

Disseny d'un generador eòlic de petita potència

MEMÒRIA

Autor: MONJO MUR, LLUÍS

Director: BARGALLÓ PERPIÑÀ, RAMON

Convocatòria: JUNY 2009



**Màster Interuniversitari UB - UPC
d'Enginyeria en Energia**

Firma director projecte

Ramon Bargalló Perpiñà

Barcelona

25 de maig de 2009

Resum

En l'actualitat l'energia eòlica està assolint un protagonisme molt important en termes de grans parc de molt alta potència per generador. Tanmateix, un segment encara poc desenvolupat però amb símptomes d'un gran creixement és el dels petits generadors per aplicacions domèstiques, rurals, o d'abastiment en zones de difícil accés.

En aquest projecte es presenten quins són els passos a seguir per poder dissenyar els generadors elèctrics síncrons d'ímans permanents per a aquest tipus d'aplicacions.

Al llarg del projecte es presenten les metodologies per a analitzar la potencialitat dels recursos eòlics d'una localització determinada, una pauta de càlcul per a màquines elèctriques síncrones d'ímans permanents, tant pel disseny electromagnètic com per al disseny tèrmic, així com una proposta de simulació basada en software especialitzat.

Índex

1	Objecte i abast del projecte.....	1
1.1	Objecte	1
1.2	Abast del projecte	1
2	Recursos eòlics.....	3
2.1	Naturalesa i causes del vent	3
2.2	Caracterització	4
2.3	Variació del vent amb l'alçada	7
2.3	Potència aprofitable	8
2.4	Altres paràmetres d'importància	9
3	Estudi estadístic d'una localització	11
3.1	Descripció vent del Raval.....	13
3.2	Descripció vent observatori Fabra	16
3.3	Densitat de potència i energia aprofitable teòricament	19
4	Dimensionament del generador	21
4.1	Anàlisi dels generadors de petita potència en el mercat	21
4.2	Condicions de funcionament nominals i paràmetres de disseny	24
4.3	Dimensionat de la màquina elèctrica.....	26
4.4	Comprovació de les restriccions de disseny	32
4.5	Resultats	33
4.6	Gràfiques de funcionament	37
5	Estudi tèrmic.....	41
5.1	Circuit tèrmic equivalent	41
5.2	Estudi amb elements finits	45
5.3	Motor-cad	46
6	Simulació de la màquina.....	51
6.1	Modelització del vent i l'aerogenerador	51

6.2 Màquina elèctrica.....	52
6.3 Càrrega	53
6.4 Mesura.....	53
6.5 Esquema complet.....	54
6.6 Simulació en condicions nominals	55
6.7 Corba característica i rendiment.....	56
7 Model comercial de turbina	57
8 Pressupost	59
9 Conclusions.....	61
10 Treball futur	65
Bibliografia	67

1 Objecte i abast del projecte

1.1 Objecte

L'objecte del present projecte és el disseny d'un generador síncron d'imans permanents per a una turbina eòlica de petita potència i accionament directe.

1.2 Abast del projecte

Els diversos punts a tractar en llarg del projecte són els següents.

- Modelització i característiques del vent.
- Estimació de recursos d'una localització donada.
- Parametrització dels valors nominals de la màquina elèctrica.
- Disseny electromagnètic de la MSIP.
- Estudi tèrmic de la MSIP.
- Validació del disseny mitjançant elements finits i software especialitzat.
- Simulació del model.

2 Recursos eòlics

2.1 Naturalesa i causes del vent

El vent es genera per l'escalfament desigual que sofreix la terra. Aquest escalfament és més intens prop de l'equador i durant el dia. Generalment l'aire calent ascendeix per després circular per la part superior de l'atmosfera i caure sobre les zones més fredes. A nivell de superfície aquesta circulació és just la contrària. L'efecte combinat d'aquestes corrents, de les forces centrífugues i de rotació del planeta i les diferències de pressió atmosfèrica, donen lloc a vents a escala terràquia.

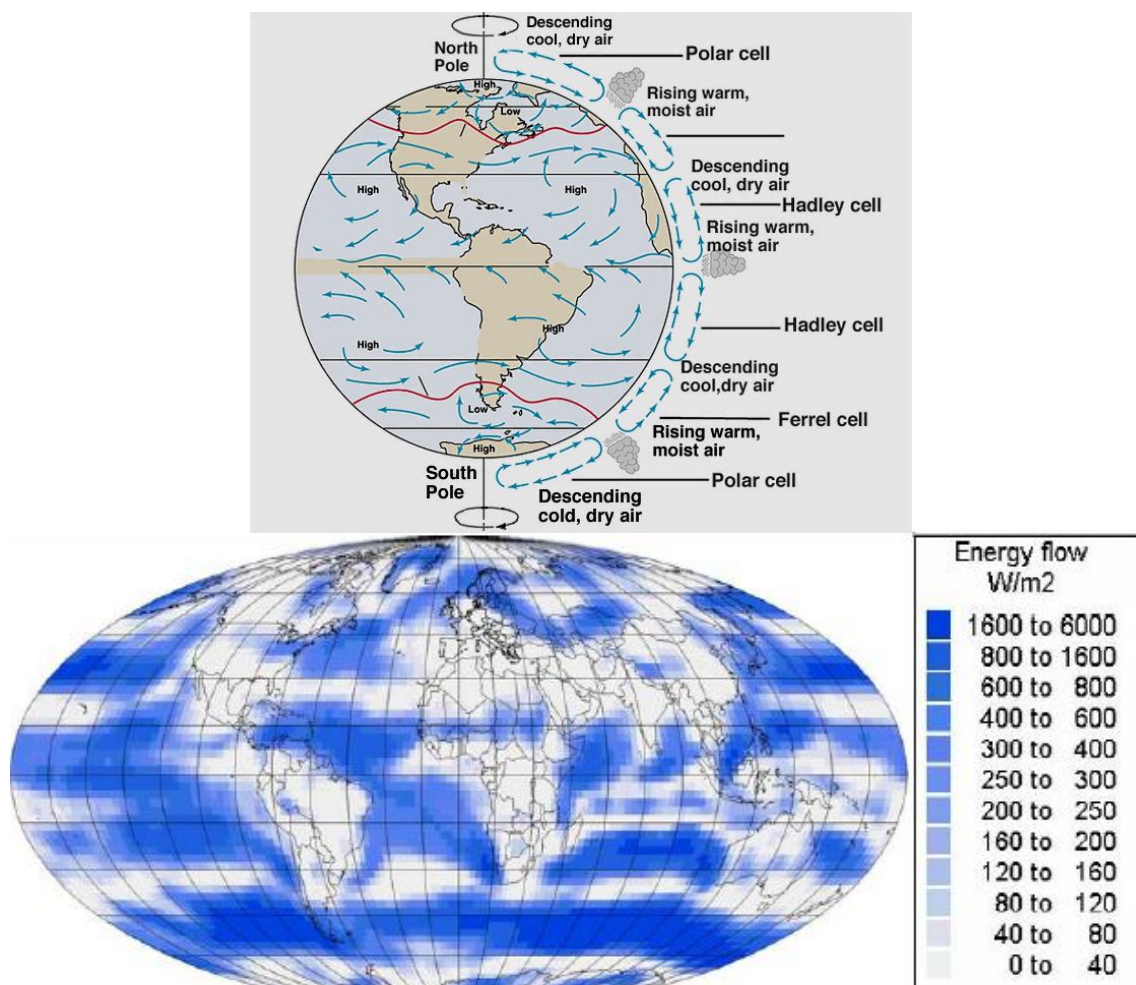


Figura 2.1 Vents a escala global

En una escala menor, el diferent escalfament de la terra pot crear brises a escala local en costes, muntanyes o valls. Situant-nos encara en una escala més reduïda, pot haver-hi molts altres factors que determinin l'aparició de vent com són les presència d'obstacles i configuracions orogràfiques. Aquestes configuracions provoquen efectes acceleradors de les corrents d'aire que seran de molt interès per a l'aprofitament de l'energia eòlica.

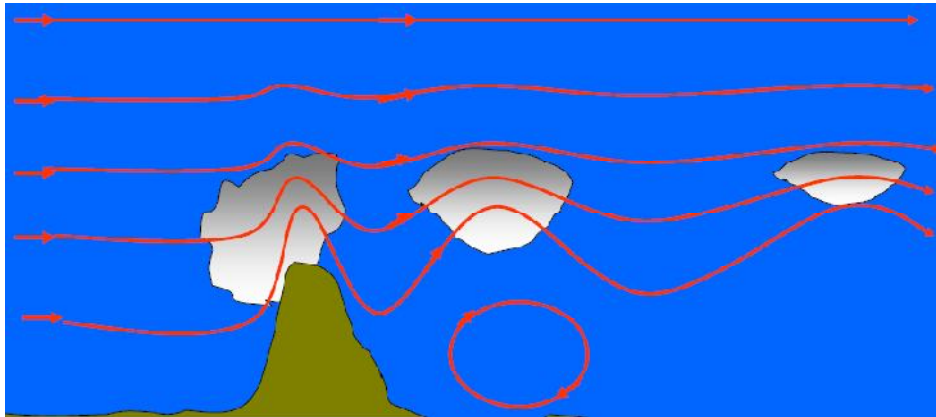


Figura 2.2 Factors orogràfics que afecten als corrents d'aire

2.2 Caracterització

El vent és un magnitud vectorial. Per a definir-lo completament és necessari indicar quin és el seu mòdul i quina és la seva direcció. La direcció del vent té en compte d'on ve l'aire, prenent el valor de l'angle que forma respecte el nord, i s'expressa en graus.

A partir de les diferents direccions que pot prendre l'aire es pot construir la rosa dels vents.

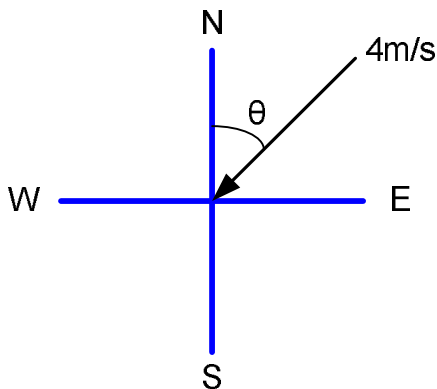


Figura 2.3 Caracterització del vent

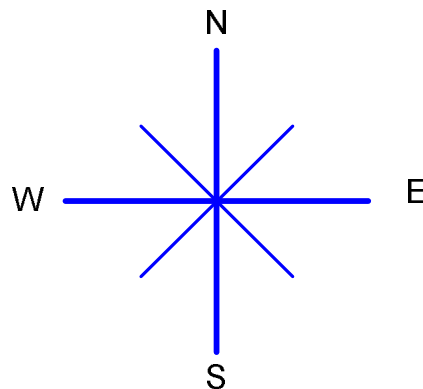


Figura 2.4 Rosa dels vents

Una de les característiques més importants dels vent és la seva variabilitat, tant espacial com temporal, en un ampli rang d'escales. Donat que les fluctuacions del vent són turbulentes, s'aconsella fer un estudi dels valors promig en una escala temporal donada. De manera que es pot definir un valor promig de velocitat com,

$$V_w(t_o) = \frac{1}{T} \int_{t_o - \frac{T}{2}}^{t_o + \frac{T}{2}} v_{ix}(t) dt \quad (2.1)$$

On x es defineix com la direcció promig del vent, v_x és la velocitat instantània i T és el període temporal estudiat.

Per poder predir la variació de la velocitat promig del vent durant un període llarg de temps se sol utilitzar la funció distribució acumulada o corba de duració del vent, que expressa la probabilitat que la velocitat V excedeixi un valor límit, V_o , durant un període considerat. La forma més acceptada de aquesta funció és la distribució de Weibull.

$$F(V_o) = P(V_o < V_w) = \exp\left(-\frac{V_o}{C}\right)^k \quad (2.2)$$

On apareixen els paràmetres factor d'escala C (m/s) i el factor de forma k , que s'han d'ajustar amb les dades del vent mesurat en un emplaçament en concret.

Per a $k=2$, la distribució es coneix com distribució de Rayleigh.

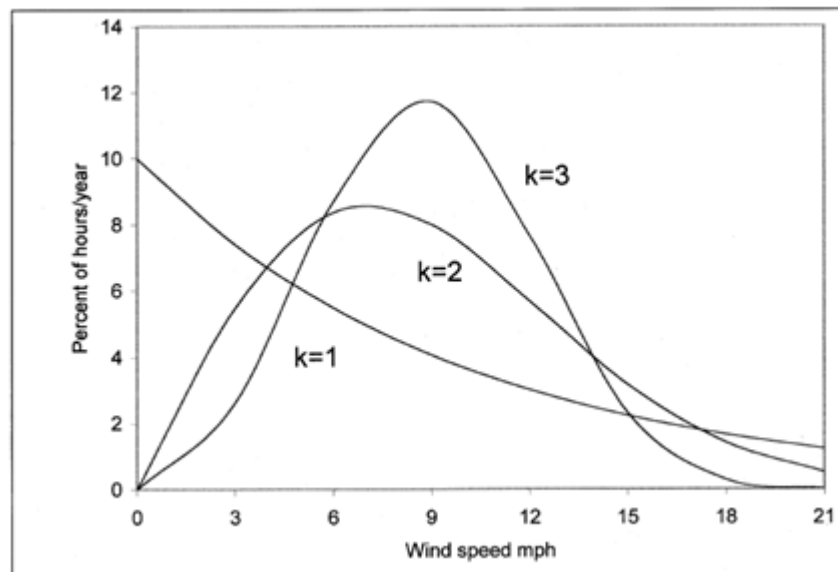


Figura 2.5 Funció de Weibull per diferents k

Per a la funció de Weibull, la funció de densitat de probabilitat ve donada per,

$$f(V_w) = -\frac{dF}{dV_o} \Big|_{V_o=V} = k \frac{V^{k-1}}{C^k} \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right) \quad (2.3)$$

Els valors de C i k es poden obtenir a partir de les mesures preses en l'emplaçament escollit. Un mètode per a fer-ho, consisteix en ajustar per mínims quadrats les dades de les mesures a la recta següent,

$$Y = Y_o + kX \quad (2.4)$$

$$Y = \ln(-\ln(F)) \quad (2.5)$$

$$X = \ln(V_o) \quad (2.6)$$

Amb la pendent de la recta es calcula el valor de K, i de la seva intersecció amb l'eix Y, s'obté Y_o , i a partir d'aquest valor es determina C.

$$Y_o = -k \cdot \ln(C) \quad (2.7)$$

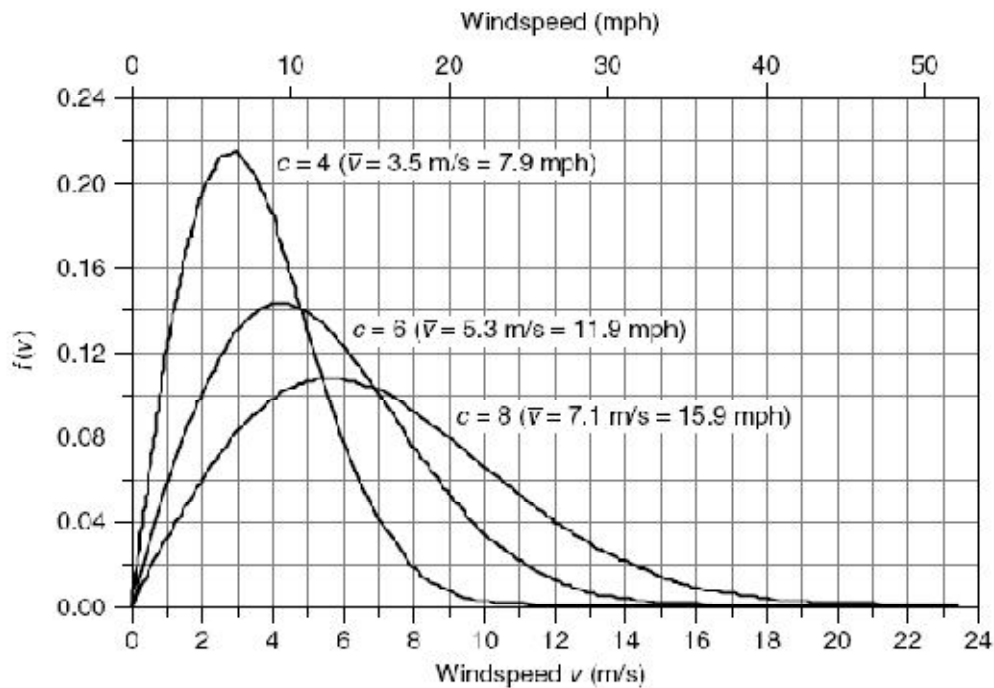


Figure 6.25 The Rayleigh probability density function with varying scale parameter c . Higher scaling parameters correspond to higher average windspeeds.

Figura 2.6 Funció distribució de probabilitat de Weibull per $k=2$

Per poder fer una estimació completa del recurs eòlic, és necessari també saber quina és la direcció del vent de manera simultània. Això s'aconsegueix mitjançant una rosa dels vents, sigui en forma tabular o en forma gràfica.

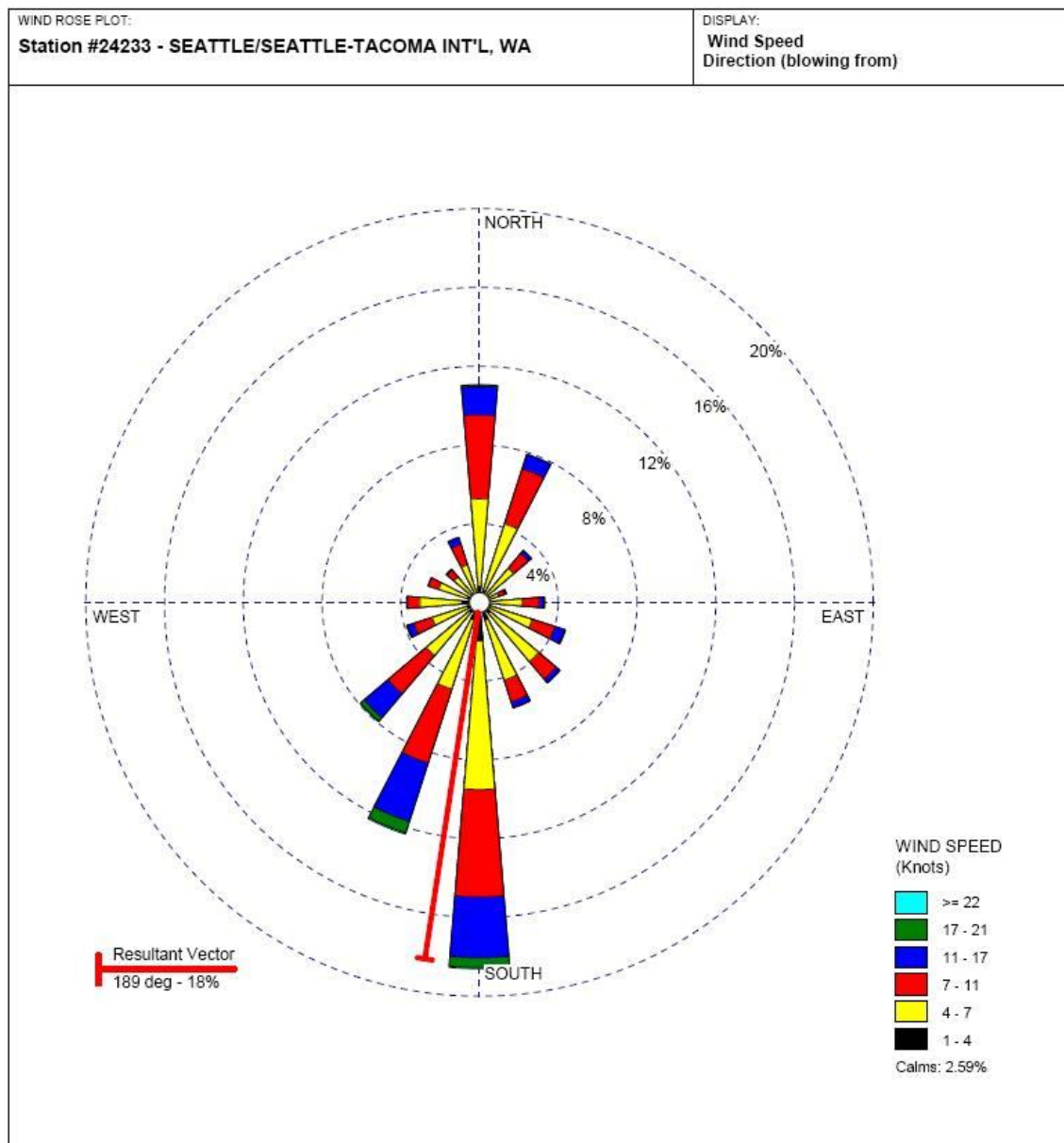


Figura 2.8 Rosa dels vents gràfica

En la forma gràfica, la longitud radial marcada en cada sector indica la freqüència del vent procedent de la direcció corresponent. El nombre en cada sector indica la velocitat promig en aquella direcció. Els nombres en tant per cent, indiquen quin percentatge de temps el vent bufa en una direcció donada.

