació de les dades mitjanes catalanes adaptades a les dimensions del poble. A més, es té com a referència només el consum d'un any.

A part d'això, les dades de consum no tenen perquè ajustar-se a la necessitat, ja sigui per raons d'estalvi econòmic o per malbaratament.

4. Viabilitat de l'aprofitament del recurs eòlic

Un cop conegut el consum elèctric de la vila, s'ha estudiat si resultaria adient instal·lar-hi un aerogenerador o no.

Per conèixer la viabilitat de l'aprofitament del recurs eòlic de Casserres, primerament, s'ha fet un estudi del comportament del vent a la localitat i, tot seguit, s'ha analitzat el funcionament d'un aerogenerador per tal d'adaptar-lo a les condicions meteorològiques de la zona. Finalment, mitjançant els costos, s'ha optimitzat el dimensionament de la turbina.

4.1. Estudi del recurs eòlic de la zona

La potència continguda en el vent és molt irregular i per això requereix un estudi acurat del seu comportament a la localitat per tal d'estimar l'energia que se'n podrà produir.

Aquesta potència ve donada per la següent expressió 1:

$$P = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} \quad (1)$$

que es dona en unitats del sistema internacional, on ρ és la densitat de l'aire, A és l'àrea de control, que a la pràctica és l'àrea escombrada per les pales de l'aerogenerador, i v és la velocitat del vent. Com s'observa, la velocitat del vent és la propietat més influent en la potència, també és la propietat més variable. En canvi, la densitat depèn de l'altura i de la temperatura, però no és tant irregular. El que sí que es pot afirmar amb certesa és que aquesta expressió quantifica si cada indret tindrà un recurs eòlic més o menys favorable.

La vila de Casserres està situada a uns 618 m d'altura respecte el mar, per tant, li correspon una densitat de l'aire d'uns $1,1533 \text{ kg/m}^3$ tal i com indica la taula 9 [4].

Taula 9. Densitat de l'aire ambient en funció de l'altura [4].

Altitud (metres)	Valores de la densidad del aire ambiente		
	Mínimo (kg/m ³)	Promedio (kg/m ³)	Máximo (kg/m ³)
0	1,1405	1,2254	1,3167
305	1,1101	1,1886	1,2735
610	1,0812	1,1533	1,2302
914	1,0524	1,1197	1,2222
1000	1,0444	1,1101	1,1902
1219	1,0252	1,0861	1,1501
1524	0,9996	1,0556	1,1133
1829	0,9739	1,0236	1,0764
2000	0,9595	1,0076	1,0572
2134	0,9483	0,9931	1,0412
2438	0,9243	0,9643	1,0060
2743	0,8986	0,9355	0,9723
3000	0,8794	0,9115	0,9467
3048	0,8762	0,9082	0,9419

Respecte la velocitat del vent, a Casserres és d'uns 4 – 4,5 m/s de mitjana, tal i com indica la figura 6, on la zona d'estudi està encerclada de color vermell [5].

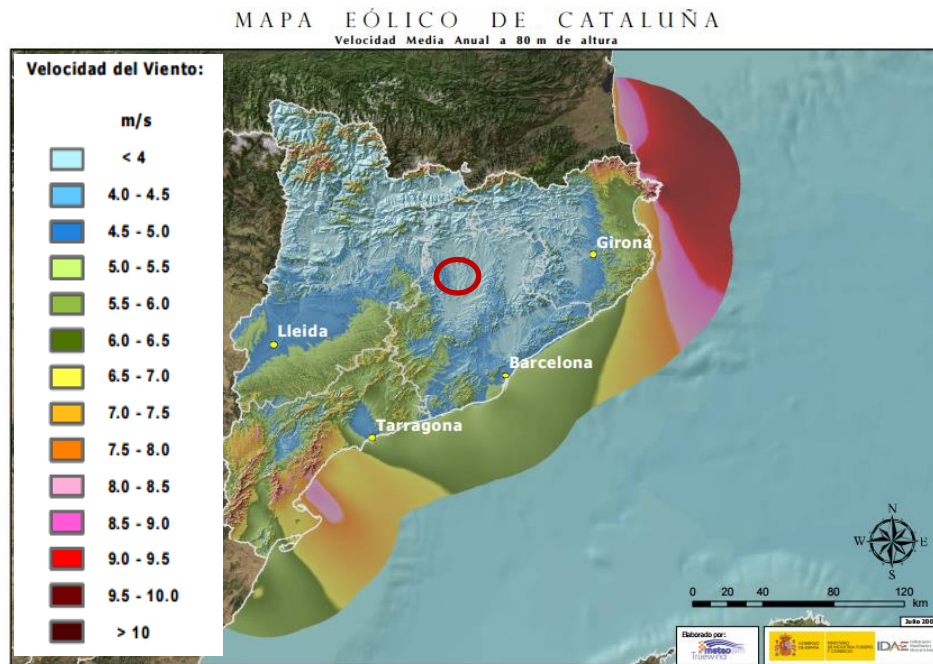


Figura 6. Mapa eòlic de Catalunya.

S'observa que el terme de Casserres no és la millor localització de Catalunya on instal·lar un aerogenerador pel que fa a potència eòlica aprofitable.

Encara que la velocitat mitjana anual és una dada important a l'hora de conèixer la viabilitat de la instal·lació de forma aproximada, com s'ha comentat, la seva variabilitat és molt gran i, per tant, s'ha utilitzat un altre mètode més acurat per fer els càlculs.

El comportament del vent es pot preveure segons una funció probabilística anomenada distribució de Weibull, la qual pot indicar, segons un paràmetre de forma k i un paràmetre d'escala c determinats per l'indret d'estudi, la probabilitat que el vent bufi amb una velocitat concreta [6].

Aquests dos paràmetres a Casserres són $k = 1,756$ i $c = 3,95 \text{ m/s}$ a 80 metres d'alçada [5] ja que la força del vent també varia en funció de l'altura. Així doncs, la distribució de Weibull agafa una forma com la mostrada a la figura 7.

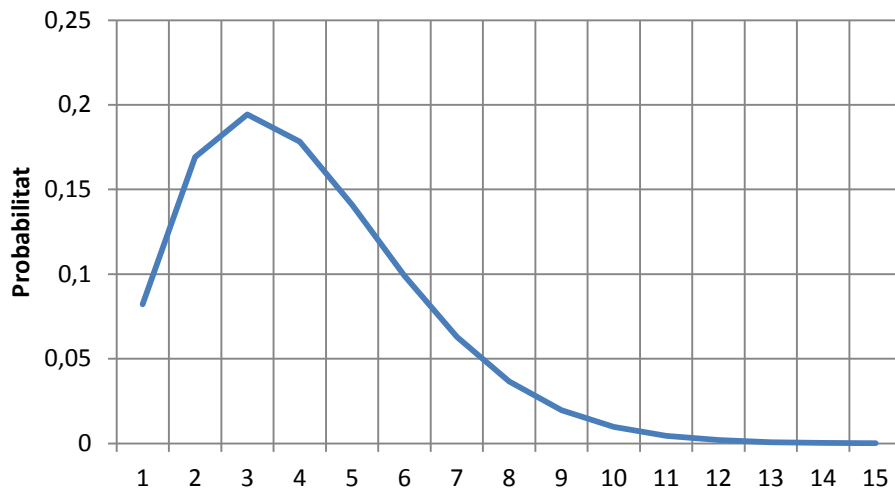


Figura 7. Funció de probabilitat de Weibull amb $c = 3,95 \text{ m/s}$ i $k = 1,756$.

S'observa que la velocitat del vent més probable està pel voltant dels 4 m/s, tal i com es pot preveure segons la informació del mapa eòlic.

Aquesta funció servirà per saber el nombre d'hores totals, al llarg de la vida útil d'un aerogenerador, en què el vent tindrà cada velocitat concreta per, finalment, poder calcular l'energia total generada.

4.2. Predimensionament d'un aerogenerador

En aquest apartat es volen fer els primers càlculs aproximats a partir de les especificacions tècniques d'un aerogenerador ja existent per, posteriorment, poder ajustar-les millor a les condicions de Casserres.

La turbina escollida és la V100-2.0MW de Vestas, amb un generador doblement alimentat [7], el qual mesura 95 metres d'altura, el diàmetre del seu rotor és de 100 metres i té una potència nominal de 2 MW. Com s'ha comentat, la velocitat del vent varia en funció de l'alçada, i la distribució vista anteriorment ha estat calculada amb les dades corresponents a 80 metres d'alçada, per tant, s'haurà de corregir el factor d'escala c per tal d'adaptar-ho a l'aerogenerador. La correcció es fa mitjançant la següent expressió 2:

$$ch = c \cdot \frac{\ln \frac{H}{z_0}}{\ln \frac{80}{z_0}} \quad (2)$$

on H és l'altura de la turbina i z_0 és la rugositat del terreny [5], en aquest cas $z_0 = 0,1$, que correspon a un terreny amb gespa alta.

Així doncs, a Casserres i a 95 metres d'altura, $ch = 4,05 \text{ m/s}$, a partir de la qual es fa servir una distribució de Weibull diferent, mostrada a la figura 4, on s'hi observa que la funció és lleugerament més ampla i amb el pic menys pronunciat. La probabilitat que el vent sigui superior a 4 m/s és, doncs, més alta a 95 metres que a 80 metres d'alçada.

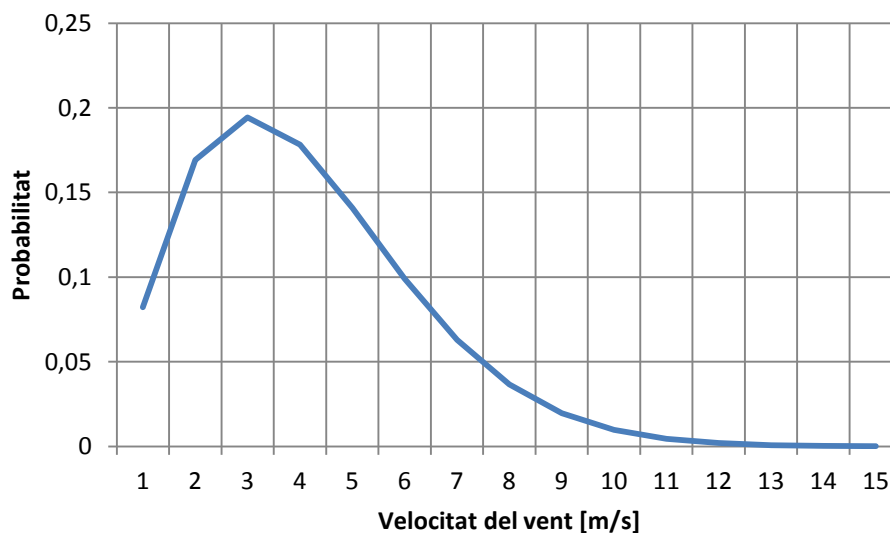


Figura 8. Funció de probabilitat de Weibull amb $c = 4,05 \text{ m/s}$ i $k = 1,756$.

Pels càlculs de producció d'energia s'ha assumit que la vida útil de la turbina és de 20 anys i que el vent només bufa en un únic sentit, per simplificació. S'ha analitzat la velocitat del vent a partir d'interval·ls d'1 m/s.

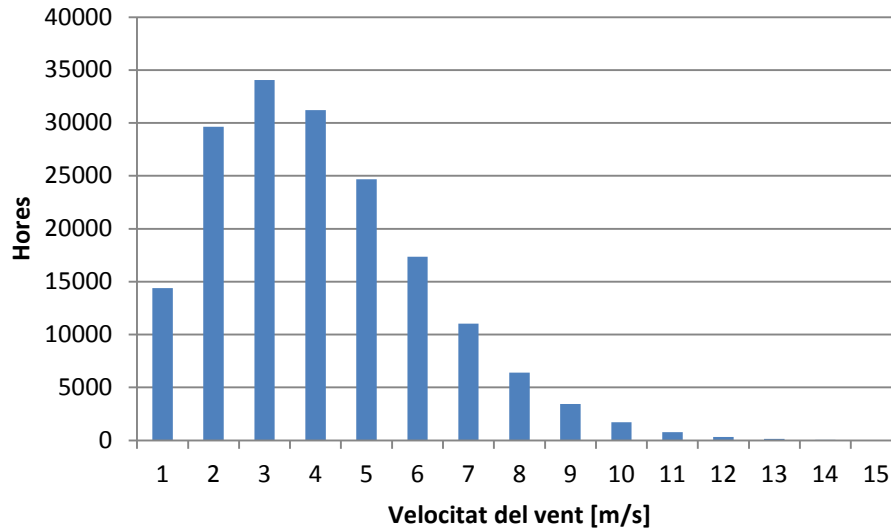


Figura 9. Nombre d'hores en què el vent bufa en una velocitat en concret a Casserres durant 20 anys.

Un cop fetes aquestes suposicions, s'ha procedit a analitzar la potència que la turbina és capaç d'extreure del vent. S'ha de tenir present una limitació física a l'hora de fer l'anàlisi, aquesta s'anomena límit de Betz i diu que la potència màxima que es pot aprofitar del vent és del 59,25%. Per tant, existeix un rendiment de la turbina, el coeficient de potència C_p que, en un cas ideal, $C_p = 0,5925$ [6]. En aquest cas, s'ha fet servir un valor típic de $C_p = 0,45$ [6]. Així doncs, la potència aprofitable per l'aerogenerador ve donada per la següent expressió:

$$P = \frac{\rho \cdot A \cdot v^3}{2} \cdot C_p \quad (3)$$

A continuació es mostren els resultats de potència aprofitable i de l'energia extreta per a cada interval de velocitats durant els 20 anys de vida útil.

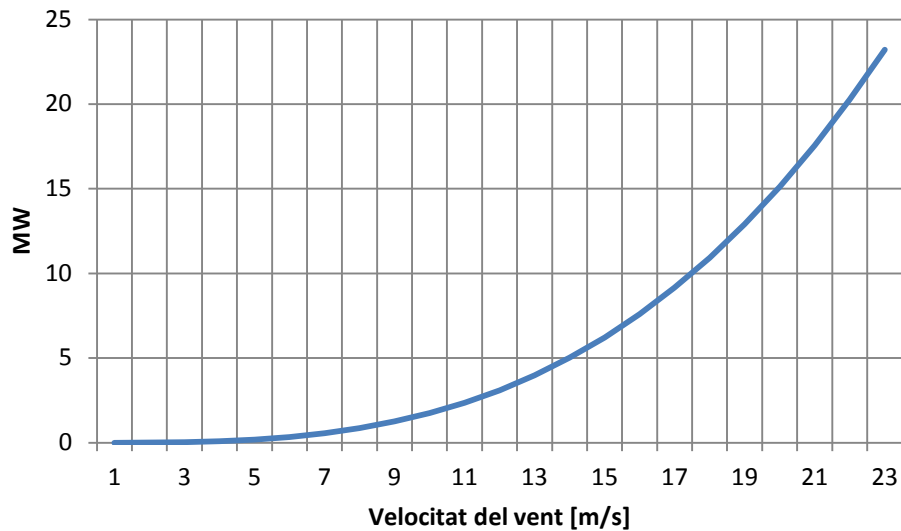


Figura 10. Potència aprofitable per un aerogenerador.

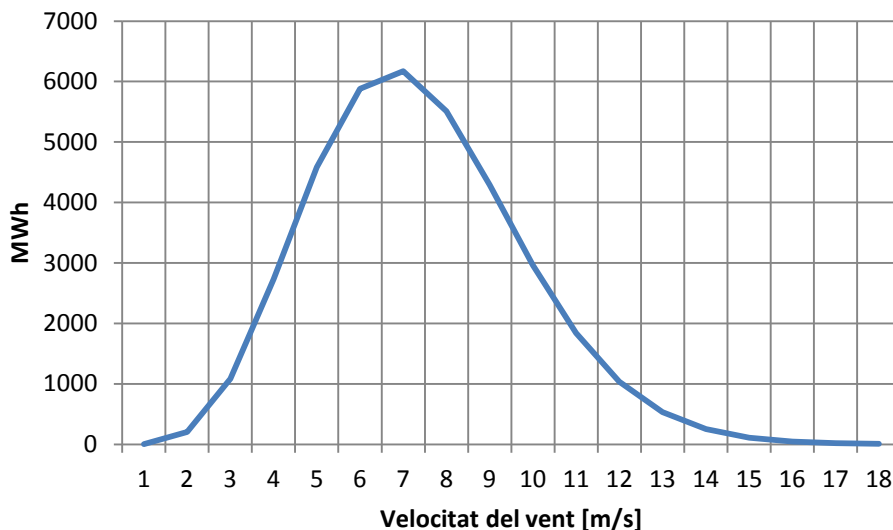


Figura 11. Energia aprofitable per un aerogenerador durant la seva vida útil.

Tot i així, hi ha tres limitacions de l'aerogenerador que encara no s'han tingut en compte: les velocitats de cut-in i cut-out, i la potència nominal.

Les velocitats de cut-in i cut-out acoten el rang de velocitats pel qual l'aerogenerador val la pena que estigui en funcionament, ja sigui per baixa producció (cut-in) o per perillositat estructural (cut-out). En el V100-2.0MW aquestes velocitats són, respectivament, de 3 m/s i 22 m/s [7].

La potència nominal ve determinada pel tren de potència, el cost del qual es veu

incrementat segons el valor nominal que es vulgui. Per tant, no és recomanable fer un tren de potència capaç de produir en velocitats molt altes si aquestes velocitats tenen poques probabilitats de donar-se. La turbina d'estudi té una potència nominal de 2 MW i, per tant, no podrà produir més que aquest valor.

Així doncs, s'han tornat a fer els càlculs tenint en compte aquestes propietats. L'energia produïda en els 20 anys de vida útil és de 34 772,44 MWh i, per tant, de 1 738,62 MWh cada any.

