



GRAU EN ENGINYERIA DE TECNOLOGIES INDUSTRIALS

Memòria del Treball de Fi de Grau

---

# MODELITZACIÓ I SIMULACIÓ D'UN AEROGENERADOR DE TIPUS 4

---

CONVOCATÒRIA: 2021-2022

AUTOR: JORDI CAVERO SIBERA

DIRECTOR: ORIOL GOMIS-BELLMUNT



# RESUM

El present treball consisteix en la modelització dels diferents elements que intervenen en el funcionament d'un aerogenerador de tipologia *direct-drive* PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*), és a dir, amb generador síncron d'imants permanents (GSIP) de transmissió directe (sense caixa de transmissió). Concretament es descriuen diferents models per: la velocitat del vent, la turbina eòlica, el generador síncron d'imants permanents, el convertidor *back-to-back* i la xarxa elèctrica. Amb aquests elements es simula el comportament d'un aerogenerador connectat a la xarxa.

Una altra part important del projecte és la implementació d'estratègies de control que permeten la regulació de les diferents variables del sistema, com poden ser els voltatges, intensitats i potències involucrades en el sistema. Les principals estratègies que s'estudien són; el control de la potència òptima, el control de l'angle de Pitch i el control davant de sots de tensió.

Un cop descrit tot el model i el sistema de control es simularà el model complet de la turbina eòlica enfront de diferents situacions, com poden ser augments sobtats de la velocitat del vent, sots de tensió a la xarxa, etc. Analitzant els resultats d'aquestes simulacions s'extrauran conclusions sobre el funcionament dels aerogeneradors.

Finalment, també s'inclou un anàlisi de l'impacte ambiental que pot produir la instal·lació d'un parc eòlic al mar (*offshore*) i també un estudi econòmic valorant el cost real que podria suposar la seva instal·lació.



# ÍNDEX

1.	GLOSSARI .....	6
1.1	Símbols.....	6
1.2	Subíndexs o superíndexs .....	8
1.3	Acrònims .....	8
2.	INTRODUCCIÓ.....	9
2.1	UNA MIRADA AL PRESENT DE LES ENERGIES.....	9
2.2	TIPUS D'AEROGENERADORS.....	13
3.	ESQUEMA GENERAL I SUBSISTEMES.....	14
4.	MODELITZACIÓ.....	15
4.1	VENT .....	15
4.1.1	<i>Origen del vent.....</i>	15
4.1.2	<i>Mapes eòlics a casa nostra .....</i>	17
4.1.3	<i>Modelització del vent .....</i>	19
4.2	TURBINA.....	22
4.2.1	<i>Principis aerodinàmics.....</i>	22
4.2.2	<i>Maximització del paràmetre <math>C_p</math>.....</i>	27
4.2.3	<i>Elecció del tipus de generador .....</i>	31
4.3	GENERADOR SÍNCRON D'IMANTS PERMANENTS (GSIP).....	40
4.3.1	<i>Classificació dels GSIP.....</i>	43
4.3.2	<i>Funcionament del generador .....</i>	45
4.3.3	<i>Modelització .....</i>	46
4.4	CONVERTIDOR.....	50
4.4.1	<i>Sinusoidal PWM (SPWM).....</i>	53
4.4.2	<i>El nostre model de convertidor .....</i>	56
4.4.3	<i>Transformada de Park .....</i>	57

4.5	XARXA ELÈCTRICA .....	58
5.	CONTROL.....	60
5.1	DESCRIPCIÓ DEL SISTEMA. ESQUEMA DE CONTROL .....	60
5.1.1	<i>Banda xarxa</i> .....	64
5.1.2	<i>Banda generador</i> .....	72
5.1.3	<i>Control Potència Òptima - MPPT</i> .....	77
5.1.4	<i>Control de l'Angle de Pitch</i> .....	81
6.	MODELAT DE L'AEROGENERADOR .....	92
6.1	Modelat de la banda de la xarxa .....	93
6.1.1	<i>Modelat del bloc connectat a la xarxa</i> .....	93
6.1.2	<i>Modelat del bloc del subsistema PLL</i> .....	95
6.1.3	<i>Modelat del bloc del sistema de control del voltatge</i> .....	96
6.1.4	<i>Modelat del bloc de control de corrent (banda xarxa)</i> .....	97
6.1.5	<i>Modelat del bloc PWM (banda xarxa)</i> .....	98
6.1.6	<i>Modelat del bloc del balanç de potències (banda xarxa)</i> .....	99
6.2	MODELAT DE LA BANDA DEL GENERADOR .....	99
6.2.1	<i>Modelat del bloc del convertidor per la banda del generador</i> .....	99
6.2.2	<i>Modelat del bloc del generador GSIP</i> .....	100
6.2.3	<i>Modelat del bloc de la turbina</i> .....	102
6.2.4	<i>Modelat del bloc de control de potència òptima</i> .....	104
6.2.5	<i>Modelat del bloc MPPT</i> .....	105
6.2.6	<i>Modelat dels blocs del control de corrent (banda generador)</i> .....	106
6.2.7	<i>Modelat del bloc del balanç de potències (banda generador)</i> .....	109
7.	SIMULACIÓ I RESULTATS.....	110
7.1	COMPROVACIÓ PRÈVIA DEL FUNCIONAMENT DEL MODELAT .....	110
7.1.1	<i>Paràmetres utilitzats</i> .....	111
7.1.2	<i>Potències i rendiments de l'aerogenerador</i> .....	111
7.1.3	<i>Funcionament del convertidor back-to-back</i> .....	113

7.1.4	<i>Simulació de la transmissió mecànica</i> .....	118
7.1.5	<i>Funcionament de la potència òptima</i> .....	118
7.2	<b>RESULTATS AMB VENT SENSE TURBULÈNCIES</b> .....	120
7.2.1	<i>Velocitat constant</i> .....	121
7.2.2	<i>Graó de velocitat</i> .....	124
7.2.3	<i>Velocitat creixent (rampa)</i> .....	126
7.3	<b>ESQUEMA DE MODEL COMPLET</b> .....	129
8.	<b>CONCLUSIONS</b> .....	130
9.	<b>AGRAÏMENTS</b> .....	131
10.	<b>REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES</b> .....	132
10.1	<b>PRINCIPALS REFERÈNCIES</b> .....	132
10.2	<b>BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTÀRIA</b> .....	134

# 1. GLOSSARI

## 1.1 Símbols

$t$	Temps
$T$	Període de mostreig
$z$	Altura de l'aerogenerador
$z_0$	Paràmetre per la tipologia del terreny
$C_p$	Coeficient de potència
$c_{1, \dots, c_9}$	Constants del coeficient de potència
$\dot{m}$	Cabal màssic d'aire
$A$	Àrea escombrada per les pales de l'aerogenerador
$R$	Radi de la turbina (longitud de les pales)
$\omega_t$	Velocitat de rotació de la turbina eòlica
$v_w$	Velocitat del vent
$P$	Potència activa
$Q$	Potència reactiva
$r$	Resistència òhmica
$L, l$	Inductàncies
$V$	Voltatges en DC
$v$	Voltatges en AC
$I$	Intensitats en DC
$i$	Intensitats en AC
$V_{ef}$	Voltatge eficaç
$V_{pic}$	Voltatge de pic
$\theta$	Angle elèctric de la xarxa
$\omega_z$	Pulsació elèctrica de la xarxa
$E_{dc}$	Voltatge del bus de contínua
$C$	Capacitat del condensador (part DC del convertidor)
$P_{ac}$	Potència de la part AC del convertidor
$P_{dc}$	Potència de la part DC del convertidor
$I_{dcm}$	Intensitat provinent de la banda del generador, va al convertidor
$I_{dcl}$	Intensitat que surt del convertidor per entrar a la xarxa
$I_c$	Intensitat que circula pel condensador de capacitat C
$r_s$	Resistència òhmica del bobinats de l'estator

$[L_1]$	Matriu d'inductàncies del generador (no depèn de $\theta_r$ )
$[L_2]$	Matriu d'inductàncies del generador (depèn de $\theta_r$ )
$L_A$	Inductància que no depèn de $\theta_r$
$L_B$	Màxim valor de la inductància que varia amb $\theta_r$
$L_{ls}$	Inductància de fuga de l'estator
$\theta_r$	Angle elèctric del rotor del generador
$\omega_r$	Velocitat de rotació de l'angle elèctric del generador
$\theta_{s,abc}$	Flux magnètic que travessa els bobinats de l'estator (flux concatenat)
$\theta_m$	Flux magnètic per unitat de velocitat de rotació de l'angle elèctric ( $\omega_r$ )
$p$	Nombre de parelles de pols
$L_q, L_d$	Inductàncies en base dq0
$K_{cp}$	Constant de coeficient de potència màxim
$\lambda$	<i>Tip speed ratio</i>
$\beta$	Angle de Pitch
$\xi$	Coefficient d'amortiment
$\omega_n$	Freqüència natural
fz	Freqüència
$\tau$	Constant de temps
$\rho$	Densitat de l'aire
$\alpha$	Constant del controlador del llaç de corrent
$\Gamma$	Parell mecànic
$K_p$	Constant proporcional d'un controlador PI
$K_i$	Constant integral d'un controlador PI
$K_w$	Constant de realimentació d'un <i>anti-windup</i>
$\eta_{rec}$	Eficiència del rectificador
$\eta_{inv}$	Eficiència inversor
$\eta_{tot}$	Eficiència global (de turbina a la xarxa)
p.u.	<i>Per unit</i> (unitat adimensional)



## 1.2 Subíndexs o superíndexs

<i>abc</i>	Referent a les tres fases d'un sistema trifàsic
<i>dq0</i>	Referent a les tres components de la transformada de <i>Park</i>
<i>l</i>	Referent a la línia que connecta amb la xarxa
<i>z</i>	Referent a la xarxa
<i>s</i>	Referent a l'estator del generador
<i>r</i>	Referent al rotor del generador
<i>t</i>	Referent a la turbina eòlica
<i>n</i>	Indica valor normalitzat
*	Indica valor desitjat (o de referència)
$\wedge$	Indica valor estimat
<i>opt</i>	Indica que és un valor òptim
<i>max</i>	Indica un valor màxim
<i>min</i>	Indica un valor mínim

## 1.3 Acrònims

VSC	<i>Voltage Source Converter</i>
GSIP	Generador Síncron d'Imants Permanents
PMSG	<i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i>
AC	<i>Altern Current (Corrent Altern)</i>
DC	<i>Direct Current (Corrent Continu)</i>
IMC	<i>Internal Model Control</i>
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
IGBT	<i>Isulated Gate Bipolar Transistor</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
LVRT	<i>Low-Voltatge Ride-Through</i>

## 2. INTRODUCCIÓ

Al llarg d'aquest projecte es modelitzarà i simularà un aerogenerador eòlic d'eix horitzontal, concretament de tipus 4. Aquests aerogeneradors consten d'una turbina eòlica que genera energia elèctrica a través d'un GSIP (Generador Síncron d'Imants Permanents). El modelat serà amb transmissió directe, i estarà connectat a la xarxa elèctrica mitjançant un convertidor VSC *back-to-back*.

L'objectiu de tot plegat serà simular el model, exposant-lo a diferents situacions que representin la realitat, i així estudiar i avaluar la seva resposta. Durant el procés de modelització, s'entrarà en detall en els sistemes necessaris pel control de l'aerogenerador en aquestes situacions.

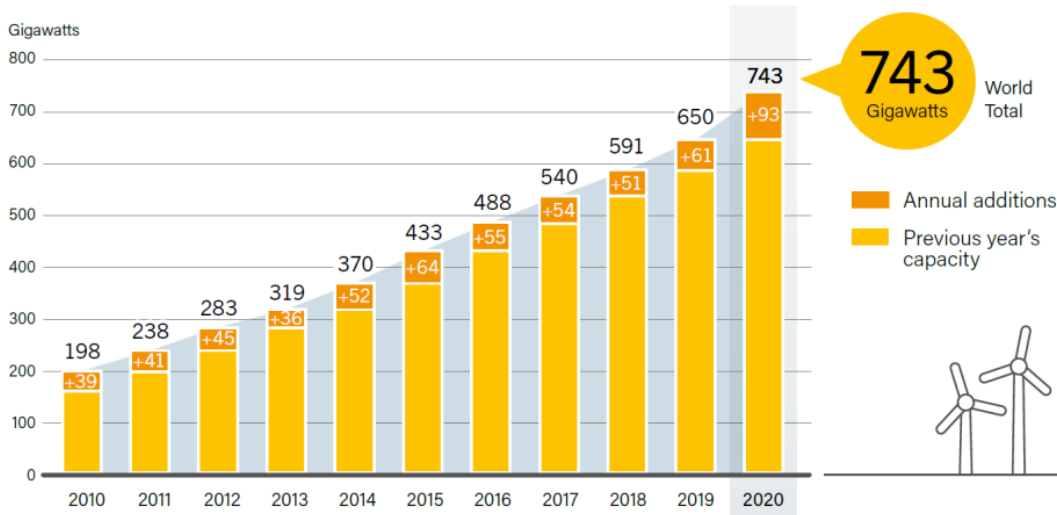
Pel que fa als motius pels quals s'ha triat aquest tema, essencialment es basen pel gran interès personal en l'àmbit de les energies renovables i en l'aprenentatge d'ús de programes simuladors, com MATLAB-Simulink. A més a més, en els darrers anys ha crescut enormement l'interès mundial i la importància de l'energia eòlica, fet que ha dut a molts països a invertir-hi cada vegada més, la qual cosa dona peu a la realització de nous projectes professionals.

És per aquest motiu que també s'ha cursat, paral·lelament a la realització d'aquest treball, l'assignatura optativa de Generació Elèctrica Eòlica. Aquest binomi entre l'assignatura i la documentació a nivell individual ha permès adquirir els coneixements necessaris per a la realització d'aquest treball.

### 2.1 UNA MIRADA AL PRESENT DE LES ENERGIES

Si mirem al present, l'aposta mundial per les energies renovables en general ha augmentat molt els últims anys degut a la creixent preocupació pel canvi climàtic, amb excessiva dependència d'uns combustibles fòssils (carbó, gas, petroli, etc.) que cada vegada seran més escassos. Segons els estudis, en els últims 10 anys la potència eòlica instal·lada a nivell mundial ha augmentat de manera espectacular, passant de 198 GW l'any 2010 a 743 GW l'any 2020. En la Figura 2.1 podem visualitzar gràficament aquesta notable evolució:

### Wind Power Global Capacity and Annual Additions, 2010-2020



Source: Renewables 2021 - Global Status Report, REN21

Figura 2.1. Evolució anual de la capacitat global de potència eòlica

(Font: [1])

Però el pas important està en que les energies renovables substitueixin l'espai que encara avui cobrim amb els combustibles fòssils. Tal com podem veure en la Figura 2.2, en aquest aspecte encara queda molt camí per fer.

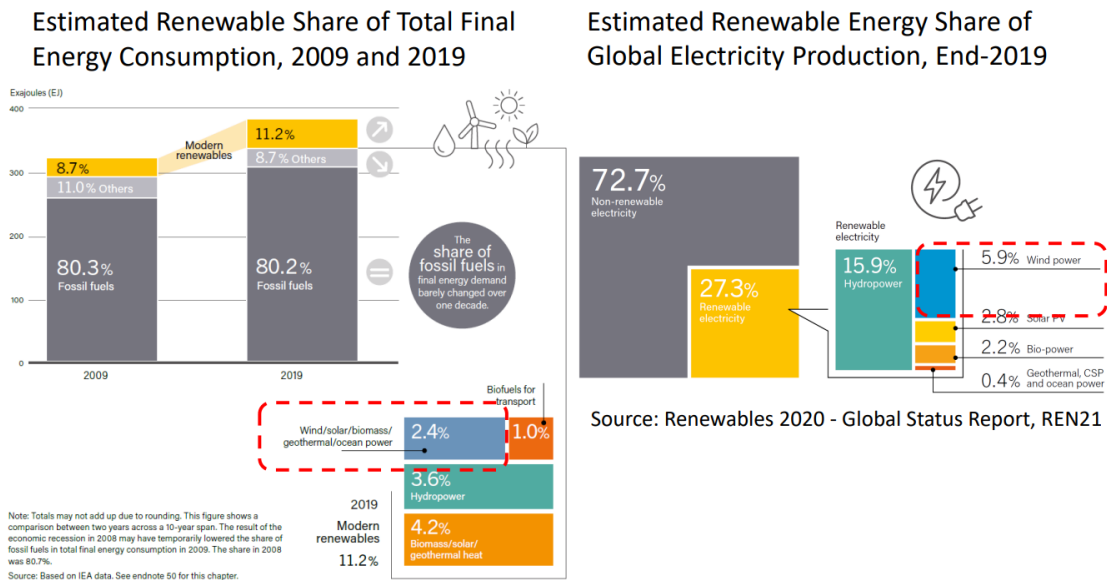


Figura 2.2. Comparació energia eòlica vs energies fòssils

(Font: [1])

No obstant, en multitud de països, principalment europeus, s'està treballant fermament pel desenvolupament de grans parcs eòlics. Fins fa poc, el principal escull era la gran quantitat d'hectàrees necessàries per a la ubicació d'aquestes instal·lacions. La solució s'ha trobat en les anomenades *Wind Power Offshore*, parcs eòlics submarins situats al mar. En la Figura 2.3 es representa l'augment exponencial de l'aposta per aquesta alternativa.

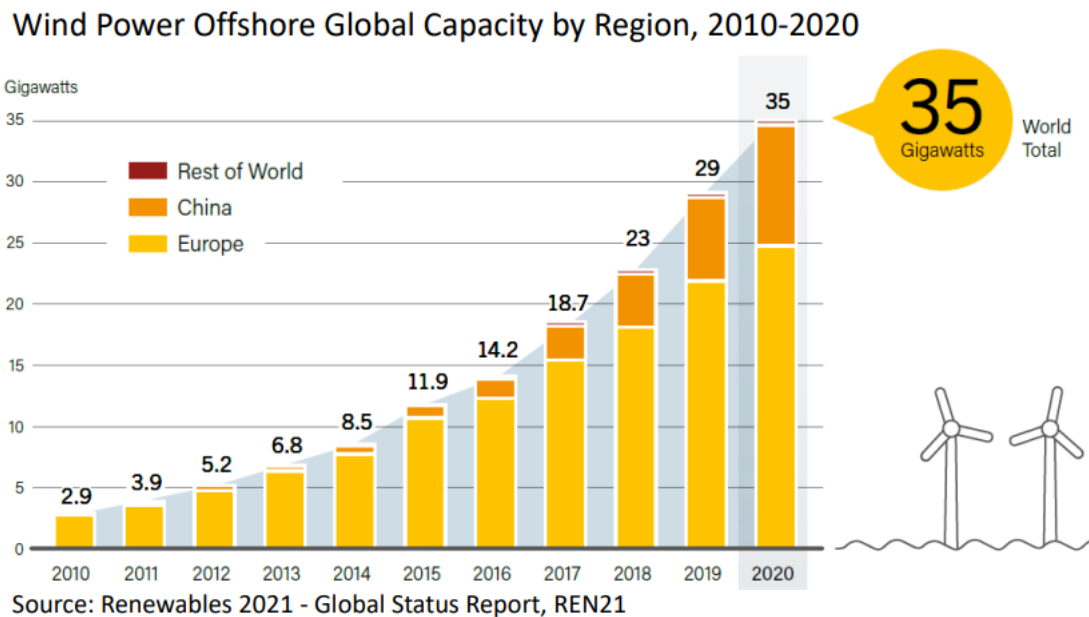


Figura 2.3. Representació de l'augment de l'aposta per l'energia eòlica  
(Font: [1])

Pel que fa a les grans potències mundials, com EEU i la Xina, engloben més del 50% de les instal·lacions *onshore* [2], si bé els EEUU no han invertit en parcs eòlics *offshore*. Tot i així, aquest percentatge no es correspon amb la despesa energètica total anual. Observant la Figura 2.4, veiem l'enorme consum anual tan sols en energia elèctrica de la Xina, i els EEUU que, conjuntament, és molt superior al conjunt de la resta de països. També podem observar que la tendència de consum dels principals països és clarament a la baixa, a excepció de la Xina, que registra una tendència a l'alça del 3,1%.

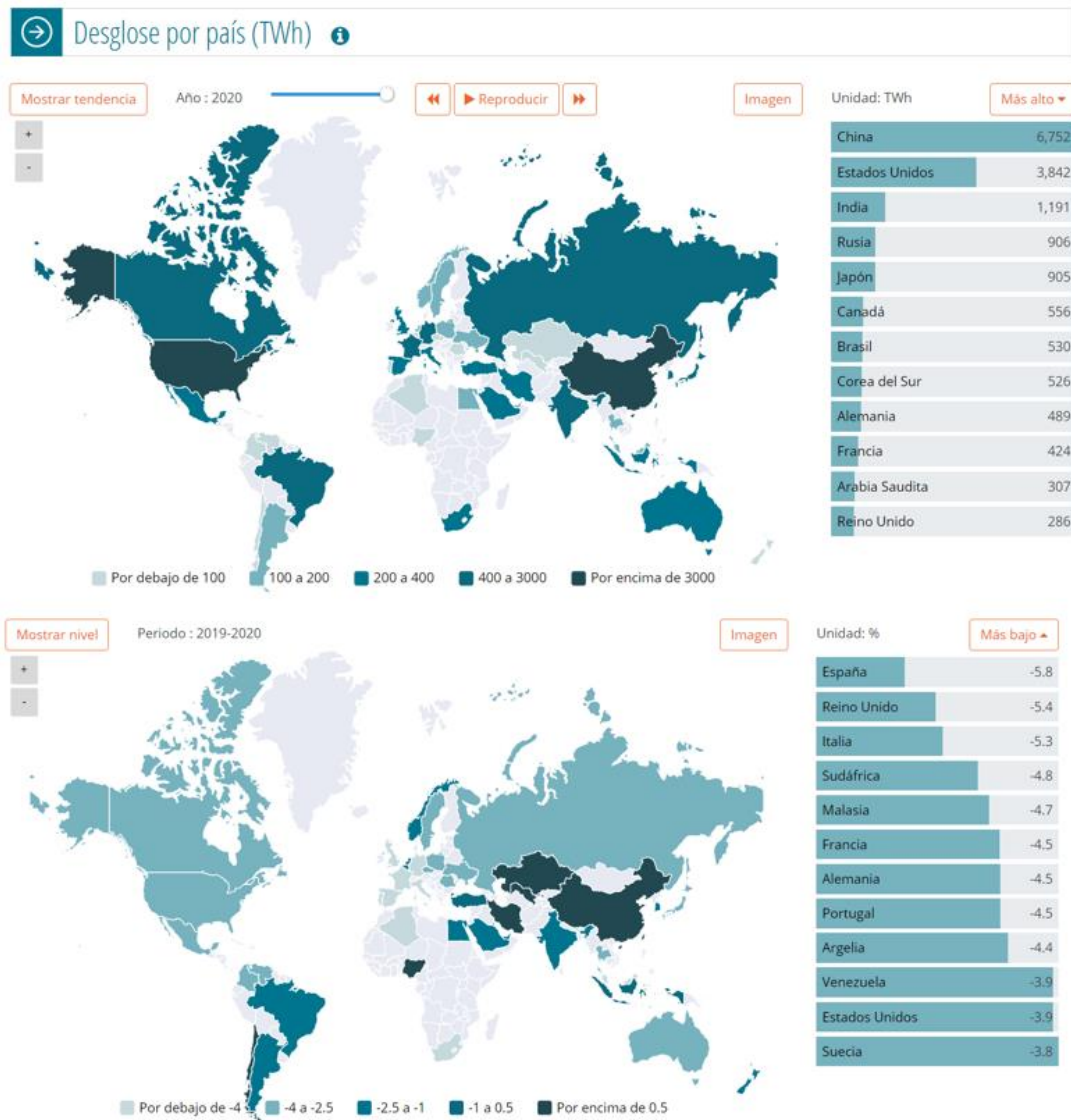


Figura 2.4. Consum d'energia elèctrica anual, per països

(Font: [2])

En el cas d'Espanya, la importància de l'energia eòlica també és molt gran. A la Figura 2.5 es veu com a l'any 2020 es va cobrir un 21,9% de la demanda amb energia eòlica, sent la segona font d'energia, només per sota de l'energia nuclear.



Figura 2.5. Xifres del sector eòlic a Espanya, període 2020

(Font: [3])

A més a més, es pot observar que Espanya es troba al Top5 en el ranking dels països amb més potència eòlica instal·lada a nivell mundial i en el ranking de futurs projectes a nivell europeu.

## 2.2 TIPUS D’AEROGENERADORS

D’entre les diferents tipologies d’aerogeneradors existents actualment s’estudiaran els aerogeneradors amb GSIP de transmissió directe. Aquesta tipologia ha anat en augment degut a la creixent aposta pels parcs eòlics submarins (*offshore*), situats al mar. Tot i que pot ser més cara, també té certs avantatges que poden servir per estalviar esforços en manteniment i reparació d’avaries, que en el cas de parcs eòlics submarins poden ser molt costosos.

Més endavant, en l’apartat 4.2.3, s’estudien els diferents tipus d’aerogeneradors existents, per així establir les bases de la decisió sobre l’ús d’un GSIP per dur a terme aquest treball.

### 3. ESQUEMA GENERAL I SUBSISTEMES

L'estructura d'aquest treball es basa en presentar el model descrit per subsistemes. D'aquesta manera serà més senzill d'entendre i explicar. Aquest model es representarà a través de la plataforma MATLAB-Simulink, on el conjunt dels subsistemes formaran un sistema general que simularà l'aerogenerador.

Els subsistemes que es modelitzaran són els següents:

- Modelització de la velocitat del vent que rep l'aerogenerador.
- Model de la turbina (de velocitat del vent a energia mecànica).
- Model del generador (en aquest projecte es considera un generador síncron d'imants permanents o GSIP).
- Modelització d'un convertidor VSC *back-to-back*, amb dos convertidors, un AC/DC (o rectificador) i un DC/AC (o inversor).
- Modelització de la xarxa elèctrica.

Amb aquests subsistemes es pretén controlar els voltatges i les intensitats dels convertidors per tal de fer una extracció òptima de la potència del vent. També permet aportar energia a la xarxa de manera controlada. Tot plegat és possible gràcies al control dels convertidors, que seran els elements clau.

A la Figura 3.1 es pot veure l'esquema general del sistema a modelar. La turbina absorbeix l'energia del vent, i connecta directament al generador (*direct-drive*), prescindint així de la caixa de transmissió. Com es veurà, l'absència de caixa d'engranatges és un dels avantatges d'utilitzar un generador d'imants permanents.

La potència originada al generador es traspasa a la xarxa mitjançant el convertidor *back-to-back*, format pels dos convertidors VSC (*Voltage Source Converter*). La unió entre els dos convertidors s'anomena bus de contínua i està format per un condensador ( $C$ ), el voltatge del qual s'anomena voltatge de bus ( $E_{dc}$ ). Un control adequat d'aquests convertidors permetrà extreure la potència màxima en cada punt de funcionament, en funció de la velocitat del vent en cada moment. La connexió a la xarxa es fa a través d'inductàncies, que fan la funció de filtre.[36]

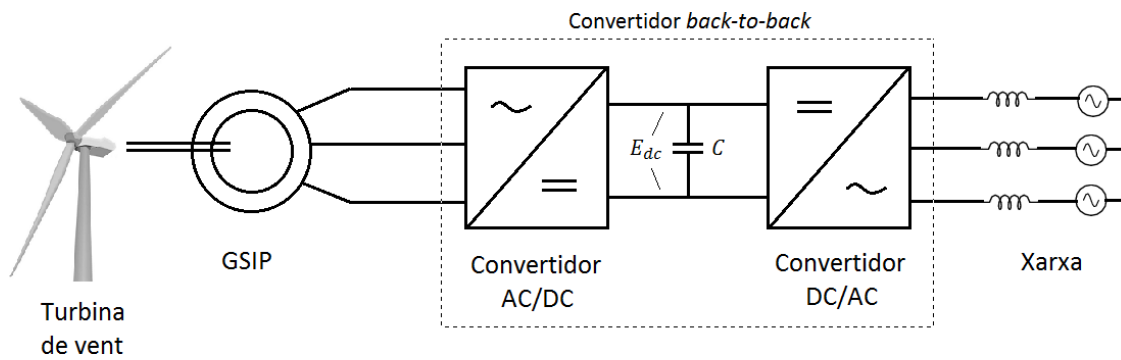


Figura 3.1. Esquema general de connexió dels subsistemes.

(Font: Elaboració pròpia)

## 4. MODELITZACIÓ

### 4.1 VENT

#### 4.1.1 Origen del vent

El propi moviment de la Terra (Coriolis) i la variació de temperatura originen unes diferències de pressió en l'atmosfera que, al seu temps, provoquen el moviment de l'aire a escala global. D'aquesta manera es formen els anomenats vents globals. A escala més local, aquest moviment de l'aire, que deriva en vent, és provocat pels canvis de temperatura en el període entre el dia i la nit.



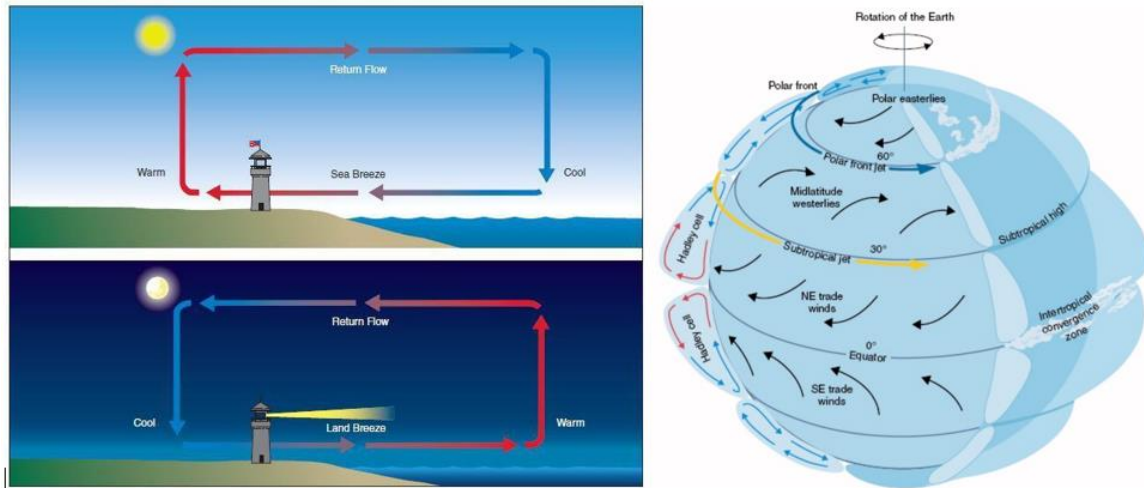


Figura 4.1. i 4.2. Cicle del vent i corrents globals d'aire

(Font: [4])

A la Terra, hi ha zones concretes on es donen especialment aquests canvis. Si ens focalitzem amb Europa, veiem que a la zona del Mar del Nord es concentra bona part de les ràfegues més potents i de forma regular. És precisament allà on trobem els parcs eòlics *offshore* més importants (Figura 4.3):

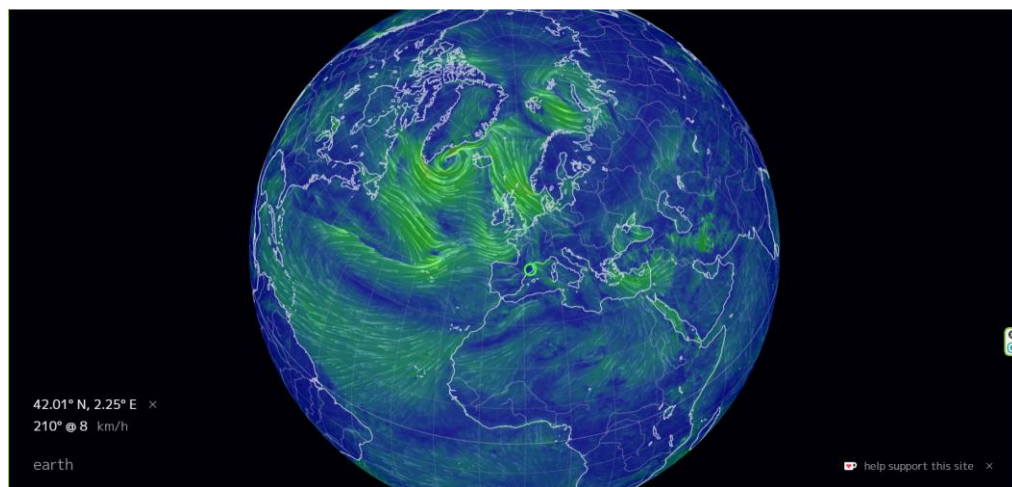


Figura 4.3. Corrents globals d'aire

(Font: [5])

Un altre factor important en la creació del vent a petita escala és l'orografia, és a dir, el relleu del terreny. El canvi de relleu comporta el xoc de les ràfegues de vent que hi incideixen perpendicularment, i dona lloc a zones de turbulència i cisalla, on els canvis de velocitat (acceleració) de l'aire deriven en vent (Figura 4.4).[4]

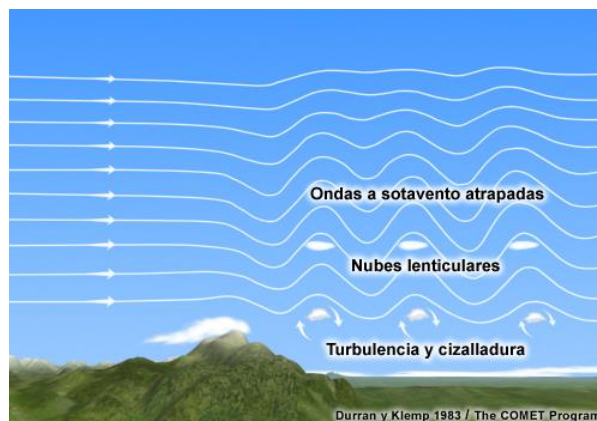


Figura 4.4. Representació de la influència del relleu en la propagació del vent

(Font: [6])

Aquestes situacions es donen de maneres molt diverses segons la situació geogràfica, doncs aquests canvis de velocitat no es donen igual en presència de boscos que en mar obert.

#### 4.1.2 Mapes eòlics a casa nostra

Si ens fixem en la situació a les nostres costes, es pot deduir que en poques zones seria factible la construcció d'un parc eòlic *offshore*. A més a més, hi ha altres factors igual d'importants que incideixen en aquesta decisió, com ara la presència d'espais naturals protegits en zones amb dades eòliques prometedores (Figures 4.5 i 4.6).

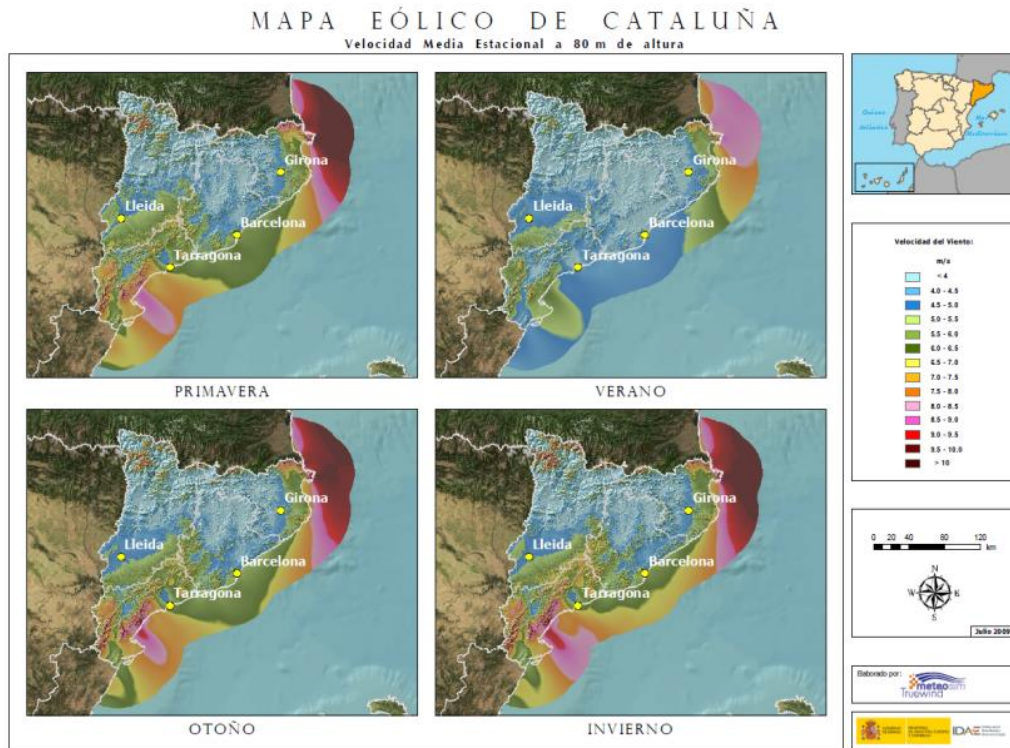


Figura 4.5. Mapa velocitats del vent a Catalunya  
(Font: [7])

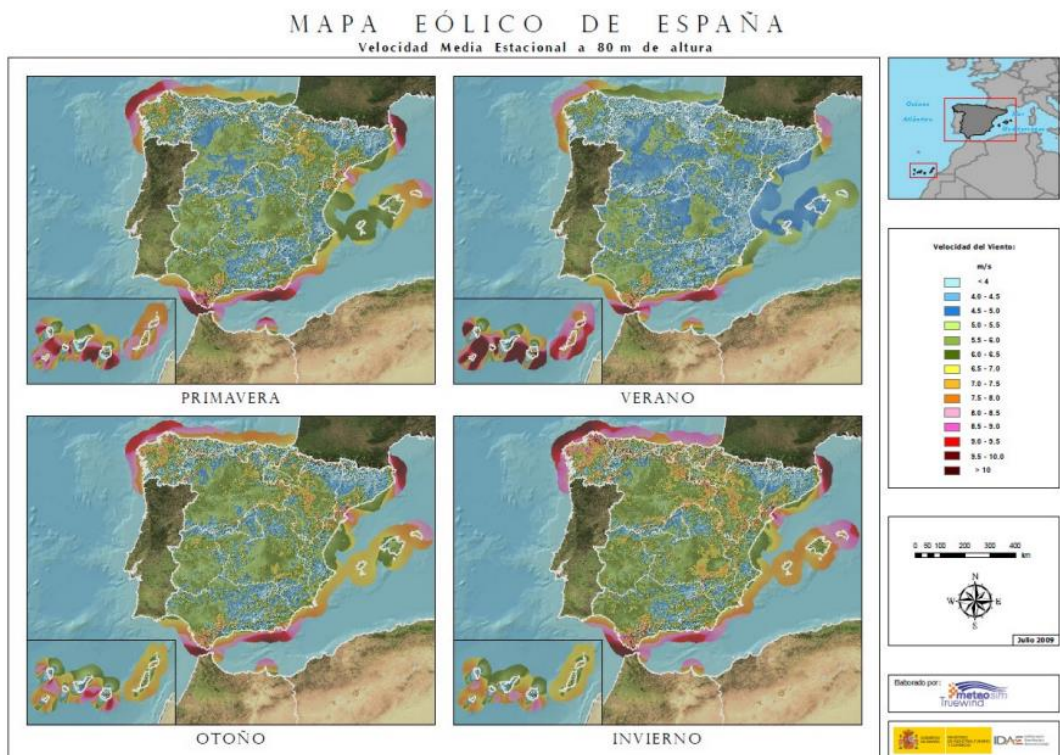


Figura 4.6. Mapa velocitats del vent a Espanya  
(Font: [7])

### 4.1.3 Modelització del vent

#### 4.1.3.1 Variabilitat del vent

Per dur a terme aquest treball, ha estat necessària la modelització de la nostra font d'energia: el vent. Dins de totes les classes d'aerogeneradors que s'esmenten més endavant, en l'apartat 4.2.3, el model proposat es basa en un aerogenerador d'eix horitzontal. Conseqüentment, el vent que cal estudiar és en direcció horitzontal.

Per iniciar l'estudi, es crea una distribució del vent a partir de dades existents, per tal d'obtenir un gràfic que mostrarà la probabilitat d'una velocitat del vent concreta en funció de l'àrea d'estudi.

Per fer-ho, es considera que el vent només bufa en una sola direcció, l'horitzontal, perpendicular a les aspes de la turbina eòlica.

El vent es pot modelitzar a partir de la distribució Weibull. La distribució Weibull utilitza 2 paràmetres a definir:

- El paràmetre de forma "k" (1-3)
- El paràmetre d'escala "c" (3,5-8 m/s)

A la Figura 4.7 s'observen els efectes d'aquests dos paràmetres, que determinen la forma de la distribució:

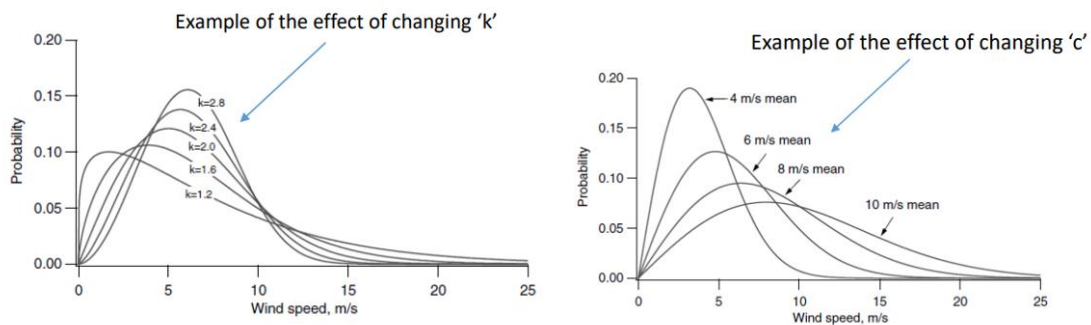


Figura 4.7. Esquemes per representar la influència dels paràmetres k i c  
(Font: [4])

A continuació es mostra l'Equació 4.1 de la distribució Weibull:

$$h(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \tag{Equació 4.1}$$



on  $v$  és la velocitat del vent i  $h$  la probabilitat.

Amb l'eina de MATLAB, s'ha realitzat un exemple de la distribució del vent a partir de dades reals. A la Figura 4.8 es pot estudiar l'histograma corresponent i la seva funció de probabilitat Weibull:

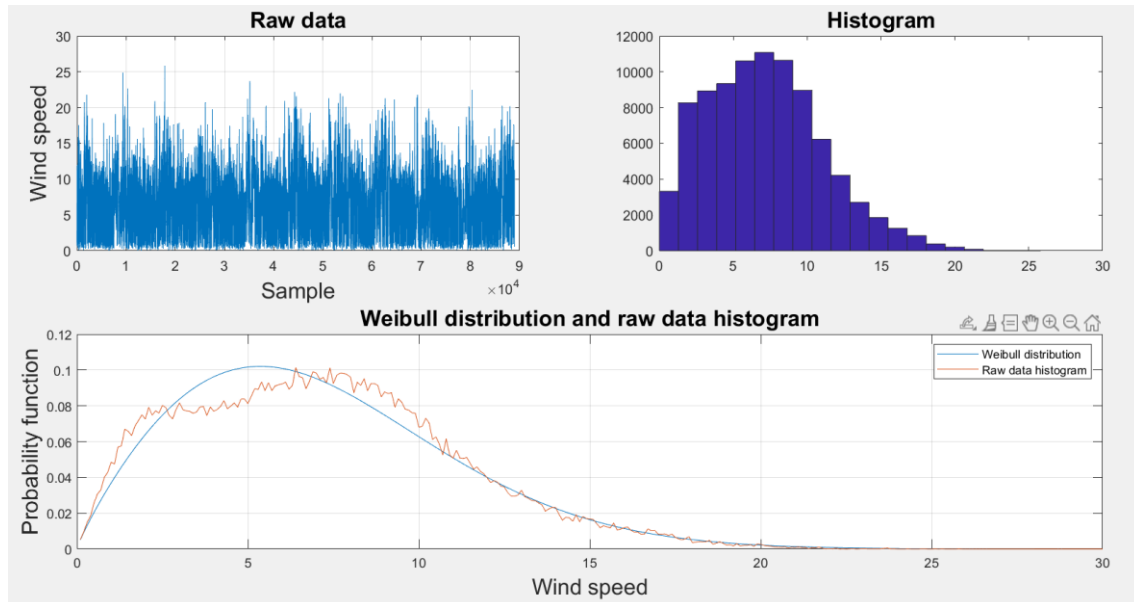


Figura 4.8. Exemple distribució del vent a partir de dades reals  
(Font: [4])

on les dades corresponen a les mesures horàries reals de 10 anys. Per aquesta distribució s'han fixat els valors  $c=8.0644$  m/s i  $k=1.8716$ . La mitjana de les dades és de 7.1723 m/s.

Amb aquests gràfics comprovem que la velocitat del vent oscil·la majoritàriament entre els 2 i els 13 m/s. Aquests valors seran molt útils per dissenyar l'aerogenerador, doncs caldrà determinar el rang de velocitats que ha de suportar per obtenir el màxim rendiment.

#### 4.1.3.2 Impacte de la rugositat del terreny

Com bé s'ha explicat, un dels factors més influents en l'impacte del vent pels aerogeneradors és la rugositat del terreny que els envolta. En aquest apartat s'estudia aquest impacte. La rugositat del terreny provoca la cisalla del vent, la qual es pot estudiar mitjançant la Llei de Prandtl.[4]

Per descriure la cisalla del vent amb la Llei de Prandtl s'utilitza la següent Equació 4.2:

$$v = \frac{v_{ref} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \tag{Equació 4.2}$$

On  $z_0$  correspon a la rugositat del terreny,  $z$  és l'elevació del punt d'estudi i  $v_{ref}$  la velocitat de referència del vent, per una alçada  $z_{ref}$  coneguda.

Aquest factor modifica el valor final de la velocitat del vent. Per tant, si es coneix les velocitats previstes associades a un punt concret, cal aplicar-hi la correcció corresponent a la rugositat del terreny i en funció a l'alçada que ens interessa. Per visualitzar-ho millor, s'ha estudiat l'impacte d'aquest factor amb dades reals- Utilitzant l'eina MATLAB, es compara la velocitat esperada en un punt a una alçada  $z_{ref}$  coneguda amb la velocitat corregida per la rugositat del terreny de la zona.

En l'apartat anterior s'ha explicat que, per modelitzar la velocitat del vent, s'utilitza la distribució Weibull. Notis que, dels dos paràmetres necessaris per definir aquesta distribució (c i k), tan sols cal corregir un d'ells, el paràmetre d'escala "c", relacionat amb la velocitat. Per contra, el paràmetre de forma "k" no exigeix cap correcció, doncs la rugositat del terreny no hi afecta.[4]

Sigui així, apliquem la correcció del paràmetre "c" amb l'equació 4.3, adaptada a partir de l'equació 4.2:

$$c = \frac{c_{ref} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)}$$

Equació 4.3

Per l'estudi utilitzem dades reals de velocitats, que correspondran als valors  $c_{ref}$ , obtingudes a una alçada de referència  $z_{ref} = 80 m$ , en un terreny amb rugositat  $z_0 = 2$  (zona lleugerament boscosa), i a una alçada  $z = 100 m$ . Els resultats obtinguts són:

<b>Valors amb paràmetres originals c i k</b>	$c = 8.6059 \text{ m/s}$ $k = 1.8765$
<b>Valors amb paràmetres <math>c=c_{corregit}</math> i <math>k=k</math></b>	$c_{corr} = 9.1265 \text{ m/s}$ $k = 1.8765$

### 4.1.3.3 Obstacles

Finalment, els obstacles són un 3r factor determinant per la producció de les turbines eòliques, i no necessàriament han d'estar a prop per causar un impacte notable.

