



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Volum I

Memòria –Pauta de càlcul-Resultats- Pressupost-Plànols

TREBALL DE FI DE GRAU



“Disseny d’un motor per a una rentadora industrial”

TFG presentat per obtenir el títol de GRAU en
ENGINYERIA ELÈCTRICA
Per **Gerard Vilarrasa López**

Barcelona, 11 de Juny de 2014

Director: Ramon Bargalló Perpiñà
Departament d'Enginyeria Elèctrica (EE)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDEX GENERAL

MEMÒRIA

| | |
|--|-----------|
| Resum..... | 5 |
| Resumen..... | 5 |
| Abstract..... | 6 |
| Objectius..... | 9 |
| Agraïments..... | 11 |
| 1. Capítol 1: Introducció..... | 13 |
| 1.1. Motor síncron d'ímants permanents..... | 13 |
| 1.2. Parts del motor síncron..... | 13 |
| 1.2.1. Estator..... | 13 |
| 1.2.2. Rotor..... | 15 |
| 1.3. Funcionament del motor..... | 16 |
| 1.4. Alimentació..... | 16 |
| 2. Capítol 2: Pauta de càlcul analític..... | 18 |
| 2.1. Definició del motor..... | 18 |
| 2.1.1. Corrent i tensió..... | 19 |
| 2.1.2. Rendiment..... | 19 |
| 2.2. Imant..... | 19 |
| 2.2.1. Paràmetres característics..... | 19 |
| 2.2.2. Tipus d'ímants..... | 20 |
| 2.3. Dimensionat de la màquina..... | 21 |
| 2.3.1. Diàmetre i longitud..... | 21 |
| 2.3.2. Entreferro..... | 21 |
| 2.4. Debanat inductor..... | 22 |
| 2.4.1. Dimensionat del bobinat..... | 22 |
| 2.4.2. Secció dels conductors..... | 23 |
| 2.5. Dimensió dels imants..... | 24 |
| 2.6. Anàlisi de desmagnetització..... | 24 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.7. | Induccions..... | 25 |
| 2.7.1. | Inducció de l'ímant..... | 25 |
| 2.7.2. | Inducció a l'aire..... | 25 |
| 2.7.3. | Inducció a les dents..... | 25 |
| 2.7.4. | Inducció a la corona estatòrica..... | 26 |
| 2.7.5. | Inducció a l'entreferro..... | 26 |
| 2.8. | Pèrdues..... | 27 |
| 2.8.1. | Resistència del debanat..... | 27 |
| 2.8.2. | Pèrdues Joule..... | 27 |
| 2.8.3. | Pèrdues al ferro..... | 27 |
| 2.8.4. | Pèrdues totals..... | 27 |
| 2.9. | Ventilació..... | 27 |
| 3. | Capítol 3: Anàlisis magnètics amb elements finits..... | 30 |
| 3.1. | Dibuix del motor..... | 30 |
| 3.2. | Configuració del problema..... | 30 |
| 3.2.1. | Definició del problema..... | 31 |
| 3.2.2. | Definició dels materials..... | 31 |
| 3.2.3. | Definició dels circuits..... | 31 |
| 3.2.4. | Definició de les condicions de contorn..... | 31 |
| 3.2.5. | Debanat estatòric..... | 31 |
| 3.2.6. | Assignació dels materials..... | 32 |
| 3.3. | Anàlisis magnètics..... | 32 |
| 3.3.1. | Verificació de les induccions..... | 32 |
| 3.3.2. | Anàlisi en buit..... | 32 |
| 3.3.3. | Parell de cogging..... | 33 |
| 3.3.4. | Anàlisi en càrrega..... | 34 |
| 3.3.5. | Anàlisi d'energia..... | 34 |
| 3.3.6. | Pèrdues Joule i pèrdues al ferro..... | 35 |
| 4. | Capítol 4: Característiques de la màquina..... | 37 |
| 4.1. | Inductàncies..... | 37 |
| 4.1.1. | Eix directe i de quadratura..... | 37 |
| 4.1.2. | Inductància principal..... | 38 |
| 4.1.3. | Inductància de dispersió..... | 38 |
| 4.1.4. | Inductància total..... | 41 |
| 4.2. | Paràmetres característics..... | 41 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 4.2.1. | Parell..... | 41 |
| 4.2.2. | Corrent de curtcircuit..... | 42 |
| 4.2.3. | Velocitat màxima..... | 44 |
| 4.2.4. | Potència..... | 44 |
| 4.2.5. | Rendiment..... | 44 |
| 4.3. | Corbes característiques..... | 45 |
| 5. | Capítol 5: Anàlisi tèrmic amb elements finits..... | 48 |
| 5.1. | Pèrdues al motor..... | 48 |
| 5.2. | Importació i caracterització del problema..... | 49 |
| 5.3. | Aïllant..... | 49 |
| 5.4. | Anàlisis tèrmics i condicions de contorn..... | 50 |
| 5.4.1. | Anàlisi amb ventilació natural..... | 50 |
| 5.4.2. | Anàlisi amb ventilació forçada..... | 50 |
| 6. | Capítol 6: Conclusions..... | 53 |
| 7. | Capítol 7: Bibliografia..... | 57 |
| 7.1. | Referències bibliogràfiques..... | 57 |
| 7.2. | Consulta..... | 57 |

ANNEX 1: PAUTA DE CÀLCUL

| | | |
|-----------|---|----------|
| 1. | Capítol 1: Càlcul analític..... | 5 |
| 1.1. | Condicions inicials..... | 5 |
| 1.1.1. | Punts de treball del motor..... | 5 |
| 1.1.2. | Freqüències dels punts de treball..... | 5 |
| 1.1.3. | Tensió i corrent en els punts de treball..... | 6 |
| 1.2. | Dimensions..... | 6 |
| 1.2.1. | Diàmetre i longitud..... | 6 |
| 1.2.2. | Entreferro..... | 7 |
| 1.3. | Imant..... | 8 |
| 1.3.1. | Tipus d'ímant..... | 8 |
| 1.3.2. | Dimensions..... | 8 |
| 1.4. | Induccions..... | 8 |
| 1.4.1. | Inducció de l'ímant..... | 8 |
| 1.4.2. | Inducció a l'aire..... | 9 |
| 1.4.3. | Inducció a les dents..... | 9 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1.4.4. | Inducció a la corona estatòrica..... | 9 |
| 1.4.5. | Inducció a l'entreferro..... | 9 |
| 1.5. | Bobinat estatòric..... | 9 |
| 1.5.1. | Dimensionat del bobinat..... | 9 |
| 1.6. | Anàlisi de desmagnetització..... | 11 |
| 2. | Capítol 2: Anàlisi tèrmic analític..... | 14 |
| 2.1. | Pèrdues..... | 14 |
| 2.1.1. | Resistència de fase..... | 14 |
| 2.1.2. | Pèrdues Joule..... | 14 |
| 2.1.3. | Pèrdues al ferro..... | 15 |
| 2.1.4. | Pèrdues mecàniques..... | 15 |
| 2.1.5. | Pèrdues totals..... | 15 |
| 2.2. | Escalfament..... | 15 |
| 2.2.1. | Superfície de ventilació..... | 15 |
| 2.2.2. | Ventilació natural..... | 15 |
| 2.2.3. | Ventilació forçada..... | 16 |
| 3. | Capítol 3: Anàlisi magnètics amb elements finits..... | 18 |
| 3.1. | Dibuix amb AutoCAD..... | 18 |
| 3.2. | Configuració del problema..... | 19 |
| 3.2.1. | Definició del problema..... | 19 |
| 3.2.2. | Definició dels materials..... | 19 |
| 3.2.3. | Definició dels circuits..... | 23 |
| 3.2.4. | Definició de les condicions de contorn..... | 23 |
| 3.2.5. | Debanat estatòric..... | 24 |
| 3.2.6. | Assignació dels materials..... | 24 |
| 3.3. | Anàlisi magnètics..... | 26 |
| 3.3.1. | Verificació de les induccions..... | 26 |
| 3.3.2. | Anàlisi en buit..... | 27 |
| 3.3.3. | Parell de cogging..... | 30 |
| 3.3.4. | Anàlisi en càrrega..... | 31 |
| 3.3.5. | Anàlisi d'energia..... | 35 |
| 3.3.6. | Anàlisi de pèrdues..... | 37 |
| 4. | Capítol 4: Característiques de la màquina..... | 41 |
| 4.1. | Inductàncies..... | 41 |
| 4.1.1. | Inductància de dispersió..... | 41 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 4.1.2. | Inductància total..... | 44 |
| 4.2. | Paràmetres característics..... | 44 |
| 4.2.1. | Corrent de curtcircuit..... | 44 |
| 4.2.2. | Parell..... | 45 |
| 4.2.3. | Potència..... | 47 |
| 4.2.4. | Corrent..... | 47 |
| 4.2.5. | Tensió..... | 48 |
| 4.2.6. | Rendiment..... | 49 |
| 5. | Capítol 5: Anàlisi tèrmic amb elements finits..... | 52 |
| 5.1. | Importació i caracterització del problema..... | 52 |
| 5.2. | Definició dels materials..... | 53 |
| 5.2.1. | Aire..... | 53 |
| 5.2.2. | Imant..... | 53 |
| 5.2.3. | Aïllant..... | 54 |
| 5.2.4. | Coure..... | 54 |
| 5.2.5. | Acer..... | 54 |
| 5.3. | Anàlisis tèrmics i condicions de contorn..... | 55 |
| 5.3.1. | Anàlisi amb ventilació natural..... | 55 |
| 5.3.2. | Anàlisi amb ventilació forçada..... | 57 |

ANNEX 2: RESULTATS

| | | |
|-----------|---|----------|
| 1. | Capítol 1: Resultats pauta analítica..... | 3 |
| 1.1. | Característiques en els punts de treball..... | 3 |
| 1.2. | Dimensions del motor..... | 4 |
| 1.2.1. | Estator..... | 4 |
| 1.2.2. | Entreferro..... | 4 |
| 1.2.3. | Rotor..... | 4 |
| 1.2.4. | Imants..... | 4 |
| 1.2.5. | Debanat..... | 4 |
| 1.2.6. | Eix..... | 4 |
| 2. | Capítol 2: Resultats anàlisis magnètics..... | 7 |
| 2.1. | Anàlisi en buit..... | 7 |
| 2.1.1. | Verificació de les induccions..... | 7 |
| 2.1.2. | Flux en buit..... | 8 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.1.3. | FEM..... | 8 |
| 2.1.4. | Parell de cogging..... | 9 |
| 2.2. | Anàlisi en càrrega..... | 9 |
| 2.2.1. | Parell..... | 9 |
| 2.2.2. | Inductàncies..... | 9 |
| 3. | Capítol 3: Característiques de la màquina..... | 12 |
| 3.1. | Pèrdues..... | 12 |
| 3.2. | Corbes característiques..... | 12 |
| 3.2.1. | Potència-velocitat..... | 12 |
| 3.2.2. | Parell-velocitat..... | 13 |
| 3.2.3. | Tensió-velocitat..... | 13 |
| 3.2.4. | Corrent-velocitat..... | 14 |
| 3.2.5. | Rendiment-velocitat..... | 14 |
| 4. | Capítol 4: Resultat anàlisi..... | 17 |
| 4.1. | Ventilació forçada..... | 17 |
| 4.1.1. | Temperatures..... | 17 |
| 4.1.2. | Aïllament..... | 18 |

ANNEX 3: PRESSUPOST

ANNEX 4: PLÀNOLS I XAPES



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Memòria



Barcelona, 11 de Juny de 2014

Director: Ramon Bargalló Perpiñà
Departament d'Enginyeria Elèctrica (EE)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDIX

| | |
|--|-----------|
| Resum | 5 |
| Resumen | 5 |
| Abstract | 6 |
| Objectius | 9 |
| Agraïments | 11 |
| Capítol 1: Introducció..... | 13 |
| 1.1. Motor síncron d'ímants permanents | 13 |
| 1.2. Parts del motor síncron..... | 13 |
| 1.2.1. Estator | 13 |
| 1.2.2. Rotor | 15 |
| 1.3. Funcionament del motor | 16 |
| 1.4. Alimentació..... | 16 |
| Capítol 2: Pauta de càlcul analític | 18 |
| 2.1. Definició del motor..... | 18 |
| 2.1.1. Corrent i tensió | 19 |
| 2.1.2. Rendiment | 19 |
| 2.2. Imant | 19 |
| 2.2.1. Paràmetres característics..... | 19 |
| 2.2.2. Tipus d'ímants | 20 |
| 2.3. Dimensionat de la màquina | 21 |
| 2.3.1. Diàmetre i longitud | 21 |
| 2.3.2. Entreferro | 21 |
| 2.4. Debanat inductor | 22 |
| 2.4.1. Dimensionat del bobinat..... | 22 |
| 2.4.2. Secció dels conductors | 23 |
| 2.5. Dimensió dels imants | 24 |
| 2.6. Anàlisi de desmagnetització | 24 |
| 2.7. Induccions..... | 25 |
| 2.7.1. Inducció de l'ímant | 25 |
| 2.7.2. Inducció a l'aire | 25 |
| 2.7.3. Inducció a les dents..... | 25 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 2.7.4. | Inducció a la corona estatòrica | 26 |
| 2.7.5. | Inducció a l'entreferro | 26 |
| 2.8. | Pèrdues | 27 |
| 2.8.1. | Resistència del debanat | 27 |
| 2.8.2. | Pèrdues Joule | 27 |
| 2.8.3. | Pèrdues al ferro | 27 |
| 2.8.4. | Pèrdues totals..... | 27 |
| 2.9. | Ventilació | 27 |
| Capítol 3: anàlisis magnetics amb elements finits | | 30 |
| 3.1. | Dibuix del motor..... | 30 |
| 3.2. | Configuració del problema..... | 30 |
| 3.2.1. | Definició del problema..... | 31 |
| 3.2.2. | Definició dels materials | 31 |
| 3.2.3. | Definició dels circuits | 31 |
| 3.2.4. | Definició de les condicions de contorn | 31 |
| 3.2.5. | Debanat estatòric..... | 31 |
| 3.2.6. | Assignació dels materials | 32 |
| 3.3. | Anàlisis magnètics | 32 |
| 3.3.1. | Verificació de les induccions | 32 |
| 3.3.2. | Anàlisi en buit..... | 32 |
| 3.3.3. | Parell de cogging..... | 33 |
| 3.3.4. | Anàlisi en càrrega..... | 34 |
| 3.3.5. | Anàlisi d'energia..... | 34 |
| 3.3.6. | Pèrdues Joule i pèrdues al ferro | 35 |
| Capítol 4: Característiques de la màquina | | 37 |
| 4.1. | Inductàncies | 37 |
| 4.1.1. | Eix directe i de quadratura..... | 37 |
| 4.1.2. | Inductància principal..... | 38 |
| 4.1.3. | Inductància de dispersió | 38 |
| 4.1.4. | Inductància total | 41 |
| 4.2. | Paràmetres característics | 41 |
| 4.2.1. | Parell | 41 |
| 4.2.2. | Corrent de curtcircuit..... | 42 |
| 4.2.3. | Velocitat màxima | 44 |
| 4.2.4. | Potència | 44 |
| 4.2.5. | Rendiment | 44 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3. Corbes característiques..... | 45 |
| Capítol 5: Anàlisi tèrmic amb elements finits | 48 |
| 5.1. Pèrdues del motor | 48 |
| 5.2. Importació i caracterització del problema..... | 49 |
| 5.3. Aïllant..... | 49 |
| 5.4. Anàlisis tèrmics i condicions de contorn | 50 |
| 5.4.1. Anàlisi amb ventilació natural | 50 |
| 5.4.2. Anàlisi amb ventilació forçada | 50 |
| Capítol 6: conclusions | 53 |
| Capítol 7: Bibliografia..... | 57 |
| 7.1. Referències bibliogràfiques | 57 |
| 7.2. Consulta | 57 |