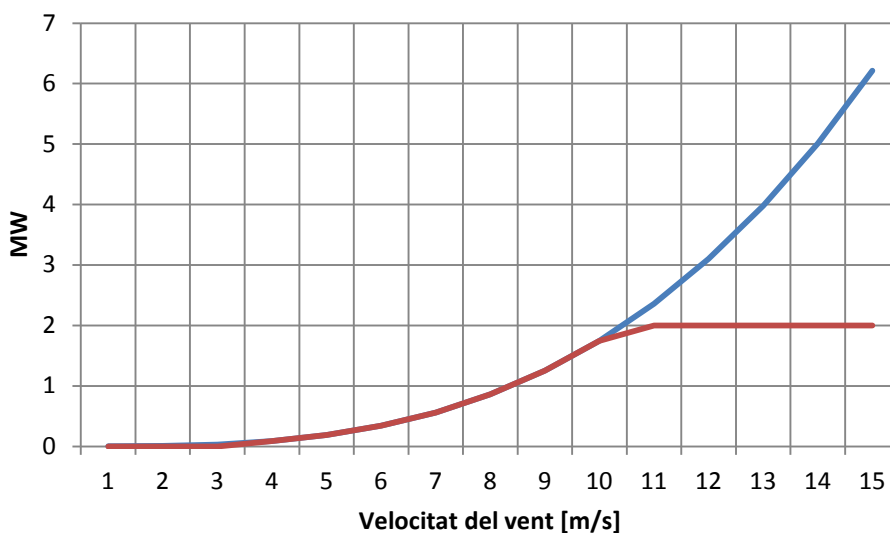


Figura 12. Contrast de la potència aprofitable i l'aprofitada per la turbina V100-2.0MW

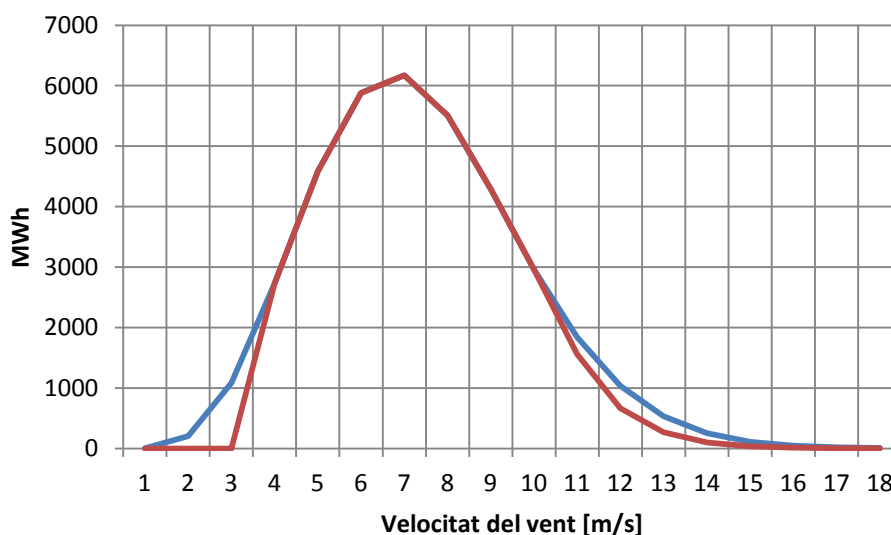


Figura 13. Contrast de l'energia aprofitable i l'aprofitada per la turbina V100-2.0MW durant la seva vida útil.

4.3. Estudi econòmic

En aquest apartat s'analitza el possible rendiment econòmic que pot tenir vendre l'energia produïda a la xarxa, és a dir, amb un plantejament empresarial, o bé des d'una perspectiva d'autosuficiència, en què els beneficis són interpretats com l'estalvi que es fa al no haver de pagar l'energia produïda. En els anàlisis no s'ha tingut en compte la variació de preus al llarg dels anys.

4.3.1. Plantejament empresarial

Primerament, s'ha fet un estudi econòmic des d'una perspectiva empresarial, amb intenció de treure rendiment econòmic mitjançant la instal·lació de l'aerogenerador a Casserres i venent l'energia produïda al mercat elèctric.

4.3.1.1. Ingressos

Els ingressos que es fan són a partir del preu de venda de l'energia produïda al mercat [8]. Al ser un valor força fluctuant, s'ha decidit obtenir la mitjana mensual de preus de l'any 2015, amb la qual es faran els càlculs.

A continuació es mostra una taula amb les dades trobades:

Taula 10. Preus de l'electricitat al mercat a l'any 2015

Preu elect. [€/MWh] 2015 (mitjanes)	
Gener	51,6
Febrer	42,57
Març	43,13
Abril	45,34
Maig	45,12
Juny	54,73
Juliol	59,55
Agost	55,59
Setembre	51,88
Preu mitjà	49,95

Així doncs, el preu de l'electricitat fet servir és de 49,95 €/MWh, la qual cosa dóna un cobrament a l'energia produïda de la turbina de 1 736 883,56 € en els 20 anys de funcionament i de 86 844,18 €/any.

Tot i així, aquests ingressos no es tradueixen en beneficis, ja que s'ha de tenir en compte el cost de l'aerogenerador i s'ha de recuperar la inversió abans de començar a obtenir

guanys.

4.3.1.2. Costos

Els costos de fabricació de cada part de la màquina i altres costos s'han calculat a partir de les expressions trobades al document *Wind Turbine Design Cost and Scaling Model [9]* (veure annex I). Aquests valors depenen de la longitud de les pales, de l'altura de la torre i de la potència nominal, majoritàriament.

El cost de cada pala, per exemple, ve donat per la següent expressió 4:

$$Cost = \frac{0,4019 \cdot R^3 - 955,24 + 2,7445 \cdot R^{2,5025}}{1 - 0,28} \quad (4)$$

on R és el radi del rotor (longitud de cada pala).

A la font, els costos vénen donats en 2002 USD, que s'han hagut de transformar en euros de l'any 2002 [10] i després adaptar als euros actuals tenint en compte la variació de l'IPC, que del gener del 2002 al gener del 2015 ha variat un 32,5% [11].

Taula 11. Cost de la instal·lació de l'aerogenerador V100-2.0MW, distribuït per components.

Cost Turbina				
	Massa [kg]	Cost [2002 USD]	Cost [2002 €]	Cost actual [€]
Pales	13 056,39	409 481,02	370 088,94	490 367,85
Rotor	18 136,10	77 078,44	69 663,49	92 304,13
Pitch+coixinets	7 389 175,59	99 310,05	89 756,42	118 927,26
Spinner	1 329,5	7 405,315	6 692,97	8 868,12
Eix baixa vel.	8 477,9	5 942,92	5 371,21	7 116,85
Suports principals	1 196,31	42 109,99	38 059,01	50 428,19
Caixa de transmissió		148 200	133 943,16	177 474,69
Fre mecànic		3 978,68	3 595,94	4 764,62
Generador		109 460	98 929,95	131 082,18
Vel. Variable elec.		158 000	142 800,4	189 210,53
Mecanisme yaw		57 442,02	51 916,09648	68 788,82784
Estructura		41 382,47	37 401,48	49 556,96
Connexions elèctriques		80 000	72 304	95 802,8
Hidràulica i refrigeració		24 000	21 691,2	28 740,84
Coverta gòndola		26 923,7	24 333,64	32 242,07
Torre	295 022,75	442 534,13	399 962,35	529 950,1138
Fonaments		71 226,45	64 374,46	85 296,16
Transport		85 880	77 618,34	102 844,30
Treball civil		98 440	88 970,07	117 885,34

Instal·lació		91 541,70	82 735,39	109 624,39
Punt de contacte elèc.		158 92	143 631,89	190 312,26
Enginyeria		3 996,31	3 611,86	4 785,72
Preu recanvis		21 400	19 341,32	25 627,249
Lloguer terres		1 877,712	1 697,07	2 248,63
Total		2 266 530,92	2 048 490,65	2 714 250,11
Despeses OM		12 170,35	10 999,57	14 574,43

Així doncs, la inversió necessària per instal·lar una turbina V100-2.0MW és d'uns 2 714 250,11 €.

4.3.1.3. Anàlisi financer

Per fer l'anàlisi financer s'han fet dos plantejaments possibles: primer considerant la necessitat de demanar un crèdit per fer la inversió i, segon, sense considerar aquesta necessitat.

Considerant la necessitat de demanar un crèdit, s'ha fet l'estudi mostrat a la taula 3, on s'analitza el flux de tresoreria tenint en compte els ingressos anuals restant-los-hi les despeses d'operació i manteniment i les despeses de finançament, les quals s'han considerat amb una taxa d'interès d'un 3% de la inversió. S'ha suposat que durant els 20 anys de vida útil no varia cap valor monetari.

Taula 12. Anàlisi financer de la instal·lació d'una turbina V100-2.0MW a Casserres, amb una taxa d'interès del 3%

Període	Ingressos [€]	Despeses OM [€]	Despeses financeres [€]	Beneficis [€]
1	86 844,17	14 574,43	182 440,24	-110 170,49
2	86 844,17	14 574,43	182 440,24	-110 170,49
3	86 844,17	14 574,43	182 440,24	-110 170,49
4	86 844,17	14 574,43	182 440,24	-110 170,49
5	86 844,17	14 574,43	182 440,24	-110 170,49
6	86 844,17	14 574,43	182 440,24	-110 170,49
7	86 844,17	14 574,43	182 440,24	-110 170,49
8	86 844,17	14 574,43	182 440,24	-110 170,49
9	86 844,17	14 574,43	182 440,24	-110 170,49
10	86 844,17	14 574,43	182 440,24	-110 170,49
11	86 844,17	14 574,43	182 440,24	-110 170,49
12	86 844,17	14 574,43	182 440,24	-110 170,49
13	86 844,17	14 574,43	182 440,24	-110 170,49
14	86 844,17	14 574,43	182 440,24	-110 170,49

15	86 844,17	14 574,43	182 440,24	-110 170,49
16	86 844,17	14 574,43	182 440,24	-110 170,49
17	86 844,17	14 574,43	182 440,24	-110 170,49
18	86 844,17	14 574,43	182 440,24	-110 170,49
19	86 844,17	14 574,43	182 440,24	-110 170,49
20	86 844,17	14 574,43	182 440,24	-110 170,49

Aquesta inversió no és gens viable si s'ha de demanar un crèdit, ja que no només s'hi perden els diners de la inversió, sinó que a més s'acumularia deute amb el banc, ni tan sols pagant el crèdit en 20 anys.

Si es planteja l'estudi sense considerar la necessitat d'un crèdit, n'hi ha prou fent el càlcul del valor actualitzat net de la inversió. S'ha suposat una taxa d'interès anual d'un 10% i s'observa que no val la pena fer la inversió, ja que el VAN és de -2 098 976,98 € i el període de retorn no es troba en la vida útil de la màquina. De fet, la taxa interna de rendibilitat és de -5%, la qual cosa també demostra que no és una bona inversió.

Així doncs, queda demostrat que de la instal·lació d'un aerogenerador V100-2.0MW a Casserres no se li pot treure rendiment econòmic, sobretot per la falta de potència eòlica disponible que hi ha a la localitat.

Taula 13. Càlcul del VAN de la inversió amb una taxa d'interès del 10%, valors en €.

Per.	Inversió [€]	Cost OM [€]	Cobraments [€]	Flux tresoreria [€]	Flux tres. Acumulat [€]	Flux tres. Actualitzat [€]	VAN [€]
0	2 714 250			-2 714 250,11	-2 714 250,11	-2 714 250,11	-2 714 250,11
1	0	14 574,42	86 844,17	72 269,75	-2 641 980,35	65 699,77	-2 648 550,33
2	0	14 574,42	86 844,17	72 269,75	-2 569 710,60	59 727,06	-2 588 823,26
3	0	14 574,42	86 844,17	72 269,75	-2 497 440,85	54 297,33	-2 534 525,93
4	0	14 574,42	86 844,17	72 269,75	-2 425 171,10	49 361,21	-2 485 164,72
5	0	14 574,42	86 844,17	72 269,75	-2 352 901,35	44 873,82	-2 440 290,89
6	0	14 574,42	86 844,17	72 269,75	-2 280 631,60	40 794,39	-2 399 496,50
7	0	14 574,42	86 844,17	72 269,75	-2208 361,8	37 085,80	-2 362 410,69
8	0	14 574,42	86 844,17	72 269,75	-2 136 092,09	33 714,37	-2 328 696,3
9	0	14 574,42	86 844,17	72 269,75	-2 063 822,34	30 649,42	-2 298 046,89
10	0	14 574,42	86 844,17	72 269,75	-1 991 552,59	27 863,10	-2 270 183,77
11	0	14 574,42	86 844,17	72 269,75	-1 919 282,84	25 330,10	-2 244 853,66
12	0	14 574,42	86 844,17	72 269,75	-1 847 013,09	23 027,37	-2 221 826,29
13	0	14 574,42	86 844,17	72 269,75	-1 774 743,34	20 933,97	-2 200 892,32
14	0	14 574,42	86 844,17	72 269,75	-1702 473,5	19 030,88	-2 181 861,43
15	0	14 574,42	86 844,17	72 269,75	-1 630 203,83	17 300,80	-2 164 560,63
16	0	14 574,42	86 844,17	72 269,75	-1 557 934,08	15 728,00	-2 148 832,63

17	0	14 574,42	86 844,17	72 269,75	-1 485 664,33	14 298,18	-2 134 534,44
18	0	14 574,42	86 844,17	72 269,75	-1 413 394,58	12 998,35	-2 121 536,09
19	0	14 574,42	86 844,17	72 269,75	-1 341 124,83	11 816,68	-2 109 719,41
20	0	14 574,42	86 844,17	72 269,75	-1 268 855,08	10 742,43	-2 098 976,97

4.3.2. Plantejament d'autoabastiment

El que es planteja en aquest segon estudi és la inversió feta per la gent del poble de Casserres o per l'ajuntament mateix, de manera que l'energia produïda sigui pel consum de la gent del poble i no per treure'n rendiment econòmic venent l'electricitat a la xarxa.

4.3.2.1. Ingressos

Aquest altre enfoc canvia la idea de benefici mitjançant vendes per la idea de benefici estalviant-se la compra d'electricitat a les companyies distribuïdores. Per tant, els ingressos són l'energia produïda pel preu per la qual es paga a les companyies, que és molt més alt que el de venda al mercat.

A Casserres, la companyia distribuïdora és Endesa, la qual té diferents taxes, entre les quals hi ha la de consum domèstic i la de gran llar (entre 10 kW i 15 kW contractats). El preu pel consum domèstic és de 0,124107 €/kWh i per la gran llar, de 0,149733 €/kWh [3]. Les càrregues inferiors a 10 kW són, majoritàriament, pel consum domèstic, i les càrregues entre 10 i 15 kW, per la resta. El 43% del consum total de Casserres és domèstic, per tant, es fa la ponderació adequada per tal d'obtenir el preu aproximat, el qual és de 0,1387 €/kWh.

4.3.2.2. Costos de la instal·lació i anàlisi financer

Considerant també un cost de turbina de 2 714 250,11 € es repeteix l'estudi anterior canviant els ingressos, que es calculen de la forma descrita abans. Els ingressos anuals amb el plantejament d'autoconsum són de 238 052,15 €.

Tabla 14. Anàlisi financer de la inversió amb una taxa d'interès del 3% (autoabastiment)

Període	Ingressos [€]	Despeses OM [€]	Despeses fin. [€]	Beneficis [€]
1	241 146,90	14 574,43	182 440,24	44 132,23
2	241 146,90	14 574,43	182 440,24	44 132,23
3	241 146,90	14 574,43	182 440,24	44 132,23
4	241 146,90	14 574,43	182 440,24	44 132,23
5	241 146,90	14 574,43	182 440,24	44 132,23
6	241 146,90	14 574,43	182 440,24	44 132,23

7	241 146,90	14 574,43	182 440,24	44 132,23
8	241 146,90	14 574,43	182 440,24	44 132,23
9	241 146,90	14 574,43	182 440,24	44 132,23
10	241 146,90	14 574,43	182 440,24	44 132,23
11	241 146,90	14 574,43	182 440,24	44 132,23
12	241 146,90	14 574,43	182 440,24	44 132,23
13	241 146,90	14 574,43	182 440,24	44 132,23
14	241 146,90	14 574,43	182 440,24	44 132,23
15	241 146,90	14 574,43	182 440,24	44 132,23
16	241 146,90	14 574,43	182 440,24	44 132,23
17	241 146,90	14 574,43	182 440,24	44 132,23
18	241 146,90	14 574,43	182 440,24	44 132,23
19	241 146,90	14 574,43	182 440,24	44 132,23
20	241 146,90	14 574,43	182 440,24	44 132,23

Considerant la necessitat de demanar un crèdit, s'ha fet el mateix estudi financer que abans, també amb una taxa del 3% i, efectivament, la instal·lació de la turbina sí que sembla econòmicament viable, amb un benefici anual de 44 132,23 € anuals, si es torna el crèdit en 20 anys.

S'ha realitzat l'experiment varies vegades canviant la taxa d'interès i el període de pagament i s'ha arribat a la conclusió que amb una taxa del 3 % es pot pagar el deute amb un període mínim de 16 anys amb un benefici anual de 10 488,71 € i de 226 572,47 € un cop pagat el crèdit, i amb una taxa del 5% es té un benefici anual de 8 774,02 €, tot i així no es pot pagar el deute en menys de 19 anys, sempre que es vulgui tenir benefici cada any.

