

Treball de final de grau
Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Estudi del funcionament d'un sistema de generació elèctrica eòlica d'àmbit domèstic

Autor: Ignasi López Rull
Director: Oriol Gomis Bellmunt
Convocatòria: Juny 2019



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Índex

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | RESUM | 1 |
| 2 | INTRODUCCIÓ | 2 |
| 3 | VENT I PRODUCCIÓ ELÈCTRICA | 4 |
| 3.1 | Aerogenerador | 5 |
| 3.2 | Simulació de producció energètica | 6 |
| 3.3 | Simulació de funcionament diari | 9 |
| 3.4 | Bateries | 10 |
| 4 | CONVERTIDOR | 12 |
| 4.1 | Model del convertidor amb el control | 12 |
| 4.1.1 | Banda d'alterna | 12 |
| 4.1.2 | Control de tensió | 13 |
| 4.1.3 | Modelització dels interruptors | 14 |
| 4.1.4 | Banda de contínua | 14 |
| 4.1.5 | Constants del controlador | 15 |
| 4.2 | Casos de simulació | 15 |
| 4.3 | Resultats | 16 |
| 4.3.1 | CAS1 | 16 |
| 4.3.2 | CAS2 | 19 |
| 4.3.3 | CAS3 | 19 |
| 4.3.4 | CAS4 | 20 |
| 4.3.5 | CAS5 | 25 |
| 5 | CONCLUSIONS | 28 |
| 6 | PRESSUPOST | 30 |
| 6.1 | Costos de personal | 30 |
| 6.2 | Costos de material i programari | 30 |
| 6.3 | Cost total | 30 |
| 7 | BIBLIOGRAFIA | 32 |

1 RESUM

El present treball pretén estudiar de forma genèrica les característiques que presenta un sistema de generació eòlica domèstica. Per a fer-ho s'ha dividit el contingut en dos grans blocs; un estudi de caracter macroscòpic de l'energia que es produiria en un habitatge i un seccion, de caràcter més tècnic, on s'analitza el control i el convertidor que requeriria tal sistema.

Per al primer s'ha treballat amb dades d'un habitatge particular, en concret d'una casa al municipi de Capafonts propietat dels pares de l'autor del present treball. D'aquesta manera s'ha pogut disposar de dades de consum real. A més, les dades sobre velocitat i direcció del vent també s'ajusten a l'habitatge en qüestió, oferint així una visió més focalitzada però més real.

Pel que fa la segona part, s'ha usat l'entorn MATLAB-Simulink per modelar un convertidor elèctric i el seu respectiu control. En el model s'hi ha inclòs el sistema de generació i un sistema d'emmagatzematge. S'han simulat diferents casos segons si la potència consumida es manté constant o no, segons si la producció elèctrica es manté constant o no, o segons si aquesta potència produïda és suficient per cobrir la demanda o, per contra, es requereix potència del sistema d'emmagatzematge.

2 INTRODUCCIÓ

L'energia és un dels temes de debat candents en l'actualitat. La pressió exercida per part de la població per a que s'abandonin les energies no renovables ha provocat un augment de la inversió, tant pública com privada, en aquest sector en els últims vint anys. Segons dades de la Comisión Nacional de Mercados y la Competencia (CNMC), la inversió en energia eòlica va tenir un pic just abans de la crisi econòmica, però va frenar aquesta inversió fins el punt que l'any 2015 la inversió en nova instal·lació va ser pràcticament nul·la, tot segons dades de la CNMC. A finals d'aquell any la potència eòlica instal·lada a l'Estat eren uns 23MW.

Actualment l'energia eòlica és, dins el conjunt de les energies renovables, la font més important. L'any 2017 a Espanya es van generar 47,28 TWh bruts d'energia eòlica, cosa que suposava el 18,8% de la produïda, i situava aquesta font com la segona en volum de producció, només darrera de la nuclear. Com a idea general de l'origen de l'energia produïda a l'Estat, la figura 1 mostra les diferents fonts d'energia elèctrica amb el valor percentual d'energia produïda respecte el total en el mes d'abril de 2019.

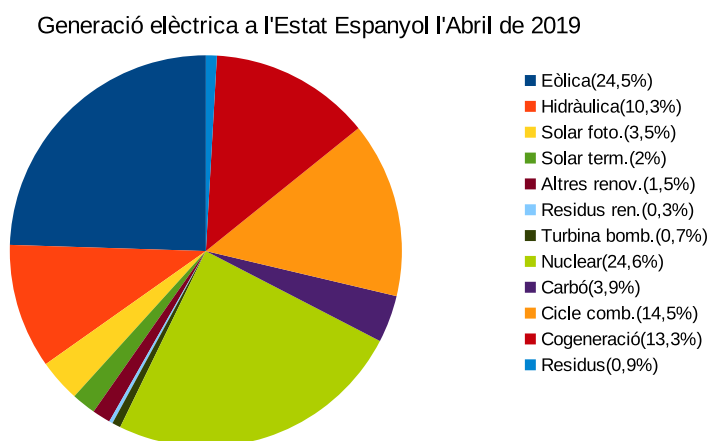


Figura 1: Percentatge d'energia produïda segons la font a l'Estat Espanyol l'abril de 2019

Tot i aquestes dades, queda clar que actualment és impossible dependre únicament de les energies renovables tal i com les coneixem. És per això que es parla de nombroses formes, com parcs eòlics *offshore* o sistemes de producció de mida domèstica, per exemple. Els primers ja comencen a ser una realitat mentre que els segons, tot i que fa anys que se'n parla, no esdevenen una solució viable en la majoria dels casos.

Normalment presenten un gran hàndicap en l'eficiència, ja que molts habitatges no presenten les condicions atmosfèriques adequades per a la producció elèctrica. En altres paraules, no tothom gaudeix d'una teulada orientada al sud amb una inclinació òptima per a la producció d'energia solar, o viuen en una zona amb vent suficient per a la producció d'energia eòlica. A més, aquest últim cas és conflictiu perquè en

zones amb edificis els fluxos d'aire presenten fortes turbulències que impedeixen un bon funcionament d'un aerogenerador i, fins i tot, poden arribar a malmetre'l. Dit d'una altra manera, els habitatges amb condicions atmosfèriques favorables per a la producció elèctrica són minoritaris.

A part de problemàtica tècnica, també presenten problemàtica administrativa. En el cas de l'Estat espanyol la llei permet tenir sistemes de generació elèctrica, però si l'habitatge està connectat a la xarxa elèctrica està obligat a enviar a la xarxa la potència generada i no consumida. Aquesta energia és comprada, amb la qual cosa converteix el propietari del sistema de generació en un productor d'energia elèctrica, obligant-lo així a esdevenir autònom.

A més, durant uns anys, la producció d'energia implicava un impost sobre la venda d'aquesta. Aquest impost era el conegut com a impost del sol i va esdevenir una de les polèmiques sobre el futur de l'energia renovable en aquest país. Aquest impost afectava a particulars que havien instal·lat camps solars i restaven exempts de pagament sistemes de generació de dimensions reduïdes, però el fet d'existir aquest impost va crear incertesa sobre si en un futur podria aplicar-se també a sistemes de generació d'àmbit domèstic, cosa que va col·laborar molt negativament en el foment d'aquest tipus de sistemes. L'eliminació d'aquest impost va ser una de les apostes de campanya d'alguns partits a les eleccions generals de 2016. En concret, el PSOE es va comprometre a eliminar-lo quan Pedro Sánchez va esdevenir president del Gobierno després de la moció de censura de l'any 2018.

Tot i les dificultats que presenten, aquest treball se centra en sistemes de generació eòlica domèstics.

3 VENT I PRODUCCIÓ ELÈCTRICA

Les dades a analitzar es tracten de dades reals del municipi de Capafonts, al Baix Camp. Són dades de velocitat del vent preses en intervals de cinc minuts i corresponen als tres primers mesos de 2017 i als tres primers mesos de 2018. Aquestes dades han estat proporcionades per *Meteoprades*. La velocitat està mesurada en km/h. Inclouen velocitat màxima en cada interval, la velocitat mitjana, la data, l'hora i la direcció del vent.

La figura 2 mostra un histograma amb la distribució probabilística d'aquesta velocitat mitjana. Es pot observar com el valor més comú és 0, fet que no ha de sorprendre, però també s'observa que la resta de dades formen una corba que pot correspondre a una distribució de Chi-quadrat. Per analitzar millor aquest fet se separen de les dades aquells valors inferiors a 1km/h. Aquest valor s'agafa arbitràriament, per tal d'ignorar no només els valors exactament iguals a zero sinó també aquells més pròxims. Amb aquest procés només s'han eliminat 7068 dades, és a dir, només 7068 valors de mitjana de vent dels gairebé 52000 de què es tenen dades són pròxims a 0. Això suposa un 13,6%. El resultat és l'histograma que es pot observar a la Figura 3.

En podem concloure que, entre els instants en què fa vent, la moda està al voltant dels 11km/h, dada interessant pel que es veurà uns punts més avall. També es pot veure que, tot i que la quantitat de valors cau ràpidament a mesura que es miren valors més elevats, es continua tenint un nombre significatiu de dades per a valors relativament alts.

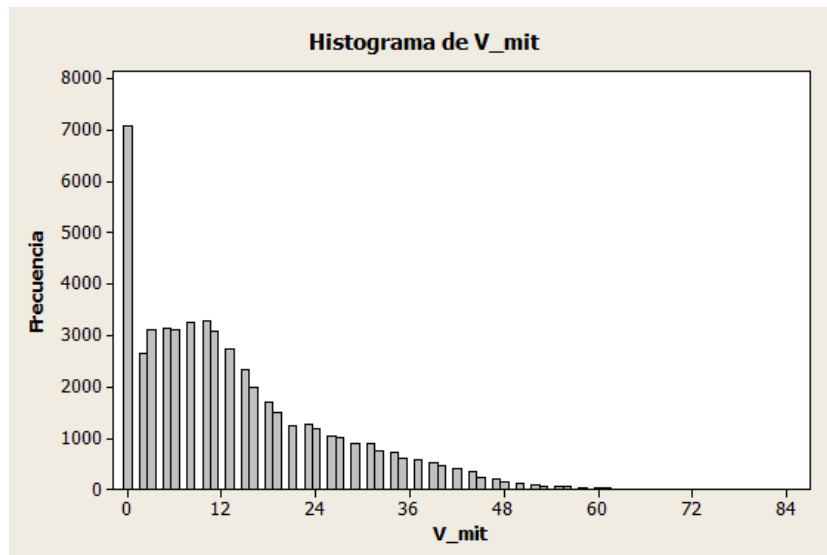


Figura 2: *histograma de la velocitat mitja del vent*

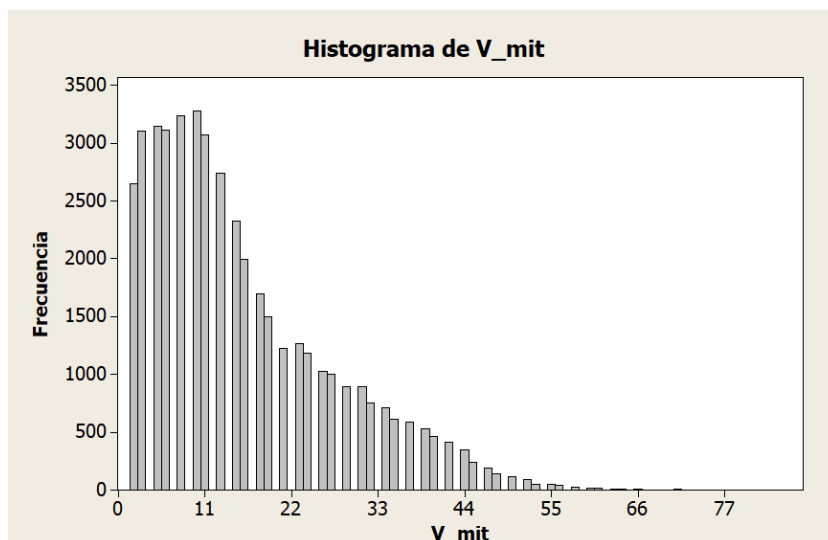


Figura 3: *histograma de la velocitat mitja del vent sense valors pròxims a 0*

3.1 Aerogenerador

A partir d'aquestes dades s'ha extret de forma qualitativa l'energia que seria capaç de produir un aerogenerador instal·lat a la casa en qüestió. Per a fer-ho s'ha escollit un model d'aerogenerador que es pugui trobar al mercat amb les especificacions que ofereix el fabricant. S'ha escollit el model TECHNOSUN-FSX2000 (veure **annex**) per la seva capacitat de suportar velocitats relativament elevades. S'ha escollit així perquè com s'ha vist en punts anteriors es tenen bastants valors relativament elevats de velocitat mitja del vent.