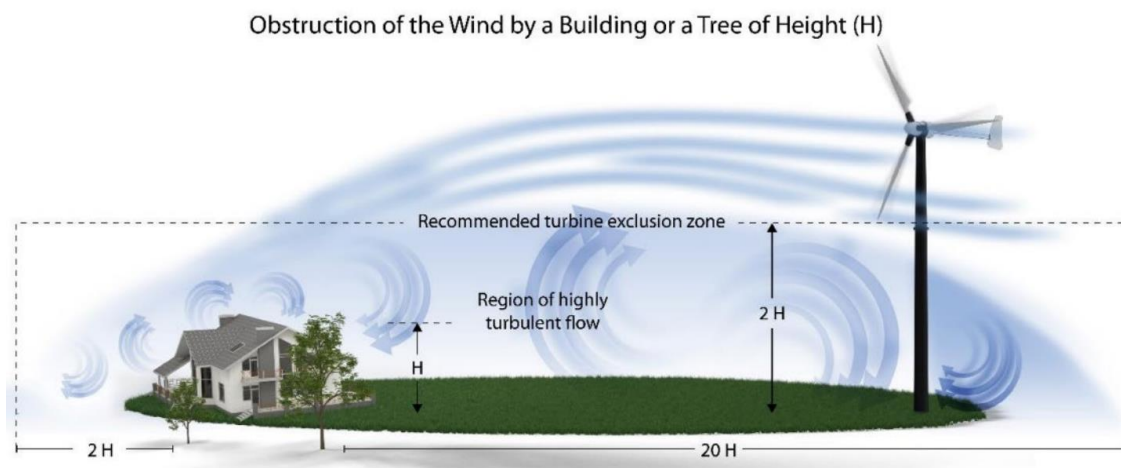


Figura 4.9. Exemple distribució del vent a partir de dades reals

(Font: [8])

Amb el coneixement i estudi de tots aquests factor d'impacte, es pot determinar una situació geogràfica per a les turbines eòliques tal que maximitzi l'extracció de potència.

## 4.2 TURBINA

### 4.2.1 Principis aerodinàmics

Per estudiar el funcionament de la turbina i la potència que en podem extreure, prèviament cal conèixer els principis aerodinàmics que ho regeixen. Partirem dels principis bàsics:

- Massa de l'aire en un cilindre de control (equació 4.4)

$$m = \rho A v \Delta t \quad \text{Equació 4.2}$$

$$dm = \rho A v dt \quad \text{Equació 4.3}$$

- Energia cinètica del vent (equació 4.5)

$$E = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} (\rho A v \Delta t) v^2 \quad \text{Equació 4.4}$$

$$dE = \frac{1}{2} \rho A v^3 \Delta t \quad \text{Equació 4.5}$$

- Potència del vent (equació 4.6)

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad \text{Equació 4.6}$$

A partir d'aquí, es calcula la potència màxima que pot capturar una turbina de vent. Es fa a partir de la llei de *Betz*, que calcula la màxima potència que es pot extreure del vent. L'energia cinètica del vent es pot expressar en forma de potència ( $P = E/t$ ) (Equació 4.7) mitjançant el cabal màssic ( $\dot{m}$ ) d'aire que travessa l'àrea d'escombrat de les pales de l'aerogenerador, que queda definit a la Figura 4.10. com *swept area*. [26]

El cabal màssic es pot calcular com el producte de la densitat de l'aire ( $\rho$ ), la velocitat del vent ( $v_{vent}$ ) i l'àrea que travessa ( $A$ ) (Equació 4.8). Substituint aquest cabal màssic a l'expressió anterior, s'obté l'expressió final del càlcul de la potència (Equació 4.9).

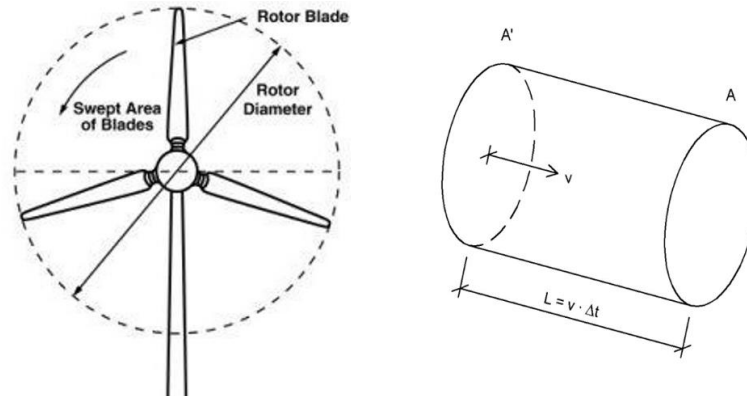


Figura 4.10. Representació de l'àrea d'escombrat (*Swept Area*) i el cilindre de control  
(Font: [9])

Però, quanta potència podem extreure amb una turbina de vent?

Per saber-ho, cal tenir en compte la pressió de l'aire i la seva velocitat. La capacitat de la turbina d'abstracció de potència del vent es determina amb un coeficient aerodinàmic adimensional, anomenat coeficient de potència ( $C_p$ ). El coeficient de potència representa la relació entre la potència que s'aprofita i la potència total del vent ( $C_p = P_{turbina}/P_{vent}$ ). Fixant la figura 4.11, es determinen les velocitats i àrees a inici, centre i final de la zona de control.

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} v_{vent}^2 \quad \text{Equació 4.7}$$

$$\dot{m} = \rho A v_{vent} \quad \text{Equació 4.8}$$

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho A v_{vent}^3 \quad \text{Equació 4.9}$$



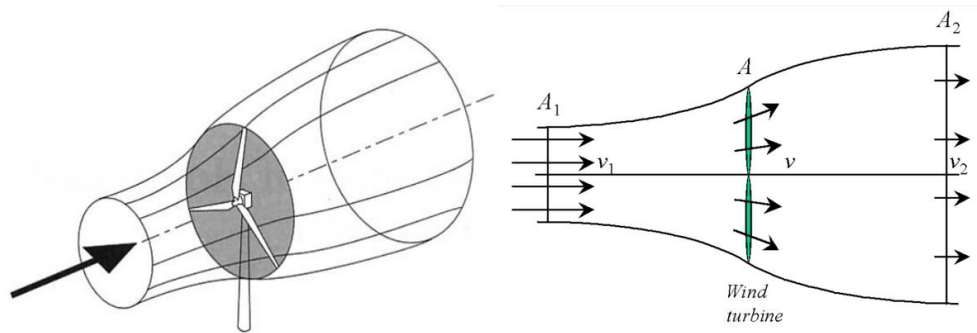


Figura 4.11. Representació del cilindre de control de la turbina

(Font: [4])

Aquest concepte correspon a la Llei de conservació de la massa, la qual es determina amb l'equació 4.10:

$$A_1 v_1 = A v = A_2 v_2 \quad \text{Equació 4.10}$$

Si ara es combina amb l'equació del cabal màssic (4.8), juntament amb l'equació 4.11 corresponent a l'expressió de la força:

$$\dot{m} = \rho A v_{vent} \quad \text{Equació 4.11}$$

$$F = |\bar{F}| = m a = \dot{m} \Delta t \frac{\Delta v}{\Delta t} = \dot{m} \Delta v = \rho A v (v_1 - v_2) \quad \text{Equació 4.12}$$

Serà necessari també l'expressió de la força en funció de les pressions (equació 4.13):

$$F = (P^+ - P^-) A \quad \text{Equació 4.13}$$

On cal determinar les expressions de P<sup>+</sup> i P<sup>-</sup> aplicant les equacions de Bernoulli en ambdós costats:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = P^+ + \frac{1}{2} \rho v^2 \quad \text{Equació 4.14}$$

$$P^- + \frac{1}{2} \rho v^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad \text{Equació 4.15}$$

Sabent que P<sub>1</sub>=P<sub>2</sub>, es pot deduir:

$$P^+ - P^- = \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_2^2) \quad \text{Equació 4.16}$$

Conseqüentment, la força es pot expressar com:

$$F = \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_2^2) A \quad \text{Equació 4.17}$$

S'igualen les equacions de la força 4.11 i 4.16, tal que:

$$\rho A v (v_1 - v_2) = \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_2^2) A \quad \text{Equació 4.18}$$

Fent les corresponents simplificacions, s'obté la fórmula simplificada de la velocitat:

$$v = \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad \text{Equació 4.19}$$

A partir d'aquí, es pot relacionar l'equació 4.18 amb l'equació de la potència extreta del vent:

$$P_{turbina} = F v = \left( \frac{1}{2} \rho A (v_1^2 - v_2^2) \right) \left( \frac{v_1 + v_2}{2} \right) \quad \text{Equació 4.20}$$

D'aquí, s'expressa el quocient  $v_2/v_1$  com una constant  $k$  :

$$P_{rotor} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \frac{1}{2} (1 + k) (1 - k^2) \quad \text{Equació 4.21}$$

$$\text{on } k = \frac{v_2}{v_1}$$

En la Figura 4.12 es representa gràficament la corba de la Potència de la turbina. D'allà s'observa que el valor de  $k$  corresponent al màxim valor de potència s'obté al punt  $k = 1/3$ :

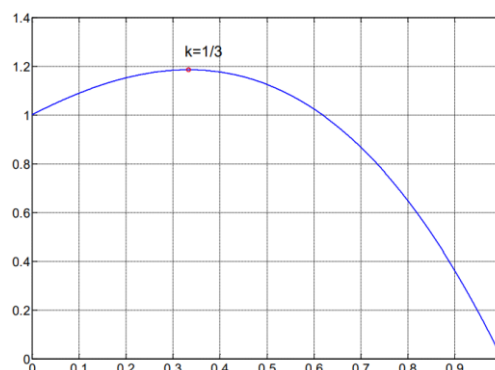


Figura 4.12. Representació gràfica potència de la turbina en funció del quocient  $k = v_2/v_1$

(Font: [4])

Per tant,  $P_{rotor}$  és màxima quan:

$$P_{turbina}^{max} = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \quad \text{Equació 4.22}$$

$$\text{on } P_{vent} = \frac{1}{2} \rho A v_1^3$$

$$\text{i per tant, } P_{turbina}^{max} = \frac{16}{27} P_{vent}$$

Com s'ha especificat anteriorment, el coeficient de potència  $C_p$  representa la relació entre la potència que s'aprofita i la potència total del vent, és a dir,  $C_p = P_{turbina}/P_{vent}$ . Maximitzant el paràmetre  $P_{turbina}$ , a l'hora maximitzem  $C_p$ , de tal manera que:

$$C_p = \frac{P_{turbina}}{P_{vent}}$$

$$P_{turbina} = C_p P_{vent} = C_p \frac{1}{2} \rho A v_1^3$$

Equació 4.23

$$\text{i per tant, } C_p = \frac{16}{27} = 0,5925$$

Aquest concepte correspon al límit de Betz, que és el màxim valor absolut que pot assolir  $C_p$ . Podem dir que aquest valor es trobaria per una turbina ideal, de la qual com a màxim se'n pot extreure un 59,26%, i tal fet no es pot obtenir a la pràctica.[26]

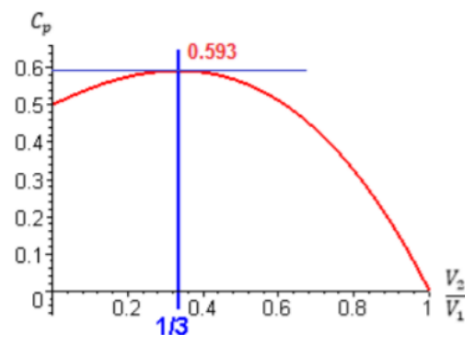


Figura 4.13. Representació gràfica paràmetre  $C_p$  en funció del quocient  $k = v_2/v_1$   
(Font: [10])

En conseqüència, el rendiment d'obtenció d'energia de la turbina es pot calcular com:

$$\eta = \frac{C_p}{C_{p_{Betz}}} \quad \text{Equació 4.24}$$

És important remarcar que el paràmetre  $C_p$  NO és constant. Com es veurà més endavant,  $C_p$  pot dependre de factors com l'angle de Pitch i la velocitat de rotació de la turbina.

#### 4.2.2 Maximització del paràmetre $C_p$

Com bé s'ha dit,  $C_p$  s'expressa mitjançant unes constants ( $c_1, \dots, c_9$ ) i depèn de dues variables:

- **L'angle de Pitch ( $\beta$ )**, que és l'angle que formen les pales respecte el seu eix longitudinal (veure Figura 4.16)
- El **tip speed ratio ( $\lambda$ )**, que es defineix com el quocient entre la velocitat de la punta de les pales i la velocitat del vent en cada moment.

Al ser una funció de dues variables, la representació del  $C_p$  esdevé una superfície.

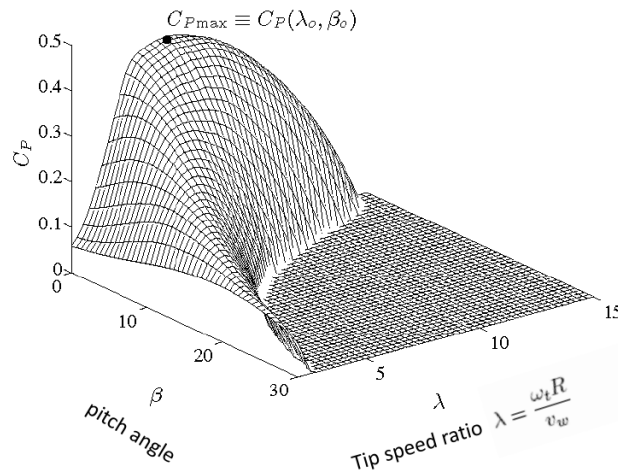


Figura 4.14. Representació gràfica paràmetre  $C_p$  en funció de  $\beta$  i  $\lambda$   
(Font: [11])

Es veu com els valors màxims del coeficient  $C_p$  es produeixen quan l'angle de Pitch és zero, és a dir, quan les pales de l'aerogenerador estan perpendiculars a la direcció del vent. A mida que va augmentant l'angle de Pitch el valor del coeficient de potència es va reduint considerablement. Com es veurà més endavant aquesta característica serà molt important pel control de la potència generada per la turbina de vent. Destacar també que el màxim valor del coeficient de potència no arriba a 0,5 i que, tal com s'ha comentat, en turbines reals acostuma a estar per sota del límit de Betz (0,5926). Pel que fa al *tip speed ratio*, es pot veure que el màxim  $C_p$  està situat entorn de  $\lambda = 7$ .

Hi ha moltes maneres de representar  $C_p$  com un model: des de considerar-lo una constant d'un estat estacionari, fins representar-lo a partir de taules de valors basades en dades reals mesurades. En aquest treball es considerarà el valor de  $C_p$  a partir de la següent expressió:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( c_2 \frac{1}{\lambda} - c_3 \beta - c_4 \beta^{c_5} - c_6 \right) e^{-c_7 \frac{1}{\lambda}} \quad \text{Equació 4.25}$$

On  $[c_1 \dots c_9]$  són paràmetres característics de la turbina. Aquests paràmetres s'obtenen a partir d'anàlisis estadístics amb dades mesurades d'un turbina real i amb simulacions d'elements finits. Per aquest treball, s'utilitzen els valors descrits en l'apartat 6.1.

Pel que fa als símbols  $\beta$  i  $\Lambda$ ,  $\beta$  representa l'angle de Pitch, mentre que  $\Lambda$  es defineix com:

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\lambda + c_8 \beta} - \frac{c_9}{1 + \beta^3} \quad \text{Equació 4.26}$$

On  $\lambda$  correspon al *tip speed ratio* (TSR), definit per:

$$\lambda = \frac{w_t R}{v_{vent}} \tag{Equació 4.27}$$

On  $w_t$  és la velocitat angular de la turbina,  $v_{vent}$  la velocitat del vent i R el radi de la turbina (considerat només com la longitud de la fulla).

De tots aquests conceptes i paràmetres, el TSR és d'especial importància pel disseny de la turbina. El *tip speed ratio* representa la proporció entre la velocitat del vent i la velocitat a la punta de la fulla de la turbina. Aquest concepte és clau perquè, si per exemple el rotor de la turbina girés massa lent la major part del vent passaria de llarg per l'espai entre les fulles, i no se n'extrauria la potència necessària. Per contra, si el rotor de la turbina girés massa ràpid, la turbina actuaria com un mur en front del vent.[26]

Per visualitzar la variació de la potència per a diferents velocitats del vent, s'ha realitzat una simulació amb dades d'un model concret de rotor (apartat 7), i s'ha graficat la funció Potència de la turbina en funció de la Velocitat de rotació, la qual influeix en el TSR i, conseqüentment, en el valor de  $C_p$ :

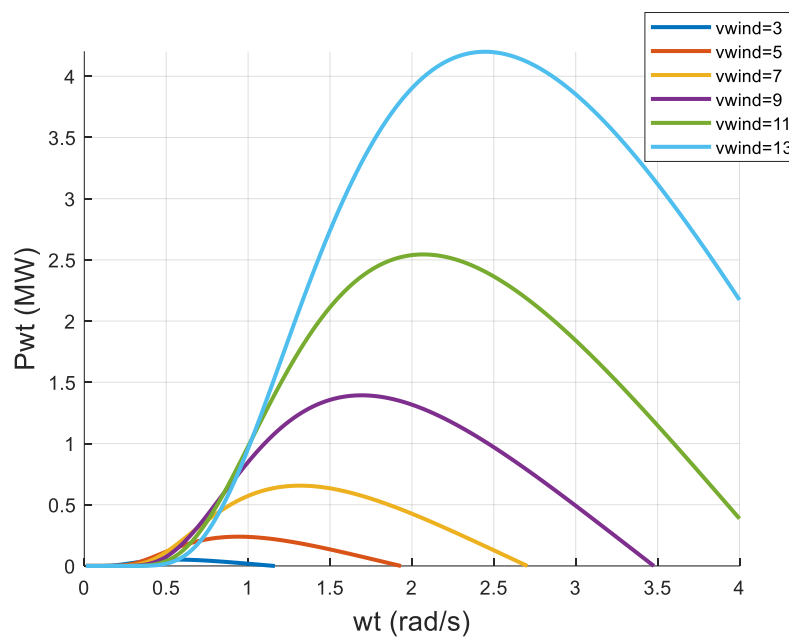


Figura 4.15. Representació gràfica paràmetre Pwt en funció de wt per diferents valor de  $v_w$   
(Font: MATLAB, elaboració pròpia)

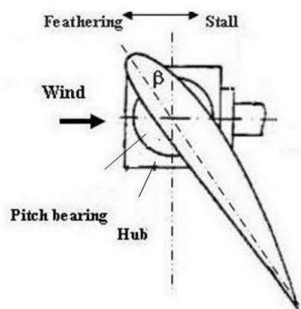


Figura 4.16. Representació de l'angle de Pitch

(Font: [12])

### 4.2.3 Elecció del tipus de generador

Existeixen 4 tipus de turbines eòliques:

- Tipus 1: Turbina eòlica de velocitat fixa.
- Tipus 2: Turbina eòlica de velocitat variable limitada.
- Tipus 3: Turbina eòlica de velocitat variable amb convertidor a escala parcial.
- Tipus 4: Turbina eòlica de velocitat variable amb convertidor a escala completa.

Per avançar en la modelització de l'aerogenerador, prèviament cal triar amb quin tipus de turbina es treballarà. A continuació s'han estudiat els 4 tipus, comparant-ne les seves avantatges i inconvenients, per finalment acabar triant el més adequat.

A la figura 4.17 es presenta una classificació de les configuracions més habituals, on els aerogeneradors es poden classificar generalment en turbines de velocitat fixa i variable.

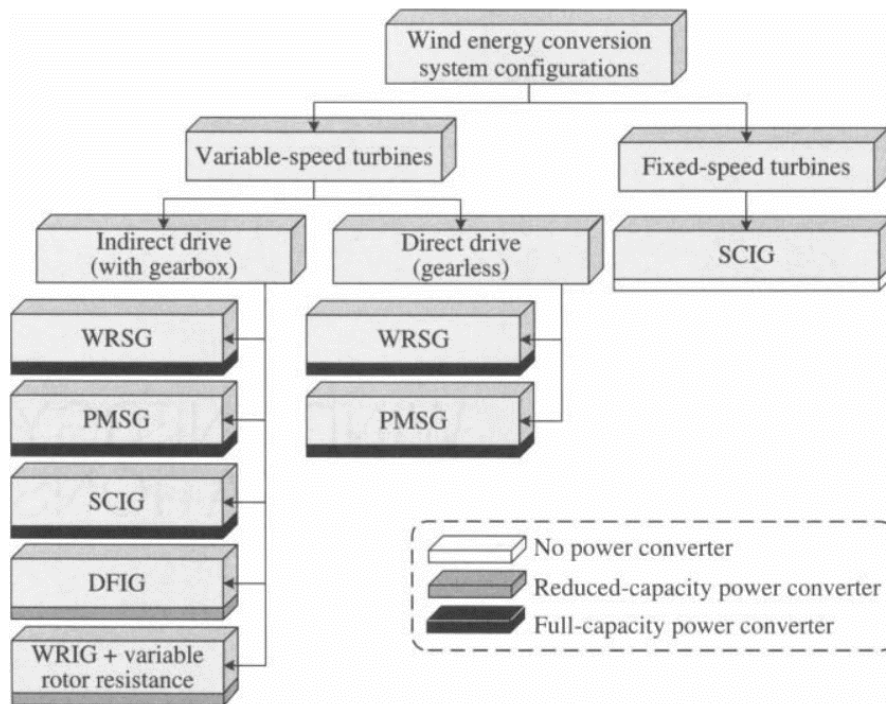


Figura 4.17. Classificació de les configuracions de sistemes d'energia eòlica

(Font: [13])

Les turbines de velocitat fixa utilitzen un generador d'inducció de gàbia d'esquirol (SCIG) connectat directament a la xarxa i, per tant, no necessiten cap convertidor de potència durant el funcionament normal.

Els aerogeneradors de velocitat variable es poden dividir en turbines d'accionament directe i indirecte. A les turbines d'accionament directe s'utilitzen generadors síncrons (SG) de baixa velocitat amb un gran nombre de pols. La velocitat dels generadors síncrons està dissenyada per coincidir amb la



velocitat de la turbina, de manera que s'elimina la caixa de canvis que normalment es requereix en altres configuracions.

Tant els generadors síncrons de rotor bobinat (WRSG) com els generadors síncrons d'imants permanents (PMSG) són adequats per a les turbines d'accionament directe, per a les quals es requereix un sistema convertidor de potència de plena capacitat o a escala completa. El sistema convertidor serveix com a interfície entre el generador i la xarxa elèctrica.

Les turbines d'accionament indirecte requereixen una caixa de canvis per fer coincidir la baixa velocitat de la turbina amb l'alta velocitat del generador. Els WRSG, PMSG i SCIG equipats amb convertidors d'energia a escala completa s'han utilitzat en sistemes pràctics d'energia eòlica. A més, els generadors d'inducció de doble alimentació (DFIG) amb convertidors de capacitat reduïda i els generadors d'inducció de rotor bobinat (WRIG) amb resistència variable del rotor controlada per convertidor també han trobat aplicacions pràctiques.[36]

#### 4.2.3.1 Generadors de velocitat fixa

##### 4.2.3.1.1 Tipus 1: turbina de velocitat fixa

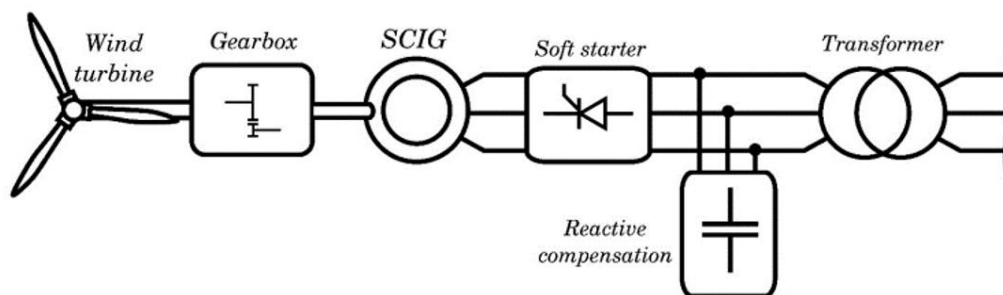


Figura 4.18. Esquema d'un generador de velocitat fixa  
(Font: [14])

Els sistemes d'energia eòlica de velocitat fixa es poden dividir en generadors d'una sola velocitat, on el generador només funciona a una velocitat fixa; i generadors de dues velocitats, on el generador pot funcionar a dues velocitats fixes.

##### Generador d'una sola velocitat

La turbina és normalment de tipus d'eix horitzontal amb tres pales del rotor que giren a velocitats baixes, per exemple, 15 rpm com a velocitat nominal. Els generadors d'inducció de gàbia d'esquirol (SCIG) s'utilitzen exclusivament per aquest sistema.

Per entendre-ho millor, es suposa un generador de 4 pols que està connectat a una xarxa de 50 Hz, llavors la seva velocitat és lleugerament superior a 1500 rpm, per la qual cosa es requereix una relació d'engranatge d'aproximadament 100:1.

Per ajudar a la posada en marxa de la turbina, s'utilitza un arrencador suau per limitar el corrent d'entrada al bobinat del generador, a través d'un controlador de tensió CA trifàsic.

Un cop finalitzat el procés d'engegada, l'arrencada suau es desvia mitjançant un interruptor i el generador es connecta a la xarxa mitjançant un transformador. Com que el sistema no necessita una interfície de convertidor de potència durant el funcionament normal, es classifica com a generador sense convertidors de potència.

Per compensar la potència reactiva inductiva consumida pel generador d'inducció, normalment s'utilitza un compensador de factor de potència (FP) basat en condensadors.[36]

Generador de dues velocitats

Per millorar l'eficiència de conversió d'energia, s'han desenvolupat sistemes d'energia eòlica SCIG de dues velocitats. La velocitat del generador canvia amb el nombre de pols de l'estator. El canvi d'una configuració de 4 pols a una de 6 o 8 pols pot introduir una reducció de velocitat de 1/3 o 1/2, respectivament.

Amb el nombre de pols canviats de 4 a 6, per exemple, un generador connectat a una xarxa de 50 Hz pot funcionar a una mica més de 1500 rpm i 1200 rpm, de manera que el sistema pot capturar la màxima potència a dues velocitats de vent diferents, donant lloc a millores en l'eficiència energètica. [36]

A continuació es presenten els avantatges i inconvenients generals d'aquest tipus de generador:

<b>CONCEPTE</b>
Turbina de velocitat fixa
Concepte "danès"
Caixa de canvis de múltiples etapes
Rotor de 3 pales
Generador d'inducció de gàbia d'esquirol (SCIG)
Gran rellevància durant la dècada dels 80 i 90

<b>AVANTATGES I INCONVENIENTS</b>
Robust
Costos de producció baixos
Control directe
Opera a velocitat constant
Estrès mecànic elevat
Necessita compensació de potència reactiva
Sense capacitat <i>ridethrough</i> / suport a la xarxa

SCIG amb VSC de 2 nivells

Aquest tipus d'aerogeneradors SCIG contenen un convertidor de font de tensió, on s'utilitzen un rectificador de font de tensió de dos nivells (VSR) i un inversor de font de tensió (VSI) que utilitzen

dispositius IGBT. Els dos convertidors són idèntics en topologia i estan enllaçats per un filtre capacitiu d'enllaç DC. El generador i els convertidors solen tenir una capacitat de 690 V i cada convertidor pot gestionar fins a 0,75 MW de potència, amb possibilitat d'augmentar-la posant en paral·lel els mòduls IGBT.

#### 4.2.3.2 Generadors de velocitat variable

El funcionament en velocitat variable d'un sistema d'energia eòlica es pot realitzar mitjançant un WRIG, en el qual el rotor està connectat a una resistència variable externa; o per un DFIG amb un convertidor de potència de capacitat reduïda al circuit del rotor. El primer és un dels primers generadors comercials de velocitat variable, i el segon és un dels més utilitzats fins ara.

##### 4.2.3.2.1 Tipus 2: turbina de velocitat variable limitada

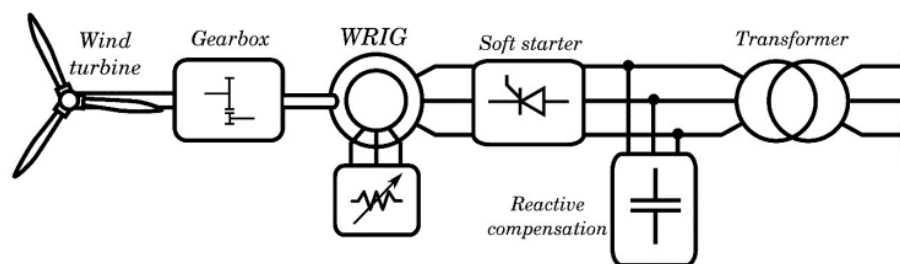


Figura 4.19. Esquema d'un generador de velocitat variable limitada  
(Font: [14])

Es tracta d'un sistema d'energia eòlica WRIG de velocitat variable amb una resistència de rotor extern controlada per un convertidor. La configuració del sistema és la mateixa que la del sistema d'energia eòlica de velocitat fixa, excepte que el SCIG es substitueix pel WRIG.

Les característiques de parell i lliscament del generador varien amb la resistència externa del rotor. Amb diferents valors d'aquesta resistència, el generador pot funcionar en diferents punts de funcionament. Això introdueix un rang de velocitat moderat, generalment inferior al 10% de la velocitat nominal.[13]

A continuació es mostren els principals avantatges i inconvenients del tipus 2 d'aerogeneradors:

CONCEPTE
Generador inductiu de rotor bobinat (WRIG)
Connexió directa a la xarxa
Resistència variable del rotor
Rang de velocitat operativa (entre 0 i 10%)
Gran rellevància durant la dècada dels 90 (proposta de Vestas)

AVANTATGES I INCONVENIENTS
Millor extracció de potència del vent que tipus 1
Càrrega mecànica reduïda
Costos de producció relativament baixos
Pèrdues de potència per la resistència del rotor bobinat
Requereix de <i>soft-starter</i>
Necessita compensació de potència reactiva
Sense capacitat <i>ridethrough</i> / suport a la xarxa

#### 4.2.3.2.2 Tipus 3: turbina de velocitat variable amb convertidor a escala parcial

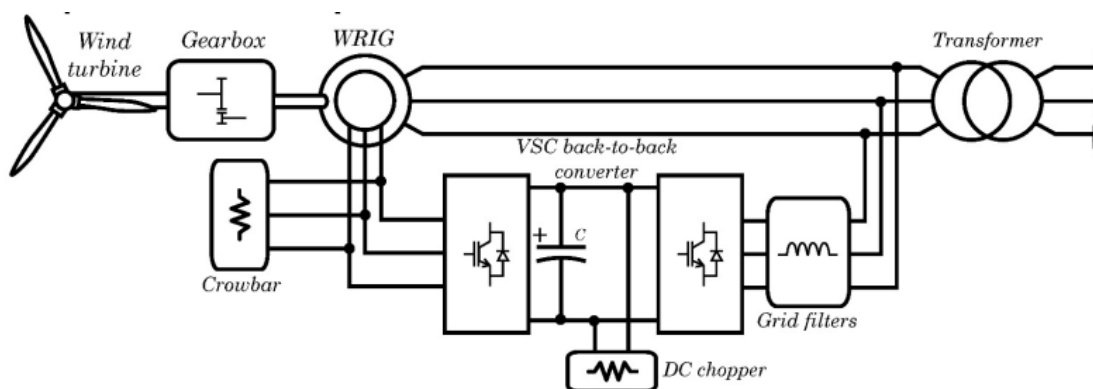


Figura 4.20. Esquema d'un generador de velocitat variable amb convertidor a escala parcial  
(Font: [15])

Els aerogeneradors DFIG de velocitat variable són una de les principals configuracions en la indústria eòlica actual. L'estator està connectat a la xarxa directament, mentre que el rotor està connectat a la xarxa mitjançant uns convertidors de potència de capacitat parcial.

Normalment, s'utilitza un sistema convertidor de font de tensió (VSC) IGBT de dos nivells en una configuració adossada. Com que tant l'estator com el rotor poden alimentar energia a la xarxa, el generador es coneix com a generador de doble alimentació.

La tensió típica de l'estator per al DFIG comercial és de 690 V i la potència des d'uns pocs KW a MW. El convertidor del costat del rotor (RSC) controla el parell o la potència activa i reactiva del generador, mentre que el convertidor del costat de la xarxa (GSC) controla la tensió de l'enllaç DC i la seva potència reactiva del costat AC. Com que el sistema té la capacitat de controlar la potència reactiva, no cal la compensació de la potència reactiva externa.

El rang de velocitat del sistema d'energia eòlica DFIG és al voltant del  $\pm 30\%$ , que és un 30% per sobre i per sota de la velocitat síncrona. El rang de velocitat del 60% pot satisfer normalment totes les condicions del vent i, per tant, és suficient per al funcionament de velocitat variable de l'aerogenerador. El lliscament màxim determina la potència màxima que ha de processar el circuit del rotor, que és al voltant del 30% de la potència nominal.

Per tant, el flux de potència al circuit del rotor és bidireccional: pot fluir de la xarxa al rotor o viceversa. Això requereix un sistema convertidor de quatre quadrants.

Tanmateix, el sistema convertidor només ha de processar al voltant del 30% de la potència nominal. El filtre L s'utilitza sovint als convertidors del costat del generador per reduir la distorsió harmònica del corrent i la tensió del generador, la qual cosa condueix a una reducció de les pèrdues harmòniques al nucli magnètic i al bobinat del generador. També es poden utilitzar filtres LC per aconseguir millors resultats.[13]

A continuació es mostren els principals avantatges i inconvenients del tipus 3 d'aerogeneradors:

CONCEPTE
Generador d'inducció doblement alimentat (DFIG)
Ampli rang de velocitat (entre -40% i +30%)
Control de potència activa i reactiva
Gran rellevància durant la primera dècada dels 2000

AVANTATGES I INCONVENIENTS
Millor extracció de potència del vent
Cost reduït a causa del convertidor a escala parcial
Potències activa i reactiva controlables
Capacitat <i>ridethrough</i> i suport a la xarxa
<i>Slip rings</i> necessaris
Estator connectat a la xarxa directament
Control complex durant avaries

#### 4.2.3.2.3 Tipus 4: turbina de velocitat variable amb convertidor a escala completa

Els sistemes d'energia eòlica de generador síncron tenen moltes més configuracions que el generador d'inducció. Això es deu principalment a 2 fets:

- 1- El generador síncron proporciona el flux del rotor per sí mateix mitjançant imants permanents o rotor bobinat i, per tant, els rectificadors de díodes es poden utilitzar com a convertidors del costat del generador, cosa que és impossible en el generador d'inducció.
- 2- És més fàcil i rendible que el generador síncron tingui configuracions de múltiples pols (per exemple, 72 pols) i de fases múltiples (per exemple, sis fases) que el seu homòleg.[13]

Dins d'aquest tipus de generadors, s'obre un ventall de múltiples configuracions possibles:

- Configuració amb convertidors de potència *back-to-back* de capacitat completa
  - Amb convertidors VSC de dos nivells i NPC de tres nivells
  - Amb convertidors de font de corrent PWM
- Configuració amb rectificador de díodes i convertidors DC/DC
  - Amb rectificador de díodes i convertidor de reforç multicanal
  - Amb rectificador de díodes i convertidors de reforç multinivell

- Amb rectificador de díodes i convertidor Buck per a generadors CSC
- Configuracions amb convertidors distribuïts per a generadors multi-bobinats
  - Configuració amb generadors multi-bobinats
  - Configuració amb múltiples generadors

Per la realització d'aquet treball, s'estudia més detingudament la primera opció, concretament els generadors síncrons amb convertidors VSC *back-to-back* de 2 nivells.

Aquests convertidors s'utilitzen en aerogeneradors de mitjana tensió. De manera similar al sistema SCIG presentat anteriorment, es requereixen mòduls paral·lels als sistemes de baix voltatge (LV) per a generadors de més de 0,75 MW, mentre que als sistemes de voltatge mig (MV) un únic convertidor NPC pot gestionar una potència de fins a uns pocs MW.

No tots els aerogeneradors síncrons necessiten una caixa de canvis. Quan s'utilitza un generador de baixa velocitat amb un gran nombre de pols, es pot eliminar la caixa de canvis. La turbina eòlica sense engranatges és atractiva per la reducció de costos, pes i manteniment.

Més endavant es parlarà amb detall dels convertidors de font de corrent, els quals tenen un gran nombre d'avantatges.

A continuació es mostren 3 exemples per la configuració d'aerogeneradors de tipus 4, amb els seus respectius avantatges i inconvenients:

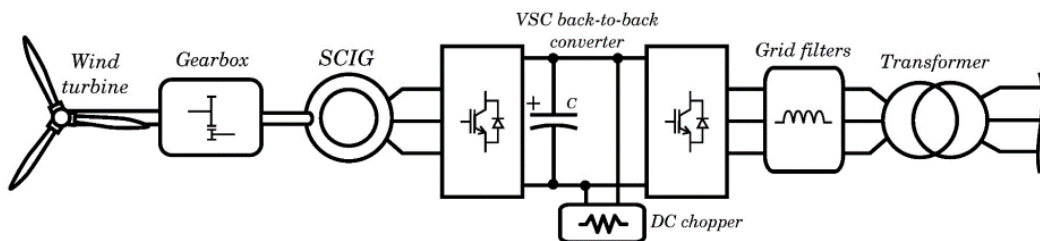


Figura 4.21. Esquema d'un generador SCIG de velocitat variable amb convertidor a escala completa

(Font: [15])

<b>CONCEPTE</b>
Velocitat variable
Generador SCIG amb convertidor de potència complet
Caixa de canvis de múltiples etapes

<b>AVANTATGES I INCONVENIENTS</b>
Avantatges del concepte de velocitat variable
Generador simple
Caixa de canvis necessària

Eficiència relativament baixa del sistema global (generador, caixa de canvis i convertidor)

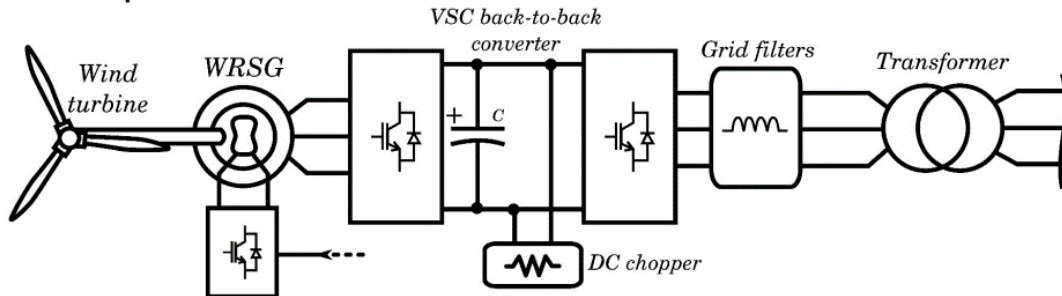


Figura 4.22. Esquema d'un generador WRS de velocitat variable amb convertidor a escala completa  
(Font: [15])

<b>CONCEPTE</b>
Velocitat variable
Generador síncron de rotor bobinat (WRS)
Excitació DC del rotor
Impuls directe (DD)
Nombre de pols elevat al rotor

<b>AVANTATGES I INCONVENIENTS</b>
Avantatges del concepte de velocitat variable
Control del flux del rotor per excitació
Costs de la caixa de canvis i les conseqüents averies eliminats
Slip rings necessaris
Pèrdues per l'excitació del rotor
Generador molt pesat

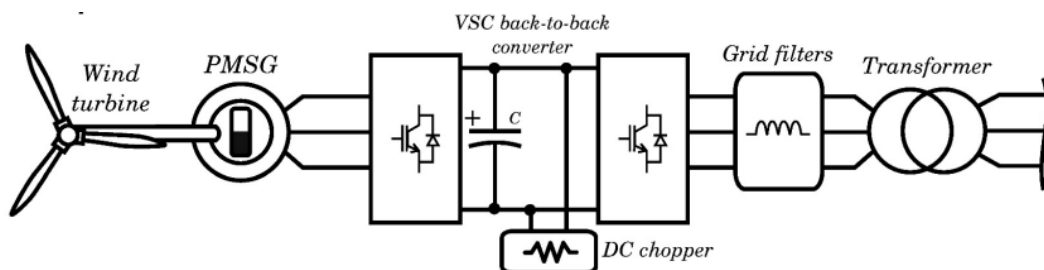


Figura 4.23. Esquema d'un generador PMSG de velocitat variable amb convertidor a escala completa  
(Font: [15])

<b>CONCEPTE</b>
Velocitat variable



Generador síncron d'imants permanents (PMSG)
Impuls directe (DD)
Màquina multi-polar

<b>AVANTATGES I INCONVENIENTS</b>
Avantatges del concepte de velocitat variable
Eficiència elevada
Costs de la caixa de canvis i les conseqüents averies eliminats
Més petit i lleuger que WRSG
Disseny i fabricació complexos
Excitació del rotor NO controlable
Possible desmagnetització del rotor

### 4.2.3.3 Comparativa entre tipus de turbina

	TIPUS 1	TIPUS 2	TIPUS 3
	TURBINA DE VELOCITAT FIXA	TURBINA DE VELOCITAT VARIABLE LIMITADA	TURBINA DE VELOCITAT VARIABLE AMB CONVERTIDOR A ESCALA PARCIAL
CONCEPTES	Turbina de velocitat fixa Concepte "danès" Caixa de canvis de múltiples etapes Rotor de 3 pales Generador d'inducció de gàbia d'esquirol (SCIG) Gran rellevància durant la dècada dels 80 i 90	Generador inductiu de rotor bobinat (WRIG) Connexió directa a la xarxa Resistència variable del rotor Rang de velocitat operativa (entre 0 i 10%) Gran rellevància durant la dècada dels 90 (proposta de Vestas)	Generador d'inducció doblement alimentat (DFIG) Ampli rang de velocitat (entre -40% i +30%) Control de potència activa i reactiva Gran rellevància durant la primera dècada dels 2000
AVANTATGES	Robust Costos de producció baixos Control directe	Millor extracció de potència del vent que tipus 1 Càrrega mecànica reduïda Costos de producció relativament baixos	Millor extracció de potència del vent Cost reduït a causa del convertidor a escala parcial Potències activa i reactiva controlables Capacitat <i>ridethrough</i> i suport a la xarxa
INCONVENIENTS	Opera a velocitat constant Estrès mecànic elevat Necessita compensació de potència reactiva Sense capacitat <i>ridethrough</i> / suport a la xarxa	Pèrdues de potència per la resistència del rotor bobinat Requereix de <i>soft-starter</i> Necessita compensació de potència reactiva Sense capacitat <i>ridethrough</i> / suport a la xarxa	<i>Slip rings</i> necessaris Estator connectat a la xarxa directament Control complex durant <i>avaries</i>
	TIPUS 4-SCIG	TIPUS 4-WRSG	TIPUS 4-PMSG
	TURBINA DE VELOCITAT VARIABLE AMB CONVERTIDOR A ESCALA COMPLETA - SCIG	TURBINA DE VELOCITAT VARIABLE AMB CONVERTIDOR A ESCALA COMPLETA-WRSG	TURBINA DE VELOCITAT VARIABLE AMB CONVERTIDOR A ESCALA COMPLETA-PMSG
	Velocitat variable Generador SCIG amb convertidor de potència complet Caixa de canvis de múltiples etapes	Velocitat variable Generador síncron de rotor bobinat (WRSG) Excitació DC del rotor Impuls directe (DD) Nombre de pols elevat al rotor	Velocitat variable Generador síncron d'imants permanents (PMSG) Impuls directe (DD) Màquina multi-polar
	Avantatges del concepte de velocitat variable Generador simple	Avantatges del concepte de velocitat variable Control del flux del rotor per excitació Costs de la caixa de canvis i les conseqüents averies eliminats	Avantatges del concepte de velocitat variable Eficiència elevada Costs de la caixa de canvis i les conseqüents averies eliminats Més petit i lleuger que WRSG
	Caixa de canvis necessària Eficiència relativament baixa del sistema global (generador, caixa de canvis i convertidor)	<i>Slip rings</i> necessaris Pèrdues per l'excitació del rotor Generador molt pesat	Disseny i fabricació complexos Excitació del rotor NO controlable Possible desmagnetització del rotor

TIPUS	Velocitat fixa	Velocitat variable				
Generador	SCIG	WRIG + resistència al rotor	DFIG	SCIG	WRSG	PMSG
Tipologia de	No	Rectificador	VSC de 2	VSC de 2 i 3	VSC de 2 i 3 nivells,	



convertidor de potència		de díodes + chopper	nivells	nivells, CSC PWM	rectificador de díodes + boost, CSC PWM	
Capacitat del convertidor	No aplicable	Baixa	Reduïda	Completa	Completa	Completa
Rang de velocitats	<1%	10%	+30%	Completa	Completa	Completa
Soft-starter	Sí	Sí	No	No	No	No
Caixa de canvis	Sí	Sí	Sí	Sí	Opcional	Opcional
Control de potència	Stall, Stall actiu, Pitch	Pitch	Pitch	Pitch	Pitch	Pitch
Compensació externa de potència reactiva	Necessària	Necessària	No	No	No	No
Control de potència activa i MPPT	No aplicable	Rang limitat	Sí	Sí	Sí	Sí

#### 4.2.3.4 Decisió del tipus d'aerogenerador

Estudiats els diferents tipus d'aerogeneradors esmentats en aquest apartat, es procedeix a triar-ne un per executar el present treball. Es decideix treballar a partir d'un aerogenerador de tipus 4 d'imants permanents. Els motius d'aquesta elecció s'exposen en el següent apartat 4.3.

## 4.3 GENERADOR SÍNCRON D'IMANTS PERMANENTS (GSIP)

Per prosseguir en la modelització d'un aerogenerador, es presenta el model escollit: un generador síncron d'imants permanents (GSIP). Aquest tipus d'aerogeneradors funciona, com el seu nom indica, imants permanents per crear un camp magnètic fix al rotor. Com s'ha estudiat en l'apartat anterior, es tracta d'una alternativa als sistemes de bobinats d'excitació. Conseqüentment, amb els imants permanents s'aconsegueix crear el camp magnètic fix prescindint d'un circuit

extern d'excitació, així com de les escombretes i els anells lliscants, ja que gràcies als imants no cal alimentar el rotor amb corrent. D'aquesta manera, el manteniment de l'aerogenerador disminueix considerablement, fet molt avantatjós sobretot de cara als projectes de parcs eòlics marins, on realitzar un manteniment constant dels aerogeneradors és més complicat i suposa un cost addicional considerable.

Per altra banda, cal destacar que el cost dels imants permanents no és precisament baix. No obstant, en general ofereixen millors característiques en quant a eficiència, són més compactes i proporcionen una densitat de potència més elevada.