Taula 15. Càlcul del VAN de la inversió amb una taxa d'interès del 3% (autoabastiment)

Per.	Inversió [€]	Cost OM [€]	Cobraments [€]	Flux tresoreria [€]	Flux tres. Acum. [€]	Flux tres. Act. [€]	VAN [€]
0	2 714 250,11			-2 714 250,11	-2 714 250,11	-2 714 250,11	-2 714 250,11
1	0,00	14 574,43	241 146,90	226 572,47	-2 487 677,64	219 973,27	-2 494 276,84
2	0,00	14 574,43	241 146,90	226 572,47	-2 261 105,17	213 566,28	-2 280 710,56
3	0,00	14 574,43	241 146,90	226 572,47	-2 034 532,70	207 345,91	-2 073 364,65
4	0,00	14 574,43	241 146,90	226 572,47	-1 807 960,23	201 306,70	-1 872 057,94
5	0,00	14 574,43	241 146,90	226 572,47	-1 581 387,76	195 443,40	-1 676 614,54
6	0,00	14 574,43	241 146,90	226 572,47	-1 354 815,29	189 750,88	-1 486 863,67
7	0,00	14 574,43	241 146,90	226 572,47	-1 128 242,82	184 224,15	-1 302 639,51
8	0,00	14 574,43	241 146,90	226 572,47	-901 670,35	178 858,40	-1 123 781,11
9	0,00	14 574,43	241 146,90	226 572,47	-675 097,88	173 648,93	-950 132,18

10	0,00	14 574,43	241 146,90	226 572,47	-448 525,41	168 591,20	-781 540,99
11	0,00	14 574,43	241 146,90	226 572,47	-221 952,94	163 680,77	-617 860,21
12	0,00	14 574,43	241 146,90	226 572,47	4 619,53	158 913,37	-458 946,84
13	0,00	14 574,43	241 146,90	226 572,47	231 192,00	154 284,83	-304 662,01
14	0,00	14 574,43	241 146,90	226 572,47	457 764,47	149 791,09	-154 870,92
15	0,00	14 574,43	241 146,90	226 572,47	684 336,94	145 428,25	-9 442,67
16	0,00	14 574,43	241 146,90	226 572,47	910 909,41	141 192,47	131 749,80
17	0,00	14 574,43	241 146,90	226 572,47	1 137 481,88	137 080,07	268 829,87
18	0,00	14 574,43	241 146,90	226 572,47	1 364 054,35	133 087,45	401 917,32
19	0,00	14 574,43	241 146,90	226 572,47	1 590 626,82	129 211,11	531 128,43
20	0,00	14 574,43	241 146,90	226 572,47	1 817 199,29	125 447,68	656 576,11

A continuació, s'ha fet l'estudi considerant que no hi ha necessitat de demanar un crèdit, igual que en el primer plantejament. S'ha calculat el valor actualitzat net i, amb una taxa d'interès anual superior al 5% el VAN és negatiu, per tant, no sortiria a compte. Però amb una taxa del 3%, el VAN és positiu i el període de retorn es realitza entre l'11è i 12è períodes (veure taula 15).

4.4. Dimensionament de l'aerogenerador

Sembla ser que amb un plantejament d'autoconsum és rentable instal·lar un aerogenerador a Casserres. El que s'estudia a continuació és la possibilitat de dimensionar la turbina de vent per tal que s'adapti millor a la localitat i treure-li així el màxim rendiment. És a dir, potser a l'aerogenerador no li fa falta tenir una potència nominal de 2 MW, o tenir unes dimensions tan grans.

Per començar, cal analitzar més a fons el desglossament de costos de la instal·lació:

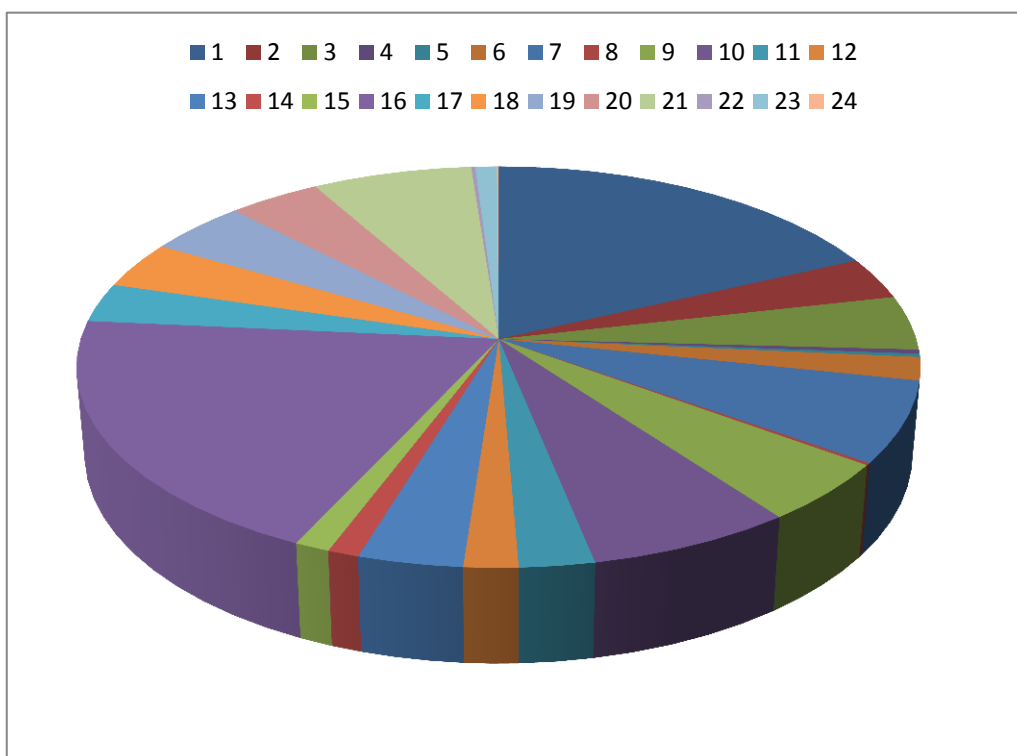


Figura 14. Cost de l'aerogenerador V100-2.0MW desglossat per components⁽²⁾.

A la figura 14 s'observa que la torre (fracció 16) i les pales (fracció 1) són els components més cars de la construcció, per tant, es valora la possibilitat de reduir-ne les dimensions.

Amb la turbina del predimensionament s'obtenia un estalvi anual de 44 132,23 €, tot i així, aquest estalvi cau molt ràpidament per poca reducció de dimensions de la torre o les pales, la qual cosa és comprensible si es recorda la importància de la velocitat del vent (relacionada amb l'altura) i de l'àrea escombrada per les pales a l'hora de captar energia de l'aire.

Per tant, es decideix mantenir les dimensions estructurals de la màquina, la qual cosa afegeix un possible problema, la tolerància o no de la gent del poble al soroll provocat per

⁽²⁾. La llegenda correspon a l'ordre dels components col·locats de dalt a baix a la taula 11. Els costos que depenen de les dimensions estructurals són les fraccions: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 11, 12, 16, 17, 20. Els costos que depenen de la potència nominal són les fraccions: 7, 8, 9, 10, 13, 14, 15, 18, 19, 21, 22, 23, 24.

les pales, les quals només es podrien arribar a disminuir de 50 a 30 metres de longitud si es vol seguir tenint benefici en forma d'estalvi.

Existeix una altra possibilitat per tal de maximitzar els beneficis. Aquesta és reduir la potència nominal de la màquina. S'observa que la possibilitat que la turbina arribi a la màxima producció és de 0,000761425 sobre 1, per tant, es valora la idea de reduir aquest valor, ja que la majoria dels components no estructurals es fan més cars a mesura que augmenta la potència nominal (veure annex I).

Després de fer la prova amb varis valors, es descobreix que si es fa servir una potència nominal d'1,2 MW el benefici anual generat per l'estalvi es veu incrementat fins a 56 277,07 €, que és òptim, a més, la possibilitat d'assolir la màxima producció varia fins a 0,019564631 sobre 1. Així doncs, un aerogenerador de 95 metres d'alçada, 50 metres de radi de rotor i potència nominal d'1,2 MW seria ideal per al poble de Casserres (veure costos a la figura 15).

Aquesta variació, a més, dóna més marge per reduir la longitud de les pales en cas que la gent valori més la poca contaminació acústica en front a l'estalvi generat. De fet, es podria reduir aquesta dimensió fins a uns 30 metres de radi (veure costos a la figura 16) i seguir tenint una mica de marge anual, tot i que molt escàs.

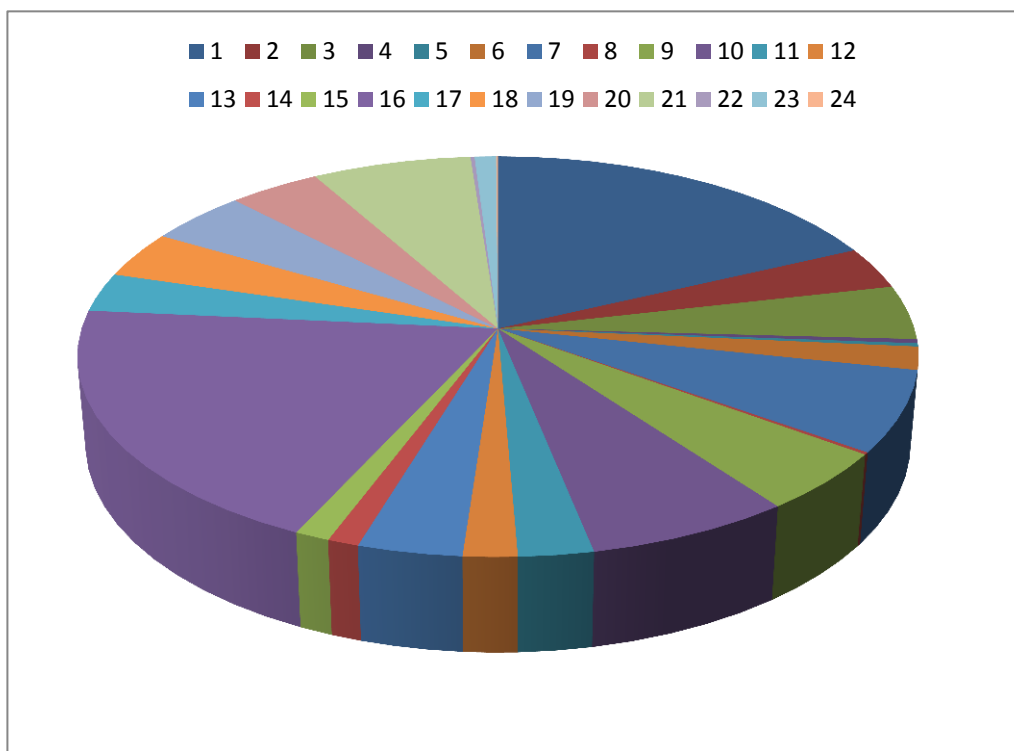


Figura 15. Cost d'un aerogenerador d'1,2 MW de potència nominal, diàmetre del rotor de 100 m i altura de 95 m, desglossat per components.

S'observa a la figura 15 que els costos de la resta de components s'han reduït lleugerament, de fet, el cost total de la turbina és, així, de 2 280 715,62 €, uns 500 000 € menor que en la V100-2.0MW.

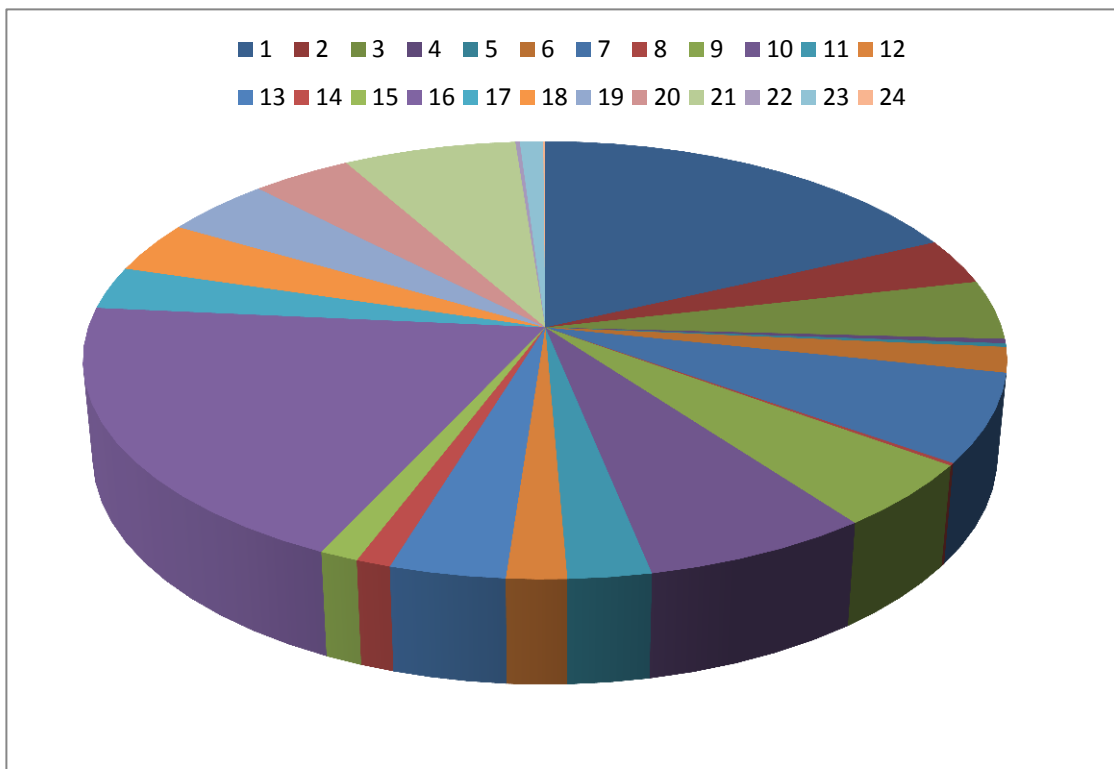


Figura 16. Cost d'un aerogenerador d'1,2 MW de potència nominal, diàmetre del rotor de 60 m i altura de 95m, desglossat per components.

S'observa a la figura 16 que el cost de les pales s'ha reduït significativament, de fet, el cost total d'una turbina com aquesta seria de 1 223 011,73 €. Per tant, es comprova que els costos estructurals són els més influents.

Així doncs, si s'implementa una turbina de 95 metres d'alçada, 50 metres de radi del rotor i una potència nominal d'1,2 MW, s'obté el màxim rendiment a la vila de Casserres, el qual es tradueix amb una predicció de la producció anual de 1 630,48 MWh i un benefici anual de 59 179,31 € si es retorna el crèdit de 226 147,10 € durant els 20 anys de vida útil, tot i així, és possible que unes pales d'aquestes dimensions molestin acústicament als habitants del poble.

En canvi, si s'implementa una turbina de 95 metres d'alçada, 30 metres de radi del rotor i una potència nominal d'1,2 MW, s'obté un marge de benefici d'uns 1 531,95 € anuals si es retorna el crèdit de 1 223 011,72 € durant els 20 anys de vida útil, el qual és mínim,

però es redueix el soroll provocat per la màquina i encara s'aconsegueix una producció d'energia neta, d'uns 642,57 MWh cada any.

4.5. Viabilitat ambiental

L'aerogenerador és una estructura de grans dimensions que, tot i no emetre gasos ni residus contaminants, pot tenir un impacte negatiu en el medi ambient. Per tant, la seva instal·lació no està permesa a qualsevol lloc, s'ha de tenir en compte la contaminació acústica, visual i la perillositat per aus migratòries. Així doncs, s'han exclòs diferents territoris a Catalunya [12]:

- Espais d'interès natural.
- Espais natural de protecció ambiental i espais assimilables.
- Reserves nacional de caça.
- Zones d'especial protecció per a les aus.
- Zones humides d'interès internacional.
- Jaciments arqueològics.
- Béns culturals d'interès nacional.
- Punts d'interès geològic.

Cada terme municipal està estudiat i s'ha elaborat el mapa de compatibilitat eòlica [13], on s'hi mostren els termes que són compatibles (blanc) amb la instal·lació de parcs eòlics, els que són totalment incompatibles (vermell) i zones d'implantació condicionada (groc).

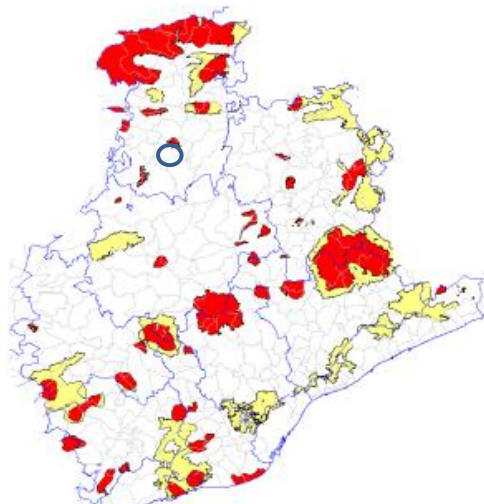


Figura 17. Mapa de compatibilitat eòlica a la província de Barcelona, el terme de Casserres encerclat en blau.

Sembla, per tant, que el terme de Casserres és compatible amb la implantació de parcs eòlics pel que fa a espais protegits.

Pel que fa a la contaminació acústica, aquesta és produïda per la punta de les pales al girar que, alhora, depèn de la seva longitud i la velocitat del vent [6]. Un aerogenerador V100-2.0MW té una potència acústica màxima de 105 dB [7]. Tot i així, a Casserres poques vegades s'arribarà a aquest valor a causa de la baixa velocitat del vent.

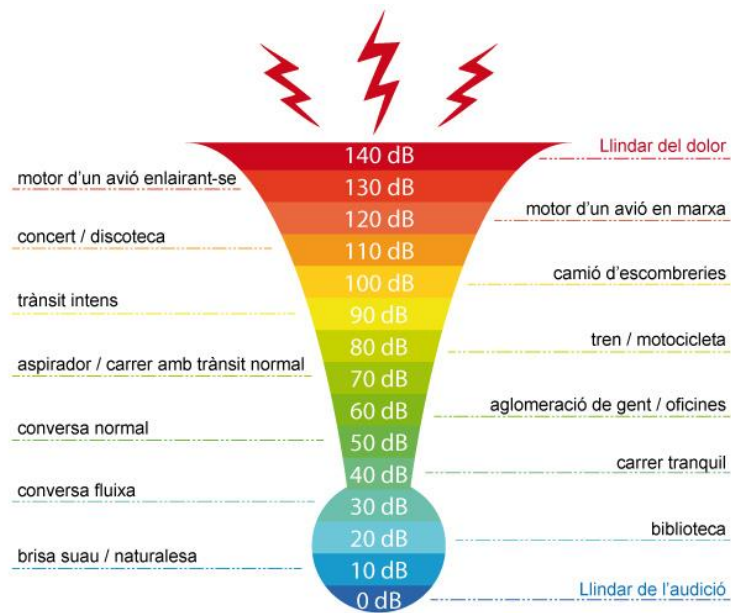


Figura 18. Escala de contaminació acústica [26].