2.3 Variació del vent amb l'alçada

L'estudi de la variació del vent amb l'alçada té molta importància, ja que a més alçada hi ha més velocitat, de manera que és pot extreure més potència de les turbines, però com més grans i altes estan les pales, aquestes suporten diferents ràfegues de vent que produeixen fatiga mecànica i pertorben la qualitat de les ones elèctriques generades.

La variació de la velocitat amb l'alçada es calcula amb l'expressió,

$$V = V(z_r) \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (2.8)$$

On z_r és l'alçada de referència de valor 10 metres, i z és l'alçada on es trobi el generador. Alfa és un paràmetre que depèn de la hora del dia, l'estació, el tipus de terreny, la velocitat del vent i l'estabilitat atmosfèrica. En general alfa augmenta amb la rugositat i disminueix amb la velocitat i el grau d'estabilitat atmosfèrica. Existeixen valors tabulats per aquest paràmetre.

Tipus de terreny	Rugositat [m]
Gel	10 ⁻⁵ a 3·10 ⁻⁵
Aigua	10 ⁻⁴ a 3·10 ⁻⁴
Herba tallada	10 ⁻³ a 10 ⁻²
Terrenys rocosos	10 ⁻² a 5·10 ⁻²
Pastures	0,1 a 0,3
Suburbis	0,5 a 1
Boscós	0,1 a 1
Ciutats	1 a 5

Taula 2.1 Rugositat del terreny

2.3 Potència aprofitable

Per a determinar quina és la potència que es pot extreure del vent mitjançant turbines eòliques és necessari fer un anàlisi de les relacions entre la velocitat del vent i la potència que pot generar.

Els sistemes eòlics transformen l'energia cinètica del vent en energia mecànica que acciona un generador elèctric.

$$E_c = \frac{1}{2} m V_w^2 \quad (2.9)$$

On la massa en moviment d'aire per unitat de temps pot ser expressada com,

$$m = \rho A V \quad (2.10)$$

D'on s'obté que la potència teòrica d'una massa de vent al seu pas per la turbina [R] és,

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 \quad (2.11)$$

Es pot demostrar que no tota aquesta energia pot ser transformada [r], i que fent un anàlisi de la velocitat promig que veuen les pales de la turbina apareix un terme adimensional que relaciona la potència màxima que podem extreure per les pales de la turbina i la potència total de les masses d'aire.

Aquest coeficient s'anomena factor de potència C_p . Aquest paràmetre té un valor màxim que s'anomena límit de Betz i que té un valor de 16/27, el que representa que només el 59,26% de

l'energia cinètica de l'aire pot ésser aprofitada per a la generació elèctrica. De manera que la màxima potència a obtenir és,

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \frac{16}{27} \rho \frac{\pi}{4} D^2 V_w^3 \quad (2.12)$$

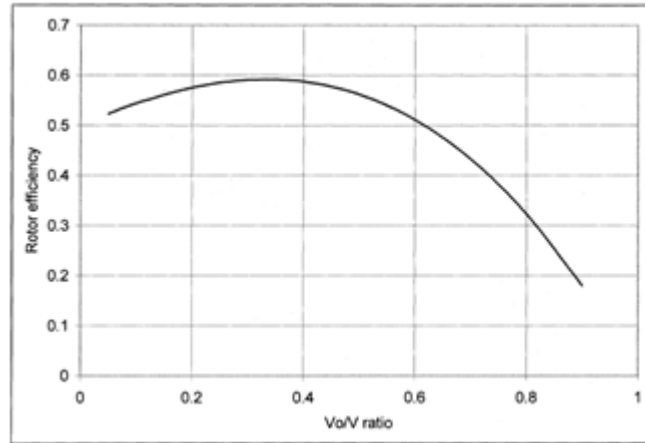


Figura 2.9 Coeficient de potència

2.4 Altres paràmetres d'importància

Existeixen altres paràmetres que afecten directament al comportament de l'aeroturbina, però n'hi ha dos que tenen una importància molt gran per establir les condicions de contorn del disseny de la màquina.

El primer dels paràmetres és l'angle de pas de la pala (β), aquest paràmetre indica quina és la posició angular de les pales respecte el seu eix, fent que aquestes puguin modificar la superfície incident amb el vent, de manera que això permet tenir un grau de llibertat en el control del flux de potència. De la mateixa manera també s'ha de tenir en compte quin és l'angle d'orientació (Ψ) que permet que la màquina no estigui alineada amb el vent.

L'altre paràmetre important és la velocitat específica, que es defineix com el quocient entre la velocitat de la punta de la pala i la velocitat del vent.

$$\lambda = \frac{\Omega \frac{D}{2}}{V_w} \quad (2.13)$$

De manera que coneixent quina velocitat té el vent, per una velocitat específica donada podem saber quina és la velocitat de gir del generador elèctric.

Habitualment si la màquina està alineada amb el vent ($\Psi = 0$) i tenim un tipus de màquina donada, el coeficient de potència pot ser un paràmetre de control ja que només depèn de λ i β .

$$C_p = f(\lambda, \beta) \quad (2.14)$$

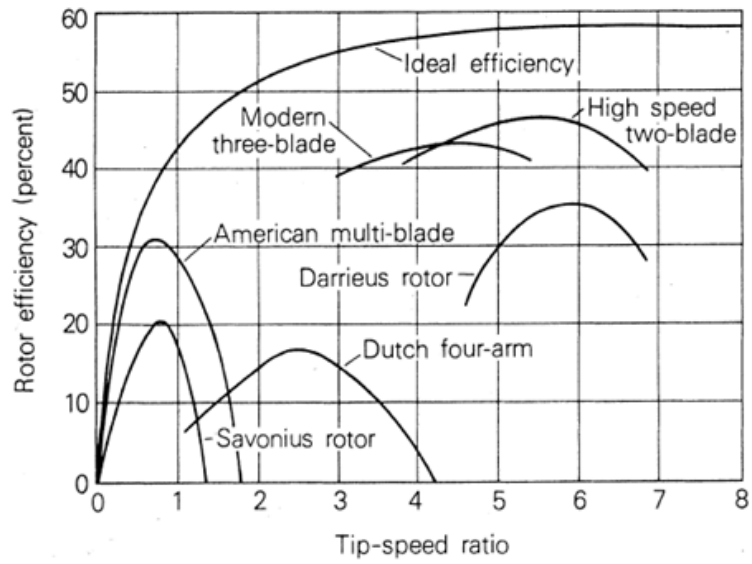


Figura 2.10 Coeficient de potència per diverses tipologies d'aerogeneradors

3 Estudi estadístic d'una localització

Per a procedir al disseny de la màquina elèctrica generadora és necessari fer un estudi de vents de la localització on es vulgui instal·lar la turbina. Per aquest motiu, a continuació es presenten els resultats de l'estudi de vents realitzat per la ciutat de Barcelona a través de les dades de les estacions automàtiques del Servei meteorològic de Catalunya i que estan recollides en la documentació electrònica del projecte, ja que degut a la seva llargària no és viable annexar-les en paper.



Figura 3.1 Estació meteorològica automàtica

Les dades del servei meteorològic de Catalunya venen donades en arxius de text en format columna. La informació que es pot extreure d'aquestes és la següent:

- Dia i hora de la lectura
- Velocitat del vent a 10 metres d'alçada
- Direcció del vent a 10 metres d'alçada

Estació: D5 Barcelona - Observatori Fabra		
Data i hora (T.U.)	VV10 (m/s)	DV10 (graus)
01/01/2006 0:00	1	318
01/01/2006 0:30	1,3	298
01/01/2006 1:00	0,7	323
01/01/2006 1:30	1,6	239
01/01/2006 2:00	0,9	233

Taula 3.1 Exemple de dades del SMC

El procediment per a l'obtenció dels resultats és el desenvolupat en les pàgines anteriors i que queda automatitzat en Matlab d'acord amb l'arxiu corresponen adjuntat amb els annexes.

Es presenten els resultats dels emplaçaments dels quals el SMC ha facilitat les dades de direcció i velocitat del vent de la ciutat de Barcelona.

Els emplaçaments corresponen a les localitzacions de

- 1 EMA del Raval
- 2 EMA de l'Observatori Fabra



Figura 3.2 Localització de la EMA Obs. Fabra



Figura 3.3 Localització de la EMA del Raval

3.1 Descripció vent del Raval

Interval de classe	Dades		Càlculs	
	Centre de la classe	Freqüència de la classe	Freqüència relativa	Freqüència relativa acumulada
0 ≤ v ≤ 1	0,5	401	0,0748	0,0748
1 ≤ v ≤ 2	1,5	1587	0,2962	0,3710
2 ≤ v ≤ 3	2,5	1454,5	0,2714	0,6424
3 ≤ v ≤ 4	3,5	1135	0,2118	0,8543
4 ≤ v ≤ 5	4,5	484	0,0903	0,9446
5 ≤ v ≤ 6	5,5	188	0,0351	0,9797
6 ≤ v ≤ 7	6,5	62	0,0116	0,9912
7 ≤ v ≤ 8	7,5	24,5	0,0046	0,9958
8 ≤ v ≤ 9	8,5	15	0,0028	0,9986
9 ≤ v ≤ 10	9,5	4,5	0,0008	0,9994
10 ≤ v ≤ 11	10,5	2,5	0,0005	0,9999
11 ≤ v ≤ 12	11,5	0,5	0,0001	1,0000
12 ≤ v ≤ 13	12,5	0	0,0000	1,0000
13 ≤ v ≤ 14	13,5	0	0,0000	1,0000
14 ≤ v ≤ 15	14,5	0	0,0000	1,0000
15 ≤ v ≤ 16	15,5	0	0,0000	1,0000
16 ≤ v ≤ 17	16,5	0	0,0000	1,0000
17 ≤ v ≤ 18	17,5	0	0,0000	1,0000
18 ≤ v ≤ 19	18,5	0	0,0000	1,0000

N
5358,5 1,000

Hores totals	Velocitat promig	Mediana	Desviació típica
5358,5 hores	2,1483 m/s	1,6 m/s	1,1254 m/s
Paràmetres calculats de la distribució de Weibull			
k		c	
1,1398		1,5507	

Taula 3.2 Estadístiques del vent a la EMA del Raval

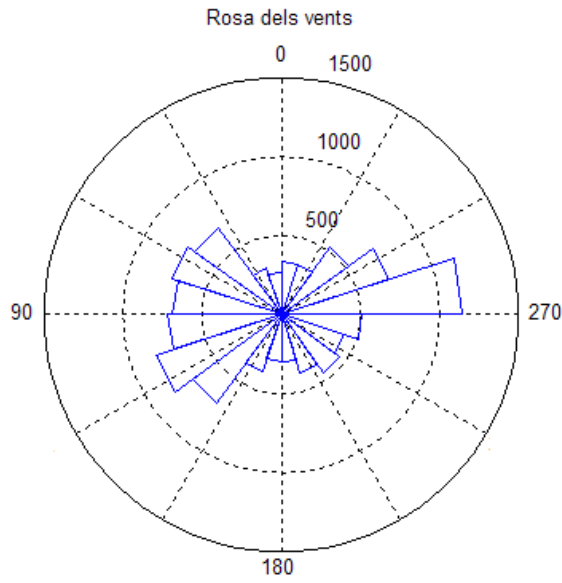


Figura 3.4 Rosa dels vents estació Raval

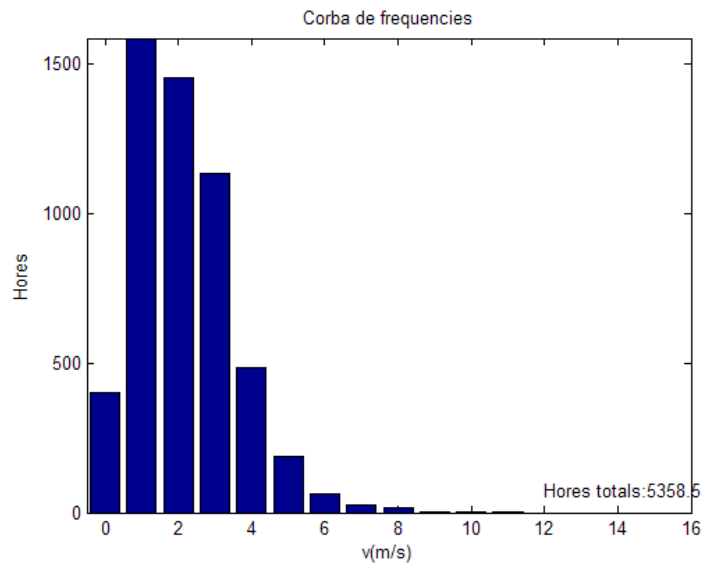


Figura 3.5 Corba de freqüències estació Raval

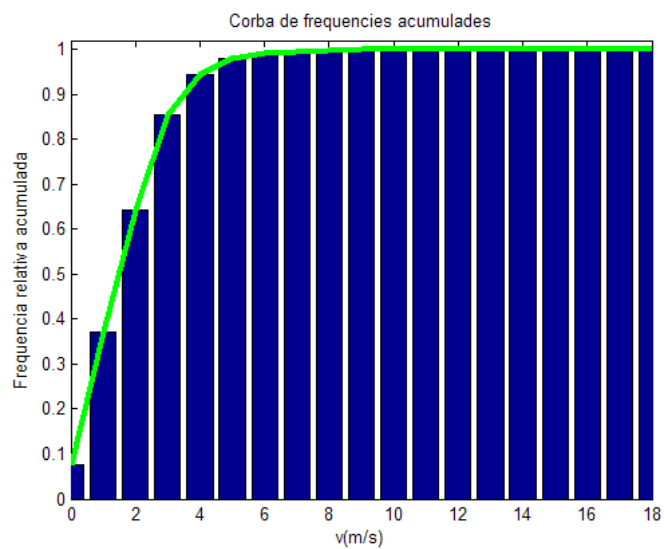


Figura 3.6 Corba de freqüències acumulades estació Raval

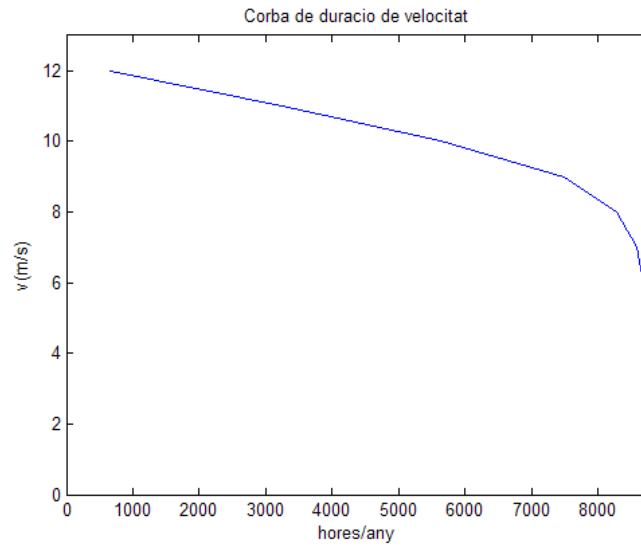


Figura 3.7 Corba de duració de la velocitat estació Raval

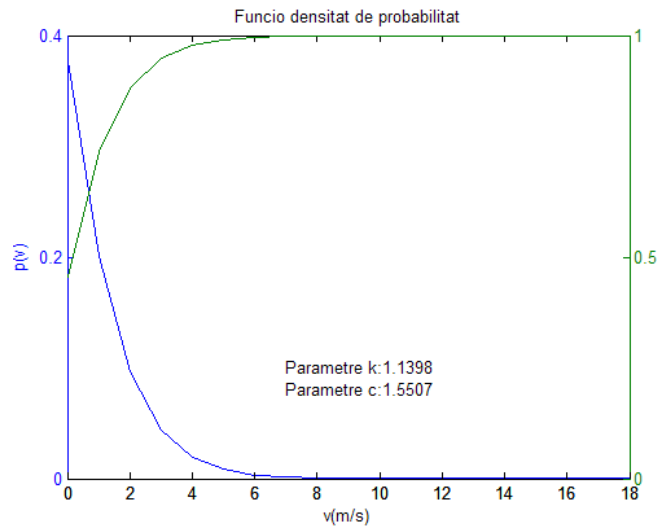


Figura 3.8 Corba funció de probabilitat estació Raval

3.2 Descripció vent observatori Fabra

Interval de classe	Dades		Càlculs		
	Centre de la classe	Freqüència de la classe	Freqüència relativa	Freqüència relativa acumulada	
0 ≤ v ≤ 1	0,5	449	0,0257	0,0257	
1 ≤ v ≤ 2	1,5	1252,5	0,0716	0,0972	
2 ≤ v ≤ 3	2,5	1947,5	0,1113	0,2085	
3 ≤ v ≤ 4	3,5	2613	0,1493	0,3578	
4 ≤ v ≤ 5	4,5	2199,5	0,1257	0,4835	
5 ≤ v ≤ 6	5,5	2042	0,1167	0,6002	
6 ≤ v ≤ 7	6,5	2052,5	0,1173	0,7175	
7 ≤ v ≤ 8	7,5	1385,5	0,0792	0,7967	
8 ≤ v ≤ 9	8,5	1078	0,0616	0,8583	
9 ≤ v ≤ 10	9,5	884,5	0,0505	0,9088	
10 ≤ v ≤ 11	10,5	545	0,0311	0,9399	
11 ≤ v ≤ 12	11,5	362,5	0,0207	0,9607	
12 ≤ v ≤ 13	12,5	280	0,0160	0,9767	
13 ≤ v ≤ 14	13,5	158,5	0,0091	0,9857	
14 ≤ v ≤ 15	14,5	111	0,0063	0,9921	
15 ≤ v ≤ 16	15,5	69,5	0,0040	0,9960	
16 ≤ v ≤ 17	16,5	39	0,0022	0,9983	
17 ≤ v ≤ 18	17,5	20	0,0011	0,9994	
18 ≤ v ≤ 19	18,5	10,5	0,0006	1,0000	

N
17500 0,999

Hores totals	Velocitat promig	Mediana	Desviació típica
17500 hores	5,091 m/s	3,9 m/s	2,5725 m/s
Paràmetres calculats de la distribució de Weibull			
k		c	
1,1941		4,1711	

