

Disseny d'un generador eòlic de petita potència

ANNEX

Autor: MONJO MUR, LLUÍS

Director: BARGALLÓ PERPIÑÀ, RAMON

Convocatòria: JUNY 2009



Màster Interuniversitari UB - UPC
d'Enginyeria en Energia

Índex

1 Recursos eòlics. Estudi estadístic.....	1
1.1 Implementació en Matlab	1
2 Imans permanents	5
3 Material constructiu.....	7
4 Pauta de càlcul de màquines síncrones d'ímans permanents.....	11
4.1 Diagrama de flux	11
4.2 Restriccions de disseny.....	12
4.3 Pauta de càlcul	13
5 Estudi tèrmic.....	21
5.1 Circuit tèrmic equivalent	21
5.2 Resolució del model	25
5.3 Resolució del circuit tèrmic equivalent	25
5.5 Resolució model tèrmic en Matlab	26
5.4 Implementació model tèrmic en Matlab.....	26
6 Modelització de la màquina en elements finits.....	31
6.1 Procediment.....	31
6.2 Resultats	33

1 Recursos èòlics. Estudi estadístic

1.1 Implementació en Matlab

```
close all; clear all; clc;

%Llegeix fitxer meteocat
nom_fitxer='raval.txt';
fid=fopen(nom_fitxer,'r');
[ca,ce]= textread(nom_fitxer, '%f %n');
if i==1
    vv=ca;
    dv=ce;
end
if i>1
    vv=[vv;ca];
    dv=[dv;ce];
end
fclose(fid);

%CARACTERITZACIO DE LA VELOCITAT
%CORRECCIO A L'ALÇADA QUE TOQUI
h1=10;
h2=25;
alfa=0.2;
vv_h2=ca*(h2/h1)^alfa;

%Alçada de referencia
%ALÇADA DE CALCUL

if h2==h1
    velocitat=ca;
else
    velocitat=vv_h2;
end

%Grafica de vectors
%giro el grafic 90° porque el N es 0° i segons matlab 0° es l'est
direccio=90-ce;%f;
direccioRAD=direccio*pi/180;
[x,y]=pol2cart(direccioRAD,velocitat);
GR=compass(x,y,'b');
set(gcf, 'Color', [1 1 1]);
title 'Rosa dels vents v v[m/s] i d v(°)';
%Rosa dels vents
figure(2);
[ANGLE,FREQ]=rose(direccioRAD);
rose(direccioRAD);
set(gcf, 'Color', [1 1 1]);
title 'Rosa dels vents';
```

```

%histograma
v_max=18; %VELOCITAT MAXIMA DE VENT
x=0:1:v_max; %INTERVALS ASSOCIATS DE 1m/s
[N,INT]=hist(velocitat,x);
N_hora=N/2; %FREQUENCIA DE LA CLASSE - NOMBRE
TOTAL D'HORES DE CADA UN DELS INTERVALS
Hores_TOT=sum(N_hora); % NOMBRE TOTAL D'HORES
COMPTABILITZADES

N_hora_REL=N_hora/Hores_TOT; %FREQUENCIA RELATIVA -- FREQ.
CLASSE / NOMBRE D'HORES
acumulat=0;
for i=1:1:v_max+1
    acumulat=0;
    for j=1:1:i
        acumulat=acumulat+N_hora_REL(j);
    end
    N_hora_REL_ACUM(i)=acumulat; %FREQUENCIA RELATIVA ACUMULADA
end
disp(N_hora_REL_ACUM);

figure(3);
bar(INT,N_hora);
title 'Corba de freqüencies';
xlabel('v(m/s)');
ylabel('Hores');
axis([-0.5 16 0 max(N_hora)]);
set(gcf, 'Color', [1 1 1]);
etiqueta=strcat('Hores totals:',num2str(Hores_TOT));
text(12,70,etiqueta);

v_promig=sum(INT*N_hora_REL'); %VELOCITAT PROMIG
v_mediana=median(ca); %VELOCITAT MEDIANA
v_varianza=var(ca); %VARIANÇA DE LA V
v_desviacio=sqrt(v_varianza); %DESVIACIO TIPICA DE V

disp('Resum dades')
x',N_hora',N_hora_REL,N_hora_REL_ACUM
disp(' ');

%grafica de freq acumulada

figure(4);
bar(INT,N_hora_REL_ACUM);
hold on
plot(INT,N_hora_REL_ACUM,'g','linewidth',3);
hold off
title 'Corba de freqüencies acumulades';
set(gcf, 'Color', [1 1 1]);
xlabel('v(m/s)');
ylabel('Frequencia relativa acumulada');
axis([0 v_max 0 1.02]);

%grafica de duracio de velocitat
figure(5);
plot(8760*N_hora_REL_ACUM,12-INT);
title 'Corba de duracio de velocitat';
set(gcf, 'Color', [1 1 1]);
xlabel('hores/any');
ylabel('v(m/s)');

```

```

axis([0 8770 0 13]);

%calcul parametres weibull
max=size(INT)-1;
for i=2:1:max(2)
    if N_hora_REL_ACUM(i)~=1
        w_v(i)=log(INT(i));
        w_f(i)=log(log(1/(1-N_hora_REL_ACUM(i))));
    else
        i=max(2);
    end
end

param_regressio=polyfit(w_v,w_f,1);
param_k=param_regressio(1);
param_c=exp(-param_regressio(2)/param_regressio(1));

%corba de duracio de velocitat
figure(6);
v=0:1:v_max;
for i=1:1:v_max+1
    v=i;v;/2;
    p(i)=(param_k/param_c)*(v/param_c)^(param_k-1)*exp(-
(v/param_c)^param_k);
    p_acum(i)=1-exp(-(v/param_c)^(param_k));
end

plotyy(INT,p,INT,p_acum);
title 'Funcio densitat de probabilitat';
xlabel('v(m/s)');
ylabel('p(v)');
set(gcf, 'Color', [1 1 1]);
etiqueta_w=strcat('Parametre k:',num2str(param_k));
text(7,0.1,etiqueta_w);
etiqueta_w2=strcat('Parametre c:',num2str(param_c));
text(7,0.08,etiqueta_w2);

%densitat de potencia del vent
densitat_aire=1.23;
cp=0.5;
p_w_dens=0.5*cp*densitat_aire*(INT.^3);           %POTENCIA ELECTRICA
DISPONIBLE
p_w_rel_dens=p_w_dens.*N_hora_REL;                 %POTENCIA ELECTRICA
relativa DISPONIBLE A L'ANY
p_w_ave_dens=sum(p_w_rel_dens);                    %CALCUL DENSITAT
PROMIG DE POTENCIA EOLICA DISPONIBLE
disp(p_w_ave_dens);                                %MOSTRAR DENSITAT
PROMIG DE POTENCIA EOLICA DISPONIBLE
e_w=p_w_rel_dens*8760;                             %ENERGIA HORARIA
DISPONIBLE
figure(8);
plotyy(INT,p_w_rel_dens,INT,p_w_dens,'bar','plot');
set(gcf, 'Color', [1 1 1]);
xlabel('v(m/s)');
ylabel('Densitat de potencia relativa - Potencia W (blau)');
axis auto;
disp(p_w_dens')
disp(e_w')                                         %MOSTRAR ENERGIA
ELECTRICA DISPONIBLE A L'ANY

```


2 Imans permanents

Els imans permanents són materials que presenten un camp magnètic remanent sense requerir energia externa després de la seva magnetització inicial, aquesta característica fa que els materials siguin utilitzats en una gran varietat d'aplicacions en especial la construcció de màquines elèctriques. La seva evolució ha estat creixent en els darrers últims cinquanta anys sobretot en el grau de qualitat de les seves propietats. Les investigacions en nous materials han dut a imans més compactes i de major eficiència.

La característica principal dels imans permanents, és que estan constituïts de manera que els moments magnètics dels seus dominis es poden reorientar amb relativa dificultat, pel que requereixen una major energia per orientar els dominis que els materials ferromagnètics habituals. Aquesta dificultat de reorientació es reflexa en les corbes d'histèresi, les que resulten més àmplies.