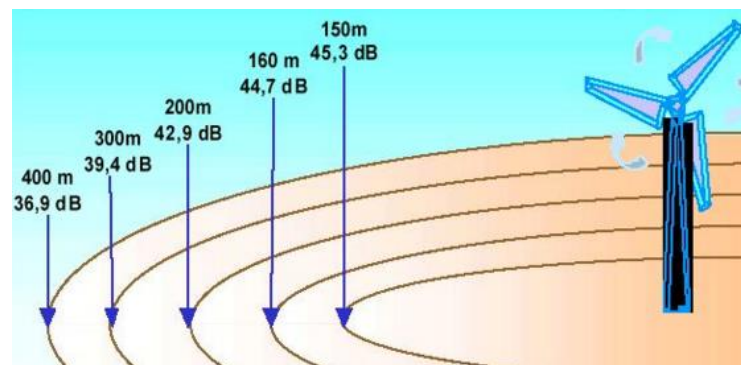


Figura 19. Escala de contaminació acústica en funció de la distància

Pel que es pot observa a les figures 18 i 19, sembla que s'instal·li on s'instal·li l'aerogenerador, s'hauria de procurar que estigués almenys a 150 m de distància de qualsevol habitatge.

4.6. Conclusions

Després de fer l'estudi de la rendibilitat o no d'una instal·lació d'un aerogenerador V100-2.0MW a la vila de Casserres, s'ha arribat a varies conclusions.

La comarca del Berguedà no és un lloc massa adequat per la producció d'energia eòlica, ja que s'ha demostrat que el projecte no seria rentable si el que es pretén és extreure'n benefici venent l'electricitat produïda a la xarxa. Tot i així, s'ha vist que si el plantejament és el de l'autoconsum, sí que val la pena dur a terme la proposta.

A més, s'ha comprovat que el major gruix del cost de la instal·lació es deu als components estructurals, però que reduir-ne les dimensions es paga amb una davallada significativa de la producció. En canvi, la potència nominal de la màquina és un valor que implica menys variació del flux de tresoreria i que, precisament per això, es pot adaptar molt bé a les condicions eòliques de cada indret.

Tenint en compte aquestes comprovacions, s'ha observat que la proposta d'autoconsum també deixa marge per regular fins a cert punt la contaminació acústica, en funció de les preferències de la gent del poble.

5. Viabilitat de l'aprofitament del recurs solar

Un cop vista la viabilitat de la instal·lació d'una turbina eòlica, anàlogament, s'ha fet l'estudi per l'aprofitament del recurs solar de Casserres, aquest cop fent els càlculs per a un sol mòdul fotovoltaic. Primerament, s'han obtingut dades de radiació solar global [15] i, tot seguit, s'han fet servir per l'anàlisi del funcionament dels mòduls fotovoltaics. Finalment, s'ha estudiat la seva viabilitat econòmica mitjançant els costos.

5.1. Estudi del recurs solar de la zona

En aquest apartat s'analitza la captació de la irradiància solar mitjançant mòduls fotovoltaics i adaptant-los a la zona per tal d'aconseguir el millor rendiment.

L'energia procedent del Sol, anomenada també irradiació solar global, es pot desglossar en irradiació directa (rebuda directament sense obstacles), difusa (rebuda indirectament des dels núvols, la pols i altres obstacles) i reflectida.

Per tal de conèixer la irradiància (W/m^2) solar global mitjana que Casserres rep segons l'època de l'any al pla horitzontal, s'han demanat les dades al Servei Meteorològic de Catalunya. Tot i així, els mòduls fotovoltaics se solen inclinar per tal de tenir la màxima perpendicularitat possible a la irradiància directa i aprofitar la irradiància reflectida al llarg de l'any (també existeixen panells orientables, però són més cars i menys comuns). Aquesta inclinació òptima depèn de la latitud (en graus) de l'indret [15] que, en el nostre cas, és de $\phi = 42^\circ$:

$$\beta = 3,7 + 0,69 \cdot \phi \quad (5)$$

Així doncs, la inclinació òptima per un mòdul fotovoltaic a Casserres és de $32,68^\circ$.

La irradiància captada per una superfície d'una certa inclinació s'obté a partir de l'expressió 6 [15], en unitats del sistema internacional:

$$G(\beta) = \frac{G(0)}{1 - 4,46 \cdot 10^{-4} \cdot \beta - 1,19 \cdot 10^{-4} \cdot \beta^2} \quad (6)$$

on $G(\beta)$ és la irradiància captada per una superfície inclinada i β és la inclinació calculada anteriorment.

L'expressió anterior, junt amb les dades proporcionades pel Servei Meteorològic de Catalunya, permet saber quanta potència solar es rep a Casserres cada mes i, tenint en compte les hores de llum al dia de cada època de l'any, l'energia.

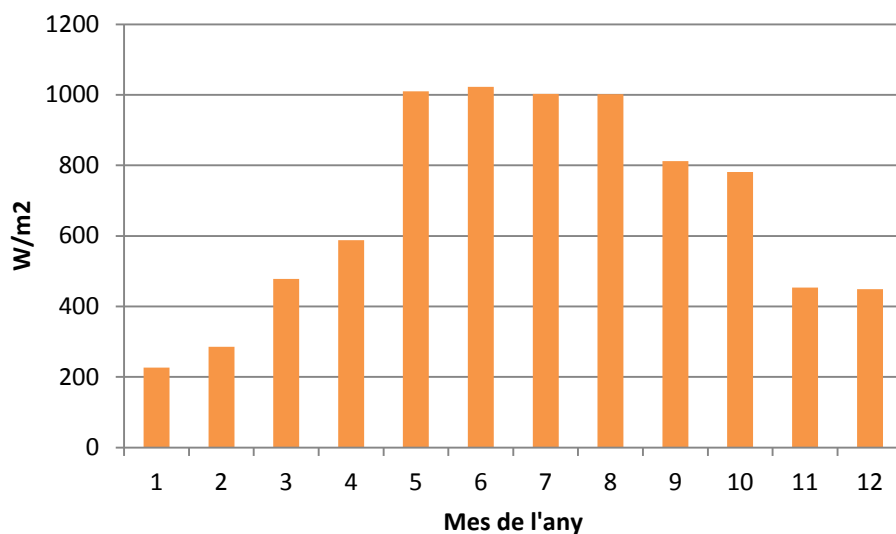


Figura 20. Irradiància mitjana captada per la superfície inclinada a Casserres l'any 2014, distribuïda per mesos.

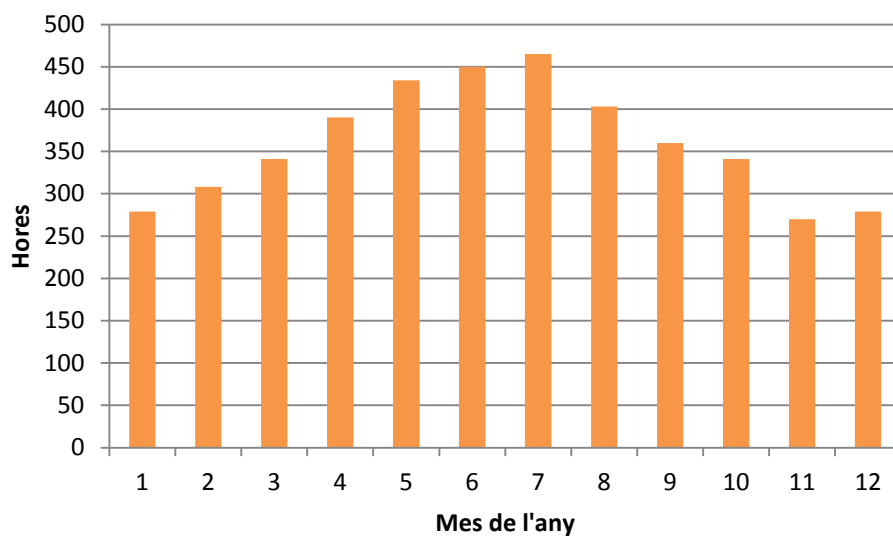


Figura 21. Hores de llum mensuals a Casserres l'any 2014.

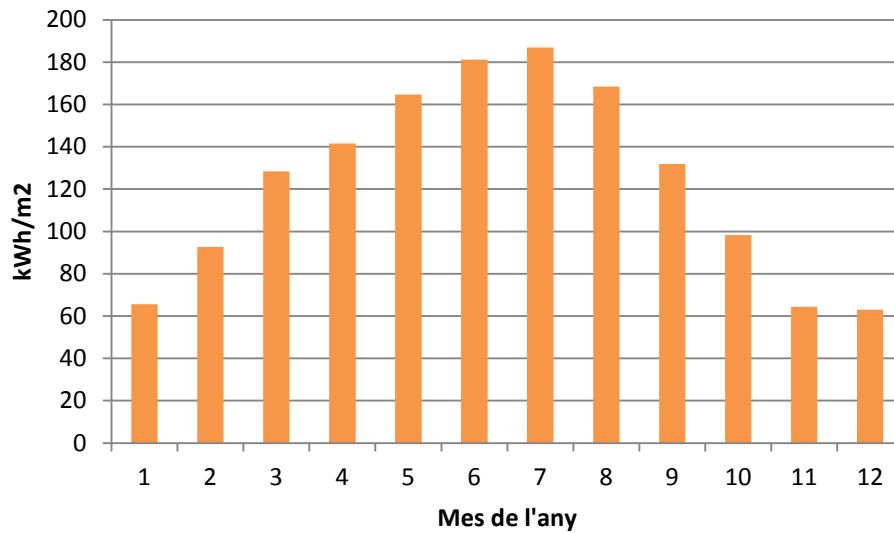


Figura 22. Irradiació mensual captada per la superfície inclinada a Casserres l'any 2014.

S'observa, doncs, que els mesos en què més radiació seria capaç de captar un mòdul fotovoltaic són els d'estiu, ja sigui tant per les hores de llum com per la perpendicularitat de la radiació directa que la inclinació calculada ens permet obtenir.

Per obtenir el màxim rendiment d'un mòdul fotovoltaic també s'ha de tenir en compte l'orientació azimuthal d'aquest, la qual es procurarà que estigui a $\alpha = 0^\circ$, és a dir, en referència hemisferi nord, just entre el sentit est i oest, perpendicular a la direcció sud (veure figura 23).

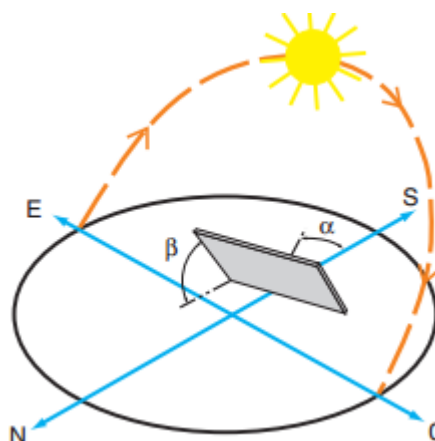


Figura 23. Inclinació òptima β i orientació azimuthal α .

5.2. Funcionament d'un mòdul fotovoltaic a Casserres

En aquest apartat s'estudia el funcionament d'un mòdul fotovoltaic per tal de poder fer els càlculs necessaris per obtenir l'energia que és capaç de produir a Casserres.

Les condicions estàndard d'un mòdul fotovoltaic són:

- Irradiància (G) de 1000 W/m².
- Temperatura ambient (Ta) de 25 °C.
- Temperatura d'operació (Top), entre 45 i 47 °C.
- AM = 1,5. AM és la massa d'aire que ha de travessar la irradiació solar abans d'arribar a la superfície terrestre, expressant com a AM = 1 si la travessa de forma perpendicular.

Les plaques fotovoltaïques vénen classificades segons les seves propietats en aquestes condicions estàndard.

La potència que una cèl·lula és capaç de generar depèn de la seva intensitat i la seva tensió, com es dona en l'expressió 7, en unitats del sistema internacional:

$$P = U \cdot I \quad (7)$$

Així doncs, la potència màxima ($P_{m\grave{a}x}$) serà el producte de la tensió en el punt màxim (U_m) i la intensitat en el punt màxim (I_m), que són dades donades pel fabricant de la cèl·lula. També cal tenir en compte la intensitat de curtcircuit (I_{sc}) i la tensió en el buit (U_{oc}) per tal de disposar de la corba I-U de les cèl·lules fotovoltaïques.

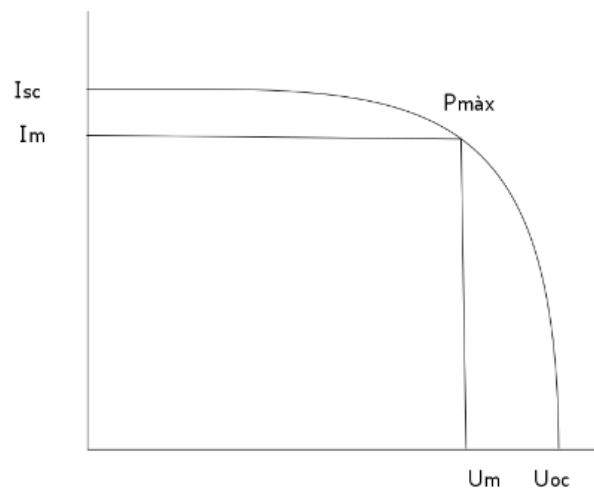


Figura 24. Corba $U_{oc} - I_{sc}$, indica la potència en el punt de funcionament.

A la figura 24 es pot observar la corba esmentada abans i el punt de funcionament, que indica la potència que es genera segons la U i la I, en concret, el punt B és el de màxima potència.

Tot i així, aquesta corba no és rígida per una mateixa cèl·lula, ja que les condicions ambientals hi intervenen amb importància. La temperatura ambiental i la irradiància fan variar la temperatura de la cèl·lula, de la qual depenen I_{sc} i U_{oc} [15]:

$$T_c = T_a + \frac{T_{op}-20}{800} \cdot G \quad (8)$$

$$I_{sc} = I'_{sc} \cdot \frac{G}{G'} + \alpha \cdot (T_c - T'_c) \quad (9)$$

$$U_{oc} = U'_{oc} + m \cdot vt \cdot \ln \frac{G}{G'} - \beta \cdot (T_c - T'_c) \quad (10)$$

Així doncs, es pot deduir que la potència que la cèl·lula fotovoltaica és capaç de donar també varia en funció de les condicions ambientals. Tot i així, no s'ha trobat cap font que afirmi que I_m i U_m reaccionin igual que I_{sc} i U_{oc} , per la qual cosa s'ha fet servir la variació del rendiment en funció de la temperatura de la cèl·lula:

$$\eta = \eta' \cdot [1 - \gamma \cdot (T_c - T'_c)] \quad (11)$$

De totes aquestes expressions, totes expressades en unitats del sistema internacional, se'n pot extreure la conclusió que el rendiment d'una cèl·lula fotovoltaica augmenta a mesura que disminueix la temperatura ambiental i augmenta la irradiància captada.

⁽³⁾. L'apòstrof indica el valor de la variable en condicions estàndard.

⁽⁴⁾. Les constants m i vt són, pel silici, 1 i 0,0257 [V], respectivament.

⁽⁵⁾. α i β són paràmetres de variació d'intensitat i tensió per grau celsius, respectivament, també són dades que dona el fabricant.

⁽⁶⁾. γ és el paràmetre de variació de potència per grau celsius.

5.3. Dimensionament de mòduls fotovoltaics

En aquest apartat es realitzen els càlculs de producció energètica d'un mòdul fotovoltaic amb les especificacions tècniques d'un mòdul existent.

S'ha escollit com a model de mòdul fotovoltaic, un dels models d'Atersa [16], l'A-250P. S'ha elegit l'A-250P perquè és de silici policristal·lí, el qual obté rendiments mitjans (si fos monocristal·lí o de concentració obtindria rendiments més alts, però són més cars i menys habituals), i té una potència màxima de 250 W, el qual és bastant alt en comparació amb altres models. Les propietats d'aquest tipus de mòdul s'observen a la taula 16:

Taula 16. Dades tècniques del mòdul A-250P donades pel fabricant.

Dades fabricant (A-250P)	
P _{màx} [W]	250
I _{sc} [A]	8,91
U _{oc} [V]	37,6
α	0,0004
β	0,0032
γ	0,0043
Acèl·lula [m ²]	0,024336
Amòdul [m ²]	1,71
N _s	36
I _m [A]	8,45
U _m [V]	29,53
η	0,15337423

A partir d'aquestes dades, les expressions de l'apartat anterior i les dades meteorològiques, s'ha pogut calcular la potència que pot donar un mòdul i l'energia que genera al cap d'un any.