Taula 3.3 Estadístiques del vent a la EMA de l'Observatori Fabra

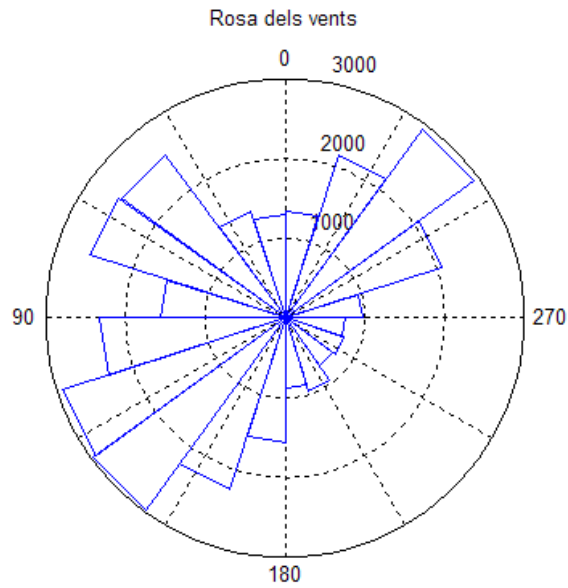


Figura 3.9 Rosa dels vents estació Fabra

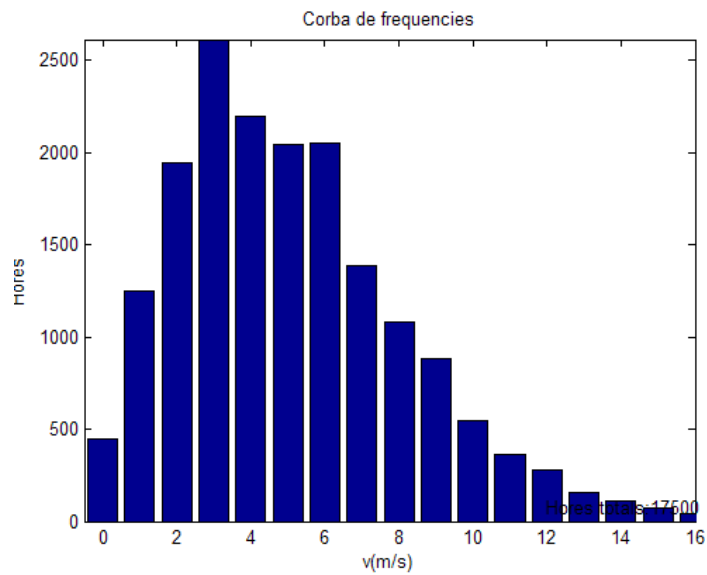


Figura 3.10 Corba de freqüències estació Fabra

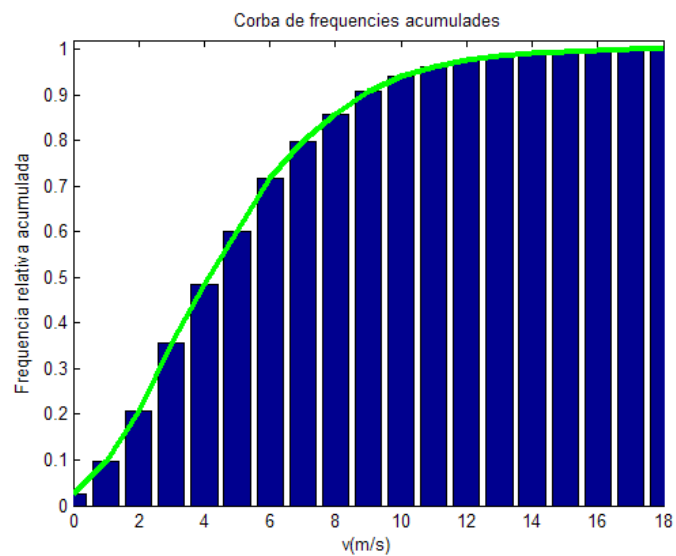


Figura 3.11 Corba de freqüències acumulades estació Fabra

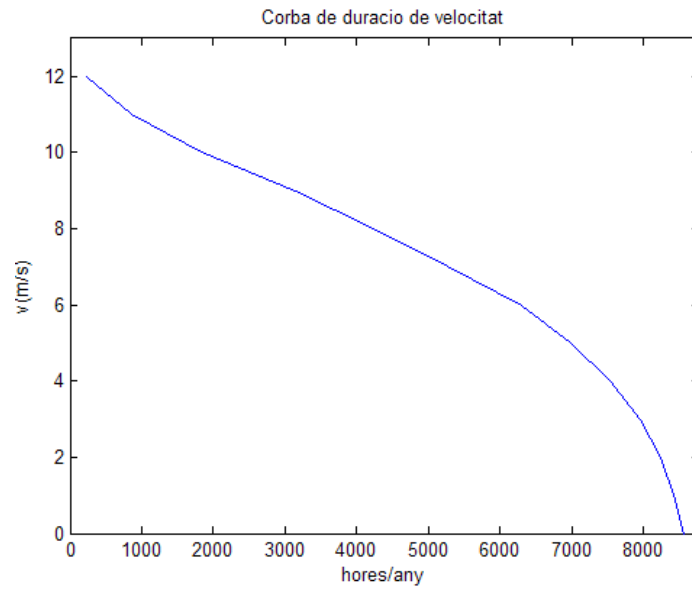


Figura 3.12 Corba de duració de la velocitat estació Fabra

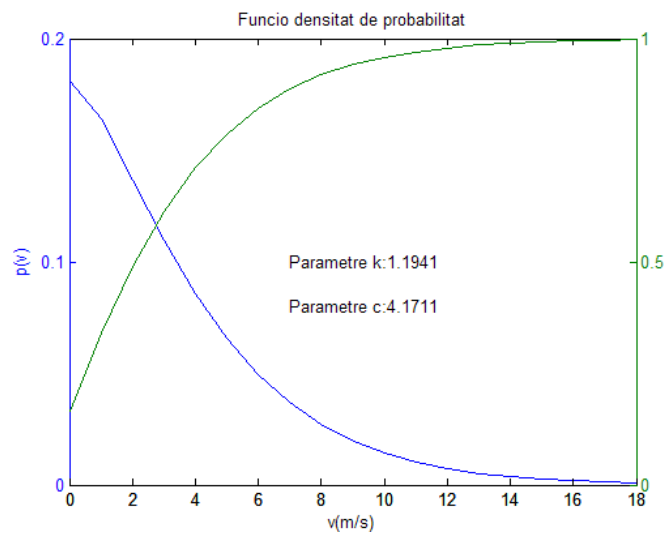


Figura 3.13 Corba funció de probabilitat estació Fabra

3.3 Densitat de potència i energia aprofitable teòricament

Considerant l'estudi estadístic realitzat i la metodologia de càlcul presentada, es pot fer una estimació de quina és la potència eòlica disponible anualment així com la quantitat d'energia aportada. Per a l'obtenció dels resultats s'ha considerat que el coeficient de potència del generador serà de 0,5.

3.3.1 Raval

Interval de classe			Dades		Càlculs	
			Freqüència de classe [h]	Potència disponible [W/m ²]	Potència relativa disponible [W/m ²]	Energia relativa disponible [J/m ²]
0	≤ v ≤	1	401	0	0,0000	0,00
1	≤ v ≤	2	1587	0,3	0,0888	867,17
2	≤ v ≤	3	1454,5	2,5	0,6786	6623,08
3	≤ v ≤	4	1135	8,3	1,7580	17158,55
4	≤ v ≤	5	484	19,7	1,7794	17366,73
5	≤ v ≤	6	188	38,4	1,3472	13149,09
6	≤ v ≤	7	62	66,4	0,7683	7498,36
7	≤ v ≤	8	24,5	105,5	0,4824	4707,88
8	≤ v ≤	9	15	157,4	0,4406	4300,34
9	≤ v ≤	10	4,5	224,2	0,1883	1837,62
10	≤ v ≤	11	2,5	307,5	0,1435	1400,21
11	≤ v ≤	12	0,5	409,3	0,0382	372,75
12	≤ v ≤	13	0	531,4	0,0000	0,00
13	≤ v ≤	14	0	675,6	0,0000	0,00
14	≤ v ≤	15	0	843,8	0,0000	0,00
15	≤ v ≤	16	0	1037,8	0,0000	0,00
16	≤ v ≤	17	0	1259,5	0,0000	0,00
17	≤ v ≤	18	0	1510,7	0,0000	0,00
18	≤ v ≤	19	0	1793,3	0,0000	0,00

N

5358,5 h

Densitat promig de potència eòlica disponible anualment:

7,7049 W/ m²

Taula 3.4 Estimació de potència disponible Raval

3.3.2 Observatori Fabra

Interval de classe		Dades		Càlculs	
		Freqüència de classe [h]	Potència disponible [W/m ²]	Potència relativa disponible [W/m ²]	Energia relativa disponible [J/m ²]
0	≤ v ≤ 1	449	0	0,0000	0,00
1	≤ v ≤ 2	1252,5	0,3	0,0215	209,56
2	≤ v ≤ 3	1947,5	2,5	0,2782	2715,37
3	≤ v ≤ 4	2613	8,3	1,2393	12095,65
4	≤ v ≤ 5	2199,5	19,7	2,4760	24165,84
5	≤ v ≤ 6	2042	38,4	4,4807	43731,94
6	≤ v ≤ 7	2052,5	66,4	7,7878	76008,65
7	≤ v ≤ 8	1385,5	105,5	8,3526	81521,24
8	≤ v ≤ 9	1078	157,4	9,6958	94631,40
9	≤ v ≤ 10	884,5	224,2	11,3317	110597,48
10	≤ v ≤ 11	545	307,5	9,5764	93465,94
11	≤ v ≤ 12	362,5	409,3	8,4784	82748,77
12	≤ v ≤ 13	280	531,4	8,5024	82983,42
13	≤ v ≤ 14	158,5	675,6	6,1190	59721,50
14	≤ v ≤ 15	111	843,8	5,3521	52236,52
15	≤ v ≤ 16	69,5	1037,8	4,1215	40226,31
16	≤ v ≤ 17	39	1259,5	2,8069	27395,20
17	≤ v ≤ 18	20	1510,7	1,7265	16850,78
18	≤ v ≤ 19	10,5	1793,3	1,0760	10501,56

N

17500 h

Densitat promig de potència eòlica disponible anualment: 93,4210 W/ m²

Taula 3.5 Estimació de potència disponible Observatori Fabra

4 Dimensionament del generador

4.1 Anàlisi dels generadors de petita potència en el mercat

Per a poder procedir al dimensionat de la màquina elèctrica s'ha analitzat el mercat actual de aerogeneradors de petita potència per a tenir unes condicions de contorn en les que comparar els paràmetres de disseny del generador objecte del projecte.

L'anàlisi consisteix en la recopilació de dades nominals de les màquines avui en mercat per veure si els paràmetres de funcionament i dimensions convergeixen amb les que es disposen per al disseny del generador.

Model	Fabricant	Pales / Eix horitz-vert	Potència nominal [W]	Velocitat arrancada [m/s]	Velocitat nominal [m/s]	Diàmetre pala [m]	Alçada torre [m]
Ari 2500	ARI Renewable Energy	3 – E.H.	2500	5	12	-	-
Whisper500	Windenergy	2 – E.H.	3000	3,4	10,5	4,5	7
Skytream	Windenergy	3 – E.H.	1900	3,5	9,4	3,72	10-18
Tulipo	Tulipo	3 – E.H.	2500	3	10	5	12,5
Proven 2.5	Proven Energy	3 – E.H.	2500	-	-	-	-
Twfi280	The wind factory	3 – E.H.	1800	1,5	12	-	-
Turby	Turby	3 – E.V.	2500	4	14	2	-
Nasmi	Nasmi	3 – E.H.	2500	2	8	5	-
Hush	O'Connor Wind Factory	3 – E.H.	3000	-	-	-	-
Lf2kW	Flexienergy	3 – E.H.	2000	3	9	3,7	9
Lf3kW	Flexienergy	3 – E.H.	3000	2	10	5	9
S322	Helix Wind	3 – E.H.	2500	5	8	2,64	-
TGT2	Taos Wind En.	3 – E.H.	2000	3	12	2,8	-
FSW Giro	Four Seasons Wind Power	5 – E.V.	3000	-	22,2	4,5	-
E400	Krestel	3 – E.H.	3000	3	12,5	4	

Taula 4.1 Generadors eòlics comercials de petita potència

La diferència existent entre els diferents generadors analitzats, no només recau en els paràmetres de funcionament nominals si no que la diferència màxima entre models es centra en la màquina elèctrica que s'utilitza com a generador.

D'entrada la característica principal de tots els models és que degut a la connexió directa entre pales i generador no hi ha un mecanisme que reguli quina és la velocitat de rotació del sistema, ja que aquesta vindrà donada per les condicions del règim de vents, això implica que el funcionament de la màquina haurà de permetre la generació a velocitat variable. A més, s'ha de tenir en compte que les velocitats de gir no seran elevades, fet que comporta que necessàriament la màquina haurà de disposar d'un elevat nombre de pols per tal de reduir la velocitat de sincronisme.

Tenint en compte els punts anteriors, la topologia més habitual és la de màquina síncrona d'ímans permanents.

Altres tipologies de màquina com la asíncrona o la síncrona d'excitació elèctrica no són adequades per a la generació eòlica. En el cas de la màquina asíncrona el fet que la generació sigui a velocitat variable, fa que el sistema de control que hauria d'implementar-se fos complicat i no garantiria el funcionament òptim del generador, a més l'excitació hauria de ser aportada per la xarxa elèctrica cosa que implica que no sigui possible l'assoliment de rendiments superiors al 84% segons alguns autors. Un cas similar passa amb les màquines síncrones d'excitació elèctrica, per la aplicació en la que ens hem fixat, el fet que el corrent d'excitació sigui controlable no té la importància com en altres aplicacions com per exemple la hidràulica, ja que gairebé a la totalitat de les aplicacions mini eòliques sempre hi existeix una connexió mitjançant convertidors estàtics entre la generació i el consum. Una altra possibilitat en aplicacions mini eòliques són les màquines de reluctància, que tot i tenir un cost aproximat a les síncrones d'ímans permanents no obtenen les relacions tensió - corrent tant adequades com aquestes.

De màquines síncrones d'ímans permanents n'hi ha de diferents tipus, la classificació habitual d'aquest tipus de màquines és la següent.

- Màquines de flux radial o axial

La diferència ve donada per la direcció del vector normal a l'entreferro de la màquina

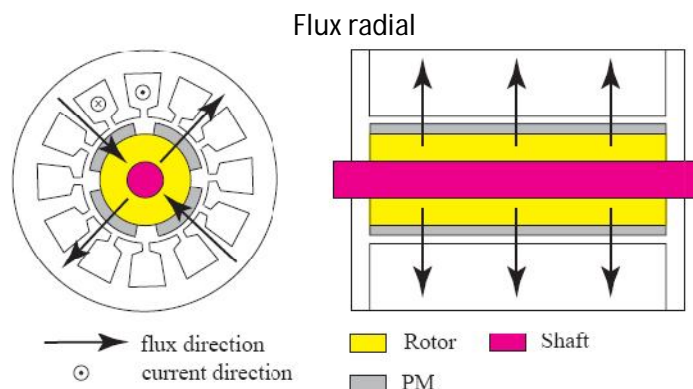


Figura 4.1 Màquina de flux radial

Font: Ref [13]

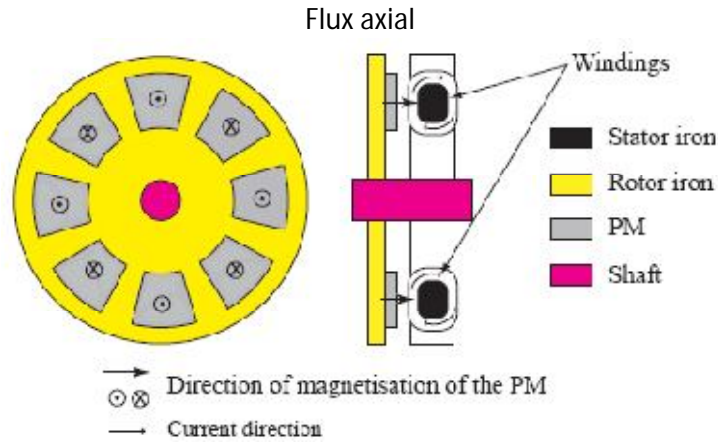


Figura 4.1(b) Màquina de flux axial

Font: Ref [9]

- Màquines amb imans interiors, exteriors o 'enterrats'
Segons la posició de l'iman

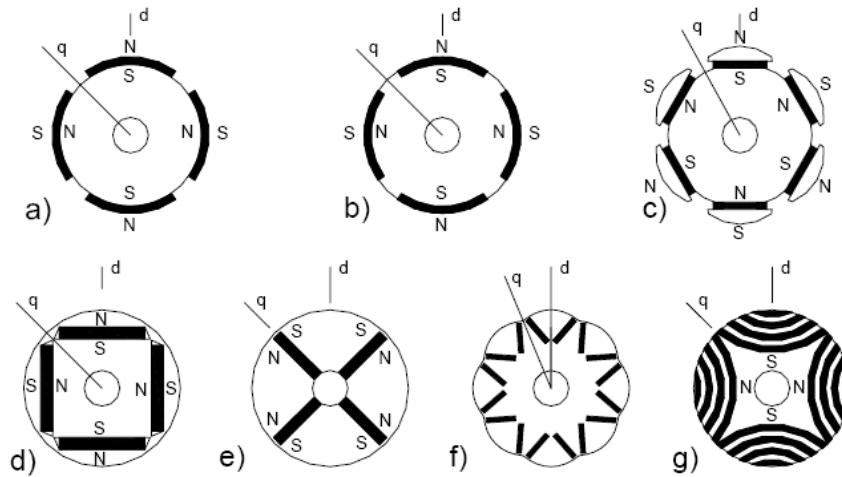


Fig. 1.1 Different rotor constructions of radial flux machines (Morimoto 1994). a) Surface mounted magnets, b) inset rotor with surface magnets, c) surface magnets with pole shoes producing a cosine flux density, (Hendershot 1994) d) buried tangential magnets (Tseng 1999), e) buried radial magnets (Hippner 1992), f) buried inclined magnets with cosine shaped pole shoe (Luukko 2000, Salo 2000, Heikkilä 2001) and g) Permanent magnet assisted synchronous reluctance motor with axially laminated construction (Honda 1998).

Figura 4.2. Màquines d'IP de diferents configuracions

Font: Ref [13]

Per la seva simplicitat constructiva i per tenir una maduresa analítica més assolida, la màquina que es dissenyarà serà del tipus síncron d'estator exterior amb excitació per imans permanents muntats sobre la superfície del rotor.

4.2 Condicions de funcionament nominals i paràmetres de disseny

A partir dels procediments descrits en el capítol anterior s'han analitzat les diferents possibilitats de funcionament del generador eòlic en quant a potència elèctrica aprofitable i velocitat de gir de la màquina.

En primer lloc s'ha analitzat quina és la potència elèctrica disponible per diferents velocitats de vent i diàmetres de pala.

	<v> m/s	7,7	7,8	7,9	8	8,1
	<d_p> w/m ²	140,38	145,92	151,61	157,44	163,42
	h [m]					
D [m]	S [m²]	P_e[W]				
4	12,57	1764,1	1833,7	1905,2	1978,4	2053,6
4,1	13,20	1853,4	1926,6	2001,6	2078,6	2157,5
4,2	13,85	1944,9	2021,7	2100,5	2181,2	2264,1
4,3	14,52	2038,7	2119,1	2201,7	2286,3	2373,2
4,4	15,21	2134,6	2218,8	2305,3	2393,9	2484,8
4,5	15,90	2232,7	2320,8	2411,2	2504,0	2599,1
4,6	16,62	2333,0	2425,1	2519,6	2616,5	2715,8

Taula 4.2 Potència elèctrica disponible per diferents diàmetres de pala

Considerant una velocitat específica de pala $\lambda = 8$ [1], típic de turbines tripala, es poden obtenir quins són els règims de gir del rotor en funció de la velocitat del vent i de diferents diàmetres de pala.

D [m]	Velocitat gir	[rpm]			
4	294,1	297,9	301,8	305,6	309,4
4,1	286,9	290,7	294,4	298,1	301,9
4,2	280,1	283,8	287,4	291,0	294,7
4,3	273,6	277,2	280,7	284,3	287,8
4,4	267,4	270,9	274,3	277,8	281,3
4,5	261,4	264,8	268,2	271,6	275,0
4,6	255,8	259,1	262,4	265,7	269,0
4,7	250,3	253,6	256,8	260,1	263,3

Taula 4.3 Velocitats de gir rotòriques per diferents diàmetres de pala

És necessari poder comparar aquests valors de velocitat amb els nominals de funcionament d'una màquina síncrona per a poder escollir els valors que s'ajustin a les necessitats. La velocitat nominal d'una màquina síncrona ve determinada per la relació que existeix entre els números de pols de la màquina i la freqüència de la ona elèctrica generada.

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (4.1)$$

On f és la freqüència en Hertz, i p són els parells de pols de la màquina.

En una màquina síncrona, les diferents combinacions de pols i freqüència determinen els diferents règims de gir que són possibles adquirir.

Velocitat de gir $n=f(p,f)$ [rpm]					
p / f	40	42,5	45	47,5	50
10	240,00	255,00	270,00	285,00	300,00
11	218,18	231,82	245,45	259,09	272,73
12	200,00	212,50	225,00	237,50	250,00
13	184,62	196,15	207,69	219,23	230,77
14	171,43	182,14	192,86	203,57	214,29
15	160,00	170,00	180,00	190,00	200,00
16	150,00	159,38	168,75	178,13	187,50

Taula 4.4 Velocitat de gir mecànica en funció de la freqüència i el número de parells de pols

De l'anàlisi de les taules anteriors i de l'estudi estadístic del vent, es poden definir els paràmetres nominals del generador eòlic i de la màquina elèctrica que es dissenyarà. La configuració escollida com a paràmetre de disseny és la següent.