El model escollit treballa bé fins a valors de vent de 20m/s, és a dir, 72km/h, valor que no s'assoleix en les dades de què es disposa (veure figura3). Altres aerogeneradors d'àmbit domèstic estan pensats per a treballar amb valors de velocitat del vent d'entre 12 i 15m/s, és a dir, entre 43,2 i 54km/h, i aquests sí que són valors que es poden assolir en la situació amb què es treballa. Té un hàndicap, però, que és la velocitat mínima de funcionament. El fabricant la marca a 3m/s, és a dir, 10,8km/h. Així doncs, molts dels valors que es donen més sovint no afectarien en la generació (veure figura3). Cal dir, però, que la gran majoria d'aerogeneradors tenen una velocitat mínima de funcionament similar, inclús superior, a l'aquí escollit.

El fabricant proporciona una corba (sense l'equació que la defineix) que relaciona directament la velocitat del vent amb la potència generada. Per tal de poder obtenir dades numèriques, s'ha trobat una corba el més similar possible a la que proporciona el fabricant. Tot i que els valors de potència per a valors de velocitat baixos són entre cinc i deu vegades inferiors als valors de potència referents a velocitats altes, la corba també ha d'ajustar bé aquests perquè, com s'ha vist, són valors molt més freqüents.

La corba que es vol trobar és, doncs, $Potència[W] = f(v[m/s])$, però la parame-

tritzada no és aquesta sinó que és $\frac{Potència[W]}{v[m/s]} = f(v[m/s])$. La raó d'aquest fet és la naturalesa de la corba parametritzada. Es vol trobar una corba polinòmica que la representi, per tant, si parametritzem $\frac{Potència[W]}{v[m/s]} = f(v[m/s])$, la corba que obrindrem de $Potència[W] = f(v[m/s])$ no tindrà terme independent, cosa que forçarà que passi per (0,0). Aquest detall és important pel motiu següent. El fabricant especifica que l'aerogenerador necessita una velocitat mínima de 3m/s per a posar-se en funcionament. Per tant, encara que l'equació de la corba ens mostri uns valors de potència generada per a velocitats inferiors a 3m/s, aquests valors realment han de ser 0. Si ens assegurem que la corba passa pel (0,0) es pot solucionar aquest problema substituint tots els valors de vent inferiors a 3m/s per 0, i en aplicar l'equació de la corba obtinguda la potència generada en tots aquests instants de temps serà 0. Fer això és més senzill que parametritzar una corba i després haver d'eliminar tot un seguit de valors diferents de 0 que no són reals. A més, depenent de la forma de la corba es podrien obtenir valors relativament elevats corresponents a velocitat nul·la, i això dificultaria encara més la seva eliminació.

Un altre motiu pel qual és millor parametritzar $\frac{Potència[W]}{v[m/s]} = f(v[m/s])$ és l'ordre de la funció polinòmica que es busca. S'observa que la corba té un punt d'inflexió, per tant, la corba parametritzada serà, com a mínim, de tercer grau. Si es dibuixen, però, els punts corresponents a $\frac{Potència[W]}{v[m/s]}$ es continua observant un punt d'inflexió i, per tant, ens obligaria a tenir una funció de quart grau com a funció parametritzadora. Amb el software MINITAB, el que s'ha utilitzat pel tractament de totes aquestes dades, és molt més senzill parametritzar una funció cúbica que una de quart ordre, amb la qual cosa podem simplificar el procediment parametritzant $\frac{Potència[W]}{v[m/s]} = f(v[m/s])$ enlloc de $Potència[W] = f(v[m/s])$.

La corba que s'obté d'aquesta parametrització és la que es pot observar a la figura 4.

Concretament MINITAB aporta els resultats que es poden veure a la Figura 5. Tant el p-valor com els paràmetres de R^2 i $R_{ajustat}^2$ indiquen el bon ajust de la corba parametritzada als valors dels quals es partia.

Així doncs, l'equació parametritzada que ens permet obtenir la potència en funció de la velocitat del vent queda:

$$Potència = 17,68v - 5,94v^2 + 1,563v^3 - 0,05322v^4$$

on la potència s'obté en W i la velocitat del vent està en m/s.

3.2 Simulació de producció energètica

A partir d'aquí es pot obtenir l'energia produïda per l'aerogenerador tenint en compte que les dades de vent estan preses cada cinc minuts. Considerant constant la

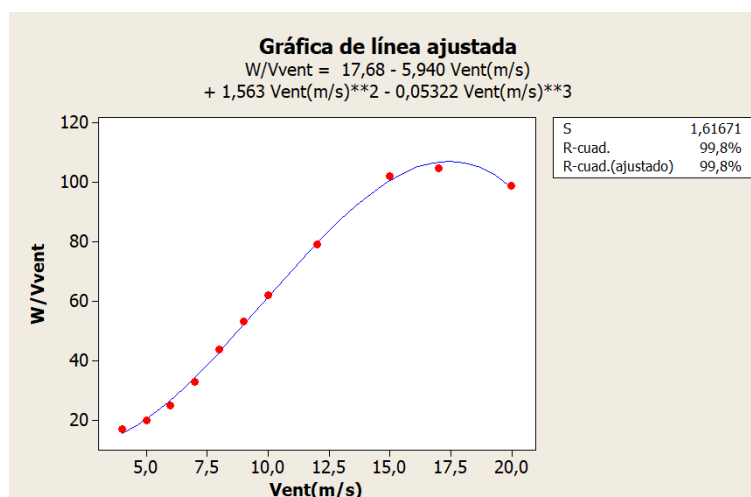


Figura 4: Gràfica de línia ajustada de $\frac{Potència}{v}$ en funció de v

velocitat del vent en aquests cinc minuts, amb l'equació descrita anteriorment es troba la potència mitjana en cada interval. Multiplicant la potència pels cinc minuts que dura l'interval i aplicant un factor de conversió per obtenir els resultats en kWh podem obtenir la producció energètica al llarg dels sis mesos de què es tenen dades.

Cal afegir que les dades de què es disposa estan en km/h mentre que l'equació està en m/s, amb la qual cosa és necessària una conversió prèvia.

També cal destacar que s'han eliminat del càlcul les dades de vent corresponents a les direccions NNE, NE, ENE, E, ESE, SE i SSE. La raó és l'emplaçament de la casa en qüestió. Mentre que la teulada no té cap obstacle cap a l'oest, ja que està situada en un extrem del poble, sí que té obstacles en la direcció est. Tot i això, com és sabut per la gent que freqüenta Capafonts, el vent ve quasibé sempre de l'oest.

Per una bona visualització, es calcula la potència mitjana i l'energia produïda per dia, tant pels tres primers mesos de 2017 com els tres primers mesos de 2018. Observant la Figura6 es pot apreciar les grans diferències segons el dia. Això és perfectament normal observant les dades sobre la velocitat del vent, on s'apreciaven dies molt ventosos i dies en calma.

Pel que fa a l'energia produïda, la distribució és la mateixa, com es pot veure a la Figura7. Aquestes diferències són les que fan imprescindible l'ús de sistemes d'emmagatzematge. A més, aquestes diferències impliquen molta incertesa a l'hora de predir l'energia produïda en un cert interval de temps, ja que es combinen dies, inclús setmanes, de calma amb períodes molt ventosos. Tot i que la velocitat sí que sembla ajustar-se a una corba clàssica de probabilitat, la seva distribució al llarg de l'any sembla totalment aleatòria.

Si fem la suma de tota aquesta energia obtenim que els mesos de gener, febrer i març de 2017 s'haurien produït 223,093kWh mentre que en els mateixos mesos de

La ecuación de regresión es
 $W/V_{vent} = 17,68 - 5,940 \text{ Vent(m/s)} + 1,563 \text{ Vent(m/s)}^{**2} - 0,05322 \text{ Vent(m/s)}^{**3}$

S = 1,61671 R-cuad. = 99,8% R-cuad. (ajustado) = 99,8%

Análisis de varianza

| Fuente | GL | SC | MC | F | P |
|-----------|----|---------|---------|---------|-------|
| Regresión | 3 | 11315,1 | 3771,70 | 1443,02 | 0,000 |
| Error | 7 | 18,3 | 2,61 | | |
| Total | 10 | 11333,4 | | | |

Análisis de varianza secuencial

| Fuente | GL | SC | F | P |
|------------|----|---------|--------|-------|
| Lineal | 1 | 10469,7 | 109,10 | 0,000 |
| Cuadrática | 1 | 544,4 | 13,64 | 0,006 |
| Cúbico | 1 | 301,0 | 115,16 | 0,000 |

Figura 5: equació de la corba i paràmetres de l'ajust

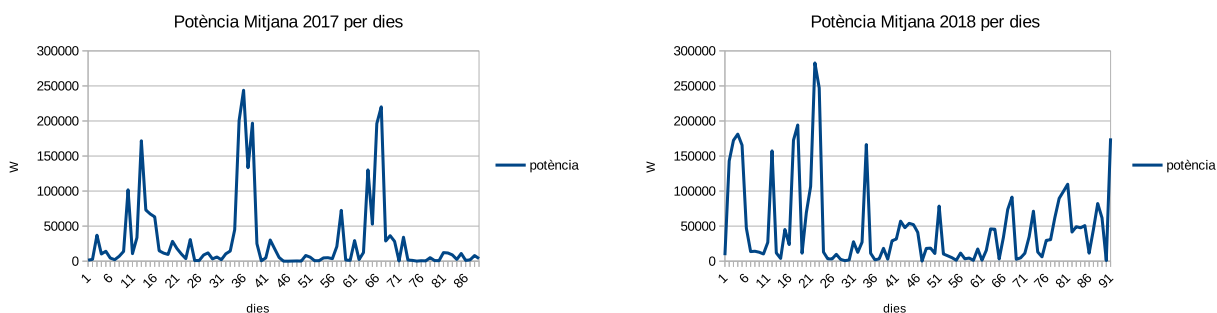


Figura 6: Potència mitjana per dia en els tres primers mesos de 2017 i 2018

2018 s'haurien produït 363,361 kWh.

Pel que fa al consum en els mateixos períodes, es poden observar a la taula1. En total doncs, en aquests mesos de 2017 es consumeixen 281kWh, mentre que en el mateix període de 2018 se'n consumeixen 285. Cal destacar que són uns consums baixos, i això és degut a que l'habitatge és una segona residència, i només s'utilitza en caps de setmana. La font d'aquestes dades és la companyia elèctrica, i no proporciona valors amb decimals. Coneixent la producció, doncs, es pot concloure que en aquests mesos de 2017 la producció hauria sigut insuficient per cobrir la demanda, mentre que el 2018 sí que hauria pogut abastir el consum.