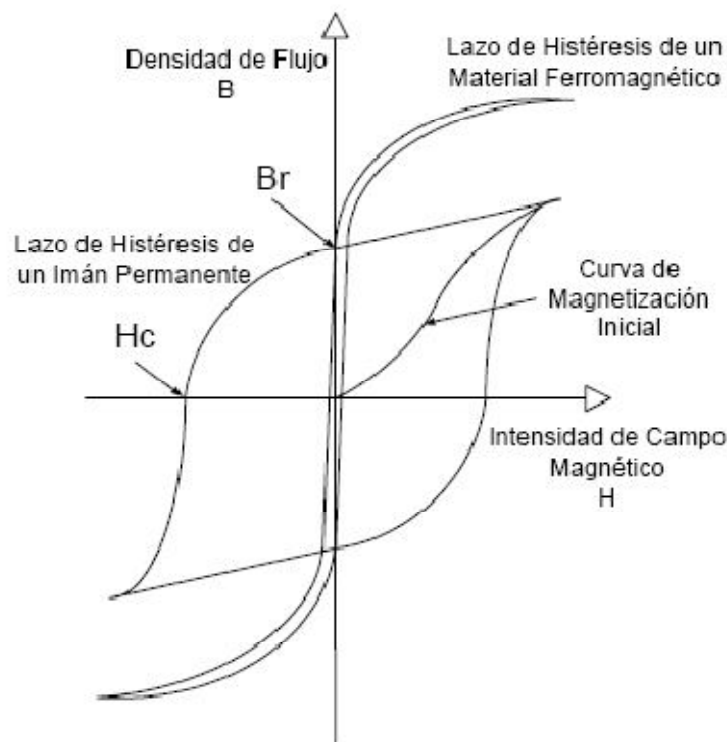


Figura 2.1 Corba B-H d'un imant permanent

En general els imans permanents treballen en el segon i el quart quadrant, on la direcció de intensitat de camp magnètic H i la inducció magnètica B són oposades.

En el segon quadrant la corba B-H és denominada 'corba de desmagnetització'. Els principals punts característics de desmagnetització són els següents:

- i. Remanència magnètica: Densitat de flux magnètic de l'iman quan la intensitat de camp que se li aplica és nul·la.
- ii. Força coercitiva: Si la intensitat de camp magnètic s'incrementa en polaritat oposada a través de la corba de desmagnetització i la densitat de flux es fa zero, la intensitat de camp present es denomina força coercitiva i es designa H_c .
- iii. Producte d'energia i producte d'energia màxim: El valor absolut del producte de la densitat de flux magnètic i la intensitat de camp en cada punt a través de la corba s'anomena producte d'energia. El seu valor màxim és el valor de la energia interna de l'iman.

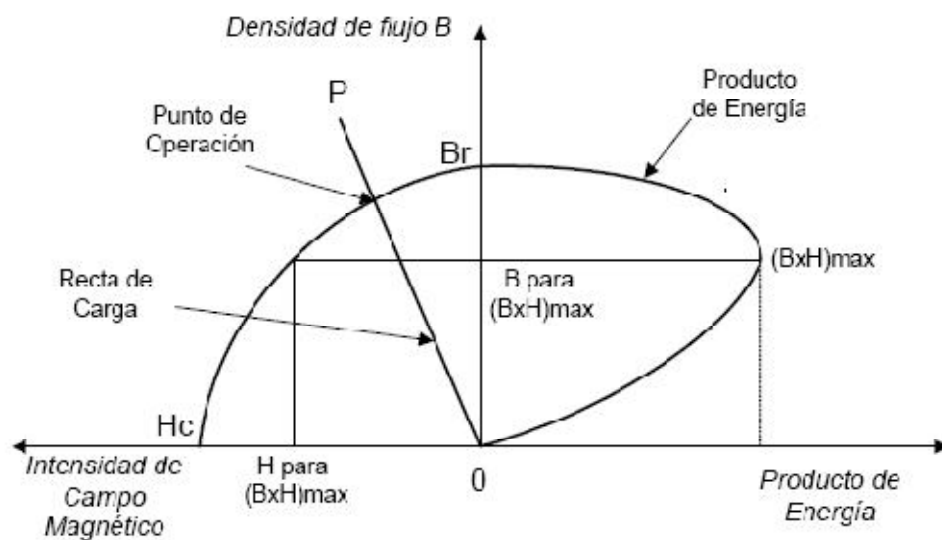


Figura 2.2 Punts característics

Una altra propietat important en un imant permanent és la seva temperatura de Curie (T_c), que és la temperatura crítica sobre la que un material ferromagnètic es torna paramagnètic. Habitualment s'especifica també quina és la temperatura màxima d'operació generalment molt per sota de T_c .

3 Material constructiu

A continuació es descriuen les propietats magnètiques i les pèrdues característiques del material utilitzat en la construcció del generador a partir de les característiques donades pel fabricant.

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 3.1 Material constructiu

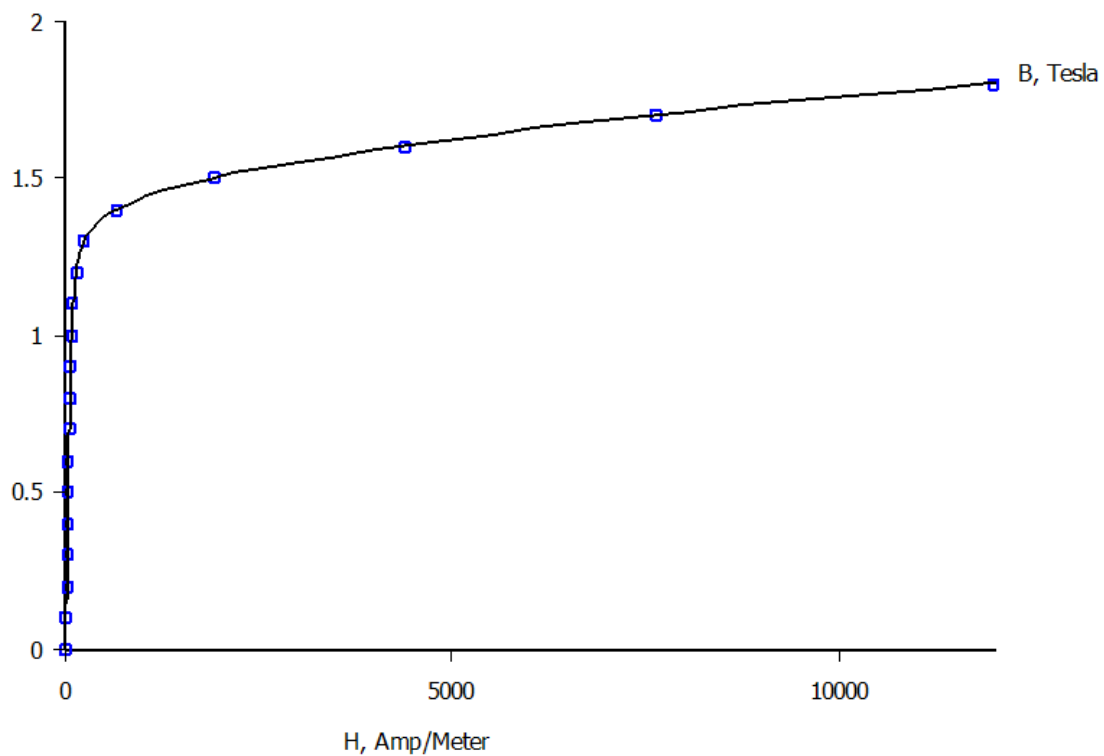


Figura 3.1 Característica B-H

Cogent Power M235-35A Fully-processed Non-oriented Silicon Steel				
.35 mm (.014 inch, 29 gauge)				
Magnetizing Force in Oersteds and Amperes per meter				
B (Gauss)	Oe	A/m		
	50 hz		60 Hz	
1000	0,310	24,7	0,344	27,4
2000	0,410	32,6	0,435	34,6
3000	0,479	38,1	0,498	39,6
4000	0,542	43,1	0,554	44,1
5000	0,606	48,2	0,615	48,9
6000	0,678	53,9	0,686	54,6
7000	0,763	60,7	0,769	61,2
8000	0,865	68,8	0,871	69,3
9000	0,997	79,3	1,00	79,9
10000	1,18	93,7	1,19	94,5
11000	1,45	115	1,46	116
12000	1,96	156	1,97	157
13000	3,27	260	3,29	262
14000	8,67	690	8,72	694
15000	24,5	1950	24,6	1960
16000	55,4	4410	55,7	4430
17000	95,9	7630	96,3	7660
18000	151	12000	151	12000