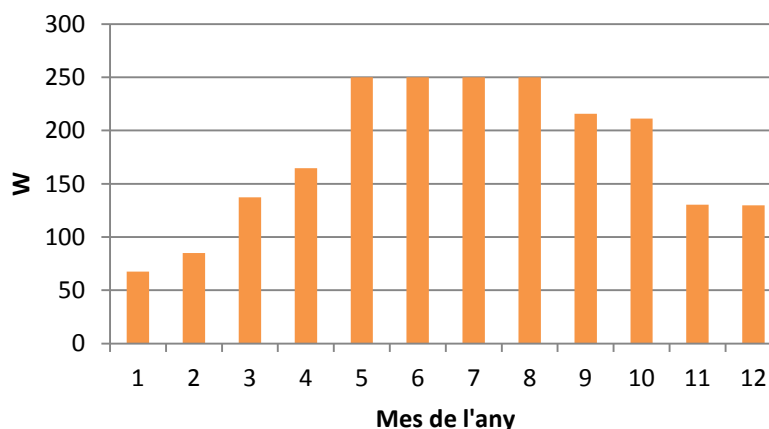


Figura 25. Potència mitjana mensual generada per un mòdul A-250P a Casserres l'any 2014

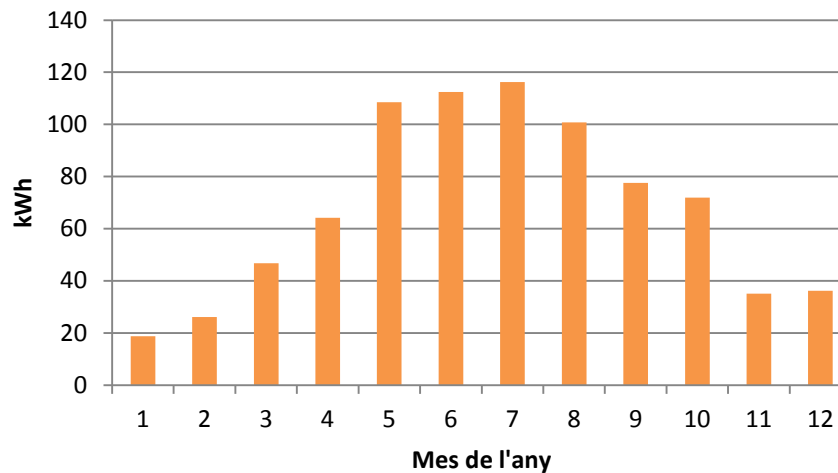


Figura 26. Energia mensual generada per un mòdul A-250P a Casserres l'any 2014.

A partir de les figures 25 i 26, s'observa que els mesos pics de producció són els d'estiu, tot i tenir més rendiment quan fa fred, això pot ser degut a què la influència de la irradiància és major que la de la temperatura.

Així doncs, s'obté un total de 814,89 kWh al llarg d'un any a partir de cada mòdul fotovoltaic de 1,71 m² de superfície. Suposant una vida útil de 25 anys, cada mòdul genera un total de 20,37 MWh durant la seva vida.

5.4. Estudi econòmic

El mètode emprat per fer l'estudi econòmic és el mateix que en el de l'aerogenerador, aquest cop per un sol mòdul. Així doncs, s'han obtingut els costos d'instal·lació i s'han fet els anàlisis d'ingressos i financers en funció de si es produeix amb intencions mercantilistes o bé d'autoabastiment.

5.4.1. Costos

Actualment, el cost dels mòduls fotovoltaics està a 0,5 €/W i el 80% del cost és degut a les cèl·lules de silici, per tant, un A-250P costaria uns 125 euros. Tot i així, se li ha d'afegir el 20% restant, que es deu al vidre i el marc d'alumini, entre altres [17]. Així doncs, cada mòdul té un cost de 155 €. També s'ha de tenir en compte que el cost d'operació i manteniment està sobre l'1,5% del cost total i s'incrementa un 2% cada any.

5.4.2. Ingressos i anàlisi financer

Per aquest subapartat s'ha fet servir el mateix mètode que en l'apartat anterior, és a dir, s'ha estudiat el plantejament empresarial i el d'autoconsum considerant els preus de l'electricitat respectius comentats anteriorment, contemplant la necessitat o no de demanar un crèdit, i s'han obtingut els següents resultats:

- Si es planteja vendre l'energia al mercat, amb la necessitat de demanar un crèdit, és rendible mentre la taxa d'interès no superi el 25%, obtenint beneficis anualment i, sense demanar un crèdit, el període de retorn es dona durant el tercer any i el VAN al final de la vida útil és de 458,77 € amb una taxa interna de rendibilitat del 5%, de fet, la TIR és d'un 28%.
- Si es fa el plantejament d'autoabastiment, els resultats són encara més positius, obtenint beneficis fins i tot amb taxes d'interès molt elevades si s'hagués de demanar un crèdit i, en cas que no, el període de retorn es donaria al primer any i el VAN al final de la vida útil seria de 1 994,66 €, de fet, la TIR seria d'un 71%.

Tot i així, aquests resultats són els d'estudi d'un sol mòdul fotovoltaic, el qual té una dimensió d'uns 1,71 m², per la qual cosa el benefici, encara que gairebé sempre n'hi hagi, és molt petit a causa de la poca producció que té.

5.5. Conclusions

Cal destacar la conclusió a la que s'ha arribat de què el rendiment dels panells fotovoltaics és major com menor és la temperatura ambient, la qual cosa és beneficiosa en aquest cas, ja que l'ambient del terme municipal és més aviat fred.

Tenint en compte els càlculs, es podria dir que la instal·lació de mòduls fotovoltaics és sempre rendible a Casserres. El problema d'aquest mètode de generació rau, però, en el fet que per abastir una població es requeriria una superfície de grans dimensions. Sabent el consum total del poble i la generació de cada mòdul en un any, s'estima que es necessitarien uns 10 500 mòduls A-250P per abastir Casserres, la qual cosa implica una superfície d'uns 18 000 m².

Per tant, l'ús més sensat dels mòduls fotovoltaics sembla ser el de suport, ja sigui en les teulades de les llars o bé de forma centralitzada però en relativament petites dimensions.

6. Optimització del mètode d'abastiment

Posteriorment als estudis preliminars realitzats per comprovar la viabilitat de la instal·lació de generadors eòlics i fotovoltaics a la vila de Casserres, s'ha d'estudiar el com s'instal·len aquests generadors, és a dir, encara que s'hagi trobat el tipus de turbina eòlica òptima per Casserres, no es pot assegurar que a mesura que s'augmenta el nombre d'aerogeneradors, aquest segueixi essent el millor, així com la varietat d'opcions, ja que potser s'hauria de contemplar la possibilitat de fer diverses turbines de diferents tipus. El mateix problema es pot extrapolar als mòduls fotovoltaics que, ja que no poden servir com a únic generador per les raons abans comentades, s'han de poder combinar amb altres fonts, i s'hauria d'estudiar quina és la millor combinació entre aquestes. A més, la combinació òptima de generació es pot interpretar de diverses maneres en funció de les prioritats.

Per tal de fer aquest estudi s'ha recorregut a un programa de simulació anomenat *Homer Energy*[®], el qual serveix exactament per solucionar aquest tipus de problema. Fent servir el *Homer* i, fent servir les dades exposades en els apartats anteriors, s'han contemplat i estudiat diverses opcions segons les seves prioritats.

6.1. Observació de la situació actual

El que es pretén en aquest apartat és simular la situació actual amb el *Homer*, per tal de comparar-la amb futurs resultats.

Actualment Casserres està connectat a la xarxa i, l'ajuntament té contractada la comercialitzadora Endesa i, s'assumeix, doncs, que tothom té contracte amb Endesa. Com s'ha comentat anteriorment, existeix una tarifa per consums domèstics (inferiors a 10 kW), la qual té un preu de 0,124107 €/kWh, i una tarifa per consums més grans (entre 10 kW i 15 kW), la qual té un preu de 0,149733, que és la que té contractada l'ajuntament per les diferents càrregues. Les càrregues inferiors a 10 kW solen ser per consum domèstic, el qual al poble és d'un 43% del total, i les càrregues superiors, per altres consums. Així doncs, s'ha fet la ponderació corresponent per fer servir un preu únic: 0,1387 €/kWh.

Taula 17. Despeses del sistema actual, de forma anual. Extreta del Homer

Componente	Inversión(€)	Reemplazo (€)	O&M (€)	Combustible (€)	Rescate (€)	Total (€)
Grid	0,00 €	0,00 €	1.166.239,00 €	0,00 €	0,00 €	1.166.239,00 €
System	0,00 €	0,00 €	1.166.239,00 €	0,00 €	0,00 €	1.166.239,00 €

En els resultats s'observa que el cost anual regeix en l'operació i manteniment de la xarxa, és a dir, la compra d'energia elèctrica, la qual és de 1 166 239 €/any. Tenint en compte que el projecte té una vida de 20 anys, el cost total serà de 23 324 786 €. Això implica que si es volgués fer una modificació en el mètode d'obtenció d'energia, aquest hauria de tenir un cost inferior a l'esmentat en tota la vida del projecte.

Cal tenir en compte, però, que el preu de l'electricitat varia amb el temps, per tant, s'han contemplat diferents casuístiques.

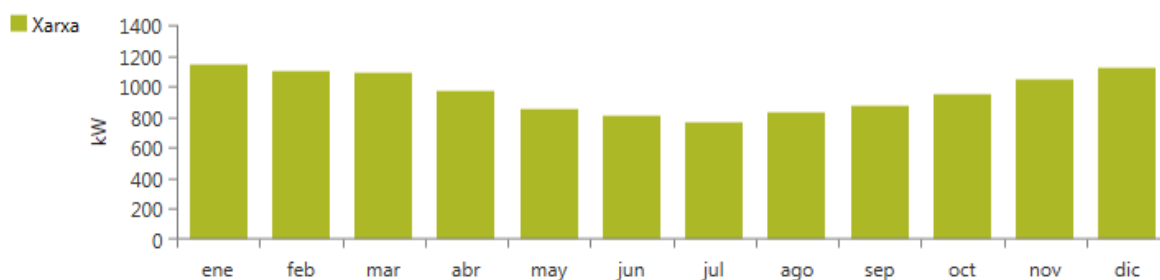


Figura 27. Producció elèctrica mensual mitjana segons la seva procedència. Extreta del Homer

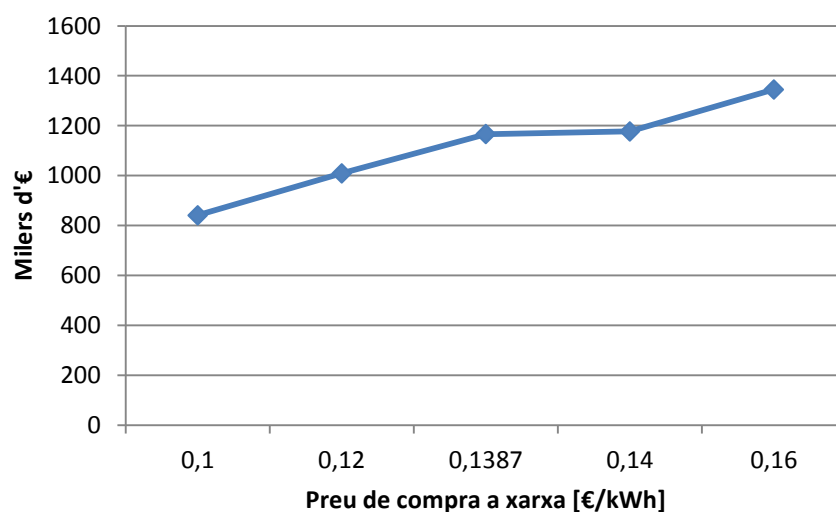


Figura 28. Cost anual de l'abastiment amb xarxa segons el preu de compra.

Pel que fa a les emissions de gasos atribuïbles a la procedència de l'electricitat de la xarxa, s'observa que, majoritàriament, s'emet CO₂, aproximadament 5 314 082 kg/any.

Taula 18. Emissions de gasos atribuïbles a la procedència de l'electricitat de la xarxa. Extreতা del Homer.

Cantidad	Valor	Unidades
Dióxido de carbono	5.314.082,00	kg/yr
Monóxido de carbono	0,00	kg/yr
Hidrocarburos incombustos	0,00	kg/yr
Material particulado	0,00	kg/yr
Dióxido de azufre (SO ₂):	23.039,00	kg/yr
Óxidos de nitrógeno	11.267,00	kg/yr

6.2. Autoabastiment connectat a la xarxa

En aquest apartat s'estudia la possibilitat d'integrar generadors eòlics i/o fotovoltaics a la xarxa. D'aquesta manera, Casserres tindria el seu propi abastiment renovable i per a l'autoconsum i, en cas d'excés/manca d'energia, se'n podria vendre/comprar a la xarxa.

6.2.1. Adhesió de generadors fotovoltaics

Pel que fa a la instal·lació de mòduls fotovoltaics, s'ha observat que és econòmicament rendible i que, per tant, només està limitada per la gran superfície que s'ha d'ocupar per tal de generar quantitats significatives.

Així doncs, s'ha decidit estudiar primer la possibilitat de fer servir la superfície de les teulades, que a Casserres n'hi ha unes 500 (10x10m de mitjana), per tal d'intentar evitar l'ocupació d'una extensió molt gran.

Es decideix instal·lar uns 6 mòduls per teulada, és a dir, 1,5 kW/teulada, la qual cosa implica un total de 750 kW, valor màxim en el rang que es proposa al programa per a fer la simulació.

A més, s'ha de tenir en compte que la generació fotovoltaica sol ser en corrent continu i, per contra, la càrrega sol ser en corrent altern. Per tant, s'ha hagut d'afegir un convertidor al sistema que s'adeqüi a la potència dels mòduls. La simulació es pot simplificar amb l'esquema de la figura 29.

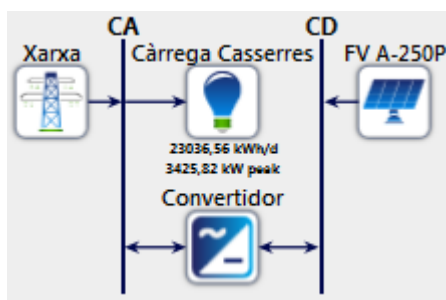


Figura 29. Esquema conceptual del sistema proposat. Extreta del Homer.

Segons el Homer, sempre que la irradiància mitjana superi els 2,5 kW/m²/dia i el preu de la xarxa no sigui molt baix, és recomanable instal·lar els mòduls. Aquesta conclusió s'extreu de la figura 30, el qual mostra, per cada situació i segons les restriccions imposades, el sistema òptim.

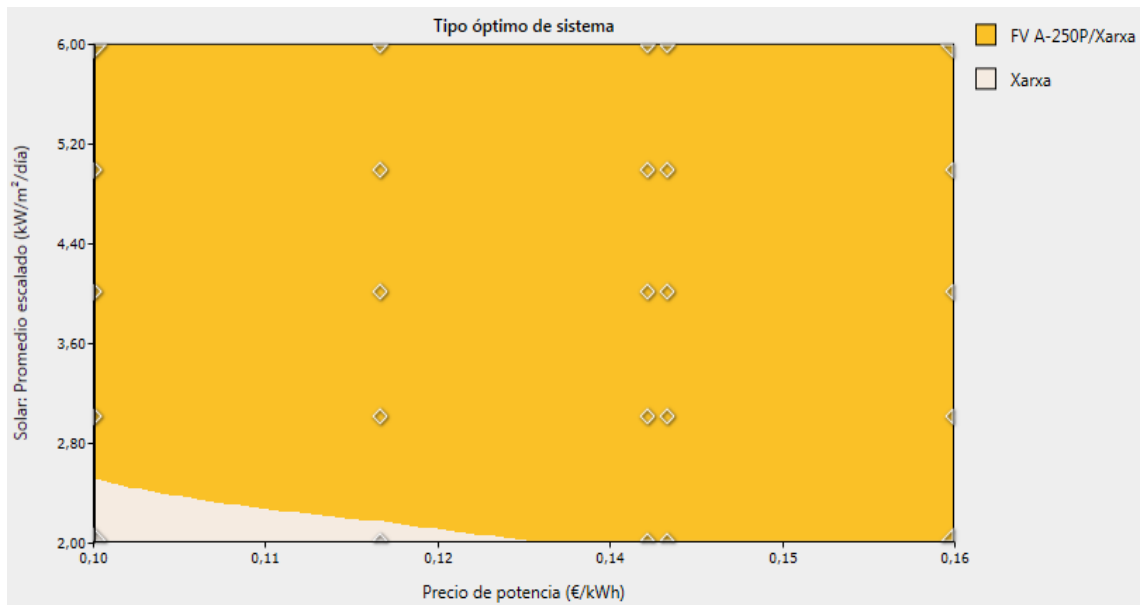


Figura 30. Sistema recomanat pel Homer en funció de les condicions de contorn. Extreta del Homer

A Casserres, la irradiància mitjana anual és d'uns 4,01 kW/m²/dia, per tant, es comprova que és recomanable posar els mòduls.

Si s'analitzen els resultats obtinguts s'observa que es pot assolir fins a un 10,8 % de generació 100 % renovable (producció dels generadors instal·lats, ja que part de l'energia de la xarxa prové de fonts no renovables), produint 1 008 989 kWh/any, dels quals només 246 són venuts a la xarxa, i reduint l'emissió d'uns 573 862 kg CO₂/any.

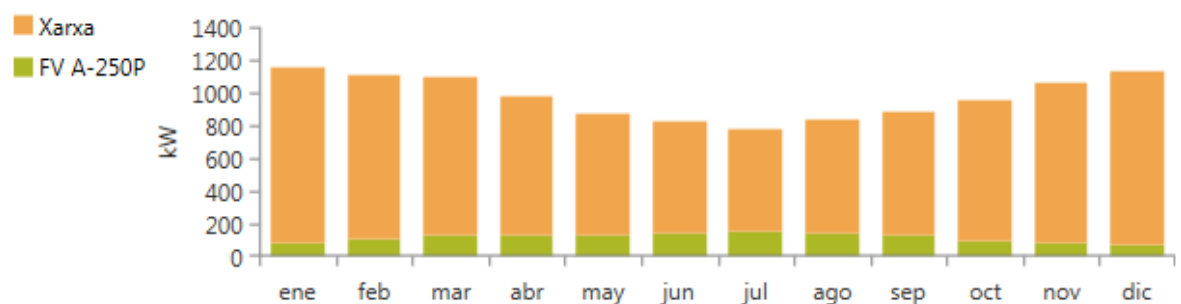


Figura 31. Producció elèctrica mensual mitjana segons la seva procedència. Extreta del Homer.

Per tal de fer un anàlisi econòmic s'ha observat el resum de despeses al llarg dels 20 anys, exposats a la taula 19. Es veu que la inversió inicial seria d'uns 630 000 €, tot i així, el cost total acaba sent de 21 556 400 € a causa de la compra a la xarxa.