Pel que fa a l'ús d'una caixa de canvis, com hem vist en l'apartat anterior, és opcional. Si ens centrem en els costos de fabricació i manteniment, poder prescindir de la caixa de canvis suposa una rebaixa dels costos molt important. Cal esmentar que una de les principals fonts d'averies dels aerogeneradors s'originen en la caixa de canvis. La configuració en la qual no s'instal·la la caixa de canvis per la transmissió entre la turbina i el generador es coneix com *direct-drive*. Aquests models treballen a velocitats de rotació baixes, d'entre 10 i 25 rpm, i consegüentment es necessita un elevat nombre de pols del rotor.[36]

A la 4.24 es pot veure l'esquema d'un generador síncron amb imants permanents situats al rotor. Cadascun dels bobinats i el del seu costat oposat corresponen a les 3 fases  $a_s$ ,  $b_s$  i  $c_s$ .

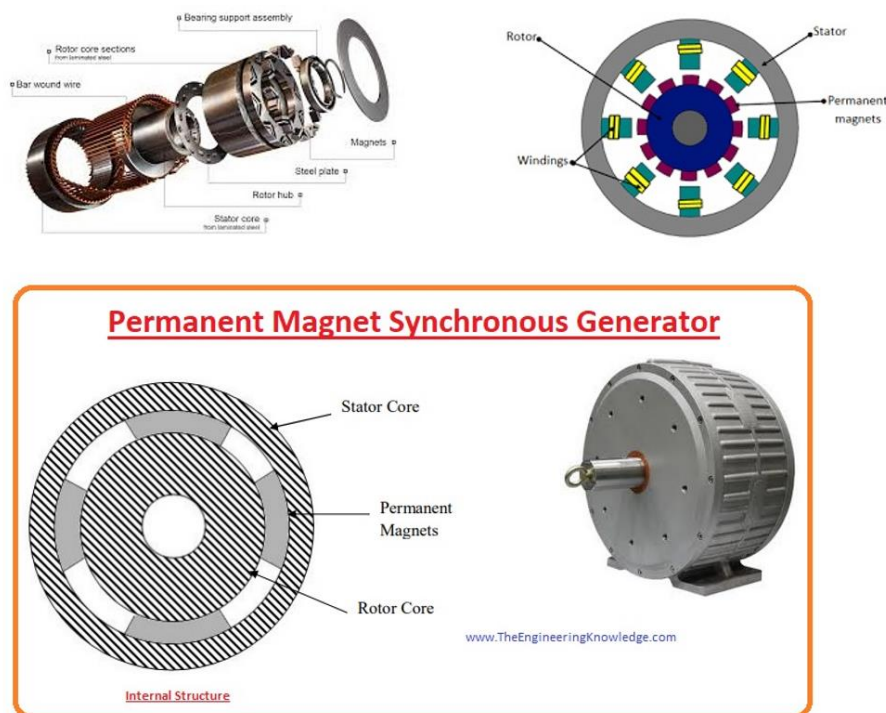


Figura 4.24. Esquema d'un generador síncron d'imants permanents  
(Font: [16])

També es mostra un esquema de l'acoblament *direct-drive* (sense transmissió/caixa de canvis) del generador a la turbina de vent:

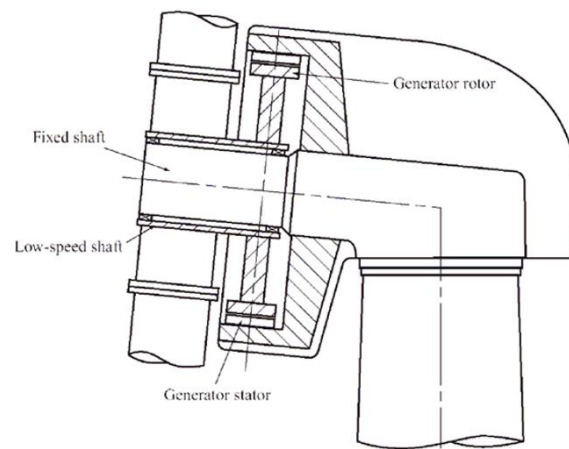


Figura 4.25. Esquema generador síncron d'ímants permanents

(Font: [17])

### 4.3.1 Classificació dels GSIP

Existeixen diverses classificacions dels GSIP en funció de la la configuració del rotor i posicionament dels imants. A continuació se'n fa un breu resum.

#### 4.3.1.1 Rotor radial i axial

Si el vector normal és perpendicular a l'eix, la màquina s'anomena radial. Si el vector normal és paral·lel a l'eix, la màquina s'anomena axial.

- Rotor radial:
  - Major potència nominal aconseguida augmentant la longitud de la màquina.
  - S'utilitza en:
    - Propulsió de vaixells
    - Robòtica
    - Tracció
    - Sistemes eòlics

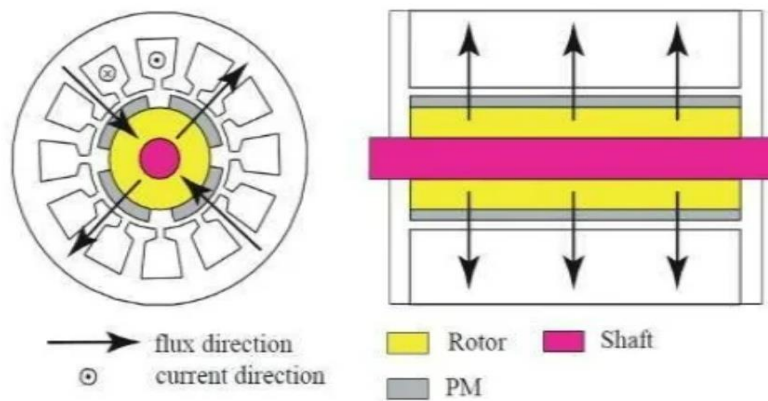


Figura 4.26. Esquema rotor radial

(Font: [16])

- Rotor axial:
  - Més petit que la màquina radial
  - Alta densitat de parell
  - S'utilitza en:
    - Sistemes d'elevadors sense engranatges
    - Rarament utilitzat en tracció
    - Generació

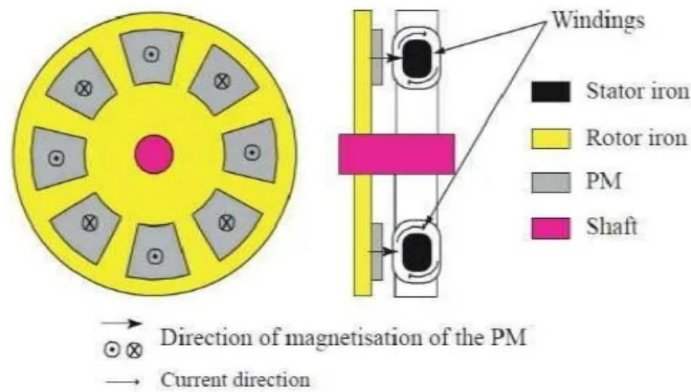


Figura 4.27. Esquema rotor axial

(Font: [16])

#### 4.3.1.2 Rotor interior i exterior

El rotor d'imant interior té imants magnetitzats radialment i de pols alternatius. Com que l'àrea del pol de l'imant és més petita que l'àrea del pol a la superfície del rotor, la densitat de flux d'aire en circuit obert és menor que la densitat de flux de l'imant. L'imant està molt ben protegit contra les forces centrífugues. Aquest disseny es recomana per a motors d'alta freqüència de velocitats.

El motor d'imant de superfície o exterior pot tenir imants magnetitzats radialment. De vegades s'utilitza un cilindre no ferromagnètic extern d'alta conductivitat. Protegeix els IP contra la desmagnetització de la reacció de l'armadura i les forces centrífugues, proporciona un parell d'arrencada asíncron i actua com a amortidor. L'imant està molt ben protegit contra les forces centrífugues. Aquest disseny es recomana per a altes freqüències.



Figura 4.28. Esquema rotor interior (esquerra) i exterior (dreta)

(Font: [16])

#### 4.3.1.3 Imants superficials i enterrats

Principalment, els imants permanents poden ser muntats a la superfície del rotor o bé enterrats dins d'aquest. Aquesta diferència en la col·locació dels imants al rotor fan variar les característiques del generador i, consegüentment, variarà també el seu control.

A la Figura 4.12, es pot veure un esquema del tall transversal d'una màquina síncrona d'imants permanents amb els imants muntats a la superfície del rotor (esquerra). En segon lloc, es pot observar un esquema d'un rotor amb els imants enterrats dins al rotor (dreta).

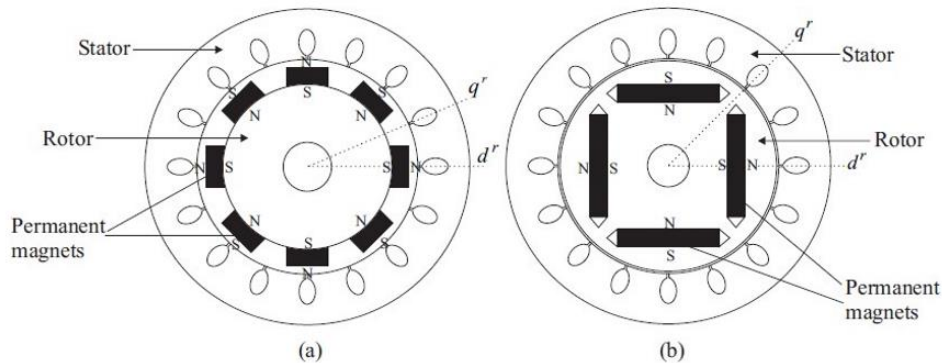


Figura 4.29. Tipologies de rotors: a l'esquerra imants muntats, a la dreta imants enterrats

(Font: [18])

### 4.3.2 Funcionament del generador

Partint de l'input del vent que fa girar les pales de l'aerogenerador, es considera una velocitat angular de rotació designada com  $w_t$ . Aquesta rotació es transmet al rotor on hi ha instal·lats els imants permanents, i es genera el corresponents camp magnètic. El camp magnètic provoca la variació del flux magnètic als bobinats de l'estator i, conseqüentment, s'indueixen les 3 tensions que donen lloc a les 3 fases  $a_s, b_s$  i  $c_s$ , i que estan desfasades  $120^\circ$  a causa del posicionaments dels bobinats. Aquestes tensions tenen forma sinusoidal, amb una pulsació tal que:

$$w_r = p w_t \tag{Equació 4.28}$$

On  $p$  correspon al nombre de parells de pols del rotor.

Paral·lelament, s'origina un segon camp magnètic a l'estator. Aquest camp parteix de la circulació de les intensitats induïdes als bobinats de l'estator, i rota a la velocitat de la turbina,  $w_t$ .

L'afectació d'un camp respecte l'altre determina la condició de funcionament de la màquina síncrona, essent un generador o un motor. Pel cas que ens ocupa, en un generador és el camp magnètica produït pels IP del rotor el que arrossega el camp magnètic de l'estator. Així, el generador subministra un corrent trifàsic a la xarxa.

Per conèixer la freqüència de les tensions sinusoidals, s'aplica l'equació 4.28 a la 4.29, corresponent a la relació entre freqüència i velocitat de rotació. D'aquí se n'extreu la relació entre la freqüència de les tensions i la velocitat angular del rotor, en funció del nombre de pols que s'imposin.[13]

$$w_r = 2\pi f_r \tag{Equació 4.29}$$

$$f_r = p \frac{w_t}{2\pi} \tag{Equació 4.30}$$

Si el generador es connecta directament a la xarxa, llavors la velocitat de rotació del rotor ( $w_r$ ) estarà fixada, doncs la xarxa té una freqüència  $f_z$  constant. Per tant, el generador girarà a velocitat rigorosament constant, marcada per la xarxa. És per això que a aquesta tipologia de generadors se'ls anomena síncrons.

No obstant, més endavant veurà que el generador modelat no està connectat directament a la xarxa, sinó que 'hi connecta a través del convertidor *back-to-back*. En conseqüència, la velocitat de gir no vindrà marcada per la xarxa, però es podrà regular convenientment mitjançant el control del convertidor.

### 4.3.3 Modelització

En aquest apartat es plantegen les equacions que modelen el GSIP. En primer lloc, es mostra un esquema que representa el funcionament de l'interior del generador:

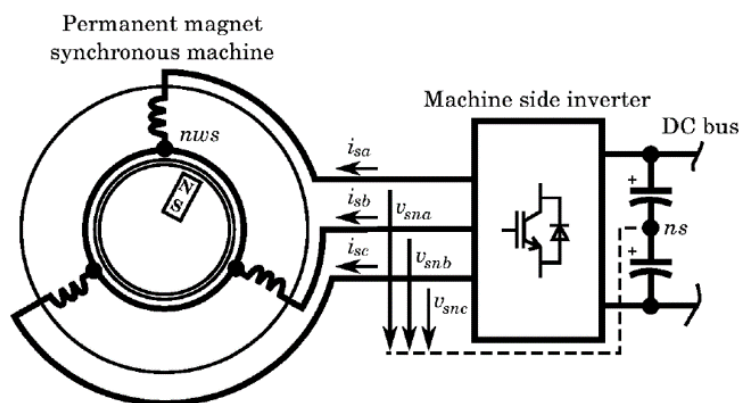


Figura 4.30. Esquema de connexió d'un GSIP.

(Font: [19])

Cal destacar que el rotor no té cap connexió elèctrica, avantatge de l'elecció d'un generador d'imants permanents, i es considera una connexió estrella sense conductor neutre. Per tant, es pot assegurar que:

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \tag{Equació 4.31}$$

$$v_{s,abc} = r_s i_{s,abc} + \frac{d\phi_{s,abc}}{dt} \tag{Equació 4.32}$$

On  $r_s$  correspon a la resistència de cadascun dels bobinats de l'estator, considerada igual en tots ells.  $v_{s,abc}$  és la tensió en la resistència  $r_s$ . També es distingeix  $\phi_{s,abc}$  fa referència al flux magnètic

que travessa el bobinat de l'estator, també anomenat flux concatenat. Finalment, el factor  $\frac{d\phi_{s,abc}}{dt}$  representa la força electromotriu generada pel corrent induït al bobinat.

El flux magnètic s'expressa seguint:

$$\phi_{s,abc} = ([L_1] + [L_2(\theta_r)])i_{s,abc} + \phi_m \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) \\ \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{Equació 4.33}$$

On veiem que les inductàncies generades a l'estator estan en funció de l'angle  $\theta_r$ , l'angle elèctric del rotor. El terme  $\phi_m$  correspon al flux magnètic per unitat de velocitat de rotació de l'angle elèctric, és a dir,  $w_r$ .

Per altra banda,  $[L_1]$  i  $[L_2(\theta_r)]i_{s,abc}$  són les matrius d'inductàncies que engloben tots els coeficients d'autoinductància i inductància mútua entre les 3 fases (a, b i c).

$$[L_1] = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_A & -\frac{1}{2}L_A & -\frac{1}{2}L_A \\ -\frac{1}{2}L_A & L_{ls} + L_A & -\frac{1}{2}L_A \\ -\frac{1}{2}L_A & -\frac{1}{2}L_A & L_{ls} + L_A \end{bmatrix} \quad \text{Equació 4.34}$$

$$[L_2(\theta_r)] = -L_B \begin{bmatrix} \cos 2(\theta_r) & \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right) & \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) \\ \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right) & \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) & \cos 2(\theta_r) \\ \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) & \cos 2(\theta_r) & \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{Equació 4.35}$$

On  $L_A$  és una inductància independent de  $\theta_r$ , mentre que  $L_B$  correspon al màxim valor de la inductància en funció de  $\theta_r$ . Tornant a les diferents configuracions de muntatge dels imants en el rotor, si aquests es munten a la superfície, llavors es considera  $L_B \approx 0$ . En canvi, si els IP es munten enterrats, llavors  $L_B$  assumeix un valor concret. Finalment, el terme  $L_{ls}$  refereix a la inductància de dispersió o fuga, en l'estator.[19]

Per obtenir l'expressió referent al terme de la força electromotriu generada,  $\frac{d\phi_{s,abc}}{dt}$  [V], s'aplica un diferencial de temps a l'equació 3.37, tal que:

$$\frac{d\phi_{s,abc}}{dt} = ([L_1] + [L_2(\theta_r)]) \frac{d}{dt} i_{s,abc} + w_r \frac{d}{d\theta_r} [L_2(\theta_r)] i_{s,abc} + \phi_m w_r \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{Equació 4.36}$$



Seguidament, s'aplica l'equació 3.42 a la 3.38, per tal de relacionar els voltatges del generador i les intensitats d'aquest.

$$v_{s,abc} = \left( r_s + w_r \frac{d}{d\theta_r} [L_2(\theta_r)] \right) i_{s,abc} + ([L_1] + [L_2(\theta_r)]) \frac{d}{dt} i_{s,abc} + \phi_m w_r \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad \text{Equació 4.37}$$

La complexitat d'aquesta relació és palpable. Si bé, existeix la possibilitat de simplificar-la, aplicant el mètode de la Transformada de Park. Sigui així, l'expressió de l'equació 4.37 simplificada seria:

$$v_{s,qd} = \begin{bmatrix} r_s & w_r \left( L_{ls} + \frac{3}{2} (L_A + L_B) \right) \\ -w_r \left( L_{ls} + \frac{3}{2} (L_A - L_B) \right) & r_s \end{bmatrix} i_{s,qd} + \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{3}{2} (L_A - L_B) & 0 \\ 0 & L_{ls} + \frac{3}{2} (L_A + L_B) \end{bmatrix} \frac{d}{dt} i_{s,qd} + \phi_m w_r \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Equació 4.38}$$

$$v_{s0} = r_s i_{s0} + L_{ls} \frac{d}{dt} i_{s0} = 0 \quad \text{Equació 4.39}$$

On l'angle de la Transformada de Park  $\theta = \theta_r$ . La component  $v_{s0} = 0$  ja que no hi ha conducte neutre.

Per acabar, és possible compactar encara més l'expressió de la tensió  $v_{s,dq}$ . Per fer-ho, cal definir els paràmetres  $L_d$  i  $L_q$ , que representen:

$$L_d = L_{ls} + \frac{3}{2} (L_A + L_B) \quad \text{Equació 4.39}$$

$$L_q = L_{ls} + \frac{3}{2} (L_A - L_B) \quad \text{Equació 4.40}$$

D'aquesta manera:

$$v_{s,qd} = \begin{bmatrix} r_s & w_r L_d \\ -w_r L_q & r_s \end{bmatrix} i_{s,qd} + \begin{bmatrix} L_q & 0 \\ 0 & L_d \end{bmatrix} \frac{d}{dt} i_{s,qd} + \phi_m w_r \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Equació 4.41}$$

De l'equació 3.48, aïllem el factor  $\frac{d}{dt} i_{s,qd}$  que serà necessari més endavant.

$$\frac{d}{dt} i_{s,qd} = \begin{bmatrix} r_s \frac{1}{L_q} & w_r L_d \frac{1}{L_q} \\ -w_r L_q \frac{-1}{L_d} & r_s \frac{-1}{L_d} \end{bmatrix} i_{s,qd} - \Phi_m w_r \begin{bmatrix} 1 \\ L_q \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ L_q \\ 0 \\ 1 \\ L_d \end{bmatrix} v_{s,qd}$$

Equació 4.42

Amb  $v_{s,qd}$  i  $i_{s,qd}$  definits, es procedeix a expressar el càlcul de la potència generada:

$$P_{gen} = \frac{3}{2} (v_{sq} i_{sq} + v_{sd} i_{sd})$$

Equació 4.43

$$P_{gen} = \frac{3}{2} \left( r_s i_{sq}^2 + w_r L_d i_{sd} i_{sq} + L_q \frac{di_{sq}}{dt} i_{sq} + \Phi_m w_r i_{sq} + r_s i_{sd}^2 - w_r L_q i_{sd} i_{sq} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} i_{sd} \right)$$

Equació 4.44

D'aquesta expressió s'eliminen tots aquells factors relacionats amb les pèrdues de potència, tals com les pèrdues per efecte de Joule en la resistència de l'estator, així com l'energia emmagatzemada en les inductàncies. Destacar també que, pel cas en que la configuració dels IP s'ubiquen en la superfície del rotor, s'ha expressat que  $L_B \approx 0$ . Això implica que  $L_d = L_q$  i, per tant, tots els factors multiplicats per  $L_d - L_q$  s'eliminen.

$$P_{gen} = \frac{3}{2} (\Phi_m w_r i_{sq} - w_r (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}) = \frac{3}{2} (\Phi_m w_r i_{sq})$$

Equació 4.45

Finalment, per obtenir l'expressió del parell del generador tan sols cal dividir la potència per la velocitat de rotació de la turbina,  $w_t$ . [19] Si es recupera l'equació 4.28, on  $w_r = p w_t$ , llavors:

$$\Gamma_{gen} = \frac{3}{2} p (\Phi_m w_r i_{sq} - w_r (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq}) = \frac{3}{2} p (\Phi_m w_r i_{sq})$$

Equació 4.46

## 4.4 CONVERTIDOR

Per aquest treball es farà us de dos convertidors VSC (*Two-Level Voltage Source Converter*), que componen l'anomenat convertidor *back-to-back*. El convertidor VSC es compon de 6 interruptors, S1 a S6, amb un díode antiparal·lel en cada interruptor. Aquests interruptors poden ser IGBT o IGCT, depenent de la potència i la tensió nominal del convertidor. En la figura 4.31 podem veure l'esquema d'un convertidor DC/AC real format per 6 IGBT, dos per cada fase.[37]

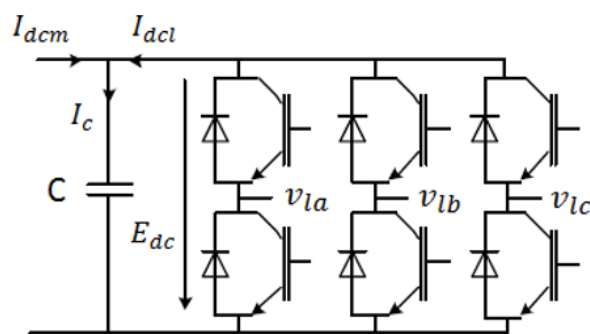


Figura 4.31. Representació d'un VSC (DC/AC)

(Font: [20])

Quan el convertidor s'utilitza per transformar una tensió contínua fixa en una tensió alterna trifàsica amb magnitud i freqüència variables per una càrrega AC, sovint s'anomena inversor. En la figura 4.32 s'observa l'esquema corresponent:

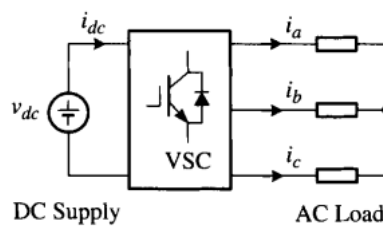


Figura 4.32. Representació d'un Inversor VSC

(Font: [13])

Per contra, quan el convertidor transforma una tensió de xarxa de AC amb una magnitud i una freqüència fixes a una tensió de CC ajustable per a una càrrega de CC, sovint es coneix com a rectificador actiu o rectificador PWM.

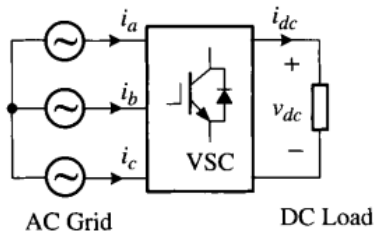


Figura 4.33. Representació d'un Rectificador actiu VSC  
(Font: [13])

Tant si serveix com a inversor o com a rectificador, el flux de potència al circuit convertidor és bidireccional: la potència pot fluir des del seu costat CC al costat AC, i viceversa.

En els sistemes de conversió per aerogeneradors d'energia eòlica, el convertidor sovint està connectat a un xarxa elèctrica i lliura l'energia generada des del generador a la xarxa, tal com es mostra a la figura 4.34. El convertidor d'aquesta aplicació s'anomena convertidor connectat a la xarxa. També s'anomena inversor ja que el convertidor normalment ofereix energia del seu costat CC al costat AC.[21]

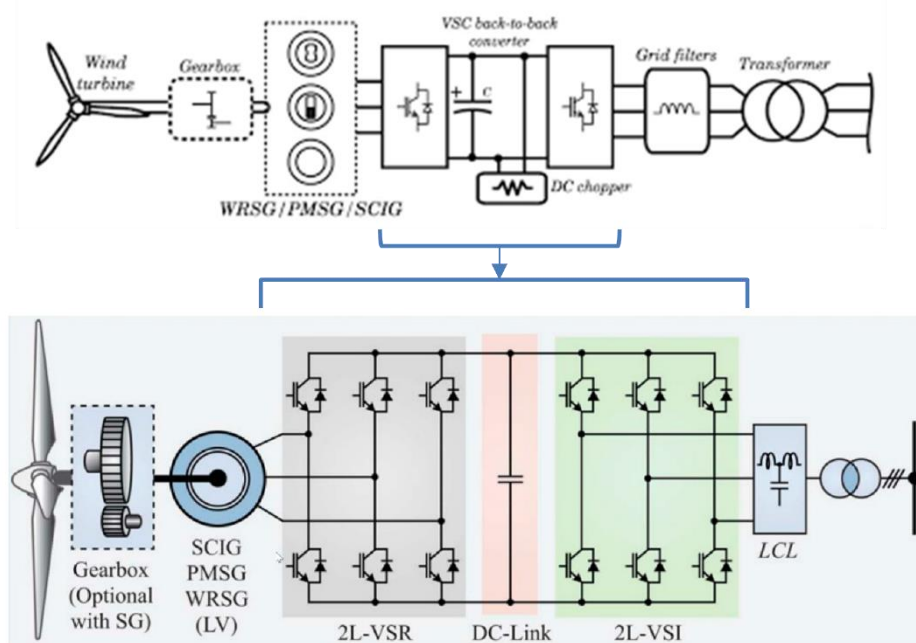


Figura 4.34. Esquema VSC back-to-back de 2 nivells  
(Font: [21])

Els convertidors VSC reals es basen en els estats discrets d'obertura i tancament dels IGBT. En aquest treball, es modelarà el convertidor en dues parts, la part de corrent continu i la part de corrent altern, i s'establirà les relacions entre les dues parts per tal que es comporti com un convertidor real. La connexió entre els dos convertidors s'anomena bus de contínua, i està format per un condensador en paral·lel.

Per treballar en els següents apartats, s'utilitzarà la següent nomenclatura pels corrents d'entrada i sortida del VSC b2b:

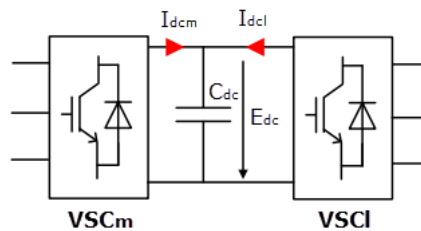


Figura 4.35. Esquema VSC back-to-back de 2 nivells amb la nomenclatura corresponent

(Font: [22])

On  $I_{dcm}$ ,  $I_{dcl}$  són els corrents provinents del VSC de la banda del generador i de la xarxa, respectivament;  $C_{dc}$  correspon al capacitiu de CC; i  $E_{dc}$  correspon a la tensió CC.

L'estructura *back-to-back* és una de les configuracions més utilitzades per als convertidors VSC.[21] Tal com es pot veure en la Figura 4.20, consisteix en la connexió de dos VSC per al costat CC mitjançant un condensador. Permet la connexió d'un dispositiu elèctric a una xarxa AC eliminant la dependència de la freqüència. Per exemple, els accionaments elèctrics moderns com ara els trens o les turbines eòliques utilitzen estructures *back-to-back* per variar la velocitat de rotació de la màquina elèctrica sense interaccions amb la xarxa AC. El mateix concepte s'aplica als sistemes d'alta tensió, on s'utilitzen estructures *back-to-back* HVDC per connectar sistemes asíncrons que funcionen a diferents freqüències o quan la diferència d'angle de voltatge és massa gran. L'equació dinàmica és:

$$\frac{dE_{dc}}{dt} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ C_{dc} & C_{dc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dcm} \\ I_{dcl} \end{bmatrix} \tag{Equació 4.46}$$

El funcionament d'aquests convertidors es basa en el control dels temps d'obertura dels IGBT, que actuen com a interruptors controlats. Calen doncs, 6 senyals de control, una per cada interruptor. A la Figura 4.36 es veu un exemple de senyal de control pels IGBT.

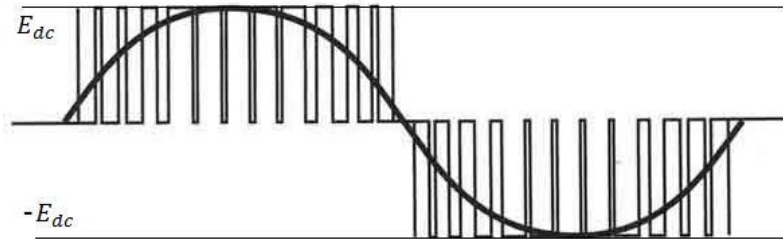


Figura 4.36. Exemple senyals de control dels IGBT

(Font: [13])

Pel funcionament d'un VSC aplicat en aquest treball, és necessari l'obtenció d'un pols a través d'un generador PWM. La propera secció es centra en els esquemes de modulació d'amplada de pols (PWM) per a convertidors de fonts de tensió de dos nivells. Com que els esquemes de modulació són aplicables al convertidor que pot funcionar com a inversor o rectificador, l'inversor s'utilitza com a exemple per a la discussió. La secció comença amb una introducció al sinusoidal basat en portadors PWM (SPWM).

#### 4.4.1 Sinusoidal PWM (SPWM)

La modulació per ample de pols (PWM, *Pulse Width Modulation*) proporciona un mètode per disminuir el factor de distorsió harmònica (THD) en la corrent que subministra l'inversor a la càrrega. La Distorsió Harmònica Total (THD) és una mesura de quant es «distorsiona» o es canvia la forma d'ona del voltatge o del corrent de la forma d'ona sinusoidal convencional.

La sortida d'un inversor amb PWM compleix les regulacions de distorsió harmònica total més fàcilment que un inversor amb sortida mitjançant ones quadrades. La modulació PWM controla l'amplitud de la tensió de sortida utilitzant diferents formes d'ona moduladora o de referència.[37]

AVENTATGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> <li>- La reducció dels requeriments de filtrat.</li> <li>- El control de l'amplitud de la sortida.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Increment en les pèrdues del dispositiu interruptor (les considerarem negligibles) pel major número de commutacions realitzades.</li> <li>- Major complexitat del circuits de control.</li> </ul>

La modulació PWM es pot realitzar de dues formes:

- BIPOLAR: Quan l'inversor utilitza 2 estats, +Vdc i -Vdc (Figura 4.38).
- UNIPOLAR: Quan l'inversor utilitza 3 estats, +Vdc, 0 i -Vdc(Figura 4.37).

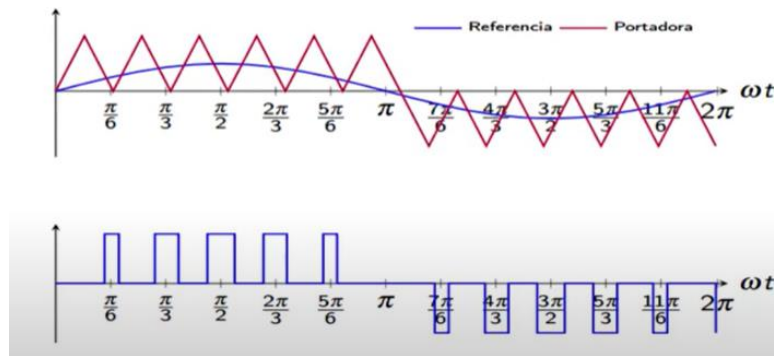


Figura 4.37. Modulació PWM Unipolar

(Font: [23])

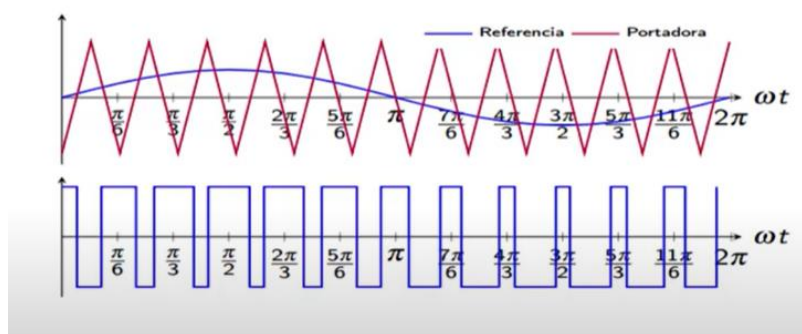


Figura 4.38. Modulació PWM Bipolar

(Font: [23])

Pel model estudiat, s'utilitza la modulació bipolar. El principi de l'esquema PWM sinusoidal per al convertidor de dos nivells s'il·lustra a la figura 4.38, on  $V_{ma}$ ,  $V_{mb}$  i  $V_{mc}$  són les formes d'ona sinusoidals trifàsiques modulades, mentre que  $V_{cr}$  és el senyal portador triangular. El component de la freqüència fonamental de la tensió de sortida de l'inversor es pot controlar mitjançant l'índex de modulació d'amplitud:

$$m_a = \frac{V_m}{V_{cr}} \tag{Equació 4.47}$$

On  $V_m$  i  $V_{cr}$  són els valors pic de les ones modulades i portadores, respectivament. L'índex de modulació d'amplitud  $m_a$  normalment s'ajusta variant  $V_m$  mentre es manté el  $V_{cr}$  fix. L'índex de modulació de freqüència es defineix per:

$$m_f = \frac{f_{cr}}{f_m} \tag{Equació 4.48}$$

On  $f_m$  i  $f_{cr}$  són les freqüències de les ones modulades i portadores, respectivament.[37]

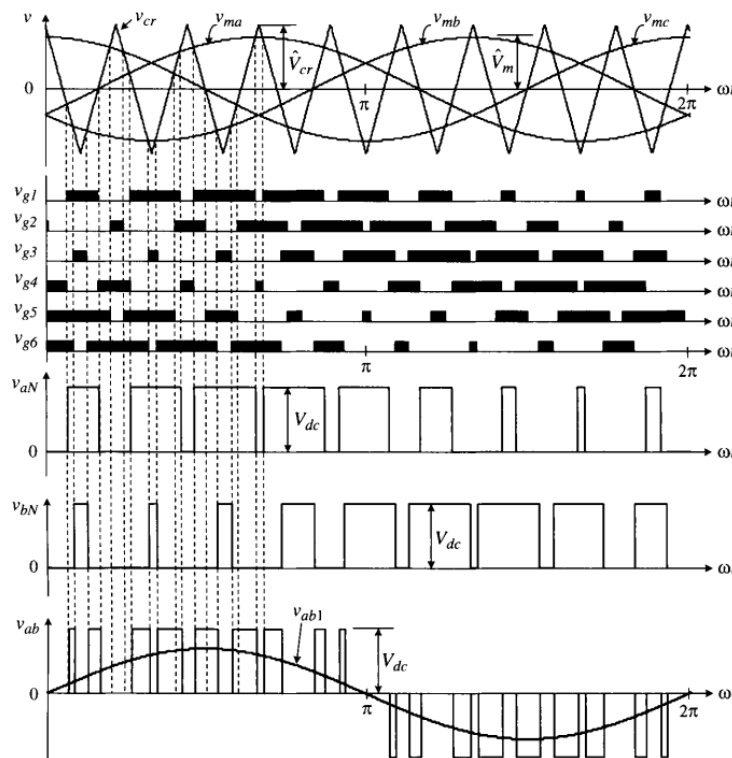


Figura 4.39. PWM sinusoidal

(Font: [13])

Com es pot observar, el funcionament dels interruptors S1 a S6 es determina comparant les ones modulades amb l'ona portadora.

- Quan  $V_{ma} > V_{cr}$ , s'activa l'interruptor superior S1 a la branca "a" de l'inversor. L'interruptor inferior S4 funciona de manera complementària i per tant està apagat. La tensió del terminal de l'inversor resultant  $V_{aN}$ , que és la tensió al terminal de la fase "a" respecte al bus de CC negatiu N, és igual a la tensió de CC  $V_{DC}$ .
- Quan  $V_{ma} < V_{cr}$ , llavors S4 està activat i S1 està apagat. Conseqüentment,  $V_{aN} = 0$  com es mostra a la figura 4.38. Com que la forma d'ona de  $V_{aN}$  només té dos nivells ( $V_{DC}$  i 0), l'inversor sovint s'anomena inversor de dos nivells.

La tensió línia a línia de l'inversor  $V_{ab}$  es pot determinar mitjançant  $V_{ab} = V_{aN} - V_{bN}$ . La forma d'ona del seu component de freqüència fonamental  $V_{ab1}$  també es mostra a la figura. La magnitud i la freqüència de  $V_{ab1}$  es poden controlar de manera independent per  $m_a$  i  $f_m$ , respectivament.[37] La freqüència de commutació dels interruptors actius a l'inversor de dos nivells s'obté de:

$$f_{sw} = f_{sw} = f_m \times m_f \tag{Equació 4.49}$$

Per exemple,  $V_{aN}$  a la figura 4-24 conté 9 polsos per cicle de la freqüència fonamental. Cada pols es produeix activant i apagant S1 cada vegada. Amb la freqüència fonamental de 50 Hz, la freqüència de commutació resultant per S1 seria  $f_{sw} = 50 \times 9 = 450\text{Hz}$ , que també és la freqüència portadora  $f_{cr}$ . Quan l'ona portadora es sincronitza amb l'ona modulant ( $m_f$  és un nombre enter), l'esquema de modulació es coneix com a PWM síncron. Per contra, tenim el PWM asíncron, quan la freqüència



portadora  $f_{cr}$  sol ser fixa i independent a  $f_m$ . El PWM síncron és més adequat per a la implementació amb un processador digital.[23]

Cal afegir que el model simplificat que es simularà en aquest projecte no té en compte aquests estats discrets i genera els voltatges a partir de fonts de tensió (model amitjanat). Seria com en el cas de tenir un convertidor ideal on la commutació dels IGBT fos ideal, sense pèrdues i a alta freqüència de commutació.

#### 4.4.2 El nostre model de convertidor

En el model simplificat del convertidor, la part de corrent continu (CC) es modelitza com una font de corrent i un condensador amb paral·lel. La part de corrent altern (AC) es modelitza amb tres fonts de tensió (sistema trifàsic), tal i com es mostra a la Figura 4.29. La part alterna és la que va connectada a la xarxa (Figura 4.26).

En els primers passos de la simulació es treballa amb 2 documents independents: la banda de la xarxa (*Grid-Side*) i la banda del generador (*Generator-Side*). Per aquest motiu, per treballar amb la mateixa potència es modelitza amb una font de corrent. La font de corrent reflexa la potència intercanviada entre la part AC i CC i assegura el balanç energètic del sistema. En un convertidor real això és implícit, i precisament en el document definitiu connectem directament les dues bandes, per la qual cosa la font de corrent desapareix.

Així doncs, tenint en compte que és un model sense pèrdues, s'ha de complir que la potència generada a la part CC és igual a la potència a la part AC (Equació 4.50).

$$P_{dc} = E_{dc}I_{dcl} = P_{ac} = v_{la}i_{za} + v_{lb}i_{zb} + v_{lc}i_{zc} \tag{Equació 4.50}$$

On  $E_{dc}$  és el voltatge de bus i  $P_{ac} (= P_t)$  la potència intercanviada entre el convertidor i la xarxa. La intensitat al convertidor i a la xarxa és la mateixa ( $i_{z,abc} = i_{l,abc}$ ).

A la Figura 4.26 es mostra la part AC del convertidor connectada a la xarxa a través d'unes línies que tenen una resistència  $r_l$  i una inductància  $l_l$ . Les variables  $v_l$  són els voltatges aplicats pel convertidor i les variables  $v_z$  són els voltatges de la xarxa. A partir d'aquest esquema es poden trobar les equacions dels voltatges aplicant les lleis de *Kirchhoff* (Equació 4.51).

$$\begin{bmatrix} v_{la} \\ v_{lb} \\ v_{lc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{za} \\ v_{zb} \\ v_{zc} \end{bmatrix} - (v_{l0} - v_{z0}) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & 0 & 0 \\ 0 & r_l & 0 \\ 0 & 0 & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 & 0 \\ 0 & l_l & 0 \\ 0 & 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} \tag{Equació 4.51}$$

Que es pot simplificar com:

$$v_z^{abc} = r_l i_z^{abc} + L_l \frac{d}{dt} i_z^{abc} + v_l^{abc}$$

Equació 4.52

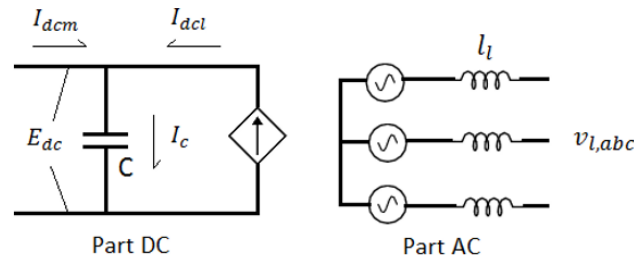


Figura 4.40. Simplificació del convertidor (part DC i AC)

(Font: [20])

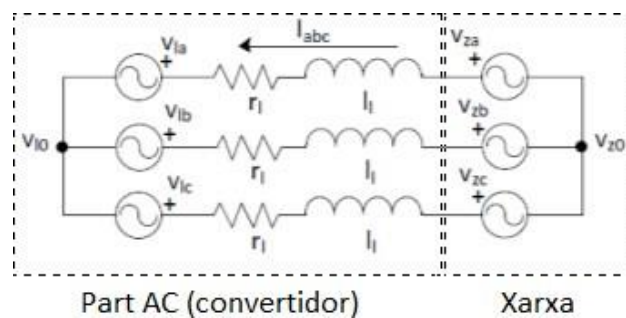


Figura 4.41. Model equivalent de la part AC connectada a la xarxa

(Font: [24])

### 4.4.3 Transformada de Park

A continuació, per tal de simplificar al màxim l'estudi d'aquestes equacions, s'aplica a les variables la matriu de transformació de Park, permetent suprimir una de les equacions quan no hi ha conductor neutre, i també transformant els senyals sinusoidals variables en el temps en constants en estat estacionari, si es trien els paràmetres adequats de la transformació. La matriu de transformació de variables Park es pot definir com:

$$T(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Equació 4.53

La seva inversa es defineix com:

$$T^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Equació 4.54}$$

Definim la variable de la Transformada de Park  $x^{dq0}$  per una senyal trifàsica  $abc$  ( $x^{abc}$ ) com:

$$x^{dq0} \triangleq T(\theta) x^{abc} \quad \text{Equació 4.55}$$

Seguidament, s'introdueix la matriu de la Transformada de Park a les equacions del circuit, multiplicant l'equació 4.52 per  $T(\theta)$ , obtenint:

$$T(\theta) v_l^{abc} = r_l T(\theta) i_l^{abc} + L_l T(\theta) \frac{d}{dt} i_l^{abc} + T(\theta) v_z^{abc} \quad \text{Equació 4.56}$$

Operant l'expressió i afegint l'equació 4.55 s'obté:

$$v_l^{dq0} = \begin{bmatrix} r_l & L_l \dot{\theta} & 0 \\ -L_l \dot{\theta} & r_l & 0 \\ 0 & 0 & r_l \end{bmatrix} i_l^{dq0} + L_l \frac{d}{dt} i_l^{dq0} + v_z^{dq0} \quad \text{Equació 4.57}$$

On  $\dot{\theta} = \omega_z$ . Se sap que  $v_l^{abc}$  i  $v_z^{abc}$  no tenen component 0, i que  $i_{l0}$  serà 0. Conseqüentment, podem suprimir la component 0 de les equacions[20]:

$$\begin{bmatrix} v_{lq} \\ v_{ld} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{zq} \\ v_{zd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & l_l \omega_z \\ -l_l \omega_z & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{lq} \\ i_{ld} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_l & 0 \\ 0 & l_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{lq} \\ i_{ld} \end{bmatrix} \quad \text{Equació 4.58}$$

## 4.5 XARXA ELÈCTRICA

Tal com s'ha especificat en apartats anteriors, el generador es connecta a la xarxa elèctrica mitjançant un sistema de AC trifàsic i equilibrat, el qual es modelitza en aquest treball.

Per fer-ho, es modelitzen 3 fonts de tensió  $v_{z,abc}$  amb el mateix valor de mòdul i un desfase de  $120^\circ$  entre elles. També caldrà filtrar el voltatge provinent del convertidor, la qual cosa es fa a través d'inductàncies connectades a la xarxa.

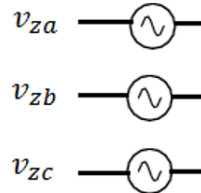


Figura 4.43. Model de la xarxa elèctrica

(Font: [20])

A continuació es mostren les equacions dels voltatges mencionats[12]:

$$v_{za} = \sqrt{2} V_{ef} \cos(\omega_z t + \theta_0) \quad \text{Equació 4.59}$$

$$v_{zb} = \sqrt{2} V_{ef} \cos\left(\omega_z t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}\right) \quad \text{Equació 4.60}$$

$$v_{zc} = \sqrt{2} V_{ef} \cos\left(\omega_z t + \theta_0 + \frac{2\pi}{3}\right) \quad \text{Equació 4.61}$$

On  $V_{ef}(=V_{rms})$  correspon al valor eficaç del voltatge de fase, també anomenat tensió fase-neutre;  $\theta_0$  correspon a la fase inicial de l'angle elèctric; i  $\omega_z$  és la pulsació de la xarxa elèctrica, el valor de la qual prové de  $\omega_z = 2\pi f_z$ , fixant el valor de  $f_z = 50\text{Hz}$  (correspon al valor de la freqüència de la xarxa a Europa).

Aquí cal recordar la diferència entre valor eficaç i valor de pic. El valor eficaç d'un senyal altern (intensitat o voltatge) és el valor constant equivalent al mateix senyal en continu. Per senyals sinusoidals es compleix  $V_{ef} = \frac{V_{pic}}{\sqrt{2}}$ . En aquest treball es fixa  $V_{ef} = \frac{690}{\sqrt{2}} = 487.9\text{ V}$ .

# 5.CONTROL

## 5.1 DESCRIPCIÓ DEL SISTEMA. ESQUEMA DE CONTROL.

En aquest apartat es descriu tot el sistema de control per una turbina eòlica amb GSIP. L'aerogenerador consta de dues bandes: la banda de la xarxa (Grid-side) i la banda del generador (Generator-side). També podem distingir dues parts més enfocades al control de la planta: el nivell alt i el nivell baix de control (Hight-Level & Low-Level Control)[25].