Per a aquests càlculs s'ha considerat tots els valors inferiors a 3m/s nuls perquè aquesta és la velocitat mínima de funcionament del generador.

Els càlculs s'han fet ignorant la direcció del vent (només separant dels càlculs aquells

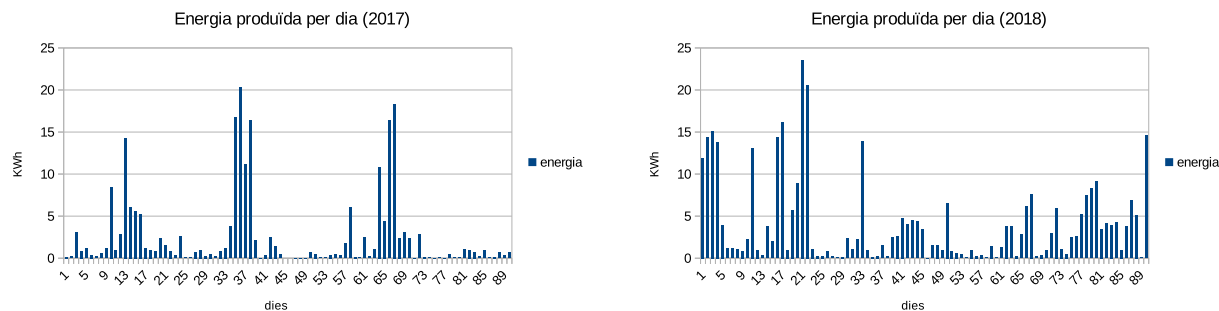


Figura 7: *Energia produïda per dia en els tres primers mesos de 2017 i 2018*

valors de velocitat del vent que provinguin de l'est). La fitxa tècnica de l'aerogenerador especifica que l'aerogenerador pot variar l'orientació 360° (*yall control*) de forma lliure. En tot cas, també s'ha fet el càlcul de producció suposant constant la orientació de l'aerogenerador. Per a fer-ho s'ha considerat la velocitat perpendicular a l'aerogenerador, multiplicant els valors de velocitat per l'angle que forma la direcció d'on provenen amb l'oest, orientació que s'ha fixat per aquest hipotètic cas. En aquesta hipòtesi també s'ha considerat la velocitat mínima de funcionament de 3m/s, eliminant els valors inferiors de la mateixa manera que s'ha fet amb l'altre càlcul. El resultat és una producció total, al llarg dels sis mesos, de 403kWh, més d'un 30% inferior respecte l'altre cas.

| | gener | febrer | març |
|------|--------|--------|-------|
| 2017 | 99kWh | 93kWh | 89kWh |
| 2018 | 101kWh | 88kWh | 96kWh |

Taula 1: *consum energètic en els tres primers mesos de 2017 i 2018*

3.3 Simulació de funcionament diari

A part de comprovar la producció al llarg d'un trimestre, s'ha fet una petita simulació per veure els rangs de funcionament que hauria de tenir la bateria. Es disposa del consum en Wh al llarg d'interval de vint minuts d'un dia i, com ja s'ha vist, de la producció de l'hipotètic aerogenerador al llarg de tots aquests mesos en intervals de cinc minuts. El dia del qual se'n tenen dades, malauradament no correspon a cap dels dies dels quals es disposa, per això, s'ha escollit un dia qualsevol per fer una simulació qualitativa. S'ha escollit un dia amb nivells de producció elevats, en concret el 5 de febrer de 2017. En aquest dia la producció hauria estat similar al consum.

A la Figura 8 s'hi pot veure representada l'energia produïda i consumida al llarg d'interval de vint minuts. Realment no és una gràfica contínua, sinó que està

elaborada a base d'una sèrie de punts, i cada punt representa l'energia produïda o consumida en un interval de temps, però s'ha representat d'aquesta manera per una bona visualització.

Es pot observar com hi ha producció en la majoria de moments del dia, però en molts d'ells el consum és superior. Cal recordar que la potència màxima que pot arribar a produir de forma instantània l'aerogenerador escollit és de 2000W, mentre que la potència contractada a l'habitatge és més del doble. Per tant, en hores de consum elevat ni que fes molt de vent no es podria arribar a cobrir la demanda.

Pel que fa a la bateria, en la mateixa simulació s'ha suposat l'ús d'aquesta fent un balanç entre les energies consumida i produïda en cadascun dels intervals de vint minuts. S'ha partit a l'inici, com a valor arbitrari, de 2000Wh acumulats al sistema d'emmagatzematge. El tipus de gràfica és el mateix que en el cas de les energies consumides i produïdes. Els valors de la corba són els d'energia emmagatzemada en cada interval. El resultat és la figura 9. Es pot veure com, partint de 2000Wh acumulats a les dotze de la nit del dia 5 de febrer s'arriba a les 12 de la nit del dia 6 de febrer amb 4262Wh acumulats, però que el valor més baix al llarg del dia és de 346Wh. Això implica que en una dia on es produeix i es consumeix bastant es té un rang de valors de la bateria de quasi 4kWh. És important, però, observar com l'energia acumulada augmenta i disminueix. Les bateries perden eficàcia amb els cicles de càrrega i descàrrega. Sense arribar a carregar-se o descarregar-se completament, s'observen diversos canvis de tendència en un sol dia, fet que no és adient per la durabilitat de les bateries.

3.4 Bateries

De moment s'ha parlat de bateries en general, sense parar esment en el funcionament d'aquestes. Per tal d'adaptar una mica el sistema al que seria un emmagatzematge real i poder-ne treure algunes conclusions, s'ha escollit un model de bateria del mercat. L'aerogenerador escollit pot treballar a 24 o 48V. S'ha obtingut per buscar una bateria que pugui funcionar a 48V per no forçar els corrents a ser molt elevats.

El model escollit és una bateria Rolls S-480. És un model de bateria de plom-àcid de capacitat 480Ah. S'ha escollit així per la recomenació del fabricant de l'aerogenerador que fos una bateria de plom-àcid amb una capacitat de 420Ah o superior. (Fitxa tècnica a l'**annex**)

Si s'observa la figura 7 es pot veure que una bateria així hauria de ser suficient en la majoria de dies de què es tenen dades, ja que una capacitat de 480Ah a una tensió de 48V implica que podria absorbir una producció de 23kWh, però en alguns dies consecutius es produeix més. Seria interessant doncs, disposar de més d'una bateria.

Com s'ha comentat anteriorment, les dades de consum fan referència a una segona residència, que no s'acostuma a utilitzar més de dos dies seguits. El consum un dia pot ser del voltant de 10kWh (al dia de què es coneix el consum va ser de 11,4kWh), cosa que implica que una bateria així hauria de poder cobrir la demanda,

tot i que no de forma sobrada. En la simulació de producció i consum d'un dia s'ha vist que en un mateix dia hi pot haver diferències entre valors de càrrega màxima i mínima de 4kWh. En principi, una bateria així els hauria de poder suportar.

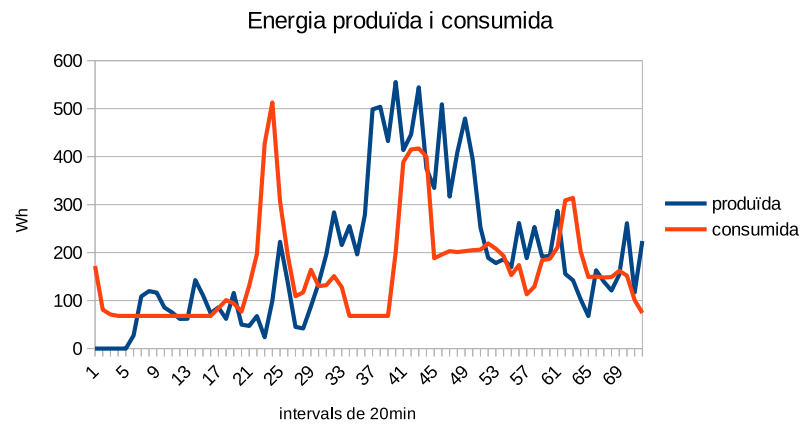


Figura 8: *Energia produïda i consumida en intervals de 20 minuts*

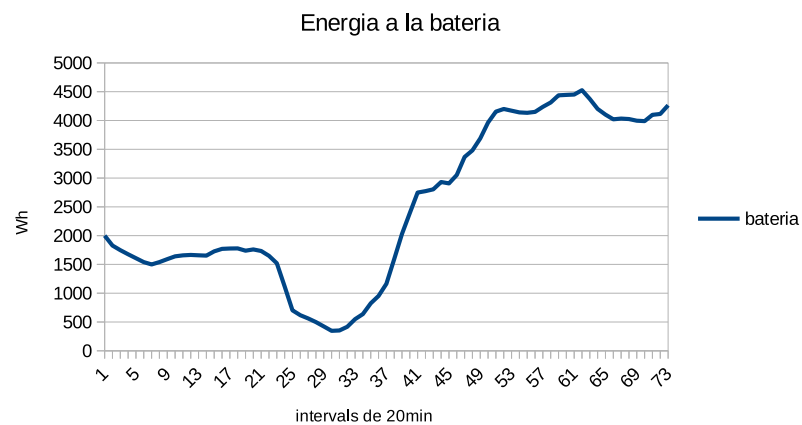
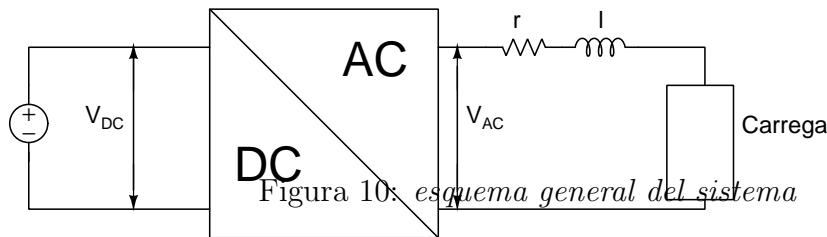


Figura 9: *Nivell d'energia acumulat a la bateria al llarg del dia*

4 CONVERTIDOR

4.1 Model del convertidor amb el control

Seguint altres articles relacionats amb el modelatge de convertidors, s'ha elaborat un esquema i un model que representen el convertidor i les seves parts. L'esquema general es pot veure a la figura 10.



La part que treballa en alterna representa la xarxa del domicili. S'ha considerat no connectada a la xarxa general, és per això que només consta d'una càrrega, que simula els aparells elèctrics connectats, i una impedància que servirà pel control de tensió. En aquest treball quan es parla de banda d'alterna es fa referència a la part de l'esquema que treballa amb tensió alterna (V_{AC}).

La part que treballa amb tensió contínua (V_{DC}) representa les fonts de la xarxa, que en aquest treball són un generador eòlic i un sistema d'emmagatzematge. Quan es fa referència a aquesta part del model es parla de banda de contínua.

4.1.1 Banda d'alterna

La banda d'alterna es modelitza amb el circuit que es pot veure a la figura 11. La càrrega s'ha representat amb tres impedàncies connectades en paral·lel. La primera és una resistència que sempre està connectada i té un valor R_c . La segona i la tercera s'activen amb un interruptor, el qual està desconnectat si el senyal *gate* està a zero i està tancat si el senyal *gate* val 1. Per controlar aquest senyal es disposa d'un generador de senyals graó per a cada interruptor. Els valors d'aquestes impedàncies són R_1 per la impedància resistiva i R_2 i L per la inductiva. La impedància formada per r i l no forma part de la càrrega, com es pot apreciar a la figura 10, i s'usen pel control de tensió, com es veurà més avall.