Tipus d'aerogenerador	Tripala d'eix horitzontal
Potència elèctrica nominal	2500 W
Diàmetre pala	4,5 m
Velocitat inicial de generació	3 m/s
Velocitat nominal de generació	8 m/s
Velocitat de desconnexió	11 m/s
Màquina elèctrica	Màquina síncrona trifàsica
Excitació	Imants permanents
Velocitat de gir	272,72 rpm
Freqüència	50 Hz
Tensió nominal de generació	400 V
Intensitat nominal	4 A

Taula 4.5 Especificacions nominals de disseny

Un cop definides aquestes característiques principals de la màquina, ja és possible dur a terme el disseny electromagnètic de la mateixa.

4.3 Dimensionat de la màquina elèctrica

4.3.1 Restriccions de disseny

Com a part del disseny electromagnètic de la màquina és necessari donar valors de longitud i secció a les diferents parts que conformaran tant l'estator com el rotor de la màquina. Perquè no hi hagin problemes estructurals mecànics, magnètics i tèrmics, és necessari complir amb les restriccions mostrades a continuació [9].

Objectiu de la restricció			
Valors de validesa del disseny de la MSIP	Número de pols	$2p$	$p \geq 20$ nombre parell
	Número de ranures per pol i fase	q	$q \leq 1$
	Diàmetre del rotor	D_r	$D_r < D_a$
	Entreferro	δ	$\delta[m] \geq 0,0002 + 0,003\sqrt{D_i L / 2}$
	Longitud d'iman	l_m	$2mm \leq l_m \leq 8mm$
	Angle de mig pol en graus elèctrics	α	$0,7\pi / 2 \geq \alpha$
	Diàmetre exterior estator	D_a	$D_o \leq 500mm$
	Ample de dent	b_{ts}	$b_{ts} > 2,5mm$
	Alçada de ranura	h_{ss}	$h_{ss} \geq 0$
	Obertura de ranura	k_{open}	$0,2 \leq k_{open}$
	Alçada entrada de ranura	h_{sw}	$h_{sw} \geq 1mm$
	Longitud de la màquina	L	$100mm \leq L \leq 500mm$
Garantia de rigidesa mecànica	Alçada corona estatòrica	h_{sy}	$h_{sy} \geq h_{ss} / 2$
	Ample de ranura	b_{ss2}	$0,15h_{ss} \leq b_{ss2} \leq 0,5h_{ss}$
	Ample de dent	b_{ts}	$b_{ts} \geq 0,3\tau_s$
	Base de ranura	b_{ss1}	$b_{ss1}k_{open} \geq 2mm$
Evitar la saturació	Obertura de ranura	b_{so}	$b_{so} \geq 2mm$
	Inducció màxima a l'entreferro	\hat{B}_g	$\hat{B}_g \leq 1,1T$
	Inducció màxima a les dents	B_{ts}	$B_{ts} \leq 1,6T$
	Ind. màx. a la corona estatòrica	B_{sy}	$B_{sy} \leq 1,4T$
Prevençió d'elevades temperatures i pèrdua d'eficiència	Ind. màx. a la corona rotòrica	B_{ry}	$B_{ry} \leq 1,4T$
	Temperatura bobinat	T_{cu}	$T_{cu} = 80^\circ C$
Límit de pes	Pèrdues del coure	P_{cu}	$P_{cu} \leq 700W$
	Massa d'iman	m_{mag}	$m_{mag} \leq 5,5kg$
Límit de pes	Massa de la màquina	m_{tot}	$m_{tot} \leq 150kg$

Taula 4.6 Restriccions del disseny

4.3.2 Bobinat i número de ranures

Com a conseqüència del moviment dels imans permanents dintre dels conductors de l'estator es crearà una força electromotriu en els debanats de l'estator que serà la que proporcionarà la tensió i el corrent que evacui el generador eòlic. Per donar resposta a aquesta evacuació, és necessari seleccionar quin és el millor bobinat possible.

Degut a que es té una màquina amb un elevat nombre de pols ($2p=24$), es tindrà una màquina amb un nombre de ranures per pol i fase que serà menor que la unitat, i que per tant es tractarà d'un bobinat concentrat.

$$q = \frac{Z_s}{2pm} \tag{4.2}$$

On Z_s són les ranures de l'estator, p és el nombre de parells de pols, i m són les fases de la màquina.

Per tal d'aprofitar millor la distribució dels conductors dintre les ranures de l'estator i obtenir unes formes d'ona el més sinusoidals possibles, s'adoptarà la forma constructiva de bobinat de doble capa.

Per escollir el número de ranures de la màquina, s'han analitzat quines són les diferents configuracions possibles, i el factor de bobinat que en resulta.

Q_s/p	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
6	0.866		0.866	0.5		0.5	0.866		0.866	0.5		0.5	0.866		0.866	0.5		0.5	0.866
9	0.617	0.866	0.945	0.945	0.866	0.617	0.328		0.328	0.617	0.866	0.945	0.945	0.866	0.617	0.328		0.328	0.617
12	q=1		0.866	0.933		0.933	0.866							0.866	0.933			0.933	0.866
15			0.621	0.866		0.951	0.951		0.866	0.621								0.621	0.866
18		q=1		0.647	0.866	0.902	0.945		0.945	0.902	0.866	0.647							
21						0.866	0.89		0.953	0.953		0.89	0.866						
24			q=1			0.76	0.866		0.933	0.95		0.95	0.933		0.866	0.76			
27								0.866	0.877	0.915	0.945	0.954	0.954	0.945	0.915	0.877	0.866		
30				q=1					0.866	0.874		0.936	0.951		0.951	0.936		0.874	0.866
33										0.866		0.903	0.928		0.954	0.954		0.928	0.903
36					q=1						0.866	0.867	0.902	0.933	0.945	0.953		0.953	0.945
39												0.866	0.863		0.918	0.936		0.936	0.863
42						q=1							0.866		0.89	0.913		0.913	0.866
45														0.866	0.859	0.886		0.886	0.859
48							q=1								0.866	0.857		0.857	0.866
51																0.866		0.88	0.901
54								q=1									0.866	0.854	0.877
57																		0.866	0.852
60									q=1										0.866

q=1/2, 1/4	q=3/8, 3/10	$Q_s=21+6k, p=Q_s \pm 1, k = 0, 1, 2 \dots$
q=3/7, 3/11	q=5/14, 5/16	$Q_s=24+6k, p=Q_s \pm 2, k = 0, 1, 2 \dots$
q=2/5, 2/7	no apropiat	$kw1 < 0.866$

Taula 4.7 Factors de bobinat per a diferents combinacions de pols i ranures

Els paràmetres escollits per al bobinat i les ranures són els següents.

Tipus bobinat	Concentrat de doble capa	
Nombre de ranures	Z_s	21
Nombre de pols	$2p$	22
Ranures per pol i fase	q	0,3181
Factor de bobinat	ξ_b	0,953
Material	Coure	

Taula 4.8 Paràmetres del bobinat

La distribució del bobinat quedarà doncs tal com es mostra a la figura.

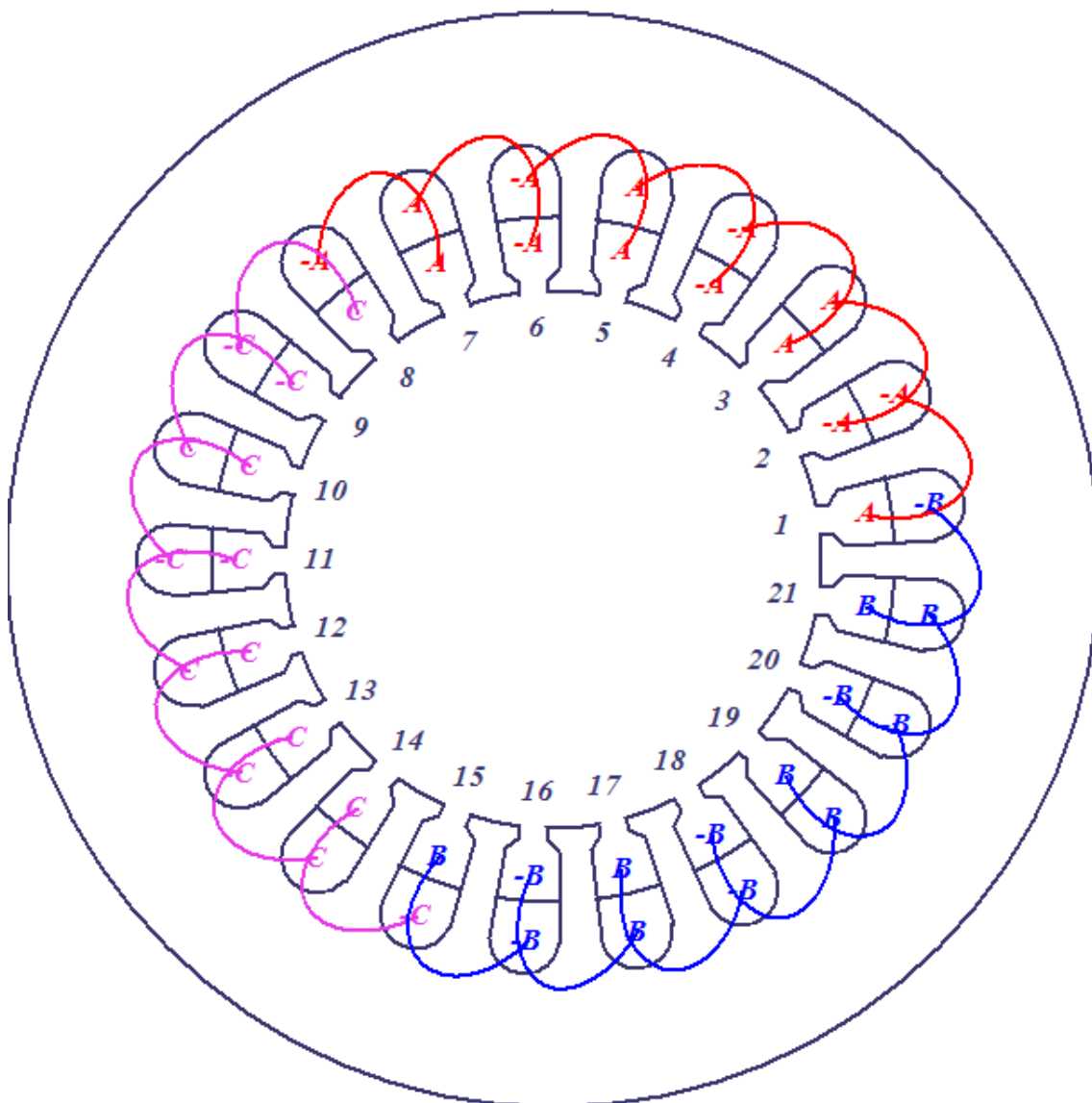


Figura 4.4 Connexió del bobinat en les ranures del generador

4.3.3 Material constructiu estator i rotor

L'estator i el rotor es construiran mitjançant l'apilament de xapa magnètica fins a que s'aconsegueixi la longitud de màquina desitjada.

Per a dur a terme aquesta construcció s'ha escollit la xapa magnètica que té les següents propietats i característiques.

Material	M235-35A
Fabricant	Cogent Power
Gruix de làmina d_{lam}	0,35 mm
Densitat ρ	7750 kg/m ³
Conductivitat σ	4 MS/m
Pèrdues a 50 Hz i 1 T	1,1 W/kg

Taula 4.9 Material constructiu

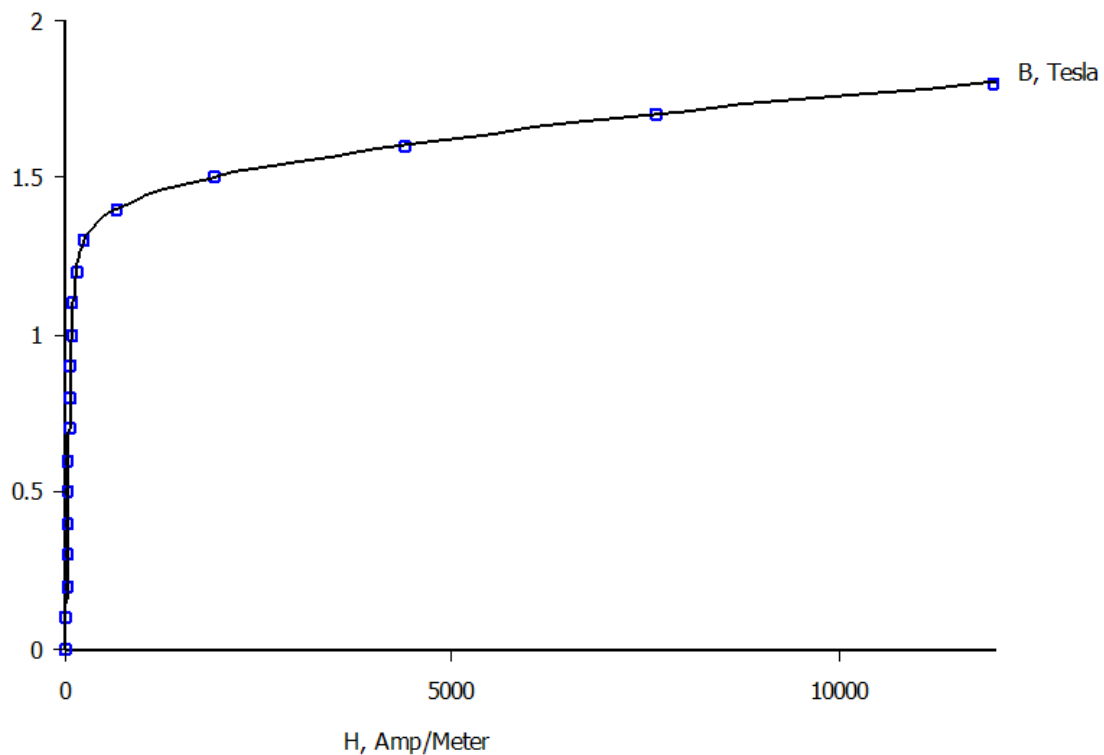


Figura 4.5 Característica B-H

A l'annex estan incloses les taules amb els valors característics de la corba B-H, així com la taula tabulada de pèrdues en funció de la inducció i la freqüència.

4.3.4 Imans permanents

L'excitació de la màquina s'ha escollit que fos mitjançant imans permanents. Els imans permanents són materials que presenten un camp magnètic remanent sense necessitat d'energia externa un cop feta la seva magnetització inicial.

Ens els annexes es pot trobar una breu introducció al comportament i modelització d'aquests materials.

Els imans permanents escollits són els que presenten les següents característiques.

Material		NdFeB 32
Magnetisme remanent	B_r	1,16 T
Força coercitiva	H_c	883310 A/m
Permeabilitat relativa	μ_r	1,045
Densitat	ρ_{pm}	7800 kg/m ³
Temperatura de Curie	T_c	310°C
Factor recobriment polar	ψ	0,66

Taula 4.10 Propietats del iman permanent

Els imans permanents aniran muntats en la superfície del rotor tal i com mostra la figura.



Figura 4.6 Aspecte constructiu dels imans en superfície rotòrica

Amb aquesta configuració el camp magnètic que crearan a la superfície del iman i que servirà com a excitació de la màquina, donada una alçada del iman es pot avaluar mitjançant la següent equació.

$$B_m = \frac{B_r}{1 + \frac{\delta \mu_r}{h_m}} \quad (4.3)$$

Tenint en compte que per l'aplicació en la que ens trobem ens interessa un cap magnètic al voltant d'1 T, i que s'ha de vigilar no desmagnetitzar el iman quan la màquina estigui a plena càrrega, s'ha establert una alçada d'iman de 3mm.

La condició de desmagnetització verifica la següent desigualtat.

$$\Delta B = \mu_o \frac{\hat{F}_1}{\delta'} < \frac{B_r}{3} = \Delta B_{\max} \quad (4.4)$$

On F_1 és la força magnetomotriu de la màquina en càrrega, i δ és una funció de l'entreferro i l'alçada de l'iman.

Els detalls de càlcul es poden consultar en els annexes a la memòria.

Alçada d'iman	l_m	3 mm
Camp magnètic creat	B_m	0,8808 T
Variació màxima de C.M.	ΔB_{\max}	0,387 T
Variació C.M. en càrrega	ΔB	0,153 T

Taula 4.11 Característiques d'operació de l'IP

4.3.5 Geometria de la màquina. Diàmetre i longitud

Un cop analitzat el bobinat que tindrà la màquina i el sistema d'excitació, s'ha de procedir al dimensionat de l'estator i el rotor.

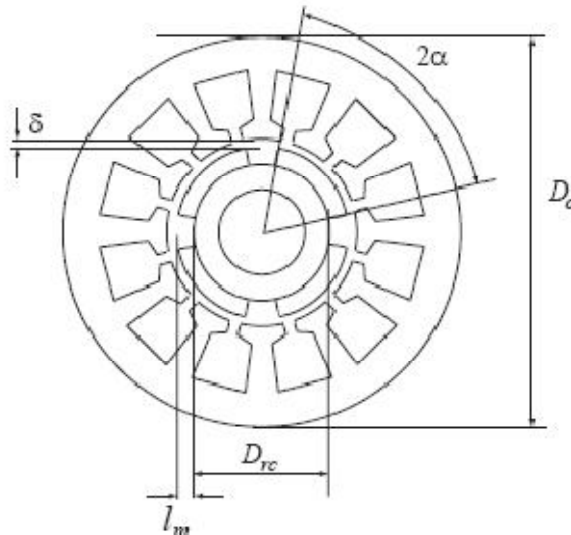


Figura 4.7 Dimensions d'estator i rotor

A partir de l'expressió que ens relaciona el parell de la màquina i les seves dimensions es pot procedir a establir els valors del diàmetre interior i longitud de la màquina, donat un valor de relació entre aquestes dues últimes variables.

$$D^2 L = \frac{M}{\frac{\pi^2}{4\sqrt{2}} B_{ave} A} \quad (4.5)$$

4.3.6 Entreferro

L'entreferro en una màquina elèctrica té una significant influència en la força magnetomotriu del circuit magnètic així com en la inductància de la màquina. A més també té importància en l'aspecte tèrmic ja que pot utilitzar-se com a zona de refrigeració per convecció.

Existeixen diverses equacions que permeten donar a l'entreferro un valor aproximat. La utilitzada per a donar un primer valor un cop fixada la longitud i el diàmetre de la màquina és la següent [R].

$$\delta[m] \geq 0,0002 + 0,003 \sqrt{\frac{D_i L}{2}} \quad (4.6)$$

4.3.7 Ranures

Les ranures tenen la funció d'acollir els conductors estatòrics que permetran l'evacuació de l'energia transformada pel generador cap a l'exterior. El nombre de ranures i la distribució dels conductors tindran influència en la forma i el valor de l'ona de tensió induïda tal com s'ha comentat abans. A l'hora quedaran determinades les dimensions de les dents de la corona, que han de complir les exigències mecàniques necessàries per tal de garantir l'estabilitat estructural.