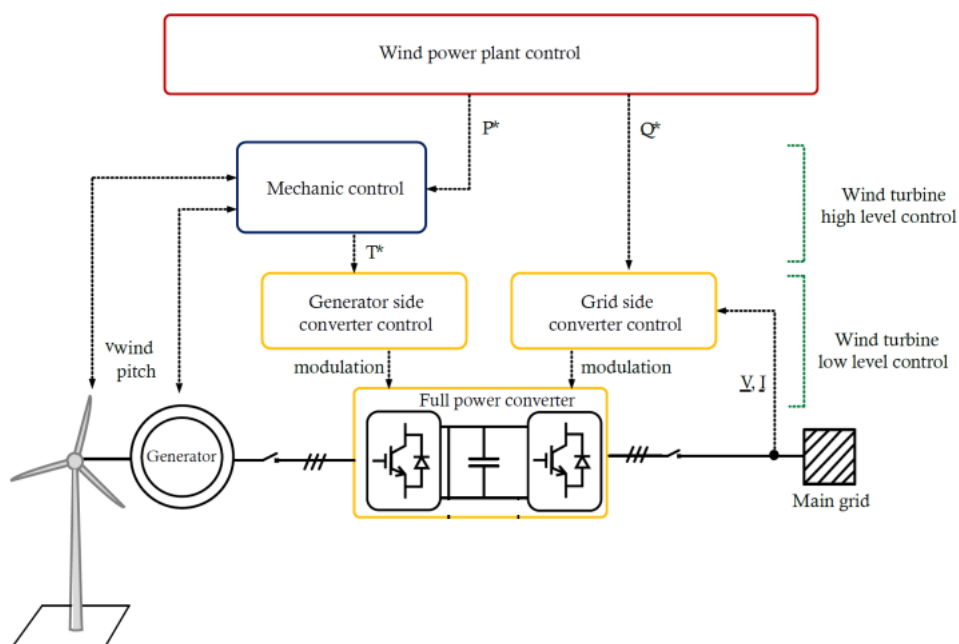


Figura 5.1. Esquema general aerogenerador

(Font: [25])

Tal com s'observa en la Figura 5.1, High-level control correspon al control mecànic. Dins aquest control es distingeix:

- L'angle de Pitch, que limita la potència.
- L'angle de Yaw, que limita l'orientació de l'aerogenerador, en funció de la direcció del vent.

- El par de referència, que estarà vinculat al MPPT.

Per altra banda, Low-level control correspon als convertidors. És en aquest punt on fem la distinció entre:

- Convertidor de la banda del generador.
  - Controla el parell.
- Convertidor de la banda de la xarxa.
  - Controla el bus DC.
  - Controla la potència reactiva  $Q$ .
  - Dóna suport a la xarxa.

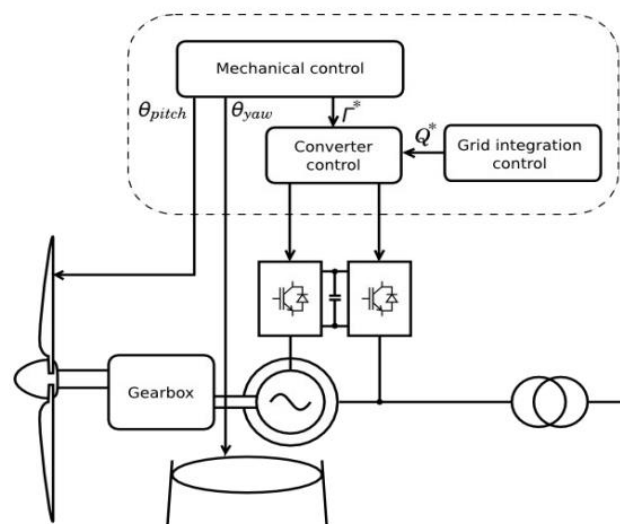


Figura 5.2. Esquema més específic dels controls de l'aerogenerador

(Font: [25])

El sistema de control pretén maximitzar o limitar la potència absorbida per l'aerogenerador en funció de la velocitat del vent. Observant la Figura 5.3, es pot entendre com, per un cert rang inicial de velocitats, la potència absorbida augmenta. En un 1r tram, donat que les velocitats del vent són excessivament baixes, l'aerogenerador no actua. Assolida una velocitat de treball mínima, anomenada *Cut-in wind speed*, s'inicia el 2n tram de velocitats. Durant aquesta fase, el sistema de control proporciona el valor  $C_p$  màxim per tal d'obtenir el màxim rendiment possible.

Si la velocitat del vent segueix en augment, s'assoliria el 3r i 4t rang de velocitats, el qual comença quan s'arriba a la velocitat nominal fixada (*rated wind speed*). En aquesta fase s'assoleix el valor nominal de potència, la màxima a la qual pot treballar l'aerogenerador (*rated power*). No obstant, la velocitat del vent pot seguir en augment, i conseqüentment augmentaria la potència absorbida. És

per això que, per aquest rang de velocitats, el sistema de control limita l'obtenció de potència a través de l'angle de Pitch. Aquesta limitació es pot dur a terme fins a una velocitat del vent límit, anomenada *Cut-out wind speed*, en la qual l'aerogenerador deixaria d'operar per seguretat.

Finalment, es distingeix la velocitat del vent de supervivència, que dóna entrada al 5è i darrer tram. Parlem de velocitats molt elevades, les quals podrien provocar danys importants a la instal·lació de l'aerogenerador, tot i estant no-operatiu.[26]

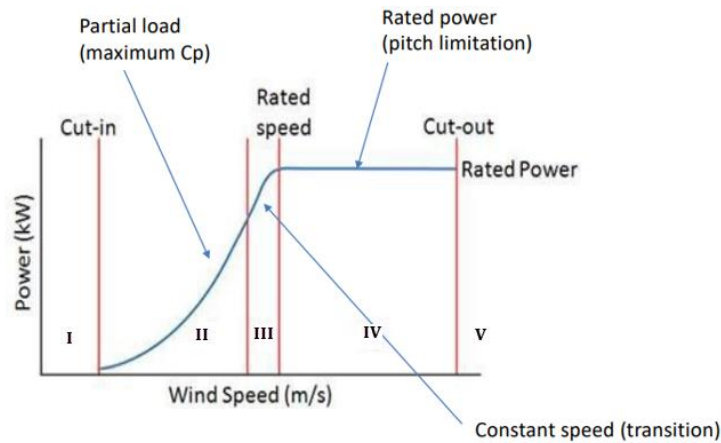


Figura 5.3. Gràfic Potència absorbida en funció de la velocitat del vent

(Font: [26])

En l'apartat 5.1.4. corresponent al Control de l'angle de Pitch es detallen cadascuna de les zones, i la seva influència en el control de la potència absorbida del vent per l'aerogenerador. A continuació, s'especifiquen uns valors orientatius per a cada denominació de velocitats citades:

<b>Cut-in</b> wind speed	2,5 – 4,5	m/s
<b>Nominal</b> wind speed	10 - 16	m/s
<b>Cut-out</b> wind speed	20 - 30	m/s
<b>Survival</b> wind speed	50 - 70	m/s

Per entrar en més detall, es presenta l'esquema de control real de tot el sistema (veure Figura 5.4). S'hi distingeixen les dues meitats del sistema; la banda de la xarxa (costat dret de la imatge) i la banda del generador (costat esquerre de la imatge).

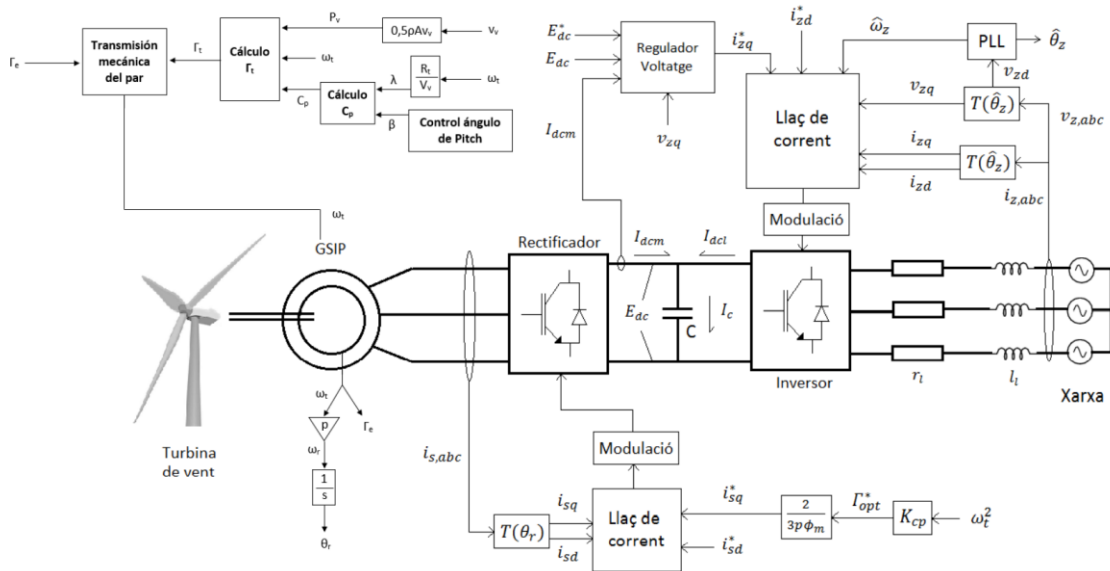


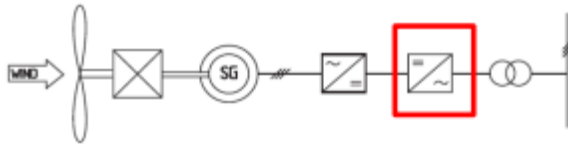
Figura 5.4. Esquema de control real

(Font: elaboració pròpia)

La principal diferència entre el sistema de control real i el de simulació és el control dels convertidors. En el cas real, els senyals de control que es generen als llaços de corrent que es veuen a la Figura 5.4 es modulen amb la tècnica PWM (*Pulse-Width Modulation*). Amb aquesta modulació, per cada convertidor es generen 6 senyals de control pels 6 IGBT, com s'ha exposat a l'apartat 4.4.



### 5.1.1 Banda xarxa



A la Figura 5.4 s'observa l'esquema de control de la simulació per la banda de la xarxa, que avarca des del convertidor DC/AC fins a la xarxa. L'objectiu principal és controlar els voltatges ( $v_{l,abc}$ ) amb què el convertidor (l'inversor) es connecta a la xarxa. Controlant aquests voltatges es controla també la intensitat i la potència que es transmet a la xarxa.

Per aquest treball, es modela un control bàsic VSC.

#### 5.1.1.1 VSC Basic Control

El VSC permet controlar dues variables elèctriques en el marc  $qd$ . De tal forma, es controla per separat la potència activa i la reactiva. La potència activa de referència s'ajusta per regular la tensió del bus de CC i per garantir l'equilibri de potència, és a dir, la potència injectada a la xarxa ha de ser la mateixa que la potència generada.[37]

Com s'ha vist en l'apartat anterior, l'esquema de control aplicat en aquest treball es basa en una cascada de dos nivells de sistema de control:

- El controlador de nivell inferior ens permet regular la corrent alterna en els components  $q$  i  $d$ . [22] Aquest nivell també es coneix com a bucle de corrent o bucle interior, i és el bucle de control bàsic per a un VSC. En aplicacions HVDC, trobem dues possibilitats per al control d'alt nivell:
  - Creació de voltatge AC: els controladors d'alt nivell se centren en la creació d'un costat AC de la xarxa que parteix dels dos components de corrent  $i_{l,qd}$  per crear una nova tensió de AC amb un angle i una velocitat angular preestablerts. L'estructura d'aquest control s'utilitza per crear una xarxa de AC en parcs eòlics mar.
  - Control de tensió de DC: Controladors d'alt nivell enfocats al costat de DC, que dedica un component de corrent ( $i_{l,q}$ ) per regular la tensió continua i garantir l'estabilitat del sistema de corrent continu. A més, l'altre component,  $i_{l,d}$ , controla la tensió o la potència reactiva al PCC. [22]

Aquest és l'estructura de control típica per a VSC que connecta sistemes de corrent continu amb la xarxa principal de AC. Aquest treball s'ha modelat amb aquesta segona opció.

Els controladors tracten corrents i tensions en el marc de referència  $qd$  ajustant l'angle de la xarxa elèctrica. Per aquest motiu, es necessita el que s'anomena un PLL (*Phase Locked Loop*) per fer un seguiment de l'angle corresponent.[28]

Per entendre-ho millor i en més detall, es fa un recorregut des de l'obtenció dels valors sol·licitats de tensió i intensitat de l'aerogenerador, fins el control d'aquests valors que s'acaben transmetent a la xarxa.

### 5.1.1.2 Grid-side AC Current Control (Inner Loop)

En aquest apartat es detalla el control del corrent (*Current Control Loop*, també conegut com *Inner Loop*) a través d'un filtre d'acoblament L. L'objectiu és controlar el corrent  $i_{l,abc}$  aplicant la tensió  $v_{l,abc}$  a través del convertidor de potència. Les següents equacions descriuen el filtre d'acoblament L existent entre es components  $q$  i  $d$  de tensió i corrent. [28]

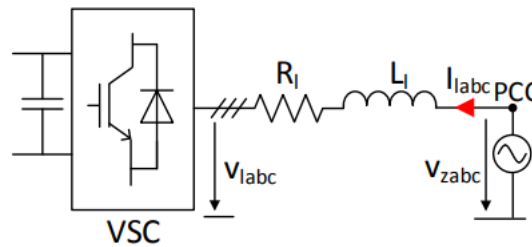


Figura 5.5. Model VSC connectat a la xarxa CA a través d'un filtre d'acoblament L

(Font: [22])

$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_l^q \\ i_l^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_l & -w_z \\ w_z & -r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_l^q \\ i_l^d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_l^q \\ v_l^d \\ v_d^q \\ v_z^d \end{bmatrix}$	Equació 5.1
--	-------------

On  $v_z^{qd}$  són les components  $qd$  de voltatge  $v_z^{abc}$  al PCC. Per altra banda,  $Z_l = r_l + jwL_l$  són la resistència i la reactància de la inductància d'acoblament,  $v_l^{qd}$  són les components qd de voltatge aplicat pel convertidor de potència,  $i_l^{qd}$  es el corrent a través del filtre d'acoblament, i  $w_z$  és la velocitat angular de la xarxa.

Per tal de controlar el  $i_{lq}$  i  $i_{ld}$ , hi ha dos enfocaments principals de control diferents:

- Control multivariable, controlant els components  $q$  i  $d$  amb un sol controlador de dues dimensions.
- Control independent i de desacoblament dels components  $q$  i  $d$ .

En aquest treball s'utilitza el segon enfocament de desacoblament i control de  $i_{lq}$  i  $i_{ld}$  per separat.

Suposant que el sistema de control està orientat amb la component de l'eix  $d$  de la tensió al PCC ( $v_{zd} = 0$ ),  $q$  i  $d$  es poden desacoblar com:

$$\begin{bmatrix} v_l^q \\ v_l^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{v}_l^q + v_z^q - l_l \omega i_l^d \\ -\hat{v}_l^d + l_l \omega i_l^q \end{bmatrix} \quad \text{Equació 5.2}$$

On  $\hat{v}_l^q$  i  $\hat{v}_l^d$  són les tensions de sortida dels controladors de corrent, mentre que  $v_l^q$  i  $v_l^d$  són les tensions a aplicar pel controlador. Si substituïm els valors a l'equació 5.1, s'obté:

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_l^q \\ \hat{v}_l^d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_l & 0 \\ 0 & r_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_l^q \\ i_l^d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_l & 0 \\ 0 & L_l \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_l^q \\ i_l^d \end{bmatrix} \quad \text{Equació 5.3}$$

S'aplica la Transformada de Laplace, de tal manera que l'equació de transferència entre els voltatges del controlador i els corrents del convertidor és:

$$\begin{bmatrix} i_l^q(s) \\ i_l^d(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_l s + r_l} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_l s + r_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{v}_l^q \\ \hat{v}_l^d \end{bmatrix}$$

En base a [27], s'obté el controlador:

$$K_{il}(s) = \frac{K_{p\_il}s + K_{p\_pl}}{s} \quad \text{Equació 5.4}$$

$$K_{p\_il} = \frac{L_l}{\tau_{il}} \quad \text{Equació 5.5}$$

$$K_{i\_il} = \frac{r_l}{\tau_{il}} \quad \text{Equació 5.6}$$

On  $\tau_{il}$  correspon a la constant de temps del closed loop del sistema elèctric. Aquesta constant es determina en funció de les restriccions físiques del convertidor. Sol definir-se amb valors 5-10 vegades menors a la freqüència de la xarxa.[22]

D'aquesta manera, el control queda:

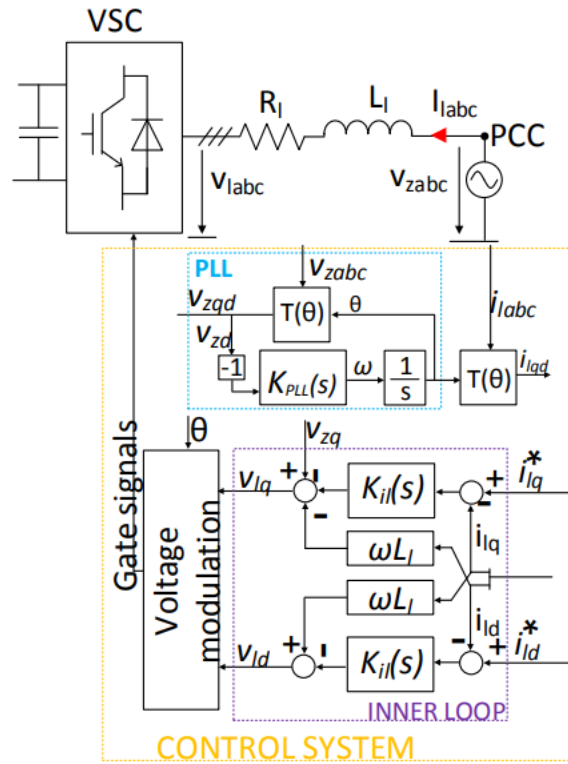


Figura 5.6. Esquema del Current Control Loop d'un VSC connectat a la xarxa AC

(Font: [22])

On s'hi distingeix no només l'Inner Loop descrit en aquest apartat, sinó també el sistema PLL, que s'explica a continuació.

### 5.1.1.3 PLL (Phase Locked Loop)

PLL correspon al Phase Locked Loop. Com s'ha dit, el PLL és útil per extreure l'angle necessari per sincronitzar el control del sistema, sota el marc de referència síncrona. Un esquema clàssic d'un PLL es basa en l'eix  $d$  de la tensió, retro alimentada per un controlador PI.[28] Aquest controlador obté la velocitat angular de la xarxa, i amb un integrador addicional també s'obté l'angle corresponent. La figura 5.7 mostrava l'esquema del PLL integrat en el control VSC, que es pot descriure com segueix:

$$K_{PLL}(s) = \frac{K_{p\_PLL}s + K_{i\_PLL}}{s} \quad \text{Equació 5.7}$$

On  $K_{p\_PLL}$  és el guany proporcional i  $K_{i\_PLL}$  és el guany integral del PLL. D'acord amb [28], els guanys es defineixen com:

$$K_{p\_PLL} = \frac{2 \xi_{pll} w}{\hat{V}_{za}} \quad \text{Equació 5.8}$$

$$K_{i\_PLL} = \frac{w^2}{\hat{V}_{za}} \quad \text{Equació 5.9}$$

On  $\xi_{pll}$  és el factor d'amortiment,  $\hat{V}_{za}$  és el valor pic de  $v_{za}$ , i  $w$  és la velocitat angular de la xarxa. Es suggereix utilitzar un valor del factor d'esmortiment  $\xi_{pll} = 0.707$ . [28]

#### 5.1.1.4 DC Voltage Control (Outer Loop)

El següent pas correspon al control de tensió DC (DC Voltage Control Loop, també conegut com Outer Loop).

El regulador de tensió de DC és necessari per controlar la tensió del bus de DC assegurant l'equilibri de potència entre la potència d'entrada a la xarxa de corrent continu i la potència injectada a la xarxa. La sortida del controlador de tensió de DC es proporciona la  $i_l^{q*}$  referència per al bucle actual. Diversos controladors poden utilitzar-se per a sistemes HVDC [35] però el més predominant és el controlador PI.

El controlador PI s'utilitza principalment en enllaços HVDC per controlar la tensió del costat DC a un nivell constant, a causa del guany integral, que permet tenir error d'estat estacionari zero.

La sortida del controlador de tensió de DC és el corrent que hauria de ser injectat pel VSC al costat DC,  $I_{dcm}^*$ , però per al bucle interior cal un corrent de referència AC.  $I_{dcm}^*$  es pot transformar en  $i_l^{q*}$  a través de:

$$i_l^{q*} = \frac{2 I_{dcm}^* E_{dc}}{3 v_z^q} \quad \text{Equació 5.10}$$

##### 5.1.1.4.1 Disseny del controlador PI del DC Voltage Control

El controlador basat en PI s'exemplifica en el cas d'un disseny d'un regulador de tensió de bus de DC per al convertidor VSC1-back-to-back, connectat a la xarxa mitjançant un filtre d'acoblament L. La figura 5.8 mostra un esquema de la implementació del control de tensió de DC.

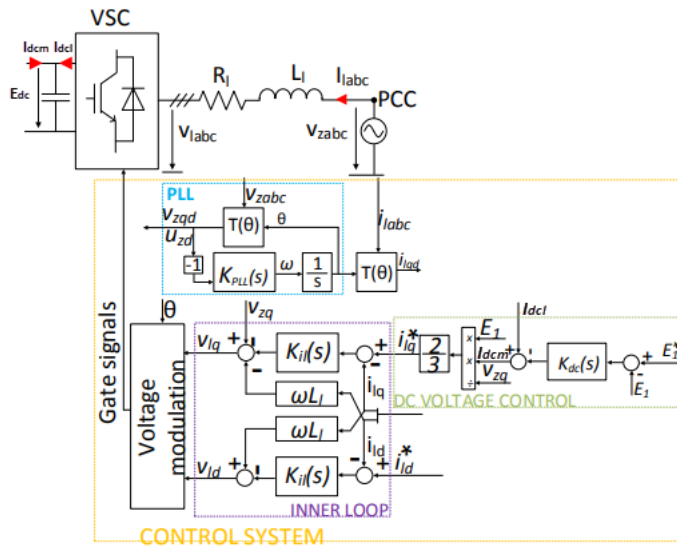


Figura 5.7. Esquema del DC Voltage Control i del Current Control Loops d'un VSC connectat a la xarxa AC  
(Font: [22])

De l'equació 5.10 es dedueix la següent estructura de desacoblament:

$$I_{dcm}^* = \hat{I}_{dcm}^* - I_{dcl}^* \tag{Equació 5.11}$$

On  $\hat{I}_{dcm}^*$  és la sortida del voltatge del controlador. Substituint a l'equació 5.10:

$$\hat{I}_{dcm}^* = C_{dc} \frac{dE_{dc}}{dt} \tag{Equació 5.12}$$

Si s'aplica la Transformada de Laplace, s'obté la funció de transferència entre el corrent controlat i el voltatge  $E_{dc}$ :

$$E_{dc}(s) = \frac{1}{C_{dc} s} \hat{I}_{dcm}^*(s) \tag{Equació 5.13}$$

En base a [27], s'obté el controlador proporcional:

$$G_{dc}(s) = K_{p\_dc} \tag{Equació 5.14}$$

On  $K_{p\_dc}$  representa el guany del controlador proporcional. Aquest es pot calcular com:

$$K_{p\_dc} = \frac{C_{dc}}{\tau_{dc}} \tag{Equació 5.15}$$

On  $\tau_{dc}$  és la constant de temps del closed loop del sistema de voltatge DC. Aquesta constant sol definir-se amb valors 3-5 vegades menor a  $c$ . Per millorar el rendiment del sistema s'afegeix un guany integral. El nou controlador és:

$$G_{dc}(s) = \frac{K_{p\_dc}s + K_{i\_dc}}{s} \tag{Equació 5.16}$$

D'acord amb [28], els guanys es defineixen com:

$$K_{p\_dc} = 2 C_{dc} \xi_{dc} w_{dc} \tag{Equació 5.17}$$

$$K_{i\_dc} = C_{dc} w_{dc}^2 \tag{Equació 5.18}$$

On  $\xi_{dc}$  és el factor d'amortiment i  $w_{dc}$  és la velocitat angular del outer loop closed loop.  $w_{dc}$  s'ajusta per ser almenys 3 vegades menor que  $\tau_{il}$ . [35]

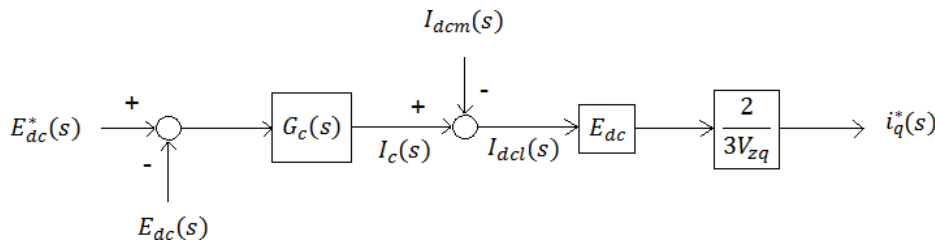


Figura 5.8. Regulador de voltatge implementat

(Font: [20])

Sabent ja com controlar la tensió  $E_{dc}$  que garanteixi l'equilibri de potència, s'analitza amb més profunditat l'origen i ús d'aquesta potència.

La potència provinent del generador es transmet pel convertidor i "entra" a la banda de la xarxa amb la intensitat  $I_{dc}$ . La part contínua (DC) del convertidor es controla amb el regulador de voltatge

esmentat, que manté el voltatge de bus constant al valor desitjat ( $E_{DC}^*$ ). Quan el regulador aconseguix un voltatge de bus constant, llavors la intensitat pel condensador  $I_{dc} = 0$  i es compleix  $|I_{dcm}| = |I_{dcl}|$ , i per tant es transmet tota la potència de la banda del generador a la banda de la xarxa. Es considera doncs, un convertidor sense pèrdues. Només hi ha pèrdues a la resistències de connexió a xarxa.[35]

Per aconseguir això, el regulador de voltatge (5.1.1.4) fixa quina intensitat ha de circular cap a la xarxa ( $i_z^{q*}$ ). Aquí és on actua el llaç de corrent (5.1.1.2), el qual a partir del valor de intensitat que demana el regulador de voltatge actua sobre el voltatge de la part AC del convertidor ( $v_{l,abc}$ ), fent-lo variar de manera que la intensitat resultant sigui la desitjada. Per garantir l'equivalència de potències entre la part DC i AC del convertidor es fixa la intensitat  $I_{dcl} = \frac{P_t}{E_{dc}}$  (en el cas real aquesta equivalència és implícita al sistema). Cal recordar que en un sistema real, el llaç de corrent actuaria, a través d'una modulació, sobre els senyals de control dels IGBT de l'inversor, per tal de regular-ne el voltatge (veure Figura 5.9).

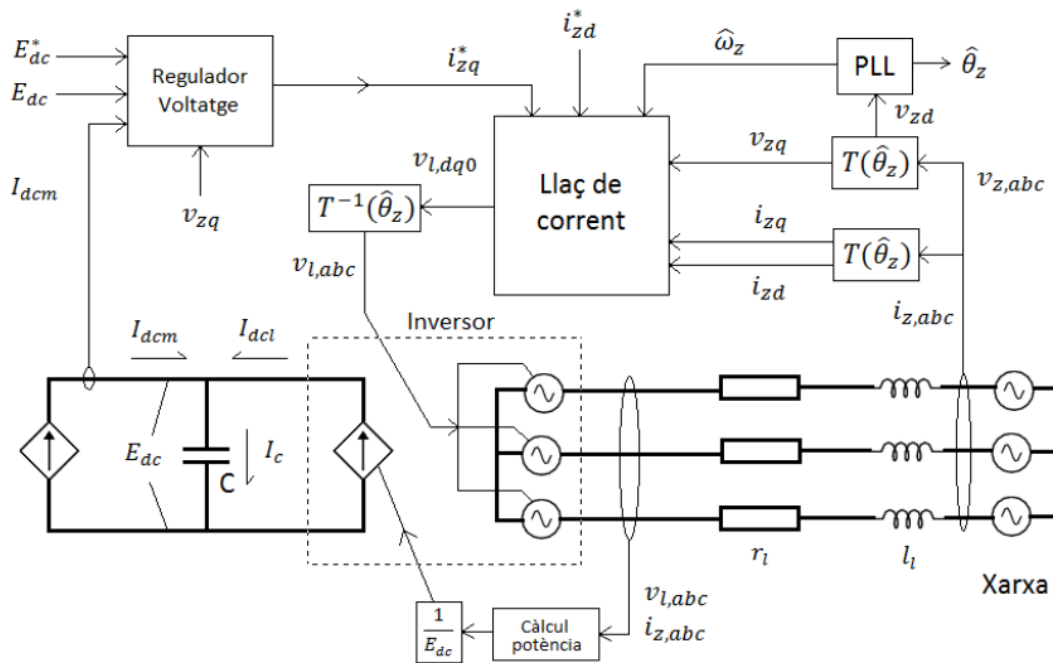


Figura 5.9. Esquema de simulació del control banda xarxa (simplificat).

(Font: [20])

D'aquesta manera es tanca tot el sistema i la potència rebuda pel convertidor es transmet a la xarxa. La intensitat  $i_z^{d*}$  permet fixar el valor de la potència reactiva ( $Q$ ) (habitualment es fixa a un cert valor requerit per l'operador de la xarxa).

Els blocs  $T(\hat{\theta}_z)$  són transformades de Park que a partir de l'estimació de l'angle elèctric de la xarxa  $\hat{\theta}_z$  transformen les variables sinusoidals dels voltatges i de les intensitats a valors



constants. Aquesta transformació de les variables sinusoidals del sistema a variables constants permet un control més simple de les mateixes. El PLL vist (*Phase Locked Loop*) (5.1.1.3) permet estimar l'angle elèctric de la xarxa  $\hat{\theta}_z$  que s'utilitza per aplicar la transformada de *Park* i obtenir voltatges i intensitats constants.

Per últim, es presenta el càlcul de les potències activa i reactiva a partir de les intensitats de referència  $i_z^{q*}$  i  $i_z^{d*}$  per tal d'obtenir els valors de potència activa  $P^*$  i potència reactiva  $Q^*$  desitjats. Aquests valors poden ser obtinguts gràcies a la teoria de la potència instantània i recordant la transformada de *Park*. [25]

$$P^* = \frac{3}{2} (v_z^q i_z^{q*} + v_z^d i_z^{d*}) \tag{Equació 5.19}$$

$$Q^* = \frac{3}{2} (v_z^q i_z^{d*} - v_z^d i_z^{q*}) \tag{Equació 5.20}$$

On els valors dels voltatges i les intensitats són en referència  $dq0$ . A més, com s'ha vist, a la banda de la xarxa el *Phase Locked Loop* (PLL) es garanteix que  $v_z^d = 0$ . I per tant, les equacions anteriors quedarien de la següent forma:

$$i_z^{q*} = \frac{2}{3} \frac{P^*}{v_z^q} \tag{Equació 5.21}$$

$$i_z^{d*} = \frac{2}{3} \frac{Q^*}{v_z^q} \tag{Equació 5.22}$$

### 5.1.2 Banda generador



En aquest apartat es descriurà la part del sistema que va des de la pròpia turbina fins al rectificador, tot això representat a la Figura 5.11.

Aquest esquema presenta l'altra part del sistema general (veure Figura 5.4) que avarca des de la turbina fins al rectificador (convertidor AC/DC). De manera semblant a l'esquema de l'apartat anterior (Figura 5.10), un altre llaç de corrent (5.1.1.2) actua sobre els voltatges de la part AC del convertidor ( $v_{s,abc}$ ) de manera que les intensitats per l'estator ( $i_s^q$  i  $i_s^d$ ) de la màquina siguin les desitjades ( $i_s^{q*}$  i  $i_s^{d*}$ ).

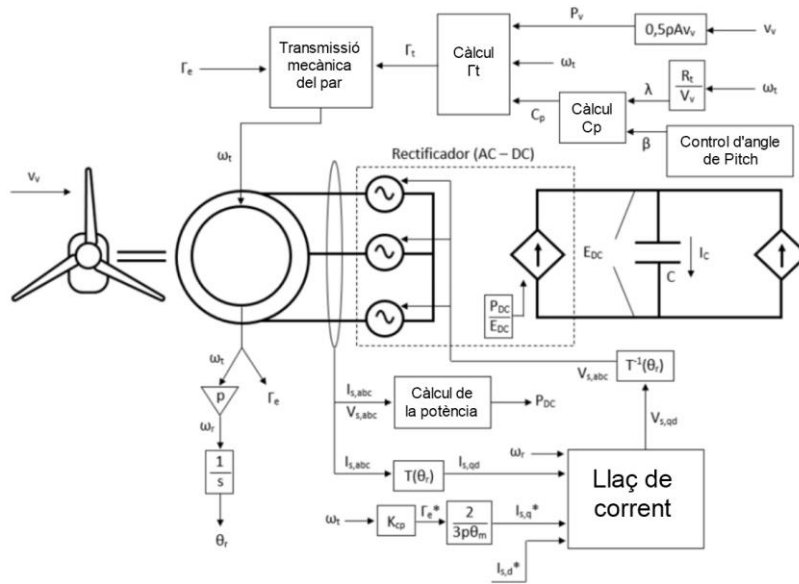


Figura 5.10. Esquema de simulació del control banda generador  
(Font: [29])

Com es veurà més endavant, fixant el valor correcte de la intensitat desitjada  $i_s^{q*}$  es podrà controlar la velocitat de rotació de la turbina i, per tant, la generació de potència (5.1.3 Control potència òptima i 5.1.4 Control d'angle de Pitch).

A la Figura 5.11 es veu com es fixa  $i_s^{q*}$  mitjançant el valor del parell òptim ( $T_{opt}^*$ ). De la mateixa manera, controlant el valor de l'altra component de la intensitat  $i_s^{d*}$  es podria limitar els nivells de voltatge de l'inversor. No obstant, en aquest projecte no s'ha modelat el limitador de voltatge.

Per tal d'obtenir valors constants de les intensitats s'aplicarà altre cop la transformada de Park ( $T(\theta_r)$ ). En aquest cas però, el valor de l'angle serà l'angle elèctric del rotor  $\theta_r$  calculat integrant la velocitat de rotació de la turbina ( $\omega_t$ ) pel nombre de parelles de pols ( $p$ ). Per garantir l'equivalència de potències durant la simulació del model entre la part DC i AC del convertidor es fixa la intensitat  $I_{acm} = \frac{P_{dc}}{E_{dc}}$ , on  $P_{dc} (= P_t)$  correspon a la potència de la part AC. A la realitat aquesta equivalència és implícita.

### 5.1.2.1 Procediment

En primer lloc, a través de la velocitat del vent  $v_w$  i de la velocitat de rotació de la turbina  $\omega_t$  es calcularà el parell mecànic de referència  $T_{opt}^*$ . Comparant aquest parell mecànic amb el parell del generador  $T_e$  mitjançant una equació diferencial es recalcularà la  $\omega_t$ .

En segon lloc, centrant-nos pròpiament al rectificador (AC/DC), aquest s'ha modelitzat amb tres fonts de tensió a la part d'AC i amb una font de corrent a la part de DC.

Per al control del rectificador es torna a fer servir un llaç de corrent similar al que ja s'ha explicat per a l'inversor. En aquest cas, el llaç de corrent té com a inputs les intensitats que circulen per l'estator ( $i_s^q$  i  $i_s^d$ ) i les intensitats desitjades ( $i_s^{q*}$  i  $i_s^{d*}$ ). Així mateix, es calculen les tensions  $v_s^q$  i  $v_s^d$  que cal aplicar a les fonts de tensió perquè les intensitats que circulen per l'estator siguin igual a les desitjades.[25]

Com es pot veure a la Figura 5.11, per a aquest sistema de control també s'utilitzarà la transformada de Park per passar els senyals sinusoidals a valors constants, i viceversa. A diferència del cas anterior, per fer aquesta transformació s'utilitzarà l'angle elèctric del rotor  $\theta_r$  que s'obté d'integrar la velocitat de rotació del rotor.

De la mateixa manera que a l'inversor, es farà el càlcul de la potència activa mitjançant:

$$P_t = v_{sa}i_{sa} + v_{sb}i_{sb} + v_{sc}i_{sc} \quad \text{Equació 5.23}$$

D'aquesta manera, s'implantarà la intensitat que ha de circular per la font de corrent a la part de contínua, imposant així la igualtat de potències  $P_t = P_{dc}$ .

Finalment, s'estudiarà quina intensitat desitjada  $i_s^{q*}$  cal aplicar al llaç de corrent per obtenir la potència òptima per a cada velocitat angular  $w_t$ . Igualment, també es determinarà el component  $i_s^{d*}$  per tal de limitar el voltatge del rectificador.

### 5.1.2.2 Transmissió mecànica del par

Com es veurà detalladament en l'apartat del MPPT, a partir de la velocitat del vent  $v_w$ , i de la velocitat de rotació de les aspes  $w_t$ , es calcula la potència disponible  $P_v$  i el coeficient de potència  $C_p$  respectivament. Mitjançant aquests valors es pot determinar la potència  $P_t$  de la turbina a cada instant i, per tant, també el parell mecànic de la turbina  $\Gamma_t$ .

D'altra banda, també hi ha el parell del generador,  $\Gamma_e$ , que ofereix el GSIP com a resistència a la rotació del rotor. La relació entre  $\Gamma_t$  i  $\Gamma_e$  es descriu mitjançant:[11]

$$\Gamma_t + \Gamma_e = J_{tot} \frac{d}{dt} w_t \quad \text{Equació 5.24}$$

D'aquesta manera, si la turbina està girant a  $w_t$  constant i hi ha un augment de la velocitat del vent, s'incrementarà el  $\Gamma_t$ , venent instantàniament el  $\Gamma_e$ . Això provocarà un augment en la velocitat de rotació

de la turbina que provocarà un augment del  $\Gamma_e$  fins a arribar a l'equilibri de moments. Aleshores, la velocitat de rotació de turbina es mantindrà constant de nou.

Aplicant la transformada de *Laplace* obtenim:

$$w_t = \frac{1}{J_{tot}} \frac{1}{s} (\Gamma_t + \Gamma_e) \tag{Equació 5.25}$$

Aquesta equació s'implementarà al sistema de control per calcular la velocitat de rotació de la turbina, que es mostra a continuació:

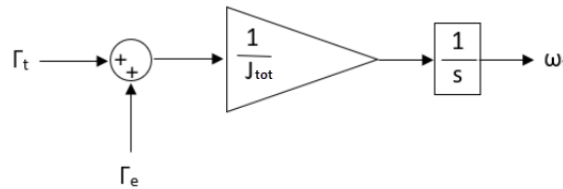


Figura 5.11. Esquema transmissió mecànica del par  
(Font: [29])

### 5.1.2.3 Generator-side AC Current Control (Inner Loop)

Aquest llaç de corrent funciona de manera molt semblant al llaç de corrent ja explicat per a l'inversor. Partint de l'equació 4.42, primer cal desacoblar els voltatges i les intensitats. Conseqüentment, es defineixen dues variables auxiliars  $\hat{v}_s^q$  i  $\hat{v}_s^d$  que permeten desacoblar els corrents  $i_s^q$  i  $i_s^d$  per estudiar primer el sistema desacoblat:

$$\hat{v}_s^q = r_s i_s^q + L_q \frac{di_s^q}{dt} \tag{Equació 5.26}$$

$$\hat{v}_s^d = r_s i_s^d + L_s \frac{di_s^d}{dt} \tag{Equació 5.27}$$

Aplicant la transformada de *Laplace* i reordenant les variables s'obtenen les funcions de transferència de la planta:

$$\frac{i_s^q(s)}{\hat{v}_s^q(s)} = \frac{1}{(r_s + L_q s)} \tag{Equació 5.28}$$

$$\frac{i_s^d(s)}{\hat{v}_s^d(s)} = \frac{1}{(r_s + L_d s)} \tag{Equació 5.29}$$

Tenint en compte que en aquest cas s'ha definit que  $L_q = L_d$ , s'obté el controlador, les constants del qual  $K_{p\_scc}$  i  $K_{i\_scc}$  són les representades a continuació:

$$G_{ciq}(s) = \frac{K_{p\_scc}s + K_{i\_scc}}{s} \tag{Equació 5.30}$$

D'acord amb [28], els guanys es defineixen com:

$$K_{p\_scc} = \frac{L_q}{\tau} \tag{Equació 5.31}$$

$$K_{i\_scc} = \frac{r_s}{\tau} \tag{Equació 5.32}$$

Aquestes equacions desacoblades ja poden ser controlades mitjançant la tècnica IMC [30]. Un cop calculat el controlador per al sistema desacoblat, s'acobla de nou el model seguint:

$$v_s^q = \hat{v}_s^q + w_r L_d i_s^d + \phi_m w_r \tag{Equació 5.33}$$

$$v_s^d = \hat{v}_s^d - w_r L_q i_s^q \tag{Equació 5.34}$$

A la figura 5.13 es mostra un esquema de com queda finalment acoblat el sistema:

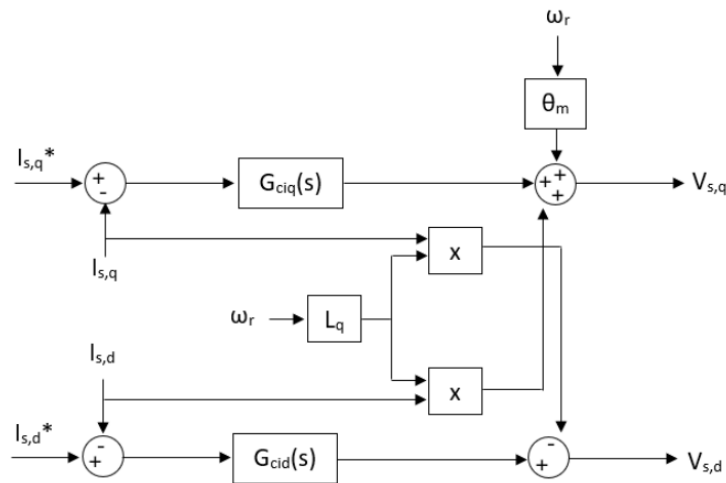


Figura 5.12. Esquema Current Control rectificador

(Font: [29])

### 5.1.3 Control Potència Òptima - MPPT

El control d'un aerogenerador de velocitat variable per sota de la velocitat nominal del vent s'aconsegueix controlant el generador. L'objectiu principal és maximitzar la captació d'energia eòlica a diferents velocitats del vent.

Per tal d'aconseguir que la potència extreta del vent en cada moment sigui la òptima, cal determinar la potència òptima per a cada velocitat angular de la turbina. En funció de la velocitat de gir de la turbina es pot calcular una consigna de control pel convertidor, que incidirà en el parell elèctric que dona el generador i de retruc farà variar la velocitat de rotació de la turbina. Tot plegat establirà la velocitat angular de l'aerogenerador per extreure'n la màxima potència en cada moment. Es pot aconseguir ajustant la velocitat de la turbina de manera que es mantingui la relació òptima de velocitat de punta  $\lambda^{opt}$ .

La figura 5.5 mostra les característiques típiques d'una turbina eòlica que funciona a diferents velocitats del vent, on  $P_M$  i  $w_M$  són la potència mecànica i la velocitat mecànica de la turbina, respectivament.

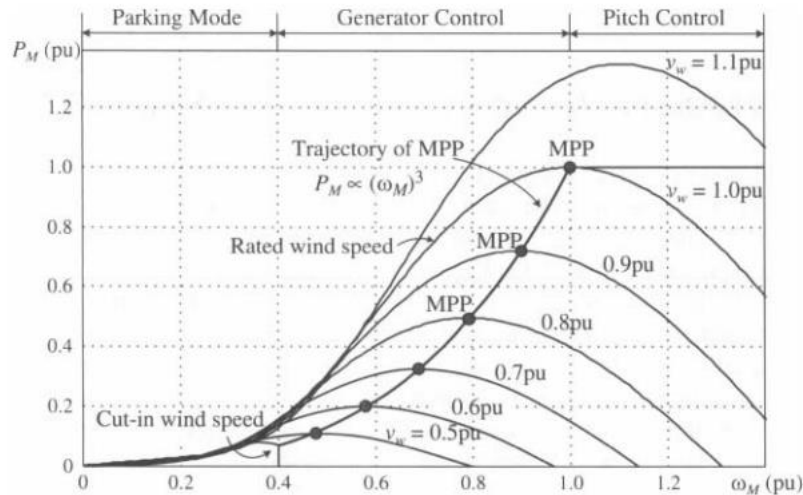


Figura 5.13. Característiques de potència-velocitat de l'aerogenerador i funcionament del punt de màxima potència (MPP).

(Font: [13])

Per a una velocitat del vent determinada, cada corba de potència té un punt de potència màxima (MPP) de la qual s'aconsegueix la relació òptima de velocitat de punta  $\lambda^{opt}$ . Per obtenir el màxim de potència

del vent disponible a diferents velocitats del vent, s'ha d'ajustar la velocitat de la turbina per garantir el seu funcionament a tots els MPP. La trajectòria dels MPP representa una corba de potència, que es pot descriure per:

$$P_t \propto w_t^3 \tag{Equació 5.35}$$

Aquesta potència també es pot expressar en termes de parell:

$$P_t = \Gamma_t w_t \tag{Equació 5.36}$$

On  $\Gamma_t$  representa el parell mecànic de la turbina. Substituint les equacions 5.35 i 5.36 s'obté:

$$\Gamma_t \propto w_t^2 \tag{Equació 5.37}$$

Les relacions entre la potència mecànica, la velocitat i el parell d'una turbina eòlica poden utilitzar-se per determinar la velocitat o parell òptims de referència per controlar el generador i aconseguir l'operació MPP. El desenvolupament d'aquest sistema de control en funció de les velocitats del vent es duu a terme amb un seguiment del punt de màxima potència (MPPT).[13] Aquest seguiment es divideix en 3 fases, directament relacionades amb els rangs de velocitats del vent descrites en l'apartat 5.1.

L'MPPT, o *Maximum Power Point Tracking*, maximitza la potència de la turbina partint de la velocitat de rotació d'aqueta. Partint de l'expressió de la potència del vent (Equació 4.22) es pot veure tots els termes són constants excepte la velocitat del vent i el coeficient de potència ( $C_p$ ). Com que la velocitat del vent no la podem controlar, només podem incidir en el  $C_p$ , que com es veu a les equacions 4.25 i 4.26 depèn de l'angle de Pitch i del *tip speed ratio*. En conseqüència, s'opera al valor màxim de  $C_p$ , donat pel valor de TSR  $\lambda$ =òptim i un valor d'angle de Pitch  $\beta$ =òptim. Matemàticament es tradueix en una derivada del  $C_p$  respecte del *tip speed ratio* ( $\lambda$ ), que igualant-ho a zero (per imposar  $\lambda$  constant) i aïllant  $\lambda$  s'obté valor òptim del *tip speed ratio* (Equació 5.39) que fa que  $C_p$  sigui màxim:

$$\frac{d}{d\lambda} C_p(\lambda, \beta) |_{\lambda=\lambda^{opt}; \beta=\beta^{opt}} = 0 \tag{Equació 5.38}$$

$$\lambda^{opt}(\beta) = \frac{c_2}{\frac{c_2}{c_7} + \frac{c_9 c_2}{1 + \beta^3} + c_3 \beta + c_4 \beta^{c_5} + c_6} - c_8 \beta \tag{Equació 5.39}$$

Equació 5.40

$$P_e^{opt}(C_p^{opt}) = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 C_p^{opt}$$

$$v_w = \frac{w_t R}{\lambda^{opt}}$$

Equació 5.41

$$\Gamma_e(C_p^{opt}) = \frac{1}{2} \rho A C_p^{opt} \frac{R^3}{\lambda_{opt}^3} w_t^2$$

Equació 5.42

$$\Gamma_e(C_p^{opt}) = \frac{1}{2} C_p^{opt} \frac{\rho AR^3}{2 \lambda_{opt}^3} w_t^2; \text{ on } K_{CP} = \frac{\rho AR^3}{2 \lambda_{opt}^3}$$

Equació 5.43

$$\Gamma_e^* = K_{CP} w_t^2$$

Equació 5.44

De l'equació 5.9 s'extreu que  $w_t$  n'és l'input i  $\Gamma_e^*$  l'output.[25] Recordar que l'obtenció del valor òptim de  $w_t$  es dona pels valors òptims de l'angle de Pitch i TSR, tal com s'especifica en l'apartat 4.2.2.