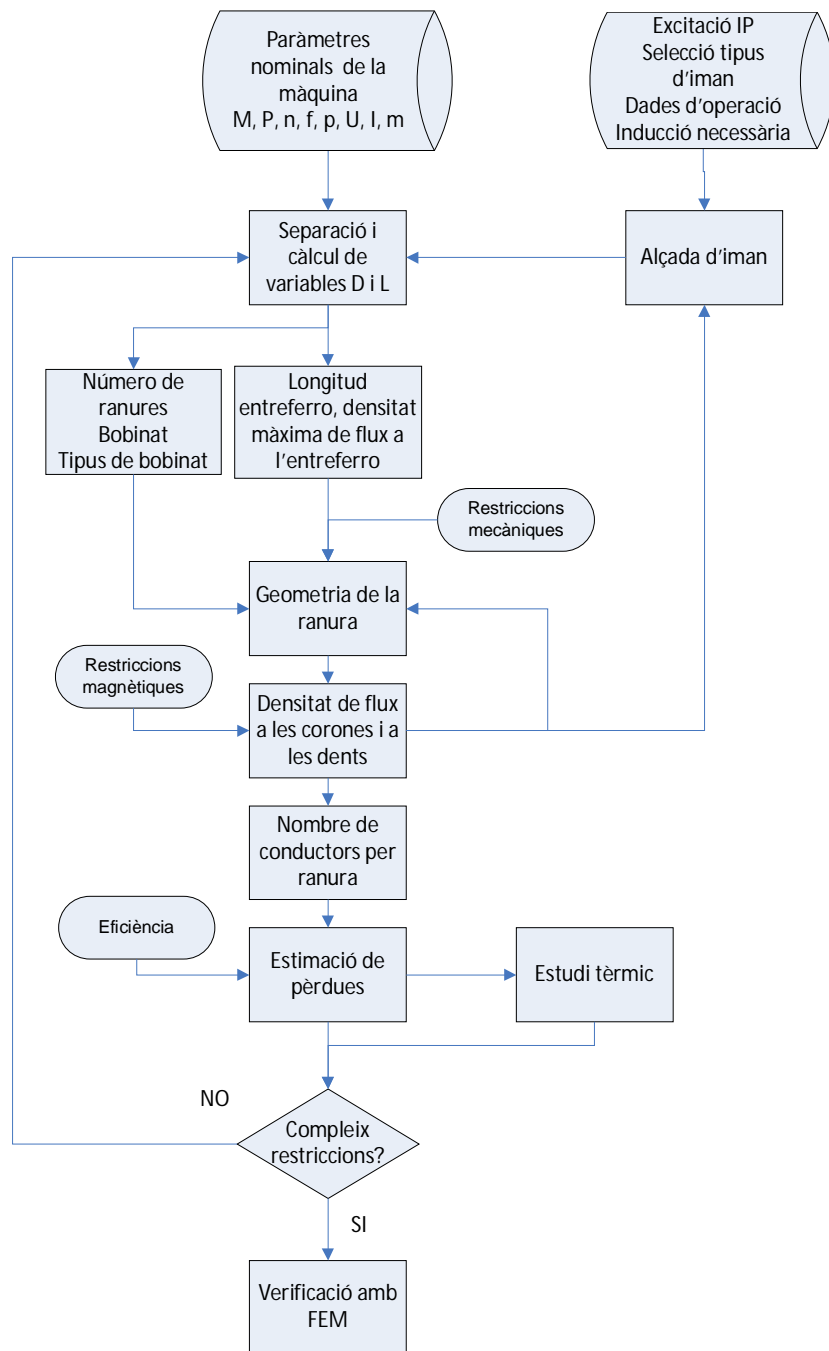
Taula 3.2 Característica B-H

Cogent Power M235-35A Fully-processed Non-oriented Silicon Steel						
.35 mm (.014 inch, 29 gauge)						
Core Loss in Watts per pound and Watts per kilogram						
	W/lb	W/kg				
	50 Hz		60 Hz		100 Hz	
1000	0,009	0,020	0,01	0,022	0,02	0,044
2000	0,027	0,060	0,03	0,066	0,06	0,132
3000	0,050	0,110	0,06	0,132	0,140	0,309
4000	0,091	0,200	0,110	0,242	0,220	0,485
5000	0,132	0,290	0,160	0,353	0,320	0,705
6000	0,172	0,380	0,210	0,463	0,440	0,970
7000	0,227	0,500	0,280	0,617	0,570	1,26
8000	0,281	0,620	0,340	0,749	0,710	1,56
9000	0,349	0,770	0,430	0,948	0,870	1,92
10000	0,417	0,920	0,510	1,12	1,05	2,31
11000	0,499	1,10	0,610	1,34	1,25	2,76
12000	0,594	1,31	0,730	1,61	1,48	3,26
13000	0,708	1,56	0,870	1,92	1,76	3,88
14000	0,871	1,92	1,08	2,38	2,12	4,67
15000	1,02	2,25	1,26	2,78	2,51	5,53
16000	1,15	2,53	1,42	3,13		
17000	1,25	2,75	1,54	3,39		
18000	1,33	2,94	1,65	3,64		

Taula 3.3 Pèrdues característiques del material

4 Pauta de càlcul de màquines síncrones d'ímans permanents

4.1 Diagrama de flux



4.2 Restriccions de disseny

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	$\delta[m] \geq 0,0002 + 0,003 \sqrt{\frac{D_i L}{2}}$
	Longitud d'íman	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}	$B_{sy} \leq 1,4T$
Prevenió 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 preu	Pèrdues del coure	P_{cu}	$P_{cu} \leq 700W$
	Massa d'íman	m_{mag}	$m_{mag} \leq 5,5kg$
Límit de pes	Massa de la màquina	m_{tot}	$m_{tot} \leq 150kg$

Taula 4.1 Restriccions del disseny

4.3 Pauta de càlcul

Potència nominal elèctrica

$$P_n = \sqrt{3} \cdot V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n \quad (4.1)$$

Parell nominal

$$M_n = \frac{P_n}{\Omega_n} \quad (4.2)$$

Inducció mitja a l'entreferro

$$B_{g_{av}} = \frac{\phi}{\tau_p \cdot L} \quad (4.3)$$

On ϕ és el flux per pol de la màquina, τ_p és el pas polar i L la longitud axial del paquet de xapes.

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} \quad (4.4)$$

Sent p el nombre de parells de pols.

Altament es pot obtenir la inducció màxima a l'entreferro com,

$$\hat{B}_{g_1} = \frac{4}{\pi} B_g \sin(\alpha) \quad (4.5)$$

I a partir d'aquesta la promig com,

$$B_{g_{av}} = \frac{2}{\pi} \hat{B}_{g_1} \quad (4.6)$$

La capa de corrent es pot escriure com,

$$A = \frac{Z \cdot I_z}{\pi \cdot D} \quad (4.7)$$

On Z és el número total de conductors de la màquina i I_z la corrent que circula per cada un dels conductors.

El parell intern de la màquina es pot escriure com,

$$M = \frac{\pi}{2} \cdot B_{g_{av}} \cdot A \cdot D^2 \cdot L \quad (4.8)$$

Establint una relació entre D i L , o bé fixant-les com a condició inicials ja es té el dimensionament de la màquina pel que fa a diàmetre i longitud.