Taula 19. Resum de despeses del sistema proposat al llarg dels 20 anys de projecte. Extretra del Homer

Componente	Inversió(€)	Reemplazo (€)	O&M (€)	Combustible (€)	Rescate (€)	Total (€)
Mòduls FV	450.000,00 €	0,00 €	150.000,00 €	0,00 €	-90.000,00 €	510.000,00 €
Grid	0,00 €	0,00 €	20.806.398,00 €	0,00 €	0,00 €	20.806.398,00 €
Converter	180.000,00 €	180.000,00 €	0,00 €	0,00 €	-120.000,00 €	240.000,00 €
System	630.000,00 €	180.000,00 €	20.956.398,00 €	0,00 €	-210.000,00 €	21.556.400,00 €

L'impacte de la instal·lació de mòduls fotovoltaics a les teulades és força positiu, tot i així, es considera insuficient. Per tal d'incrementar-lo, es contempla la idea de posar generadors també fora de les teulades, ocupant una superfície encara per fer servir, la qual es limita a uns 2 000 m² per qüestions ambientals, que equivalen a uns 300 kW de potència instal·lada.

Tot i així, les diferències no són gaire notables, tot i continuar sent positives. La fracció de producció 100 % renovable s'incrementa fins a un 15,1 %, amb 1 412 585 kWh/any provinents dels mòduls. La inversió inicial augmenta fins a 870 000 €, però això fa disminuir el cost total del projecte a 20 anys a 20 843 924 €, a causa de la reducció de compra a la xarxa.

6.2.2. Adhesió de generadors eòlics

Per a l'estudi de l'adhesió de generadors eòlics, s'ha simulat la implantació de turbines d'1,2 MW amb les mateixes propietats trobades a l'apartat de la viabilitat de l'aprofitament del recurs eòlic.

Segons el *Homer*, sempre que la velocitat mitjana del vent sigui superior a 2 m/s i el preu de la compra a xarxa no sigui molt baix, és recomanable instal·lar aquest aerogenerador que, com que la seva velocitat de cut-in és de 3 m/s i la velocitat mitjana a Casserres és superior a 4 m/s, sempre serà recomanable posar-ne.

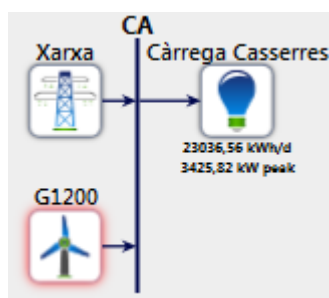


Figura 32. Esquema conceptual del sistema proposat. Aerogenerador doblement alimentat d'1,2 MW. Extretra del Homer

Així doncs, s'ha simulat amb un rang de nombre de generadors comprès entre 0 i 5.

Si s'analitzen els resultats obtinguts amb la instal·lació de 5 aerogeneradors s'observa que es pot assolir fins a un 93,1 % de generació 100 % renovable, produint 22 210 218 kWh/any, dels quals 15 455 392 són venuts, amb la compra requerida d'uns 1 653 527 kWh/any. Es veu, doncs, que aquest sistema és capaç de produir en excés i vendre una bona part de la generació a la xarxa.

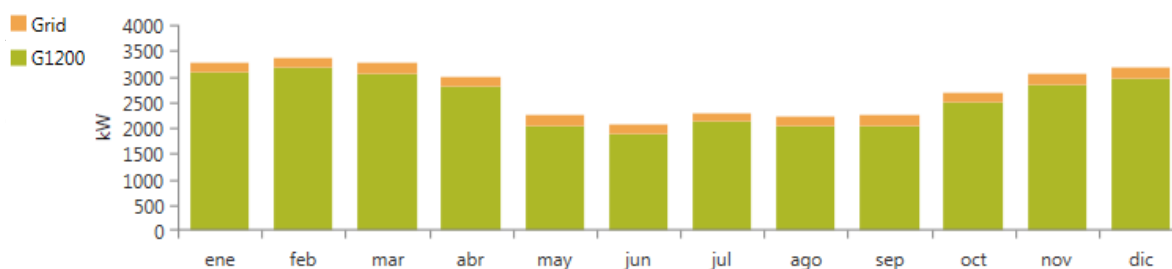


Figura 33. Producció elèctrica mensual mitjana segons la seva procedència. Extreta del Homer

De totes maneres, aquest model representaria una inversió inicial de 11 403 575 € que, tot i que el cost total al final es redueixi a 1 901 768 € a causa de la venda a la xarxa, no és una inversió real que es pugui contemplar pels habitants d'un poble.

A més, aquest no seria el model d'autoconsum que s'intenta buscar, ja que només el 35,23% de l'energia produïda és consumida pel poble, de manera que no s'adapta gens a les seves necessitats.

Taula 20. Ús de l'energia produïda. Extreta del Homer

Consumo	kWh/año	%
Carga primaria de CA	8.408.349	35,23
Carga primaria de CD	0	0,00
Ventas a la red	15.455.392	64,77
Total	23.863.740	100,00

Així doncs, s'ha estudiat l'impacte que tindria cadascun dels valors del rang de nombre d'aerogeneradors per tal d'adaptar millor el sistema proposat a les necessitats i capacitats del poble.

Taula 21. Comparativa dels resultats amb N aerogeneradors instal·lats.

Cost total [€]	Inversió inicial [€]	Fracció renovable [%]	Aerogeneradors	Inversió/llar [€]
1.901.768,00	11.403.575,00	93,1	5	13.906,80
4.343.409,00	9.122.860,00	90	4	11.125,44
7.014.965,00	6.842.145,00	84,7	3	8.344,08
10.123.190,00	4.561.430,00	74,2	2	5.562,72
14.742.630,00	2.280.715,00	48,9	1	2.781,36

Un cop fetes les simulacions, s'observa que amb 3 aerogeneradors o menys la inversió inicial és inferior al cost total del projecte, ja que el balanç de compra/venda d'energia a la xarxa ja no resulta beneficiós econòmicament. Tot i així, encara que el cost total del sistema sigui superior, sempre serà millor que la situació actual.

Encara que només s'instal·li un aerogenerador, aquest ja és suficient per tal que un 48,9 % de la producció sigui 100 % renovable. A més, el poble consumiria un 92,63 % de l'energia total produïda i la resta la injectaria a la xarxa, per la qual cosa el sistema s'adaptaria més a les necessitats del poble.

La inversió inicial per un sol aerogenerador ja es considera prou elevada com per contemplar instal·lar-ne un altre, així doncs, es considera que amb un és suficient. De totes maneres, aquesta valoració quedaria a disposició dels habitants de Casserres.

6.2.3. Sistema combinat

En aquest apartat es volen combinar les generacions eòlica i fotovoltaica per tal d'acabar proposant un sistema òptim. S'ha observat que tant l'adhesió de generació fotovoltaica com l'eòlica són rendibles econòmicament. A partir d'aquesta premissa, es poden estudiar molts casos diferents, tot i així, s'ha decidit marcar restriccions i exigir mínims al programa per tal d'acotar les possibilitats:

- La fracció de producció 100 % renovable, és a dir, la produïda únicament pels generadors a partir de fonts renovables instal·lats al municipi, ha de ser, almenys, d'un 25 %.
- Se suposa que la inversió la fan els habitants del poble, ja sigui en forma d'impostos a l'ajuntament o directament. Per tal de tenir-ho en compte, s'estudiarà el cost per càpita que la inversió inicial signifiqui i s'acotarà a valors realistes.
- Es restringeix la superfície ocupada pels mòduls fotovoltaics a l'espai aprofitable de les teulades, de tal manera que la potència màxima instal·lada en fotovoltaica serà de 750 kW.
- La fracció de producció consumida també es tindrà en compte, ja que la intenció és que el sistema s'adapti al màxim a les necessitats del poble i no vendre excés a la xarxa per tal de finançar-lo. La xarxa s'ha de fer servir com a recurs de suport.

Tenint en compte aquestes restriccions, la funció de la generació fotovoltaica queda relegada a la funció de suport, ja que per ella sola no pot complir els requisits. S'han simulat 4 casuístiques diferents, un o dos aerogeneradors combinats amb fotovoltaica només en teulada o en teulada i 2 000 m² de superfície.

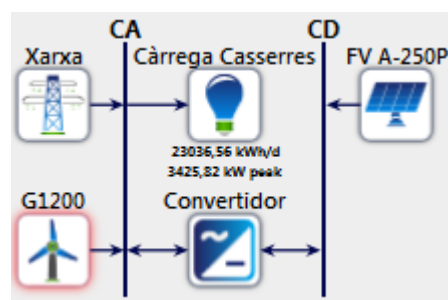


Figura 34. Esquema conceptual del sistema proposat. Aerogenerador doblement alimentat d'1,2 MW i mòduls A-250P. Extreta del Homer.

Turbines	Mòduls [kW]	Fracció renovable [%]	Inversió [€]	Inversió/llar [€]	Cost total [€]	Producció consumida [%]
2	750	76,7	5.131.430,00 €	6.257,84 €	9.935.137,00 €	69,89
1	750	55,2	2.910.715,00 €	3.549,65 €	13.959.480,00 €	91,1
2	1050	78,3	5.371.430,00 €	6.550,52 €	9.601.143,00 €	68,6
1	1050	57,8	3.090.715,00 €	3.769,16 €	13.504.621,00 €	89,89

A la taula de resultats es nota que hi ha certes correlacions:

- Com més gran és la fracció de renovables més gran és la inversió inicial, però més venda a la xarxa es produeix i, per tant, el cost total del projecte acaba sent més baix.
- Com més gran és la fracció renovable menys percentatge del que es produeix es consumeix directament al poble, això és degut a la inestabilitat dels recursos renovables. Aquesta dada és important, ja sigui pels mateixos principis de la idea de l'autoconsum com pel tema de normativa, el qual es comenta a l'apartat 6.2.5. Sigui com sigui, interessa que aquest percentatge sigui el més elevat possible.
- El que realment marca la diferència és el nombre d'aerogeneradors.

Tenint en compte tot això, es considera que l'opció d'un sol aerogenerador combinat amb 750 kW en mòduls fotovoltaics a les teulades és la millor.

Amb el *Homer* no es pot simular per a cada teulada un panell amb el seu convertidor, per tant, s'ha simulat de forma agregada. El convertidor usat és un convertidor estàndard proposat pel programa i amb uns 600 kW de potència. Així doncs, es procedeix a un estudi més profund d'aquest model.

Pel que fa a l'anàlisi de producció, s'observa que dels 9 330 353 kWh/any produïts, el 44,84% provenen de l'aerogenerador, el 10,81% dels mòduls fotovoltaics i la resta, de la xarxa, amb un 55,2% del total de procedència totalment renovable. Tot i així, un 8,9% d'aquest total és venut a la xarxa i no consumit pel poble.

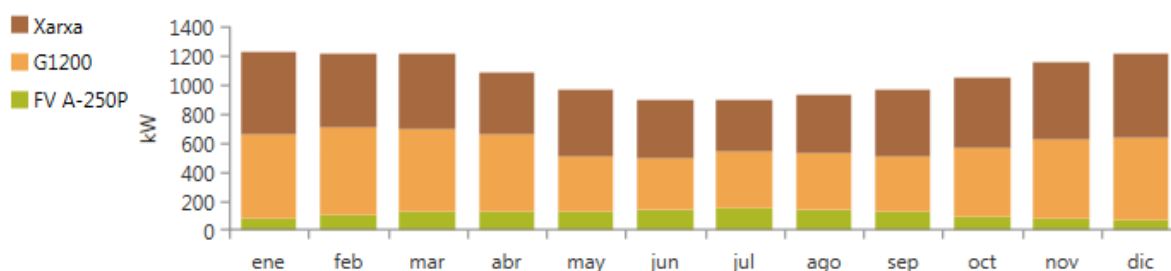


Figura 35. Producció elèctrica mensual mitjana segons la seva procedència. Extreta del Homer.

Pel que fa a les emissions de gasos atribuïdes a la procedència de l'energia de la xarxa, s'observa que s'emetria, cada any, uns 2 095 764 kg CO₂, per la qual cosa hi ha una reducció de 3 218 318 kg CO₂/any respecte la situació actual.

Taula 22. Emissions de gasos atribuïbles a la procedència de l'energia de la xarxa. Extretra del Homer.

Cantidad	Valor	Unidades
Dióxido de carbono	2.095.764,00	kg/yr
Monóxido de carbono	0,00	kg/yr
Hidrocarburos incombustos	0,00	kg/yr
Material particulado	0,00	kg/yr
Dióxido de azufre (SO ₂):	9.086,10	kg/yr
Óxidos de nitrógeno	4.443,50	kg/yr

Pel que fa a les despeses del sistema, s'observa que la inversió inicial és de 2 910 715 €, la qual cosa implica una inversió inicial per cada llar d'uns 3 550 €. Al cap dels 20 anys de vida del projecte el cost total puja a 13 959 480 €, on s'hi inclou la inversió, el pagament de l'energia procedent de la xarxa, així com el manteniment i la substitució d'equips, es recupera cert capital amb el rescat dels components que encara els hi queda vida útil per expirar.

Si es compara aquest cost total amb el de la situació actual, es calcula que hi ha un estalvi en la reducció de compra d'energia a la xarxa d'uns 9 365 280 €, el qual suposa un estalvi per llar d'uns 11 421 €, tot això durant els 20 anys de vida útil del projecte.

Taula 23. Resum de despeses del sistema proposat durant 20 anys. Extretra del Homer.

Componente	Inversión(€)	Reemplazo (€)	O&M (€)	Combustible (€)	Rescate (€)	Total (€)
Mòduls FV	450.000,00 €	0,00 €	150.000,00 €	0,00 €	-90.000,00 €	510.000,00 €
Generic 1.2 MW	2.280.715,00 €	0,00 €	273.340,00 €	0,00 €	0,00 €	2.554.055,00 €
Grid	0,00 €	0,00 €	10.655.432,00 €	0,00 €	0,00 €	10.655.432,00 €
Converter	180.000,00 €	180.000,00 €	0,00 €	0,00 €	-120.000,00 €	240.000,00 €
System	2.910.715,00 €	180.000,00 €	11.078.768,00 €	0,00 €	-210.000,00 €	13.959.480,00 €

6.2.4. Estudi econòmic

Tot i haver pogut treure les primeres conclusions només amb el resum de despeses a 20 anys, s'ha volgut fer un estudi econòmic més profund. Per tant, s'ha calculat el VAN i la TIR del projecte. Les suposicions que s'han fet són:

- Als pagaments s'hi inclou l'operació i manteniment, la substitució de components i el rescat dels mateixos, tot això distribuït de forma anual, excloent-hi el pagament anual de compra a la xarxa, ja que això és quelcom implícit, es té per benefici l'estalvi fet per deixar de comprar certa quantitat.
- S'ha suposat demanda constant i homogènia al llarg dels 20 períodes.
- S'ha suposat que el preu de compra de la xarxa és constant i igual a 0,1387 €/kWh.
- En els cobraments no s'ha inclòs la venda d'energia a la xarxa.
- S'ha suposat que no és necessari cap crèdit, degut a la relativament baixa inversió per llar que es requereix.

Un cop fets els càlculs, s'ha obtingut un VAN de 5 610 269 € amb una taxa d'interès del 3% i el període de retorn es situa entre el 5è i 6è períodes. La TIR és igual al 19%, això vol dir que el projecte és rendible sempre que la taxa d'interès no superi aquest valor.

De totes maneres, s'han volgut tenir en compte els aspectes legals abans d'extreure conclusions.

Taula 24. Càlcul del VAN del sistema proposat amb una taxa d'interès del 3%.

Estudi econòmic solució							
Inversió [€]	Pagaments [€]	Estalvi [€]	Flux tres. [€]	Flux tres. Acum. [€]	Flux tres. Act. [€]	VAN [€]	Per.
2 910 715,00			-2 910 715,00	-2 910 715,00	-2 910 715,00	-2 910 715,00	0
0	19 667,00	592 411,00	572 744,00	-2 337 971,00	556 062,14	-2 354 652,86	1
0	19 667,00	592 411,00	572 744,00	-1 765 227,00	539 866,15	-1 814 786,71	2
0	19 667,00	592 411,00	572 744,00	-1 192 483,00	524 141,89	-1 290 644,82	3
0	19 667,00	592 411,00	572 744,00	-619 739,00	508 875,63	-781 769,19	4
0	19 667,00	592 411,00	572 744,00	-46 995,00	494 054,01	-287 715,19	5
0	19 667,00	592 411,00	572 744,00	525 749,00	479 664,08	19 948,90	6
0	19 667,00	592 411,00	572 744,00	1 098 493,00	465 693,28	657 642,18	7
0	19 667,00	592 411,00	572 744,00	1 671 237,00	452 129,40	1 109 771,58	8
0	19 667,00	592 411,00	572 744,00	2 243 981,00	438 960,58	1 548 732,17	9
0	19 667,00	592 411,00	572 744,00	2 816 725,00	426 175,33	1 974 907,49	10
0	19 667,00	592 411,00	572 744,00	3 389 469,00	413 762,45	2 388 669,95	11
0	19 667,00	592 411,00	572 744,00	3 962 213,00	401 711,12	2 790 381,06	12
0	19 667,00	592 411,00	572 744,00	4 534 957,00	390 010,79	3 180 391,86	13
0	19 667,00	592 411,00	572 744,00	5 107 701,00	378 651,26	3 559 043,11	14
0	19 667,00	592 411,00	572 744,00	5 680 445,00	367 622,58	3 926 665,69	15
0	19 667,00	592 411,00	572 744,00	6 253 189,00	356 915,13	4 283 580,82	16
0	19 667,00	592 411,00	572 744,00	6 825 933,00	346 519,54	4 630 100,36	17
0	19 667,00	592 411,00	572 744,00	7 398 677,00	336 426,74	4 966 527,10	18
0	19 667,00	592 411,00	572 744,00	7 971 421,00	326 627,90	5 293 155,00	19
0	19 667,00	592 411,00	572 744,00	8 544 165,00	317 114,47	5 610 269,46	20

6.2.5. Normativa: el Reial Decret d'Autoconsum

A l'octubre del 2015 es va aprovar el Reial Decret d'Autoconsum [18], l'objectiu del qual és regular administrativament i econòmicament l'autoconsum energètic integrat a la xarxa.