Un cop es coneix quin és el valor del parell que ha d'exercir el generador, només cal preguntar-se com es pot imposar aquest valor al model. Per això, cal recuperar l'equació 4.46, que relaciona el parell resistent que ofereix el generador en funció de la intensitat  $i_s^q$  que circula per l'estator. A través d'aquesta expressió es dedueix:

$$i_s^{q*} = \frac{2 \Gamma_e^*}{3 p \phi_m}$$

Equació 5.45

que determina el valor de la intensitat desitjada  $i_s^{q*}$  que cal aplicar al llaç de corrent, completant l'esquema de la Figura 5.11. Vist amb més detall, l'esquema de bolcs per la simulació queda:

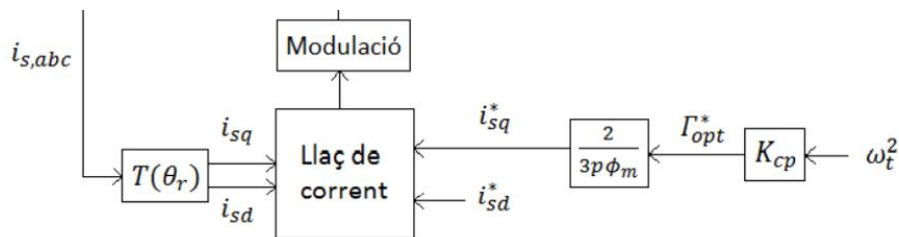


Figura 5.14. Diagrama de blocs del controlador de potència òptima

(Font: [20])



Per visualitzar millor la situació descrita, es representen les corbes de la potència obtinguda (per  $\beta = 0$ ) en funció de diferents velocitats del vent; i la corba de potència òptima, calculada a partir de l'equació 5.4.

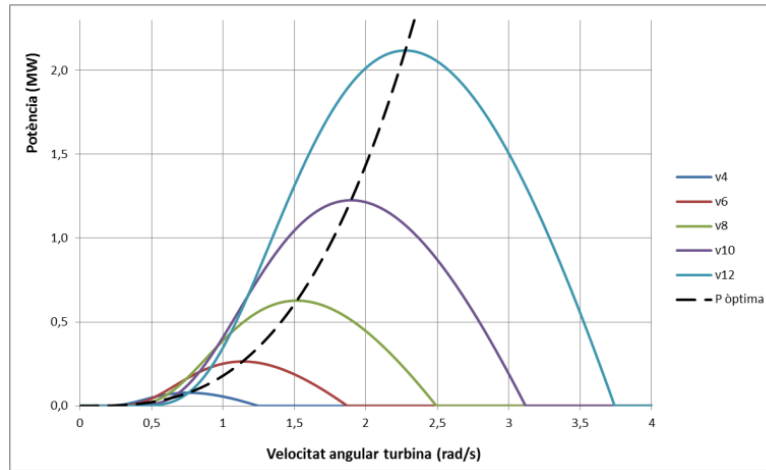


Figura 5.15. Corba de potència òptima en funció de la velocitat angular  
(Font: [20])

En efecte, la corba coincideix amb els màxims de les potència per les diferents velocitats del vent.

Per contra, es pot veure que aquesta coincidència amb els màxims no es produeix en les corbes del parell:

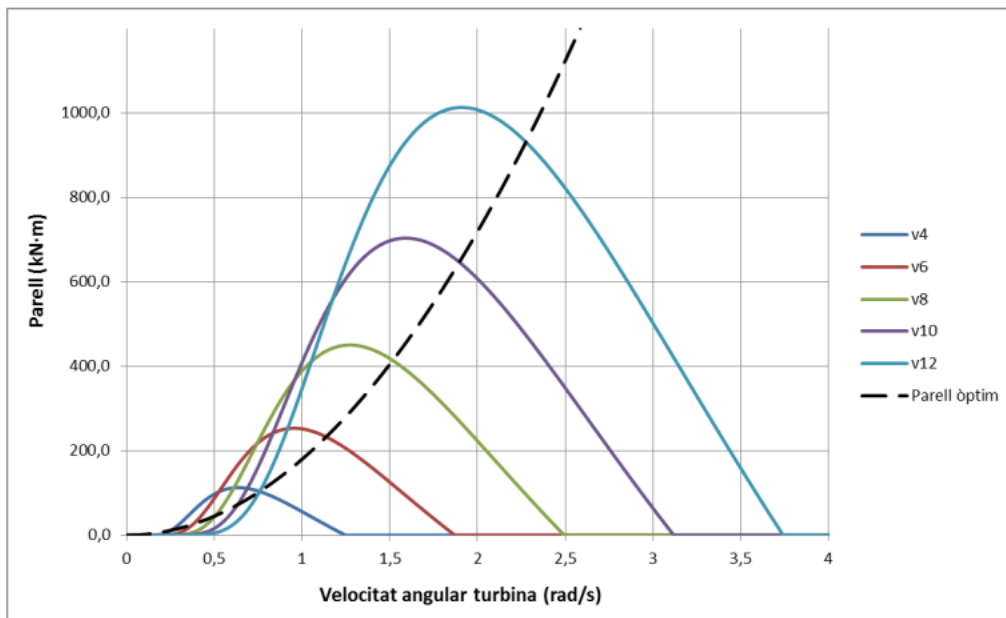


Figura 5.16. Corba parell òptim en funció de la velocitat angular

(Font: [20])

Aquí, el parell màxim es produeix a un velocitat angular inferior a la velocitat corresponent a la màxima potència.

En resum, obtenir màxima potència no implica treballar al punt de màxim parell, sinó a un velocitat més alta i a un parell inferior al màxim.

## 5.1.4 Control de l'Angle de Pitch

### 5.1.4.1 Descripció i estratègies de control

Com ja s'ha introduït anteriorment, l'angle de Pitch és l'angle longitudinal de les aspes de l'aerogenerador. Ajustant-lo, es podrà controlar en tot moment la potència del vent absorbida per l'aerogenerador. Si no s'actués sobre l'angle de Pitch, la turbina de vent s'aniria accelerant fins a velocitats de rotació perilloses que podrien malmetre-la. El control de l'angle de Pitch permet que l'aerogenerador no es desconnecti i continuï generant potència quan la velocitat del vent està per sobre de la nominal, tot mantenint la velocitat de rotació i la potència generada als valors nominals.

Per tant, el vent hauria de ser l'únic paràmetre a proporcionar en el nostre model, i el sistema serà el que es reguli de manera autònoma en el cas que la potència superi el seu valor nominal.



**Figura 5.17. Angle de Pitch**

(Font: [31])

### 5.1.4.2 Fonaments

Les turbines no sempre estan en funcionament. Encara hi ha molts parcs eòlics que no disposen de llocs on emmagatzemar l'energia que obtenen els aerogeneradors. Això vol dir que l'energia extreta ha de ser igual a l'energia demandada en aquell moment precís. Per posar un exemple senzill, si una casa demana 1kW de potència elèctrica en un instant donat, no és necessari que la turbina reculli 5kW ja que aquests 4kW es perdrien i, per tant, seria totalment ineficient. Aquesta turbina s'hauria d'adaptar per extreure només els kW que requereix la casa, i no més. Per fer-ho, hi ha controladors per a la velocitat angular de la turbina, que automàticament la modifiquen per obtenir una potència determinada. D'altra banda, si les condicions meteorològiques fan que el WT generi més potència que la nominal, aleshores el controlador d'angle de Pitch és el que entra en joc i s'ajusta per extreure només la potència nominal de la turbina.[33]

### 5.1.4.3 Força aerodinàmica

Pel disseny del controlador, prèviament cal entendre les forces a les que estan sotmeses les pales. Si ens centrem en els fonaments de l'aerodinàmica, se sap que durant la incisió del fluid sobre una superfície, les partícules més properes a la superfície s'acceleren, la qual cosa crea un variacions de pressió al seu entorn. Es produeix baixa pressió a les zones d'acceleració de partícules, mentre que alta pressió es produeix a les zones de desacceleració. A la figura 5.18 hi ha un exemple de pressions al voltant de les pales d'una turbina:[32]

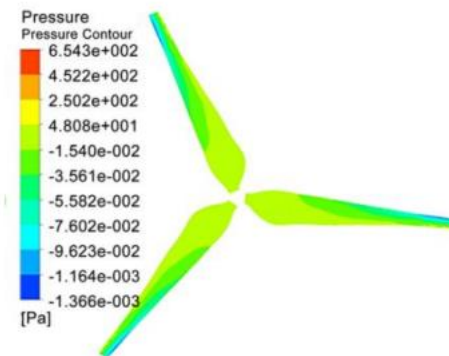


Figura 5.18. Mapa de pressions en les pales d'un aerogenerador  
(Font: [32])

Aquestes diferències de pressió que es creen al voltant de la superfície de la fulla de cada pala són les responsables de la força que es genera, i que genera la pròpia rotació. Aquesta força es regeix per la següent equació on  $A_r$  és l'àrea de la superfície on incideix el fluid:

$$F = \rho v_w^3 A_r$$

Equació 5.46

5.1.4.4 Angle de Pitch

Primer cal entendre quin és l'angle d'incidència, que és equivalent a l'angle de Pitch però expressat en nomenclatura genèrica. L'angle d'incidència defineix la posició en què el fluid incideix a la superfície. Així, com més gran sigui l'angle de Pitch, menys energia pot absorbir la turbina perquè la superfície de la pala que entraria en contacte amb el fluid seria més petita.

D'altra banda, si l'angle de Pitch de la pala és menor, la superfície exposada al fluid serà més gran i, per tant, l'energia que pot absorbir serà màxima. Això es mostra a la figura 5.??

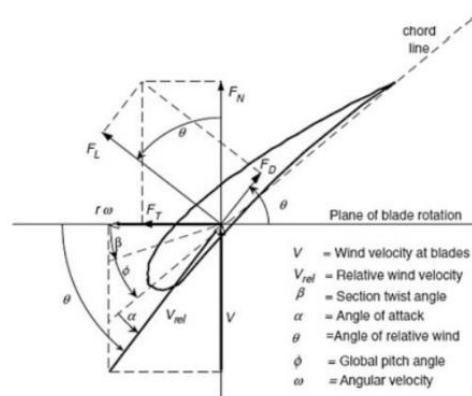


Figura 5.19. Diagrama de la pala de la turbina al detall

(Font: [33])

Els aerogeneradors consten de tres motors actuadors que fan girar les pales modificant els respectius angles de Pitch. Evidentment la velocitat amb la qual es canvia l'angle de Pitch no és instantània. Les velocitats habituals de funcionament d'un actuador estan entorn dels 5-10°/s . A la Figura 5.19 es poden veure tres motors elèctrics (color blau) encarregats de modificar els tres angles de Pitch de manera coordinada.



Figura 5.20. Detall dels tres motors elèctrics que actuen sobre l'angle de Pitch

(Font: [34])

Depenent de la velocitat del vent hi ha un angle de pas òptim on la potència generada per la turbina és màxima. Com que aquest treball no té un gran abast, no calcularem ni estudiarem el punt d'angle de to òptim per a cada valor de velocitat del vent. Cal tenir en compte que es prendrà com a angle de pas mínim  $0^\circ$  i angle màxim de  $45^\circ$ . El primer fa referència a que la superfície de les pales està perpendicular al vent, mentre que el segon fa referència a que la superfície de les pales està col·locada en diagonal respecte al vent.

#### 5.1.4.5 Restriccions

Per molt que el controlador d'angle de Pitch de les pales ens permeti regular la potència que ha d'absorbir la turbina, hi ha certs límits mecànics. No es pot demanar a la turbina que generi deu vegades més potència que la potència nominal, ja que això seria impossible i fins i tot malmetria els components.

L'angle de pas mínim, que ja s'ha comentat a l'apartat anterior, és de  $0^\circ$  mentre que el màxim serà de  $45^\circ$  a causa de les limitacions mecàniques pròpies del sistema.

El límit inferior proporcionarà un parell màxim de turbina  $\Gamma_t$  mentre que el límit superior donarà un  $\Gamma_t$  molt més petit, ja que les pales estaran més a prop d'estar en una posició de "bandera" per a aquesta última. A més, el canvi de l'angle de pas de la pala no pot ser instantani perquè no seria real i, per tant, es requereix una regulació suau a causa de problemes de potència limitats dels accionaments,  $5^\circ/s$  serà la variació d'angle màxima admesa.

Per als sistemes, ha d'haver un límit de potència de generació que es defineixi per les condicions màximes tant de l'equip com de la pròpia xarxa elèctrica. De fet, no interessa que la turbina funcioni en condicions meteorològiques on la velocitat del vent és molt alta perquè podríem, per exemple, danyar la turbina. Aquesta velocitat màxima del vent s'anomena *cut-out speed*, ja mencionada en apartats anteriors.[33]

### 5.1.4.6 Disseny del control

Per poder entendre quan ha d'actuar aquest control, primer es recorden quines són les diferents zones de treball d'una turbina i quina influència hi té l'angle de Pitch.

En funció del vent rebut es diferencien les 5 zones de treball resumides en l'apartat 4.1. Aquestes eren:

- I. **Zona de no funcionament:** Quan la velocitat del vent és massa baixa, la turbina no treballa i, per tant, no es genera potència. Això sol ser per a velocitats del vent menors a 2,5-4,5 m/s.
- II. **Zona de funcionament amb  $\beta = 0$ :** Aquest tram de funcionament comença a partir que se supera la velocitat coneguda com a *cut in*. Això sol ser aproximadament des de vents de 2,5-4,5 m/s fins a vents de 10 m/s. Durant aquesta etapa la velocitat angular de la turbina està relacionada linealment amb la velocitat del vent segons l'equació 5.41, tal com s'ha vist en la secció anterior. Per tant, durant aquest tram el coeficient de potència és el valor òptim  $C_p^{opt}$ . Com es pot veure a la figura 5.21, la potència creix de forma cúbica a mesura que augmenta la velocitat del vent.

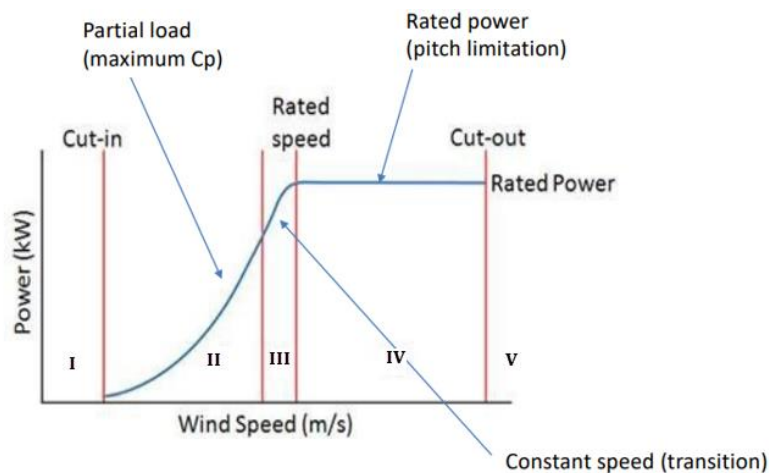


Figura 5.21. Gràfica Potència absorbida en funció de la velocitat del vent

(Font: [4])

- III. **Zona de transició:** És una zona breu de transició abans d'arribar a la potència nominal. Es deu, en part, al fet que la  $w_t$  ja no és proporcional a la velocitat del vent, sinó que és pràcticament constant. A més, com veurem més endavant, l'actuador que permet augmentar l'angle de Pitch no és instantani, és a dir, no es pot adquirir instantàniament el coeficient de potència desitjat.
- IV. **Zona de funcionament a la potència nominal:** En aquest tram, la potència transformada és igual a la potència nominal, la potència a la què ha estat dissenyada la màquina per treballar. Durant aquest tram, a mesura que augmenta la velocitat del vent, augmenta l'angle de Pitch per tal de disminuir el coeficient de potència. D'aquesta manera, s'influeix en limitar la

velocitat de rotació de l'aerogenerador, i la potència absorbida no sobrepassa la potència nominal.

- V. **Zona de desconnexió:** A partir d'una certa velocitat del vent, coneguda com a *cut-out speed*, l'aerogenerador deixa de funcionar per evitar danys. Aquesta velocitat de tall sol estar al voltant dels 20-30 m/s.

Hi ha varies estratègies de control vàlides [ 30]. Es tracta de controlar l'angle de Pitch a partir de diferents entrades o variables.

- A. **Velocitat del vent.** És el mètode ideal. Es pot controlar l'angle de Pitch de manera simple a partir de la velocitat del vent. No obstant, és difícil portar-la a terme a la realitat, doncs implica mesurar la velocitat del vent constantment i de manera molt precisa.
- B. **Velocitat de rotació del rotor.** Es tracta de comparar la velocitat de rotació del rotor amb el seu valor nominal per tal d'obtenir el senyal de control de l'angle de Pitch.
- C. **Potència generada.** Igual que l'estratègia B però comparant la potència elèctrica generada amb el seu valor a funcionament nominal.

Per la realització d'aquest treball es realitza l'estratègia C, si bé també es podria haver implementat l'opció B, ja que tenen un control molt semblant.

#### 5.1.4.6.1 Estratègia de control C

En aquest apartat s'explica amb més detall l'estratègia de control C, on es controla l'angle de Pitch amb realimentació de potència generada. L'explicació també serviria per l'estratègia B, amb realimentació de velocitat de rotació. L'únic que canvia és el valor de les constants del controlador ( $K_p$ ,  $K_i$  i  $K_w$ ).[38]

La turbina de vent com a sistema té una dinàmica de control no lineal degut bàsicament a la característica aerodinàmica ( $C_p$ ) i a les limitacions de l'angle de Pitch. Les limitacions físiques fan que l'angle de Pitch només pugui variar entre un cert rang d'angles i a una velocitat limitada. És per això que es força comú l'ús de tècniques de control no lineal com per exemple el *gain scheduling*, o l'anomenat *fuzzy logic control*.

Per tal d'evitar la no linealitat del  $C_p$ , es proposa aplicar la tècnica *Gain Sheduling*. Consisteix en dissenyar el control entorn d'un punt de funcionament habitual. En aquest treball es fixa un *tip speed ratio* ( $\lambda$ ) constant, i s'estudia la corba característica de  $C_p$  a potència nominal. A continuació es representa la variable  $C_p$  respecte el *tip speed ratio* i per diferents valors d'angle de Pitch.

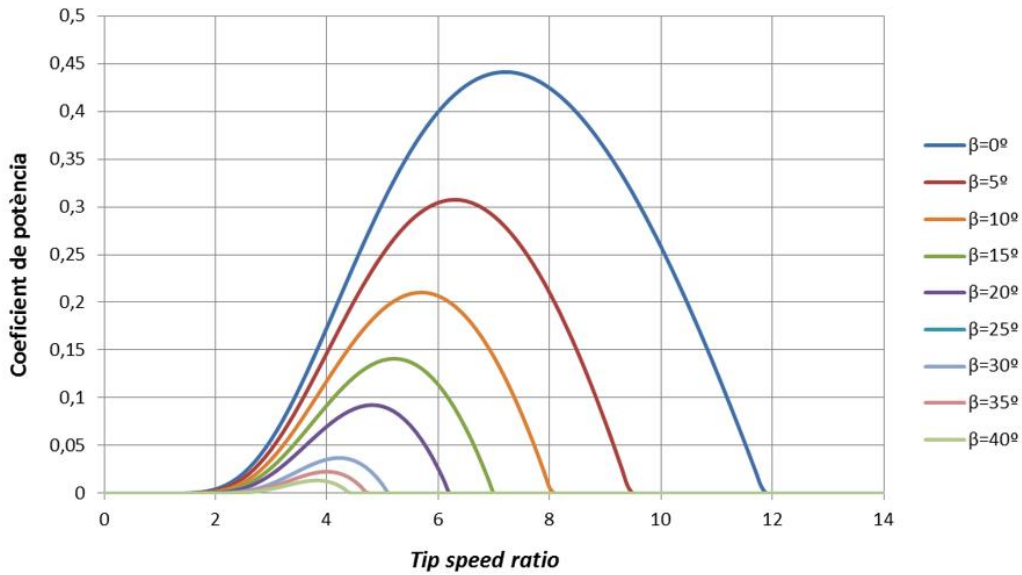


Figura 5.22. Representació  $C_p$  – tip speed ratio ( $\lambda$ ) per varis angles de Pitch ( $\beta$ )  
(Font: [20])

El màxim valor del  $C_p$  es produeix quan l'angle de Pitch és de zero graus (pales totalment encarades al vent) i per una  $\lambda$  d'aproximadament 7,2.

Com que el control de l'angle de Pitch només s'activa per vents superiors al nominal, es pot considerar un *tip speed ratio* constant representatiu dels punts de funcionament. Un rang habitual dels punts de funcionament pren valors de *tip speed ratio*  $4 < \lambda < 8$ ; i valors de l'angle de Pitch entre  $0^\circ < \beta < 20^\circ$  (recordar que el límit superior imposat és de  $45^\circ$ ).

Així doncs, considerant només aquest rang de funcionament, es pot considerar un comportament aproximadament lineal del sistema. Prenent, per exemple, un valor constant de  $\lambda = 6$ , la relació entre el coeficient de potència i l'angle de Pitch és quasi lineal. Tot i que  $\lambda$  no es constant, podem aplicar el mateix concepte dins del seu rang de funcionament, i la relació entre  $C_p$  i angle de Pitch és manté aproximadament lineal. Acceptant això, es pot simplificar el control aplicant les tècniques de control habituals (PI) a un sistema lineal.

Perquè el controlador funcioni correctament, és necessari crear un sistema que només actuï quan la potència extreta és superior a la nominal. S'utilitzen un saturador, un controlador PI i un sistema *anti-windup*.

El controlador funciona en funció del càlcul del senyal d'error. Al principi, el regulador rep la senyal de Potència  $P_e$  i una potència de referència  $P_{ref} = P_{nom}$ , que es resten entre sí. La  $P_{ref}$  és la potència nominal de la turbina, i mitjançant la resta s'obté l'error absolut, que té com a unitat el Watt.



$$e_{abs} = P_e - P_{ref} \quad \text{Equació 5.47}$$

A aquest error absolut es divideix la  $P_{ref}$  mencionada, obtenint així l'error relatiu, que ara és adimensional. L'error relatiu és el que passarà al controlador PI.

$$e_{rel} = \frac{P_e - P_{ref}}{P_{ref}} \quad \text{Equació 5.48}$$

És important tenir en compte que la part de regulació no començarà a funcionar al començament de la simulació ( $t = 0s$ ). En altres paraules, s'ha col·locat un bloc "Step" amb un valor final d'1, multiplicant l'error relatiu. Fins que el bloc "Step" doni un valor d'1, l'error relatiu sempre es multiplicarà per zero (durant un temps igual al "Step-time"=1s). D'aquesta manera, és possible deixar un marge de temps abans que el controlador comenci a actuar i així permetre que el sistema s'estabilitzi abans d'alterar el valor de potència. Aquest pas és necessari perquè, en cas contrari, és molt probable que el sistema pugui col·lapsar-se a l'inici de la simulació i donar resultats no vàlids.

Pel que fa al controlador de tipus PI, conté només un paràmetre proporcional ( $K_p$ ) i un paràmetre integral ( $K_i$ ). Aquests paràmetres s'han d'ajustar segons el sistema que tenim i com volem que evolucioni. L'equació que regeix un controlador PI és la següent:[33]

$$PI \text{ controller} = K_p + K_i \frac{1}{s} \quad \text{Equació 5.49}$$

On:

-  $K_p$  és un paràmetre que multiplica el senyal d'error donat. Com més gran sigui el seu valor, més ràpida serà la resposta del sistema i menor serà l'error del sistema en estat estacionari. Tanmateix, fer que el  $K_p$  sigui massa gran pot fer que el sistema es desestabilitzi, per la qual cosa cal equilibrar-lo, doncs un sistema estable sempre és imprescindible.

-  $K_i$  també actua com una multiplicació, però a l'hora té un integrador que, com el seu nom indica, integra l'error. Com més alt sigui el  $K_i$ , menor serà l'error en estat estacionari. També augmenta una mica la velocitat de resposta, però provoca que el sistema sigui inestable.

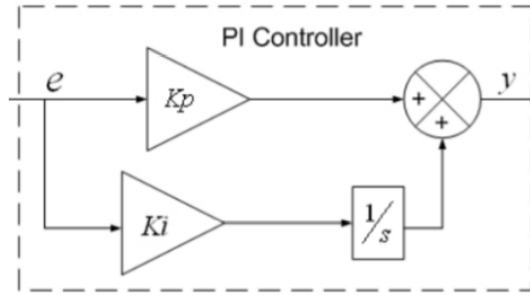


Figura 5.23. Diagrama de blocs del controlador PI per l'angle de Pitch  
(Font: [10])

Per determinar els valors de  $K_p$  i  $K_i$  hi ha dues maneres:

- 1- La primera consisteix a fer un càlcul en sistemes multivariables.
- 2- La segona implica simular a base de prova i error.

En aquest article s'utilitza el segon mètode per la facilitat d'ús amb l'ajuda de Simulink en comparació amb la dificultat del primer mètode.

En primer lloc, els dos valors de  $K_p$  i  $K_i$  han d'iniciar-se a zero. Es comença augmentant el valor de la part proporcional fins que el sistema comenci a oscil·lar i, per tant, no s'assoleixi un valor exacte. Aleshores, cal deixar el valor de  $K_p$  a la iteració anterior a partir de la qual ha començat a oscil·lar, i a continuació s'ajusta la part proporcional.

Per ajustar el valor de  $K_i$  s'utilitza la mateixa metodologia que amb el valor proporcional i es deixa d'iterar quan el dinamisme del sistema sigui realista en funció de les restriccions del sistema. Per tant, no hi hauria d'haver una variació de l'angle superior a  $\beta = 5^\circ/s$ , la qual cosa s'aplica amb un actuador, que s'encarrega de fer girar les pales segons el senyal que rep del controlador de l'angle de Pitch. Com ja s'ha comentat, aquest canvi no és instantani, i sol produir-se a velocitat de rotació constant. Es considera una modelització de l'actuador com un llaç tancat amb saturació per la velocitat dels actuadors de  $\pm 5^\circ/s$ .

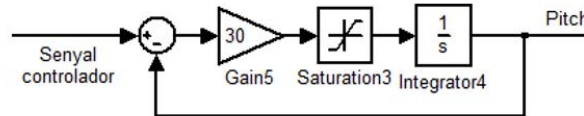


Figura 5.24. Model de l'actuador de l'angle de Pitch  
(Font: [20])

Realitzat aquest mètode, s'obtenen els següents valors:

$$K_p = 10e - 7$$

$$K_i = 10e-6$$



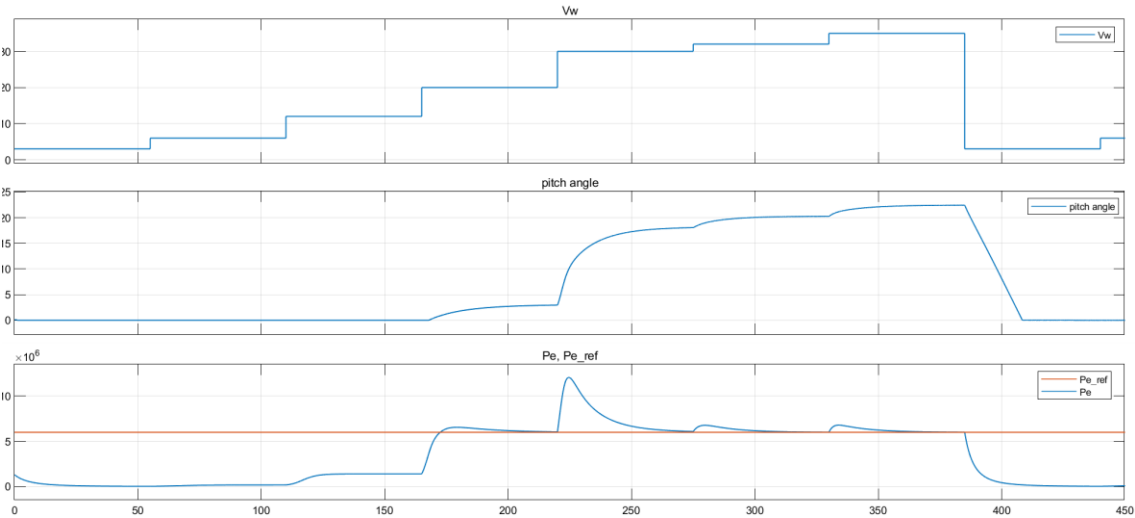


Figura 5.26. Gràfics de Velocitat del vent, Angle de Pitch, Pe i Pref del controlador PI per l'angle de Pitch en funció del temps

(Font: elaboració pròpia)

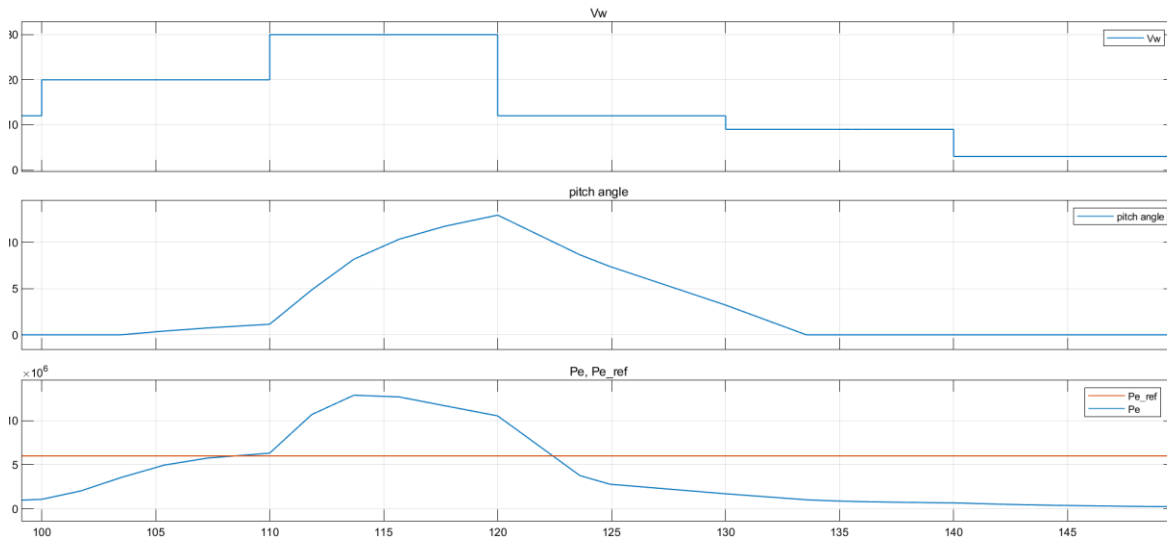
Per aquesta simulació s'ha aplicat una funció "Step" a l'input de la velocitat del vent i amb els següents valors:

Velocitat del vent (m/s)	Temps (s)
3	0
6	55
12	110
20	165
30	220
32	275
35	330

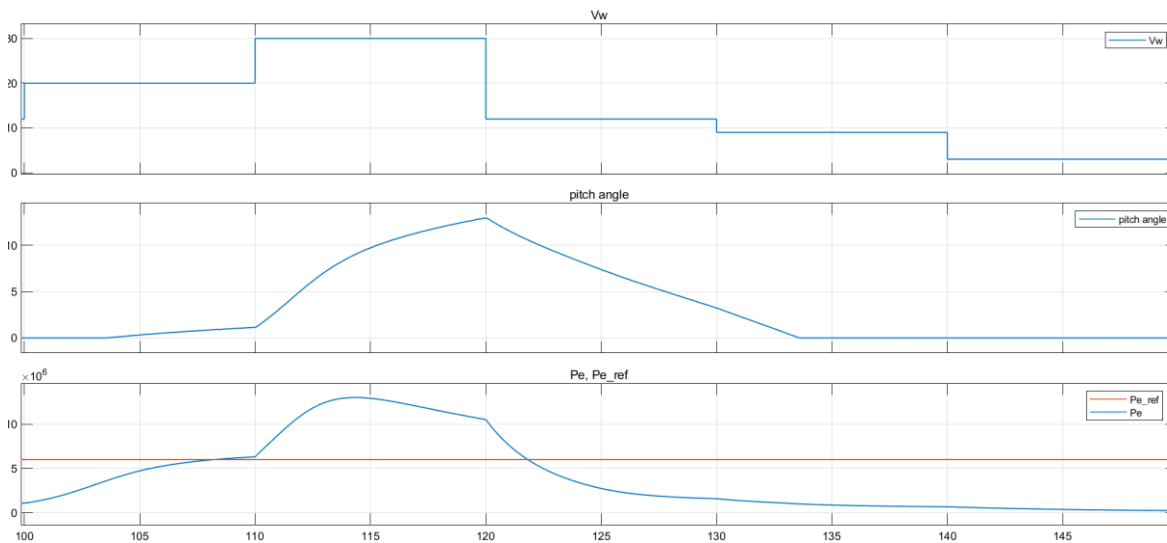
Veiem que el sistema es comporta correctament, doncs es poden distingir les diferents zones de funcionament comentades anteriorment. Entre els valors 3 i els 19 m/s aproximadament, la potència augmenta amb la velocitat.

En canvi a partir dels 20 m/s, la potència generada es manté constant al valor nominal del generador (6 MW).

A la Figura 5.25 es poden veure les diferències entre la senyal de control de l'angle de Pitch i la resposta de l'actuador davant d'aquesta senyal de control. Es pot observar com la limitació de l'actuador fa que, en alguns punts, els canvis d'angle són continus, mentre que sense l'actuador els canvis són bruscos.



**Figura 5.27. Gràfics del Control PI d'angle de Pitch SENSE actuator**  
 (Font: elaboració pròpia)



**Figura 5.28. Gràfics del Control PI d'angle de Pitch AMB actuator**  
 (Font: elaboració pròpia)

## 6. MODELAT DE L'AEROGENERADOR

En aquest apartat es presenten els esquemes de blocs utilitzats en les simulacions realitzades. L'aerogenerador s'ha simulat amb l'eina MATLAB-Simulink.

## 6.1 Modelat de la banda de la xarxa

### 6.1.1 Modelat del bloc connectat a la xarxa

En aquest bloc s'observa el sistema que proporciona la tensió trifàsica de la xarxa a l'aerogenerador. Aquesta tensió s'obté a partir de l'input de la freqüència de la xarxa ( $f_z$ ) i la tensió de fase ( $V_{rms}$ ), tal com es veu en la figura 6.2.

El valor d'aquesta tensió trifàsica ( $V_{z\_abc}$ ) s'utilitzarà més endavant per obtenir les tensions de la xarxa en referència  $qd$ . També obtenim el corrent trifàsic de la xarxa ( $I_{z\_abc}$ ) amb el qual, igual que el cas de la tensió, s'obtiniran els corrents de la xarxa en referència  $qd$ .

Més endavant, amb els filtres R i L corresponents obtenim els valors de tensió i corrent trifàsics de línia ( $V_{l\_abc}$  i  $I_{l\_abc}$ ). La tensió trifàsica de línia s'introdueix al convertidor VSC de 2 nivells de la banda de la xarxa. També ens serà útil per calcular la potència activa de la xarxa ( $P_{grid}$ ), que haurà de correspondre a la potència sol·licitada (en el cas d'aquest projecte, de 2MW); i per l'obtenció de l'angle de gir a partir del subsistema de control PLL.

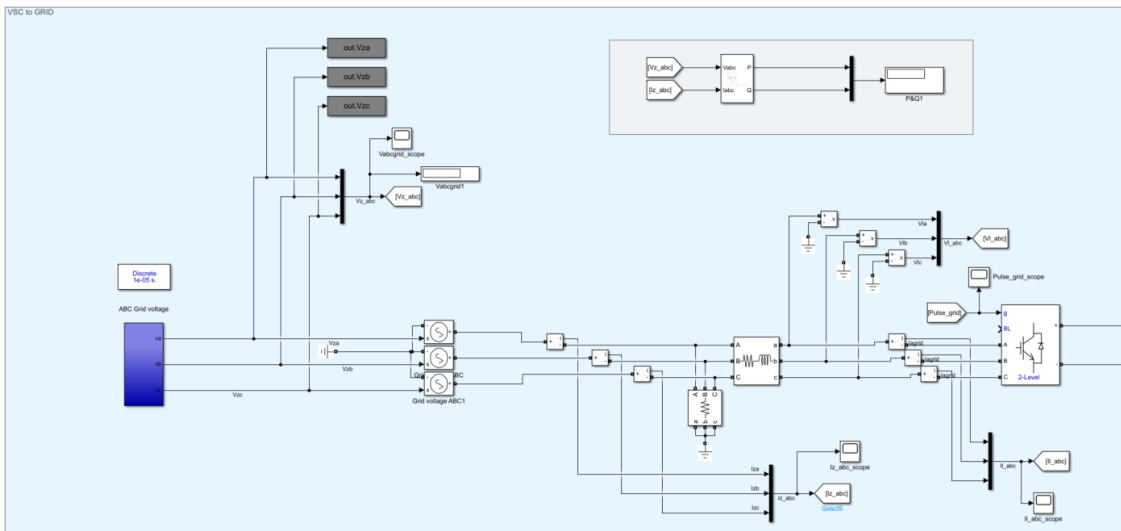


Figura 6.1. Connexió VSC a Xarxa

(Font: elaboració pròpia)

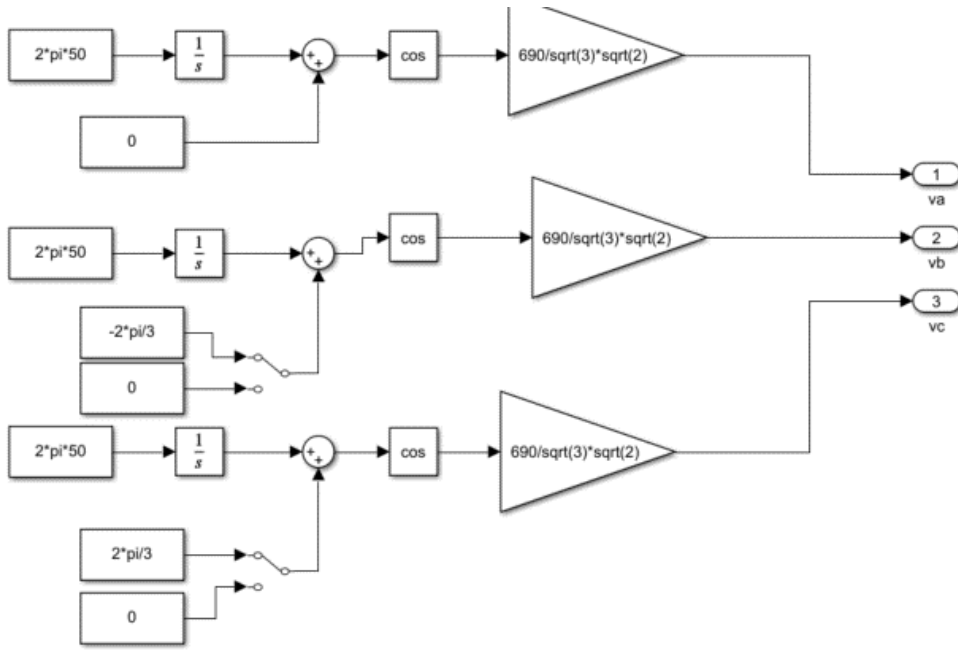


Figura 6.2. Implementació de la tensió trifàsica de la xarxa

(Font: elaboració pròpia)

A través del convertidor accedim al bus DC, el qual actua d'interconnexió entre la banda de la xarxa i la banda del generador. Aquest bloc és qui regeix la potència rebuda del generador. En el model centrat en la banda de la xarxa, aquesta potència s'introdueix a través d'una font de corrent, amb l'input de la potència absorbida de 2MW ( $P_{step} = P_{DC}$ ) dividida per la tensió de referència del bus DC ( $V_{DC}$ ). Això resulta en el corrent del bus DC ( $I_{DC}$ ). L'output d'aquest bloc és la tensió  $E_{DC}$ , la qual es controlarà en el bloc de control de voltatge.

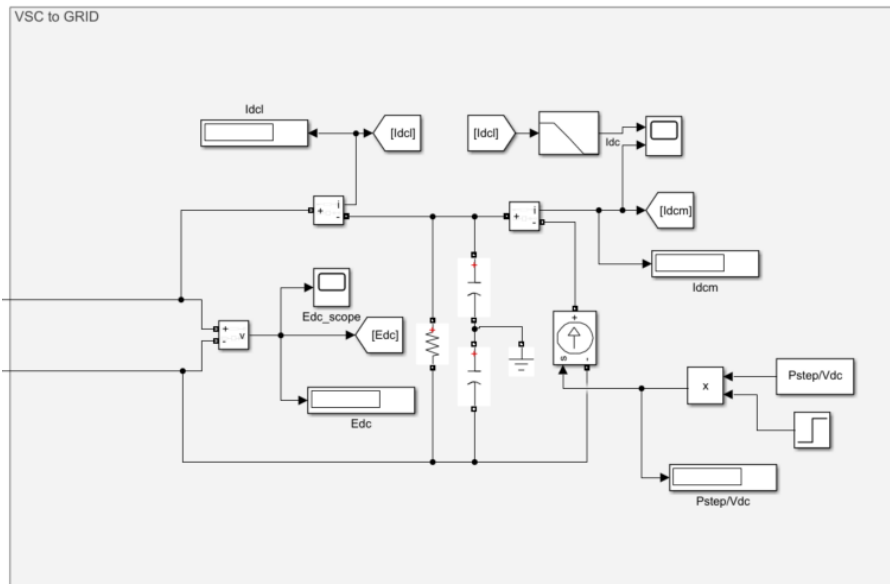
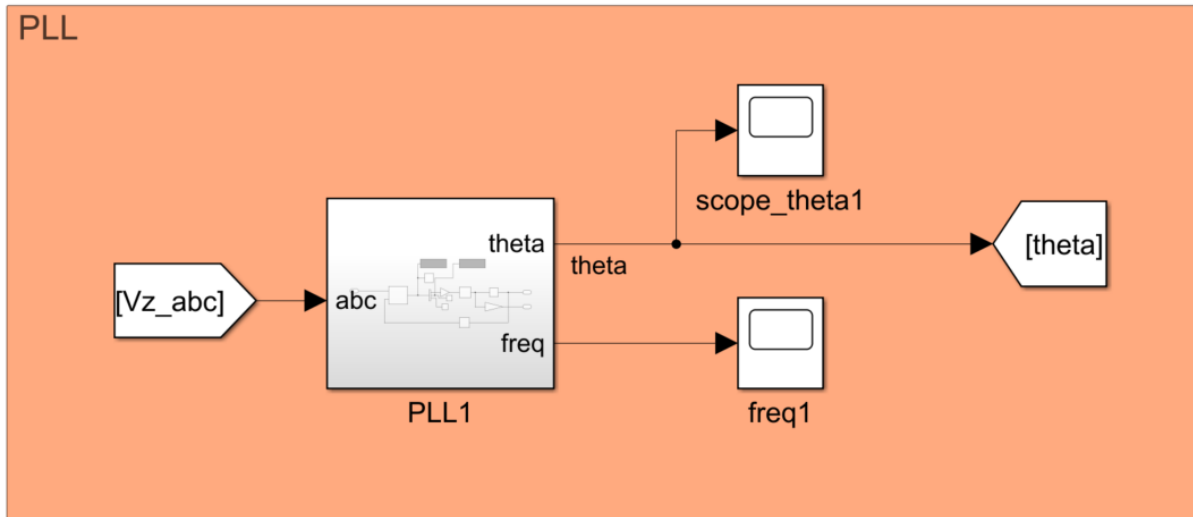


Figura 6.3. Simulació bus DC

(Font: elaboració pròpia)

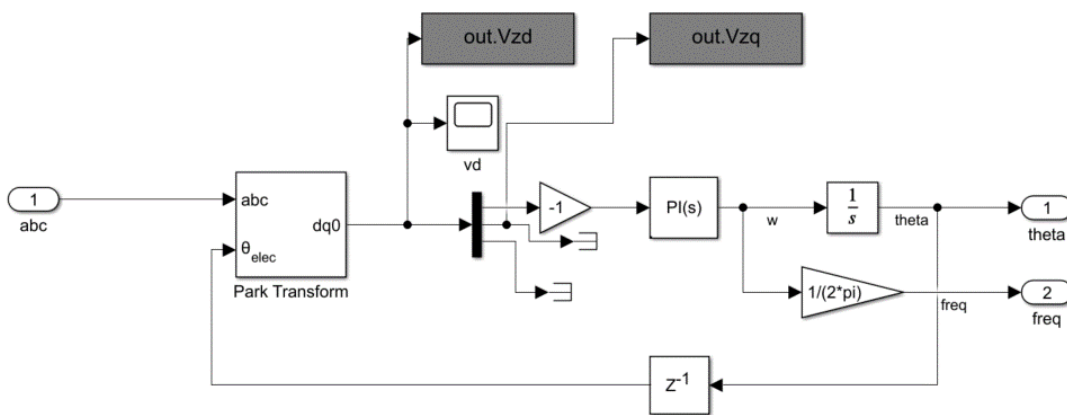
### 6.1.2 Modelat del bloc del subsistema PLL

En aquest bloc es visualitza el control PLL per l'obtenció de l'angle de gir  $\theta$ . Cal recordar que l'angle de gir permet sincronitzar el control del sistema, sota el marc de referència síncrona.



**Figura 6.4. Sistema PLL**  
(Font: elaboració pròpia)

Aquest controlador obté la velocitat angular de la xarxa a partir de l'input de la tensió de línia trifàsica, i amb un integrador addicional també s'obté l'angle corresponent.



**Figura 6.5. Subsistema PLL**  
(Font: elaboració pròpia)



### 6.1.3 Modelat del bloc del sistema de control del voltatge

En aquest bloc es visualitza el sistema que regula la tensió del bus DC, necessari per garantir l'equilibri de la potència d'entrada de la xarxa per CC i la injectada a la xarxa.

Els inputs del control de voltatge són l'esmentada tensió de bus DC ( $E_{DC}$ ), la tensió de referència  $V_{DC}$  (valor constant) i les tensions i corrents de la xarxa referenciats a  $qd$ . Aquestes últimes variables,  $V_{zq}$ ,  $V_{zd}$  i  $I_{zq}$ ,  $I_{zd}$  respectivament, s'han obtingut prèviament amb la Transformada de Park, on els inputs són la tensió i el corrent trifàsics de la xarxa ( $V_{z\_abc}$  i  $I_{z\_abc}$ ) i l'angle de gir  $\theta$ .