Iman

Corba característica del iman

$$B_m = B_r + \mu_r \mu_o H_m \quad (4.9)$$

Densitat de flux magnètic creada per un iman d'alçada determinada

$$B_m = \frac{B_r}{1 + \frac{\delta \mu_r}{h_m}} \quad (4.10)$$

Factor de recobriment polar

$$\Psi = \frac{\alpha}{\tau_p} \quad (4.11)$$

Força magnetomotriu

$$\hat{F}_1 = \frac{4}{\pi} \frac{m}{2} \frac{T_s \xi}{2p} \sqrt{2} \hat{I} \quad (4.12)$$

Desmagnetització en càrrega

$$\Delta B = \mu_o \frac{\hat{F}_1}{\delta + \frac{h_m}{\mu_r}} \quad (4.13)$$

Entreferro

$$\delta[m] \geq 0,0002 + 0,003 \sqrt{\frac{D \cdot L}{2}} \quad (4.14)$$

Bobinat

Angle elèctric

$$\gamma_e = 360 \frac{P}{Q_s} \quad (4.15)$$

Nombre de ranures per pol i fase

$$q = \frac{Q_s}{2pm} \quad (4.16)$$

Factor de distribució

$$\xi_d = \frac{\sin\left(q \frac{\gamma_e}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{\gamma_e}{2}\right)} \quad (\text{si } q > 1) \quad (4.17)$$

Pas polar

$$y_p = \frac{Q_s}{2p} \quad (4.18)$$

Factor de pas

$$y_k = 1 \quad (4.19)$$

Factor d'escurçament

$$\xi_a = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4.20)$$

$$\frac{\alpha}{2} = 90 \frac{y_k}{y_p} \quad (4.21)$$

Factor de bobinat

$$\xi_w = \xi_d \xi_a \quad (4.22)$$

Fem induïda

$$E = 4,44 \cdot f \cdot \phi \cdot T_s \cdot \xi_w \quad (4.23)$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega \cdot \xi_w \cdot q \cdot N_{cr} \cdot \hat{B}_g \cdot L \cdot (D - \delta) \quad (4.24)$$

Induccions

A la corona estatòrica

$$B_{cs} = \frac{\phi}{h_{sy} L} \quad (4.25)$$

A la corona rotòrica

$$B_{cs} = \frac{\phi}{h_{ry} L} \quad (4.26)$$

A les dents

$$B_{ts} = B_{av} \frac{\pi D}{Q_s b_{ts}} \quad (4.27)$$

Paràmetres de la màquina

Resistència per fase

$$R_{phase} = \rho_{cu} \frac{(pL + (D_i + h_{ss})\pi k_{endw}) N_{cr}^2 q}{f_s A_s} \quad (4.28)$$

Inductància magnetitzant

$$L_m = \frac{\mu_o}{\pi} m \frac{D_i L}{\delta_{eq}} \left(\frac{T_s \xi}{p} \right)^2 \quad (4.29)$$

Entreferro equivalent

$$\delta_{eg} = (\delta + l_m) \cdot k_c \cdot k_{sat} \quad (4.30)$$

Pèrdues

Pèrdues per histèresi

$$P_H = k_H \cdot f \cdot V \cdot B_m^\alpha \quad (4.31)$$

Pèrdues per corrents de Foucault

$$P_F = \frac{\pi^2}{6} f^2 B_m^2 d_{lam}^2 \sigma V \quad (4.32)$$

Pèrdues per efecte Joule

$$P_J = 3 \cdot R_f \cdot I^2 \quad (4.33)$$

Pèrdues addicionals

$$P_{add} = 1,8\% P_n \quad (4.34)$$

Rendiment

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + P_H + P_F + P_J + P_{add}} \quad (4.35)$$

Característiques nominals - Hipòtesis inicials

P [W]	2500
n [rpm]	272,72
f [Hz]	50
p	11
R·cos(φ)	0,9
A [A/m]	10000
U [V]	230
Bg [T] (0,7-0,9)	0,8808
2·alfa [°]	120
L/D	1
Bobinat	0,953
m	3

$$I_n = \frac{P_n}{\eta \sqrt{3} V I_n \cos \varphi}$$

In [A]
4,03

$$M_n = \frac{P_n}{\Omega_n}$$

Mi [Nm]
87,54

$$\hat{B}_g = \frac{4}{\pi} B_g \sin(\alpha)$$

Bg_pic_1 [T]
0,971

$$B_{ave} = \frac{2}{\pi} \hat{B}_g$$

Bg_av [T]
0,618

$$D^2 L = \frac{M}{\pi^2 B_{ave} A}$$

(D^2)L
0,00811468

D [mm]
200,95

Flux

3,53E-03

0,0055476

200,951147

16125,79437

0,005852455 Flux

272,7272727

Característiques de l'iman

Iman NdFeB 32

Br [T]
1,160

Hm [A/m]
883310

Ur
1,045

gamma
0,53

228

Corba de l'iman $B_m = B_r + \mu_r \mu_0 H_m$

Bobinat

Angle elèctric

$$\gamma_e = 360 \frac{p}{Z_s} \text{ angle } e$$

188,571

Factor de distribució

$$\xi_d = \frac{\sin\left(\frac{\gamma_e}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{\gamma_e}{2}\right)} \text{ (si } q > 1)$$

kd
1,00

Número de ranures per pol i fase

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

0,31818182 (3/8)

Pas polar

$$Y_p = \frac{Z_s}{2p}$$

Factor de pas

$$y_k$$

1

Factor d'escurçament

$$\xi_a = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \frac{\alpha}{2} = 90 \frac{y_k}{y_p}$$

ka
0,99720

Factor de bobinat

$$\xi_b = \xi_d \xi_a$$

f bobinat
0,9519

Comprovació de flux i induccions

Inducció a les dents (1,8 max)

$$B_b = B_{av} \frac{\pi D}{Z_p b_b}$$

Bts = 0,740
Bts_leak = 0,46

Inducció a la corona estàtica (1,4 max)

$$B_{cs} = \frac{\phi}{h_{cs} L}$$

Bcs = 0,88

$$B_{av} = \frac{B_{cs} \frac{2}{p} \left(\frac{D}{2} - \delta \right) (1 - k_{ind\delta})}{2b_{cs}}$$

$$k_{ind\delta} = \frac{17p/56 - 13/14}{100}$$

Conductors

Densitat de corrent [A/mm²]

Delta = 6

Aïllament [mm]

0,1

factor d'ocupació

0,45

Diàmetre conductor [mm]

$$\frac{I}{\Delta} = \frac{\pi d_c^2}{4}$$

Àrea d'un conductor

Ac [mm²] = 0,80

Àrea total conductors

Ac_tot [mm²] = 77,85

$$A_{ke} = N_{cr} \frac{\pi d_c^2}{4}$$

$$f_{oc} = \frac{A_{ke}}{A_s}$$

Delta_Real

4,55

$$\Delta = \frac{N I}{f_{oc} A_s}$$

Normalitzat

dc [mm] = 1,024

Característiques en càrrega

Força magnetomotriu

$$\hat{F}_1 = \frac{4 m N^2}{\pi 2 2p} \sqrt{2I}$$

Fmmd [A] = 435,22

delta' = 3,57

$$\Delta B = \mu_0 \frac{\hat{F}_1}{\delta'}$$

Delta_B [T] = 0,153

si > B / Fixar Delta_B i recalcular l'iman i la resta de paràmetres

Delta_B [T] = 0,387

delta' [mm] = 0,21146324

Im [mm] = -0,5105209 a K44

Delta_B < B_s

no

Paràmetres

Factor de final de bobinat

$$k_{endw} = 1,36$$

Resistència per fase

$$R_{phase} = \rho_{cu} \frac{(pL + (D_i + h_{st}) \pi k_{cond}) N_{cc}^2 q}{f_s A_s}$$

R fase [ohm/f] a 20°C

2,49

a 80°C

3,07

PJ_TOT [W]