En aquest apartat s'intenta interpretar el decret i adaptar-lo al sistema proposat per tal d'aplicar els impostos necessaris a l'estudi econòmic fet anteriorment.

D'acord amb l'article 19, el no registre d'una instal·lació d'autoconsum està catalogat com a infracció molt greu que, segons l'article 67 de la Llei 24/2013 del Sector Elèctric [19], pot significar sancions entre 6 000 000 € i 60 000 000 €, tot i que també s'indica que la sanció serà proporcionada a les capacitats de l'infractor.

Es plantegen dues modalitats d'autoconsum [18] [20], de les quals se'n descriuen alguns punts:

- Modalitat 1
 - a) Consumidor únic en un únic punt de subministrament amb una o diverses instal·lacions de generació connectades a la seva xarxa interior.
 - b) Només existeix el subjecte consumidor.
 - c) Per tant, i degut a què només hi ha subjecte consumidor, la instal·lació generadora no serà donada d'alta com a instal·lació de producció elèctrica.
 - d) Només s'admeten consumidors que tinguin contractada una potència inferior a 100 kW.
 - e) La potència màxima instal·lada no podrà superar mai la que està contractada.
 - f) Mateix titular del punt de subministrament que de totes les instal·lacions de generació.
 - g) La companyia elèctrica contractada n'haurà d'estar al corrent per fer els tràmits.
 - h) Els excedents injectats a la xarxa tindran remuneració nul·la.

Respecte aquesta modalitat cal destacar l'apartat c), el qual exclou el sistema proposat degut a què es requereix una potència instal·lada molt més alta, l'apartat e), que exclou la creació d'autoconsum en comunitats de veïns, i l'apartat g), el qual anul·la el cobrament per

injecció a la xarxa.

- Modalitat 2
 - a) Consumidor únic en un únic punt de subministrament amb una o varies instal·lacions de producció connectades a la seva xarxa interna o que comparteixin infraestructura de connexió amb el consumidor a través d'una línia directa.
 - b) Existeix subjecte consumidor i productor.
 - c) Per tant, la instal·lació generadora sí que estarà donada d'alta com a instal·lació productora.
 - d) No existeix límit de potència contractada pel consumidor associat.
 - e) La potència instal·lada no superarà mai la potència contractada.
 - f) Tant consumidor com productor han de ser un únic titular, tot i que no s'obliga a que siguin el mateix, com a la modalitat 1.
 - g) Es poden vendre els excedents al mercat al preu que cotitzi el mercat a cada hora.

D'aquesta modalitat cal destacar que segons l'apartat d) no hi ha limitació de potència instal·lada, sempre que no es superi la potència contractada, la qual cosa restringeix menys que la segona modalitat, i l'apartat g), el qual permet la venda d'excedent, tot i així, segueix excloent l'autoconsum per comunitats.

En ambdues modalitats és obligatòria la instal·lació d'aparells de mesura d'importació i exportació a la xarxa.

D'entrada sembla que el sistema proposat no s'adequa a cap de les dues modalitats i, per tant, està prohibida, sota la sanció econòmica exposada anteriorment i el tall de subministrament.

Tot i així, en ambdues modalitats es comenta que els subjectes consumidor i productor estan especificats a l'article 6 de la Llei 24/2013 de Sector Elèctric.

Resulta que també es pot interpretar com a consumidor a una societat mercantil o societat de consumidors, és a dir, que els veïns podrien crear una societat per tal de firmar com a un sol titular. De manera que podria ser possible encabir el sistema proposat en una de les dues modalitats, més en concret, a la segona, per la no limitació de potència.

El que sí que afecta a les dues modalitats d'autoconsum, excepte per càrregues inferiors als 10 kW, és el peatge d'accés, un impost que s'ha de pagar per tal de fer servir la xarxa com a suport en moments en què no hi hagi generació d'autoconsum a causa de l'entorn. Aquest peatge es divideix en dues parts, igual que el consum ordinari: un terme variable sobre l'autoconsum horari i un terme fix de potència instal·lada.

Taula 25. Pegauges d'accés per potència contractada, terme fix. [18]

NT	Peaje de acceso	Cargo fijo (€/kW)					
		Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
BT	2.0 A (Pc ≤ 10 kW)	8,989169					
	2.0 DHA (Pc ≤ 10 kW)	8,989169					
	2.0 DHS (Pc ≤ 10 kW)	8,989169					
	2.1 A (10 < Pc ≤ 15 kW)	15,390453					
	2.1 DHA (10 < Pc ≤ 15 kW)	15,390453					
	2.1 DHS (10 < Pc ≤ 15 kW)	15,390453					
	3.0 A (Pc > 15 kW)	32,174358	6,403250	14,266872			
AT	3.1 A (1 kV a 36 kV)	36,608828	7,559262	5,081433	0,000000	0,000000	0,000000
	6.1A (1 kV a 30 kV)	22,648982	8,176720	9,919358	11,994595	14,279706	4,929022
	6.1B (30 kV a 36 kV)	16,747077	5,223211	7,757881	9,833118	12,118229	3,942819
	6.2 (36 kV a 72,5 kV)	9,451587	1,683097	4,477931	6,402663	8,074908	2,477812
	6.3 (72,5 kV a 145 kV)	9,551883	2,731715	3,994851	5,520499	6,894902	1,946805
	6.4 (Mayor o igual a 145 kV)	3,123313	0,000000	1,811664	3,511473	4,991205	1,007911

Taula 26. Pegauges d'accés per energia consumida, terme variable (any 2016). [18]

Peaje de acceso	Cargo transitorio por energía autoconsumida (€/kWh)					
	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
2.0 A (Pc ≤ 10 kW)	0,049033					
2.0 DHA (Pc ≤ 10 kW)	0,063141	0,008907				
2.0 DHS (Pc ≤ 10 kW)	0,063913	0,009405	0,008767			
2.1 A (10 < Pc ≤ 15 kW)	0,060728					
2.1 DHA (10 < Pc ≤ 15 kW)	0,074079	0,018282				
2.1 DHS (10 < Pc ≤ 15 kW)	0,074851	0,021301	0,014025			
3.0 A (Pc > 15 kW)	0,029399	0,019334	0,011155			
3.1A (1 kV a 36 kV)	0,022656	0,015100	0,014197			
6.1A (1 kV a 30 kV)	0,018849	0,016196	0,011534	0,012518	0,013267	0,008879
6.1B (30 kV a 36 kV)	0,018849	0,013890	0,010981	0,011905	0,012871	0,008627
6.2 (36 kV a 72,5 kV)	0,020138	0,016194	0,011691	0,011696	0,011996	0,008395
6.3 (72,5 kV a 145 kV)	0,022498	0,017414	0,012319	0,011824	0,011953	0,008426
6.4 (Mayor o igual a 145 kV)	0,018849	0,013138	0,010981	0,011104	0,011537	0,008252

S'interpreta el cas estudiat com a una sola càrrega major a 15 kW, ja que només es permet un sol punt de subministrament. Notis que el càrrec sobre l'autoconsum horari és inferior per càrregues majors a 15 kW, però que el càrrec fix és superior. També s'interpreta que els períodes són anys (no està especificat), tot i que només s'han anunciat els impostos en els casos d'aplicació a l'any 2015 i l'any 2016. S'entén que a partir del període 4 no hi ha impost aplicable.

Així doncs, s'ha aplicat aquest peatge en l'estudi econòmic anterior, de manera que per

cada kW instal·lat, 1 950 kW en total, es pagarà l'impost fix corresponent en cada període i per cada kWh consumit provinent de la xarxa, 3 215 170 kWh anuals, es pagarà l'impost variable.

Taula 27. Peatge d'accés en el sistema proposat, temes fix i variable, segons període.

	Fix [€/kW]	Variable [€/kWh]
Per. 1	32,174358	0,029399
Per. 2	6,40325	0,019334
Per. 3	14,266872	0,011155

Fet el càlcul, es veu que l'impost no té un impacte significatiu. El VAN s'ha reduït fins a 5 328 942 € i la TIR al 18%, el període de retorn només s'endarrereix un període. Per tant, es nota que l'impost significa una penalització, però el projecte segueix sent rendible econòmicament.

De totes maneres, s'ha observat que l'impost variable és molt més gran per càrregues petites (més en concret, d'entre 10 i 15 kW, ja que les inferiors a aquestes queden exemptes de l'impost) i s'ha decidit fer el càlcul de rendibilitat per un cas de 42 mòduls fotovoltaics, que sumen 10,5 kW instal·lats, de forma anàloga a l'apartat 5.4. El VAN és de -1 942 092 € per una taxa del 3% i la TIR de -16%, és a dir, el projecte seria inviable.

6.3. Autoabastiment de forma aïllada a la xarxa

Com que el supòsit anterior de la legalitat de la proposta mitjançant una societat mercantil o societat de consumidors podria suposar un problema per tirar endavant la proposta, és a dir, podria ser que el projecte fos il·legal, s'ha contemplat la casuística d'aïllar el poble de la xarxa per tal de no tenir problemes amb l'administració i, per tant, d'autoconsumir de forma totalment independent.

El primer que s'ha de tenir en compte és que pels recursos naturals que es troben a Casserres és molt difícil poder prescindir de la xarxa i que la generació sigui del tot renovable mantenint els nivells de consum actuals, es necessitaria una inversió molt gran. Per tant, cal dir que s'haurà de fer servir un substitut de la xarxa, que serveixi com a suport. Aquest substitut serà la generació mitjançant la combustió de dièsel, la qual s'accionarà en moments en què la demanda sigui més alta que la oferta a través de generació renovable.

El generador de dièsel ha de ser capaç de subministrar la potència pic per ell sol. Aquesta potència pic és una mica inferior a 3500 kW, així doncs, s'instal·len dos generadors, un de 2000 kW i l'altre, de 1500 kW.

Tot i així, crear una xarxa pròpia comporta certes complicacions, s'afegeixen tres paràmetres que s'han de tenir en compte, es tracten de l'excés d'electricitat, la càrrega elèctrica insatisfeta i la falta de capacitat [21].

Taula 28. Paràmetres a tenir en compte en les simulacions. Extretra del Homer.

Cantidad	kWh/año	%
Exceso de electricidad	3.767.157,0	30,5
Carga eléctrica insatisfecha	0,0	0,0
Falta de capacidad	99,0	0,0

Si apareix càrrega elèctrica insatisfeta vol dir que els generadors no poden abastir el poble en tot moment, és a dir, la potència nominal del sistema és inferior a la càrrega de pic del poble, s'intentarà que aquest valor sigui sempre nul. La falta de capacitat es pot regular mitjançant bateries, s'ha d'intentar mantenir a zero aquest valor.

L'energia, un cop produïda i amb les bateries plenes, no es pot emmagatzemar, s'ha de llençar a la xarxa i s'ha de consumir. Per tant, l'excés de producció és un problema força important. La generació renovable és irregular i, per tant, difícil de fer encaixar amb la demanda, l'excés de producció és normal. De totes maneres, hi ha mecanismes de control que permeten aturar la producció de les turbines eòliques, així com la dels mòduls fotovoltaics. Pels aerogeneradors només cal regular el paràmetre Cp mitjançant l'angle de

pitch [6] per tal que la potència produïda sigui nul·la i, en el cas dels mòduls només cal regular la tensió que, si es fa molt gran, la potència de funcionament tendeix a zero a causa de la disminució de la intensitat [22]. Aquests mecanismes no són considerats pel *Homer* i detecta i comptabilitza aquest excés, tot i així, s'ha de procurar que el seu valor sigui el més baix possible, la qual cosa s'aconsegueix mitjançant bateries, que poden emmagatzemar energia quan la oferta és superior a la demanda.

Les bateries recomanades per les microxarxes són les bateries de flux [23], que n'hi ha de dos tipus: de Vanadi i de Zinc-Brom. Les bateries escollides per fer servir en aquest cas són les de Vanadi, les quals disposen d'una vida útil més llarga, que provoca un estalvi en substitució a causa de l'elevat preu de les bateries, i també tenen una resposta molt ràpida, la qual cosa va bé per satisfer pics de demanda sobtats. El principal desavantatge és, però, que té poca densitat d'energia per volum, és a dir, ocupen més espai que les bateries convencionals.

L'últim pas és conèixer el preu del dièsel, el qual és molt fluctuant, ja que a l'estiu del 2014 era d'uns 111 \$/barril (0,64 €/l, sabent que un barril són 159,11 litres) i a l'estiu del 2015 era d'uns 47 \$/barril (0,27 €/l) [24]. A part de ser un valor molt fluctuant i inestable, és un valor que no es pot controlar per la dependència a polítiques exteriors a la que es veu exposat, sobretot en aquest últim any, el qual ha caigut significativament. S'ha decidit prendre el valor de l'estiu del 2014, anterior a l'última caiguda, que és poc representativa del preu habitual, i afegir-li un coeficient de seguretat d'1,7, aproximadament, per tal de tenir en compte aquesta inestabilitat d'aquest valor, ja que el projecte proposat és molt sensible a aquesta dada i se'n contempla un cicle de vida de 20 anys. Per tant, es pren 1,1 €/l com a preu del combustible.

Per fer les simulacions s'han marcat certes premisses abans:

- Es manté la potència màxima en fotovoltaica a 750 kW, ja que a causa de l'espai necessari per les bateries i els generadors de combustió no es vol ocupar més superfície que l'aprofitable de les teulades.
- Es segueix mantenint el mínim del 25% de fracció 100% renovable en la producció.

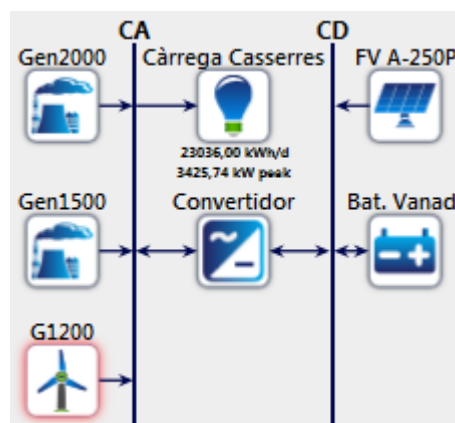


Figura 36. Esquema conceptual del sistema proposat. Extreta del *Homer*.

També cal dir que els paràmetres que es prioritzen són la inversió que ha de fer cada llar, la fracció renovable de la producció i, en aquest cas, també es té en compte l'excés d'energia que, si és molt elevat voldrà dir que s'haurà pagat certa quantitat per un equip capaç de generar més del que després es consumeix.

Els resultats permeten arribar a certes conclusions:

- En tots els casos, sempre és recomanable la instal·lació del màxim de potència en fotovoltaica, en aquest cas és de 750 kW.
- La potència de les bateries és de 600 kW per 3 aerogeneradors o més i de 900 kW per 2 o menys. Així com la potència del convertidor, que és de 900 kW i 1200 kW, respectivament. Això és degut a la major dependència de les bateries amb menor generació renovable, ja que s'intenta minimitzar l'ús del combustible.
- S'observen certes tendències.
 - L'excés d'energia generada augmenta significativament per cada aerogenerador instal·lat, de manera que la instal·lació de 3 aerogeneradors o més significa un excés d'energia de més del 50% del que es consumeix.
 - Com més capacitat tenen les bateries es redueix, encara que poc significativament, l'excés d'energia, a més, augmenta lleugerament la fracció de generació renovable. Tot i així, aquestes tenen un elevat cost.
 - La fracció renovable de la generació està vinculada al cost total a 20 anys, ja que la despesa principal és l'obtenció del dièsel. Com més s'inverteix inicialment menys acaba costant el projecte.
 - El *Homer* no permet una solució en què no hi hagi cap aerogenerador, ja que el mínim imposat de generació renovable és del 25% i, només amb fotovoltaica no es pot assolir aquest mínim.

- En cap cas el projecte és rendible. El cost de mantenir-se en la situació actual és d'uns 23 324 786 € al llarg de 20 anys, tot i així, a causa de les grans inversions requerides, el cost de manteniment d'un equip com el necessari i l'obtenció periòdica del dièsel, fan que cap de les opcions estudiades situï el cost total per sota dels 29 000 000 €.

Taula 29. Resultats en funció del nombre d'aerogeneradors i la capacitat de les bateries.

Turbines	Bateries [kWh]	Excés d'energia [kWh]	Inversió [€]	Cost total [€]	Frac. Ren. [%]	Inv./llar [€]
5	1000	14839299,00	17.073.576,00	32.869.430,00	82,1	20.821,43
5	2000	14.584.958,00	17.273.576,00	31.547.710,00	84,2	21.065,34
5	3000	14.432.201,00	17.473.576,00	30.725.576,00	85,4	21.309,24
	...					
4	2000	10.626.618,00	14.992.860,00	31.423.752,00	81,1	18.283,98
4	3000	10.447.859,00	15.192.860,00	30.419.764,00	82,6	18.527,88
4	4000	10.001.110,00	16.982.860,00	29.549.352,00	86,4	20.710,80
	...					
3	1000	7.118.021,00	12.512.145,00	34.226.376,00	73,8	15.258,71
3	2000	6.805.978,00	12.712.145,00	32.675.546,00	76,3	15.502,62
3	3000	6.310.814,00	14.502.145,00	31.336.452,00	80,6	17.685,54
3	4000	6.116.580,00	14.702.145,00	30.284.582,00	82,2	17.929,45
	...					
2	1000	3.592.424,00	10.231.430,00	37.927.428,00	65,6	12.477,35
2	2000	3.030.118,00	12.021.430,00	36.311.400,00	70,6	14.660,28
2	3000	2.766.315,00	12.221.430,00	34.948.580,00	72,7	14.904,18
2	4000	2.556.620,00	12.421.430,00	33.784.864,00	74,4	15.148,09
	...					
1	1000	739.632,00	7.950.715,00	47.202.348,00	49,6	9.695,99
1	2000	480.049,00	8.150.715,00	46.020.536,00	51,7	9.939,90
1	3000	253.770,00	10.190.715,00	49.307.032,00	53,2	12.427,70

Els resultats de les simulacions es poden veure a la taula 29, tot i així, només s'hi mostren els components variables i els valors en què s'aplica criteri per tal d'escollir la solució òptima.