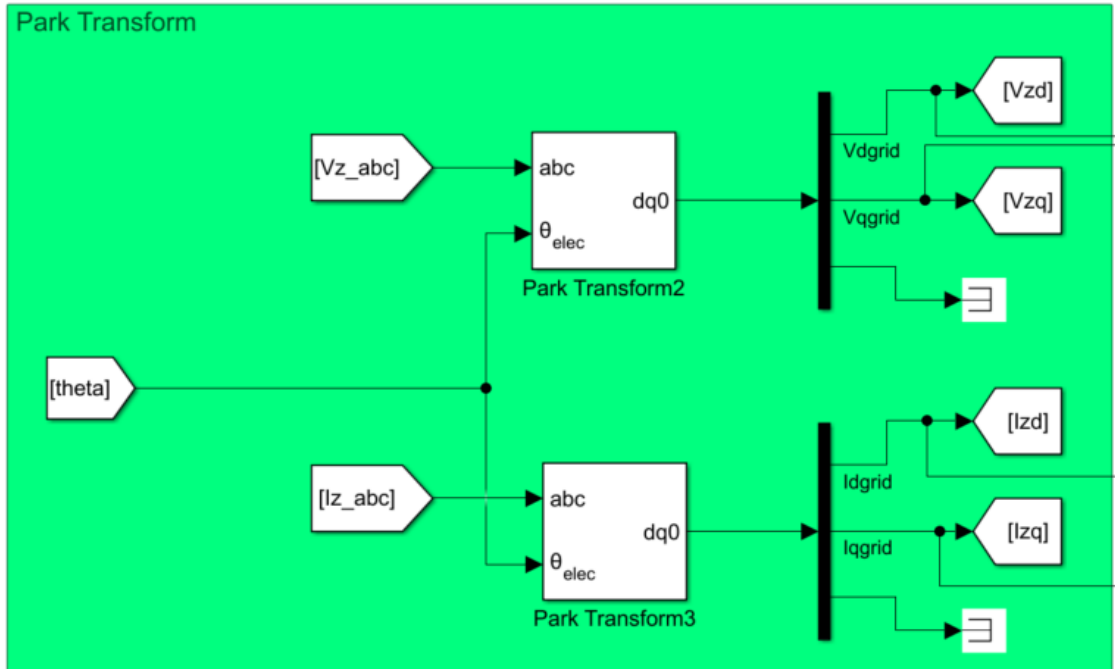


Figura 6.6. Subsistema Transformada de Park (XARXA)

(Font: elaboració pròpia)

Tal i com s'explica detalladament en l'apartat 5.1.1.4, a través d'un controlador PI obtenim el corrent de referència  $i_l^{q*}$ , que s'utilitzarà pel control de corrent.

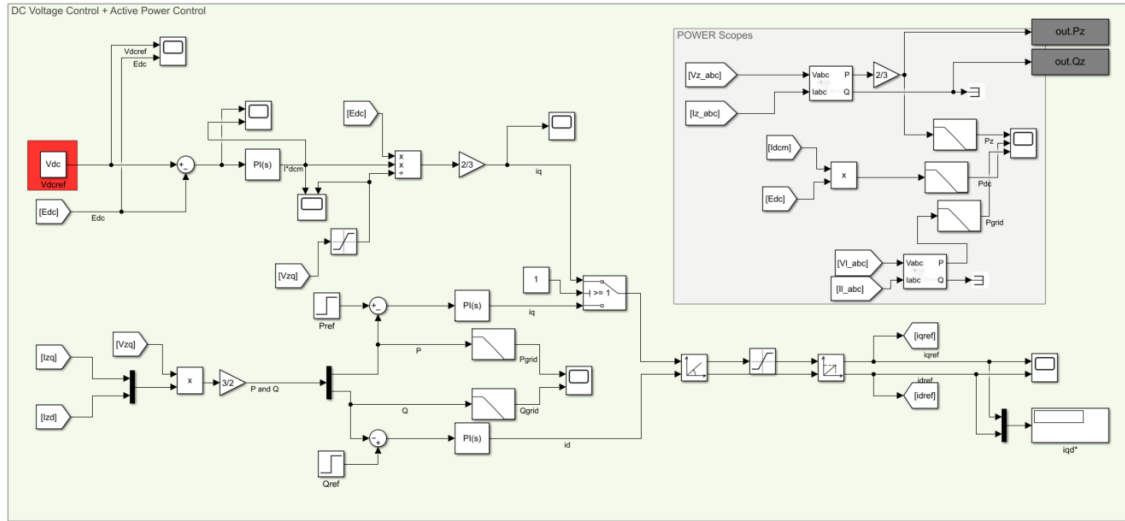


Figura 6.7. Subsistema Control de Voltatge i Control de Potència Activa

(Font: elaboració pròpia)

En aquest bloc també s’observa un sistema de control de potència. El control de potència activa és una alternativa al control per voltatge, mentre que controlant la potència reactiva s’obtidria el corrent de referència  $i_l^{d*}$ . En aquest projecte s’ha estudiat inicialment la resposta d’aquest control, si bé per les simulacions s’ha aplicat el controlador PI del voltatge.

#### 6.1.4 Modelat del bloc de control de corrent (banda xarxa)

En aquest bloc es descriu el control del corrent de la banda de la xarxa. Tal com s’explica detalladament en l’apartat 5.1.1.2, el control de corrent permet controlar el corrent  $i_{l,abc}$  aplicant la tensió  $v_{l,abc}$  a través del convertidor de potència.

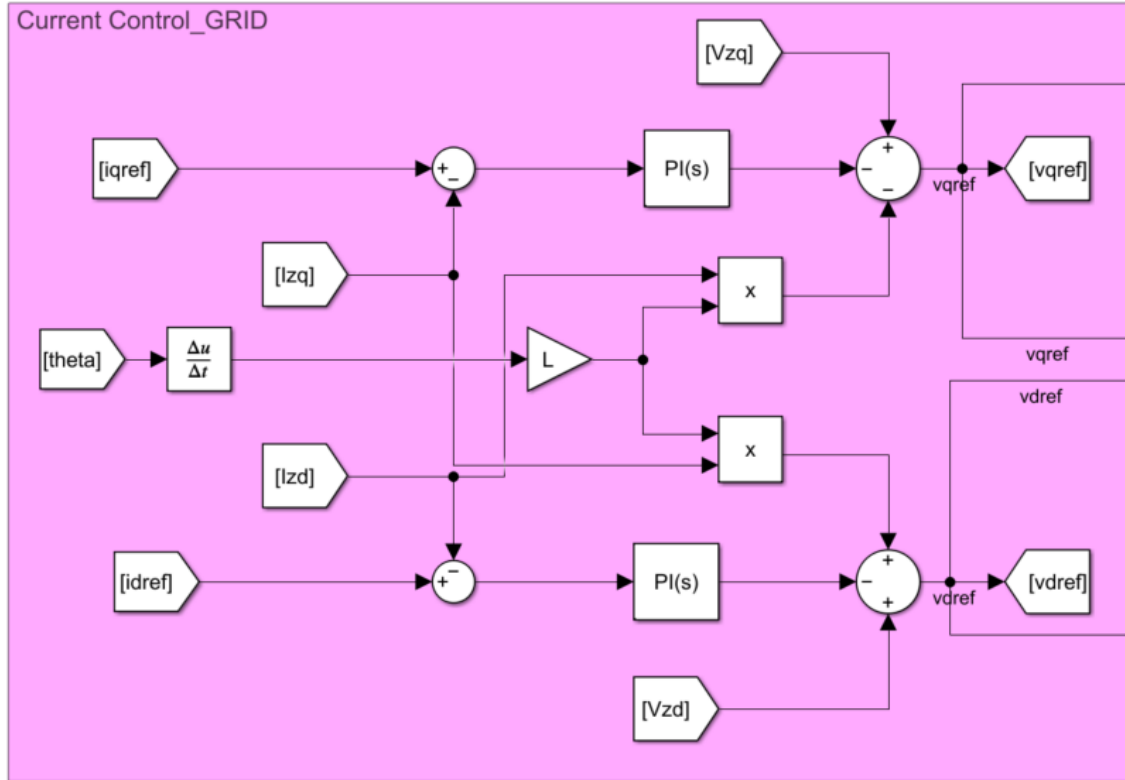


Figura 6.8. Subsistema Control de Corrent de la banda de xarxa

(Font: elaboració pròpia)

Amb aquest modelat s'obtenen els outputs de les tensions de referència en  $qd$  ( $v_q^*$  i  $v_d^*$ ), que a través d'una antitransformada de Park s'obté la tensió de referència trifàsica de la xarxa,  $V_{abc}^*$ .

### 6.1.5 Modelat del bloc PWM (banda xarxa)

Finalment, la tensió trifàsica de la xarxa obtinguda ( $V_{abc}$ ) s'introdueix al sistema PWM, el qual sincronitza la tensió amb l'angle de gir ( $\theta$ ) per tal d'obtenir les senyals de pulsos de la xarxa. Aquestes senyals s'introdueixen al bloc del convertidor VSC de 2 nivells. D'aquesta manera sincronitzem la banda de la xarxa amb la banda del generador, a través del bus DC.

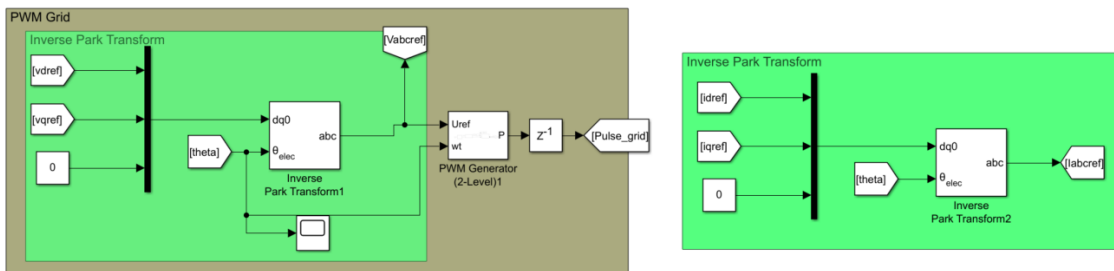


Figura 6.9. Subsistema Anti-transformada de Park i PWM (xarxa)

(Font: elaboració pròpia)

### 6.1.6 Modelat del bloc del balanç de potències (banda xarxa)

Per acabar, recuperem la tensió  $E_{DC}$  obtinguda en el bloc del bus DC de la banda de la xarxa que, combinada amb la potència del bus DC ( $P_{DC}$ ), s'iguala a la potència absorbida del generador ( $P_{AC}$ ).

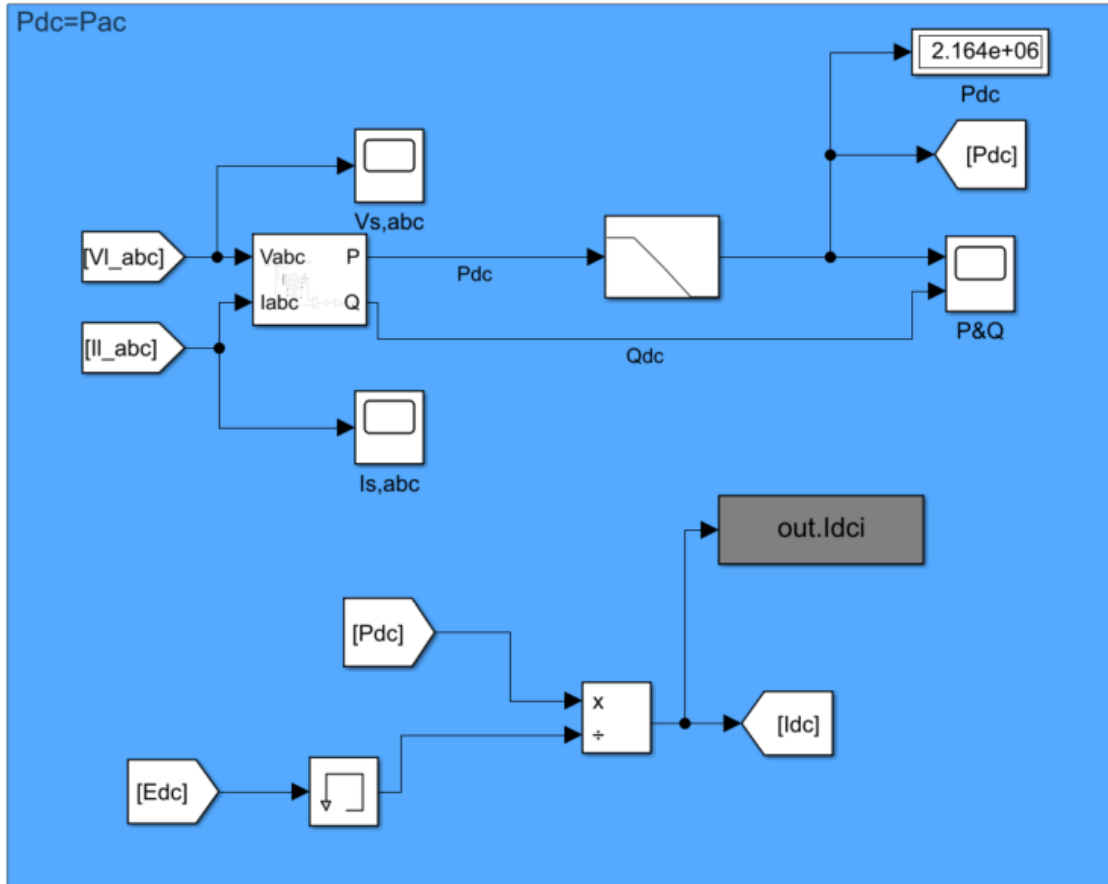


Figura 6.10. Subsistema senyal bus DC (connexió xarxa)

(Font: elaboració pròpia)

Com es pot observar, el valor  $P_{DC}$  s'obté de la tensió i la intensitat trifàsica de la xarxa ( $V_{l\_abc}$  i  $I_{l\_abc}$  respectivament). Aquesta potència ha de correspondre a la potència sol·licitada (en el cas d'aquest projecte és 2MW). La combinació de  $E_{DC}$  i  $P_{DC}$  dona lloc a la intensitat  $I_{dc}$  del bus DC.

## 6.2 MODELAT DE LA BANDA DEL GENERADOR

### 6.2.1 Modelat del bloc del convertidor per la banda del generador

En aquest bloc observem l'input de la intensitat  $I_{DC}$ , la qual circula pel bus DC, provinent del convertidor de la banda de la xarxa. Amb  $I_{DC}$  obtenim l'output  $E_{DC}$ , que correspon a la tensió del bus DC. Amb aquesta tensió recalcularem més endavant el valor de  $I_{DC}$ .

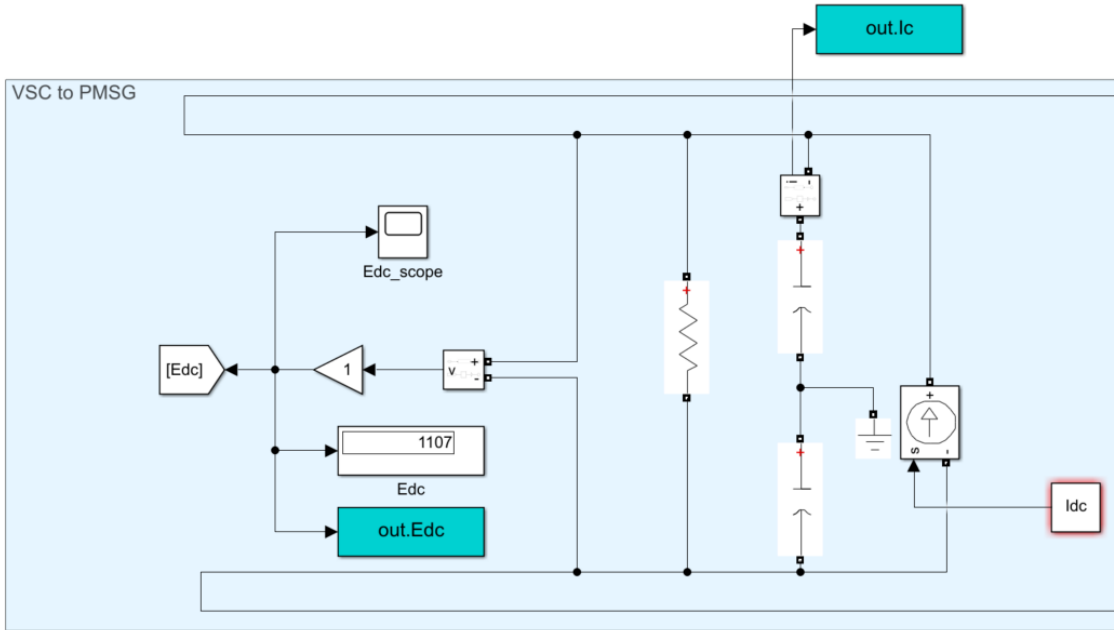


Figura 6.11. Simulació bus DC

(Font: elaboració pròpia)

### 6.2.2 Modelat del bloc del generador GSIP

El bloc de potència del generador té dos inputs:

- Voltatge provinent del convertidor ( $V_{abc}$ )
- Velocitat de rotació de la turbina, obtinguda en el bloc de la turbina ( $w_t$ )

Per altra banda, obtenim 4 outputs, dels quals 2 són únicament per plotejar ( $I_{s,abc}$  i  $V_{s,qd}$ ), mentre que els altres dos s'utilitzen pel control del GSIP:

- La velocitat de rotació mecànica ( $w_m$ ), a través de la qual obtenim l'angle de gir del rotor ( $\theta_r$ ), necessari per les transformades de Park i el Current Control.
- El parell electromagnètic ( $T_e$ ), a través del qual obtenim la potència elèctrica del generador ( $P_e$ ), transmesa a la xarxa, i que s'introdueix al subsistema de control d'angle de Pitch.

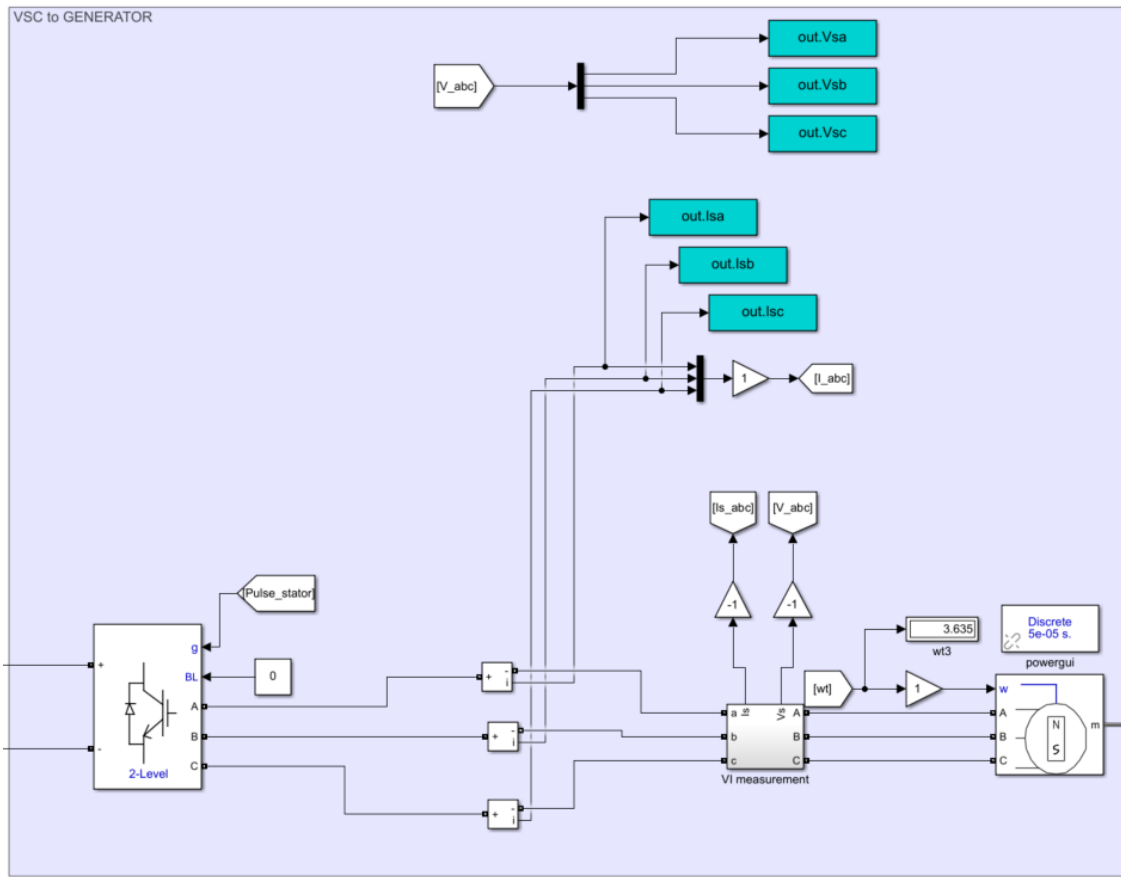


Figura 6.12. Connexió VSC a Generator

(Font: elaboració pròpia)

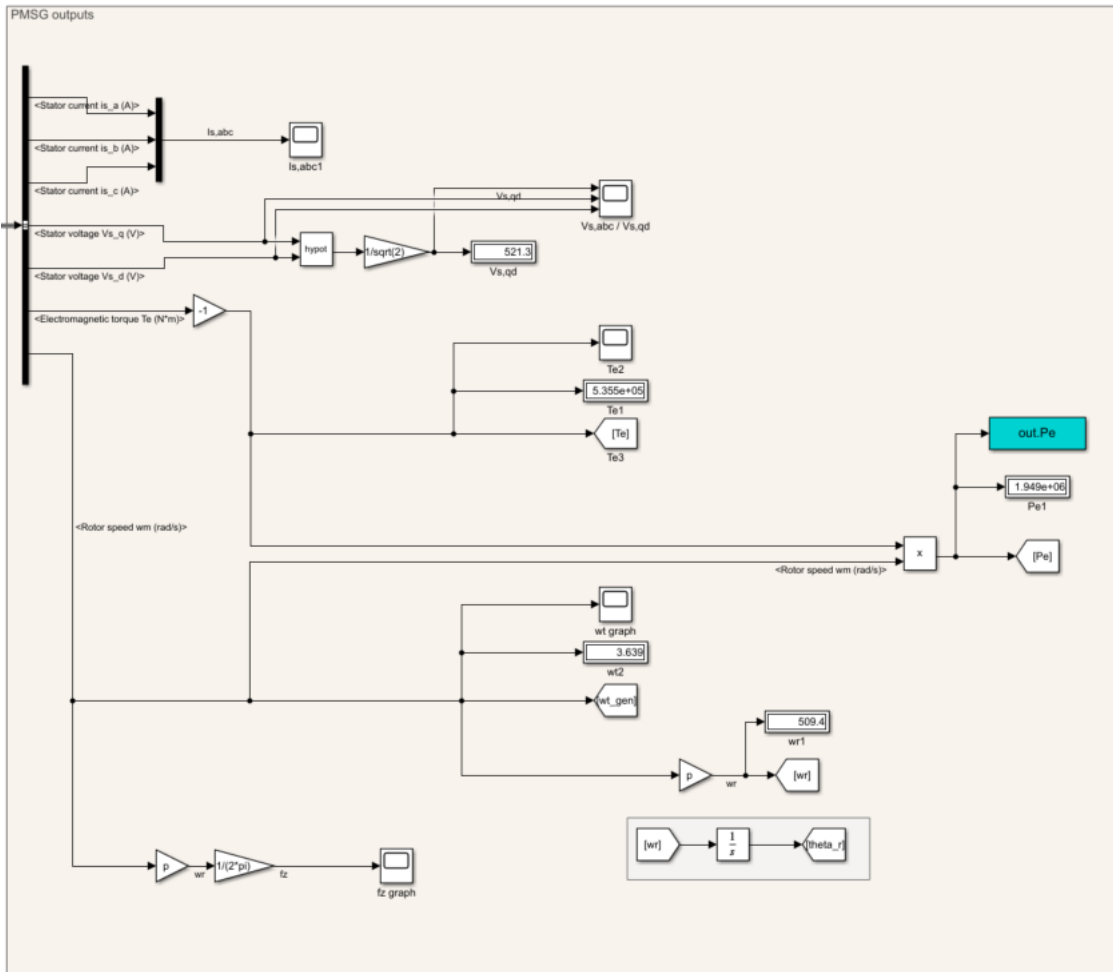


Figura 6.13. Outputs del GSIP  
(Font: elaboració pròpia)

### 6.2.3 Modelat del bloc de la turbina

El bloc de simulació de la turbina és bastant simple, en comparació amb d'altres blocs, com els sistemes de control PI. El bloc de la turbina compta amb 4 inputs i 1 output, si bé els que a la figura 10.14 en veiem més perquè alguns tan sols s'han utilitzat per poder plotejar. L'output és la velocitat de rotació de la turbina,  $w_t$ , que s'envia directament a l'entrada del GSIP. El valor d'aquesta velocitat està determinada per l'equació 5.25.

Precisament, en aquesta equació s'observa que la velocitat de rotació de la turbina està determinada per:

- Densitat de l'aire,  $\rho$
- Radi de l'àrea escombrada, corresponent a la longitud de les pales,  $R$
- Velocitat del vent,  $v_w$
- Coeficient de potència  $C_p$ , en funció de  $\lambda$  i  $\beta$

Les primeres tres variables s'introdueixen com constants a partir d'uns valors establerts en un m.file.  $C_p$  i  $\lambda$  es calculen dins del bloc, mentre que  $\beta$  es calcula en un subsistema propi.

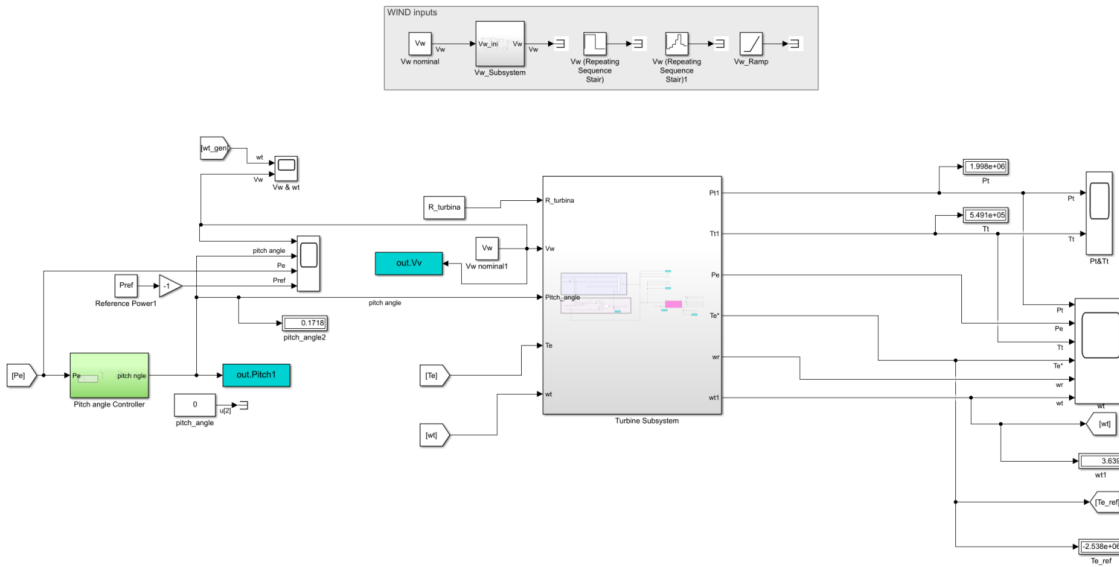


Figura 6.14. Sistema de control de la turbina  
(Font: elaboració pròpia)

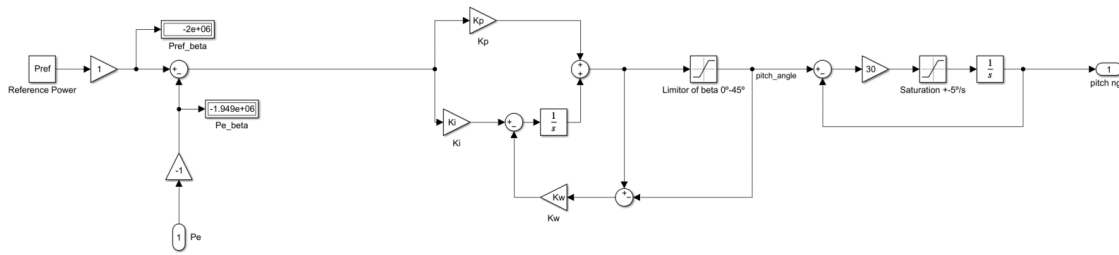


Figura 6.15. Subsistema de control d'angle de Pitch  
(Font: elaboració pròpia)

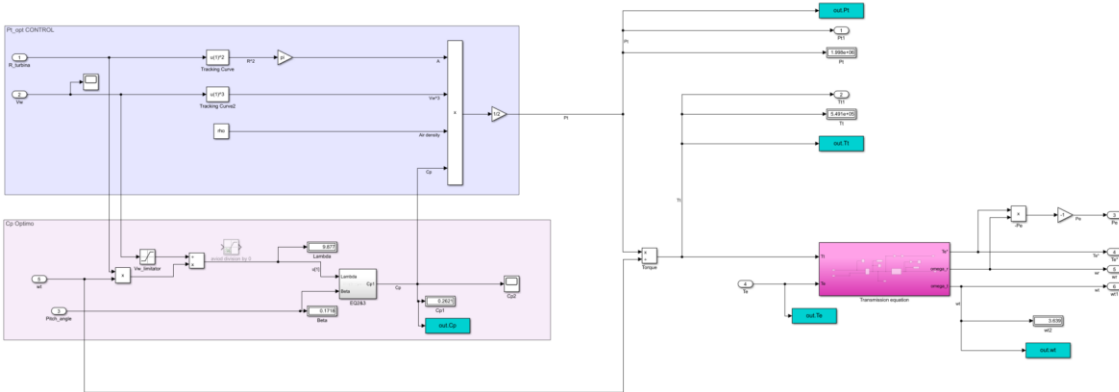


Figura 6.16. Interior del sistema de control de la turbina



(Font: elaboració pròpia)

Com es pot observar a la figura 6.17, amb  $R$ ,  $\rho$ ,  $C_p$  i  $v_w$  obtenim el valor de la Potència òptima de la turbina. Això és gràcies a que el valor de  $C_p$  és òptim, obtingut a través de  $w_t$ ,  $\beta$  i  $\lambda$ .

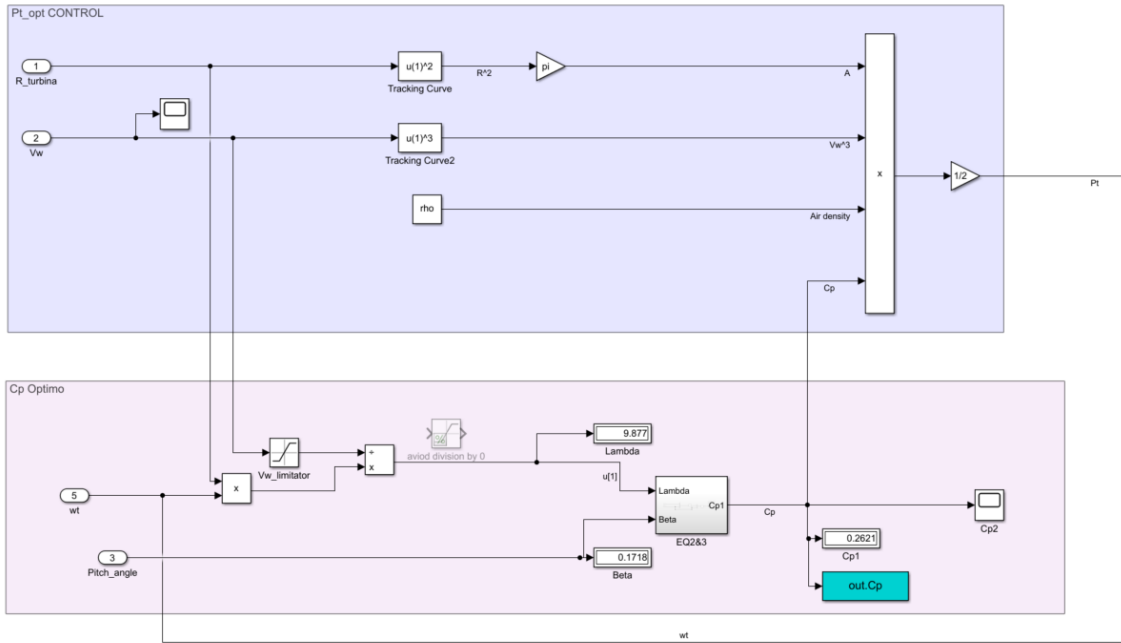


Figura 6.17. Subsistemes de control de  $C_p$  i Potència òptims

(Font: elaboració pròpia)

Aquest valor  $C_p$  es limita a través d'un bloc de saturació, entre el màxim teòric que pot assolir (límit de Betz) i el valor mínim (zero). El valor de  $\lambda$  s'obté del càlcul regit per l'equació 5.39. Dins de les equacions de  $C_p$  existeixen una sèrie de valors constants importants,  $c_{1-9}$ , corresponents als coeficients de la turbina, els valors dels quals es troben al document file.m.

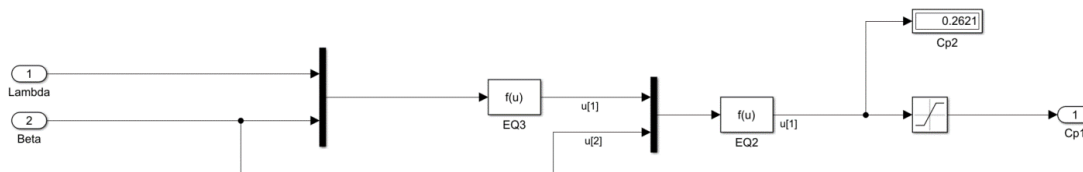


Figura 6.18. Subsistema de control de  $C_p$  (interior)

(Font: elaboració pròpia)

### 6.2.4 Modelat del bloc de control de potència òptima

A la figura 6.17 també s'observa el subsistema de control de la potència òptima. La potència òptima de la turbina obtinguda ( $P_t$ ) es divideix per la velocitat de rotació de la turbina ( $w_t$ ) i obtenim el parell de la turbina ( $T_t$ ). Aquest valor de  $P_t$  ha de coincidir amb la potència desitjada (en el cas d'aquest treball 2MW).

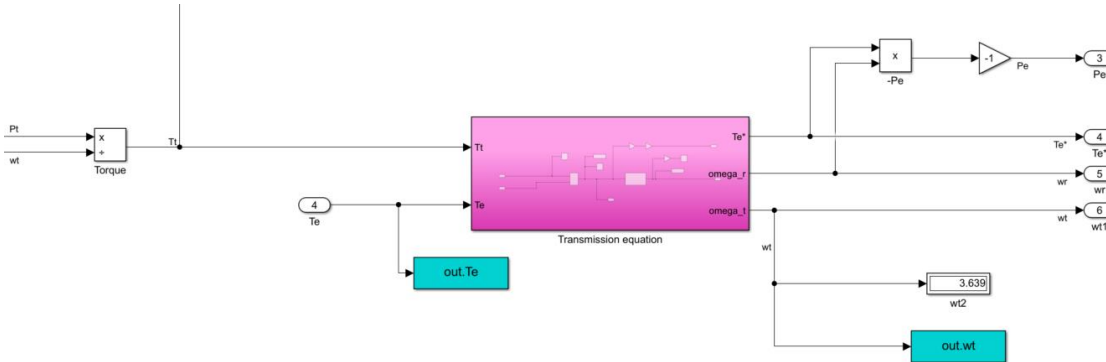


Figura 6.19. Subsistema de transmissió mecànica del parell  
(Font: elaboració pròpia)

Aquest parell s'introdueix a un subsistema de transmissió mecànica, on també introduïm el parell elèctric, obtingut dels outputs del GSIP. D'aquesta manera, obtenim el valor de la velocitat angular de la turbina desitjat ( $w_t$ ). També calculem el valor del parell electromagnètic de referència ( $T_e^*$ ), el qual es comparà amb l'obtingut en el subsistema MPPT.

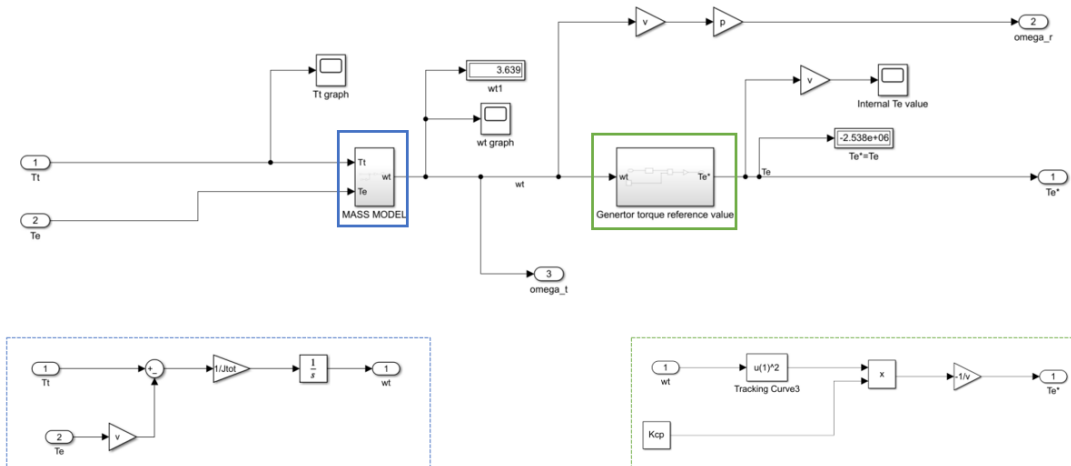


Figura 6.20. Subsistema de transmissió mecànica del parell (interior)  
(Font: elaboració pròpia)

### 6.2.5 Modelat del bloc MPPT

En aquest bloc observem l'input  $w_r$ , corresponent a la velocitat de rotació del rotor, que no és més que la velocitat de la turbina ( $w_t$ ) multiplicada pel nombre de parells de pols del generador. Aquesta velocitat la multipliquem per la constant  $K_{cp}$ . El valor de  $K_{cp}$  prové del document file.m, regit per l'equació 5.43. Amb aquesta operació obtenim el valor del parell electromagnètic de referència. Combinat amb el valor

constant del flux, s'obté la intensitat de referència de l'estator, en referència  $q$  ( $i_{sq}^*$ ), la qual s'introdueix al Current Control.

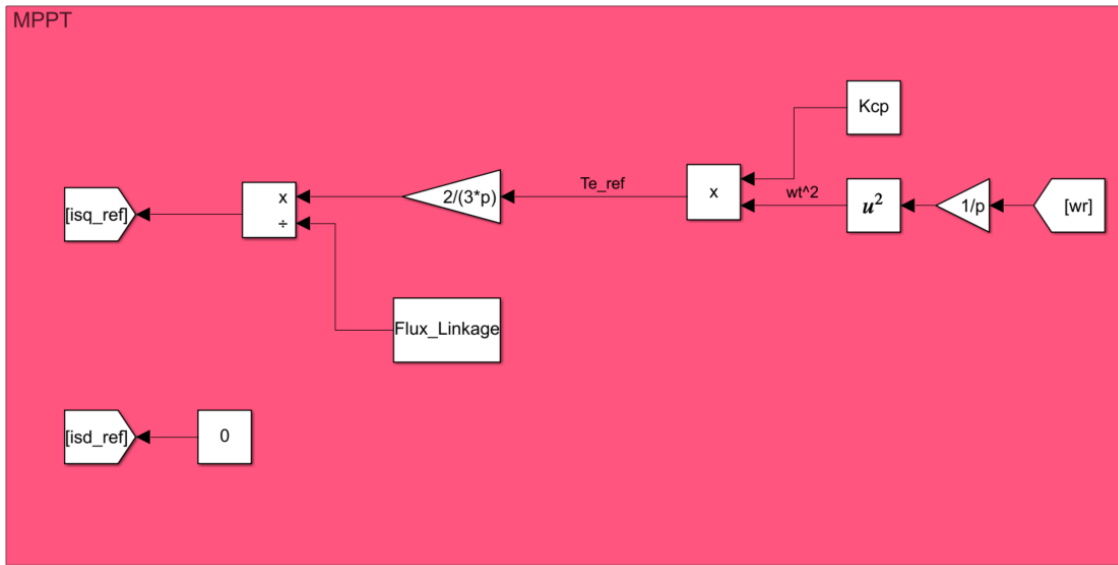


Figura 6.21. Subsistema MPPT  
(Font: elaboració pròpia)

Amb aquest bloc es garanteix l'obtenció del màxim parell, per a cada velocitat de rotació de la turbina, que prèviament hem vist que depèn de la velocitat del vent. Afegir que, per aquest projecte simplificat, la intensitat de referència en  $d$  ( $i_{sd}^*$ ) es manté en un valor nul.

### 6.2.6 Modelat dels blocs del control de corrent (banda generador)

En la Figura 6.22 es determina el bloc de control de corrent per la banda del generador. En aquest sistema trobem 5 inputs, corresponents als corrents en referència  $qd$ , i a la velocitat de rotació del rotor ( $w_r$ ).

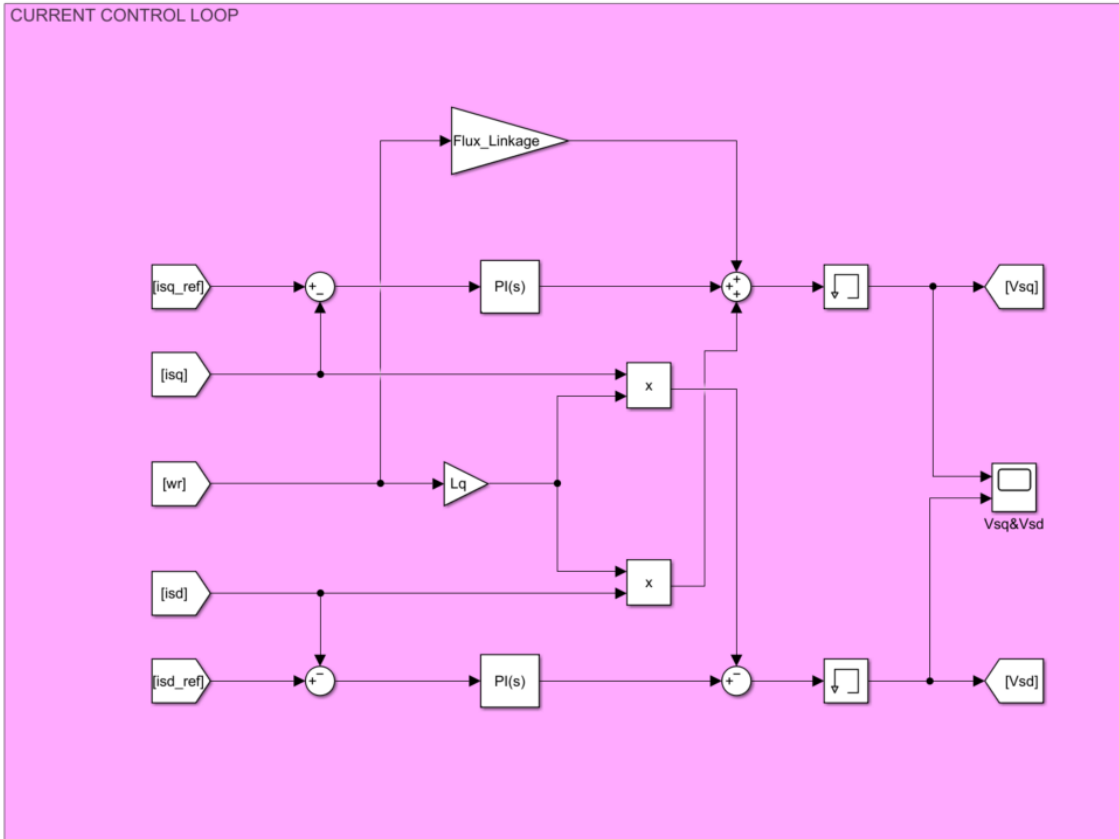


Figura 6.22. Subsistema Control de Corrent de la banda del generador

(Font: elaboració pròpia)

De les senyals de corrent, les de referència ( $i_{sq}^*$  i  $i_{sd}^*$ ) s'han obtingut en el modelat del MPPT, mentre que els corrents  $i_{sq}$  i  $i_{sd}$  són els outputs de la Transformada de Park. Aquesta transformada parteix del valor de corrent trifàsic de l'estador  $I_{s\_abc}$ , obtingut a la sortida del convertidor de la banda del generador; i del valor de l'angle de rotació del rotor ( $\theta_r$ ), que prové dels outputs del GSIP.

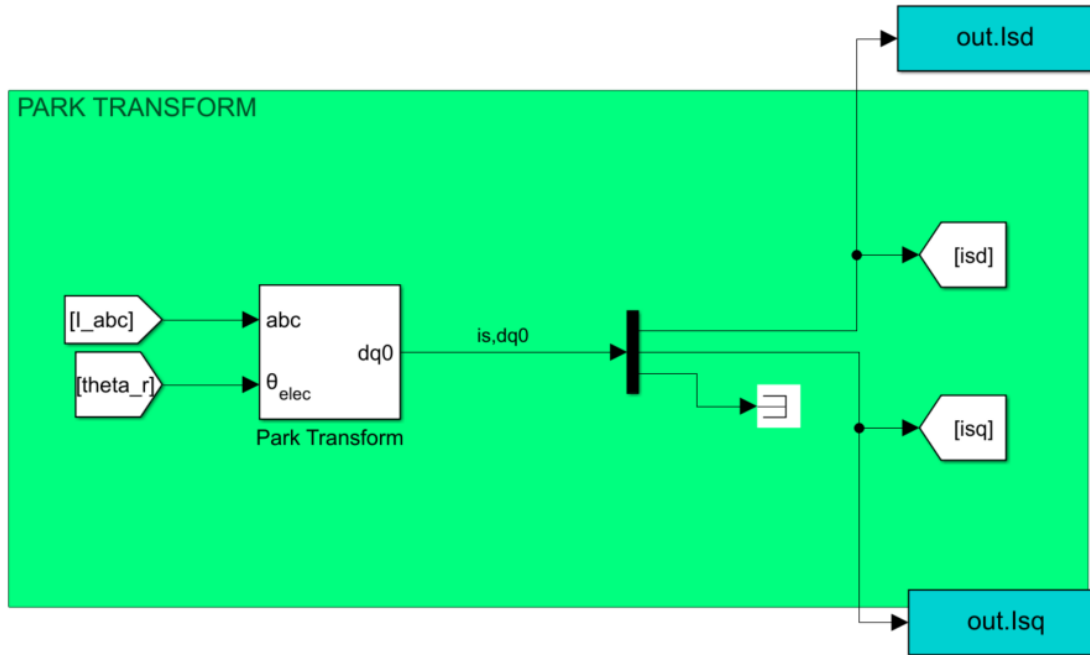


Figura 6.23. Subsistema Transformada de Park (GENERADOR)

(Font: elaboració pròpia)

Tornant al sistema de control de corrent, s'utilitza el mètode de control PI esmentat en l'apartat 5.1.2.3 per deduir els valors de tensió  $V_{sq}$  i  $V_{sd}$ . Aquests valors es regeixen per l'equació 5.33 i 5.34. Els outputs  $V_{sq}$  i  $V_{sd}$  es dirigeixen cap a l'Antitransformada de Park, a través de la qual s'obté el valor de tensió trifàsica  $V_{s\_abc}$ .