149,2

Coefficient de carter

$$k_C = \frac{\tau_s}{\tau_s - b_{open} b_{st1} k_{open}^2 + 5 \delta}$$

kc_teoric

1,043

kc

1,3

Coefficient de saturació

$$k_{sat} = 1$$

Entreferro equivalent

$$\delta_{eg} = (\delta + l_m) k_c \cdot k_{sat} = 0,00481$$

Inductància magnetitzant

$$L_m = \frac{\mu_0}{\pi} \frac{D_i L}{\delta_{eg}} \left(\frac{T_s \xi}{p} \right)^2$$

Lm [H]

0,0071

POLS LLISOS - Ld = Lq = Lm

	Estator	Rotor
Volum	0,00359	0,00129
Pèrdues per histèresi	17,101017 W	10,282117
Pèrdues per foucoults	1,7059E-06 W	6,13E-07
Pèrdues addicionals	45	
Total pèrdues	221,62	W (Joul+Hist+Fouc)
Rendiment	0,9186	d

5 Estudi tèrmic

5.1 Circuit tèrmic equivalent

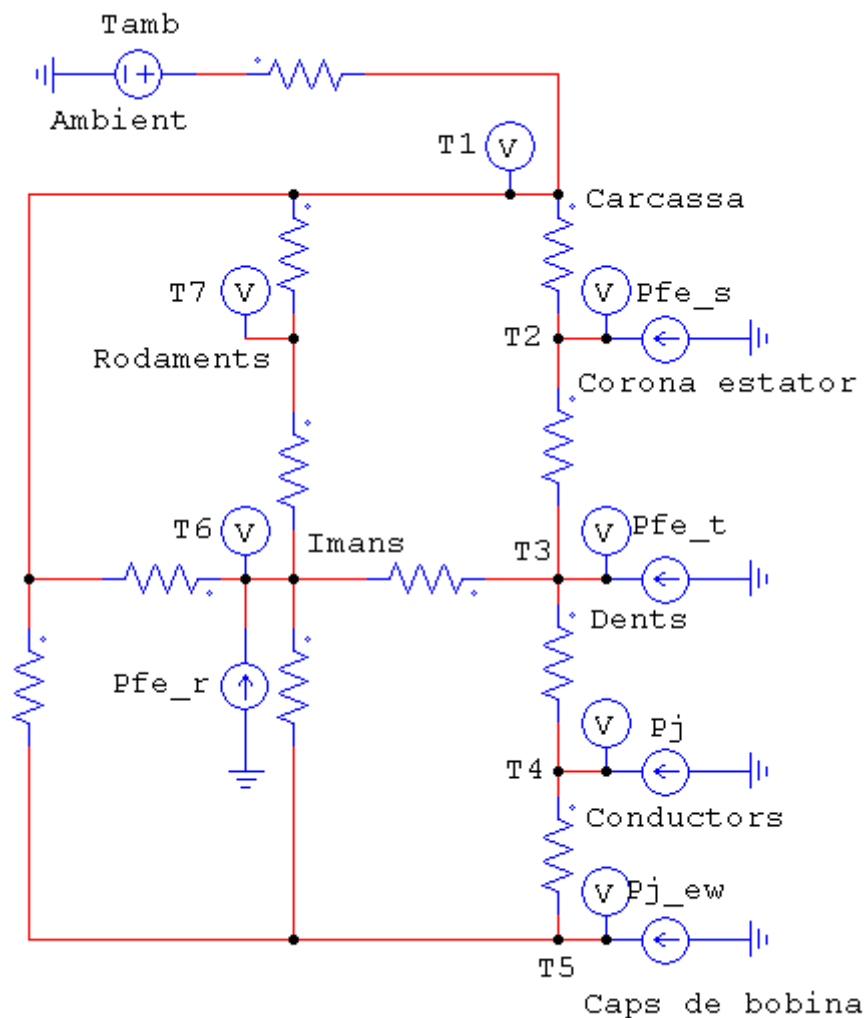


Figura 5.1 Circuit tèrmic equivalent en règim permanent

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.

La pauta de càlcul que permet la obtenció dels valors numèrics de les diferents resistències és la següent.

Resistència tèrmica	
R_{th1}	Carcassa – Exterior
R_{th2}	Carcassa – Corona
R_{th3}	Corona - Dent
R_{th4}	Conductors
R_{th5}	Caps de bobina
R_{th6}	Aire intern - Carcassa
R_{th7}	Aire intern - Rotor
R_{th8}	Aire intern – Caps de bobina
R_{th9}	Entreferro
R_{th10}	Rotor – Rodaments
R_{th11}	Carcassa - Rodaments

$$R_{th1} = \frac{1}{2} R_{thfr} = \frac{1}{2} \frac{h_{fr}}{\pi L \lambda_{al} (D_o + h_{fr})} \tag{5.1}$$

$$R_{thys} = \frac{\ln\left(\frac{D_o / 2}{D_i / 2 + h_{ss}}\right)}{2\pi L \lambda_{fe}} \tag{5.2}$$

$$R_{thcy} = \frac{g_g}{\lambda_g A_g} \tag{5.3}$$

$$R_{th2} = \frac{1}{2} R_{thfr} + \frac{1}{2} R_{thys} + R_{thcy} \tag{5.4}$$

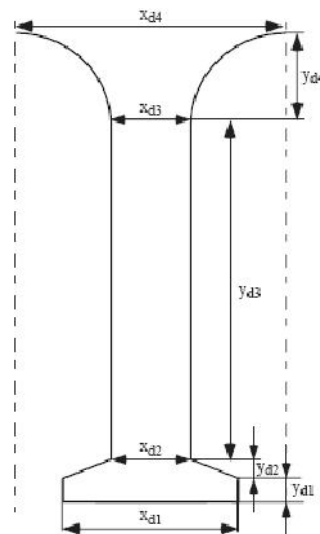


Figura 5.2 Geometria de les dents

$$R_{thd} = \frac{1}{\lambda_{Fe} Q_s L} \left[\frac{y_{d1}}{x_{d1}} + \frac{y_{d3}}{x_{d3}} + \frac{y_{d2}}{x_{d1} - x_{d2}} \left(\ln \left| \frac{x_{d1} y_{d2}}{x_{d1} - x_{d2}} \right| - \ln \left| y_{d2} - \frac{x_{d1} y_{d2}}{x_{d1} - x_{d2}} \right| \right) + \right. \\ \left. - \frac{\pi}{4} + \frac{a}{\sqrt{a^2 - 1}} \arctan \left(\frac{a+1}{\sqrt{a^2 - 1}} \right) \right] \quad (5.5)$$

$$a = \frac{x_{d3} + 2y_{d4}}{2y_{d4}} \quad (5.6)$$

$$R_{th3} = \frac{1}{2} (R_{thd} + R_{thys}) \quad (5.7)$$



Figura 5.3 Geometria de les ranures

$$b = \frac{x_{Q3} + x_{Q2}}{2} - 2d \quad (5.8)$$

$$h = \frac{2A_Q}{x_{Q3} + x_{Q2}} \quad (5.9)$$

$$R_{xo} = \frac{b}{h\lambda_a} \quad R_{yo} = \frac{h}{b\lambda_a} \quad (5.10)$$

$$R_{ix} = \frac{d_i}{h\lambda_i} + \frac{d_A}{h\lambda_A} \quad R_{iy} = \frac{d_i}{b\lambda_i} + \frac{d_A}{b\lambda_A} \quad (5.11)$$

$$R_x = \frac{1}{2} \left(R_{ix} + \frac{R_{xo}}{6} \right) \quad R_y = \frac{1}{2} \left(R_{iy} + \frac{R_{yo}}{6} \right) \quad (5.12)$$

$$R_{th4} = \frac{R_x R_y}{Q_s L (R_x + R_y)} \left(1 - \frac{R_{xo} R_{yo}}{720 (R_{xo} + R_{yo})} \right) \quad (5.13)$$

$$R_{thw} = \frac{L_{av}}{3A_{cu}\lambda_{cu}} \quad (5.14)$$

$$R_{th5} = \frac{R_{thw}}{2Q_s} \quad (5.15)$$

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1 A_1} \quad \alpha_1 = 15 + 6,75^{0,65} + v_r^{0,65} \quad (5.16)$$

$$A_1 = 2A_{es} + A_{yf} \quad (5.17)$$

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_2 A_2} \quad \alpha_2 = 16,5^{0,65} v_r^{0,65} \quad (5.18)$$

$$A_2 = 2b_{fin} h_{fin} n_{fin} + \pi r_\delta^2 \quad (5.19)$$

$$R_3 = \frac{1}{\alpha_3 A_3} \quad \alpha_3 = 6,5 + 5,25^{0,65} v_r^{0,6} \quad (5.20)$$

$$A_3 = A_{ew} = \pi (L_{av} - L) \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (5.21)$$