RESUM

Aquest projecte té com a principal objectiu el disseny d'un motor síncron d'ímants permanents per a una rentadora industrial.

El punt de partida són les condicions que ha de complir el motor, és a dir, els parells i velocitats per a cada punt de treball de la rentadora. Amb aquestes dades, es desenvolupa l'anàlisi analític del motor per determinar-ne les dimensions. Posteriorment, es realitzen una sèrie d'anàlisis magnètics per confirmar el bon funcionament de la màquina, i per extreure'n algunes dades que ens ajudaran en el posterior càlcul de les seves característiques. Finalment, l'últim anàlisi és el tèrmic, el qual ens permetrà fixar el mètode de ventilació més adequat.

Els punts de treball on el motor ha de garantir un bon funcionament són els següents:

- Punt de rentat: Parell de 1,4 Nm i velocitat de 600 rpm
- Punt de centrifugació: Parell de 0,4 Nm i velocitat de 15.000 rpm

El projecte està format per la memòria, que descriu de forma teòrica els càlculs analítics, les simulacions mitjançant un programa basat en el mètode dels elements finits i, el tractament dels resultats obtinguts; l'annex 1, que conté la pauta de càlcul completa; l'annex 2, que recull els resultats finals; l'annex 3, que conté el pressupost del projecte; i l'annex 4, que recull els plànols i la xapa escollida.

RESUMEN

El principal objetivo de este proyecto es el diseño de un motor síncrono con imanes permanentes para una lavadora industrial.

El punto de partida son las condiciones que debe cumplir el motor para su correcto funcionamiento, las cuales son el par y la velocidad para cada punto de trabajo de la lavadora. Con estos datos se realizará un análisis analítico del motor para determinar sus dimensiones. A continuación, se realizarán un conjunto de análisis magnéticos para confirmar el buen funcionamiento de la máquina y para extraer algunos datos que serán necesarios para realizar el cálculo de las características del motor. Para acabar, escogeremos el método de ventilación de la máquina mediante la realización de un análisis térmico.

Los puntos de trabajo donde el motor debe garantizar un buen funcionamiento son:

- Punto de lavado: Par de 1,4 Nm i velocitat de 600 rpm

- Punto de centrifugación: Par de 0,4 Nm i velocidad de 15.000 rpm

El proyecto se encuentra formado por la memoria, que describe de forma teórica los cálculos analíticos, las simulaciones realizadas mediante un programa basado en el método de los elementos finitos, y el tratamiento a los resultados obtenidos; el anexo 1, que contiene la pauta de cálculo completa; el anexo 2, que recoge los resultados finales; el anexo 3, que contiene el presupuesto del proyecto; y el anexo 4, que recoge los planos y la chapa elegida.

ABSTRACT

The main objective of this project is the design of a permanent magnet synchronous motor for an industrial washing machine.

The starting points are the conditions to be met for proper engine operation, which are the torque and speed for each working point of the machine. With these data, we'll do an analytical analysis of the engine to determine its dimensions and its working. Next, we'll do a set of magnetic analysis to confirm the proper functioning of the machine and to extract some data needed for the calculation of the motor's features. Finally, we choose the method of ventilation of the machine by performing a thermal analysis.

Work points where the motor must ensure smooth operation are:

- Wash point: Torque of 1.4 Nm and speed of 600 rpm.
- Centrifugation point: Torque of 0.4 Nm and speed of 15,000 rpm

The project is composed of memory, which theoretically describes the analytical calculations, simulations performed using a method based on the finite element program, and result's treatment; Annex 1, which contains all of calculation; Annex 2, which contains the final results; Annex 3 containing the project budget; and Annex 4, which includes plans and the chosen model.

OBJECTIUS

- Desenvolupament del disseny d'un motor síncron d'ímants permanents per a una rentadora industrial a partir del seu parell i de la seva velocitat de gir en dos punts característics de treball. Els punts de treball des de els que es partirà són el de rentat i el de centrifugat, amb un parell de 1,4 Nm per al primer i, de 0,4 Nm per al segon; i amb una velocitat de gir de 600 rpm per al rentat, i de 15.000 rpm per a la centrifugació.
- Desenvolupament de la pauta de càlcul analític mitjançant *Excel* per a determinar les dimensions principals del motor i realitzar una aproximació del seu escalfament.
- Realització dels anàlisis magnètics amb el mètode d'elements finits per extreure algunes dades de la màquina i comprovar que el motor funciona adequadament. El software utilitzat és el FEMM (*Finite Element Method Magnetic*).
- Desenvolupament d'una pauta de càlcul analític per determinar les seves característiques mitjançant *Mathcad*.
- Implementació del llenguatge LUA per la automatització d'anàlisis de FEMM.
- Execució dels anàlisis tèrmics mitjançant el mètode dels elements finits per determinar l'escalfament del motor i el mètode de ventilació més adequat.
- Assolir les velocitats i parells requerits en els punts de treball de rentat i centrifugació.

AGRAÏMENTS

Principalment a en Ramón Bargalló Perpiñà, el tutor del projecte, per la paciència i l'ajuda donada durant el transcurs del treball.

A l'Anna Albacete i a la família pel suport.

A tots ells, moltes gràcies.

CAPÍTOL 1:

INTRODUCCIÓ

1.1. Motor síncron d'ímants permanents

El motor síncron és un motor elèctric accionat per corrent alterna que consta de dos components bàsics: un estator i un rotor, els que trobem separats entre si per un espai d'aire anomenat entreferro. La seva velocitat de gir és constant i depèn de la freqüència de la font d'alimentació a la que estigui connectat i del nombre de parells de pols del motor.

Algunes de les principals virtuts del motor síncron d'ímants permanents són el seu ampli rang de velocitats, on des de que comença a girar disposem del parell màxim, el qual és present fins a certa velocitat; i el seu rendiment, que es troba al voltant del 90%.

Aquest tipus de motors són presents en una àmplia àrea d'aplicacions, que van des de servomotors, accionaments elèctrics per posicionament, robòtica, màquines eina, ascensors, etc.

1.2. Parts del motor síncron

El motor síncron d'ímants permanents esta format per l'estator i el rotor.

1.2.1. Estator

És la part immòbil del motor on trobem el sistema inductor. El componen la carcassa, l'empilat, la caixa de connexions i el bobinat inductor.

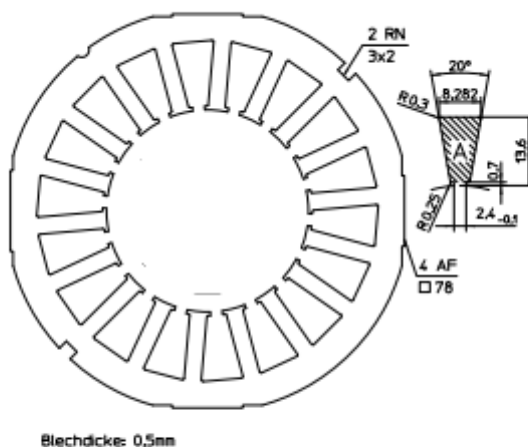
- a) Carcassa: És l'estructura que alberga el motor i ens permet la seva fixació. Generalment és d'alumini i pot constar amb d'aletes. La seva funció és la de fixar la màquina i la de ser un dels principals elements de dissipació de calor.



Figura 1. Carcassa de motor elèctric.

b) Empilat: Es tracta d'un paquet de xapa magnètica apilada amb forma de corona i amb ranures per albergar-hi el bobinat. Trobem les xapes apilades per tal d'evitar corrents paràsits de Foucault.

Les principals dimensions són el diàmetre interior i exterior, el gruix de l'empilat i les mides referents a la forma de les ranures.



| SKS 400 | | Maße und Varianten | | | |
|----------------|----------------|--------------------|----|------|----------------|
| | D ₀ | D ₁ | N | A | b _z |
| SB 080.23.X.00 | 80 +0,074 | 40 +0,06 | 18 | 78,9 | 3,4 |
| 01 | wie Abbildung | | | | |

Figura 2. Xapa d'estator amb les seves característiques.

c) Bobinat inductor: Format per tres bobines de core, al tractar-se d'un motor trifàsic, aquest bobinat és el responsable d'induir un camp giratori. Trobem les bobines repartides entre les ranures de l'empilat en una distribució que depèn del nombre de ranures i dels pols del motor.

Per qüestions de muntatge és important que l'àrea ocupada per conductors no superi el 40% de l'àrea de les ranures. Aquests

conductors els trobarem recoberts d'un material aïllant, normalment d'una fibra vegetal anomenada kapok, que evitarà els contacte elèctric entre conductors i entre conductors i xapa de l'empilat.

- d) Caixa de connexions: La caixa de connexions és un element que protegeix als conductors que alimenten al motor, dins trobarem els borns del bobinat de l'estator. Segons la connexió que realitzem el motor es trobarà connectat en estrella o triangle.

1.2.2. Rotor

És la part mòbil del motor. El componen l'empilat , els imants i l'eix.

- a) Empilat: El trobem format per un paquet de xapes magnètiques apilades, per evitar així corrents de Foucault, les quals solen produir pèrdues i escalfament.

Generalment té forma cilíndrica i consta d'unes ranures longitudinals, les quals tenen una diversitat de mides i formes que depenen del muntatge dels imants que allotjaran.

En alguns casos, poden trobar que l'empilat té alguns forats, la funcionalitat dels quals és la de col·laborar a la refrigeració del motor i la corregir en alguns casos el camp magnètic que és crea dins el motor.

- b) Imants: : La seva magnetització, mides i forma, dependran del tipus de muntatge que s'escollí i dels càlculs pertinents. La seva funció és la de crear el camp magnètic al rotor.

Sempre trobarem un nombre d'imants parells, ja que un dels imants de la parella representarà un nord i l'altre el seu sud.

Pel que fa a la magnetització dels imants, aquests es poden magnetitzar de diverses formes però les més comunes en el disseny de màquines són la radial i la diametral.

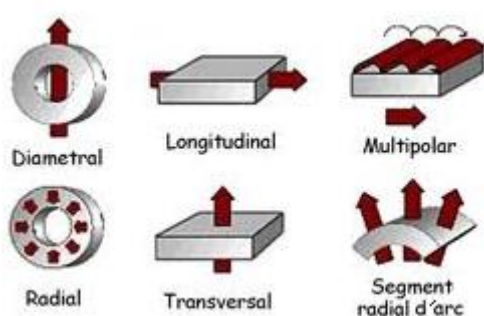


Figura 3a. Diferents magnetitzacions dels imants.

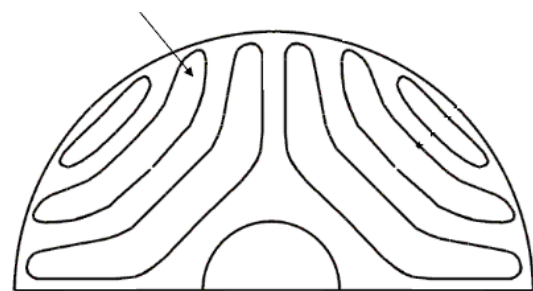


Figura 3b. Canals d'aire del rotor.

Respecte al muntatge d'aquests en el rotor, aquests poden anar de forma superficial, enterrats o inserits. En el primer cas, l'imant el trobem muntat

sobre la superfície del rotor; en el segon, aquest es troba encaixat dins del rotor; i en el tercer cas, una de les cares de l'imant queda lliure, és a dir, no està recoberta per part del rotor.