En la mateixa figura 11 es pot veure representada una font de tensió alterna V_c , que representa la potència que subministra el convertidor (és a dir, el generador o el sistema d'emmagatzematge) a la xarxa domèstica. És una font controlada, ja que el seu valor dependrà de les càrregues que hi hagi connectades en un moment donat.

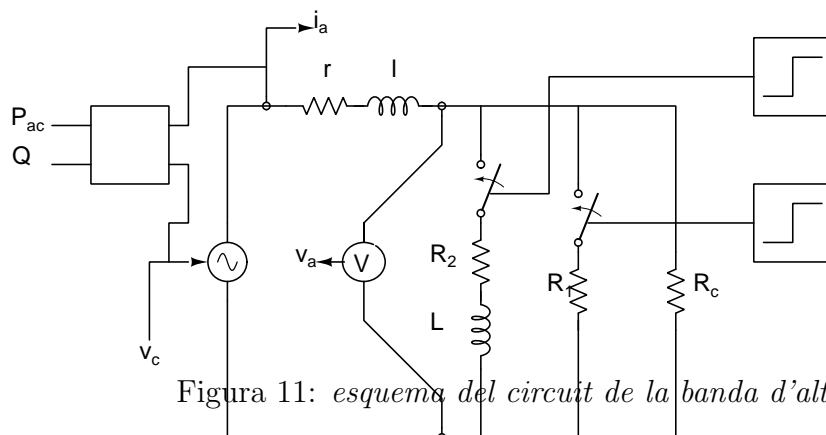


Figura 11: esquema del circuit de la banda d'alterna

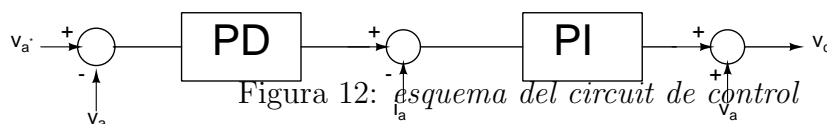


Figura 12: esquema del circuit de control

4.1.2 Control de tensió

La figura12 representa el control de la font V_c . La consigna d'entrada és V_a^* , que és la tensió desitjada a la càrrega. La primera acció de control treballa amb l'error a la consigna, $V_a^* - V_a$, on V_a és la tensió real a la càrrega. Aquest valor es pren directament de l'esquema de la banda d'alterna (veure figura11). És una acció derivativa, ja que a la sortida es vol un valor de corrent. La funció de transferència del controlador en qüestió és la següent:

$$PD(s) = K_P + K_D \cdot s$$

On $K_P = \frac{r}{k}$ i $K_D = \frac{l}{k}$. r i l són els valors de la impedància de control (veure figura11) i k és una constant que afecta directament la velocitat d'assoliment del valor. El control derivatiu és un control ràpid però pot amplificar el soroll si n'hi ha. És per això que caldrà comprovar que no es disparin els valors d'error del senyal de sortida si es dona un canvi brusca en algun valor.

La segona acció de control és un control integral i treballa amb l'error de corrent. El valor i_a s'obté directament de l'esquema (veure figura11). La funció de transferència d'aquest controlador és la següent:

$$PI(s) = \frac{K_P \cdot s + K_I}{s}$$

On $K_P = \frac{r}{k}$ i $K_I = \frac{l}{k}$. r i l són els valors de la impedància de control i k és la mateixa constant del controlador PD.

El valor obtingut amb aquest control s'usa per reajustar el valor de V_c .

4.1.3 Modelització dels interruptors

Com ja s'ha comentat, els interruptors s'activen i es desactiven amb un senyal *gate*. Internament, però, funcionen com dues resistències. Quan l'interruptor està obert, és a dir, quan no deix passar corrent, hi ha connectada una resistència de valor elevat. Teòricament, si l'interruptor fos ideal, aquesta resistència hauria de tenir un valor infinit. En aquest cas el valor és $R_{off} = 1 \cdot 10^5 \Omega$. Quan l'interruptor es manté tancat i deix passar corrent hi ha connectada una resistència de valor molt baix. Idealment aquesta resistència hauria de tenir un valor nul per tal que la caiguda de tensió a l'interruptor fos nul·la. En aquest cas, però, es té una resistència de valor $R_{on} = 1 \cdot 10^{-3} \Omega$.

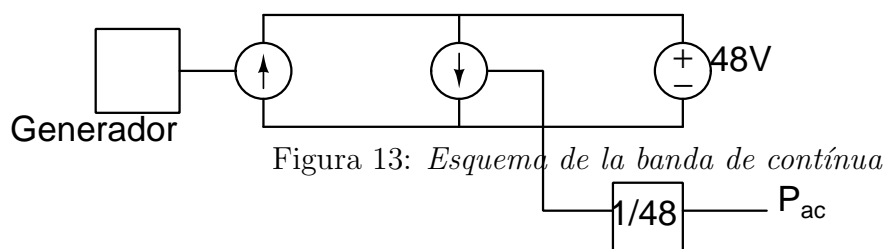
4.1.4 Banda de contínua

Per últim, la banda de contínua del convertidor ha d'incloure la generació i la bateria. L'esquema usat es troba a la figura 13. El generador es modelitza amb una font de corrent continu que es pot fer canviar de valor. Es modelitza d'aquesta manera perquè l'aerogenerador està pensat per treballar a tensió constant, i segons el vent que faci varia el corrent produït.

L'altra font de corrent modelitza la potència requerida per la xarxa. Treballant a tensió constant, el valor del corrent que força aquesta font varia segons ho fa la potència a la banda d'alterna. Es força, doncs, que la potència en els borns d'aquesta font sigui sempre igual a la potència a la banda d'alterna.

Per últim es modelitza la bateria amb una font de tensió constant. Aquesta font és la que fa que totes dues fonts de corrent treballin a tensió constant. Com s'ha explicat anteriorment, s'ha escollit una bateria que pugui treballar amb les tensions que requereix el generador. En aquest esquema ja s'inclou que la bateria treballa a 48V, valor que s'ha escollit anteriorment en base a les especificacions tècniques reals del generador.

En la branca de la bateria el corrent varia segons els altres dos corrents. Si el corrent que aporta el generador es superior al que requereix la xarxa, el corrent "entra" per la branca de la bateria, fent que la potència produïda per la bateria sigui negativa, és a dir, que es carregui. Per contra, si el corrent que es genera és inferior al que demanda la xarxa, el corrent per la bateria "surte" pel pol positiu de la font de tensió de la bateria, fent que la potència produïda per la font de tensió sigui positiva, és a dir, que aquesta es descarregui.



4.1.5 Constants del controlador

El control actua a partir d'uns paràmetres que anteriorment s'han definit com r , l i k . Per donar un valor a aquests paràmetres s'han fet diverses simulacions prèvies als casos exposats a continuació per tal de determinar un valor adient per les constants. S'ha partit de valors de l'ordre dels paràmetres utilitzats en altres models de convertidor i s'han anat modificant segons interessés per una bon funcionament. Els valor finals són els exposats a la taula2

| Paràmetre | Valor | Unitats |
|-----------|-------|----------|
| r | 0,2 | Ω |
| l | 0,001 | H |
| k | 0,01 | - |

Taula 2: Valor dels paràmetres del controlador

4.2 Casos de simulació

Per tal de veure el funcionament del convertidor es plantegen cinc casos de simulació. En tots els casos s'ha utilitzat com a valor consigna una tensió de 230V de valor eficaç i 50Hz de freqüència, és a dir, una senyal sinusoidal d'amplitud $230 \cdot \sqrt{2}$ i freqüència $2\pi \cdot 50$ rad/s.

En tots els casos s'ha comprovat el valor de la tensió a la càrrega, els senyals d'error en el control, la potència consumida i els corrents en la banda de contínua. A més, en els casos on hi ha interruptors també s'ha comprovat el bon funcionament d'aquests. En el present treball s'han inclòs molts d'aquests resultats, però no tots, ja que alguns no varien entre alguns casos.

Cal afegir que per donar més realisme a les simulacions, en cap moment la potència produïda supera els 2000W (valor màxim que dona l'aerogenerador segons el fabricant) i la potència consumida tampoc excedeix els 4,5kW de valor eficaç, potència que s'ha marcat com a màxima (simulant la potència contractada que pot tenir un habitatge).

Els dos primer casos són els base. Tant la càrrega com la potència produïda són constants. La diferència entre els dos casos és el valor de la potència produïda. En el primer cas és suficient com per cobrir la demanda de la càrrega. En la segona, en canvi, és insuficient. La càrrega s'ha simulat amb una ùnia resistència, $R_c=40\Omega$, i la potència produïda constant s'ha simulat amb un corrent constant en la font de corrent que simula el generador. Pel primer cas el corrent és de 40A, fet que implica una potència de 1920W (la tensió en la banda de contínua és de 48V). En el segon cas el corrent és de 15A, corrent que implica una potència de 720W. En ambdós el temp de simulació és de 0,2 segons.

El tercer cas és amb la càrrega constant però la potència produïda variable. Per la càrrega s'ha utilitzat el mateix valor de $R_c=40\Omega$ i la potència variable s'ha simulat amb un corrent que varia de forma exponencial, entre un valor de 5A a l'inici i un de 41A al final dels 0,2 segons de simulació.

En el quart cas la potència produïda es manté constant (com en els dos primers casos) i s'ha simulat amb un corrent de 30A. Pel que fa la càrrega se'n tenen tres de diferents en una mateixa simulació. La primera és $R_c=40\Omega$, la segona s'activa amb un interruptor als 0,1 segons i també és de 40Ω ($R_1 = 40\Omega$) i la tercera és una resistència de 20Ω en sèrie amb una inductància de 0,03H ($R_2 = 20\Omega, L = 0,03H$) que també s'activa amb un interruptor als 0,2 segons. La simulació acaba als 0,3 segons.

Finalment hi ha un cinquè cas on es combinen diferents càrregues i potències produïdes alhora. La potència produïda se simula amb un corrent amb forma hiperbòlica, que varia entre un valor de gairebé 40A als estats inicial i final i un valor de gairebé 10A als 0,25 segons, just al mig de la simulació, que dura 0,5 segons. En aquesta simulació també es tenen les tres càrregues de la simulació anterior però en aquest cas $R_c = 80 \Omega$. La resistència que s'activa amb l'interruptor està connectada entre els instants 0,1 i 0,4 segons. La càrrega inductiva ho està des de l'instant 0,3 segons fins al final.

4.3 Resultats

4.3.1 CAS1

Com s'ha comentat anteriorment el primer cas és un cas base que permet veure el bon funcionament del model. El model ha d'assegurar que la tensió de la consigna sigui realment la tensió que pateix la càrrega. La figura 14 mostra sobreposades ambdues tensions. S'hi pot observar que la diferència és pràcticament inexistent.

També és important veure els errors. A la figura15 s'hi representa l'error en la consigna de tensió, i en la figura16 l'error en la consigna de corrent. Es pot observar com els errors són oscil·lants i mai s'anul·len. Això passa perquè, en ser la consigna un valor que oscil·la, no es manté mai constant, cosa que obliga al control a ajustar el valor de forma permanent.