Les resistències R6, R7, R7 conformen l'equivalent en triangle de les resistències R1, R2 i R3.

$$(Ta)_m = \frac{\Omega_m^2 r_\delta \delta^3}{v^2} \quad (5.22)$$

$$Nu = 0,409(Ta)_m^{0,241} - 137(Ta)_m^{-0,75} \quad (5.23)$$

$$\alpha_\delta = \frac{Nu\lambda_a}{2\delta} \quad (5.24)$$

$$R_{th\delta} = \frac{1}{\alpha_s 2\pi r_\delta L} \quad (5.25)$$

$$R_{thyr} = \frac{\ln\left(\frac{D_a}{2} + h_{yr}\right) - \ln\left(\frac{D_a}{2}\right)}{2\pi L \lambda_{fe}} \quad (5.26)$$

$$R_{thpm} = \frac{\ln\left(\frac{D_a}{2} + h_{yr} + h_{pm}\right) - \ln\left(\frac{D_a}{2} + h_{yr}\right)}{2\pi L \lambda_{pm}} \frac{2\pi}{2p\gamma_m} \quad (5.27)$$

$$R_{thsl} = \frac{h_{sl}}{\pi D_{ir} L \lambda_{sl}} \frac{2\pi}{2p\gamma_m} \quad (5.28)$$

$$R_{thins} = \frac{d_{1r}}{\pi(D_a + 2h_{yr})L\lambda_{1r}} \frac{2\pi}{2p\gamma_m} \quad (5.29)$$

$$R_{th9} = R_{th\delta} + \frac{1}{2}R_{thd} + R_{thsl} + \frac{1}{2}R_{thpm} \quad (5.30)$$

$$R_{thsh} = \frac{l_{bb}}{\pi\left(\frac{D_a}{2}\right)^2 \lambda_{sh}} \quad (5.31)$$

$$R_{thb} = 0,45(0,12 - d_b)(33 - \Omega_m d_b) \quad (5.32)$$

$$R_{th10} = \frac{1}{2}R_{thpm} + R_{thins} + R_{thyr} + R_{thcr} + \frac{1}{2}R_{thsh} + \frac{1}{4}R_{thb} \quad (5.33)$$

$$R_{th11} = \frac{1}{4}R_{thb} \quad (5.34)$$

5.2 Resolució del model

Els valors de les resistències tèrmiques fruit de l'aplicació del model tèrmic de la màquina síncrona d'ímans permanents i implementats amb Matlab són els següents.

	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		

5.3 Resolució del circuit tèrmic equivalent

Per al càlcul de les temperatures en règim permanent en cada un dels nodes del circuit tèrmic equivalent es pot utilitzar el mètode de càlcul provinent de la teoria de circuits. Es tracta d'aplicar el mètode dels nusos, que enuncia la següent igualtat.

$$[G] \cdot [\Theta] = [P]$$

On G és la matriu de conductàncies tèrmiques, quadrada i de dimensió el nombre de nodes que tingui el circuit equivalent.

P, és el vector que conté les pèrdues de cada un dels nodes.

Θ , és el vector de temperatures en cada un dels nodes del circuit.

5.5 Resolució model tèrmic en Matlab

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
Adicionals	0
Pèrdues totals	171,4
Taula 5.2 Distribució de pèrdues	

Amb les resistències tèrmiques i la distribució de pèrdues que s'han trobat, la temperatura als diferents punts de la màquina en règim permanent és la que segueix.

	Temperatura [°C]
Amb Ambient	
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	

5.4 Implementació model tèrmic en Matlab

```
%Model tèrmic de la màquina SIP
```

```
clear all;
```

```

clc;

%Parametres de la màquina
p=11; f=50; n=60*f/p;
%Perdues
Pfe_s=23; Pfe_r=0; Pfe_t=34;
Pj_c=105; Pj_ew=45; Padd=0;

%Geometria maquina
Do=269/1000; Di=209/1000; L=273/1000;
stack_f=0.95; Qs=21;
ag=0.7/1000; Dir=201.6/1000; Da=150/1000;
rd=104.15/1000;
hs=19/1000;
kfe=0.97;
tp=pi*Di/(2*p);
hpm=3/1000;
gammam=11*pi/180;
hfr=5/1000; % frame
dwew=1.06/1000; % end winding
lew=200/1000;

%Geometria de ranures i dents
xd1=28.46/1000; xd2=24.98/1000 ; xd3=27.72/1000; xd4=36.81/1000; %dent
yd1=2/1000; yd2=1/1000; yd3=15/1000; yd4=1/1000;
xq1=2.8/1000 ; xq2=7.12/1000 ; xq3=8.88/1000 ;
a=(xd3+2*yd4)/(2*yd4);
Aq=147/1000/1000;
fs=0.5;

%kinetic visccosity air
ua=1.689e-5;; %m2/s

%Materials aïllants
dlr=0.005/1000; %imans-rotor
hsl=0/1000;

%Bearings geometry
lbb=405/1000; db=20/1000;

%Conductivitats tèrmiques dels materials
landa_fe=97; landa_cu=394; landa_al=200; landa_sh=52;
landa_pm=9;
landa_wi=0.2; landa_a=0.025; landa_sl=0.5;
landa_mi=0.5; landa_si=0.2; landa_q=0.2;

Rtframb=1/(25*2*pi*L*(Do+2*hfr));

Rthfr=hfr/(pi*L*landa_al*(Do+hfr));

%Rth1
Rth1=Rtframb+1/2*Rthfr;

lu=kfe*L;
Rthys=(log(Do/2)-log(Di/2+hs))/(2*pi*lu*landa_fe);
Rthcy=0.001154;

%Rth2
Rth2=1/2*Rthys+1/2*Rthfr+Rthcy;

```

```

%Rth3
Rthd_31=yd1/xd1;
Rthd_32=yd3/xd3;
Rthd_33=yd2/(xd1-xd2)*(log(abs(xd1*yd2/(xd1-xd2)))-log(abs(yd2-
xd1*yd2/(xd1-xd2))));
Rthd_34=-pi/4+a/sqrt(a^2-1)*atan((a+1)/sqrt(a^2-1));

Rthd=(1/(landa_fe*Qs*lu))*(Rthd_31+Rthd_32+Rthd_33+Rthd_34);

Rth3=1/2*(Rthys+Rthd);
%-----

d1=0.1/1000;
dA=0.005/1000;
d=d1+dA;

b=(xq3+xq2)/2-2*d;
h=2*Aq/(xq3+xq2)-2*d;
Rxo=b/(h*landa_q);
Ryo=h/(b*landa_q);
Rix=d1/(h*landa_si)+dA/(h*landa_a);
Riy=d1/(b*landa_si)+dA/(b*landa_a);
Rx=1/2*(Rix+Rxo/6);
Ry=1/2*(Riy+Ryo/6);

Rth4=Rx*Ry/(Qs*lu*(Rx+Ry))*(1-Rxo*Ryo/(720*(Rxo+Ryo)));
%-----

Rthw=(L+tp*1.2+0.05/1000)/(3*Aq*fs*landa_cu);
Rth5=Rthw/(2*Qs);
%-----

vr=272.72*2*pi/60*(Dir/2);

alfa1=15+6.75^0.65+vr^0.65;
alfa2=16.5^0.65*vr^0.65;
alfa3=6.5+5.25^0.65*vr^0.6;

Aif=2*pi*Do*L;
Aes=pi/4*(Do*Do-Da^2);
A1=2*Aes+Aif;
A2=pi*(rd)^2;
Aew=pi*lew*dwew;
A3=Aew;

R1=1/(alfa1*A1); %Transformacio YD
R2=1/(alfa2*A2);
R3=1/(alfa3*A3);
Rth6=R1*R2/(R1+R2+R3);
Rth7=R2*R3/(R1+R2+R3);
Rth8=R1*R3/(R1+R2+R3);

%-----
Tam=1.23*1.23*((272.72*2*pi/60)^2)*rd*(ag^3)/(ua^2);%rd
if Tam<1740
    Nu=2;
else
    Nu=0.409*Tamr^0.241-137*Tamr^-0.75;