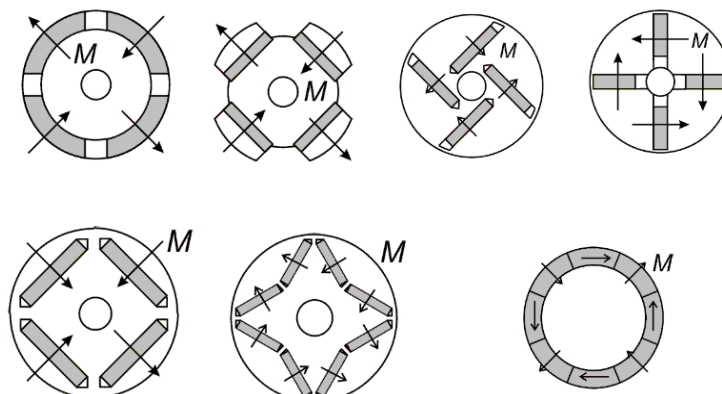


Figura 4. Diferents muntatges d'imants.

- c) Eix: Barra feta generalment d'acer inoxidable, la qual travessa el rotor. Es troba subjectada a la carcassa per coixinets.

1.3. Funcionament del motor

El funcionament d'un motor síncron es regeix per la interacció de dos camps magnètics, un sent el camp magnètic inductor i , l'altre el induït. Com a camp magnètic inductor trobem el camp generat pel bobinat de l'estator, on en el cas de fer-l'hi circular un corrent continu per les bobines es crea un camp magnètic constant i , en el cas d'aplicar-l'hi un corrent altern, ens trobarem amb un camp magnètic rotatiu.

El camp magnètic induït és el camp creat pels imants del rotor, els quals s'orientaran en el mateix sentit que el camp inductiu.

Al aplicar amb un camp inductiu rotatiu, ens trobarem amb que el camp creat pels imants tendirà constantment a alinear-s'hi i d'aquesta manera aconseguirem el gir del rotor.

Entre un camp i l'altre hi podrà haver un desfasament d'angle, on serà el camp magnètic induït el que anirà amb retard respecte al camp inductor. Aquest retard és degut a la presència de càrrega del motor, fent que com més gran sigui aquesta, més gran sigui l'angle de desfasament, el qual podrà assolir un valor màxim de 90° .

1.4. Alimentació

El motor síncron d'imants permanents s'alimenta a través d'un rectificador trifàsic capaç de controlar la tensió, el corrent i la freqüència de la senyal d'alimentació.

CAPÍTOL 2:

PAUTA DE CÀLCUL

ANALÍTIC

En aquest capítol realitzarem un estudi analític del motor, el qual ens ajudarà a determinar les seves dimensions i ens donarà una aproximació a les seves característiques de funcionament.

Els passos a seguir en aquesta pauta seran els següents: Primer, partint de les dades inicials, trobarem les principals dimensions i assignarem un estator. Tot seguit, s'escollirà un bobinat i es calcularan les dimensions dels imants.

2.1. Definició del motor

Coneixent l'ús que tindrà el motor, el qual serà com a motor de una rentadora industrial, s'ha de garantir que treballarà correctament en els dos punts marcats de treball. Un, el punt de rentat, on haurà de girar a 600rpm donant un parell de 1,4Nm; i l'altre, el punt de centrifugat, on haurà de girar a 15.000rpm donant un parell de 0,4Nm.

A partir d'aquestes dades, caldrà determinar el nombre de parells de pols de la màquina en funció de la freqüència i de les velocitats que ha d'assolir. La relació entre la freqüència i els parells de pols és:

$$f = p \cdot \frac{N}{60} \quad (1)$$

On:

f: freqüència [Hz]
p: parells de pols
N: velocitat [rpm]

Cal tenir present que el nombre de pols del rotor serà $2 \cdot p$, ja que cada parell de pols representa un nord i un sud.

2.1.1. Corrent i tensió

El corrent que absorbirà el motor per obtenir la potència necessària per realitzar les funcions de rentat i centrifugació determinarà alguns dels paràmetres de la màquina, com són la secció o el nombre de conductors del bobinat inductor. Per a calcular-lo utilitzarem l'aproximació següent:

$$I \approx \frac{P}{U} \quad (2)$$

On:

I: corrent [A]
U: tensió nominal del rectificador [V]
P: potència [W]

El motor síncron s'alimentarà a través d'un rectificador trifàsic.

2.1.2. Rendiment

La màquina haurà d'aconseguir un rendiment que s'adeqüi a la norma internacional IEC 60034-30.

2.2. Imant

Podem trobar diferents tipus d'ímants al mercat amb diferents paràmetres característics i diferents preus, la tria del més adequat per a cada projecte és una barreja entre el seu cost i les seves característiques.

2.2.1. Paràmetres característics

- a) Inducció (B_r): És la densitat de flux magnètic romanent quan no hi ha present d'un camp magnètic. Com més alt és aquest paràmetre, major és la densitat de flux magnètic a l'entreferro que pot suportar l'ímant. Segons les unitats del Sistema Internacional, la inducció es mesura en Tesla [T].
- b) Coercitivitat (H_c): Ens indica el valor d'intensitat de camp magnètic desmagnetitzant per anul·lar el flux magnètic d'un material que es trobés magnetitzat. La seva unitat de mesura en el Sistema Internacional és l'Ampere per metre [A/m].
- c) Permeabilitat magnètica (μ): És la capacitat que té un material a atreure o deixar passar les línies d'un camp magnètic. La unitat de mesura que trobem en el Sistema Internacional és el Newton per Ampere quadrat [N/A^2].
- d) Permeabilitat relativa (μ_r): És la relació entre la permeabilitat d'un material i la permeabilitat del buit (μ_0). La relació és la següent:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3)$$

- e) Temperatura màxima de servei: El punt límit de temperatura on es pot fer treballar l'ímant sense que es vegin afectades les seves característiques.
- f) Temperatura de Curie: S'anomena temperatura de Curie a la temperatura per sobre de la qual un cos ferromagnètic perd el seu magnetisme.

2.2.2. Tipus d'ímants

Els tipus més utilitzats en el disseny de motors són els tres següents:

- a) Imants ceràmics o ferrites: S'anomenen així per les seves propietats físiques. Són imants molt fràgils i resistent a moltes substàncies químiques. La seva composició és aproximadament un 80% d'òxid de ferro i un 20% d'òxid de Bari o d'òxid d'estronci. Són imants de baix cost i que tenen la seva temperatura de treball entre -40°C i 250°C.
- b) Imants d'alnico: Deuen el seu nom a la seva composició, ja que uns dels elements que la formen són l'alumini, el níquel i el cobalt. Es fabriquen per fusió d'un 8% d'alumini, un 14% de níquel, un 24% de cobalt, un 51% de ferro i un 3% de coure. Aquests imants presenten un molt bon comportament a altes temperatures i tenen un bon preu, encara que consten de poca força i, per tant, són fàcils de desmagnetitzar.
- c) Imants de terres rares: Són imants petits, d'aparença metàl·lica, amb una força de 6 a 10 vegades superior als materials magnètics tradicionals. Aquests tipus d'ímants presenten una alta resistència a la desmagnetització, poden inclús magnetitzar i desmagnetitzar alguns imants d'alnico. Un dels seus inconvenients són que s'oxiden fàcilment, per això solen anar recoberts amb un bany de zinc, níquel o vernís epoxídic; i un altre dels seus contres és el al cost.

Dins d'aquest tipus trobem els que representen l'última generació de materials magnètics, els imants de Samari/Cobalt i els de Neodimi/Ferro/Bor, on tenim que aquests últims estan substituïnt als de Samari/Cobalt. Els imants de Neodimi poden treballar des de els 80°C fins els 180°C, mentre que els imants de samari els poden utilitzar des de 200°C a 350°C.

| REMANENCIA Br | | FUERZA DE CAMPO COERCITIVO Hc | | | PRODUCTO DE ENERGIA (BH) máx. | | COEFICIENTE DE TEMP. REVERSIBLE | | T° MÁX. TRABAJO |
|---------------|---------|-------------------------------|----------|------------|-------------------------------|-----------------------|---------------------------------|--------|-----------------|
| Max. | Min. | Hcb | | Hci | Max. | Min. | Br | Hcj | |
| | | Max. | Min. | | | | (%/°C) | (%/°C) | |
| 11,2 kG | 11,7 kG | 11,3 kOe | 10,8 kOe | ≥ 12 kOe | 35,0 MGOe | 33,0 MGOe | -0,12 | -0,5 | ≤ 80 °C |
| 1,210 T | 1,170 T | 899 kA/m | 860 kA/m | ≥ 955 kA/m | 279 kJ/m ³ | 263 kJ/m ³ | | | |

Figura 5. Característiques a 80°C de l'ímant utilitzat en aquest projecte (Neodimi 35).

2.3. Dimensionat de la màquina

2.3.1. Diàmetre i longitud

Per tal de trobar el diàmetre intern de l'estator, s'utilitzarà la següent expressió:

$$D^2 \cdot L = \frac{M \cdot 4 \cdot \sqrt{2}}{\pi \cdot B_a \cdot A} \quad (4)$$

On:

D: diàmetre intern de l'estator [m]
 L: longitud de l'empilat del rotor [m]
 M: parell [Nm]
 B_a: inducció a l'aire [T]
 A: capa de corrent [A/m]

La capa de corrent serveix per quantificar la força del camp magnètic. Per a màquines síncrones d'ímants permanents es recomana que prengui un valor comprés entre 35.000 i 65.000 A/m.

Per tal de poder separar les dos variables i així poder resoldre l'equació anterior, utilitzarem la següent igualtat:

$$D = L \quad (5)$$

Aïllant així el diàmetre i permetent-nos trobar el seu valor, el qual després s'haurà d'ajustar amb mides reals que seran extretes d'un catàleg. Utilitzant la igualtat anterior, trobem que l'equació 4 presenta la següent forma:

$$D^3 = \frac{M \cdot 4 \cdot \sqrt{2}}{\pi \cdot B_a \cdot A} \quad (6)$$

Un cop tinguem un valor ajustat del diàmetre, trobarem la longitud de l'empilat substituint els valors a l'equació 4.

2.3.2. Entreferro

Segons els parells de pols del motor tenim una expressió o una altre per trobar la mida de l'entreferro, el qual, no pot ser inferior a 0,2 mm.

$$\delta = 0,2 + 0,01 \cdot P^{0,4} \text{ [mm] si } p=1 \quad (7)$$

$$\delta = 0,18 + 0,006 \cdot P^{0,4} \text{ [mm] si } p>1 \quad (8)$$

On:

P: potència nominal del motor [W]
 p: parells de pols

Com que la xapa de l'estator es compra sobre catàleg i la del rotor es fabrica a mida, l'espai de l'entreferro se sol prendre del rotor.

2.4. Debanat inductor

Trobem diferents configuracions de debanat, aquest pot ser concentrat o distribuït o, de simple o doble capa.

La primera configuració fa referència a la distribució de les espines de cada costat de bobina, on aquestes poden ocupar només una ranura per pol (concentrat) o, dos o més ranures (distribuït).

Respecte a la segona classificació, aquesta fa referència als conductors de fase que poden trobar en una ranura. Podem tenir conductors d'una sola fase a cada ranura (Simple capa) o conductors de dos fases diferents en una mateixa ranura.

2.4.1. Dimensionat del bobinat

a) Nombre de conductors

Per determinar el nombre de conductors partirem del flux estimat al motor, el qual ve donat per la següent expressió:

$$\phi = B_a \cdot \tau_p \cdot L \quad (9)$$

On:

Φ : flux [Wb]
L: longitud de l'empilat del rotor [m]
 τ_p : pas polar [m]
 B_a : inducció a l'aire [T]

Sabent el flux que tindrà el motor i juntament amb un valor estimat de la força electromotriu (E), podem resoldre la següent equació:

$$N_f = \frac{E}{4 \cdot \Phi \cdot f} \quad (10)$$

On:

Φ : flux [Wb]
E: força electromotriu [V]
 N_f : nombre d'espines per fase
f: freqüència [Hz]

Coneixent el nombre d'espines per fase, podem extreure el nombre de conductors per fase de la següent forma:

$$Z_f = 2 \cdot N_f \quad (11)$$

Tot seguit trobarem el nombre de conductors que contindrà cada ranura (Z_r), coneixent prèviament el nombre de ranures (Q) que tindrà el nostre estator, valor que extraïem de la xapa triada pel motor.

$$Z_r = \frac{m \cdot Z_f}{Q} \quad (12)$$

On:

Z_r : Nombre de conductors per ranura
 m : nombre de fases
 Z_f : nombre d'espises per fase
 Q : nombre de ranures de la xapa estatòrica

2.4.2. Secció dels conductors

Per començar, cal escollir una densitat de corrent (Δ) de referència sobre la qual es farà la primera aproximació de la secció dels conductors. La densitat de corrent sol esta compresa entre els 4 i 9 A/mm² per a motors síncrons d'ímants permanents.

La secció d'un fil serà:

$$S_c = \frac{I}{\Delta} \quad (13)$$

On:

S_c : secció del conductor [mm²]
 I : corrent [A]
 Δ : densitat de corrent [A/mm²]

I el seu diàmetre:

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot S_c}{\pi}} \quad (14)$$

On:

S_c : secció del conductor [mm²]
 d_c : diàmetre del conductor [mm]

Amb aquest resultat s'ha d'escollir en un catàleg el cable que més s'ajusti a les nostres necessitats.

Tot seguit es procedeix a calcular la secció que ocuparan els conductors a la ranura, per així poder trobar el factor d'ocupació de la ranura, el qual no es recomana que superi el 0,4.

$$S_{ocupada} = Z_r \cdot \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} \quad (15)$$

$$F_{ocupació} = \frac{S_{ocupada}}{S_{ranura}} \quad (16)$$

On:

$F_{ocupació}$: factor d'ocupació

S_{ranura} : secció de la ranura [mm²]
 S_{ocupada} : secció de la ranura ocupada per conductors [mm²]
 d_c : diàmetre del conductor [mm]

2.5. Dimensió dels imants

Els següents càlculs s'han realitzat per a imants exteriors.