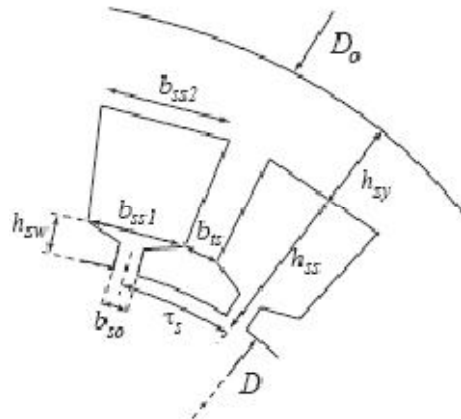


Figura 4.8 Dimensions de ranures

4.4 Comprovació de les restriccions de disseny

		Restricció	Valor	Vàlid
Número de pols	$2p$	$p \geq 20$ nombre parell	22	si
Número de ranures per pol i fase	q	$q \leq 1$	0,3181	si
Diàmetre del rotor	D_r	$D_r < D_a$	192,6 mm	si
Entreferro	δ	$\delta[m] \geq 0,0002 + 0,003 \sqrt{\frac{D_i L}{2}}$	0,7 mm	si
Longitud d'iman	l_m	$2mm \leq l_m \leq 8mm$	3 mm	si
Angle de mig pol en graus elèctrics	α	$0,7\pi / 2 \geq \alpha$	60°	si
Diàmetre exterior estator	D_a	$D_o \leq 500mm$	260 mm	si
Ample de dent	b_{ts}	$b_{ts} \geq 0,3\tau_s > 2,5mm$	21 mm	si

Alçada de ranura	h_{ss}	$h_{ss} \geq 0$	20 mm	si
Obertura de ranura	k_{open}	$0,2 \leq k_{open}$	0,4	si
Alçada entrada de ranura	h_{sw}	$h_{sw} \geq 1mm$	2 mm	si
Longitud de la màquina	L	$100mm \leq L \leq 500mm$	200,2 mm	si
Alçada corona estatòrica	h_{sy}	$h_{sy} \geq h_{ss} / 2$	10 mm	si
Ample de ranura	b_{ss2}	$0,15h_{ss} \leq b_{ss2} \leq 0,5h_{ss}$	10 mm	Si
Base de ranura	b_{ss1}	$b_{ss1}k_{open} \geq 2mm$	9 mm	si
Obertura de ranura	b_{so}	$b_{so} \geq 2mm$	2,8 mm	si

Taula 4.12 Comprovació de les restriccions de disseny

4.5 Resultats

Tenint en compte les restriccions imposades, i els paràmetres de disseny exposats anteriorment, els resultats obtinguts per al disseny de la màquina són els presentats a continuació. El procés de càlcul complet mitjançant una fulla d'excel, queda descrit en l'annex de pauta de càlcul.

4.5.1 Geometria estator

Material		D22
Diàmetre interior estator	D_i	200 mm
Diàmetre exterior estator	D_o	260 mm
Longitud activa de la màquina	L	200,2 mm
Nombre de ranures a l'estator	Z_s	21
Pas polar	τ_p	28,56 mm
Pas de ranura	τ_s	29,92 mm
Alçada ranura estatòrica	h_{ss}	20 mm
Alçada entrada ranura	h_{sw}	2 mm
Alçada corona estatòrica	h_{sy}	10 mm
Ample dent estator	b_{ts}	21mm
Angle d'obertura de ranura		10,91 °
Àrea de ranura	A_{sl}	175,74 mm ²
Factor d'obertura de ranura	k_{open}	0,31

Taula 4.13 Dimensions estator

4.5.2 Geometria rotor

Longitud de l'entreferro	δ	0,7 mm
Diàmetre eix	D_e	150 mm
Diàmetre rotor	D_{rc}	192,6 mm
Alçada iman	h_m	3 mm
Angle polar	2α	120°
Alçada corona rotòrica	h_{ry}	11,24 mm

Taula 4.14 Dimensions rotor

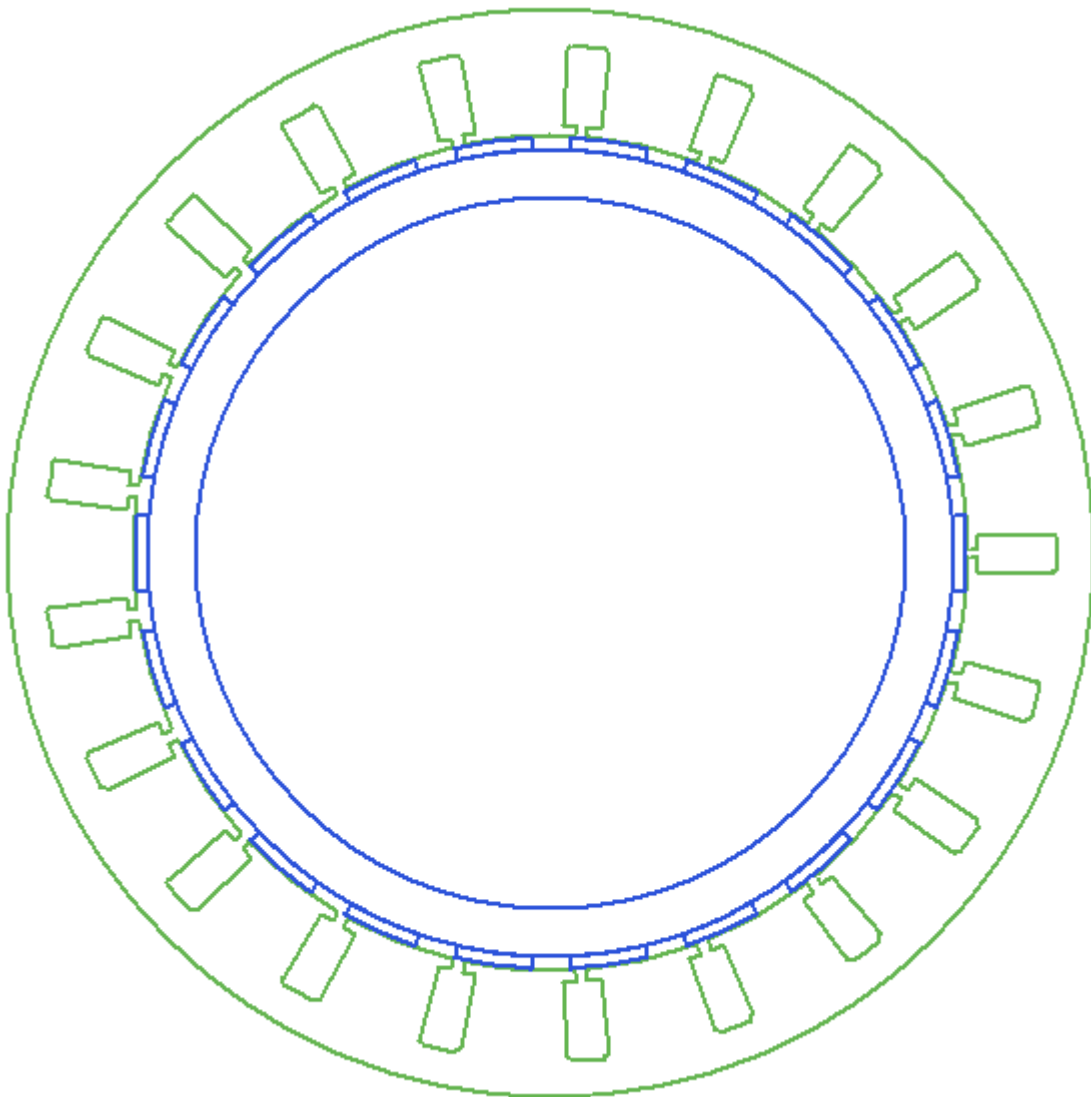


Figura 4.9 Geometria final de la màquina

4.5.3 Conductors

Material		Coure
Densitat de corrent màxima	Δ_{\max}	$< 6A / mm^2$
Densitat de corrent	Δ	$4,75A / mm^2$
Diàmetre dels conductors	d_c	1,024 mm
Conductors per ranura	A_c	88
Àrea conductora per ranura	A_{sc}	72,47 mm ²
Àrea de ranura	A_{sl}	175,74 mm ²
Factor d'ocupació de ranura	f_{oc}	0,41
Resistència per fase 20/80°C	R_f	4,12 Ω

Taula 4.15 Característiques dels conductors

4.5.4 Induccions

	Valors analítics	Valors MAX/FEM	Valor límit
B_m	0,8808 T	0,9031 (-0,7%)	$B_r = 1,16T$
\hat{B}_g	0,971 T	0,9428 (-3,16%)	$\hat{B}_g \leq 1,1T$
B_{ts}	0,74 T	0,8032 (+32,04%)	$B_{ts} \leq 1,6T$
B_{sy}	0,88 T	0,8795 (+2,61%)	$B_{sy} \leq 1,4T$
B_{ry}	-	0,7671 -	$B_{ry} \leq 1,4T$

Taula 4.16 Comprovació induccions amb EF

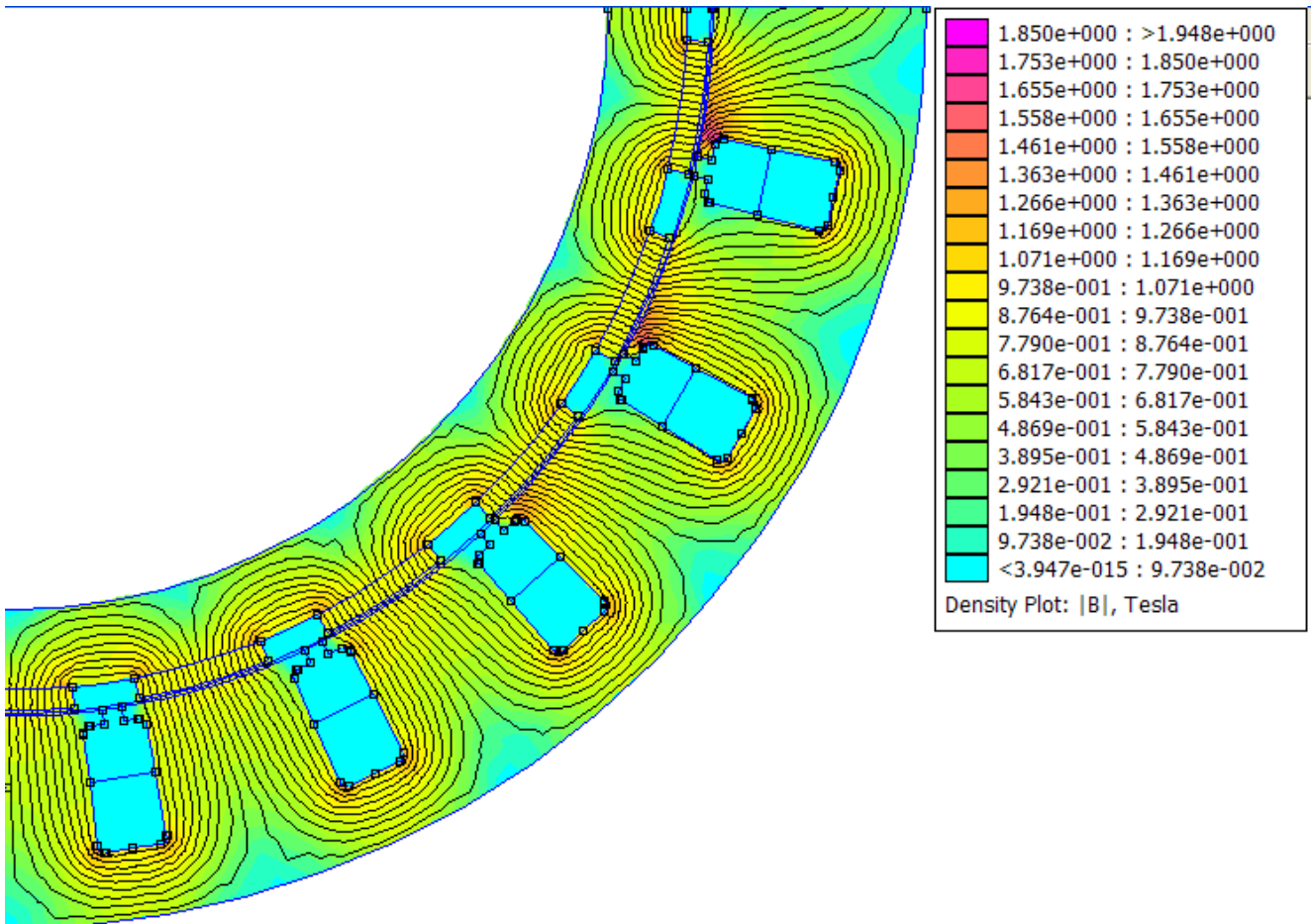


Figura 4.10 Induccions magnètiques de la màquina en buit

4.5.5 Pèrdues

Pèrdues		Valors analítics	Valors simulats	
Ferro	P_{fe}	27,3 W	19,77 W	(+29,52%)
Joules	P_{cu}	149,2 W	144,1 W	(+3,35%)
Addicionals	P_{ad}	45 W	45 W	(0%)
Rendiment	η	91,86	90,79	(+1,39%)

Taula 4.17 Comprovació pèrdues amb EF

4.5.6 Paràmetres de la màquina en règim permanent

Inductància eix d	L_d	0,009376 H
Inductància eix q	L_q	0,009376 H
Resistència per fase	R	4,12 Ω
Constant de temps eix d/q	τ	0,002273 s

Taula 4.18 Paràmetres en règim permanent

4.5.7 Altres resultats d'interès

Densitat coure	ρ_{cu}	$8900 \text{ kg} / \text{m}^3$
Densitat IP	ρ_{ip}	$7800 \text{ kg} / \text{m}^3$
Densitat ferro	ρ_{fe}	$7750 \text{ kg} / \text{m}^3$
Pes del coure utilitzat	m_{cu}	$3,38 \text{ kg}$
Pes dels imans permanents	m_{ip}	$1,89 \text{ kg}$
Pes del ferro utilitzat estator	m_{fes}	$26,18 \text{ kg}$
Pes del ferro utilitzat rotor	m_{fe_r}	$9,48 \text{ kg}$
Pes total	m_T	$40,96 \text{ kg}$
Inèrcia del rotor	J	$0,2384 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$

Taula 4.19 Característiques mecàniques

4.6 Gràfiques de funcionament

Les gràfiques de funcionament de la màquina s'han obtingut mitjançant el programa de disseny Maxwell 11.