```



```

end
alfad=Nu*landa_a/(2*ag);
Rthde=1/(alfad*2*pi*rd*L);
hyr=(Dir-Da)/2;
Rthyr=1/(2*pi*lu*landa_fe)*(log(Da/2+hyr)-log(Da/2));
Rthpm=1/(2*pi*lu*landa_pm)*(2*pi/(2*p*gamman))*(log(Da/2+hyr+hpm)-
log(Da/2+hyr));
Rthsl=hsl/(pi*Dir*L*landa_sl)*(2*pi/(2*p*gamman));
Rthins=dlr/(pi*(Da+2*hyr)*L*landa_si)*(2*pi/(2*p*gamman));

Rth9=Rthde+1/2*Rthd+Rthsl+1/2*Rthpm;
%-----

Rthsh=lbb/(pi*(Da/2)^2*landa_sh);

Rthb=0.45*(0.12-db)*(33-272.72*2*pi/60*db);

Rth11=1/4*Rthb;
Rthcr=0.0001923;
Rth10=1/2*Rthpm+Rthins+Rthyr+1/2*Rthsh+1/4*Rthb+Rthcr;

R=[Rth1 Rth2 Rth3 Rth4 Rth5 Rth6 Rth7 Rth8 Rth9 Rth10 Rth11];
Rp=R'

%RESOLUCIÓ CIRCUIT EQUIVALENT
BRANQUES= [1 1 0 1 40 Rth1;...
           2 1 2 1 0 Rth2;...
           3 2 3 1 0 Rth3;...
           4 3 4 1 0 Rth4;...
           5 4 5 1 0 Rth5;...
           6 6 1 1 0 Rth6;...
           7 6 5 1 0 Rth7;...
           8 1 5 1 0 Rth8;...
           9 3 6 1 0 Rth9;...
           10 6 7 1 0 Rth10;...
           11 7 1 1 0 Rth11;...
           12 2 0 2 Pfe_s 0;...
           13 3 0 2 Pfe_t 0;...
           14 4 0 2 Pj_c 0;...
           15 5 0 2 Pj_ew 0;...
           16 6 0 2 Pfe_r 0;...
           17 4 0 2 0.6*Padd 0;...
           18 5 0 2 0.4*Padd 0];

bb=size(BRANQUES);
b=bb(1);
J=zeros(7,1);
Y=zeros(7,7);
for k=1:b
    i=BRANQUES(k,2); %node inici de branca
    f=BRANQUES(k,3); %node final de branca

    %lecura de tipus de branca
    if BRANQUES(k,4)==1 %th
        ug=BRANQUES(k,5);
        zg=BRANQUES(k,6);
        %comprovem si hi a la branca hi ha un generador o nomes
        impedancia
    end
end

```

```

%BR(5) = Ug BR(6) = Zg
if ug==0 & zg~=0 %Nomes impedancia
    Y(i,i)=Y(i,i)+1/zg;
    if f~=0
        Y(f,f)=Y(f,f)+1/zg;
        Y(i,f)=Y(i,f)-1/zg;
        Y(f,i)=Y(f,i)-1/zg;
    end
elseif ug~=0 & zg==0 %Font pura
    nac=nac+1;
    Ath=cat(2,Ath,A(:,k));
    Ul(nac)=ug;
    col0=zeros(n_b_rares,1);
    Zl=cat(1,Zl,col0');

else %Generador amb impedancia interna
    J(i)=J(i)-(ug/zg);
    Y(i,i)=Y(i,i)+1/zg;
end

elseif BRANQUES(k,4)==2 %norton

    ig=BRANQUES(k,5);
    yg=BRANQUES(k,6);
    %comprovem si hi a la branca hi ha un generador o nomes
    impedancia
    %BR(5) = Ug BR(6) = Zg
    if ig~=0 & yg==0 %Font pura de corrent
        J(i)=J(i)-ig;
        if f~=0
            J(f)=J(f)+ig;
        end
    end
elseif BRANQUES(k,4)==3 %acoblat
    ug=BRANQUES(k,5);
    zg=BRANQUES(k,6);
    nac=nac+1;
    Ath=cat(2,Ath,A(:,k));
    aux=zeros(1,n_b_rares);
    aux(1,nac)=zg;
    Zl=cat(1,Zl,aux);
    if BRANQUES(k,5)~=0
        Ul(nac)=ug;
    end

end

end

T=abs(Y\J) %Resultat en °C
Tp=T+273 %Resultat en K

```

6 Modelització de la màquina en elements finits

6.1 Procediment

Per tal de validar els resultats del model en circuit equivalent de la màquina, també s'ha analitzat el funcionament tèrmic amb un programari d'elements finits, el FEMM.

El procediment per a la realització d'aquesta simulació és el següent.