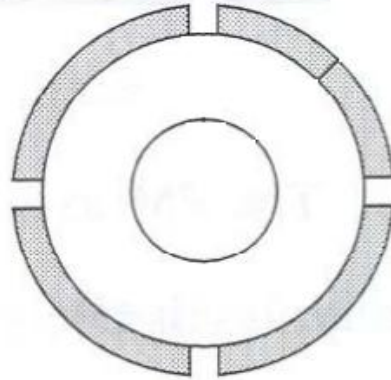


Figura 6. Rotor amb muntatge d'imants exteriors.

Els diàmetres del rotor i del estator (l'intern) juntament amb l'entreferro delimiten la mida màxima de l'imant. La seva alçada i amplada les trobarem de la següent forma:

$$l_{\text{imant}} = \alpha \cdot \tau_p \quad (17)$$

$$h_{\text{imant}} = \frac{D - D_{\text{rotor}}}{2} - \delta \quad (18)$$

On:

l_{imant} : amplada de l'imant [mm]
 α : factor de recobriment polar [0,66]
 τ_p : pas polar [mm]
 h_{imant} : alçada de l'imant [mm]
 D : diàmetre intern de l'estator [mm]
 D_{rotor} : diàmetre del rotor [mm]
 δ : entreferro [mm]

2.6. Anàlisi de desmagnetització

Per tal d'assegurar que els imants no patiran cap modificació de les seves propietats amb el funcionament regular de la màquina, cal complir la següent condició per les seves dimensions:

$$FMM_D = \frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{I \cdot N_f \cdot \xi_b}{2 \cdot p} \cdot k \quad (19)$$

$$k = \frac{I}{I_N} \quad (20)$$

$$h_{imant} \geq \frac{FMM_D}{H_c} \quad (21)$$

Si l'alçada de l'imant compleix amb la condició anterior, l'imant no rebrà cap pertorbació en les seves propietats. En cas contrari, caldrà agafar l'altura que compleixi amb la condició anterior per tal de no perdre magnetització, etc.

2.7. Induccions

2.7.1. Inducció de l'imant

L'inducció de l'imant la trobem amb la següent expressió:

$$B_m = \frac{B_r}{1 + \mu_r \cdot \alpha \cdot \frac{\delta}{h_{imant}}} \quad (22)$$

On:

B_r : inducció remanent [T]
 B_m : inducció de l'imant [T]
 δ : amplada de l'entreferro [mm]
 μ_r : permeabilitat del buit
 α : factor de recobriment polar

2.7.2. Inducció a l'aire

L'inducció a l'aire és:

$$B_a = \frac{b_{imant}}{\tau_p} \cdot B_m \quad (23)$$

On:

B_a : inducció a l'aire [T]
 B_m : inducció de l'imant [T]
 τ_p : pas polar [mm]
 b_{imant} : l'amplada de l'imant [mm]

2.7.3. Inducció a les dents

La inducció màxima recomanada a les dents és de 1,7T. Si es superés es saturaria i el corrent necessari per desenvolupar la mateixa potència augmentaria.

Per tal de calcular el valor de la inducció a les dents fem servir la següent expressió:

$$B_t = B_a \cdot \frac{\pi \cdot D}{\omega_t \cdot Q} \quad (24)$$

On:

B_t : inducció a les dents [T]
 B_a : inducció a l'aire [T]
 ω_t : amplada de les dents estatòriques [mm]
 Q : nombre de ranures de l'estator
 D : diàmetre intern de l'estator [mm]

2.7.4. Inducció a la corona estatòrica

La inducció màxima recomanada a la corona és de 1,5T.

Per tal de calcular el valor de la inducció a la corona fem servir la següent expressió:

$$B_y = \frac{\left(\frac{\Phi}{2}\right)}{l_y \cdot L} \quad (25)$$

On:

B_y : inducció a les dents [T]
 Φ : flux [Wb]
 l_y : distància entre les dents i el diàmetre exterior de l'estator [mm]
 L : longitud de l'empilat del motor [mm]

La distància l_y es pot trobar de la següent forma:

$$l_y = \frac{D_{\text{exterior}} - D}{2} - t_\omega \quad (26)$$

On:

l_y : distància entre les dents i el diàmetre exterior de l'estator [mm]
 D : diàmetre interior de l'estator [mm]
 D_{exterior} : diàmetre exterior de l'estator [mm]
 t_ω : longitud de les dents de l'estator [mm]

2.7.5. Inducció a l'entreferro

Coneixent que la inducció a l'entreferro suposa un 75% de la inducció de l'ímant, la seva expressió és:

$$B_e = 0,75 \cdot B_r \quad (27)$$

2.8. Pèrdues

2.8.1. Resistència del debanat

$$\sigma_{CuT2} = \frac{\sigma_{CuT1}}{1 + \theta \cdot \alpha_{Cu}} \quad (28)$$

$$\theta = T_2 - T_1 \quad (29)$$

On:

T_1 : temperatura de referència (20°C)

T_2 : nova temperatura [°C]

θ : escalfament [°C]

α_{Cu} : coeficient de temperatura del coure ($3,81 \cdot 10^{-3}$)

σ_{CuT1} : conductivitat del coure a 20°C ($57 \cdot 10^6$ S/m)

σ_{CuT2} : conductivitat del coure a temperatura T_2 [S/m]

$$R = \frac{N_f \cdot l_{av}}{\sigma_{CuT2} \cdot S_c} [\Omega] \quad (30)$$

2.8.2. Pèrdues Joule

Les pèrdues Joule són funció de la resistència del bobinat i del corrent que hi circula:

$$P_{Joule} = 3 \cdot R \cdot I^2 \text{ [W]} \quad (31)$$

2.8.3. Pèrdues al ferro

Les pèrdues al ferro es consideren aproximadament una tercera part de les pèrdues Joule:

$$P_{Fe} = \frac{1}{3} \cdot P_{Joule} \text{ [W]} \quad (32)$$

2.8.4. Pèrdues totals

Les pèrdues total del motor síncron d'ímants permanents seran la suma de les anteriors:

$$P_T = P_{Joule} + P_{Fe} \text{ [W]} \quad (33)$$

2.9. Ventilació

La ventilació del motor ens permet mantenir la temperatura als punts més sensibles d'aquest en uns valors adequats. Podem exercir una ventilació natural

o forçada, la nostra tria dependrà del valor d'escalfament al que arribi la nostra màquina i de la disponibilitat que tinguem per instal·lar un ventilador.

- a) Ventilació natural: És aquella que exerceix l'ambient sense cap ajuda externa, com podria ser un ventilador. El coeficient de convecció per ventilació natural el podem calcular amb la següent expressió:

$$h = 1,32 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta T}{D_{carcassa}} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]} \quad (34)$$

On:

ΔT : diferència de temperatura (normalment s'utilitza un valor entre 80-100°C)
 $D_{carcassa}$: diàmetre extern de la carcassa del motor [m]

- b) Ventilació forçada: És aquella que s'exerceix mitjançant un ventilador. El coeficient de convecció per ventilació forçada és:

$$h = 3,89 \cdot \sqrt{\frac{v}{L_{carcassa}} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]} \quad (35)$$

On:

v: velocitat de l'aire (compresa entre 5-15 m/s)
L: longitud de la carcassa del motor [m]

Per tal de determinar l'escalfament de la màquina, haurem de calcular la superfície de ventilació:

$$S_v = D_{carcassa} \cdot L_{carcassa} \cdot \pi \text{ [m}^2\text{]} \quad (36)$$

L'expressió que ens permet conèixer l'escalfament màxim del motor és:

$$\theta_{\max} = \frac{P_T}{h \cdot S_v} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (37)$$

CAPÍTOL 3:

ANÀLISIS MAGNÈTICS

AMB ELEMENTS FINITS

Un cop s'han determinat analíticament les dimensions i característiques del motor cal comprovar que el funcionament i el disseny de la màquina són els adequats.

Aquesta comprovació es durà a terme mitjançant el programa FEMM, el qual utilitza el mètode dels elements finits per realitzar els seus anàlisis.

FEMM és un programa capaç de realitzar anàlisis magnètics, electrostàtics, de flux de calor i de flux de corrent. Oferint també la possibilitat d'automatitzar els anàlisis mitjançant un llenguatge de programació anomenat LUA.

3.1. Dibuix del motor

Cal realitzar el dibuix de la xapa del motor mitjançant una eina CAD.

Mentre que el dibuix de la xapa de l'estator es realitzarà mitjançant el model i les mides facilitades pel fabricant, el dibuix de la xapa rotòrica es durà a terme a partir de les mides calculades analíticament dels imants i d'un model de xapa rotòrica que s'adapti al nostre tipus de muntatge.

Un cop realitzat el dibuix, s'haurà de guardar el document en format *dxg*. Ja que és l'únic format que reconeix el programa FEMM per realitzar importacions.

3.2. Configuració del problema

Un cop creat un nou arxiu de problema magnètic i importat el dibuix, caldrà definir les característiques del problema.

3.2.1. Definició del problema

Cal obrir la pestanya *problem* i especificar les unitats en que esta dibuixat el motor, la seva profunditat i la freqüència a la que realitzarem el anàlisis. La freqüència utilitzada sempre serà 0 Hz.

3.2.2. Definició dels materials

El programa ens dona l'opció d'escollir un material ja definit de la seva llibreria o de crear-ne un de nou. La creació d'un nou material es realitza mitjançant la introducció d'algunes de les seves característiques.

Per la caracterització d'un motor síncron d'imants permanents, necessitarem els següents materials:

a) Xapa del rotor i estator

En aquest cas s'utilitzarà l'acer M600-50, per tant, caldrà introduir la corba B-H proporcionada pel fabricant per a la freqüència a la que es treballarà i la seva conductivitat elèctrica, la qual s'expressa en MS/m.

b) Imants

Pels imants utilitzats caldrà definir les característiques següents: permeabilitat elèctrica, coercitivitat i conductivitat.

c) Coure

S'haurà d'especificar la seva conductivitat, el diàmetre corresponent a una espira i com a atribut especial, destacar que és cable magnètic.

d) Aire

S'utilitzarà el material definit a la llibreria del programa.

3.2.3. Definició dels circuits

Cal crear els circuits que trobem en el funcionament del motor elèctric. Normalment són les tres fases que alimenten el motor, les quals les anomenarem circuit A, B i C.

Un cop creats els circuits, caldrà introduir el seu valor màxim de corrent.

3.2.4. Definició de les condicions de contorn

És necessari crear una nova condició de contorn del tipus *Prescribed A*, la qual s'aplicarà al contorn de l'estator i al contorn interior del rotor (a les cares del rotor que es trobarien en contacte amb l'eix).

3.2.5. Debanat estatòric

La distribució del bobinat estatòric es determina mitjançant el programa *Koil*, al qual s'haurà d'especificar el nombre de ranures de l'estator, el parell de pols i el tipus de bobinat que es desitja; simple o doble capa. Un cop introduïdes les dades al programa, aquest et generarà una imatge del muntatge i una matriu.

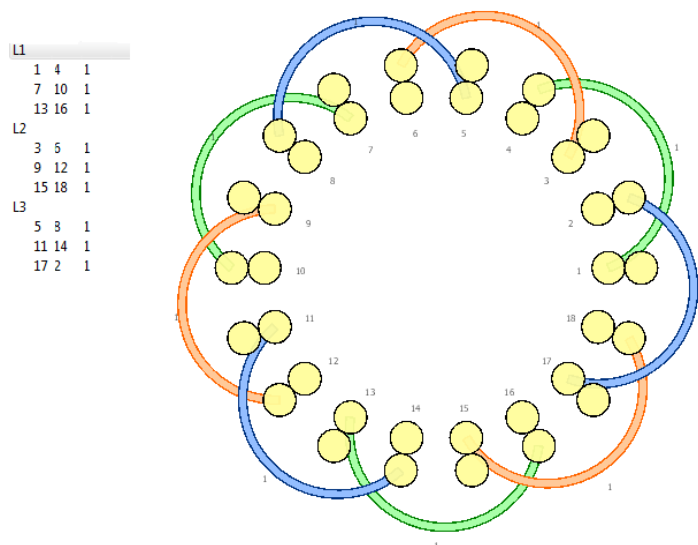


Figura 7. Debanat per a un estator de 18 ranures i 6 pols.

3.2.6. Assignació dels materials

Un cop creats els materials que definiran el dibuix del motor, s'assignaran a cada una de les parts.

És important classificar-los per grups, és a dir, crear un grup amb tots els punts i línies de cada zona. Principalment s'ha de fer amb totes les línies que componen al rotor, ja que, posteriorment això ens permetrà fer-lo girar.

3.3. Anàlisis magnètics

3.3.1. Verificació de les induccions

Per tal de comprovar els nivells d'inducció a les diferents parts del motor, s'executa un anàlisi en buit, és a dir, sense corrent als circuits.

La inducció no hauria de superar els 1,7T, considerant aquest com a valor límit.

3.3.2. Anàlisi en buit

L'objectiu d'aquest anàlisi és obtenir el flux induït a cada fase en un cicle elèctric per tal de poder calcular la FEM induïda a cada fase. El procés es durà a terme en buit i mitjançant el llenguatge LUA, amb el qual automatitzarem l'obtenció de dades i el procés de gir del motor.