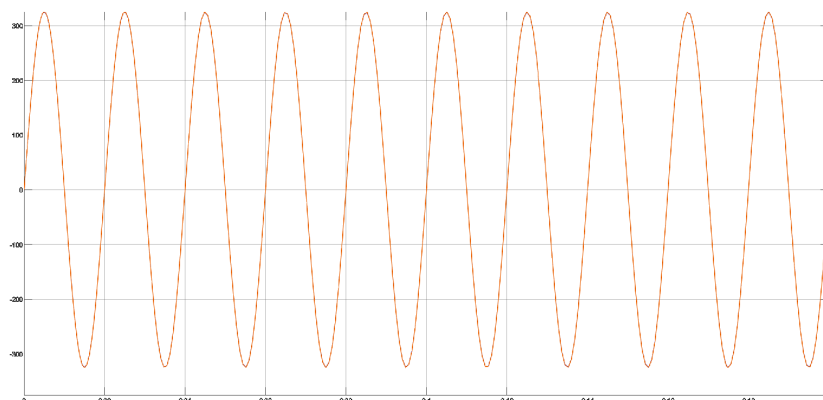


Figura 14: *tensió consigna i tensió que rep la càrrega (V) al llarg de la simulació (s) (CAS1)*

Com s'ha vist a les figura14 i 15, la diferència entre la tensió real i la consigna és pràcticament inexistent, però existeix. Tot i això, es pot veure que oscil·la entre valors inferiors a 1V, pel que es pot dir que el control funciona correctament.

Segons la norma UNE-EN 60335-1 els valors de tensió màxima no poden superar un increment del 10% del valor i la tensió mínima no pot superar un decrement del 15%, és a dir, la tensió s'ha de trobar compresa entre uns valors aproximats de 195V i 250V. Per tant, oscil·lacions de 0,5V són perfectament assumibles per una xarxa. A més, molts aparells elèctrics i electrònics tenen rangs de funcionament més amplis.

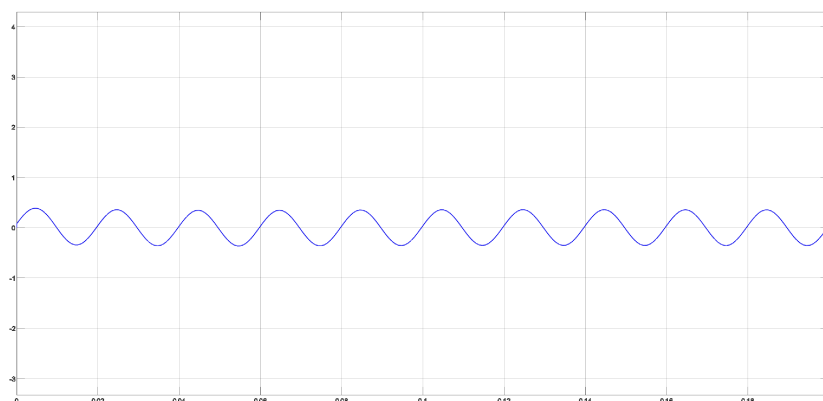


Figura 15: *error entre la consigna i la tensió a la càrrega (V) al llarg de la simulació (s) (CAS1)*

La figura17 mostra la potència activa instantània que consumeix la xarxa. També mostra el comportament esperat. La potència oscil·la amb una freqüència que és el doble que la xarxa i té un valor fix. La potència reactiva és pràcticament nul·la, només la que consumeix la inductància l .

Per últim s'han observat els corrents a la banda de contínua. La figura18 mostra el corrent que aporta la font de corrent que simula l'aerogenerador (color taronja), el

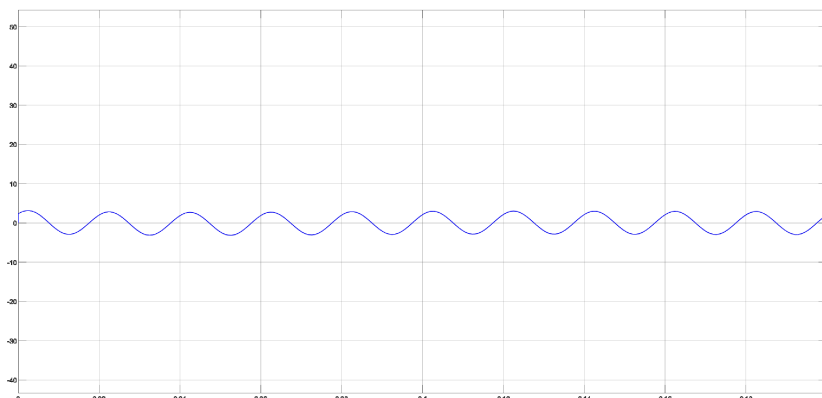


Figura 16: *error entre el corrent consigna i el corrent a la càrrega (A) al llarg de la simulació (s) (CAS1)*

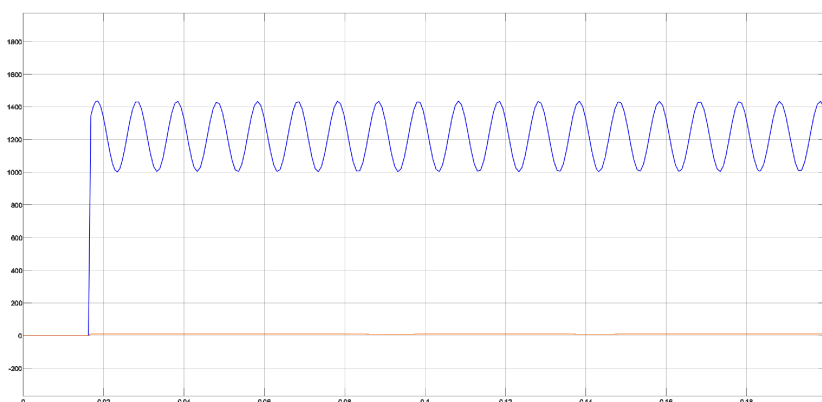


Figura 17: *Potència consumida (W) al llarg de la simulació (s) (CAS1)*

corrent que passa pel convertidor (color blau cel) i el corrent a la bateria (color blau fosc). El sentit del corrent de la bateria s'ha agafat positiu si entra a la bateria, per tant, en aquest cas s'està carregant.

S'esperava aquest fet perquè s'ha fet la simulació amb la premisa que l'aerogenerador pogués cobrir la demanda. El més interessant d'aquests resultats, però, és la forma del corrent. S'ha simulat el convertidor de forma ideal, de tal manera que a la banda de contínua i a la d'alterna la potència instantània és igual. En ser una xarxa monofàsica, la potència instantània és oscil·lant (com es pot comprovar a la figura 17) i, per tant, el corrent que circula pel convertidor en la banda de contínua també oscil·la (la tensió es manté constant). Això provoca que el corrent a la bateria també oscil·li, fet no gens interessant per la conservació d'aquesta.

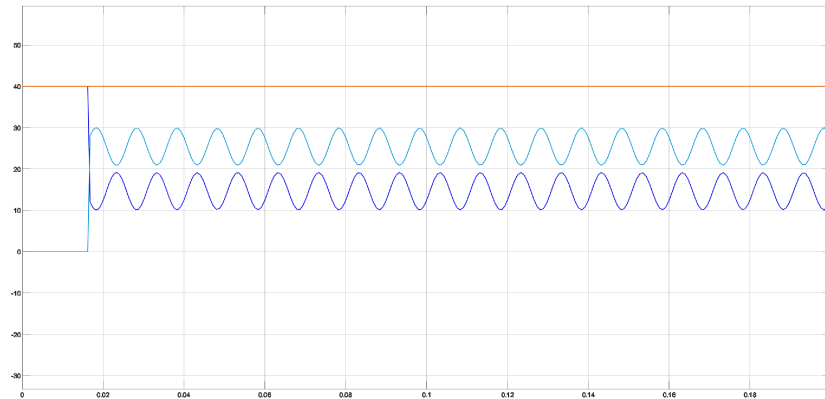


Figura 18: *Corrents a la banda de contínua (A) al llarg de la simulació (s) (CAS1)*

4.3.2 CAS2

En aquest segon cas, com ja s'ha comentat, tota la part d'alterna és igual que en el primer cas, i s'han obtingut els mateixos resultats. Pel que fa a la banda de contínua, els resultats es poden veure a la figura 19. En aquest cas el corrent de la bateria és negatiu (blau fosc), per tant implica que la bateria s'està descarregant, fet comprensible perquè es pot observar com el corrent subministrat per l'aerogenerador (taronja) és inferior al requerit per la xarxa (blau cel).

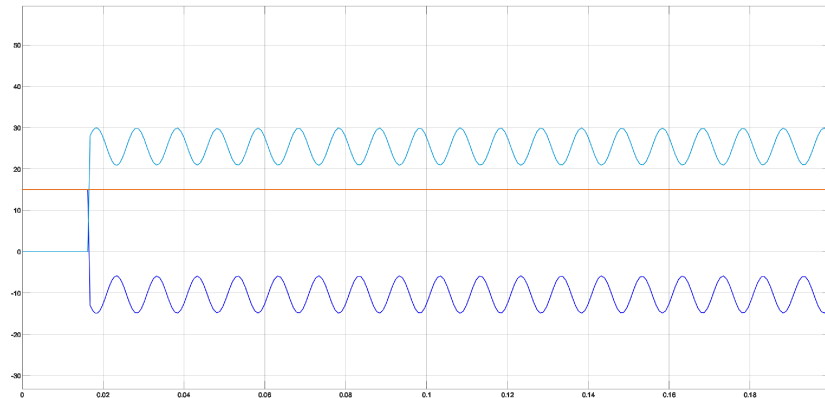


Figura 19: *Corrents a la banda de contínua (A) al llarg de la simulació (s) (CAS2)*

4.3.3 CAS3

En aquest cas de simulació l'interès està en els corrents a la banda de contínua, ja que tant les tensions, com els errors, com la potència consumida són iguals que en els casos 1 i 2. Es poden observar aquests corrents en la figura 20. S'observa la creixuda de producció representada per un augment del corrent que proporciona el

generador (taronja). En ser constant el corrent que requereix la càrrega, el corrent a la bateria va disminuint en valor absolut fins que esdevé positiu. El comportament del model és el requerit, doncs, en casos en què la generació varia.

La problemàtica que tindria aquest cas és similar a la que s'ha explicat en el cas1. Les bateries funcionen amb corrent continu, i les oscil·lacions que pateix en aquest model no serien adequades pel seu manteniment. En aquest cas, a més passa de carregar-se a descarregar-se diverses vegades en poques dècimes.

Els fabricants de bateries ofereixen dades sobre la pèrdua de capacitat de càrrega de la bateria segons els cicles de càrrega i descàrrega que pateix. Es tracten de cicles complets, però il·lustra que els canvis de cicle no són positius per la vida útil de la bateria.

Hi ha un altre problema que el model no contempla. Les bateries tenen un corrent mínim de funcionament, que ni que pugui ser baix faria que si el corrent requerit per la bateria és molt pròxim a zero la bateria realment no proporciona tal corrent. Aquest fet, tot i que fa el model menys fidel a la realitat és una "protecció" pels microcanvis de cicle en la bateria comentats anteriorment.

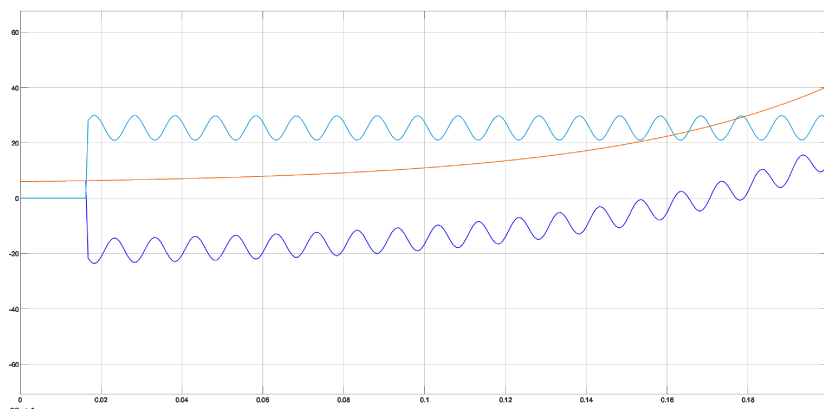


Figura 20: Corrents a la banda de contínua (A) al llarg de la simulació (CAS3)

4.3.4 CAS4

En aquest cas de simulació la part d'alterna varia respecte el casos anteriors, però els canvis no afecten el bon funcionament del model. A la figura21 es pot veure com el model continua funcionant, proporcionant la tensió consigna a la càrrega. Si es mira amb detall es pot veure que existeix una diferència entre ambdós valors, però que continua sent mínim. La magnitud d'aquesta diferència es pot apreciar a la figura22.