25 Mar 2009

Ansoft Corporation
Air-Gap Flux Density
RMxprtDesign1

16:35:20

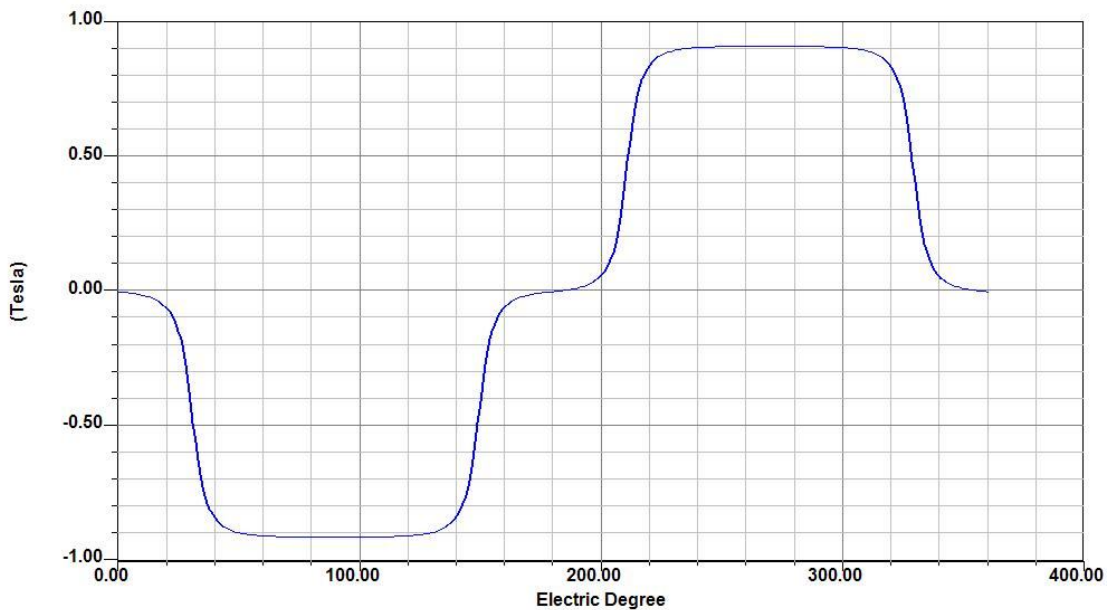


Figura 4.11 Gràfica densitat de flux a l'entreferro

25 Mar 2009

Ansoft Corporation
 Induced Coil Voltages at Rated Speed
 RMXprtDesign1

16:35:57

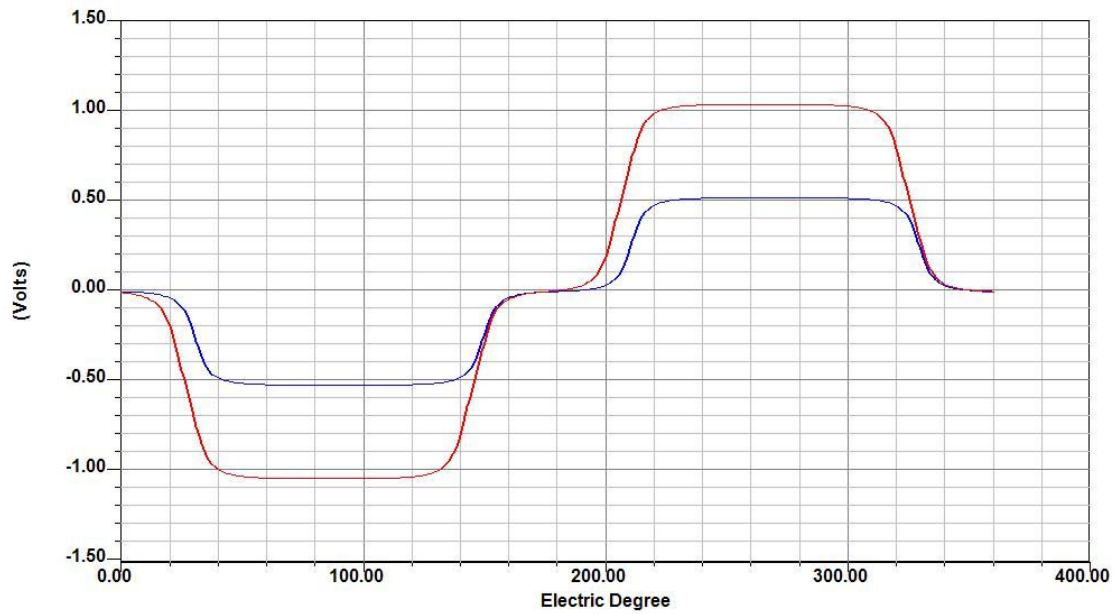


Figura 4.12 Gràfica de tensió induïda per espira a velocitat nominal

25 Mar 2009

Ansoft Corporation
 Induced Winding Voltages at Rated Speed
 RMXprtDesign1

16:36:18

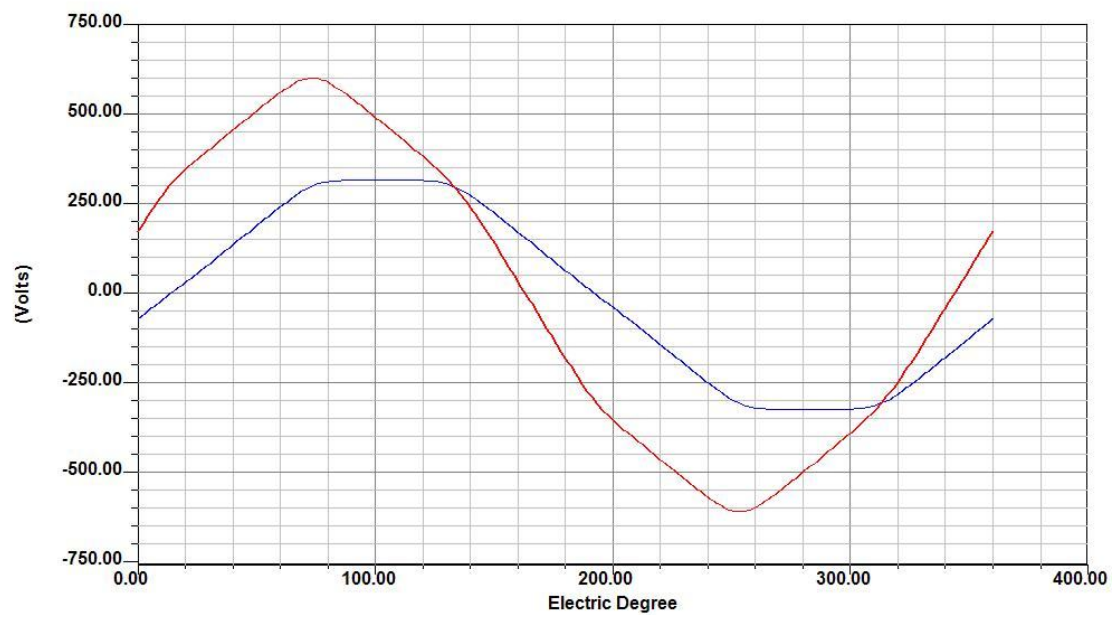


Figura 4.13 Gràfica de tensions induïdes a la bobina a tensió nominal

25 Mar 2009

Ansoft Corporation
Winding Currents under Load
RMxprtDesign1

16:37:15

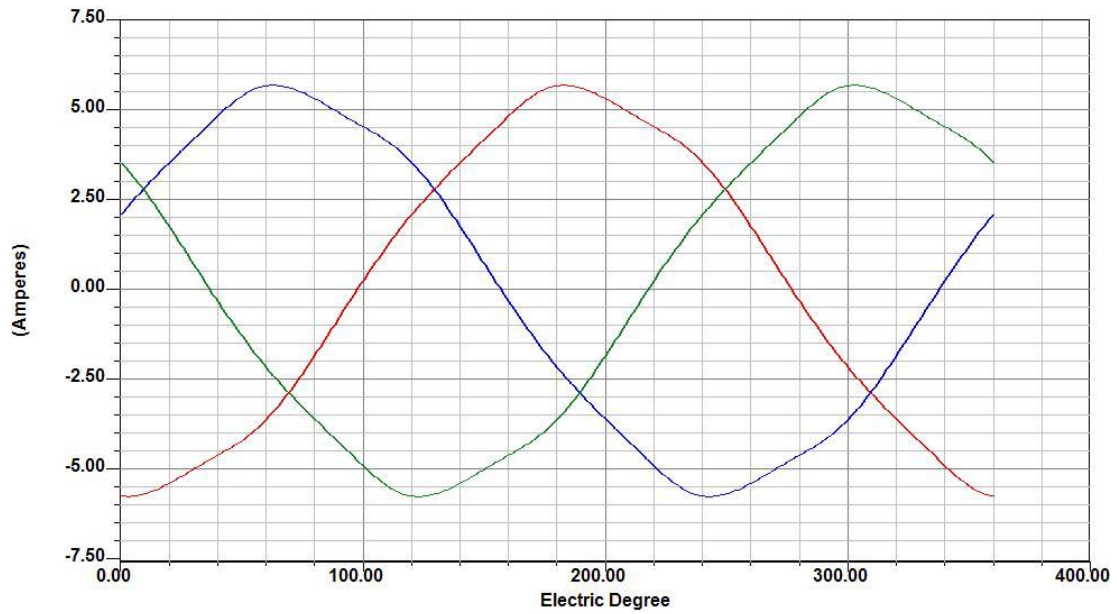


Figura 4.14 Gràfica corrents induïdes a velocitat nominal

25 Mar 2009

Ansoft Corporation
Efficiency vs Power Angle
RMxprtDesign1

16:37:52

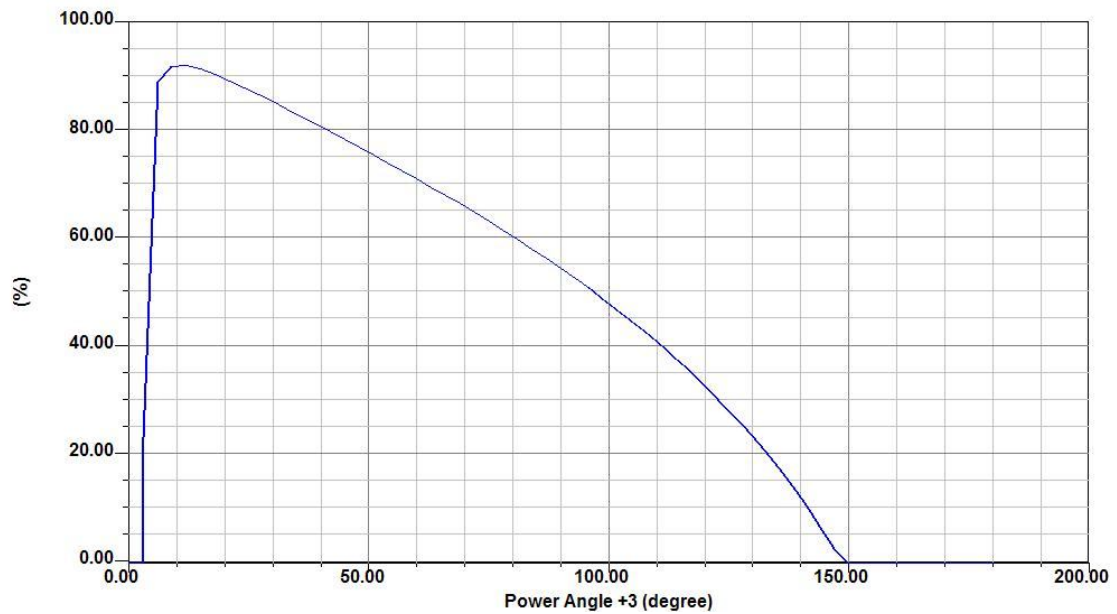


Figura 4.15 Gràfica eficiència – angle de potència

5 Estudi tèrmic

Per a finalitzar el disseny de la màquina, és necessari esbrinar si aquesta té unes característiques tèrmiques d'operació que fan viable el seu muntatge i funcionament.

Per a realitzar aquestes comprovacions, s'han realitzat de nou dos estudis que tenen la mateixa finalitat. Obtenir els valors de temperatura de les diferents parts de la màquina i validar-ne els resultats.

Els dos estudis que s'han dut a terme són els següents:

- Estudi tèrmic basat en l'anàlisi d'un model circuital tèrmic equivalent
- Estudi mitjançant elements finits

5.1 Circuit tèrmic equivalent

Per realitzar aquest primer estudi, s'ha pres com a referència el model proposat per Lindström en la referència [6]. Per a la utilització d'aquest estudi, s'ha realitzat un petit programa en Matlab, que permet a partir de les dades de la màquina, el càlcul dels elements del circuit equivalent, així com la seva resolució. El codi del programa es pot trobar en els annexos a la memòria.

Per comprovar que aquest model presenta uns resultats coherents, també s'ha analitzat la màquina amb el programa d'estudi de comportament tèrmic de màquines elèctriques Motor-Cad. Del que també es presentarà el circuit tèrmic equivalent així com els resultats obtinguts.

El model treballat presenta un circuit equivalent basat en set nodes que representen diferents parts de la màquina a estudiar. Aquestes parts són la carcassa exterior de la màquina, la corona de l'estator, les dents, les ranures, els conductors, l'entreferro, els imans, la corona rotòrica i els rodaments propis de l'eix de la màquina.

On h és el coeficient de transferència de calor per convecció. Aquest coeficient es pot calcular per a alguns sistemes, o pot ser obtingut de taules tabulades.

Per a geometries més complexes, aquestes formes de les resistències tèrmiques canvien i duen a l'obtenció d'equacions algebraicament més complicades.

Per a l'aplicació que ens ocupa, s'ha pres un model ja elaborat de màquina síncrona. El procediment i les expressions per al càlcul de les resistències està descrit en els annexos i en la referències bibliogràfiques [6].

L'aplicació del procediment de càlcul proposat presenta els següents resultats.

	Resistència tèrmica	Valor R_{thi} [K/W]
R_{th1}	Carcassa – Exterior	0,1178
R_{th2}	Carcassa – Corona	0,0023
R_{th3}	Corona - Dent	0,0034
R_{th4}	Conductors	0,0498
R_{th5}	Caps de bobina	0,0767
R_{th6}	Aire intern - Carcassa	0,0026
R_{th7}	Aire intern - Rotor	2,6266
R_{th8}	Aire intern – Caps de bobina	0,1206
R_{th9}	Entreferro	0,2280
R_{th10}	Rotor – Rodaments	0,5524
R_{th11}	Carcassa - Rodaments	0,3648
Taula 5.1 Valors de les resistències tèrmiques equivalent		

Les fonts de generació de calor corresponen a les pèrdues dels diferents components de la màquina, aquestes fonts s'introdueixen en el model com a fonts de corrent connectades en paral·lel als diferents elements que les generen. Les pèrdues en una màquina elèctrica es centren bàsicament és pèrdues al ferro de l'estator, pèrdues al coure dels conductors, pèrdues al rotor i pèrdues per fricció. Aquestes pèrdues es poden estimar analíticament o bé a través de simulació en elements finits.

La complicació del càlcul tèrmic recau en el fet que en cada punt d'operació de la màquina seria necessari recalculer què valen les pèrdues associades a l'operació així com els valors de les resistències tèrmiques, ja que paràmetres com la resistència elèctrica dels conductors (i per tant les pèrdues joules) depenen de la temperatura.

Considerant que la màquina treballa a plena càrrega, 2500 W i a velocitat nominal, 272 rpm, la distribució de pèrdues és la que s'indica a la taula següent.

Pèrdues	Valor [W]
Ferro estator	16,2
Ferro dents	11
Ferro rotor	0
Joules conductors	86,4
Joules caps de bobina	57,8
Addicionals	0
Pèrdues totals	171,4

Taula 5.2 Distribució de pèrdues

Amb aquestes dades, la resolució del circuit equivalent i tenint en compte que la temperatura ambient és de 40°C, s'arriba a la següent distribució de temperatures.

Amb	Ambient	Temperatura [°C]
1	Carcassa	60,1995
2	Corono estatòrica	60,4711
3	Dents	60,8150
4	Conductors	65,4799
5	Caps de bobina	66,0326
6	Imans	60,2119
7	Rodaments	60,2044

Taula 5.3 Distribució de temperatures

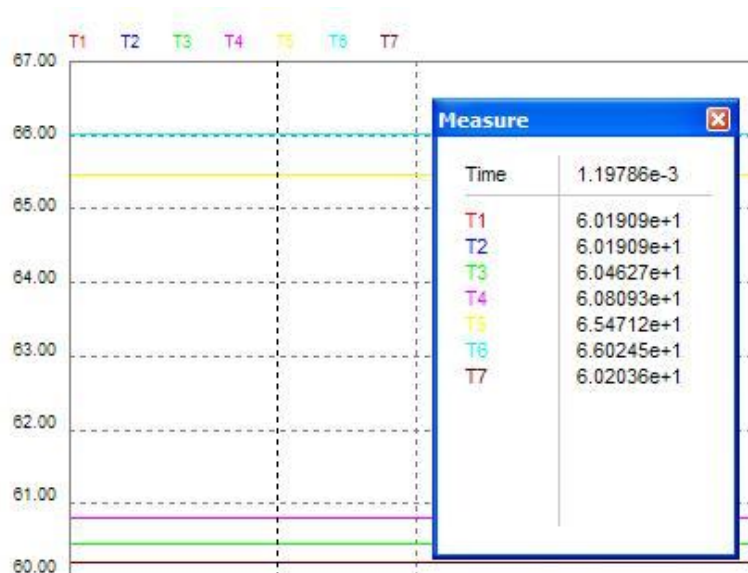


Figura 5.2 Resultat de la simulació del circuit equivalent

5.2 Estudi amb elements finits

De la mateixa manera que amb l'estudi electromagnètic, mitjançant el programa FEMM es poden dur a terme simulacions de distribucions de temperatura.

El procediment és el mateix que en el cas anterior,

- Introducció de la geometria de la màquina
- Definició dels materials
- Imposició de condicions de contorn
- Obtenció de resultats

Aquest procés de construcció i parametrització està explicat detalladament en l'annex. El resultat obtingut de la simulació amb elements finits és la figura que segueix.

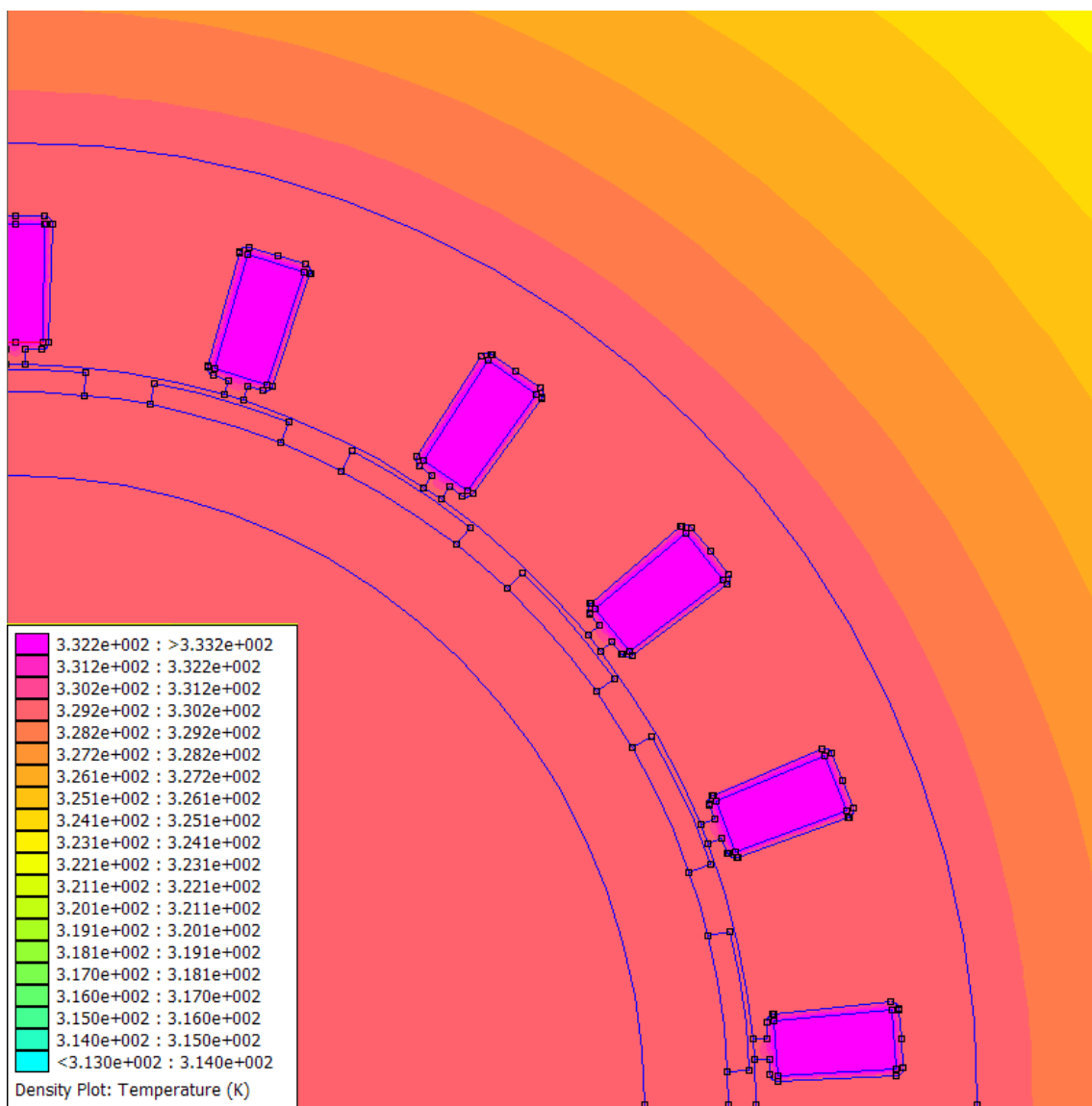


Figura 5.3 Resultat de la simulació amb elements finits

5.3 Motor-cad

5.3.1 Introducció de dades

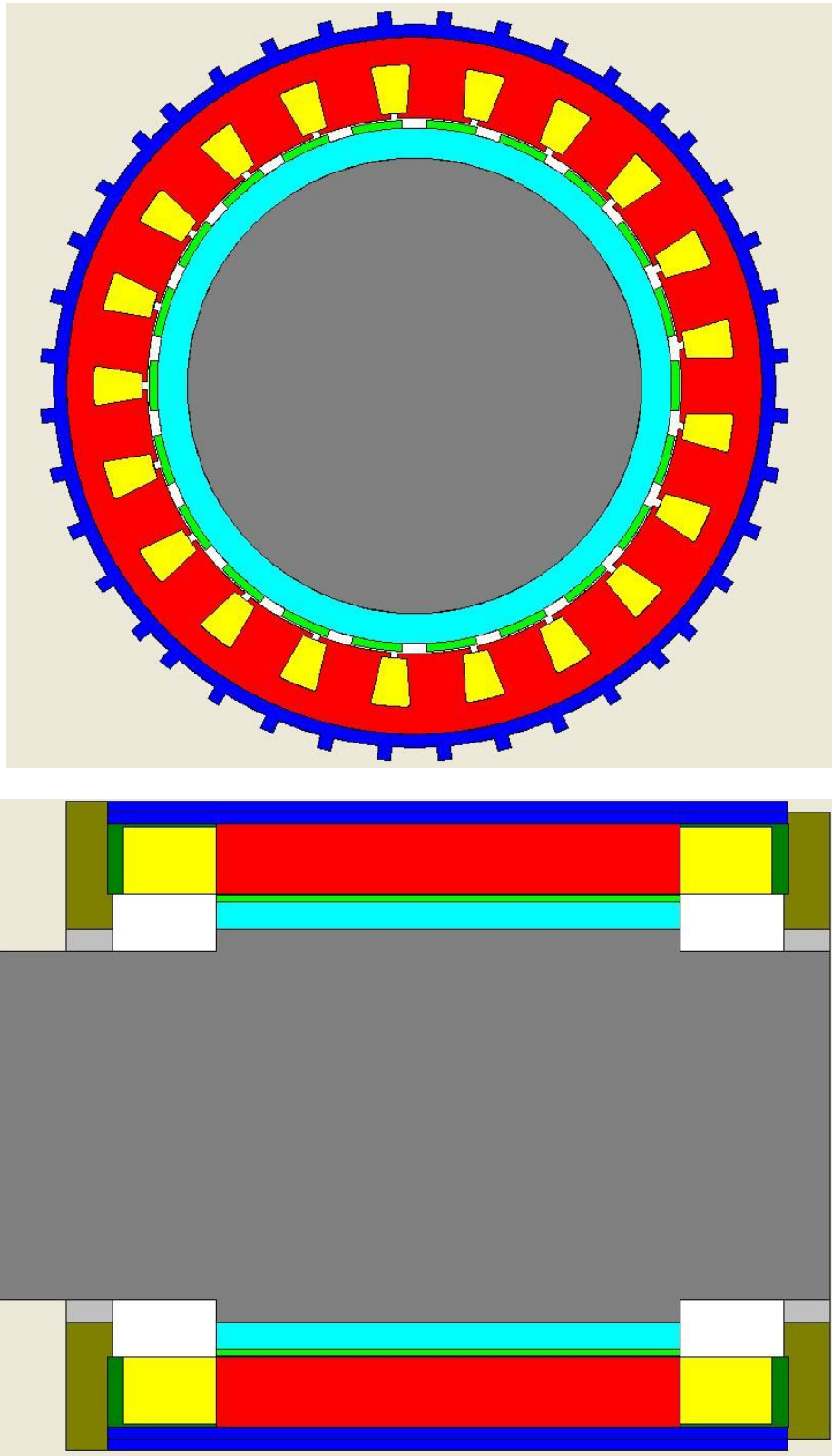


Figura 5.4 Geometria Motorcad

Temperature	Value [C]	Temperature	Value [C]	Temperature	Value [C]
T [Ambient]	40	T [Rotor Surface]	56.99	T [Winding Average]	62.69
T [Housing - Active]	60.08	T [Magnet]	57	T [Active Winding Average]	62.3
T [Housing - Overhang (F)]	60.18	T [Rotor Lamination]	57.03	T [End Winding Average]	62.88
T [Housing - Front]	59.75	T [Shaft - Center]	57.05	T [Winding Layer = 1]	62.11
T [Endcap - Front]	58.97	T [Shaft - Overhang - Front]	57.04	T [Winding Layer = 2]	62.68
T [Bearing - Front]	58.97	T [Shaft - Front]	57.1	T [Ewdg (F)]	62.99
T [Housing - Overhang (R)]	60.56	T [Shaft - Overhang - Rear]	57.28	T [Ewdg (R)]	63.93
T [Housing - Rear]	60.38	T [Shaft - Rear]	57.35		
T [Endcap - Rear]	60.04	TVent Inlet Temperature	40		
T [Bearing - Rear]	60.04	TVent Outlet Temperature	64.84		
T [Stator Lam (tooth)]	60.16	TVent Rotor Outlet Temperature	64.84		
T [Stator Lam (back iron)]	60.2	TVent Airgap Outlet Temperature	66.66		
T [Stator Surface]	59.99	Inlet Temp TVent Ewdg End Endcap F	40		
		Outlet Temp TVent Ewdg End Endcap F	43.65		
		Inlet Temp TVent Ewdg Outer Housing F	40		
		Outlet Temp TVent Ewdg Outer Housing F	40		
		Inlet Temp TVent Ewdg Outer Housing R	40		
		Outlet Temp TVent Ewdg Outer Housing R	40		
		Inlet Temp TVent Ewdg End Endcap R	65.61		
		Outlet Temp TVent Ewdg End Endcap R	64.84		
		Inlet Temp TVent Ewdg Bore Shaft F	43.65		
		Outlet Temp TVent Ewdg Bore Shaft F	44.43		
		Inlet Temp TVent Rotor Duct 1	44.43		
		Outlet Temp TVent Rotor Duct 1	44.43		
		Inlet Temp TVent Rotor Duct 2	0		
		Outlet Temp TVent Rotor Duct 2	0		
		Inlet Temp TVent Airgap Stator Rotor	44.43		
		Outlet Temp TVent Airgap Stator Rotor	66.66		
		Inlet Temp TVent Ewdg Bore Shaft R	66.66		
		Outlet Temp TVent Ewdg Bore Shaft R	65.61		
		Average Temp TVent Ewdg End Endcap F	41.83		
		Average Temp TVent Ewdg Outer Housing F	40		
		Average Temp TVent Stator Duct	40		
		Average Temp TVent Stator Duct Sq	0		
		Average Temp TVent Ewdg Outer Housing R	40		
		Average Temp TVent Ewdg End Endcap R	65.23		
		Average Temp TVent Ewdg Bore Shaft F	44.04		
		Average Temp TVent Rotor Duct 1	44.43		
		Average Temp TVent Rotor Duct 2	0		
		Average Temp TVent Airgap Stator Rotor	55.55		
		Average Temp TVent Ewdg Bore Shaft R	66.14		

Figura 5.6 Resultats Motor-cad

6 Simulació de la màquina

Un cop validat el disseny de la màquina mitjançant el software analitzat anteriorment, cal veure com respon la màquina en diferents situacions de funcionament. Per fer aquestes simulacions de funcionament s'ha utilitzat el programa Simulink.