L'angle mecànic que cal girar per realitzar un cicle elèctric complet és:

$$\alpha_{mecànic} = \frac{\alpha_{elèctric}}{p} \quad (38)$$

On:

$\alpha_{elèctric}$: 360°
 p: parells de pols

Un cop obtingut el flux és pot obtenir la FEM induïda a cada fase mitjançant el mètode de derivació directe o desenvolupant les sèries de Fourier:

a) Derivació directa:

$$\alpha x_n = \frac{\alpha_{mecànic}}{n} \quad (39)$$

$$Ex_n = \omega \cdot \frac{Fx_n - Fx_{n-1}}{\alpha x_n - \alpha x_{n-1}} [V] \quad (40)$$

On:

- ω : velocitat de gir [rad/s]
- n : nombre de passos que es simulen
- αx_n : angle mecànic girat en cada pas [rad]
- Fx_n : flux fase x , posició n [Wb]
- Ex_n : FEM induïda a la fase x , posició n [V]

b) Sèries de Fourier:

El primer pas per desenvolupar les sèries de Fourier és trobar la descomposició harmònica del flux, per així poder calcular la FEM a cada posició α de cada fase.

$$\phi \sin x_h = \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{\alpha=0}^{\alpha=2\pi} \phi(\alpha) \cdot \sin(h \cdot \alpha) \cdot \Delta\alpha \quad (41)$$

$$\phi \cos x_h = \frac{1}{\pi} \cdot \sum_{\alpha=0}^{\alpha=2\pi} \phi(\alpha) \cdot \cos(h \cdot \alpha) \cdot \Delta\alpha \quad (42)$$

$$Ex_\alpha = \omega \cdot \sum_{h=1}^{h=k} [\phi \sin x_h \cdot \cos(\alpha) - \phi \cos x_h \cdot \sin(\alpha)] [V] \quad (43)$$

On:

- ω : velocitat de gir [rad/s]
- $\Phi \sin x_h$: component sinusoidal del flux de la fase x , harmònic h [Wb]
- $\Phi \cos x_h$: component cosinusoidal del flux de la fase x , harmònic h [Wb]
- $\lambda(\alpha)$: flux a la posició α [Wb]
- α : angle elèctric [rad]
- $\Delta\alpha$: increment de l'angle elèctric [rad]
- Ex_α : FEM a la fase x quan tenim un angle elèctric α [V]
- h : Nombre d'harmònic.

I amb el sumatori de la descomposició harmònica de l'harmònic fonamental del flux, obtenim el valor del flux principal de l'imant.

$$\phi = \sqrt{\phi \sin A_1 + \phi \cos A_1} [Wb] \quad (44)$$

3.3.3. Parell de cogging

El parell de Cogging, també conegut com parell de buit, es produeix a causa de la interacció entre els imants permanents situats al rotor i les ranures de l'estator quan el motor es troba sense alimentació. El principal problema que ens causa a la màquina són unes vibracions al treballar en baixes velocitats.

Per determinar el cicle de Cogging, el primer pas que s'ha de realitzar és el de trobar el nombre d'impactes de pas per ranura:

$$N_{cogging} = \frac{2p}{MCD(Q, 2p)} \quad (45)$$

Un cop tenim aquest paràmetre, cal determinar quants graus mecànics equivalen a un cicle de cogging:

$$Cicle_{cogging} = \frac{360}{N_{cogging} \cdot Q} \quad (46)$$

Amb aquestes dades i el programa LUA utilitzat en l'anàlisi en buit, podem obtenir el parell de cogging del motor. Aquest anàlisi també cal dur-lo a terme amb la màquina en buit.

3.3.4. Anàlisi en càrrega

L'objectiu de realitzar l'anàlisi en càrrega és el d'analitzar i comparar el parell que atorgarà el motor si li apliquem una alimentació amb senyal sinusoidal i amb una quadrada.

a) Alimentació amb senyal sinusoidal:

$$I_A = \sqrt{2} \cdot I \quad (47)$$

$$I_B = \frac{-\sqrt{2} \cdot I}{2} \quad (48)$$

$$I_C = \frac{-\sqrt{2} \cdot I}{2} \quad (49)$$

b) Alimentació amb ona quadrada:

$$I_A = \sqrt{2} \cdot I \quad (50)$$

$$I_B = -\sqrt{2} \cdot I \quad (51)$$

$$I_C = 0 \quad (52)$$

La comparació entre els parells obtinguts ens mostra que el parell obtingut amb una alimentació d'ona quadrada és un 14% major al parell obtingut amb una senyal sinusoidal.

Cal tenir en compte que l'alimentació amb ona quadrada és més difícil de controlar.

3.3.5. Anàlisi d'energia

L'objectiu d'aquest anàlisi és poder calcular les inductàncies directe i de quadratura, per això, cal obtenir el flux del motor amb la màquina alimentada sinusoidalment i amb els imants desactivats per tal d'anular la seva coercitivitat (H_c).

La inductància directe es correspon a la posició on l'energia o el flux són màxims, i la inductància de quadratura a la posició en que són mínims. Les expressions de les inductàncies són:

$$L_d = \frac{2}{3} \cdot \frac{\min(\phi)}{I^2} \text{ [H]} \quad (53)$$

$$L_q = \frac{2}{3} \cdot \frac{\max(\phi)}{I^2} \text{ [H]} \quad (54)$$

Posteriorment, podem trobar les inductàncies totals sumant a les anteriors la inductància de dispersió trobada analíticament.

$$L_{dTotal} = L_d + L_{s\sigma} \text{ [H]} \quad (55)$$

$$L_{qTotal} = L_q + L_{s\sigma} \text{ [H]} \quad (56)$$

3.3.6. Pèrdues Joule i pèrdues al ferro

Es realitzarà un últim anàlisi magnetostàtic per quantificar les pèrdues degudes a l'efecte Joule al coure i les pèrdues al ferro de l'estator i el rotor. Aquest anàlisi es realitzarà en càrrega i sense produir el gir a la màquina.

Per a obtenir les pèrdues al coure mitjançant el programa FEMM, un cop realitzat l'anàlisi i trobant-nos a la finestra dels resultats, cal seleccionar l'àrea de les ranures i executar la integral que computa les pèrdues totals en watts.

Respecte a les pèrdues al ferro, aquestes es trobaran mitjançant un programa LUA que utilitza els coeficients de Bertotti.

CAPÍTOL 4: CARACTERÍSTIQUES DE LA MÀQUINA

Un cop realitzats els anàlisis magnètics amb el mètode d'elements finits i d'haver pogut comparar els resultats obtinguts amb la pauta de càlcul analítica, es calcularan i representaran les característiques principals del motor.

4.1. Inductàncies

4.1.1. Eix directe i de quadratura

- a) Eix directe (d): Travessa principalment la xapa magnètica del rotor, la qual al tenir una permeabilitat elevada permet que les línies de camp magnètic la travessin fàcilment.
- b) Eix en quadratura (q): Acostuma a ser l'eix que té com a origen el centre de la màquina i travessa l'ímant. Al tenir l'ímant una permeabilitat baixa, aquest dificulta el pas de les línies de camp.

Cada un dels eixos té una inductància, L_d i L_q respectivament. Depenent de la relació que tinguin les dues, podem designar la màquina de pols sortints o llisos. En el cas d'una màquina de pols sortints, tenim que la relació entre les inductàncies dels eixos és la següent:

$$\frac{L_d}{L_q} > 1 \quad (57)$$

En canvi, la condició que han de complir les inductàncies dels eixos d'una màquina perquè aquesta sigui de pols llisos és:

$$\frac{L_d}{L_q} = 1 \quad (58)$$

Les màquines de pols sortints tenen un parell, el qual està compost per una part magnètica i una altra de relucant. En canvi, les màquines de pols llisos tenen un parell amb una única component magnètica, ja que obtenen el parell dels imants.

4.1.2. Inductància principal

La inductància principal és la que crea l'harmònic fonamental del flux principal, aquesta inductància la trobarem posteriorment amb l'anàlisi magnètic amb elements finits.

4.1.3. Inductància de dispersió

És la causant del flux de dispersió, un flux que generalment no creua el entreferro. Aquest flux pot representar un problema, ja que pot implicar un augment de la mida de l'imant i pot causar pèrdues addicionals a l'estructura de la màquina.

Dins la inductància de dispersió podem diferenciar 4 tipus:

a) Inductància de dispersió diferencial o d'entreferro

Aquesta és la inductància corresponent als harmònics del flux principal i, dins del grup d'inductàncies de dispersió, és l'única que travessa l'entreferro.

Aquesta inductància es pot calcular a partir dels factors de dispersió i de reducció degut a barres rotòriques (aproximadament 0,8) i, de la inductància principal.

$$L_{\delta s} = 0,8 \cdot \sigma_{\delta s} \cdot L_m \text{ [H]} \quad (59)$$

On:

$L_{\delta s}$: inductància de dispersió d'entreferro [H]

$\sigma_{\delta s}$: factor de dispersió

L_m : inductància principal [H]

El factor de dispersió de la inductància principal s'obté de les següents expressions:

$$\sigma_{\delta s} = k_{\delta 1} + k_{\delta 12} \quad (60)$$

$$k_{\delta 1} = \sum_{k=1}^{300} \left[\frac{\sin \left[(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot W_p \cdot \frac{\pi}{2} \right] \cdot \frac{\sin \left[(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot q \cdot \frac{\alpha_{us}}{2} \right]}{q \cdot \sin \left[(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot q \cdot \frac{\alpha_{us}}{2} \right]}}{(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot k_{w1}} \right]^2 \quad (61)$$

$$k_{\delta 12} = \sum_{k=-1}^{-300} \left[\frac{\sin \left[(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot W_p \cdot \frac{\pi}{2} \right] \cdot \frac{\sin \left[(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot q \cdot \frac{\alpha_{us}}{2} \right]}{q \cdot \sin \left[(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot q \cdot \frac{\alpha_{us}}{2} \right]}}{(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot k_{w1}} \right]^2 \quad (62)$$

On α_{us} és:

$$\alpha_{us} = \frac{p \cdot 2\pi}{Q} \quad (63)$$

b) Inductància de dispersió de ranura

El càlcul de la inductància de dispersió de ranura està condicionat pel paràmetre λ_{us} , ja que aquest depèn de la geometria de la ranura estatòrica.

$$L_{us} = \frac{4 \cdot m}{Q} \cdot \mu_0 \cdot L \cdot N_f^2 \cdot \lambda_{us} [\text{H}] \quad (64)$$

c) Inductància de cap de dent (zig-zag)

La inductància de dispersió de cap de dent es pot quantificar utilitzant un factor de permeància:

$$L_{\sigma\delta s} = \frac{4 \cdot m}{Q} \cdot \mu_0 \cdot L \cdot N_f^2 \cdot \lambda_{\delta s} [\text{H}] \quad (65)$$

On:

$$\lambda_{\delta s} = k_2 \cdot \frac{5 \cdot \frac{\delta}{b_{1s}}}{5 + 4 \cdot \frac{\delta}{b_{1s}}} \quad (66)$$

$$k_2 = 1 - \frac{3}{4} \cdot \varepsilon \quad (67)$$

$$\varepsilon = 1 - W_{\eta} \quad (68)$$

b_{1s} : obertura de la ranura [m]
 W_{Tp} : pas del bobinat

d) Inductància de cap de bobina

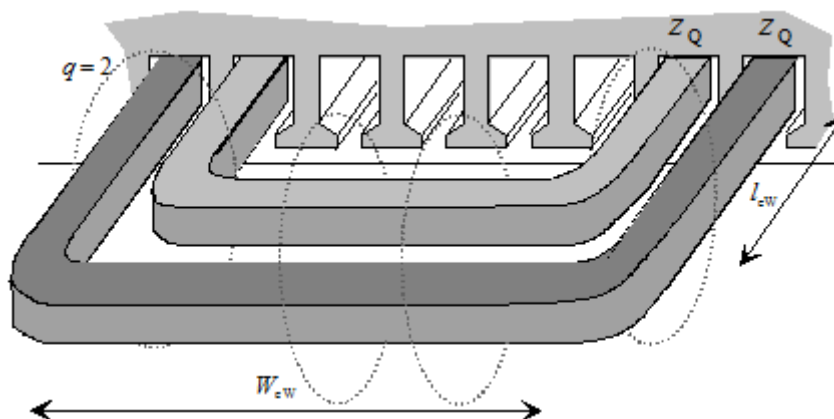


Figura 8. Dimensions del cap de bobina.

La inductància de cap de bobina es calcula:

$$L_{ws} = \frac{4 \cdot m}{Q} \cdot q \cdot \mu_0 \cdot l_w \cdot N_f^2 \cdot \lambda_{ws} \text{ [H]} \quad (69)$$

On:

q : parells de ranures per pol i fase
 μ_0 : permeabilitat del buit
 N_f : nombre d'espores per fase
 Q : ranures de l'estator
 l_w : longitud dels caps de bobina ($W_{ew} + 2 \cdot l_{ew}$)
 λ_{ws} : factor de permeància

El nombre de parells de ranures ocupades per pol i fase són:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot m \cdot p} \quad (70)$$

L'expressió del factor de permeància és la següent:

$$\lambda_{ws} = \frac{2 \cdot l_{ew} \cdot \lambda_{lew} + W_{ew} \cdot \lambda_w}{l_w} \quad (71)$$

On:

W_{ew} : longitud del conductor que passa pla per sobre de l'empilat
 l_{ew} : longitud del conductor que sobresurt de l'empilat
 l_w : longitud dels caps de bobina
 λ_w, λ_{lew} : factor de permeància

Per poder determinar la longitud d'un cap de bobina és necessari determinar la longitud d'una espira:

$$l_{av} = 2 \cdot L + 2,3 \cdot \tau_p \quad (72)$$

I la longitud dels caps de l'espira es troba de la següent forma:

$$l_w = \frac{l_{av} - 2 \cdot L}{2} \quad (73)$$

Respecte a la longitud W_{ew} , aquesta és pot aproximar amb:

$$W_{ew} = l_w - 2 \cdot l_{ew} \quad (74)$$

La inductància total de dispersió serà la suma de totes les inductàncies determinades en aquest subapartat:

$$L_{s\sigma} = L_{\delta\delta} + L_{us} + L_{\sigma\delta\delta} + L_{ws} \quad (75)$$

4.1.4. Inductància total

La inductància total de l'eix directe i la inductància total de l'eix en quadratura són la suma de les inductàncies principals i de dispersió:

$$L_d = L_{md} + L_{s\sigma} \text{ [H]} \quad (76)$$

$$L_q = L_{mq} + L_{s\sigma} \text{ [H]} \quad (77)$$

4.2. Paràmetres característics

Les equacions que defineixen el corrent, la tensió i el parell del motor síncron d'ímants permanents de pols llisos són:

$$I^2 = I_d^2 + I_q^2 \text{ [A]} \quad (78)$$

$$U^2 = (R \cdot I_d - \omega \cdot L_q \cdot I_q)^2 + (R \cdot I_q + \omega \cdot L_d \cdot I_d + \omega \cdot \phi)^2 \text{ [V]} \quad (79)$$

$$L_d = L_q \text{ [H]} \quad (80)$$

4.2.1. Parell

Una de les expressions per trobar el parell d'un motor síncron d'ímants permanents és:

$$M = 3 \cdot p \cdot (\phi \cdot I_q + (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q) \text{ [Nm]} \quad (81)$$

On:

- p: parell de pols
- Φ : flux [Wb]
- L_d : inductància directe [H]
- L_q : inductància de quadratura [H]

I_d : corrent directe [A]
 I_q : corrent de quadratura [A]

En aquesta expressió trobem els corrents I_d (corrent directe) i I_q (corrent de quadratura) els quals són els dos components que componen el corrent:

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \text{ [A]} \quad (82)$$

En la corba de parell-velocitat d'un motor síncron d'imants permanents podem distingir dos trams, un primer que va des de velocitat 0 a una velocitat base i , un segon que va des de la velocitat base a la velocitat màxima del motor. En el primer tram, trobem un parell de valor constant que es manté fins una velocitat base i , a partir d'aquesta, el parell comença a decreïxer fins a arribar a 0, marcant així el segon tram.