La figura22 mostra com l'error en el valor de la tensió varia en funció de la càrrega. En activar un interruptor i connectar una nova càrrega l'error canvia automàticament, però no presenta pics de valor. Aquest fet corrobora que el model funciona amb càrregues diverses i, sobretot, en cas que la càrrega variï de forma sobtada. És

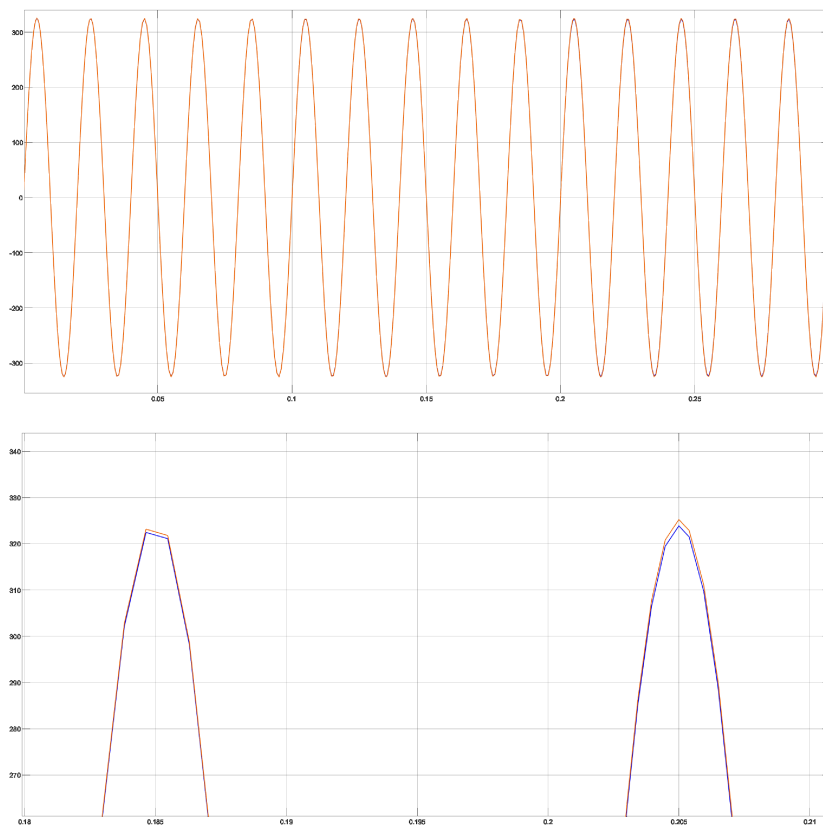


Figura 21: *Tensió consigna sobreposada a la tensió a la càrrega (V) al llarg de la simulació (s). Detall d'aquestes (CAS4)*

interessant veure també que en el cas en què la càrrega és màxima (que com es comentarà més endavant es tracta d'un cas on es consumeix la potència que s'ha marcat com a màxima) l'error oscil·la amb valors de pic lleugerament superiors a 1V, valors considerats baixos i no problemàtics.

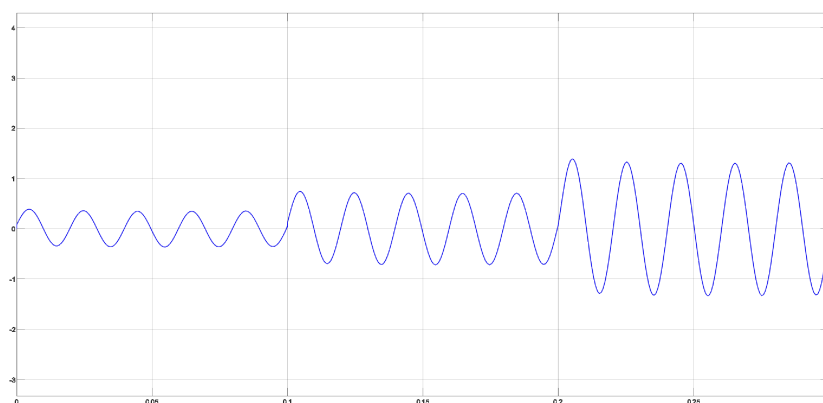


Figura 22: *Error en la consigna de tensió (V) al llarg de la simulació (s) (CAS4)*

El quart cas també ha servit per comprovar el funcionament en els interruptors. A les figures 23 i 24 es pot veure com la tensió de l'interruptor abans de ser accionat és la de la càrrega (valor esperat) i que el corrent és nul mentre que a partir de ser accionat el corrent passa a ser el corrent de la càrrega en qüestió i la tensió és nul·la. No s'observa cap pic de valor en el moment de la commutació, i en el cas de l'interruptor de la càrrega inductiva no s'aprecia cap efecte en el moment de l'accionament de l'altre interruptor (Figura24).

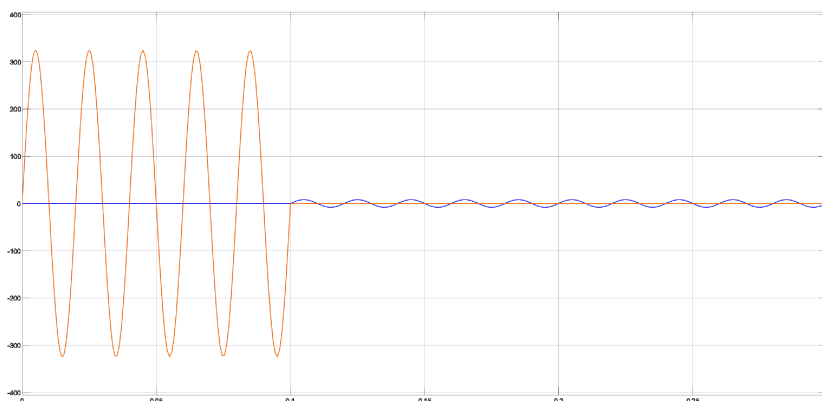


Figura 23: *Tensió (V) i corrent (A) a l'interruptor de la càrrega resistiva al llarg de la simulació (s)(CAS4)*

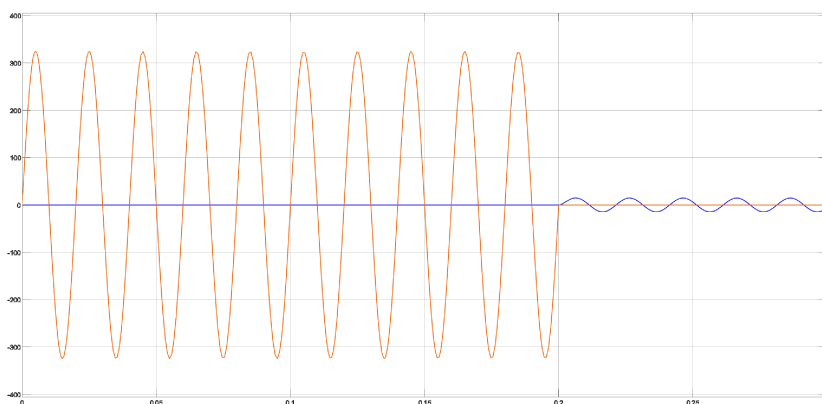


Figura 24: *Tensió (V) i corrent (A) a l'interruptor de la càrrega inductiva al llarg de la simulació (s)(CAS4)*

Pel que fa la càrrega resistiva, la figura25 mostra el corrent que circula per aquesta càrrega i la tensió en els seus borns. El comportament és l'esperat, amb el corrent i la tensió nuls abans d'activar-se l'interruptor i la tensió de 230V eficaços després.

Si observem amb molt de detall els valors suposats nuls abans de l'insant de commutació de l'interruptor, podem veure que realment no són nuls. La figura26 mostra aquest detall. Es té una tensió (corba taronja) amb valors de pic inferiors als 0,1V

i un corrent amb valors màxims inferiors a 0,01A (corba blava). La raó que aquests valors no siguin exactament 0 és que l'interruptor té una resistència interna molt elevada quan està desconnectat per simular aquest fet; però en definitiva és una resistència de valor finit.

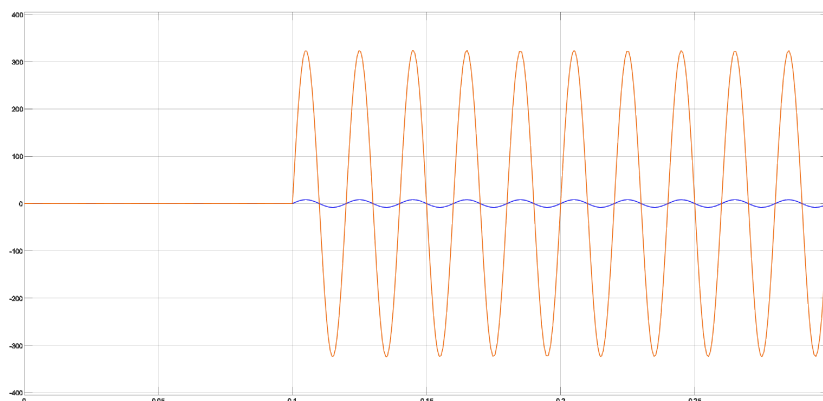


Figura 25: Tensió (V) i corrent (A) a la càrrega resistiva al llarg de la simulació (s) (CAS4)

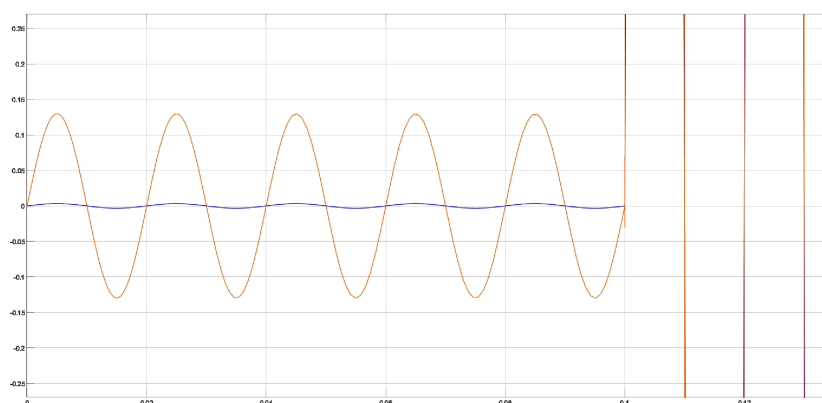


Figura 26: Detall de la tensió (V) i el corrent (A) a la càrrega resistiva abans de l'instant 0,2s (CAS4)

El mateix comportament de la càrrega resistiva es pot observar a la càrrega inductiva (figura27).

La potència consumida en aquest cas es pot veure a la figura28. En activar-se la càrrega inductiva, la potència reactiva passa de ser quasibé nul·la a tenir un valor pròxim a 1000VAr (corba taronja), mentre que la potència activa passa a tenir un valor efectiu de prop de 4,5kW. Aquest és el valor que s'ha marcat prèviament com a valor màxim, per la qual cosa les conclusions tretes a partir dels últims instants d'aquesta simulació són per càrrega màxima.