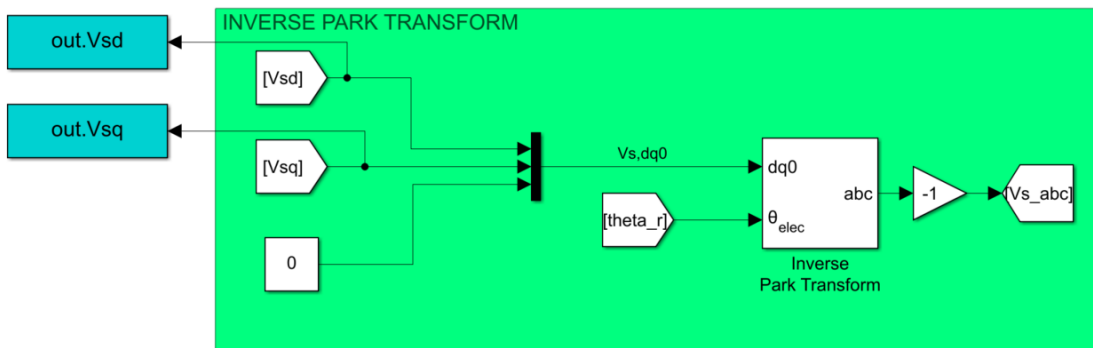


Figura 6.24. Subsistema Anti-transformada de Park (generador)

(Font: elaboració pròpia)

Finalment, la tensió trifàsica de l'estator obtinguda ( $V_{s\_abc}$ ) s'introdueix al sistema PWM, el qual sincronitza la tensió amb la rotació del rotor ( $\theta_r$ ) per tal d'obtenir les senyals de pulsos de l'estator. Aquestes senyals, igual que en la banda de la xarxa, s'introdueixen al bloc del convertidor VSC de 2 nivells. D'aquesta manera tanquem el cicle pel qual hem sincronitzat la freqüència de la banda del generador

amb la freqüència de la banda de la xarxa, que són diferents entre elles, a través dels respectius convertidors (inversor i rectificador).

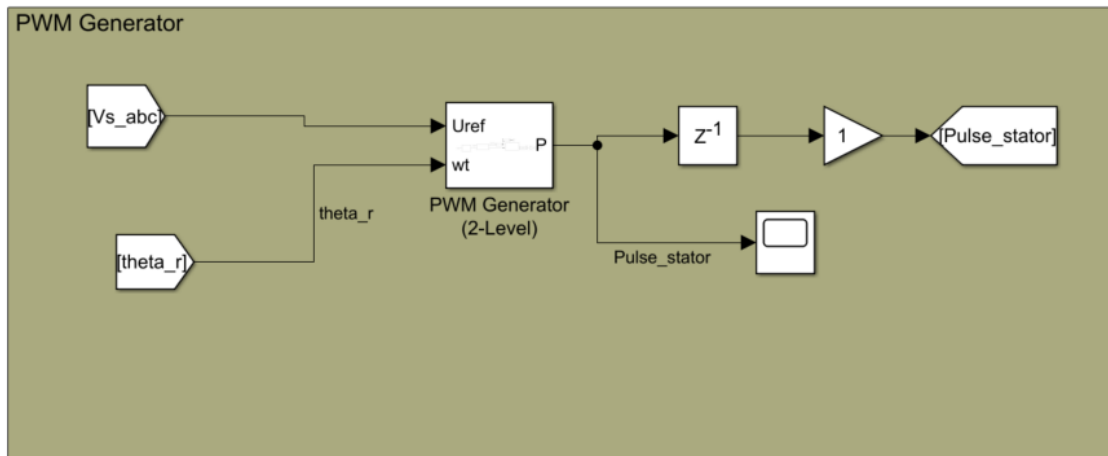


Figura 6.25. Subsistema PWM (generador)

(Font: elaboració pròpia)

### 6.2.7 Modelat del bloc del balanç de potències (banda generador)

Per acabar, recuperem la tensió  $E_{DC}$  obtinguda en el bloc del bus DC de la banda del generador. Aquesta tensió es combina amb la potència del bus DC ( $P_{DC}$ ), la qual s'ha d'igualar a la potència absorbida del generador ( $P_{AC}$ ) tal com s'ha explicat al llarg del treball.

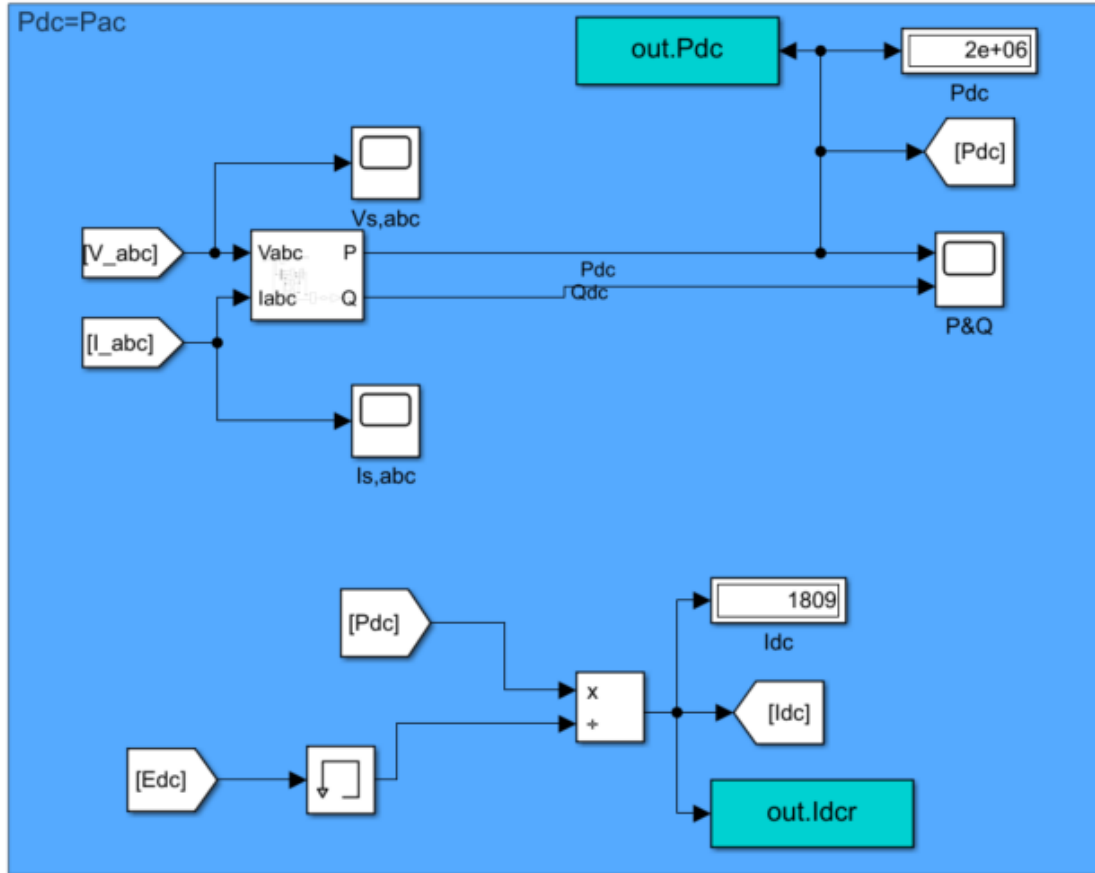


Figura 6.26. Subsistema senyal bus DC (connexió generador)

(Font: elaboració pròpia)

Com es pot observar, el valor  $P_{DC}$  s'obté de la tensió i la intensitat trifàsica del rotor ( $V_{s\_abc}$  i  $I_{s\_abc}$  respectivament). Aquesta potència ha de correspondre a la potència sol·licitada (en el cas d'aquest projecte és 2MW). La combinació de  $E_{DC}$  i  $P_{DC}$  dona lloc a la intensitat  $I_{dc}$  del bus DC.

## 7.SIMULACIÓ I RESULTATS

### 7.1 COMPROVACIÓ PRÈVIA DEL FUNCIONAMENT DEL MODELAT

Abans de començar a simular situacions concretes, cal revisar que el modelat funciona correctament. És per això que es realitza un pas previ: una simulació a velocitat constant de tot el sistema complet

on, a partir d'analitzar els gràfics de les senyals del modelat, es podrà determinar si aquest funciona correctament.

### 7.1.1 Paràmetres utilitzats

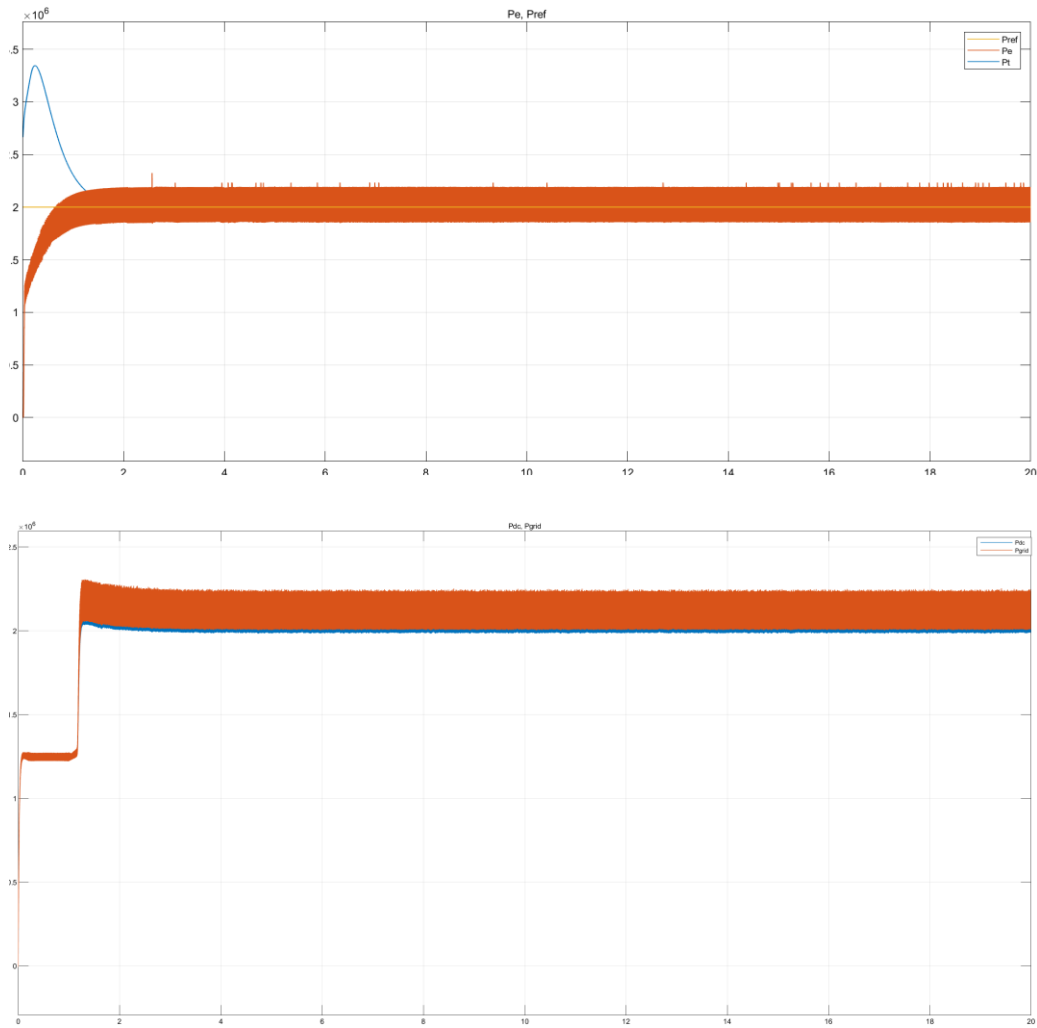
A continuació, es detalla el valor dels paràmetres utilitzats per a les simulacions desenvolupades posteriorment.

Paràmetre	Valor	Paràmetre	Valor
A	$4.5365 \times 10^3 \text{ m}^2$	Edc*	1400 V
C	0,06 F	Vrms	690 V
$\rho$	1,225 kg/m <sup>2</sup>	c1	0,73
fz	50 Hz	c2	151
Ll	10 $\mu$ H	c3	0,58
Lq = Ld	1 mH	c4	0,002
Jtot	$3 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	c5	2,14
p	140	c6	13,2
wz	$2\pi 50 = 314,16$ rad	c7	18,4
R_turbina	38 m	c8	-0,02
rl	0,01 $\Omega$	c9	-0,003
rs	0,01 $\Omega$	$\xi_{\text{pll}}$	0,707
$\tau$	0,001 s	Kcp	$1.9165 \times 10^5$ N·m/(rad/s) <sup>2</sup>
$\tau_{\text{pll}}$	0,0032 s	$\theta_m$	2.5 Wb/(rad/s)

### 7.1.2 Potències i rendiments de l'aerogenerador

Per calcular el rendiment de la turbina se simula el sistema funcionant a la potència nominal (2 MW). Per fer-ho, s'introdueix una entrada de vent en forma d'esglaó, que arriba al valor  $v_w = 14 \text{ m/s}$ . Amb aquesta velocitat del vent s'assegura que el sistema treballa a la potència nominal, ja que el control de l'angle de Pitch així ho imposa. Amb aquestes condicions de treball s'obté:





**Figura 7.1. Comparativa de potències**  
 (Font: elaboració pròpia)

S'observa que la  $P_t$  és positiva, això és degut a que se li ha aplicat un *gain* de valor -1, doncs representa la potència del vent que entra al sistema. Per contra, la resta de potències són positives de per sí, ja que són potències que surten del sistema. A partir d'aquest gràfic, utilitzant els valors de les potències respectives, es pot extreure el valor dels diferents rendiments del model. Els rendiments del rectificador i de l'inversor es poden trobar mitjançant l'equació 7.1 i 7.2 respectivament. El rendiment total s'obté fent el producte dels dos valors anteriors, segons l'equació 7.3.

Cal tenir en compte que en aquest model no es contemplen pèrdues a la part de contínua, de manera que tota la potència que surt del rectificador és la mateixa que rep l'inversor.

$$\eta_{rec} = \frac{P_e}{P_{dc}} = 0,938$$

Equació 7.1

$$\eta_{inv} = \frac{P_{dc}}{P_z} = 0,965$$

Equació 7.2

$$\eta_{tot} = \frac{P_{dc}}{P_z} = \mathbf{0,905}$$

Equació 7.3

### 7.1.3 Funcionament del convertidor *back-to-back*

En aquest apartat es graficaran les tensions que apareixen dins de l'estructura del convertidor *back-to-back*. En aquest cas, s'ha decidit simular el model amb una entrada de vent constant.

#### 7.1.3.1 Funcionament de l'inversor

A continuació es representen les tensions de la xarxa. Aquestes tenen un valor de pic de 563,38 V i una freqüència d'oscil·lació de 50 Hz (freqüència europea). Al gràfic es pot veure que el PLL està funcionant correctament perquè fixa la tensió  $V_{zd}$  a zero i la tensió  $V_{zq}$  coincideix amb el valor de pic de  $V_{z_{abc}}$ .

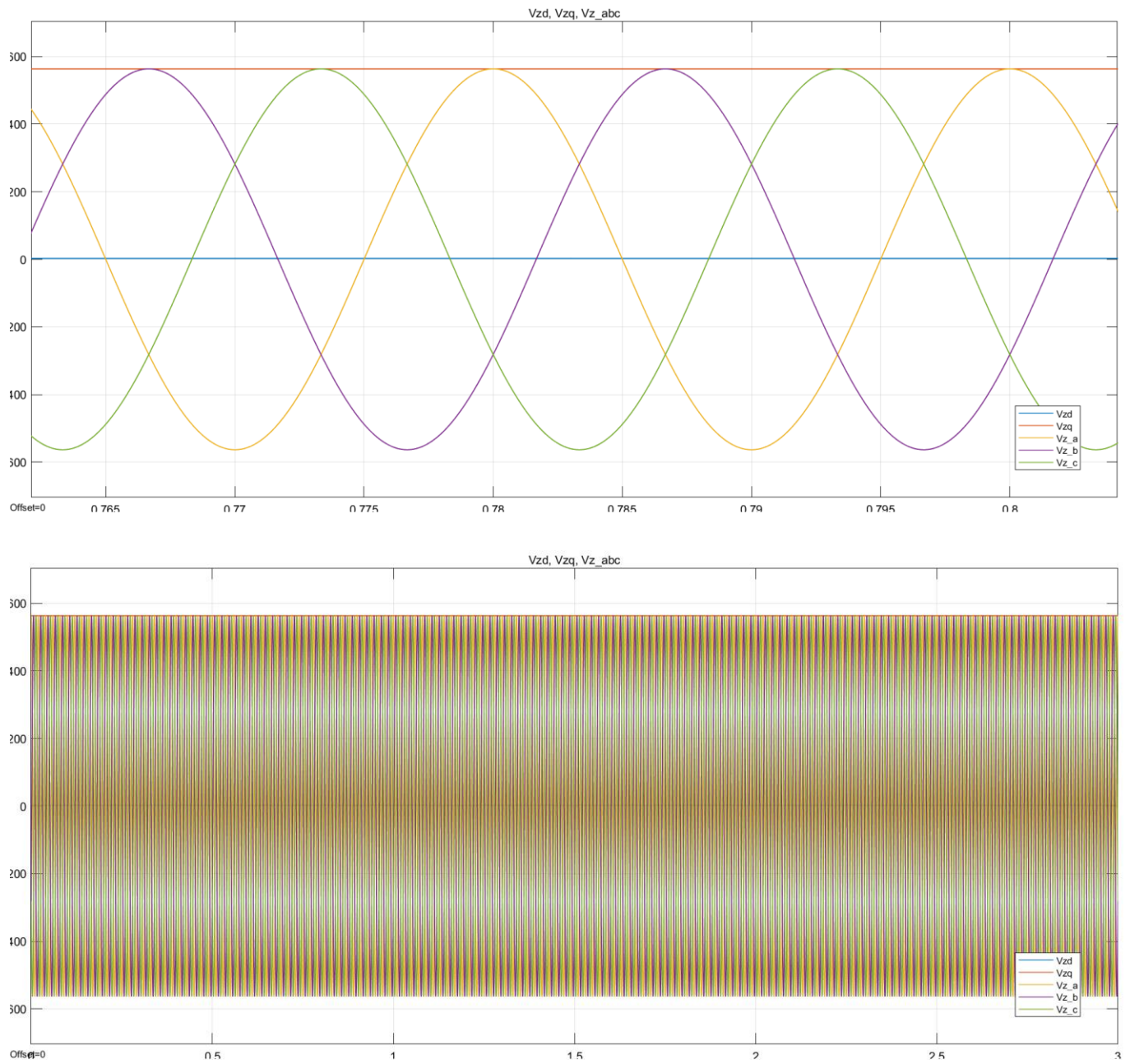
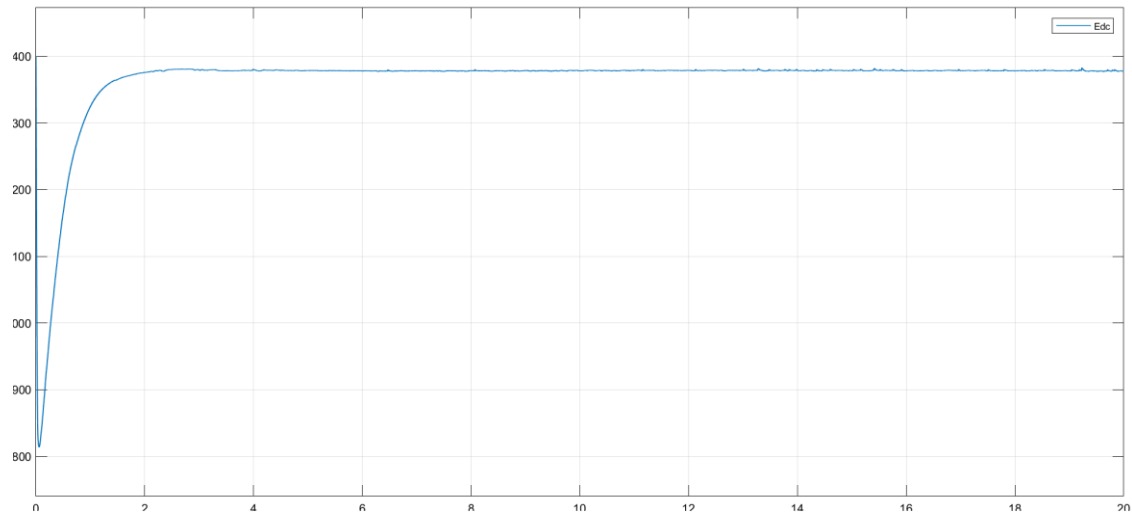


Figura 7.2. Tensions de xarxa  
(Font: elaboració pròpia)

### 7.1.3.2 Simulacions de la part DC

A continuació es mostra la tensió en borns del condensador, també coneguda com la tensió del bus de contínua.



**Figura 7.3. Tensió del bus DC**

(Font: elaboració pròpia)

En certa manera, el condensador actua de manera semblant a un dipòsit, és a dir, quan la intensitat que ve del rectificador és menor que la que necessita l'inversor, el condensador es descarrega, injectant intensitat  $I_c$  a l'inversor, disminuint així la tensió  $E_{dc}$ . Per contra, quan l'inversor requereix menys potència de la que subministra el rectificador, el condensador es torna a carregar. És per això que, per garantir el constant equilibri de potències entre la potència que surt del rectificador i la potència que entra a l'inversor, el regulador de voltatge té la funció de mantenir la tensió constant. Com a conseqüència d'un bon control de la tensió  $E_{dc}$  s'obté:

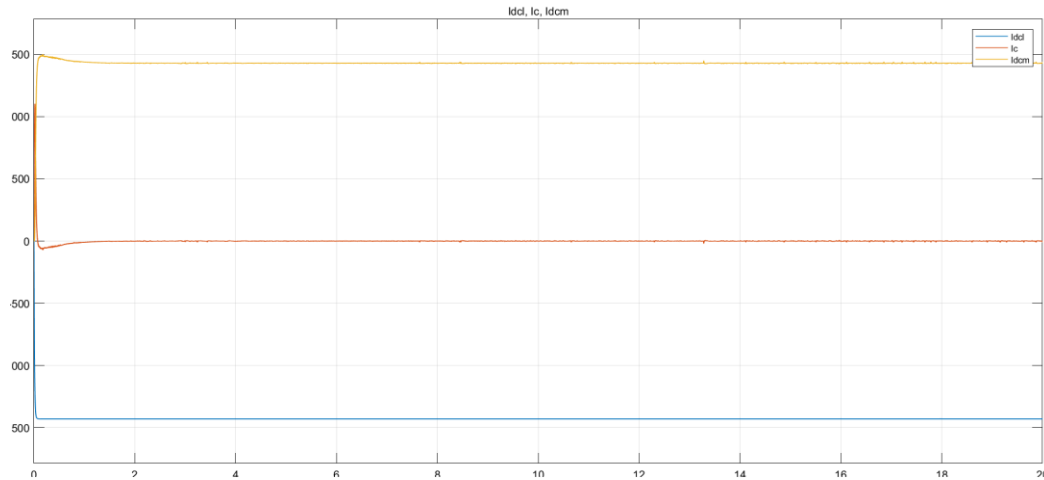


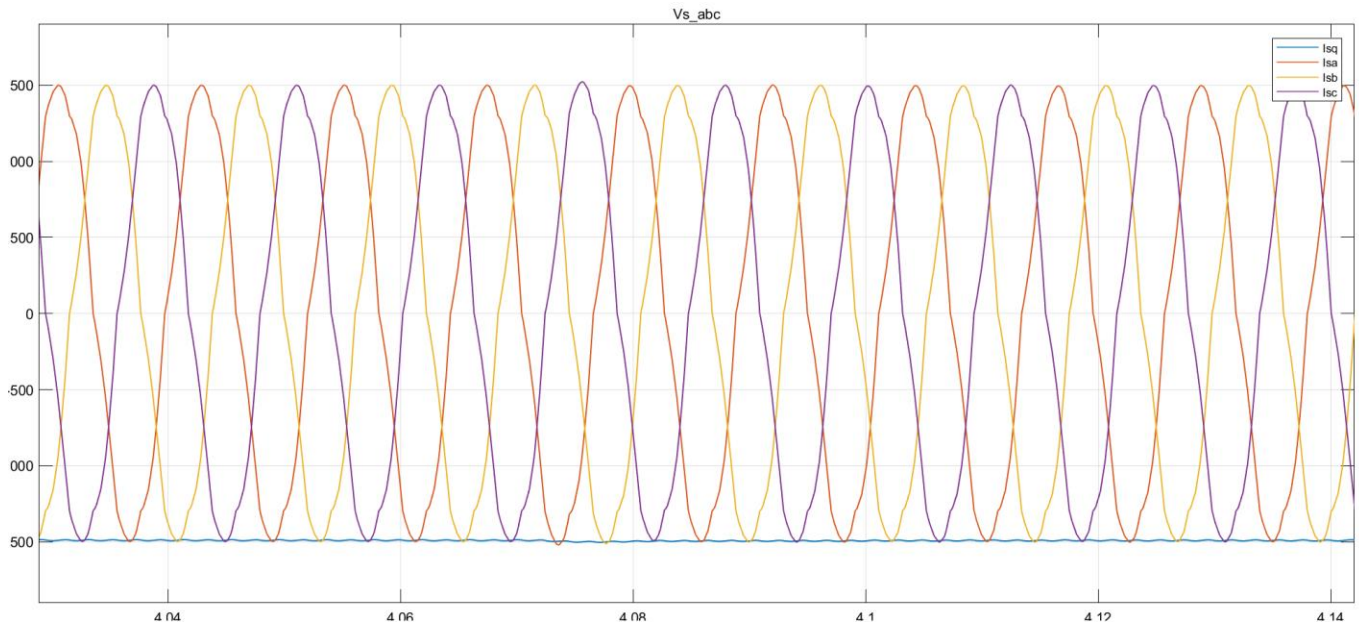
Figura 7.4. Intensitats al bus DC

(Font: elaboració pròpia)

On es mostra que la  $I_c$  és nul·la. Això és perquè tota la intensitat que surt del rectificador  $I_{dcm}$  entra directament a l'inversor  $I_{dcl}$ .

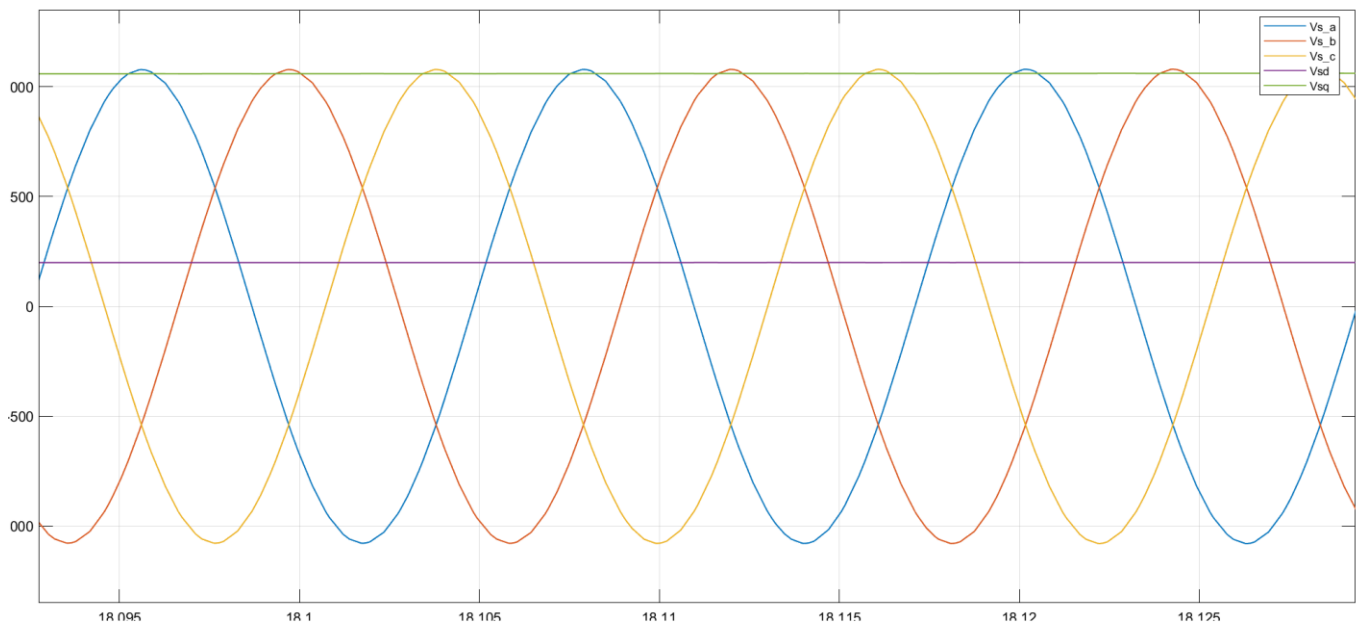
### 7.1.3.3 Funcionament del rectificador

A continuació es grafiquen els corrents que circulen a través de l'estator. En aquest cas, al gràfic es pot veure que la freqüència és molt menor que la de la xarxa. Això és possible gràcies a l'acció del convertidor *back-to-back*. A més, la freqüència varia proporcionalment segons la velocitat de rotació de la turbina. D'aquesta manera, a mesura que augmenta el vent, també augmentaria la freqüència d'aquest senyal. Aquest fet es veurà més endavant.



**Figura 7.5. Intensitats de l'estator**  
(Font: elaboració pròpia)

A continuació es poden veure els voltatges de l'estator. En aquest cas, la component  $V_{sd}$  és no nul·la (positiva), això és degut a que es consumeix potència reactiva a les bobines de l'estator.



**Figura 7.6. Tensions de l'estator**  
(Font: elaboració pròpia)

### 7.1.4 Simulació de la transmissió mecànica

Per estudiar l'evolució del  $\Gamma_t$  i del  $\Gamma_e$ , es fa servir una entrada de vent constant.

Primer de tot cal aclarir que  $\Gamma_t$  és positiu ja que és el parell que entra al sistema. Per contra,  $\Gamma_e$ , vist des del punt de vista del GSIP, és negatiu. Per poder comparar millor les dues variables se n'ha graficat el valor absolut, obtenint així:

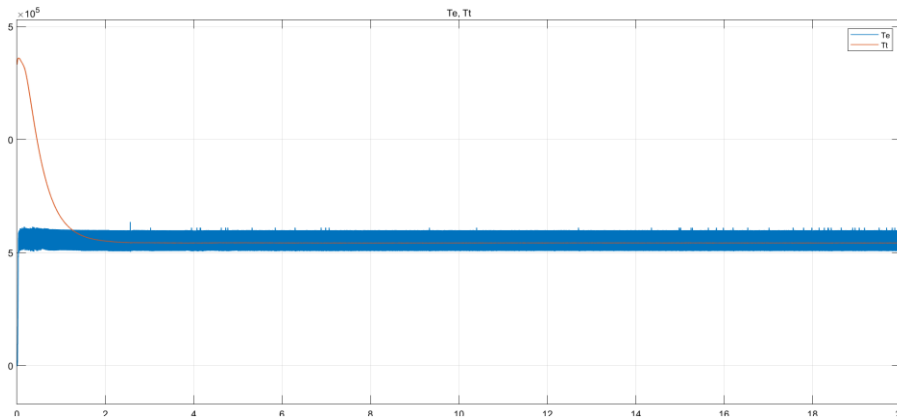


Figura 7.7. Comparativa parells mecànic i del generador

(Font: elaboració pròpia)

Es pot veure que  $\Gamma_t$  assoleix el seu valor màxim abans d'estabilitzar-se al valor desitjat. Això és degut a que el parell la potència del qual és òptima es troba per a una  $w_t$  superior a la del parell màxim.

### 7.1.5 Funcionament de la potència òptima

Per comprovar que el model està treballant a la potència òptima, es fa una simulació per a una entrada de vent constant  $v_w = 9$  m/s. Per tant, treballem per sota de la velocitat nominal. Cal remarcar que, per a aquesta velocitat la potència captada per la turbina és  $P_t = 0,838$  MW, per sota de la potència nominal. Per tant, l'aerogenerador treballa a la zona 2, on l'angle de Pitch és nul. En aquestes condicions de treball el que s'espera trobar és una velocitat de rotació constant.

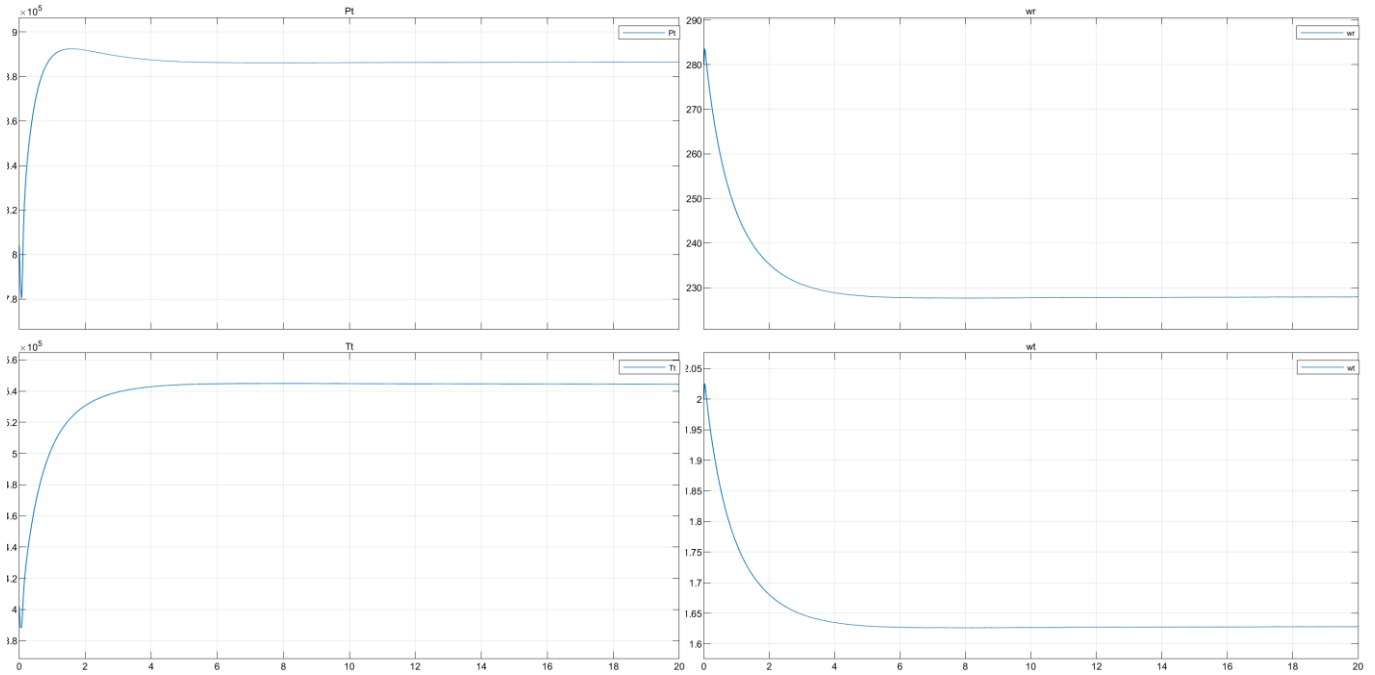


Figura 7.8. Potència mecànica, Parell mecànic, i velocitats angulars de la turbina i del generador  
(Font: elaboració pròpia)

Per a aquesta  $\omega t$  la turbina treballa amb el *tip speed ratio* en el seu valor òptim i amb l'angle de Pitch nul, de manera que cal esperar que l'aerogenerador treballi amb el màxim  $C_p$ .

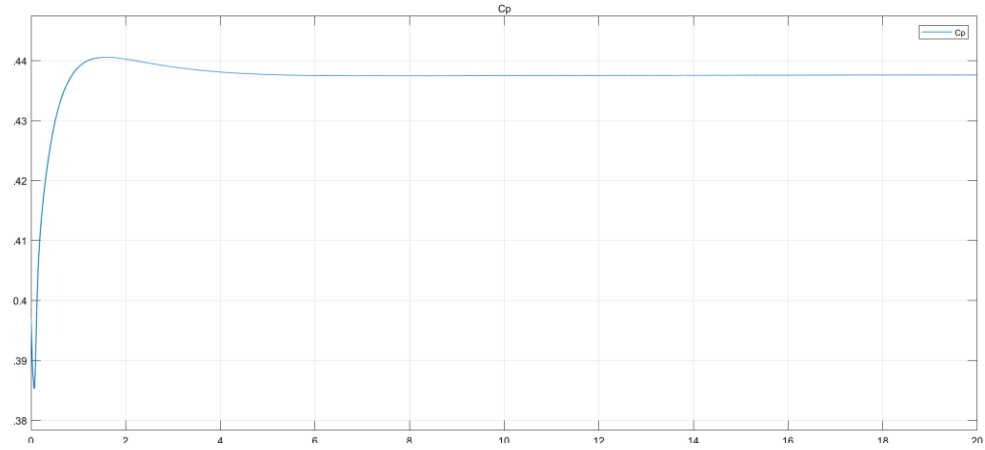


Figura 7.9. Coeficient de potència  
(Font: elaboració pròpia)



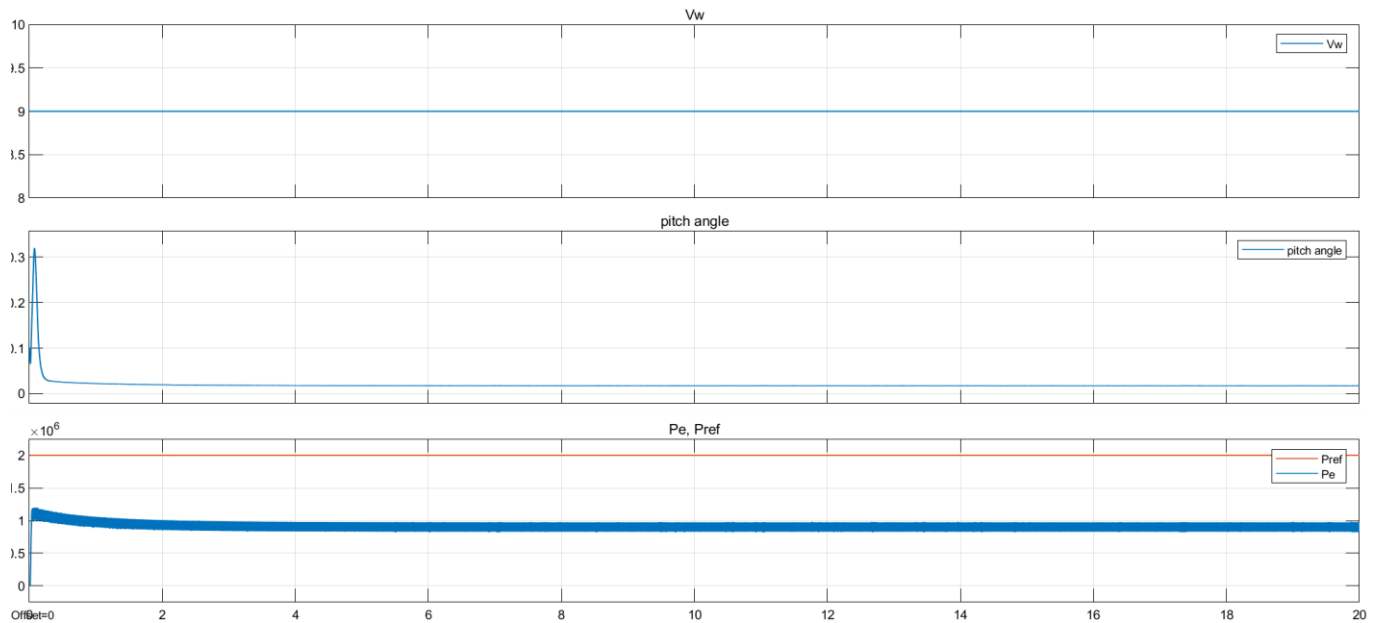


Figura 7.10. Velocitat del vent, angle de Pitch i Potències del generador i de referència  
 (Font: elaboració pròpia)

## 7.2 RESULTATS AMB VENT SENSE TURBULÈNCIES

Un cop completada la modelització del PMSG i realitzat l'avaluació prèvia del seu funcionament, es pot iniciar la simulació per estudiar-ne el comportament en situacions concretes que es trobarien en el món real. Com s'ha comentat anteriorment, l'únic input fora d'abast és el vent, i aquest pot aparèixer de dues maneres: amb o sense turbulències. En aquest apartat es simularan diferents situacions en funció del vent, això sí, sense turbulències. Si bé és cert que aquesta situació no representa ben bé la realitat, serà útil per veure la resposta del modelat per a cada situació.

Abans, es determinen els valors de les variables que es mantindran al llarg dels diferents casos, doncs com s'ha comentat, l'únic input variable serà la velocitat del vent. Sigui doncs:

DESCRIPCIÓ	SÍMBOL	VALOR	UNITATS
Voltatge efectiu fase-fase	$V_{rms}$	690	V
Voltatge de pic fase-neutre	$V_{z\_abc}$	$690 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 563,38$	V
Freqüència de xarxa elèctrica (EU)	$f_z$	50	Hz
Potència nominal	$P_{nom}$	2	MW

### 7.2.1 Velocitat constant

El primer cas estudia el funcionament de l'aerogenerador per a un vent a velocitat constant i inferior a la nominal. S'ha escollit un valor  $v_w = 14 \text{ m/s}$ . Es representen les components  $v_{z\_abc}$ ,  $v_{zq}$ , i  $v_{zd}$  per comprovar el correcte funcionament del PLL. Aquest fet ens demostra que es fa un càlcul correcte de l'angle elèctric, que posteriorment s'aplica a les transformades de Park.

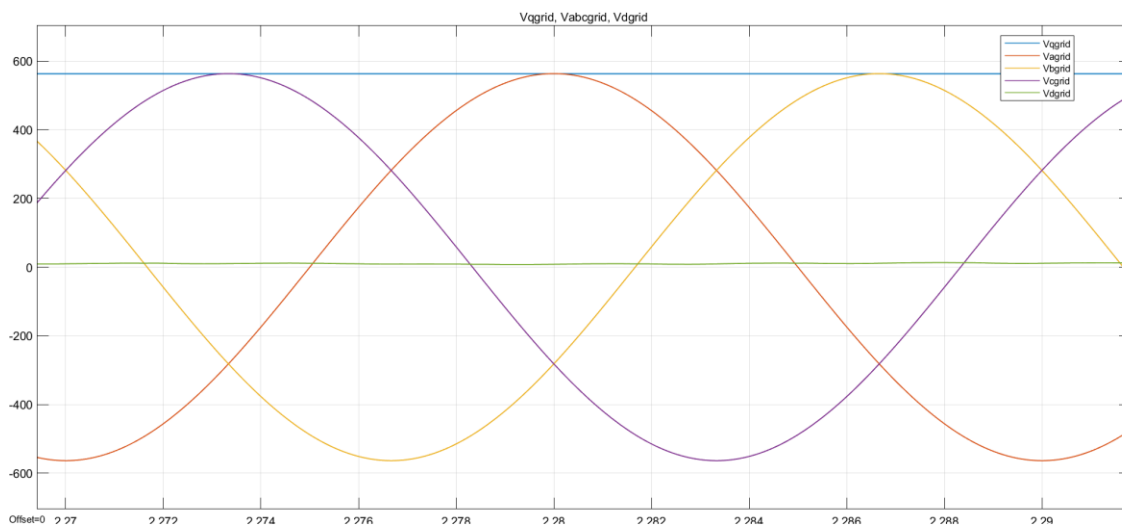


Figura 7.11. Gràfic  $V_{zq}$ ,  $V_{zd}$  i  $V_{zabc}$  (simulació Simulink)

(Font: elaboració pròpia)

Com es pot veure, els valors pic de les components  $a, b, c$  corresponen al valor de la component  $q$ , mentre que la component  $d$  té un valor molt proper a 0.

Seguidament, es visualitzen les potències a la banda de la xarxa. S'ha estudiat el valor de la potència calculada a partir de 3 formes diferents:

---

$P_z$  a partir de la tensió  $v_{z\_abc}$  i la intensitat  $i_{z\_abc}$

$P_{dc}$  a partir de la tensió  $E_{dc}$  i la intensitat  $I_{dc}$

$P_{grid}$  a partir de la tensió  $v_{l\_abc}$  i la intensitat  $i_{l\_abc}$

---

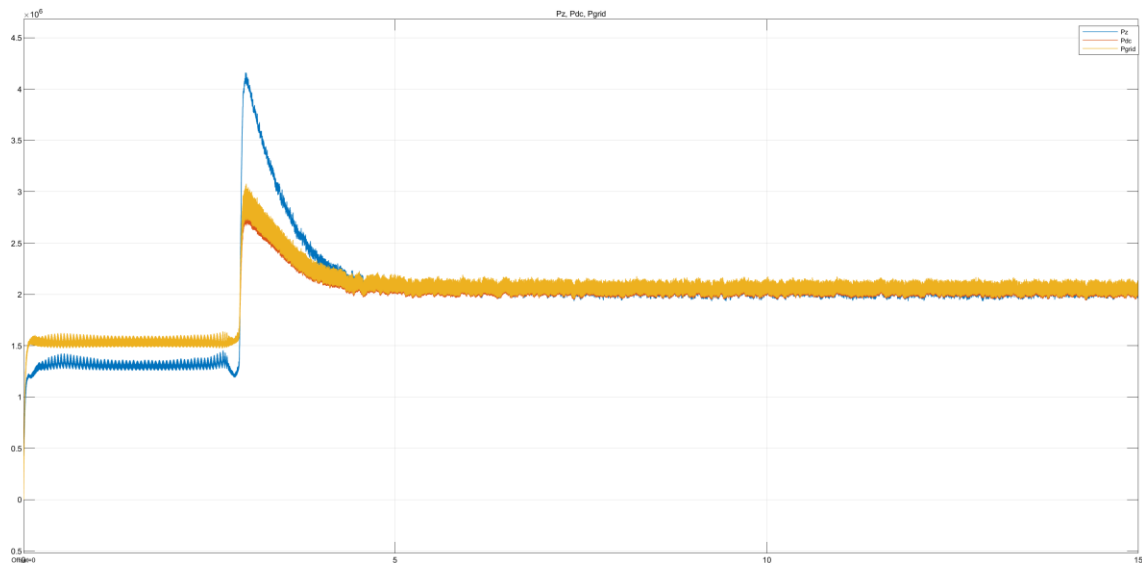


Figura 7.12. Gràfic Pz, Pdc i Pc per una Pnom=2MW (simulació Simulink)  
(Font: elaboració pròpia)

S'observa que tots 3 senyals es segueixen correctament, tal com s'esperava.