4.2.2. Corrent de curtcircuit

El corrent de curtcircuit és funció de la inductància directa i del flux dels imants:

$$I_{dk} = \frac{\phi}{L_d} \text{ [A]} \quad (83)$$

Aquest corrent ens pot servir de referència per saber si el nostre motor serà de velocitat finita, és a dir, si tindrà una velocitat màxima; o si serà de velocitat infinita.

A part de la seva utilitat com a referència, també podem fer servir el paràmetre I_{dk} per forçar al nostre motor a tenir velocitat finita o infinita segons la nostra necessitat, per exemple, si al dissenyar un motor que ha d'arribar a una certa velocitat amb un cert parell ens trobem que aquest no arriba a la velocitat esperada, podem modificar el corrent I_{dk} per aconseguir el motor tingui velocitat infinita i que així compleixi amb tots els requisits.

Les possibilitats que podem tenir són les següents:

- a) $I_{dk} > I$
- b) $I_{dk} = I$
- c) $I_{dk} < I$

En el primer cas, tindríem un motor de velocitat finita i en els altres un de velocitat infinita.

Per explicar el concepte de motor amb velocitat finita o infinita de forma adequada, cal que tornem a l'explicació del parell, on s'ha comentat que podem diferenciar dos trams en la corba parell-velocitat d'un motor. En el primer tram on tenim un parell constant, trobem la component I_q del corrent amb valor I , mentre que la component I_d té un valor nul. A partir de la velocitat base i , coincidint amb el començament del segon tram, la component I_q comença a decreïxer gradualment fins a arribar a 0, tot el contrari que la component I_d , la qual comença a créixer fins a assolir el valor de I . Tot hi els diversos canvis que pateixen les components del corrent, el mòdul d'aquest sempre té el mateix valor, un valor que es manté constant.

Si veiem el mòdul del corrent en una gràfica on l'eix horitzontal és la component I_d i l'eix vertical la component I_q , veurem que sempre ens estarem movent en el

segon quadrant de la gràfica a mesura que la màquina vagi augmentat la seva velocitat.

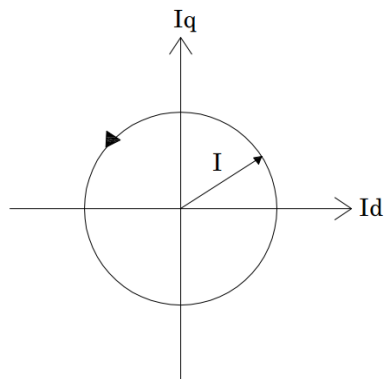


Figura 9. Gràfica del corrent.

I si ara pensem en els casos on trobem una I_{dk} major, igual i menor al corrent:

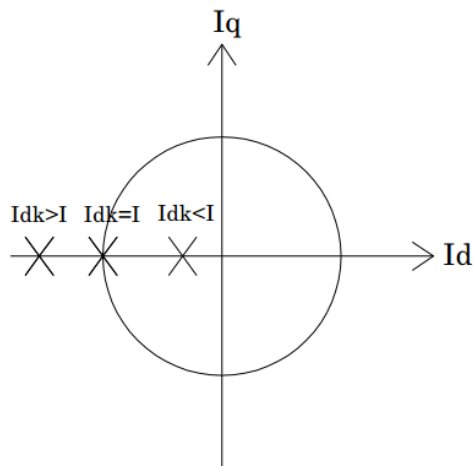


Figura 10. Senyalització dels possibles casos d' I_{dk} .

Podem observar que quan I_{dk} sigui major a I , la component I_d no podrà assolir mai el valor de I_{dk} . En canvi, quan sigui menor al mòdul d' I , podem forçar que la component I_d no assoleixi valors per sobre d' I_{dk} i, que es mantingui constant en aquest valor.

Si aïllem la velocitat en l'expressió de la tensió i observem quins seran els valors per les components del corrent en el punt de màxima velocitat, tenim que:

$$I_d = I_{dk} = \frac{-\lambda}{L_d} \text{ [A]} \quad (84)$$

$$I_{dk} = I \text{ [A]} \quad (85)$$

$$I_q = \sqrt{I^2 - I_d^2} \text{ [V]} \quad (86)$$

$$\omega \approx \frac{U}{\sqrt{(L_q \cdot I_q)^2 + (\lambda + L_d \cdot I_d)^2}} \quad (87)$$

Substituint les components del corrent, trobem una velocitat màxima de:

$$\omega_{\max} \approx \frac{U}{\sqrt{0+0}} \approx \infty \quad (88)$$

Cal destacar que s'ha menyspreat la resistència a causa del seu baix valor.

Per tant, la modificació del corrent I_{dk} és una gran solució per casos on el motor no arribi a la velocitat desitjada, però si compleixi amb la resta de requisits. Coneixent que el corrent I_{dk} depèn del flux i de les inductàncies directa i de quadratura, on en el cas d'un motor de pols llisos són iguals, només hauríem d'augmentar la inductància afegint una inductància externa per variar el valor d' I_{dk} i aconseguir que el motor fos de velocitat infinita.

Cal aclarir el concepte de motor de velocitat infinita a la pràctica, on aquesta es trobarà limitada per qüestions mecàniques. La principal limitació mecànica de la velocitat són els coixinets, els quals estan dissenyats per diferents velocitats, i caldrà triar uns que puguin suportar velocitats una mica per sobre de la velocitat de centrifugació, ja que aquesta serà la velocitat màxima a la que girarà la màquina quan es trobi en funcionament.

4.2.3. Velocitat màxima

Com s'ha comentat en el subapartat anterior, la velocitat màxima la trobarem en el punt on tinguem un corrent $I_q=0$ i $I_d=I$ o I_{dk} , tot dependrà de quina solució s'hagi triat pel motor.

4.2.4. Potència

La potència desenvolupada pel motor és

$$P = M \cdot \omega [\text{W}] \quad (89)$$

4.2.5. Rendiment

El rendiment és la relació entre la potència útil entregada pel motor i la potència absorbida:

$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}} \cdot 100 [\%] \quad (90)$$

La potència absorbida és considera la suma entre la potència útil i les pèrdues del motor, les que com hem explicat en el capítol de la pauta analítica són les pèrdues Joule i les pèrdues al ferro:

$$P_{abs} = P_u + P_{Joule} + P_{Fe} [\text{W}] \quad (91)$$

4.3. Corbes característiques

Al calcular els paràmetres descrits anteriorment per a cada valor de velocitat, podem traçar les característiques del motor.

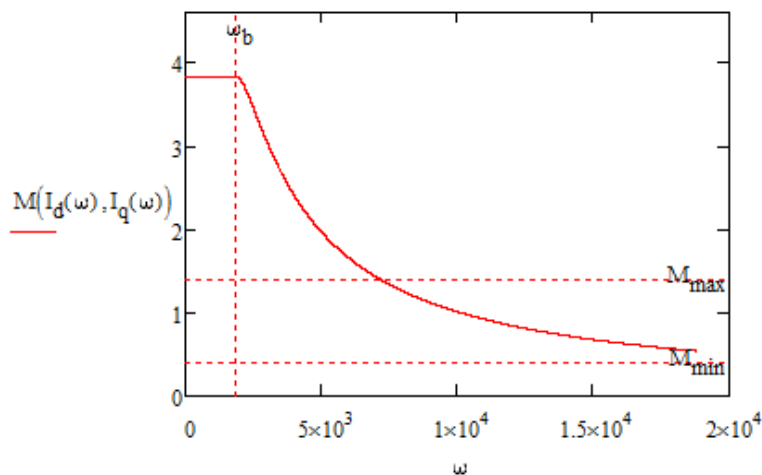


Figura 11. Corba parell-velocitat d'un motor de velocitat infinita.

A la característica parell-velocitat podem observar com varia el valor del parell segons augmentem la velocitat de gir del motor. Es pot veure que el motor manté un valor de parell màxim i constant fins a una certa velocitat, anomenada velocitat base.

En aquesta gràfica podem observar els dos trams comentats en el apartat 4.2.1. En el qual s'explicava la relació entre els corrents de quadratura i directa, corrents que varien de la següent forma:

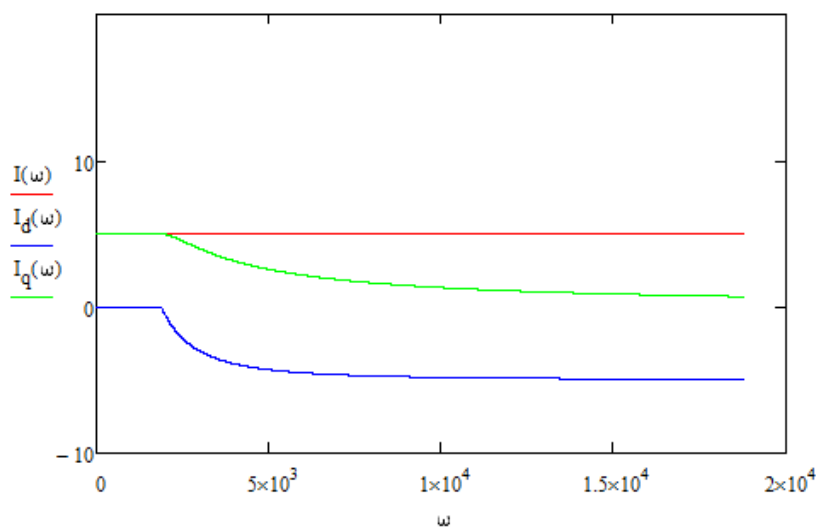


Figura 12. Característica corrent-velocitat.

La corba de potència desenvolupada pel motor és:

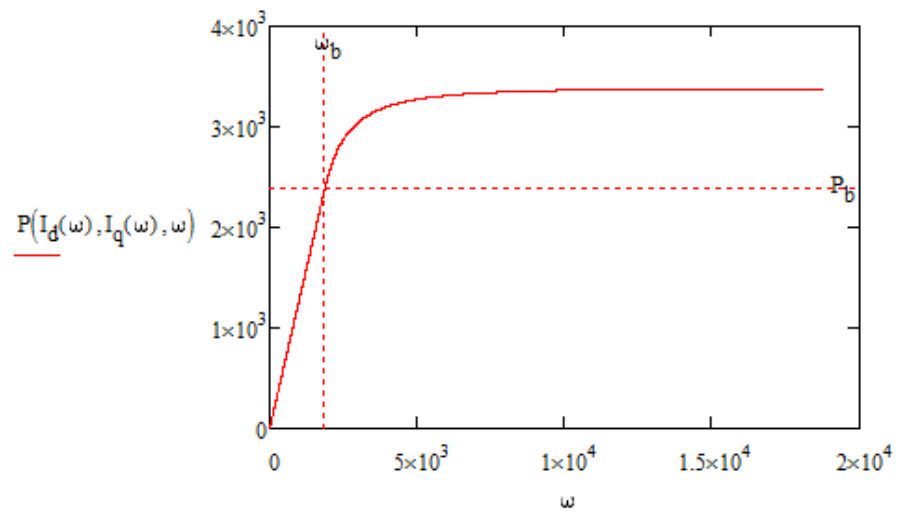


Figura 13. Corba potència-velocitat.

CAPÍTOL 5:

ANÀLISI TÈRMIC AMB

ELEMENTS FINITS

L'anàlisi tèrmic té una gran importància en el disseny de màquines ja que ens permet corroborar que l'aïllament utilitzat és apte per l'escalfament obtingut i perquè ens ajuda a triar el tipus de carcassa i ventilació més adient pel nostre motor.

En el nostre cas, el motor no tindrà carcassa com a conseqüència de la seva finalitat. Els motors elèctrics utilitzats en rentadores no utilitzen carcassa.

L'anàlisi tèrmic s'efectuarà amb el programa FEMM, el qual ens demanarà una nova importació dels arxius dibuixats en CAD i una nova caracterització dels materials.

5.1. Pèrdues del motor

Les pèrdues del motor són les responsables de l'escalfament d'aquest i de condicionar el seu rendiment, en aquest cas tenim les pèrdues Joule als conductors i les pèrdues al ferro a les xapes del rotor i l'estator.