- Introducció de la geometria de la màquina

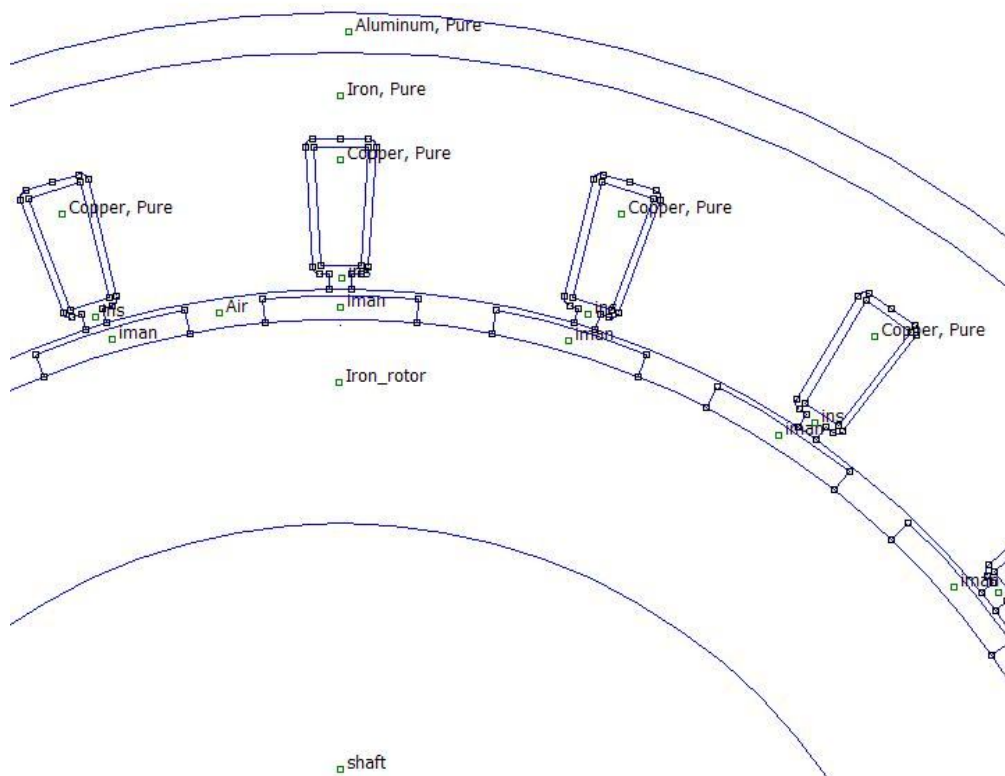


Figura 6.1

- Definició dels materials

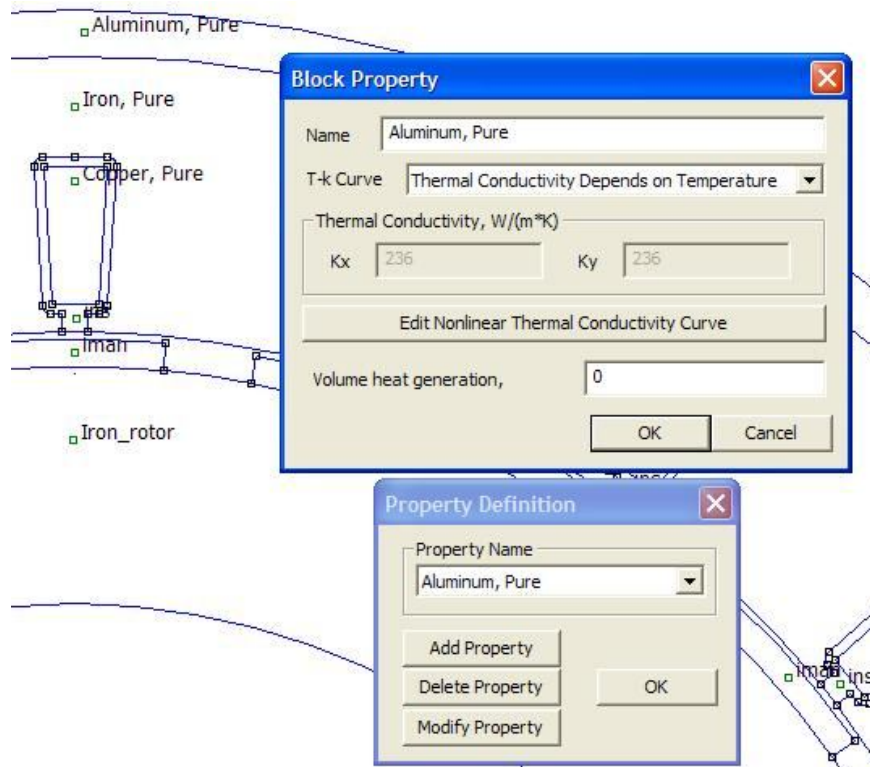


Figura 6.2

- Imposició de condicions de contorn

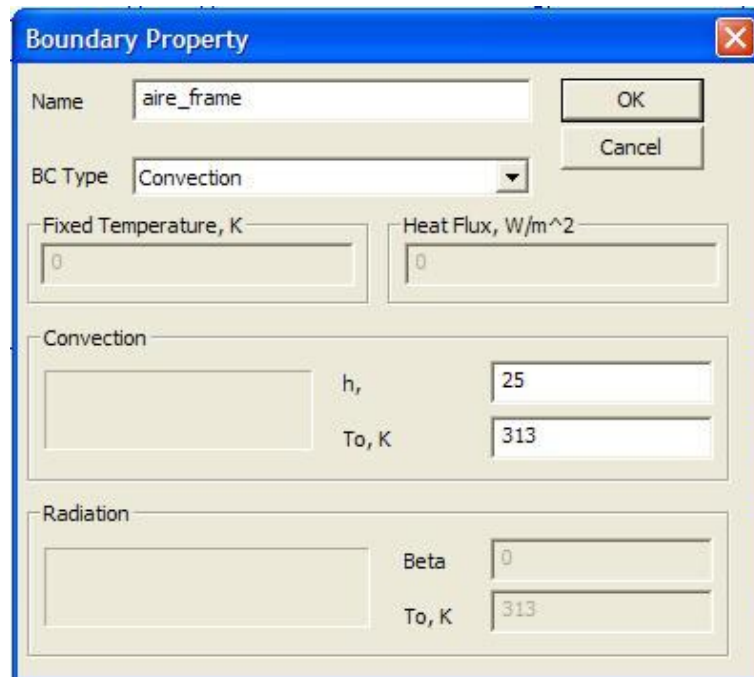


Figura 6.3

- Obtenció de resultats

6.2 Resultats

Fent l'anàlisi amb elements finits, els resultats són els que mostra el gràfic següent.

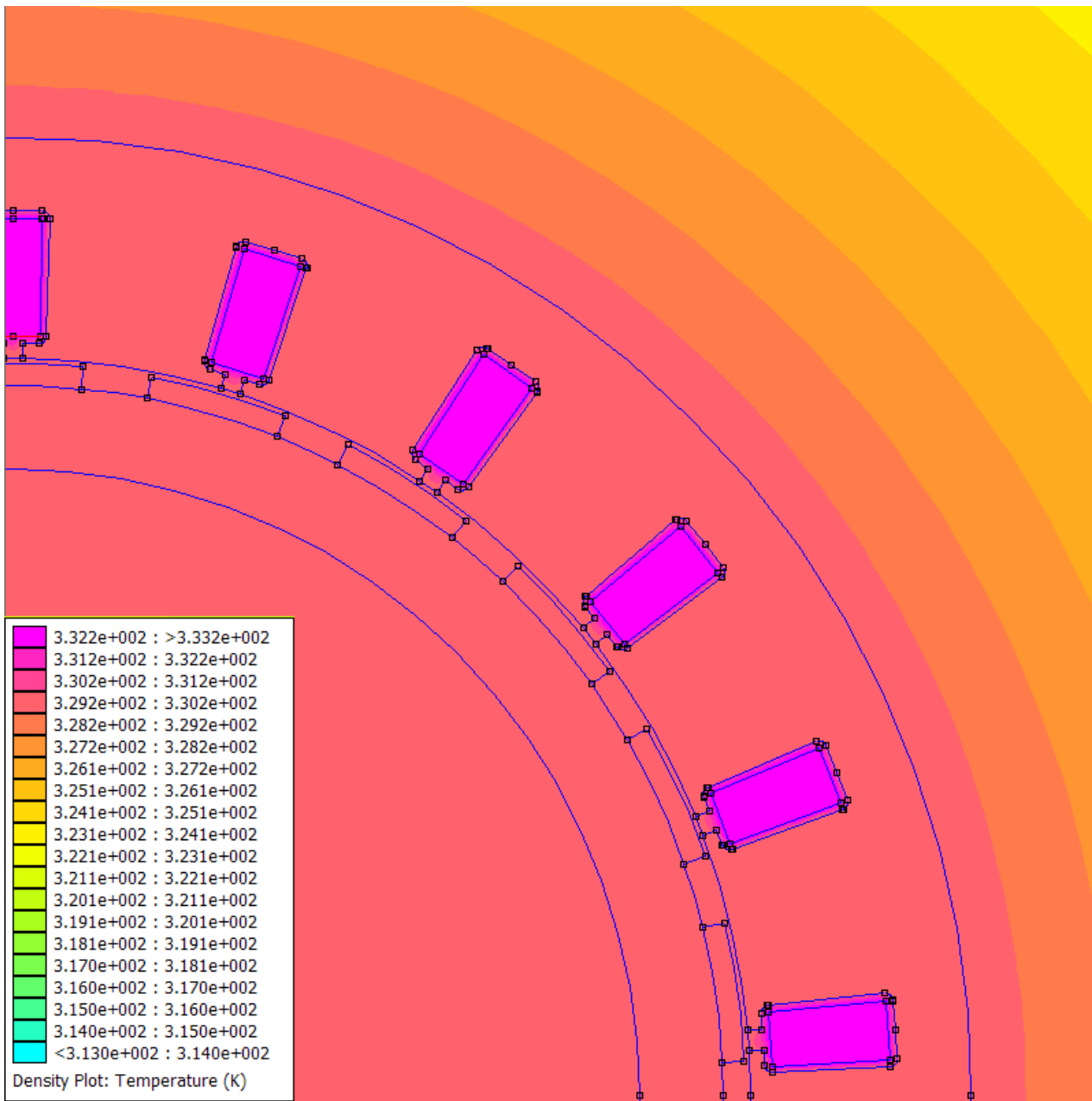


Figura 6.4 Resultat de la simulació amb elements finits