Per aquest cas, també s'ha volgut veure la resposta per a un canvi de sentit de la potència, és a dir, quan aquesta canvi de signe. És per això que s'ha simulat la mateixa situació, però imposant un *step* que al cap de 5 segons de simulació canvia el signe de la potència nominal de positiva a negativa. A continuació, podem veure la resposta corresponent:

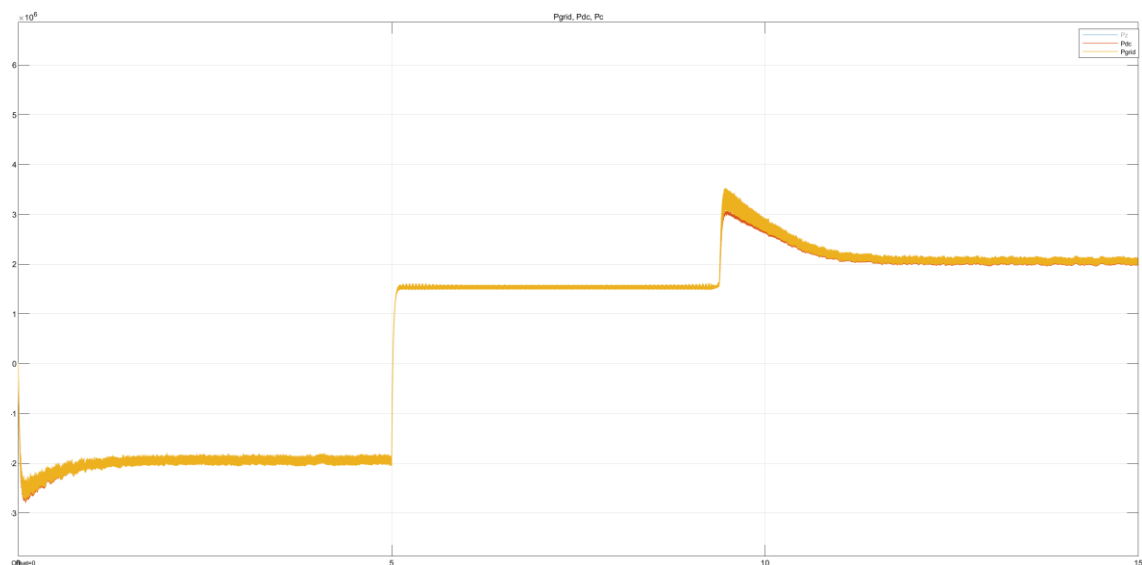


Figura 7.13. Gràfic Pz, Pdc i Pc per una Pnom=2MW amb *step* de 5 segons, de valor inicial -1 i final +1 (simulació Simulink)  
(Font: elaboració pròpia)

Aquí observem que, efectivament, els senyals també es segueixen correctament, si bé existeix una demora de 8 segons en la qual el sistema triga en executar el traspàs de valor de la potència negativa a positiva.

A la Figura 7.14 s'observa una comparativa de les potències que es transmeten dins del sistema per a la banda del generador:

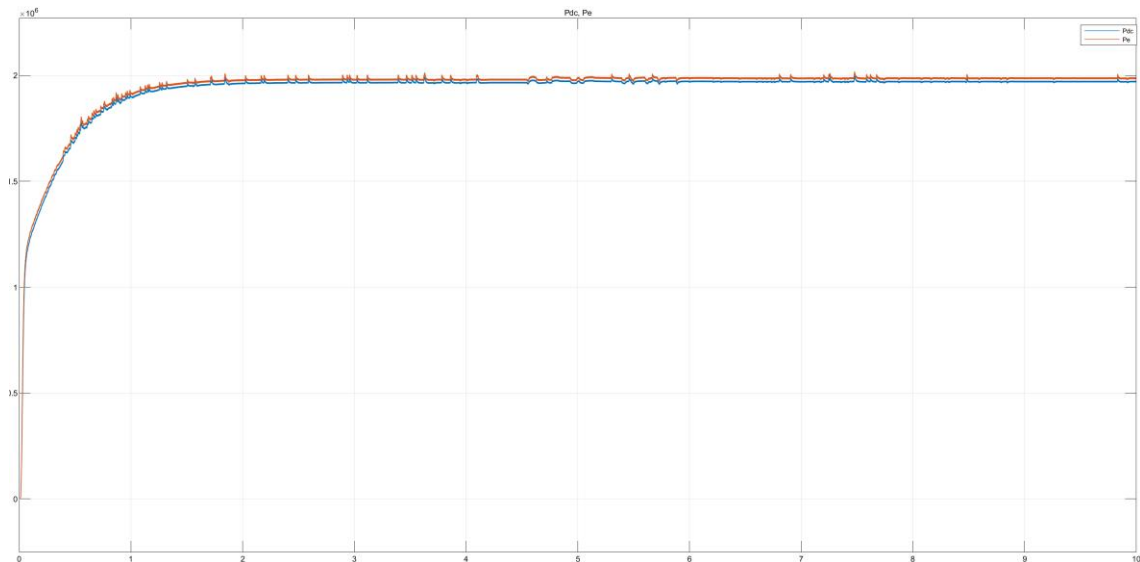


Figura 7.14. Gràfic Pdc i Pe (simulació Simulink)

(Font: elaboració pròpia)

On Pdc correspon a la potència transmesa al generador i Pe la potència elèctrica absorbida de la turbina.

Finalment, es visualitza el comportament d'E<sub>dc</sub>:

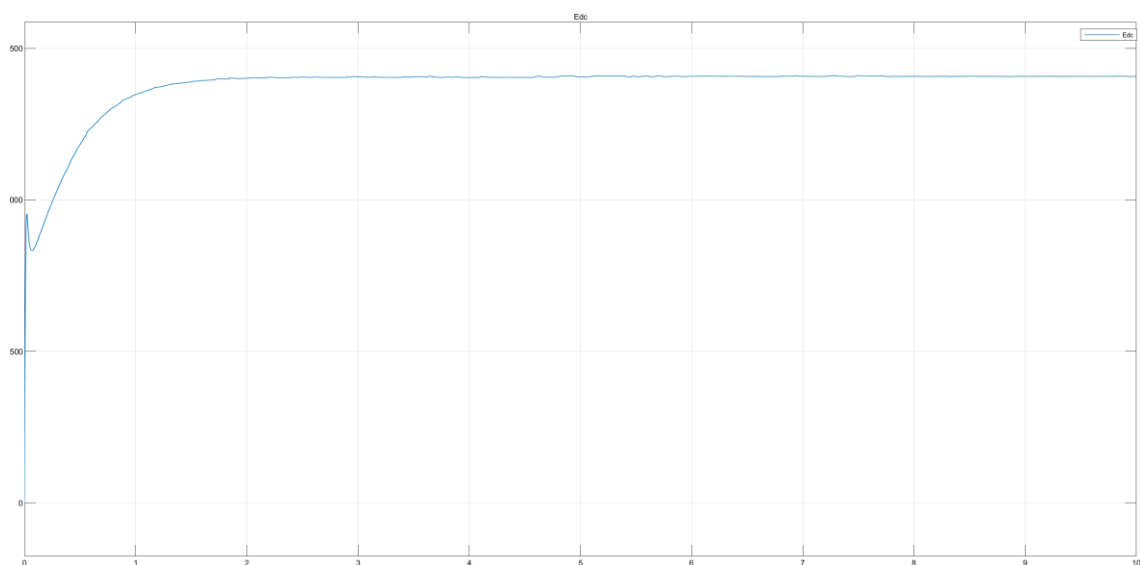


Figura 7.15. Gràfic E<sub>dc</sub> (simulació Simulink)

(Font: elaboració pròpia)

Es veu com el voltatge de bus es regula al seu valor de referència, en aquest cas 1429 V.

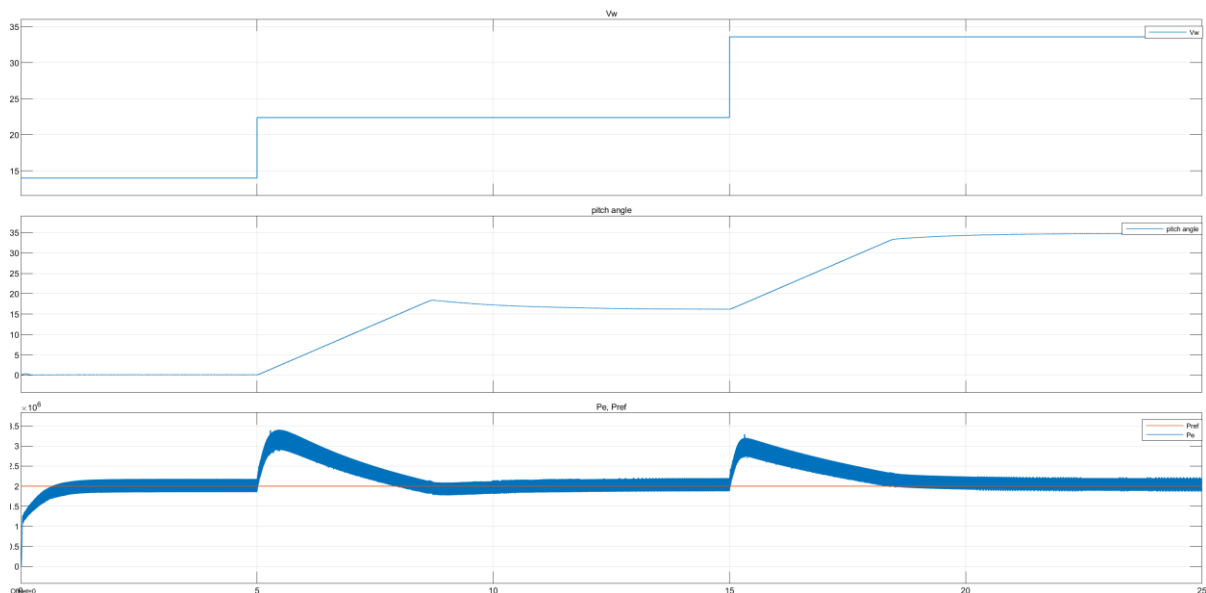
### 7.2.2 Graó de velocitat

Si bé es tracta d'una situació no-extrapolable a la realitat, pot ser de gran utilitat. L'estudi del modelat implementant diferents velocitats cada cert temps ens permet visualitzar l'actuació del control d'angle de Pitch.

Així doncs, s'imposen 3 *steps* de velocitats diferents:

<b>t = 0s</b>	V1	14	m/s
<b>t = 5s</b>	V2	22.4	m/s
<b>t = 15s</b>	V3	33.6	m/s

Primer de tot, s'analitzen conjuntament els gràfics de la velocitat del vent ( $v_w$ ), l'angle de Pitch i la potència elèctrica absorbida del generador ( $P_e$ ). D'aquesta manera es pot observar més fàcilment l'efecte de la velocitat del vent sobre l'angle de Pitch, i aquest sobre la potència. També s'ha afegit la senyal de la potència nominal de referència ( $P_{ref}$ ), la qual cal recordar que no es pot superar.



**Figura 7.16. Gràfics del Control PI d'angle de Pitch AMB actuador i 3 *steps* de velocitat del vent**  
(Font: elaboració pròpia)

Es pot observar com durant el primer tram amb  $v_w = 14 \text{ m/s}$  la potència es manté en el seu valor nominal, i l'actuació de l'angle de Pitch és pràcticament nul·la. Això permet veure que la velocitat nominal del vent és pròxima als 14 m/s. Per a valors superiors, la potència augmentaria considerablement, superant així el valor de potència nominal. És precisament en aquests casos on cal

l'actuació del controlador d'angle de Pitch, el qual augmenta el seu valor per tal de minimitzar el valor de  $C_p$ , i conseqüentment, la quantitat de potència absorbida del generador.

El segon esglauó augmenta la velocitat del vent a 22.4 m/s, el que significa que la situació correspon a la descrita en el paràgraf anterior. Efectivament, s'observa com inicialment la potència augmenta fins quasi 3,5 MW, però ràpidament és controlada per l'angle de Pitch, el qual també augmenta fins que la potència torna al valor nominal de 2 MW. En aquest punt, les pales s'han posicionat correctament, i el valor d'angle es manté constant per tal de mantenir la potència nominal al seu màxim.

Aquesta situació es repeteix de nou en el tercer i últim esglauó, ara amb una velocitat del vent igual a 33,6 m/s. De nou, l'angle de Pitch augmenta el seu valor fins que la potència absorbida queda controlada als 2 MW, i allà el valor d'angle es manté constant. En totes dues situacions s'observa un sobrepuig considerable, la qual cosa es deu principalment a la velocitat de reacció de l'angle de Pitch.

L'estudi d'aquests 3 gràfics ha permès verificar el correcte funcionament del controlador d'angle de Pitch. A més a més, s'ha vist que la velocitat de reacció del controlador és bona i controlada. Correspon a la part de l'actuador, la qual, si es recorda, s'ha fixat a 5º/s.

Cal destacar també que, en situacions extremes on existeix un augment de la velocitat de rotació de la turbina molt elevat, on es superi considerablement el seu valor nominal, es podria arribar a malmetre la turbina eòlica. Per controlar-ho, s'ha afegit la gràfica corresponent a la velocitat de rotació de la turbina:

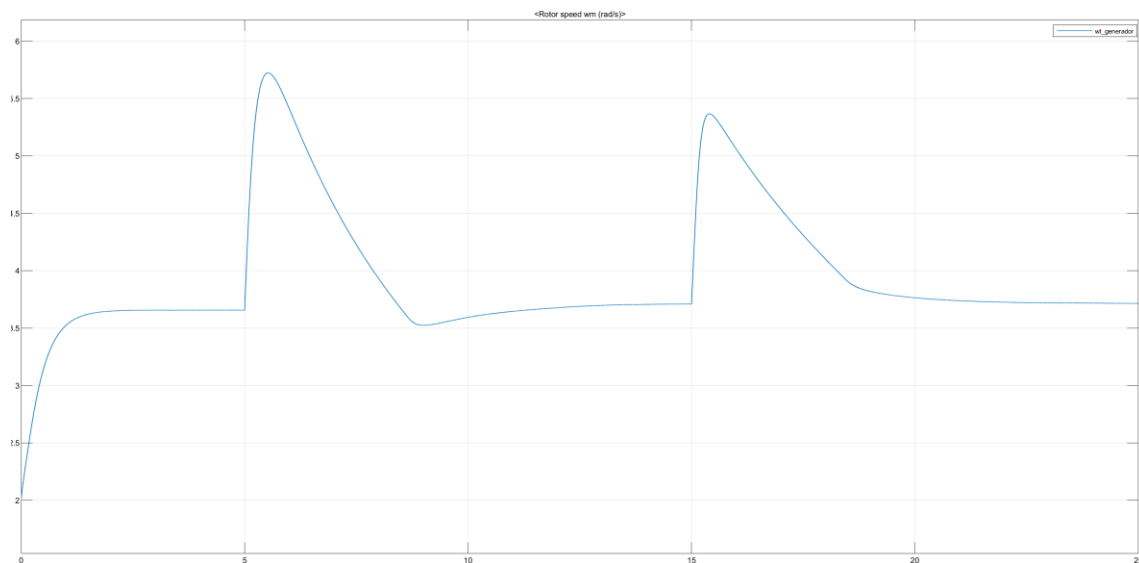
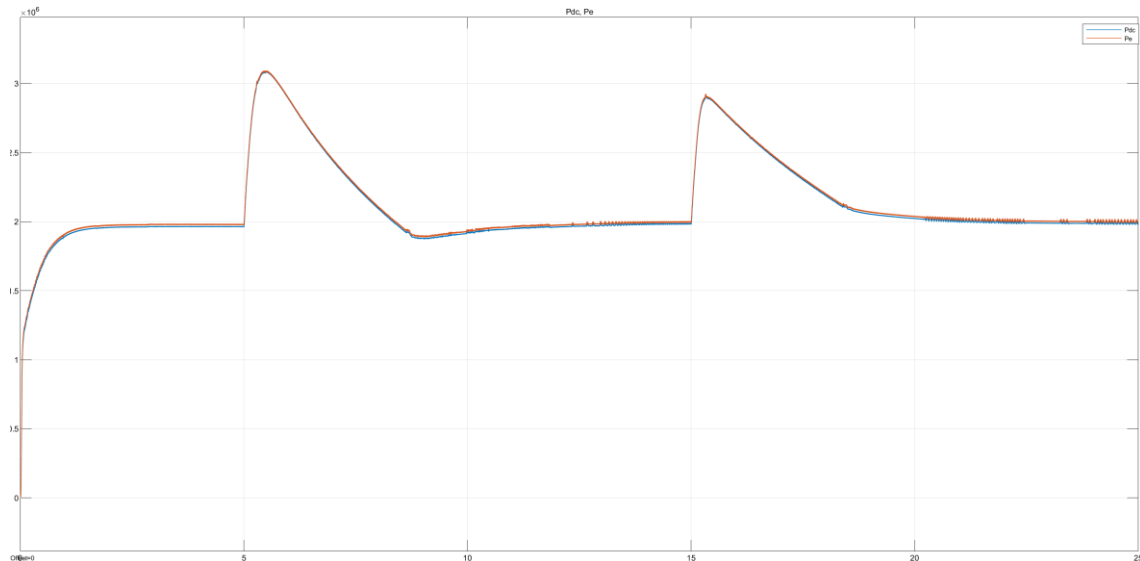


Figura 7.17. Gràfic velocitat de rotació de la turbina ( $\omega_r$ ) (simulació Simulink)

(Font: elaboració pròpia)

S'observa que, certament, en les primeres instàncies d'augment de velocitat del vent, la velocitat de rotació de la turbina adquireix valors molt per sobre del nominal.

També, es denota com la potència generada i la velocitat no augmenten tant sobtadament com la velocitat del vent. Aquest fet es deu a que la turbina eòlica té una inèrcia bastant gran ( $J_{tot}$ ).



**Figura 7.18. Gràfic Pdc i Pe (simulació Simulink)**

(Font: elaboració pròpia)

### 7.2.3 Velocitat creixent (rampa)

Per aquest apartat, es simularà amb una entrada rampa de velocitat del vent. Concretament, l'input de rampa s'inicia amb un valor de 10 m/s, amb un augment per pendent de 5 m/s<sup>2</sup>, durant un període de 50 segons. Amb aquesta opció cobrim un rang considerable de velocitats del vent, i consegüentment serà possible observar l'actuació del MPPT i del controlador d'angle de Pitch.

A la Figura 7.19 hi ha representades les corbes teòriques de potència per diferents velocitats del vent. Aquesta figura mostra com el control de potència òptima funciona, doncs per cada velocitat del vent la potència generada és la màxima possible.

Tal com s'ha vist en l'apartat 5.1.3, la seva funció permet obtenir la potència òptima en funció dels diferents valors de velocitat.

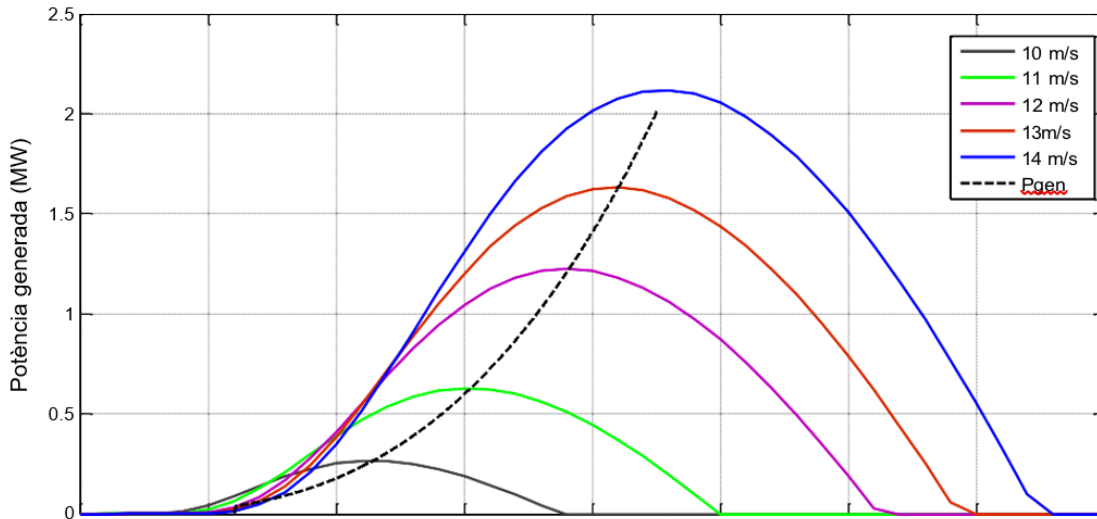


Figura 7.19. Gràfic corbes Velocitat del vent vs. Potència

(Font: elaboració pròpia)

Per veure millor com funciona al control de l'angle de Pitch s'ha representat la superfície del coeficient de potència a la Figura 7.20.

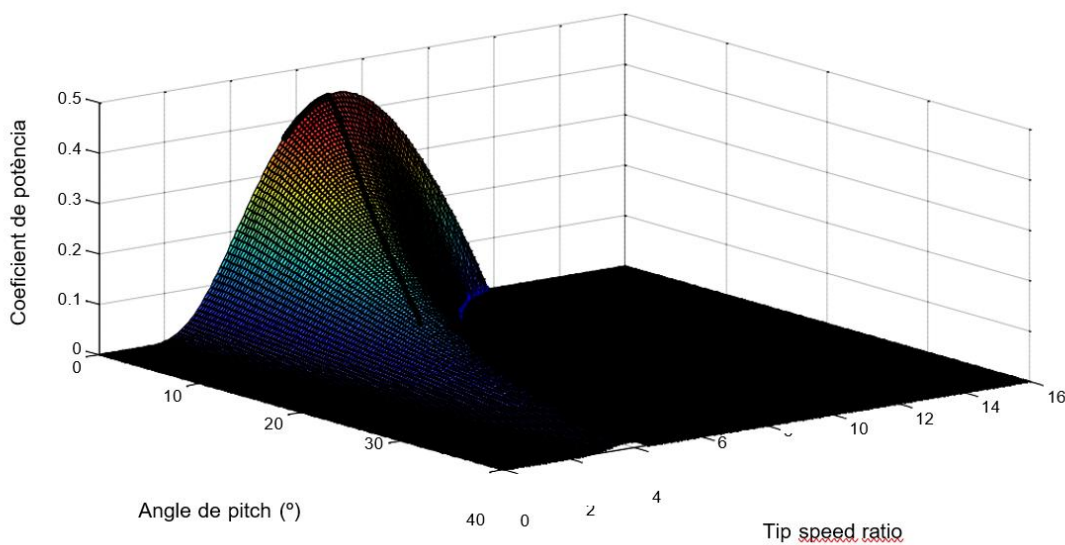


Figura 7.20. Gràfic punts de funcionament sobre la superfície Cp en funció de  $\beta$  i  $\lambda$

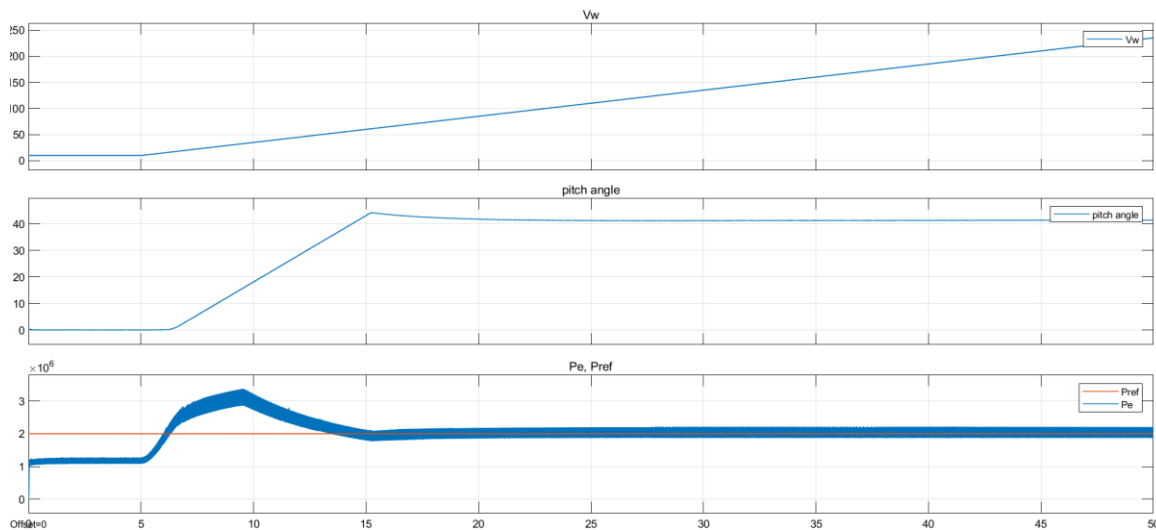
(Font: elaboració pròpia)

S'observen tots els valors que va prenent el Cp a mesura que va augmentant la velocitat del vent. Com es pot veure, per vents de velocitat inferior a la nominal, l'angle de Pitch és manté a zero i el Cp es manté al seu màxim possible, gràcies al control de potència òptima. Quan es supera la velocitat del vent nominal, comença a actuar el control de l'angle de Pitch, que n'augmenta el seu valor i consegüentment redueix el valor del Cp.

De nou, s'analitzen conjuntament els gràfics de la velocitat del vent (Vw), l'angle de Pitch i la potència elèctrica absorbida del generador (Pe). D'aquesta manera es pot observar més fàcilment l'efecte de la



velocitat del vent sobre l'angle de Pitch, i aquest sobre la potència. També s'ha afegit la senyal de la potència nominal de referència (Pref), la qual cal recordar que no es pot superar.



**Figura 7.21. Gràfics del Control PI d'angle de Pitch AMB actuador i velocitat del vent en rampa**  
 (Font: elaboració pròpia)

Observem una situació similar al cas anterior. En primera instància, la velocitat del vent és menor a 14 m/s, i per tant la producció de potència del generador és menor a la nominal. Si bé no és necessària l'actuació del controlador d'angle de Pitch, sí està actuant el MPPT, per tal d'obtenir el major valor de potència absorbida.

Assolits els 14 m/s, el controlador d'angle de Pitch s'activa, i obtenim un gràfic molt similar al del cas anterior, on es controla el valor de potència a 2MW a través de l'augment de l'angle de les pales.

Finalment, s'ha volgut visualitzar conjuntament els gràfics de velocitat del vent (Vw) i velocitat de rotació de la turbina (wt), per tal de comprovar que, malgrat l'augment constant de la velocitat del vent, l'angular augmenta paral·lelament fins el punt d'inici d'actuació de l'angle de Pitch, on es manté constant per a que la potència també ho sigui.

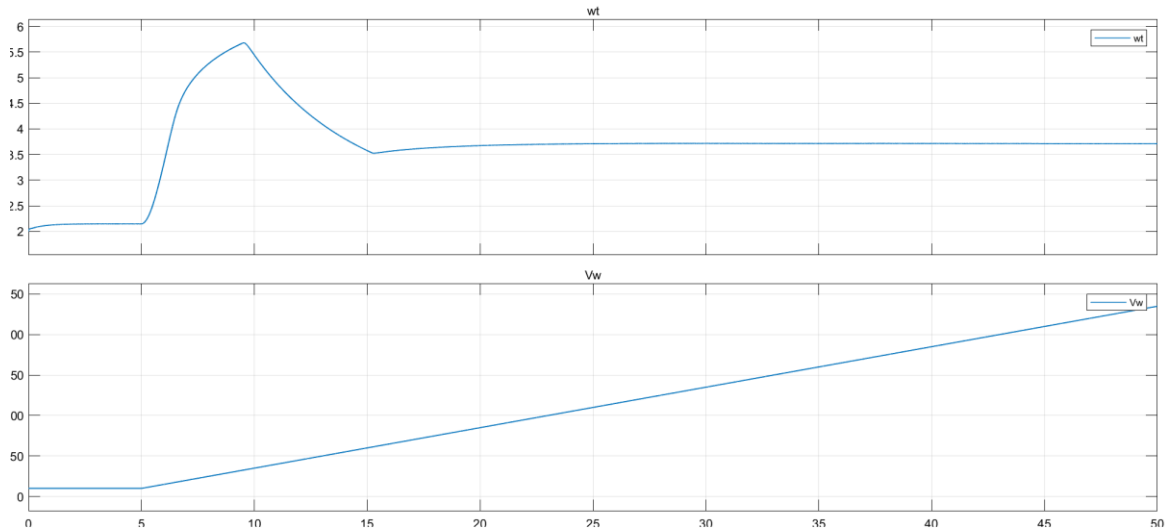


Figura 7.22. Gràfic de la velocitat del vent (Vw) i velocitat de rotació de la turbina (wt)

(Font: elaboració pròpia)

### 7.3 ESQUEMA DE MODEL COMPLET

Es presenta el model compacte del generador tipus 4, modelat amb MATLAB-Simulink, i a través del qual s’han realitzat els estudis i anàlisis presentats en els apartats anteriors.

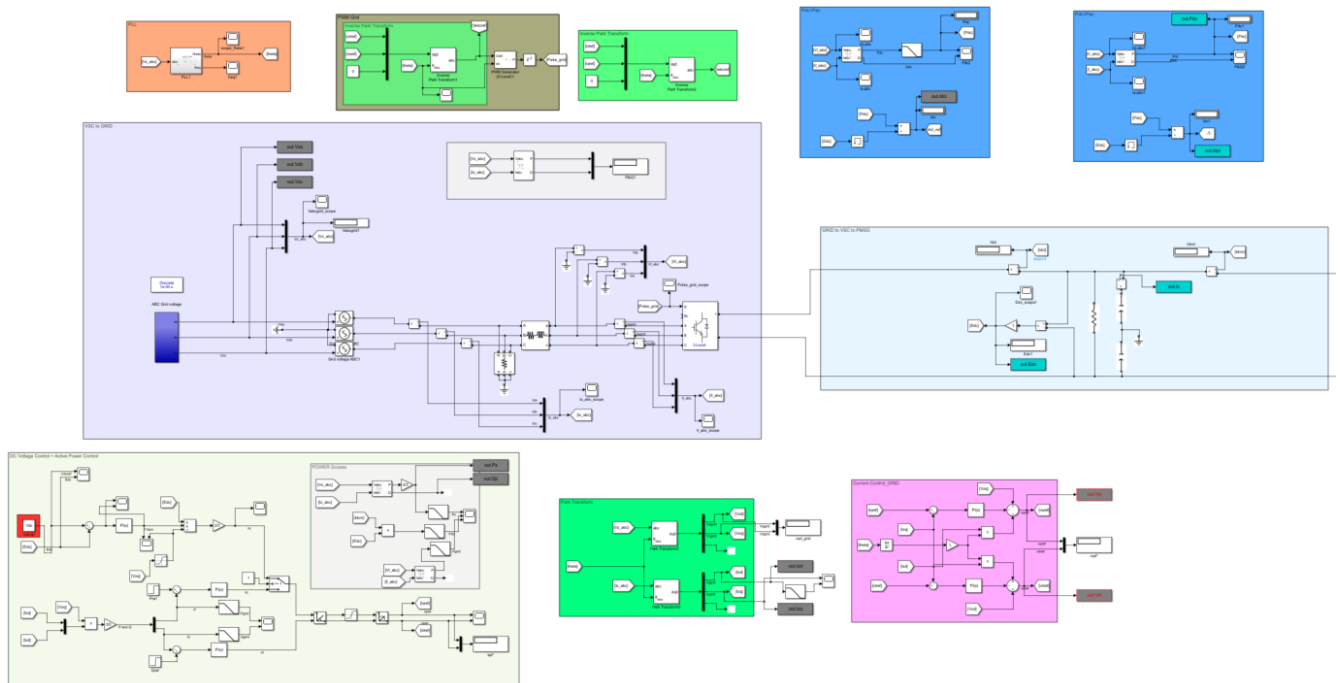


Figura 7.23. Esquema de modelat complet (Simulink) banda xarxa

(Font: elaboració pròpia)

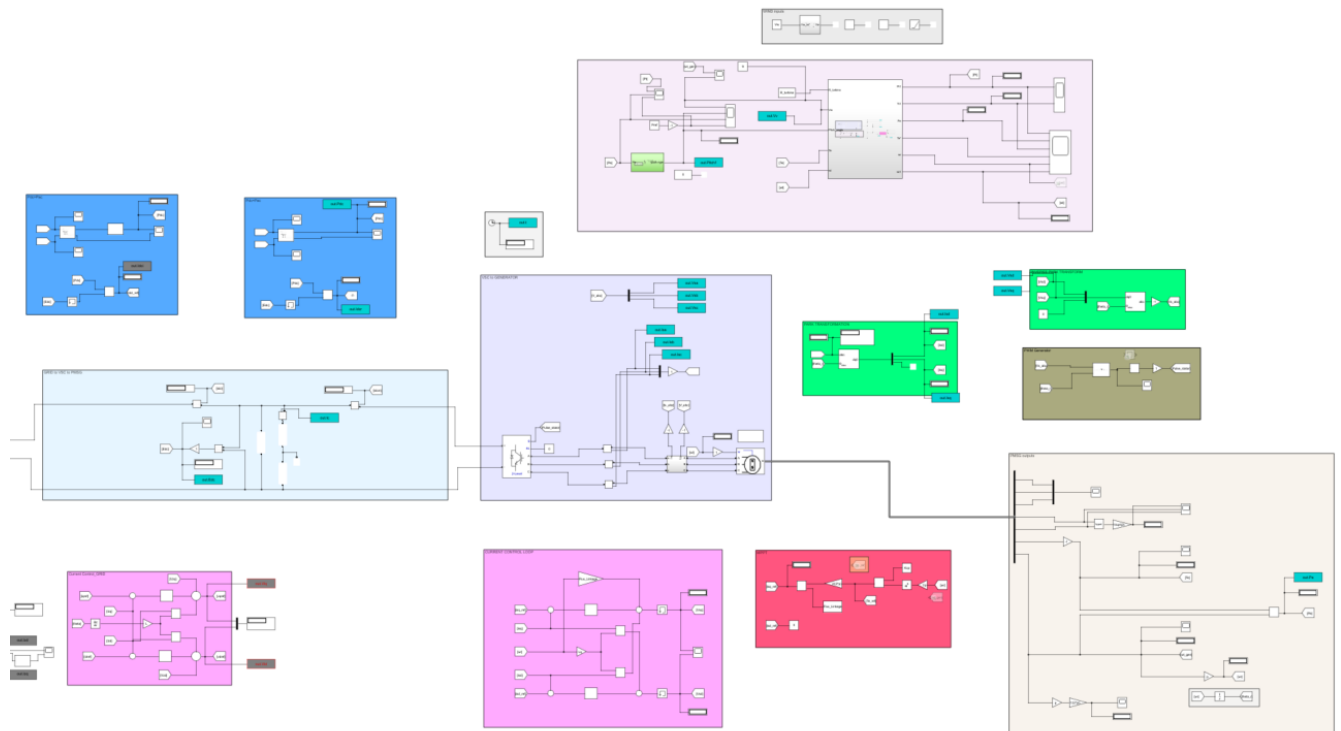


Figura 7.24. Esquema de modelat complet (Simulink) banda generador

(Font: elaboració pròpia)

## 8. CONCLUSIONS

Arribats a la fi d'aquest projecte, mirant enrere es denota la quantitat considerable de treball que implica la modelització d'un aerogenerador d'aquestes característiques. No obstant, l'objectiu principal, la modelització i simulació d'un aerogenerador de tipus 4, es considera complet.

Al llarg del projecte s'han analitzat totes les equacions que descriuen aquest tipus de turbines eòliques, s'han estudiat els diferents sistemes de control necessaris, i tot plegat s'ha implementat en un programa simulador (MATLAB-Simulink) per tal d'avaluar el correcte funcionament tant dels diferents subsistemes com del sistema en conjunt.

Es vol destacar algun dels aspectes estudiats més rellevants. Un d'ells és el control del convertidor VSC *back-to-back*. Aquest sistema ha permès connectar el GSIP directament a la xarxa, prescindint així de la caixa de transmissió. Amb aquest controlador, es transforma el corrent trifàsic provinent del generador a corrent continu, per seguidament transformar-lo de nou en corrent trifàsic, ara connectat a la xarxa de 50Hz. L'inversor manté la tensió del bus de contínua i permet enviar a la xarxa la potència desitjada en tot moment, i pot controlar independentment la potència activa i la reactiva. Per altra banda, el rectificador permet controlar el parell òptim que ha d'exercir el generador per fer girar la

turbina a la velocitat angular adequada. Això s'aconsegueix controlant les tensions de la xarxa i de l'estator, respectivament, perquè els seus corrents siguin els desitjats. Per fer-ho, prèviament s'han transformat les tensions i corrents sinusoidals  $(a,b,c)$  a valors constants  $(q,d)$ , aplicant les transformades de Park. Les simulacions han demostrat l'èxit d'aquestes transformades. En global, tot plegat permet connectar el generador (la freqüència del qual és diferent a la de 50Hz) a la xarxa.

Precisament, en aquest àmbit s'ha volgut dissenyar un model més fidel a la realitat del convertidor *back-to-back*, implementant un control PWM dels senyals de commutació dels IGBT.

En el marc de la potència generada, el sistema més destacat és el control de potència òptima. Amb ell, s'ha controlat la quantitat de potència que genera la turbina en funció del vent. D'aquesta manera, tal com s'ha vist en les simulacions, ha permès maximitzar la potència obtinguda en cada instant.

Un altre sistema destacable ha estat el control d'angle de Pitch. Amb ell, l'aerogenerador pot seguir treballant malgrat rebre velocitats del vent elevades. Concretament, el sistema consta d'un controlador PI i un actuador que regulen l'angle d'atac de les pales, per tal de disminuir la quantitat de potència del vent absorbida quan aquesta superi els valors nominals. La simulació amb diferents entrades de vent ha estat satisfactòria.

Fins aquí es pot considerar un treball satisfactori, si bé existeix el desig de poder treure'n molt més profit, sobretot a nivell d'estudiar altres situacions que es donen a la realitat, com ara la resposta davant una desconexió sobtada. Un altre cas són els sots de tensió a la xarxa elèctrica, on per normativa s'aporta intensitat reactiva a l'aerogenerador per afrontar aquesta anomalia. També seria interessant estudiar la resposta en presència de vents turbulents, on la potència generada és més variant i hi pot haver punts puntuals controlats d'acceleració de la turbina, generant potència per sobre de la nominal. I pel que fa al control d'angle de Pitch, es podria estudiar de forma no-lineal.

A més a més, es considera la possibilitat d'engegar projectes de futur en base el present treball. Un d'ells seria la modelització d'un parc eòlic marí (*offshore*). Aquests parcs solen estar compostos per múltiples aerogeneradors del tipus 4 (GSIP i *direct-drive*). Seria molt interessant veure el comportament de varis aerogeneradors a l'hora, i a dia d'avui hi ha un creixement important del nombre de projectes enfocats a aquesta tipologia d'aerogeneradors precisament per la instal·lació de parcs eòlics *offshore*.

Un altre projecte de futur, ja més allunyat de l'actual, podria ser la modelització d'un model de caixa de canvis molt habitual com és el model de dues masses. D'aquesta manera es dissenyaria un model de tipus diferent, i també proper a un cas real.

Per últim, ja més enfocat al disseny de maquetes, seria molt satisfactori tenir la possibilitat d'implementar un muntatge experimental de baixa potència, en una màquina de laboratori, del sistema simulat per observar-ne el funcionament real.

Tot plegat obra un ventall de possibilitats enorme, podent estudiar diversos models existents, normalment en funció de la situació geogràfica on s'ubiqui cadascun.

## 9. AGRAÏMENTS

Aquest projecte s'ha dut a terme en una etapa amb molts canvis a nivell personal, i combinar-ho ha estat un repte. Ha suposat molta feina i ha estat molt intens, però encara més gratificant. Estic molt satisfet amb els coneixements adquirits gràcies a aquest treball, i això ho agraeixo especialment al Vinicius. Ha estat un recolzament constant, s'ha mostrat proper i molt pacient davant els meus dubtes i el seu nivell d'implicació ha estat màxim. *Muito obrigado, Vinicius!*

Agrair al conjunt de professors de l'ETSEIB que he tingut el plaer de conèixer al llarg d'aquesta etapa, gràcies pels coneixements que m'han brindat i que he pogut aplicar en aquest treball. En especial, voldria agrair l'ajuda d'en Marc Cheah, qui a través de l'assignatura de Generació Elèctrica Eòlica m'ha motivat més per aprofundir en la matèria, i a l'hora m'ha proporcionat orientació, ajut i suport en moments concrets al llarg del procés.

Agraïments al Víctor Vesperinas, qui va respondre a una consulta amb molta implicació.

Finalment, voldria dedicar la més sincera gratitud a la meva família i a la meva parella, pel seu recolzament incondicional, dia rere dia, animant-me i ajudant-me. Sens dubte han estat una peça clau, no només en aquesta última etapa, sinó al llarg de tots els anys d'estudi a la universitat.

Per acabar, voldria afegir que la meva voluntat és la de millorar i aprofundir més en aquest projecte. Un cop estudiats diversos projectes, considero que, en el moment de presentar el treball, la fase en la que es troba aquest model és millorable i amb un recorregut molt més extens. Aquest projecte m'ha despertat un gran interès en la matèria, i en conseqüència tinc intenció de continuar aprenent i investigant.

## 10. REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

### 10.1 PRINCIPALS REFERÈNCIES

- [1] Universitat Politècnica de Catalunya. (2021). *Wind Power Generation*. Generació elèctrica eòlica. Material no publicat.
- [2] Enerdata (2020). Consumo Nacional de Electricidad. <https://datos.enerdata.net/electricidad/datos-consumo-electricidad-hogar.html>
- [3] Asociación Empresarial Eólica (2020). Principales cifras del sector eólico en España. <https://aeeolica.org/>
- [4] Universitat Politècnica de Catalunya. (2021). *Wind resource*. Generació elèctrica eòlica. Material no publicat.
- [5] Earth Null School (2022). <https://earth.nullschool.net/>
- [6] Organización Meteorológica Mundial. Atlas Internacional de Nubes. <http://cloudatlas.wmo.int>
- [7] IDAE seasonal maps. <http://idae.es>
- [8] International Energy Agency (2022). Wind Distribution Scheme. <http://iea.org>

- [9] OMAFRA (2019). Swept Area Wind Turbine. <http://www.omafra.gov.on.ca/>
- [10] Domenici, C. (2022). *Wind turbine model with implementation of a Pitch controller*. [Treball final de grau. Universitat Politècnica de Catalunya].
- [11] Wang, L. (2012). *Modeling and Control of Sustainable Power Systems*. Springer.
- [12] Universitat Politècnica de Catalunya. (2021). *Drive train and electrical concepts*. Generació elèctrica eòlica. Material no publicat.
- [13] Wu, B., Lang, Y., Zargari, N. i Kouro, S. (2011). *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*. John Wiley & Sons.
- [14] Universitat Politècnica de Catalunya. (2021). *Type 1 and 2 wind turbines*. Generació elèctrica eòlica. Material no publicat.
- [15] Universitat Politècnica de Catalunya. (2021). *Type 3 and 4 wind turbines*. Generació elèctrica eòlica. Material no publicat.
- [16] The engineering knowledge (2020). PMSG Internal Structure. <https://www.theengineeringknowledge.com/>
- [17] European Up Wind (2020). PMSG Internat Structure. <http://www.upwind.eu>
- [18] Pyrhonen, J. (2018). *Electrical Drives Research at LUT*. Lappeenranta University of Technology.
- [19] Junyent-Ferré, A. (2011). *Control of power electronic converters for the operation of wind generation systems under grid disturbances*. [Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya].
- [20] Rifà, R. (2014). *Modelització i control d'un aerogenerador direct-drive amb generador síncron d'imants permanents*. [Treball final de grau. Universitat Politècnica de Catalunya].
- [21] Liivik, E., Yang, Y., Sangwongwanich, A. i Blaabjerg, F. (2021). *Advancing grid-connected renewable generation Systems*. MDPI.
- [22] Egea, A. (2014). *Multiterminal HVDC transmission systems for offshore wind*. [Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya].
- [23] Bueno, A. (2019). HVDC [Vídeo]. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=vX-T0mdlF6s&list=PLgqw\\_8WBlqbAkVWdSakqGKVx2Qh2UlrOV](https://www.youtube.com/watch?v=vX-T0mdlF6s&list=PLgqw_8WBlqbAkVWdSakqGKVx2Qh2UlrOV).
- [24] Egea-Álvarez, A., Junyent, A. i Gomis, O. (2012). *Active and reactive power control of grid connected distributed generation systems*. [Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya].
- [25] Universitat Politècnica de Catalunya. (2021). *Control*. Generació elèctrica eòlica. Material no publicat.
- [26] Universitat Politècnica de Catalunya. (2021). *Wind resource and wind turbines*. Generació elèctrica eòlica. Material no publicat.
- [27] Harnefors, L. i Nee, H. (1998). *Model-based current control of AC Machines using the internal model control method*. IEEE.

- [28] Chung, S. (2000). *A Phase Tracking System for Three Phase Utility Interface Inverters*. IEEE.
- [29] Vesperinas, V. (2020). *Modelización y control de un aerogenerador de velocidad variable*. [Treball final de grau. Universitat Politècnica de Catalunya].
- [30] Skogestad, S. i Postlethwaite, I (2007). *Multivariable Feedback Control. Analysis and design*. John Wiley & sons.
- [31] Wind turbine models (2022). Alstom Ecotècnica ECO100 / 3.0 MW.  
<https://es.wind-turbine-models.com/fotos/lgetaMgt1zV-alstom-ecot-cnua-eco-100-3.0-mw-wind-turbine-generator-prototype-parque-eolico-la-collada-experimental-generaci-d-energia-e-lica-del-perell-sl-el-perell-catalu-a-spain>
- [32] Hasan, M., El-Shahat, A. I Rahman M. (2017). *Performance Investigation of three combined airfoils bladed small scale horizontal axis wind turbine*. BEM and CFD Analysis.
- [33] Sudhamshu A.R., Chandra, M., Sunil, N., Satish N.S., Mugundhan, V. i Kishore R. (2014). Numerical study of effect of Pitch angle on performance characteristics of a HAWT. ScienceDirect.
- [34]Geograph, Britain and Ireland (2022). Electric motors for Pitch angle control.  
<http://www.geograph.org.uk/>
- [35]B. R. Beerten, J. (2012). *Overview of dc voltage droop control methods for dc grids*. IEEE Transactions on Power Systems.
- [36]Singh, M. (2008). *Dynamic Models for Wind Turbines and Wind Power Plants*. NREL.
- [37]Yazdani, A. i Iravani, R. (2010). *Voltage-sourced converters in power Systems*. John Wiley & Sons.
- [38]Barragán, P. (2021). *Diseño de un generador síncrono de imanes permanentes para un aerogenerador marino*. [Treball final de grau. Universidad Pontificia Comillas].

## 10.2 BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTÀRIA

Universitat Politècnica de Catalunya. (2021). *Converters*. Generació elèctrica eòlica. Material no publicat.

Ackermann, T. (2012). *Wind power in power Systems*. John Wiley & Sons.

Anaya-Lara, O., Campos-Gaona, D., Moreno- Goytia, E. i Adam, G. (2014). *Offshore wind energy generation*. John Wiley & Sons.

Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D. i Bossanyi, E. (2011). *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons.

Ouro, C. (2014). *Modelado, simulación y control de un aerogenerador de velocidad variable*. [Treball final de màster. Universitat Politècnica de Catalunya].

Lorenzo, A. (2019). *Modeling, simulation and validation of generic wind turbine models based on International guidelines*. [Tesis doctoral. Universidad de Castilla la Mancha].

Rodríguez, A. (2018). *Modelado y control de un aerogenerador conectado a la red mediante un DFIG*. [Treball final de grau. Universidad Politécnica de Madrid].

Singh, M., Muljadi, E., Jonkman, J. i Gevorgian, V. (2014). *Simulation for Wind Turbine Generators with FAST and MATLAB-Simulink Modules*. NREL.

Gajewski, P. i Pienkowski, K. (2016). *Advanced control of direct-driven PMSG generator in wind turbine system*. Wroclaw University of Science and Technology.