Per poder efectuar la anàlisi tèrmic el programa FEMM ens demanarà caracteritzar de nou els materials, i una de les propietats que haurem d'aportar és la densitat de pèrdues. La densitat de pèrdues és mesura en W/m^3 , i per obtenir-la és necessari determinar el volum del rotor i de l'estator, ja que el càlcul d'aquesta és:

$$VHG_{rotor} = \frac{P_{Ferrorotor}}{V_{rotor}} [W/m^3] \quad (92)$$

$$VHG_{estator} = \frac{P_{Ferroestator}}{V_{estator}} \text{ [W/m}^3\text{]} \quad (93)$$

On:

VGH_{rotor} : *volume heat generation* del rotor [W/m³]
 $VGH_{estator}$: *volume heat generation* de l'estator [W/m³]
 $P_{ferro rotor}$: pèrdues al ferro del rotor [W]
 $P_{ferro estator}$: pèrdues al ferro de l'estator [W]
 $V_{estator}$: volum de l'estator [m³]
 V_{rotor} : volum del rotor [m³]

La densitat de pèrdues al coure la podem extreure directament en l'anàlisi en càrrega, seleccionant les ranures de l'estator i executant l'integral que computa les densitat de pèrdues total (*Total loss density*).

5.2. Importació i caracterització del problema

Com hem dit prèviament, per poder efectuar l'anàlisi tèrmic del problema amb FEMM cal crear un nou arxiu, en aquest cas un arxiu de flux de calor (*Heat Flux Problem*), i importar de nou l'arxiu CAD del motor. Abans s'haurà d'haver dibuixat un l'aïllament que recobreixi les ranures de l'estator i que acostuma a ser de 0,25 mm.

Un cop importat l'arxiu CAD amb l'aïllament, s'hauran de configurar les propietats dels sistema, és a dir, les unitats de dibuix i la profunditat del motor.

A l'hora de crear els materials a utilitzar, haurem d'introduir les següents característiques:

- a) Conductivitat tèrmica: On trobem la conductivitat tèrmica constant i la conductivitat tèrmica depenent de la temperatura.
- b) Capacitat volumètrica calorífica [MJ/(m³·K)]
- c) Densitat de pèrdues [W/m³]: Cal introduir les densitats calculades anteriorment. En els elements que no tenen pèrdues, posarem 0.

Per acabar, només caldrà crear les noves condicions de contorn, les quals s'explicaran més endavant.

5.3. Aïllant

Podem trobar diverses categories en funció de la temperatura assolida al motor. La classificació segons la IEC 60085 i IEC 60034 són:

- a) Classe B: Comprenen materials basats en polièsters i poliamídics aglutinats amb materials orgànics o saturats amb ells. La temperatura característica d'aquesta classe és de 130°C.
- b) Classe F: Comprenen materials basats en mica, amiant i fibra de vidre aglutinats amb materials sintètics, en general polièsters. La seva temperatura característica és de 155°C.

- c) Classe H: Compren materials basats en mica i fibra de vidre aglutinats amb silicones d'alta estabilitat tèrmica. La seva temperatura característica és de 180°C.

5.4. Anàlisis tèrmics i condicions de contorn

5.4.1. Anàlisi amb ventilació natural

Un motor evacua la calor per convecció a través de la carcassa i de l'entreferro.

El programa FEMM simula l'efecte de la convecció a través de les condicions de contorn, les quals es defineixen a partir del coeficient de convecció (h) i de la temperatura ambient (T_0).

El coeficient de convecció per a una ventilació natural es calcula amb la següent expressió:

$$h_{estator} = 1,32 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta T}{D_{estator}}} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \quad (94)$$

On:

ΔT : diferència de temperatura (normalment s'utilitza un valor entre 80-100°C)
 $D_{estator}$: diàmetre exterior de l'estator del motor [m]

A l'hora de calcular el coeficient de convecció per la condició de contorn de la superfície de l'estator (cal recordar que el nostre motor no utilitza cap carcassa) utilitzarem 90°C com a diferència de temperatura, el valor mig de l'interval que s'utilitza normalment, i el diàmetre exterior de l'estator. La temperatura ambient que es considera normalment és de 40°C.

Pel coeficient de convecció de l'entreferro es considerarà la mateixa diferència de temperatura, però es canvia el diàmetre pel diàmetre exterior del rotor. La temperatura ambient la considerarem lleugerament superior perquè és una zona del motor que està més calenta, així que és considera de 60°C.

Un cop obtinguts els resultats de la simulació, cal fixar-nos en les temperatures obtingudes als conductors, la carcassa i els imants. Si les temperatures tenen uns valors acceptables procedirem a escollir la classe d'aïllament més adequada, sinó, realitzarem l'anàlisi tèrmic amb ventilació forçada.

5.4.2. Anàlisi amb ventilació forçada

Quan la ventilació natural no resulta suficient per refrigerar el motor, s'utilitza la ventilació forçada, la qual consisteix en acoblar un ventilador que crea un corrent d'aire per l'exterior de la carcassa i per l'entreferro.

L'expressió del coeficient de convecció de ventilació forçada és:

$$h = 3,89 \cdot \sqrt{\frac{v}{L_{empilat}}} \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right] \quad (95)$$

On:

v : velocitat de l'aire (compresa entre 5-15 m/s)
 L : longitud de l'empilat del motor [m]

Tindrem el mateix coeficient de convecció per l'exterior de l'estator que per l'entreferro, aquest es calcularà utilitzant una velocitat d'aire de 10 m/s i la distància de l'empilat del motor.

Si les temperatures resultants de l'anàlisi no fossin acceptables, procediríem a modificar el disseny del motor, per exemple, amb una reducció del corrent.

CAPÍTOL 6:

CONCLUSIONS

Un cop finalitzat aquest projecte es pot afirmar que s'ha assolit l'objectiu principal, el qual consistia en garantir una correcta funcionalitat del motor en els principals punts de treball de la rentadora.

Per començar, s'ha realitzat una pauta de càlcul analític per tenir una noció de les dimensions i del comportament del motor. El programa utilitzat per realitzar aquesta primera aproximació ha sigut el Excel.

Un cop triat el tipus de muntatge realitzat amb els imants i escollides unes xapes pel rotor i l'estator, s'ha procedit a analitzar el motor amb el programa FEMM, el qual aplica el mètode dels elements finits. Els anàlisis han ajudat a triar la distribució del bobinat, a rectificar valors trobats de forma analítica i ha trobar paràmetres essencials per poder calcular i traçar les característiques principals del motor. Cal destacar la gran ajuda que proporciona el llenguatge de programació LUA a l'hora d'automatitzar càlculs i anàlisis.

Amb els resultats obtinguts dels anàlisis magnètics s'han pogut calcular i traçar les corbes característiques de la màquina amb el programa Mathcad, el qual és de gran utilitat per càlculs iteratius. A partir de les primeres corbes característiques, les quals mostraven un no compliment dels objectius, s'ha procedit a trobar una solució que satisfés les condicions desitjades. Finalment, el motor no tant sols garanteix un bon funcionament en el punt de rentat i centrifugat, si no que ho compleix de forma satisfactòria.

Cal destacar que s'ha afegit una inductància externa per tal d'arribar a la solució final.

El motor, a causa de la seva finalitat, no consta de carcassa i necessita ventilació forçada per garantir una correcta refrigeració. El rendiment elèctric obtingut ha superat les expectatives i compleix adequadament el rendiment mínim exigít.

Cal comentar que els motors de rentadores industrials solen ser de tipus universal, encara que cada cop s'està augmentat més l'ús de motors amb

imants. Aquest projecte ens mostra un exemple d'implementació dels motors síncrons d'imants permanents en aquest sector i el bon rendiment que poden aportar.

CAPÍTOL 7:

BIBLIOGRAFIA

7.1. Referències bibliogràfiques

Pyrhönen, Juha, Tapani Jokinen, i Valéria Hrabovcová. "Design of rotating electrical machines" John Wiley & Sons, Ltd. Primera edició, 2008.

Gieras, Jacked F. "Permanent magnet motor technology. Design and applications". CRC Press. 3a edició, 2010.

Bargalló, Ramón. "Disseny de màquines elèctriques" Apunts de classe 2012.

Bargalló, Ramón. "Màquines elèctriques 2" Apunts de classe 2012.

7.2. Consulta

Hendershot, J.R & T.J.E. Miller. "Design of brushless permanent-magnet machines". Clarendon Press. 1995.

Krishnan, R. "Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives". CRC Press.



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Annex 1 **Pauta de càlcul**



Barcelona, 11 de Juny de 2014

Director: Ramon Bargalló Perpiñà
Departament d'Enginyeria Elèctrica (EE)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDIX

| | |
|---|-----------|
| Capítol 1: càlcul analític | 5 |
| 1.1. Condicions inicials..... | 5 |
| 1.1.1. Punts de treball del motor..... | 5 |
| 1.1.2. Freqüències dels punts de treball | 5 |
| 1.1.3. Tensió i corrent en els punts de treball | 6 |
| 1.2. Dimensions..... | 6 |
| 1.2.1. Diàmetre i longitud..... | 6 |
| 1.2.2. Entreferro | 7 |
| 1.3. Imant | 8 |
| 1.3.1. Tipus d'imant..... | 8 |
| 1.3.2. Dimensions | 8 |
| 1.4. Induccions..... | 8 |
| 1.4.1. Inducció de l'imant..... | 8 |
| 1.4.2. Inducció a l'aire | 9 |
| 1.4.3. Inducció a les dents..... | 9 |
| 1.4.4. Inducció a la corona | 9 |
| 1.4.5. Inducció a l'entreferro..... | 9 |
| 1.5. Bobinat estatòric | 10 |
| 1.5.1. Dimensionat del bobinat..... | 10 |
| 1.6. Anàlisi de desmagnetització | 12 |
| Capítol 2: Anàlisi tèrmic analític | 14 |
| 2.1. Pèrdues | 14 |
| 2.1.1. Resistència de fase | 14 |
| 2.1.2. Pèrdues Joule | 14 |
| 2.1.3. Pèrdues al ferro | 15 |
| 2.1.4. Pèrdues mecàniques | 15 |
| 2.1.5. Pèrdues totals..... | 15 |
| 2.2. Escalfament..... | 15 |
| 2.2.1. Superfície de ventilació | 15 |
| 2.2.2. Ventilació natural | 15 |
| 2.2.3. Ventilació forçada..... | 16 |

| | |
|---|-----------|
| Capítol 3: Anàlisi magnètics amb elements finits | 18 |
| 3.1. Dibuix amb AutoCAD | 18 |
| 3.2. Configuració del problema..... | 19 |
| 3.2.1. Definició del problema..... | 19 |
| 3.2.2. Definició dels materials | 19 |
| 3.2.3. Definició dels circuits | 23 |
| 3.2.4. Definició de les condicions de contorn | 23 |
| 3.2.5. Debanat estatòric..... | 24 |
| 3.2.6. Assignació dels materials | 24 |
| 3.3. Anàlisi magnètics | 26 |
| 3.3.1. Verificació de les induccions | 26 |
| 3.3.2. Anàlisi en buit..... | 27 |
| 3.3.3. Parell de cogging..... | 30 |
| 3.3.4. Anàlisi en càrrega..... | 31 |
| 3.3.5. Anàlisi d'energia..... | 35 |
| 3.3.6. Anàlisi de pèrdues | 37 |
| Capítol 4: Característiques de la màquina | 41 |
| 4.1. Inductàncies | 41 |
| 4.1.1. Inductància de dispersió..... | 41 |
| 4.1.2. Inductància total | 44 |
| 4.2. Paràmetres característics | 44 |
| 4.2.1. Corrent de curtcircuit..... | 44 |
| 4.2.2. Parell | 45 |
| 4.2.3. Potència | 47 |
| 4.2.4. Corrent..... | 47 |
| 4.2.5. Tensió | 48 |
| 4.2.6. Rendiment | 49 |
| Capítol 5: Anàlisi tèrmic amb elements finits | 52 |
| 5.1. Importació i caracterització del problema..... | 52 |
| 5.2. Definició dels materials..... | 53 |
| 5.2.1. Aire | 53 |
| 5.2.2. Imant..... | 53 |
| 5.2.3. Aïllant | 54 |
| 5.2.4. Coure..... | 54 |
| 5.2.5. Acer..... | 54 |
| 5.3. Anàlisi tèrmics i condicions de contorn | 55 |

| | | |
|--------|--------------------------------------|----|
| 5.3.1. | Anàlisi amb ventilació natural | 55 |
| 5.3.2. | Anàlisi amb ventilació forçada | 57 |

CAPÍTOL 1: CÀLCUL ANALÍTIC

1.1. Condicions inicials

1.1.1. Punts de treball del motor

El motor que es dissenya en aquest projecte és un motor per una rentadora industrial, per tant, ha de garantir un correcte funcionament en dos punts principals de treball, el punt de rentat i el de centrifugat. Les especificacions que ha de complir per aquests dos punts són:

a) Punt de rentat:

$$N = 600 \text{ rpm}$$

$$M = 1,4 \text{ Nm}$$

$$P = 87,96 \text{ W}$$

b) Punt de centrifugat:

$$N = 15.000 \text{ rpm}$$

$$M = 0,4 \text{ Nm}$$

$$P = 628,32 \text{ W}$$

A partir d'aquestes dades es realitza el càlcul del motor.