6.1 Modelització del vent i l'aerogenerador

Per a la modelització del vent s'ha utilitzat el model d'aerogenerador que porta inclòs Simulink. Aquest model funciona a partir dels paràmetres de velocitat del vent, angle d'atac de les pales i velocitat base del generador. En el nostre cas, al tractar-se d'un aerogenerador d'accionament directe la base de velocitats en pu serà igual a la unitat. L'angle d'atac del vent sobre les pales es pren zero, i tot i que sigui una simplificació es considera constant. Finalment per a modelitzar la velocitat del vent s'han implementat dues opcions.

La primera de les opcions és la de un vent constant i de valor igual al nominal de disseny. Això es pot implementar a través d'un generador de valor constant (V_{wind}) i que pren el valor nominal del vent, és a dir 8 m/s.

L'altra opció per tal d'obtenir les corbes de potència, o estudiar efectes de variació del vent sobre la màquina, s'ha realitzat a través del constructor de senyals que incorpora Simulink. De manera que es poden dissenyar els processos de variació de velocitat del vent que l'usuari desitgi.

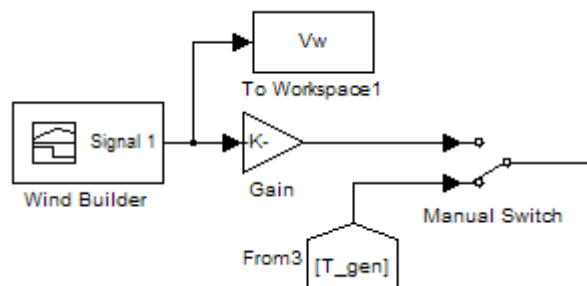


Figura 6.1 Model de vent

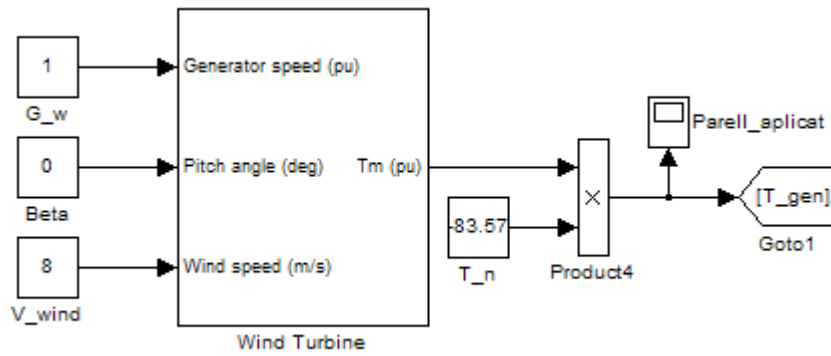


Figura 6.2 Model d'aerogenerador

6.2 Màquina elèctrica

Simulink incorpora una llibreria de màquines elèctriques en la què hi apareix la màquina síncrona d'imans permanents. Tan sols cal donar valors als diferent paràmetres que requereix el quadre de diàleg, que són els calculats anteriorment i el model està llest per a funcionar.

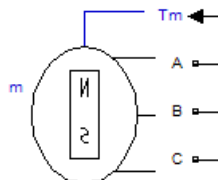


Figura 6.3 Màquina síncrona d'imans permanents

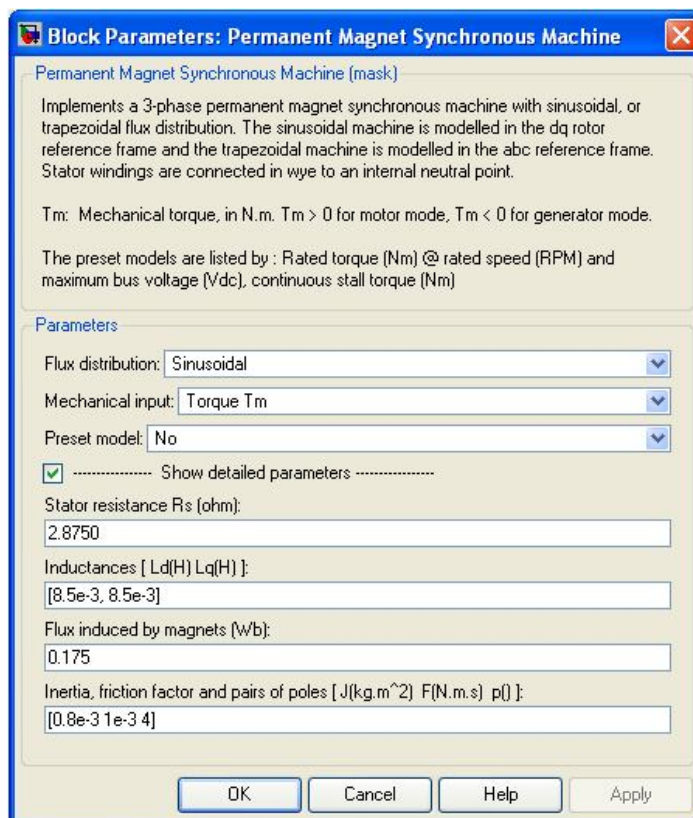


Figura 6.4 Paràmetres MSIP

6.3 Càrrega

La càrrega connectada a la sortida del generador eòlic, té com a objectiu rebre l'energia generada i transformar-la en energia útil. En aquest cas s'ha modelitzat com una càrrega resistiva capaç de absorbir la potència nominal de la màquina.

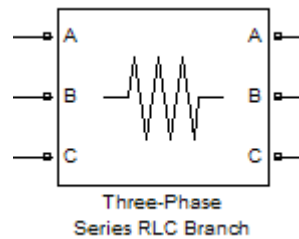


Figura 6.5 Càrrega

6.4 Mesura

Per a obtenir les dades corresponents a les diferents variables del sistema, és necessari dotar al circuit dels elements que permetin dur a terme aquesta tasca. En aquest cas és necessari implementar en el circuit aquells elements que permeten disposar de les dades de velocitat i parell generats, així com de les magnituds elèctriques de la màquina, tensions i corrents.

A partir de les dades obtingudes i de les relacions matemàtiques que s'estableixen del funcionament de l'aerogenerador, i dels propis sistemes de mesura de Simulink és possible obtenir les variables de sortida de manera indirecta.

Els circuits implementats per a realitzar aquesta tasca són els que segueixen a la següent figura.

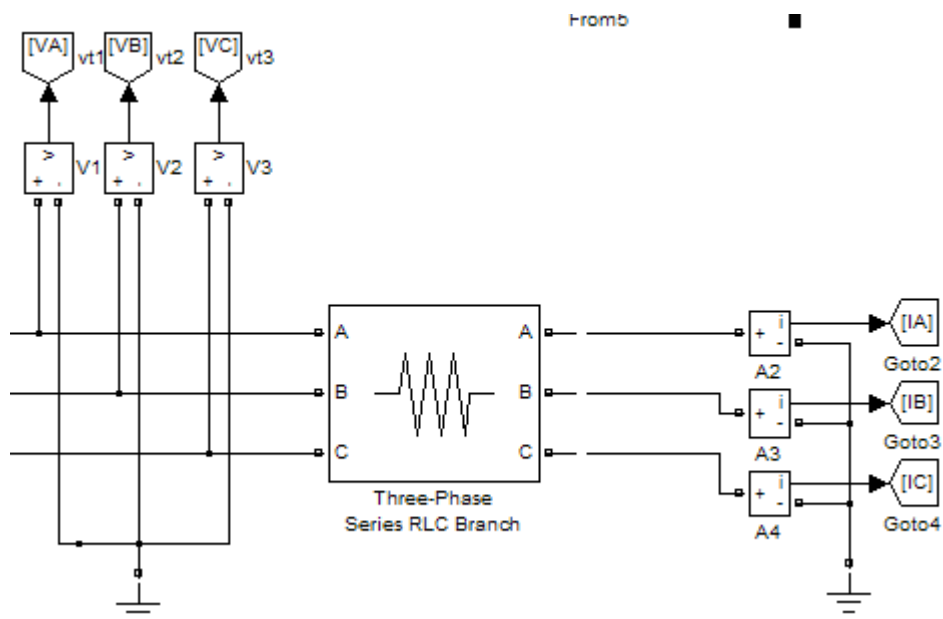


Figura 6.6 Mesura de paràmetres

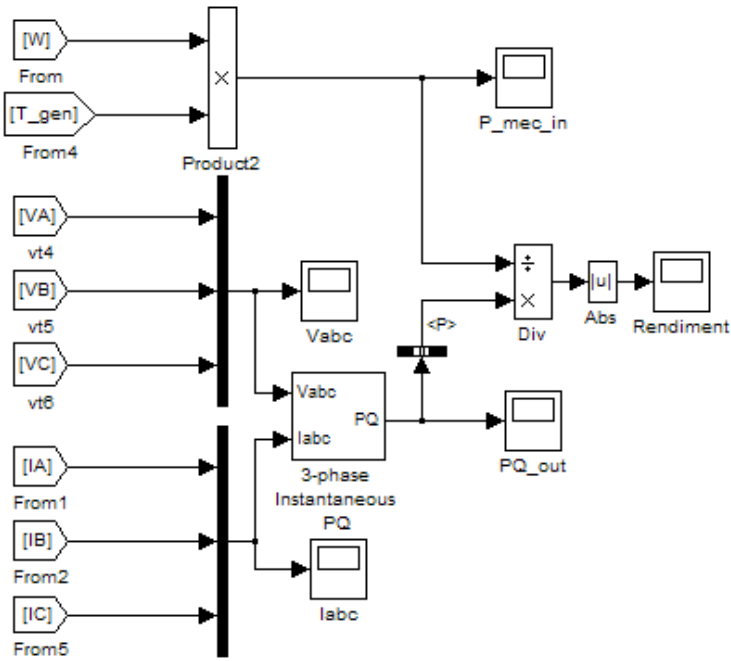


Figura 6.7 Càlcul de paràmetres

6.5 Esquema complet

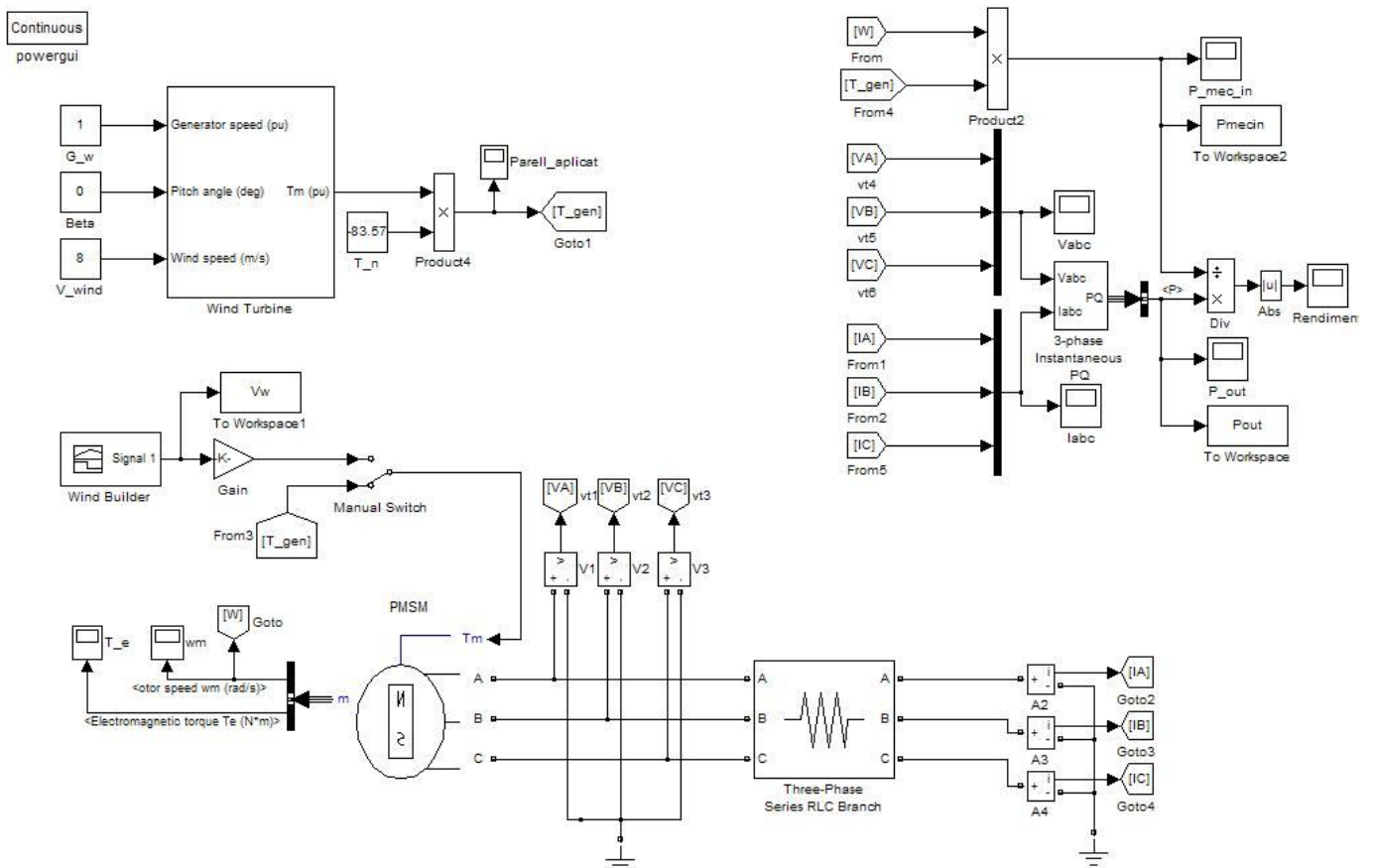


Figura 6.8 Esquema complet de la simulació

6.6 Simulació en condicions nominals

La simulació en condicions nominals ens mostra quin es el comportament de la màquina en les condicions de disseny nominals.

Paràmetres de simulació	
Velocitat del vent	8 m/s

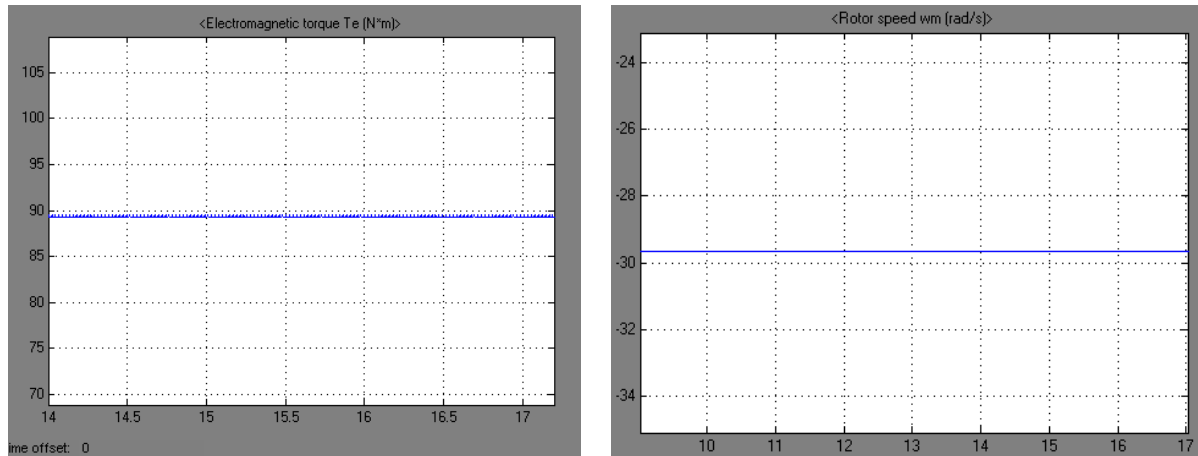


Figura 6.9 Velocitat de gir i parell en condicions nominals

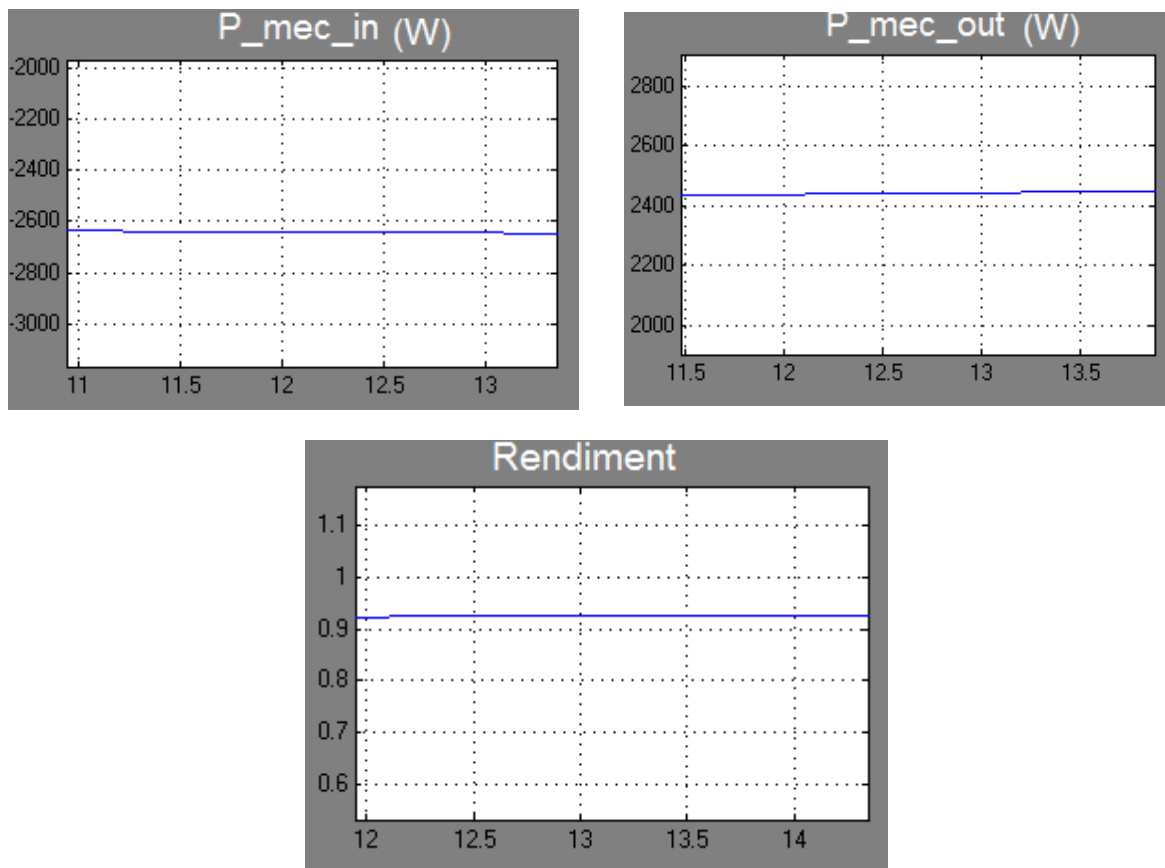


Figura 6.10 Potències d'entrada, sortida i rendiment

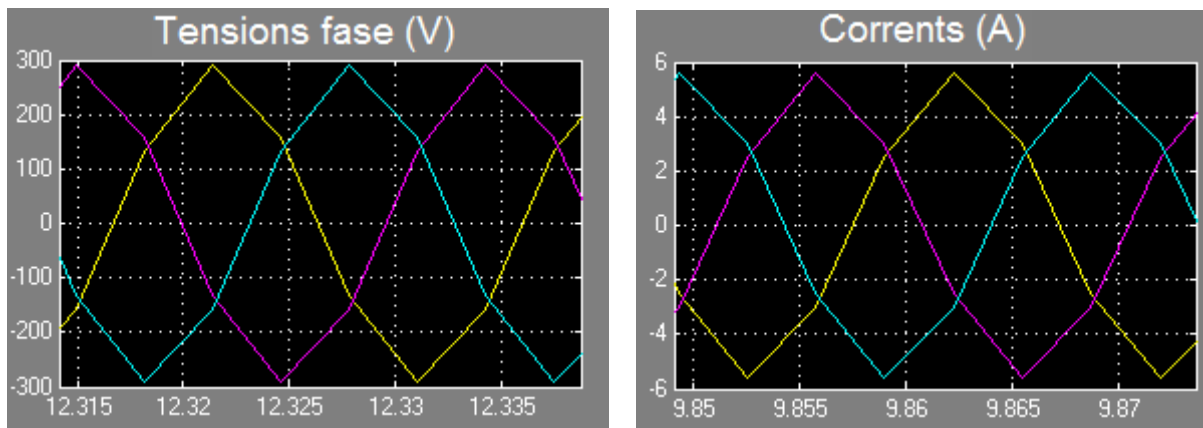


Figura 6.11 Tensions i corrents induïts a velocitat nominal

6.7 Corba característica

La corba característica del generador és la que ens mostra quina és la potència elèctrica de sortida en funció de la velocitat del vent.