Cal comentar que la potència reactiva pateix una petita oscil·lació en el moment de la commutació, però no de valor molt elevat. Aquest fet es produeix perquè en canviar

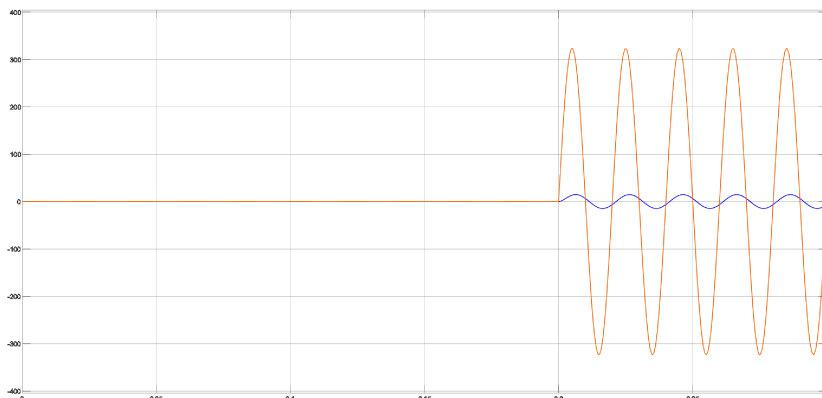


Figura 27: Tensió (V) i corrent (A) a la càrrega resistiva al llarg de la simulació (s) (CAS4)

bruscament el corrent, la seva derivada instantània augmenta. La impedància de la bobina depèn de la derivada del corrent (la caiguda de tensió de la bobina val $l \frac{di}{dt}$). Aquest canvi, però, és instantani i la potència reactiva ràpidament assoleix el valor que li pertoca.

En aquest sentit es pot veure en la figura 28 com en l'instants 0,1s es produeix una oscil·lació però després la potència reactiva torna a ser pràcticament zero, ja que la càrrega que s'ha connectat és totalment resistiva i no afecta en la potència reactiva.

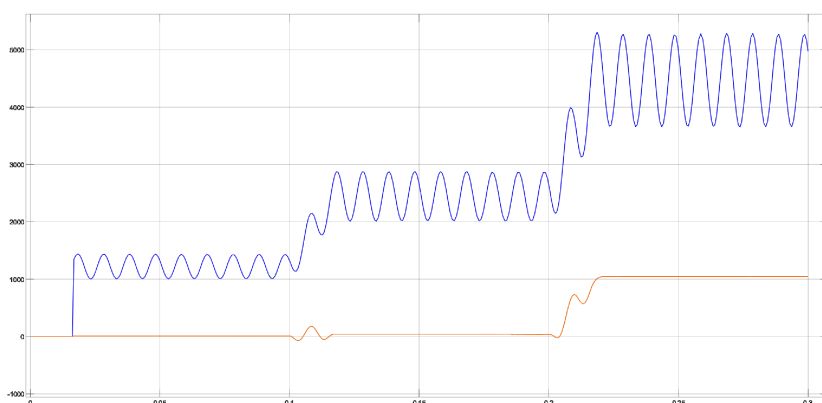


Figura 28: Potència activa (W) i reactiva (VAr) consumida al llarg de la simulació (s) (CAS4)

Per confirmar que el model es comporta com és esperat en presència de càrregues inductives, s'analitzen la tensió en els borns de l'impedància de control i el corrent que hi circula.

Es compara el desfasament entre ells i respecte la tensió a la càrrega. A la figura 29 es pot veure com el corrent està retrassat respecte la tensió ja des del primer instant de la càrrega, degut a la inductància de control. És fàcil de veure en l'instants inicial, en què el corrent (corba taronja) val 0 mentre que la tensió (corba blau cel) té un valor positiu.

Abans de l'activació de l'interruptor corresponent a la càrrega inductiva en l'instants 0,2 segons, el corrent i la tensió a la càrrega (corba blau fosc) no presenten desfasament, ja que no hi ha cap càrrega no resistiva que el pugui produir. A partir d'aquest instant, però, es pot veure com tots tres senyals estan en fases diferents. Es pot apreciar bé a l'últim instant de la simulació. Així doncs es pot concloure que el model treballa bé amb càrregues inductives.

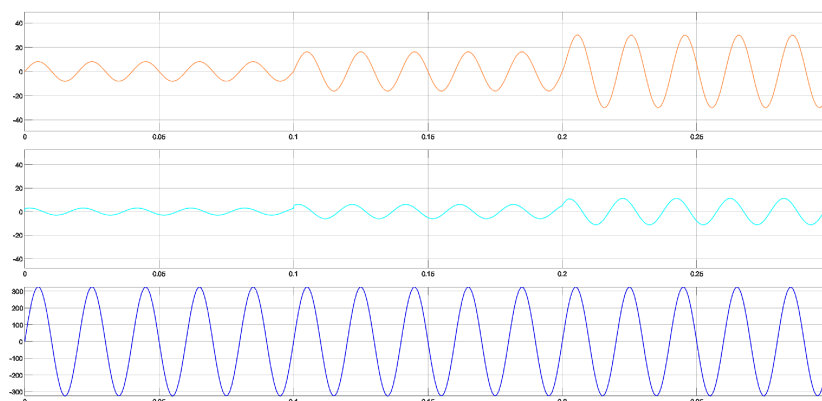


Figura 29: Corrent en la impedància de control (taronja), tensió en els seus borns (blau cel) i tensió a la càrrega (blau fosc) (A) al llarg de la simulació (s) (CAS4)

Per últim cal observar els corrents a la banda de contínua (figura30). Es pot veure com el corrent requerit per la demanda varia quan varia la càrrega connectada (corba blau cel) i com el corrent de la bateria varia segons el de la demanda. En el cas concret d'aquest cas de simulació, la bateria passa de carregar-se a descarregar-se.

Cal fer esment que en el present model no es té en compte la potència reactiva a l'hora de simular el convertidor, i només es força que la potència activa en una banda i altra del convertidor siguin iguals. Així doncs, la inductància en si no afecta els corrents mostrats en la figura30, que serien iguals si la segona càrrega enlloc d'estar formada per una resistència i una bobina estés formada exclusivament per la resistència.

4.3.5 CAS5

L'última simulació és sobre un cas complet, amb variacions de càrrega i potència produïda. L'objectiu d'aquesta simulació és comprovar que el model respon bé amb qualsevol cas que se li pugui aplicar. Les figures 31 i 32 mostren el comportament esperat pel model, comportament similar als casos previs.

Pel que fa als corrents, el comportament també és l'esperat (figura33). Es pot observar com el corrent a la bateria passa de positiu a negatiu sense problemes (corba blau fosc), com el canvi de valor del corrent del generador (corba taronja) altera el corrent de la bateria de forma natural i com els canvis bruscos en la càrrega no provoquen canvis de valor sobtats en el corrent del convertidor.

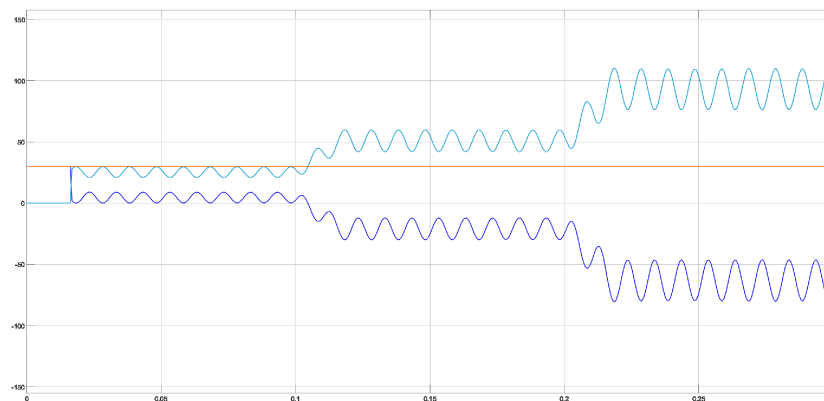


Figura 30: *Corrents a la banda de contínua (A) al llarg de la simulació (CAS4)*

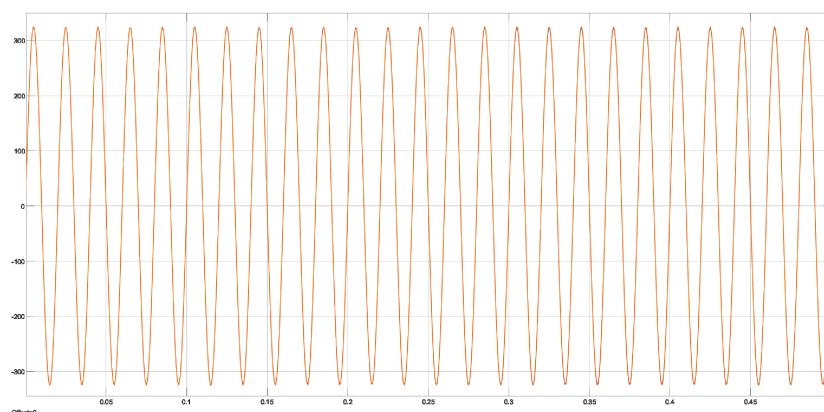


Figura 31: *Tensió consigna i tensió que pateix la càrrega (V) al llarg de la simulació (CAS5)*

Pel que fa als errors sí que cal comentar que en un dels canvis en la càrrega presenten un pic de valor sobtat. Es pot observar a la figura 34, que representa l'error en el corrent. Ocórrer a l'instant 0,4 segons, el moment en què una de les càrregues es desconnecta. Tot i això, no és un pic de valor elevat. En l'error de tensió aquest pic és més petit.

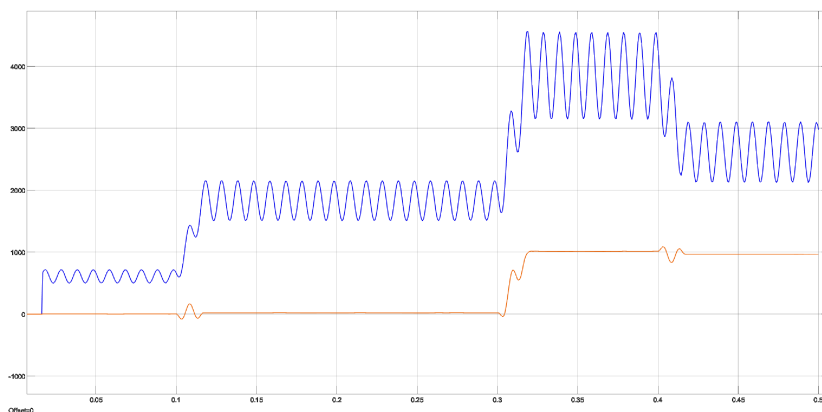


Figura 32: Potències activa (W) i reactiva (VAr) consumides al llarg de la simulació (s) (CAS5)

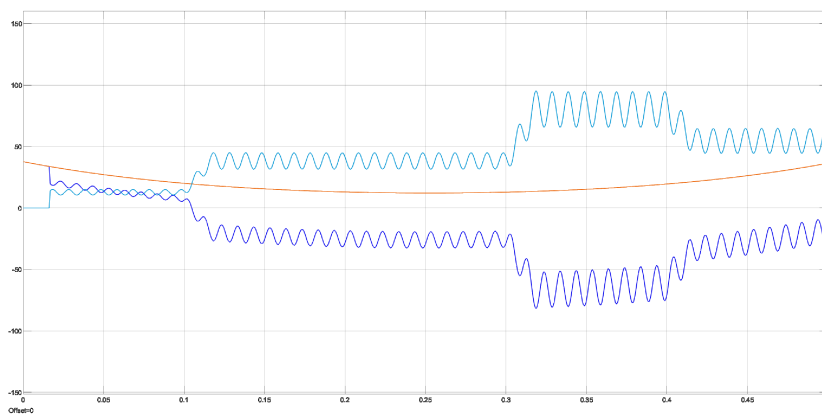


Figura 33: Corrents a la banda de contínua (A) al llarg de la simulació (CAS5)