A continuació es mostra un estudi més profund del que es considera el millor cas dels mostrats a la taula, el qual compleix amb el mínim de fracció renovable i requereix una inversió més baixa, el marcat en color a la taula 29.

En l'anàlisi de la producció s'observa que el 51,7% de l'energia produïda és renovable i que l'excés d'electricitat és de 480 049 kWh anuals, no s'ha pogut reduir més. En aquest cas no hi ha energia produïda no consumida, com en el cas del sistema integrat a la xarxa, ja que no es pot injectar.

Taula 30. Percentatge de producció elèctrica segons procedència. Extreta del Homer.

Producció	kWh/año	%
Mòduls FV	1.008.989	10,90
2000kW Genset	3.235.221	34,94
1500kW Genset	829.864	8,96
Generic 1.2 MW	4.184.190	45,19
Total	9.258.264	100,00

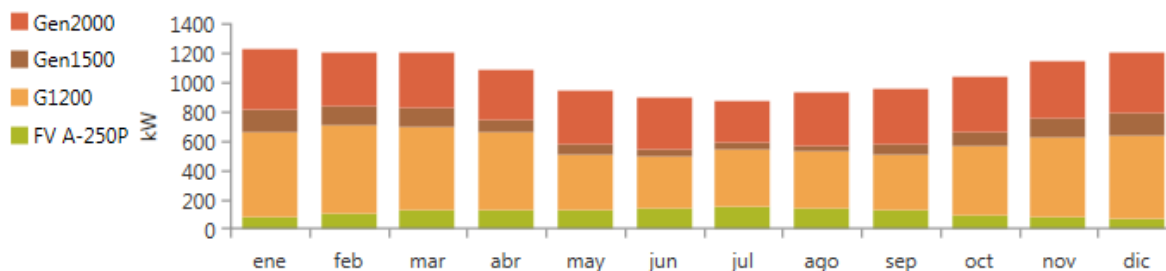


Figura 37. Producció elèctrica mensual mitjana segons la seva procedència. Extreta del Homer.

Pel que fa als generadors de dièsel, s'observa que el de 2000 kW actua com a generador principal i el de 1500 kW té una funció de suport, ja que el primer funciona 5902 hores anuals amb 1217 arrancades i, en canvi, el segon funciona només 730 hores anuals i arranca 339 vegades. El suport de combustible implica el consum de 1 136 262 litres de dièsel anuals, principal font de despeses del sistema.

Pel que fa a les emissions, però, sembla que es redueix la quantitat de CO₂ respecte la situació actual un 2 321 930 kg CO₂/any, de totes maneres, augmenten els òxids de nitrògen i s'hi afegeix el monòxid de carboni, entre altres, els qual perjudiquen significativament la salut.

Taula 31. Emissions de gasos anuals del sistema proposat. Extreta del Homer.

Cantidad	Valor	Unidades
Dióxido de carbono	2.992.152,00	kg/yr
Monóxido de carbono	7.385,70	kg/yr
Hidrocarburos incombustos	818,11	kg/yr
Material particulado	556,77	kg/yr
Dióxido de azufre (SO ₂):	6.008,80	kg/yr
Óxidos de nitrógeno	65.903,00	kg/yr

Al voler fer una inversió relativament modesta respecte les altres es depèn més del combustible, la qual cosa repercuteix negativament tant en el medi ambient com en el cost final del projecte.

Pel que fa a les despeses del sistema, cal destacar que la major part de les despeses provenen de l'operació i manteniment, així com del combustible, dels generadors de combustió. Tot i que en termes d'inversió inicial són més influents els equips de generació renovable, així com la instal·lació del banc de bateries, el qual pot arribar a ser més car que el propi aerogenerador.

Taula 32. Resum de despeses del projecte distribuïdes per components, durant la vida útil. Extreta del Homer.

Componente	Inversión(€)	Reemplazo (€)	O&M (€)	Combustible (€)	Rescate (€)	Total (€)
Mòduls FV	450.000,00 €	0,00 €	150.000,00 €	0,00 €	-90.000,00 €	510.000,00 €
Generic 1.2 MW	2.280.715,00 €	0,00 €	273.340,00 €	0,00 €	0,00 €	2.554.055,00 €
2000kW Genset	750.000,00 €	5.250.000,00 €	5.311.800,00 €	20.093.376,00 €	-98.000,00 €	31.307.172,00 €
1500kW Genset	1.000.000,00 €	0,00 €	876.000,00 €	4.904.391,00 €	-26.667,00 €	6.753.724,00 €
Generic Vanadium	3.400.000,00 €	600.000,00 €	1.271.588,00 €	0,00 €	-736.000,00 €	4.535.590,00 €
Converter	270.000,00 €	270.000,00 €	0,00 €	0,00 €	-180.000,00 €	360.000,00 €
System	8.150.715,00 €	6.120.000,00 €	7.882.729,00 €	24.997.764,00 €	-1.130.667,00 €	46.020.536,00 €

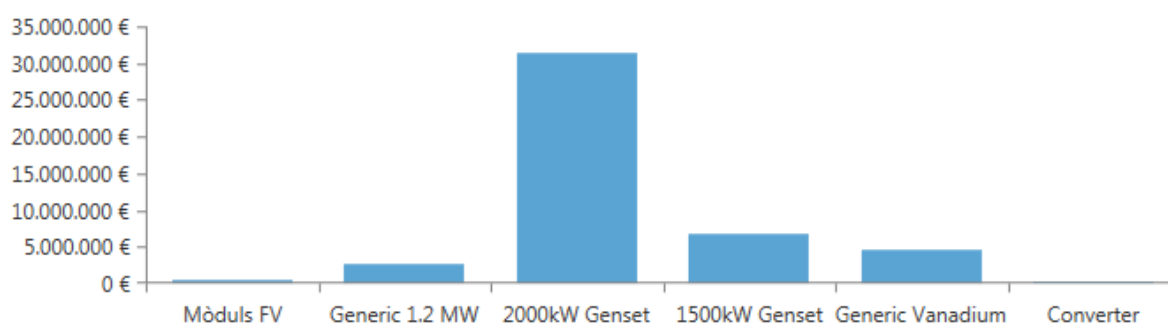


Figura 38. Despeses al llarg de la vida útil del projecte distribuïdes per components. Extreta del Homer.

Així doncs, es demostra que aïllar Casserres de la xarxa per autoabastir-se mitjançant la seva pròpia xarxa elèctrica és un projecte inviable, tant econòmicament com ambientalment.

Per tal que es pogués fer econòmicament viable, s'hauria d'aconseguir millorar l'eficiència de les bateries per tal de reduir-ne el cost. També seria imprescindible disminuir el preu del dièsel, ja que és el factor que encareix més el projecte. S'entén que el preu del petroli fluctua significativament en intervals petits de temps i que depèn de polítiques externes, per tant, és totalment imprevisible, tot i així, el projecte és molt sensible a aquesta dada i per això s'ha volgut aplicar un coeficient de seguretat. Seria interessant, doncs, intentar trobar algun altre tipus de combustible, com ara la biomassa que, a més, solucionaria el problema medi ambiental que la combustió de dièsel provoca.

Conclusions

La conclusió principal que s'extreu d'aquest treball és que és rendible econòmicament la instal·lació de generadors a partir de fonts renovables a Casserres, sempre que s'integrin a la xarxa per fer-la servir de suport, tot i així, actualment, la llei restringeix aquesta opció.

Primerament, s'ha de tenir en compte que s'ha fet l'estudi amb el consum elèctric actual del poble, la qual cosa no té perquè ser equivalent a les necessitats, és a dir, possiblement hi ha famílies que consumeixen menys del que realment necessiten per problemes econòmics, o bé n'hi ha que consumeixen molt més per falta de conscienciació. A part d'això, és important destacar que la càrrega majoritària és domèstica i els pics es donen als mesos d'hivern.

Pel que fa a la viabilitat o no de l'aprofitament del recurs eòlic, s'ha comprovat que al terme de Casserres no hi ha prou vent com per generar energia eòlica suficient per treure'n rendiment econòmic. Tot i així, si es planteja la finalitat d'autoconsum per instal·lar els aerogeneradors, de tal manera que s'interpreta l'estalvi com a benefici, sí que és recomanable dur a terme el projecte.

En canvi, aprofitar el recurs solar és sempre viable, ja sigui amb el plantejament mercantil com el de l'autoconsum. De totes maneres, el problema dels mòduls fotovoltaics és que es necessitaria ocupar una gran superfície per tal d'actuar com a únic generador, és a dir, la funció de la producció fotovoltaica queda relegada a la de suport.

Pel que fa al sistema proposat, s'ha vist que amb la instal·lació d'un aerogenerador i mòduls fotovoltaics a les teulades del poble es podria arribar a generar un 55% del consum total del municipi, de tal manera que es crearia un impacte ambiental i econòmic rellevant. A més, requeriria una inversió relativament baixa per part de les famílies. Tot i així, s'ha comprovat que per això es requereix el suport de la xarxa, si es vol mantenir el nivell de consum actual.

A diferència de l'illa de Samsó, a l'estat espanyol s'ha aprovat fa poc el Reial Decret d'Autoconsum que, amb la intenció de regular administrativament l'autoconsum, al·legant al servei de suport que fa la xarxa, el penalitza. De tal manera que el sistema proposat queda en una situació de dubtosa legalitat al no estar emmarcat en el decret. A més, s'ha observat que per grans instal·lacions significa una penalització, però que per instal·lacions menors, és a dir, per càrregues domèstiques, s'impossibilita la rendibilitat econòmica d'autoabastir-se energèticament.

Així doncs, s'ha decidit estudiar l'alternativa d'aïllar Casserres de la xarxa per crear-ne la seva pròpia. Tot i així, aquest sistema resulta ser econòmicament inviable, ja que es depèn de combustibles fòssils i la seva obtenció fa que el pressupost del projecte augmenti

significativament, sobretot si es té en compte la impredictibilitat del preu del petroli. A més, les bateries que requeriria implicaria un increment important de la inversió inicial. Tot i així, es podria contemplar la idea de fer servir altres combustibles com la biomassa, la qual solucionaria també el problema medi ambiental que presenta el dièsel.

Es conclou, doncs, que en base a la legislació actual no es podria dur a terme un projecte d'autoabastiment elèctric fent servir la xarxa com a suport. A més, l'alternativa d'aïllar-se de la xarxa no és viable si es fa servir la combustió de dièsel com a suport.

Agraïments

M'agradaria mostrar el meu agraïment a l'Oriol Gomis pels conceptes ensenyats que m'han sigut útils per fer els càlculs, així com a l'Eduardo Prieto per l'assessorament a l'hora de la confecció del treball i per la resolució de dubtes que m'han anat sorgint al llarg d'aquest període.

També m'agradaria agrair al senyor Ramon Bernades la seva disposició a cedir tota la informació necessària de l'ajuntament de Casserres.

Bibliografia

- [1]. **Institut d'estadística de Catalunya.** Institut d'estadística de Catalunya. [En línia] Octubre / 2015. [Data: 22 / Setembre / 2015.] www.idescat.cat.
- [2]. **Ajuntament de Casserres.** Base de dades demogràfiques i de consums energètics. Casserres, Catalunya : Ajuntament de Casserres, Setembre / 2015.
- [3]. **Comparador Luz.** Comparador Luz. [En línia] Setembre / 2015. <http://comparadorluz.com/faq/precio-kwh-electricidad#2>.
- [4]. **Instituto Nacional de Tecnología Industrial.** *Acción del Viento sobre las Construcciones*. Buenos Aires : INTI, 1994.
- [5]. **Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.** IDAE, Atlas eólico. [En línia] Octubre / 2015. <http://atlaseolico.idae.es/>.
- [6]. **Gomis, Oriol.** *Generació Elèctrica Eòlica*. Barcelona, Barcelona, Catalunya : s.n., Setembre / 2015.
- [7]. **Vestas.** Vestas Turbines. [En línia] Octubre / 2015. https://www.vestas.com/en/products_and_services/turbines#!2mw-platform.
- [8]. **OMIE.** OMIE. [En línia] Octubre / 2015. <http://www.omie.es/>.
- [9]. **National Renewable Energy Laboratory.** *Wind Turbine Design Cost and Scaling Model*. Colorado : U.S. Department of Energy, 2006.
- [10]. **Cambioeuro.** cambioeuro. [En línia] Octubre / 2015. www.cambioeuro.es.
- [11]. **Instituto Nacional de Estadística.** [En línia] Octubre / 2015. <http://www.ine.es/varipc/index.do>.
- [12]. **Generalitat de Catalunya.** Departament de Territori i Sostenibilitat. [En línia] Octubre / 2015. http://mediambient.gencat.cat/ca/05_ambits_dactuacio/avaluacio_ambiental/avaluacio_dimpacte_ambiental_de_projectes/energia_eolica/.
- [13]. **Diputació de Barcelona.** *Territori i Ciutat*. [Butlletí de l'oficina Tècnica de Cooperació] s.l. : Unitat de logística i comunicació, 2001.
- [14]. **Servei Meteorològic de Catalunya.** Meteocat. [En línia] Octubre / 2015.

www.meteo.cat.

- [15]. **Abella, Miguel Alonso.** *Sistemas fotovoltaicos.* Madrid : S.A.P.T. Publicaciones Técnicas S.L., 2005.
- [16]. **Atersa Grupo Elecnor.** Atersa. [En línia] Octubre / 2015. <http://www.atersa.com/datosproductos.asp?param=80>.
- [17]. **Ruiz, Enrique Zueco.** *Zytech Group.* Saragossa, Saragossa, Espanya : s.n., Novembre / 2015.
- [18]. **Ministerio de Indústria, Energía y Turismo.** *Real Decreto 900/2015 de Autoconsumo.* s.l. : Boletín Oficial del Estado, 2015.
- [19]. **Ministerio de Indústria, Energía y Tursimo.** *Ley 24/2013 de Sector Eléctrico.* s.l. : Boletín Oficial del Estado, 2013.
- [20]. **Solartradex.** Solartradex. [En línia] Diciembre / 2015. <http://solartradex.com/blog/10-claves-para-entender-el-real-decreto-de-autoconsumo/>.
- [21]. **HOMER.** *Help Manual.* 2015.
- [22]. **Martínez, Moisés.** Implicacions tècniques Nou Reial Decret. *Autogeneració Energètica.* Barcelona : UPC, Novembre / 2015.
- [23]. **CENER.** *Baterías de flujo.* 2015.
- [24]. **Ministerio de Indústria, Energía y Turismo.** *Precios de carburantes y combustibles.* 2015.
- [25]. **El Mundo.** *Economía.* 2015.
- [26]. **Universitat de Barcelona.** *Pla de Sostenibilitat.* Barcelona : s.n., 2015.

Annex I

Fórmules de cost dels components dels aerogeneradors:

- Pales (una pala)

$$Massa = 0,1452 \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^{2,9158}$$

$$Cost = \frac{0,4019 \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^3 - 955,24 + 2,7445 \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^{2,5025}}{1 - 0,28}$$

- Rotor

$$Massa = 0,954 \cdot Massa_{pala} + 5680,3$$

$$Cost = 4,25 \cdot Massa_{rotor}$$

- Pitch + coixinets

$$Massa = (0,1295 \cdot Massa_{pala} \cdot 3 + 491,31) \cdot 1328 + 555$$

$$Cost = 2,28 \cdot 0,2106 \cdot D^{2,6578}$$

- Spinner

$$Massa = 18,5 \cdot D - 520,5$$

$$Cost = Massa_{spinner} \cdot 5,57$$

- Eix baixa velocitat

$$Massa = 0,0142 \cdot D^{2,888}$$

$$Cost = 0,01 \cdot D^{2,887}$$

- Suports principals

$$Massa = \left(D \cdot \frac{8}{600} - 0,033 \right) \cdot 0,0092 \cdot D^{2,5}$$

$$Cost = 2 \cdot 17,6 \cdot Massa_{suports}$$

- Caixa de transmissió

$$Cost = 74,1 \cdot P$$

- Fre mecànic

$$Cost = 1,9894 \cdot P - 0,1141$$

- Generador

$$Cost = 54,73 \cdot P$$

- Components elèctrics de velocitat variable

$$Cost = 79 \cdot P$$

- Mecanisme d'angle Yaw

$$Cost = 2 \cdot 0,0339 \cdot D^{2,964}$$

- Estructura

$$Cost = 303,96 \cdot D^{1,067}$$

- Connexions elèctriques

$$Cost = P \cdot 40$$

- Hidràulica i refrigeració

$$Cost = 12 \cdot P$$

- Coberta de la góndola

$$Cost = 11,537 \cdot P + 3849,7$$

- Torre

$$Massa = 0,3973 \cdot A \cdot H - 1414$$

$$Cost = Massa_{torre} \cdot 1,5$$

- Fonaments

$$Cost = 303,24 \cdot (A \cdot H)^{0,4037}$$

- Transport

$$Cost = 1,581 \cdot 10^{-5} \cdot P^2 - (0,0375 \cdot P + 54,7) \cdot P$$

- Obra civil

$$Cost = P \cdot (2,17 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 - 0,0145 \cdot P + 69,54)$$

- Instal·lació

$$Cost = 1,965 \cdot (H \cdot D)^{1,1736}$$

- Punt de contacte elèctric

$$Cost = P \cdot (3,49 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 - 0,0221 \cdot P + 109,7)$$

- Enginyeria

$$Cost = P \cdot 9,94 \cdot 10^{-4} \cdot P + 20,31$$

- Preu recanvis

$$Cost = P \cdot 10,7$$

- Lloguer de les terres

$$Cost = 0,00108 \cdot E$$

on:

D: diàmetre [m]

P: potència nominal [kW]

H: altura de la góndola [m]

A: àrea escombrada per les pales [m²]

E: energia generada anualment [kWh]

Massa en kg

Cost en 2002 USD