Paràmetres de simulació	
Velocitat del vent	0 -10 m/s
λ	8

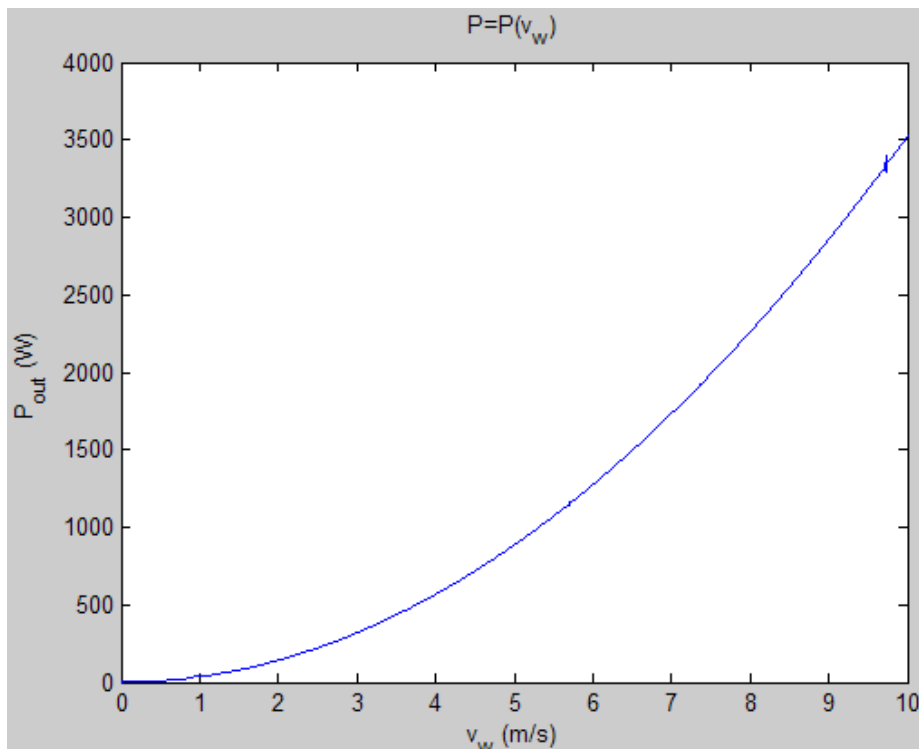


Figura 6.12 Corba de potència – velocitat vent

7 Model comercial de turbina

Per tal d'aconseguir completar el sistema eòlic, a més de la màquina elèctrica dissenyada anteriorment, és necessari adoptar un model comercial de turbina per tal de captar l'energia del vent.

Tenint en compte les restriccions imposades anteriorment, s'ha escollit el següent model.

Empresa		Tairui Windpower Co., LTD	
Model		3 kW Wind Turbine	
Main Parameter:			
Model:	TR4.5-3000W	Rated Power:	3000W
Max Power:	4000W	Generator:	Three Phase Permanent Magnet Alternator
Rated Output Voltage:	120V	Start Wind Speed:	2m/s
Rated Wind Speed:	10m/s	Maximum Wind Speed:	45m/s
Rotor Diameter:	4.5m	Rated Rotor Speed:	220r/m
Blade Number:	3	Blade Material:	Reinforced fiber glass
Blade Pitch Control:	None, Fixed Pitch	Overspend Protection:	Auto programmed control
Gearbox:	None, Direct Drive	Temperature Range:	-40 to +70 Deg. C
Tower Type:	Wire Guyed or Free Standing	Tower Height:	9m or 12m

Figura 7.1 Característiques model comercial



Figura 7.2 Fotografia model comercial

8 Pressupost

<i>Element</i>	<i>Quantitat</i>	<i>Preu [€/u]</i>	<i>TOTAL [€]</i>
Xapa magnètica	26,18 kg	10	261,8
Coure	3,38 kg – 22m	1020 € / 90 m	250
Imans permanents	105 - 1,89kg	3,728	391,44
Material aïllant	1	210	210
Carcassa	1	237	237
Taller	2 x 45 hores	12	1080
SUBTOTAL 1			2430,24
Pales	3	174,4	523,2
Rodaments	2	70	70
Torre	1	348	348
SUBTOTAL 2			941,2
TOTAL			3371€

9 Conclusions

Actualment l'aprofitament de l'energia associada al vent és la font energètica renovable més desenvolupada arreu. Aquest desenvolupament s'ha degut a la proliferació de parcs eòlics on shore amb aerogeneradors de mitjana i gran potència, actualment sobre els 3 MW, que requereixen de grans superfícies i d'impacte ambiental causat per l'obre civil que requereixen.

En aquest context de maduresa de tecnològica d'aerogeneradors, és on comença a proliferar una rama d'aprofitament d'energia eòlica destinada a l'abastiment de zones rurals o aïllades, i ara ja també en zones urbanes, però en aplicacions de petita potència, enllumenats, funcionament de petits electrodomèstics, bombeig d'aigua... Aquest tipus d'aprofitament s'anomena, energia mini eòlica.

Les característiques dels aerogeneradors destinats a l'energia mini eòlica conceptualment no són massa diferents dels aerogeneradors dels grans parcs, però tenen dimensions reduïdes i l'interval de potències en les què es mouen van des de l'1kW fins als 100kW. Habitualment els aerogeneradors de petita potència no duen reductora, i per tant són d'accionament directe.

Aquest tipus d'aerogeneradors, ja disposa d'una important capacitat de generació en països com els Estats Units. País on la proliferació en els darrers tres anys de petits generadors i sistemes d'emmagatzematge, o de producció per a la venda a la xarxa, han assolit una potència instal·lada d'aproximadament uns 10MW en l'any 2007.

L'augment de potència instal·lada s'ha degut bàsicament als incentius econòmics que s'han introduït des de les diferents administracions, i a la davallada en els costos de producció al proliferar la producció en sèrie.

Altres països on hi ha una forta implantació d'aerogeneradors de petita potència són el Regne Unit i Canadà.

Pel que fa a característiques tècniques, un anàlisi dels aerogeneradors que es troben al mercat permet veure que tots tenen un patró bastant evident, abunden les opcions que tenen un rang de potència entre 1kW i 6kW majoritàriament. Encara que els rangs de potència nominals són molt semblants, el que si varia són les opcions constructives de les que es disposen. Hi ha tendència a pensar habitualment en aerogeneradors tripala, però en el cas de la energia mini eòlica abunden les formes no habituals d'aerogeneradors bipala o d'una sola pala d'eix horitzontal, o les formes modernes no massa conegudes d'aerogeneradors d'eix vertical.

Pel que fa al sistema elèctric de l'aerogenerador, la tendència majoritària és la utilització de generadors síncrons d'imans permanents amb molts parells de pols i acompanyats per una

etapa de rectificació, sistema de control en continua i sistema d'emmagatzematge o inversor per a la connexió a la xarxa.

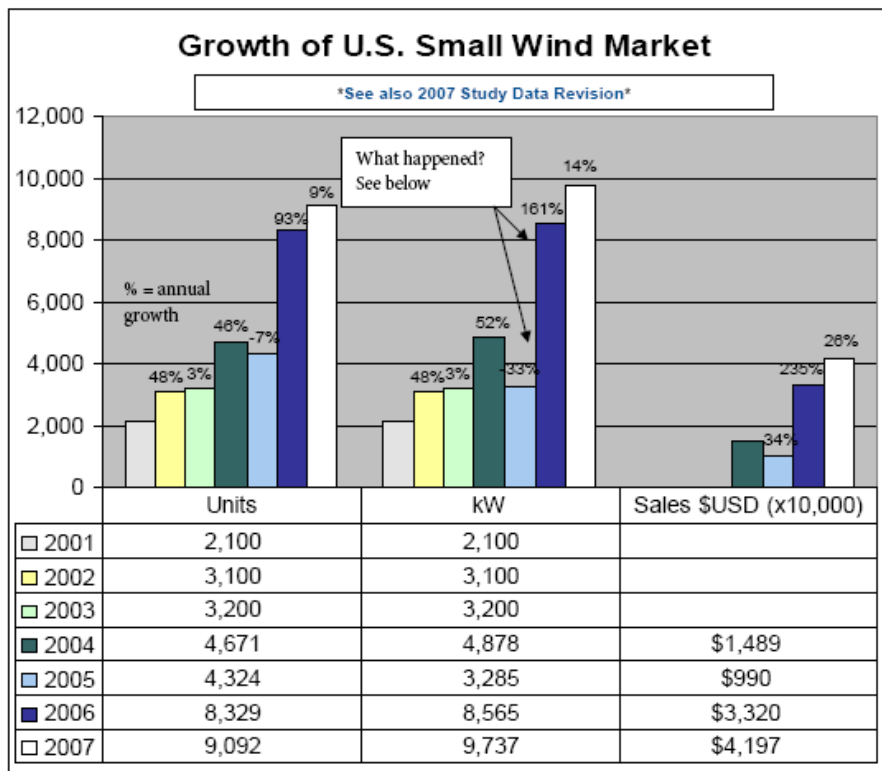


Figura 9.1 – Mercat de minieòlica als EUA
 Font: AWEA

Per aquest motiu el present projecte s’ha fixat en el disseny de les màquines síncrones d’ímans permanents i accionament directe per a la seva utilització en aerogeneradors de petita potència.

Per a dissenyar un aerogenerador s’ha de partir de diferents paràmetres que donen les característiques nominals de la màquina, bàsicament aquests són, la capacitat del recurs eòlic i la potència nominal de sortida requerida. D’aquests dos paràmetres en depenen directament el diàmetre que tindrà la màquina i la velocitat a la que podrà girar en una probabilitat més alta el generador. Per aquest motiu s’han estudiat diversos emplaçaments a partir de les lectures proporcionades pel Servei Meteorològic de Catalunya. El tractament d’aquestes dades permet estimar quina és la potència eòlica que es disposa, quina és la velocitat de generació més habitual i la dimensió dels diferents elements a dissenyar.

Els resultats obtinguts en l’anàlisi dels emplaçaments de la ciutat de Barcelona posen de manifest que el règim de vents a la ciutat és constant el temps, però de poca magnitud, sobretot en l’estudi de l’emplaçament situat a l’interior de la ciutat. Aquest punt posa de manifest que els aerogeneradors comercials que estan dissenyats per a velocitats nominals de vent al voltant dels 12 m/s no són els adequats, ja que la velocitat mitjana del vent a la ciutat està sobre els 5m/s.

Analitzat aquest punt i assumint que en el cas més favorable el funcionament en condicions òptimes serà al voltant del 40%, la velocitat nominal s'ha reduït fins als 8m/s. Aquest factor implica que per compensar la diferència en quan a velocitat el diàmetre de l'aerogenerador s'haurà de veure incrementat, fet que per algunes aplicacions dintre de la ciutat pot ser un problema. Per contra, la reducció de velocitat fa possible que les estimacions en producció d'energia i els períodes de retorn de la inversió siguin més fiables que en el cas dels aerogeneradors comercials analitzats en catàleg.

Tenint en compte tots els paràmetres analitzats ja es tenen les dades necessàries per al càlcul de la màquina elèctrica.

El disseny del generador síncron ha estat realitzat en diferents parts,

- Càlcul de la màquina a través de les equacions de la pauta descrita en l'annex.
- Comprovació analítica de les restriccions electromagnètiques
- Comprovació analítica de les restriccions mecàniques per a que l'estructura sigui sòlida
- Comprovació del disseny electromagnètic mitjançant software especialitzat
- Estudi tèrmic mitjançant model resistiu.
- Comprovació de l'estudi tèrmic mitjançant software especialitzat.

Cal destacar la dificultat de la modelització de la màquina per al seu disseny, ja que es tracta d'una tecnologia més aviat moderna, i que tot i que el disseny per a la topologia escollida d'imans superficials, és modelitzable per equacions no massa exòtiques, la variació en la posició dels imans que fan la funció d'excitació du associada una complicació en termes algebraics bastant grossa. A més cal veure que en la pauta de càlcul es comproven les restriccions en termes de valors promitjos o valors màxims, i és necessari fer un estudi més acurat mitjançant elements finits del comportament que tindrà la màquina.

Cas similar és el de la modelització en forma de circuit de la màquina per a estudiar-ne el comportament tèrmic per tal que no hi hagin sobreescalfaments. La associació de les diferents parts de la màquina en termes de resistències tèrmiques i del càlcul de les pèrdues en condicions nominals suposen un punt de dificultat afegida, ja que no és senzill fer-ne valoracions massa exactes. De totes maneres, la simplicitat de la topologia de la màquina i de la implementació de models corroborats fan que en aquest punt, les prediccions fetes en termes de càlcul analític i de comprovació mitjançant software especialitzat duguin a resultats gairebé idèntics.

És important reconèixer doncs la importància dels programes en elements finits utilitzats per a la validació dels càlculs analítics per a la comprovació de les restriccions electromagnètiques, així com de l'aspecte tèrmic. Finalment no s'ha d'oblidar tampoc la simulació final. Aquesta simulació permet veure el comportament dinàmic i el funcionament en condicions nominals de la màquina en condicions 'reals'.

Finalment dir que, la realització d'aquest projecte aporta doncs una visió general del procediment d'anàlisi d'emplaçaments per a l'estudi del recurs eòlic, i implementa aquelles metodologies que en permeten l'obtenció de resultats a partir de lectures reals. Així mateix, la recopilació de material dedicat al càlcul i disseny de màquines elèctriques, aporta una guia per

al procediment de càlcul de màquines síncrones multipolars i de la seva verificació mitjançant programari especialitzat.

Un cop realitzat tot aquest estudi i la seva verificació mitjançant simulació, només quedarien dues coses a fer, sotmetre'l a un procés d'optimització i poder comprovar experimentalment si tot el que s'ha explicat concorda amb els resultats en operació real.

10 Treball futur

Un cop realitzat tot l'estudi teòric sobre la màquina elèctrica dissenyada, havent-ne fet les simulacions corresponents i obtinguts els valors esperats en els resultats, queda pendent poder construir la màquina i comprovar-ne el funcionament en la realitat.

Procediments semblants han estat utilitzats en altres casos com per exemple l'article enumerat en la bibliografia [11], en el què es presenta l'estudi del disseny d'una màquina síncrona d'ímans permanents de 12kW, per a un generador eòlic i accionament directe.

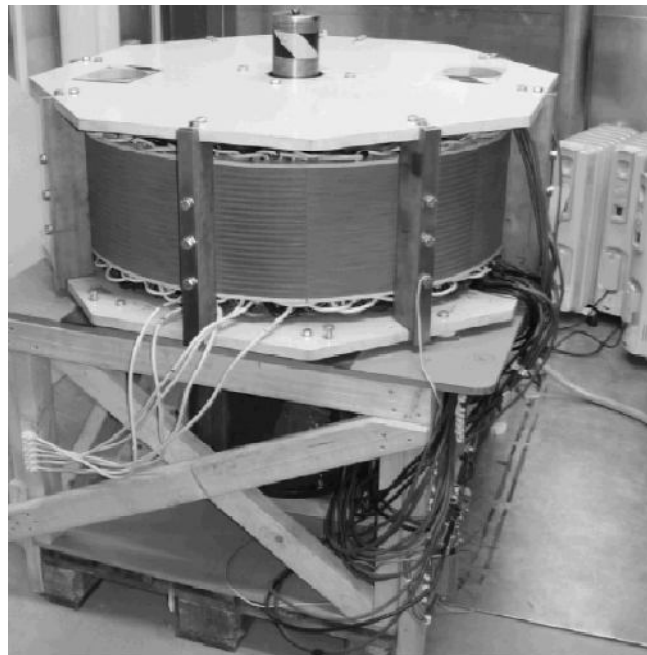


Figura 10.1 Màquina real

El treball que s'hauria de plantejar doncs, tindria els següents punts.

- Optimització del disseny si es considera oportú.
- Construcció de la màquina dissenyada.
- Mesura dels paràmetres característics en condicions nominals, potència de sortida, tensions i corrents, freqüència, resistència dels debanats...
- Comparació dels resultats analítics, els de simulació i els obtinguts en els assajos.
- Anàlisi i discussió dels resultats obtinguts.

Bibliografía

- [1] *Rodríguez Amenedo, J.L.; Burgos Díaz, J.C.; Arnalte Gómez, S. Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica.* Editorial Rueda, Madrid 2003
- [2] *Rosato, M.A. Diseño de máquinas eólicas de pequeña potencia.* Progensa S.A. Sevilla 1991
- [3] *Hamdi, E. S. Design of small electrical machines.* John Wiley & Sons Ltd. 1994
- [4] *Rapp, J. Teoría y cálculo de los bobinados eléctricos.* Editorial Vagma – J. Rapp Ed. Bilbao 1987
- [5] *Pyrhönen, J.; Jokinen, T.; Hrabovcová, V. Design of rotating electrical machines.* John Wiley & Sons Ltd. 2009
- [6] *Lindstrom, J. Thermal model of a Permanent-magnet motor for a hybrid electric vehicle.* Department of electric power engineering. Chalmers university of Technology, Göteborg, Sweden. 1999
- [7] *Mohan, Undeland, Robbins. Power electronics.* John Wiley & Sons Ltd. 2006
- [8] *Dubois, M.R.; Optimized permanent magnet generator topologies for direct-drive wind turbines.* Les imprimeries ABC, Canada . 2004
- [9] *Libert, F.; Soulard, J. Design study of a direct-driven surface mounted PM motor for low speed application.* Royal Institute of Technology. Sweden
- [10] *Kim, K-C; Lim S-B; Jang, K-B. Analysis on the direct driven high power PMG for wind turbine.* Hanyang University, Seoul
- [11] *Eriksson, S; Solum, A; Leijon, M; Bernhoff, H. Simulation and experiments on a 12 kW direct driven PM synchronous generator for wind power.* ScienceDirect. Renewable energy 33 (2008) 674-681
- [12] *VVAA. Small wind turbine market study 2008.* American Wind Energy Association
- [13] *Heikkilä, T. PM synchronous motor for industrial inverter applications – analysis and design.* Lappeenranta University of Technology
- [14] *Tápia, J. Introducción al diseño de máquinas eléctricas* Universidad de Concepción 2003