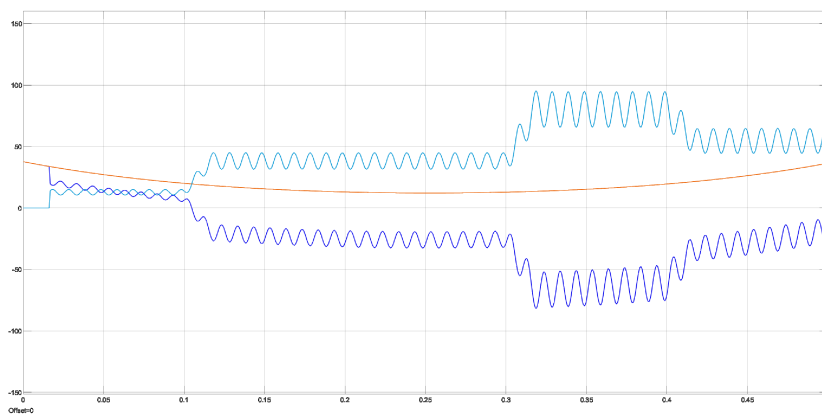


Figura 34: Error en la consigna de corrent (A) al llarg de la simulació (s) (CAS5)

5 CONCLUSIONS

Una conclusió bastant general del treball és que és molt complicat implementar un sistema de generació com el treballat. Com s'ha vist, la velocitat del vent és una variable altament impredecible i amb molta variabilitat. Això implicaria molta incertesa a l'hora de fer estudis de viabilitat.

En l'estudi de caràcter general que s'ha fet s'ha vist que, tractant-se d'un domicili no habitual, un generador podria arribar a cobrir les necessitats energètiques en llargs períodes, per alhora s'ha vist que pel mateix període de l'any en anys consecutius, la diferència entre la producció és molt gran. Concretament, els tres primers mesos de l'any 2018 és més d'un 50% més alta que en el mateix període de 2017. És difícil assegurar doncs, que un sistema d'aquestes característiques podria abastir en la seva totalitat la demanda elèctrica de l'habitatge. En tot cas, caldria disposar de sistemes d'emmagatzematge amb molta capacitat per fer front a les desigualtats de producció que tindrien lloc.

En aquest treball s'ha plantejat l'hipotètic cas que la instal·lació no estigui connectada a la xarxa. Si no fos el cas, donat que els nivells de producció i consum són d'ordres similars sí que resultaria interessant l'ús d'un generador d'aquestes característiques, ja que el fet d'estar connectat a la xarxa asseguraria disposar d'energia si es donessin llargs períodes de falta de vent, però probablement, veient les dades sobre producció i consum, no seria habitual haver de recórrer a la xarxa general.

Pel que fa al modelatge del convertidor i el control, l'esquema plantejat compleix amb tots els requeriments. En tot moment el controlador és capaç d'assegurar que la tensió en borns de la càrrega és la desitjada. A més, és capaç d'adaptar-se a canvis bruscs en la càrrega sense alterar de forma notòria la tensió a la càrrega.

El model que representa la càrrega en sí també s'adequa a la representació de la realitat que es buscava. El model accepta l'ús de càrregues resistives i inductives sense problema i els corrents i tensions que s'observen en aquests casos són sempre els esperats, amb els retards pertinents a cada combinació de resistències i inductàncies. Els interruptors d'aquestes càrregues també funcionen com és esperat, sense pics de corrent en el moment de la commutació.

Les potències consumides per la càrrega també són les esperades. En ser la tensió un senyal altern té la forma $\sqrt{2}V_{ef} \cdot \sin(2\pi ft)$, i el corrent, en ser un senyal altern amb un desfasament respecte la tensió, es pot expressar com $\sqrt{2}I_{ef} \cdot \sin(2\pi ft - \phi_0)$. Llavors, la potència instantània és $2V_{ef}I_{ef} \cdot \sin(2\pi ft) \cdot \sin(2\pi ft - \phi_0)$. Coneixent la relació $\sin(a) \cdot \sin(b) = \frac{\cos(a-b) - \cos(a+b)}{2}$, es pot expressar la potència instantània com $V_{ef}I_{ef}(\cos(\phi_0) + \cos(4\pi ft - \phi_0))$, que és una potència oscil·lant però amb un valor fix ($\cos(\phi_0)$ és constant) i una freqüència el doble que la de la tensió i el corrent, i és el que s'ha obtingut.

Els errors són petits, però com ja s'ha comentat no s'anul·len mai a causa de la naturalesa oscil·lant dels senyals. Com s'ha pogut veure no arriben a valer més de 2V, motiu pel qual s'han considerat errors assumibles però que obliguen a ajustar permanentment el valor de tensió de la càrrega. Per millorar el controlador es podria

implementar un controlador ressonant, que permetria que els errors esdevinguessin zero mentre no s'alterés el sistema, cosa que amb el control aquí proposat no passa.

Per últim, en la banda de contínua les simulacions han sigut satisfactòries pel que fa a la potència generada o absorvida per la bateria, però s'han observat corrents que dificultarien el bon funcionament d'un sistema. I és que forçant que la potència sigui igual a banda i banda del convertidor s'obtenen corrents que oscil·len de la mateixa manera que ho fa la potència a la banda d'alterna. Com també s'ha comentat, aquest fet no és bo per la bateria.

A part de la naturalesa oscil·lant que tenen, el valor dels corrents és una mica baix. El fabricant de la bateria que s'ha agafat com a guia recomana un corrent de càrrega de 45A, que pugui arribar fins un màxim de 75A. Tot i que és d'un ordre de magnitud equivalent, el corrent que proporciona l'aerogenerador serà inferior, en la majoria de casos, als recomenats pel bon funcionament de la bateria. Quan genera la màxima potència proporciona un corrent de 41A, que és correcte, però en molts casos el corrent proporcionat per l'aerogenerador serà significativament inferior.

En els casos de descàrrega, com es pot veure en diferents casos de simulació, el corrent requerit a la bateria és del voltant dels 50A, per tant en aquest cas sí que seria un corrent assumible per la bateria.

En cap moment el fabricant marca un corrent mínim de funcionament, sinó un rang de funcionament correcte. Si la bateria escollida no pogués treballar amb corrents baixos, d'entre 5 i 10A, s'hauria de canviar l'elecció d'aquesta. En tot cas, el motiu de l'elecció d'una bateria en aquest treball ha estat partir de dades reals per fer més verosímils les simulacions, ja que entrar en detall en la busca d'una bateria per una instal·lació així requeriria, a més, un anàlisi econòmic que no és l'objecte d'aquest treball.

6 PRESSUPOST

El pressupost del projecte se separa en el salari de qui l'ha realitzat i tot el material necessari per a elaborar-lo.

6.1 Costos de personal

Per a elaborar tals costos s'ha partit del salari que marca com a mínim el conveni col·lectiu nacional d'empreses d'enginyeria i oficines d'estudis tècnics. Per a un diplomad o titulat de primer cicle universitari aquest sou és de 1253,16€ nets mensuals amb 14 pagues l'any. Tenint en compte una retenció per la Seguretat Social del 6,4% (assumint un contracte temporal) i realitzant 12 pagues enlloc de 14, queda un sou brut de 8,87€/h. Per la realització d'aquest pressupost s'ha adoptat un sou de 9€/h. Els costos de personal es poden veure a la taula 3.

| Concepte | Sou brut per hora [€/h] | Temps dedicat (h) | Cost(€) |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------|-------------|
| Recerca | 9 | 100 | 900 |
| Simulació i desenvolupament | 9 | 170 | 1530 |
| Redacció | 9 | 50 | 450 |
| Subtotal | | 320 | 2880 |
| IVA(21%) | | | 605 |
| Total | | | 3485 |

Taula 3: *Costos de personal*

6.2 Costos de material i programari

Els costos de material i programari es poden veure detallats a la taula 4. Pel que fa al programa Minitab, s'ha inclòs un lloguer de la llicència per sis mesos, alternativa a la compra d'aquesta que ofereix la mateixa empresa.

No s'ha fet gaire ús de material d'oficina, però s'han utilitzat bolígrafs, fulls en blanc, etc. que també es veuen reflectits en el pressupost. Dins a extres, hi ha inclòs els costos d'impressió, enquadernament, etc.

6.3 Cost total

A partir dels costos detallats anteriorment s'ha elaborat un pressupost total (figura 5).

| Concepte | Cost unitari[€/ut] | Unitats | Cost(€) |
|-----------------------------|--------------------|---------|-------------|
| Ordinador personal | 800 | 1 | 800 |
| Matlab®2019 (Academic use) | 500 | 1 | 500 |
| Minitab®2016 (Academic use) | 28 | 1 | 28 |
| Material d'oficina | | | 15 |
| Extres | | | 30 |
| Subtotal | | | 1373 |
| IVA(21%) | | | 288 |
| Total | | | 1661 |

Taula 4: *Costos de material*

| Concepte | Cost[€] |
|--------------------------------|-------------|
| Cost de personal | 3485 |
| Cost de material | 1661 |
| Cost total (IVA inclòs) | 5146 |

Taula 5: *Cost total*

7 BIBLIOGRAFIA

1. Egea A, Junyent A, Gomis O (2011) Active and Reactive Power Control of Grid Connected Distributed Generation Systems
2. Cheah M (2013) Implementació d'una microxarxa monofàsica basada en convertidors de tipologia VSC
3. Yazdani A, Iravani R (2010) Voltage-Sourced Converters in Power Systems
4. http://een.iust.ac.ir/profs/Shamaghdari/MPC/Lectures/lecture_IMC.pdf
5. http://www.ugr.es/atv/SRD/transparencias_SRD_2.pdf
6. <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/pll-phase-locked-loop/tutorial-primer-basics.php>
7. <http://eoliccat.net/levolucion-de-leolica-a-espanya/>
8. <https://www.cnmc.es/ambitos-de-actuacion/energia/mercado-electrico>
9. <https://autosolar.es/aerogeneradores>
10. <https://www.solarreviews.com/blog/are-li-ion-or-lead-acid-batteries-better-for-home-energy-storage>
11. <https://www.cclcomponents.com/rolls-battery-26kwh-6v-546ah-48v-flooded-deep-cycle-battery-bank>
12. <https://www.altenergymag.com/article/2018/04/lead-acid-batteries-for-solar-storage/28297/>
13. <https://www.barriolapinada.es/baterias-almacenamiento-energia/>
14. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70692/fichero/10+Baterias+para+Almacenamiento+de+Energ%C3%ADa.pdf>
15. https://www.eldiario.es/alternativaseconomicas/Adios-impuesto-sol_6.789931036.html
16. <https://www.elperiodico.com/es/mas-innovacion/20181017/la-breve-historia-del-impuesto-al-sol-7093609>
17. <http://www.boe.es>
18. https://www.ree.es/sites/default/files/11_PUBLICACIONES/Documentos/ree_abril.2019.pdf
19. https://www.diariorenovables.com/2019/01/generacion-electrica-en-espana-2018_17.html
20. <https://instalacionesyeficienciaenergetica.com/normativa/normativa-electrica/reglamento-baja-tension.pdf>
21. http://www.cgtcatalunya.cat/fedbanca/wp-content/uploads/2018/04/xviii_conveni_collectiu_empreses_enginyeria_i_oficines_estudis_tecnicos.pdf