1.1.2. Freqüències dels punts de treball

El motor té 6 pols, per tant, 3 parells de pols. La freqüència a les diferents velocitats dels punts de treball del motor són:

$$f_{\text{rentat}} = p \cdot \frac{N_{\text{rentat}}}{60} = 3 \cdot \frac{600}{60} = 30 \text{ Hz} \quad (1)$$

$$f_{centrifuga} = p \cdot \frac{N_{centrifuga}}{60} = 3 \cdot \frac{15000}{60} = 750 \text{ Hz} \quad (2)$$

1.1.3. Tensió i corrent en els punts de treball

La tensió d'entrada del rectificador és de 230 V. La de sortida és:

$$V_{pp} = V_{rms} \cdot \sqrt{2} = 230 \cdot \sqrt{2} = 325,27 \text{ V} \quad (3)$$

La tensió de sortida del rectificador s'estima en 130 V, i al tenir el motor connectat en triangle, la tensió per fase serà de:

$$U_N = U_{rectificador} \cdot \sqrt{3} = 130 \cdot \sqrt{3} = 225,17 \text{ V} \quad (4)$$

El corrent absorbit pel motor en cada punt de treball s'aproxima amb la següent expressió:

$$I_{rentat} \approx \frac{P_{rentat}}{U_N} \approx \frac{87,96}{225,17} \approx 0,39 \text{ A} \quad (5)$$

$$I_{centrifuga} \approx \frac{P_{centrifuga}}{U_N} \approx \frac{628,32}{225,17} \approx 2,79 \text{ A} \quad (6)$$

1.2. Dimensions

1.2.1. Diàmetre i longitud

Les dimensions del motor depenen del parell d'aquest, al no tenir uns valors nominals, sinó unes condicions que s'han de complir en dos punts de treball, es dimensionarà la màquina pel parell més elevat. El parell més elevat és el d'engegada, el qual per un motor d'aquestes característiques s'estima en 1,9 Nm.

La capa de corrent per a motors síncrons d'ímants es recomana que prengui un valor comprés entre 35.000 i 65.000 A/m. S'escull 35.000 A/m.

S'estima una inducció a l'aire típica de 0,6 T.

El diàmetre intern de l'estator és troba mitjançant les següents expressions:

$$D^2 \cdot L = \frac{M_{engegada} \cdot 4 \cdot \sqrt{2}}{\pi^2 \cdot B_a \cdot A} \quad (7)$$

$$D = L \quad (8)$$

On la igualtat ens ajuda a poder treure una de les incògnites de l'equació, quedant així la següent expressió:

$$D = \sqrt[3]{\frac{M_{engaged} \cdot 4 \cdot \sqrt{2}}{\pi^2 \cdot B_a \cdot A}} = \sqrt[3]{\frac{1,9 \cdot 4 \cdot \sqrt{2}}{\pi^2 \cdot 0,6 \cdot 35000}} = 0,037 \approx 0,04 \text{ m} \quad (9)$$

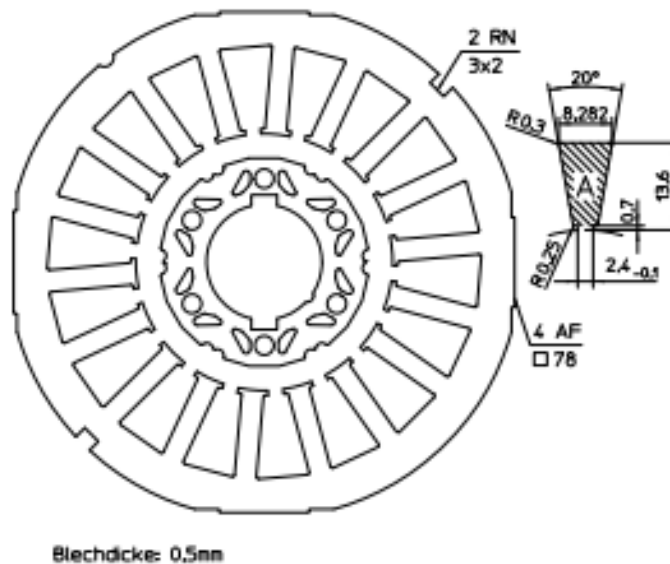
S'ajusta el diàmetre a un valor superior, com és 0,04 m.

Si ara retornem a l'equació 6 per substituir el diàmetre triat i trobar un valor mínim de L:

$$L = \frac{M_{engaged} \cdot 4 \cdot \sqrt{2}}{D^2 \cdot \pi^2 \cdot B_a \cdot A} = \frac{1,9 \cdot 4 \cdot \sqrt{2}}{0,04^2 \cdot \pi^2 \cdot 0,6 \cdot 35000} = 0,032 \approx 0,035 \text{ m} \quad (10)$$

El valor de la longitud s'ajusta a 0,035 m.

Finalment, la xapa escollida és la SKS400:



| SKS 400 | | Maße und Varianten | | | | |
|----------------|-----------------------|--------------------|----------------|----|------|----------------|
| | | D ₀ | D ₁ | N | A | b _z |
| SB 080.23.X.00 | | 80 +0.074 | 40 +0.06 | 18 | 78,9 | 3,4 |
| 01 | wie Abbildung | | | | | |
| RB 032.14.Y.00 | | SW | | P | M/P | B |
| d ₁ | | 32,4 -0,1 | | 6 | 3 | 4,7 |
| 01 | 18 +0.027 H 2xK4x19.5 | | | | | |

Figura 1. Xapa SKS400.

1.2.2. Entreferro

Com aquest motor té un nombre de parell de pols superior a 1, es calcularà la mida de l'entreferro mitjançant la següent expressió:

$$\delta = 0,18 + 0,006 \cdot P^{0,4} = 0,18 + 0,006 \cdot 628,32^{0,4} = 0,26 \approx 0,3 \text{ mm} \quad (11)$$

S'ha utilitzat la potencia més gran a la que ha d'arribar el motor per tal de dimensionar l'entreferro. El valor resultant s'ha aproximat a 0,3 mm.

1.3. Imant

1.3.1. Tipus d'imant

L'imant utilitzat en aquest projecte és neodimi de qualitat 35. Les seves característiques principals són:

- a) $B_r = 1,065$ T
- b) $H_c = 800.000$ A/m

La seva permeabilitat relativa correspon a:

$$\mu_r = \frac{B_r}{\mu_0 \cdot H_c} = \frac{1,065}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 800.000} = 1,059 \quad (12)$$

1.3.2. Dimensions

Com s'ha comentat anteriorment, l'imant és de neodimi de qualitat 35. L'alçada i l'amplada de cada imant es calculen amb les següents expressions:

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{\pi \cdot 40}{6} = 20,94 \text{ mm} \quad (13)$$

$$b_{\text{imant}} = \alpha \cdot \tau_p = 0,66 \cdot 20,94 = 13,96 \approx 14 \text{ mm} \quad (14)$$

$$h_{\text{imant}} = \frac{D - D_{\text{rotor}}}{2} - \delta = \frac{40 - 32,4}{2} - 0,3 = 3,5 \text{ mm} \quad (15)$$

On:

- b_{imant} : amplada de l'imant [mm]
- α : factor de recobriment polar [0,66]
- T_p : pas polar [mm]
- h_{imant} : alçada de l'imant [mm]
- D : diàmetre intern de l'estator [mm]
- D_{rotor} : diàmetre del rotor [mm]
- δ : entreferro [mm]

1.4. Induccions

1.4.1. Inducció de l'imant

L'inducció de l'imant la trobem amb la següent expressió:

$$B_m = \frac{B_r}{1 + \mu_r \cdot \alpha \cdot \frac{\delta}{h_{imant}}} = \frac{1,065}{1 + 1,059 \cdot 0,66 \cdot \frac{0,3}{3,5}} = 1 \text{ T} \quad (16)$$

1.4.2. Inducció a l'aire

L'inducció a l'aire és:

$$B_a = \frac{b_{imant}}{\tau_p} \cdot B_m = \frac{14}{20,94} \cdot 1 = 0,67 \text{ T} \quad (17)$$

1.4.3. Inducció a les dents

L'inducció de l'imant la trobem amb la següent expressió:

$$B_t = B_a \cdot \frac{\pi \cdot D}{\omega_t \cdot Q} = 0,67 \cdot \frac{\pi \cdot 40}{3,5 \cdot 18} = 1,34 \text{ T} \quad (18)$$

On:

ω_t : amplada de les dents estatòriques [mm]

Cal comentar que l'inducció a les dents s'ha de trobar per sota d'1,7 T.

1.4.4. Inducció a la corona

Per poder calcular aquesta inducció primer hem de trobar la distància l_y , la qual equival a la distància fruit de la diferència entre el diàmetre exterior de l'estator i el interior, i restant-li a aquesta la longitud de la ranura:

$$l_y = \frac{D_{\text{exterior}} - D}{2} - t_\omega = \frac{80 - 40}{2} - 13,6 = 6,4 \text{ mm} \quad (19)$$

L'inducció la trobem amb la següent expressió:

$$B_y = \frac{\phi}{l_y \cdot L} = \frac{4,92 \cdot 10^{-4}}{6,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,035} = 1,10 \text{ T} \quad (20)$$

1.4.5. Inducció a l'entreferro

Coneixent que la inducció a l'entreferro suposa un 75% de la inducció de l'imant, aquest imant provocaria la següent inducció:

$$B_e = 0,75 \cdot B_r = 0,75 \cdot 1,065 = 0,8 \text{ T} \quad (21)$$

1.5. Bobinat estatòric

1.5.1. Dimensionat del bobinat

a) Nombre de conductors

Per determinar el nombre de conductors partirem del flux estimat al motor, el qual ve donat per la següent expressió:

$$\phi = B_a \cdot \tau_p \cdot L = 0,67 \cdot \frac{20,94}{1000} \cdot 0,035 = 4,92 \cdot 10^{-4} \text{ Wb} \quad (22)$$

Suposant una alimentació amb ona quadrada, obtenim el següent model:

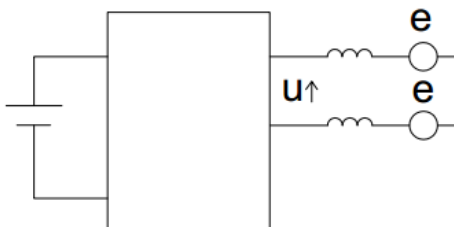


Figura 2. Model del motor alimentat amb una senyal d'ona quadrada.

$$U = 2e + 2r_i + 2L \frac{di}{dt} \quad (23)$$

$$2e < U \Rightarrow 2e < 300 \quad (24)$$

Si menyspreem les resistències i inductàncies, i aproximant que $2e$ tindrà un valor aproximat entre 260 i 280 V, podem estimar que $2e$ serà aproximadament 270 V i, per tant, e serà 135 V.

Coneixent el flux que tindrà el motor i juntament amb un valor estimat de la força electromotriu, podem resoldre la següent equació:

$$N_f = \frac{E}{4 \cdot \Phi \cdot f} = \frac{135}{4 \cdot 4,92 \cdot 10^{-4} \cdot 750} = 91,46 \approx 92 \text{ espines/fase} \quad (25)$$

Cal comentar que es realitzaran els càlculs següents pel cas de centrifugació, ja que és on tenim la potència més elevada del motor.

Coneixent el nombre d'espines per fase, podem extreure el nombre de conductors per fase de la següent forma:

$$Z_f = 2 \cdot N_f = 2 \cdot 92 = 184 \text{ conductors/fase} \quad (26)$$

Tot seguit trobarem el nombre de conductors que contindrà cada ranura (Z_r), coneixent prèviament el nombre de ranures (Q) que tindrà el nostre estator, valor que extraïem de la xapa triada pel motor.

$$Z_r = \frac{m \cdot Z_f}{Q} = \frac{3 \cdot 184}{18} = 30,66 \approx 31 \text{ conductors/ranura} \quad (27)$$

Com s'ha corregit el nombre de conductors per ranura a l'hora d'arrodonir, es tornen a calcular els conductors per fase i les espines per fase a partir del nou valor:

$$Z_f' = \frac{Q \cdot Z_r}{m} = \frac{18 \cdot 31}{3} = 186 \text{ conductors/fase} \quad (28)$$

$$N_f' = \frac{Z_f'}{2} = \frac{186}{2} = 93 \text{ espines/fase} \quad (29)$$

Per determinar la secció dels conductors, es fixa una densitat de corrent $\Delta=7$ A/mm². La secció de cada conductor, sense dividir les espines en conductors en paral·lel, és:

$$I_{ef_centrifuga} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_{centrifuga} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 2,79 = 2,3 \text{ A} \quad (30)$$

$$S_c = \frac{I_{ef_centrifuga}}{\Delta} = \frac{2,3}{7} = 0,33 \text{ mm}^2 \quad (31)$$

I el seu diàmetre:

$$d_c = \sqrt{\frac{4 \cdot S_c}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,33}{\pi}} = 0,64 \approx 0,65 \text{ mm} \quad (32)$$

Amb aquest resultat s'ha d'escollir en un catàleg el cable que més s'ajusti a les nostres necessitats, en aquest cas triarem un conductor de diàmetre 0,65 mm.

Tot seguit es procedeix a calcular la secció que ocuparan els conductors a la ranura, per així poder trobar el factor d'ocupació de la ranura, el qual no es recomana que superi el 0,4.

$$S_{ocupada} = Z_r \cdot \frac{\pi \cdot d_c^2}{4} = 31 \cdot \frac{\pi \cdot 0,65^2}{4} = 10,28 \text{ mm}^2 \quad (33)$$

$$F_{ocupació} = \frac{S_{ocupada}}{S_{ranura}} \cdot 100 = \frac{10,28}{78,9} \cdot 100 = 13,03 \% \Rightarrow 13,03\% < 40\% \quad (34)$$

Com podem observar, compleix perfectament amb les condicions imposades.

1.6. Anàlisi de desmagnetització

Per tal d'assegurar que els imants no patiran cap modificació de les seves propietats amb el funcionament regular de la màquina, cal complir la següent condició per les seves dimensions:

$$FMM_D = \frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{I \cdot N_f \cdot \xi_b}{2 \cdot p} \cdot k = \frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{2,3 \cdot 93 \cdot 0,96}{2 \cdot 3} \cdot k = 65,36 \cdot k \quad (35)$$

$$h_{imant} \geq \frac{FMM_D}{H_c} \Rightarrow 3,5 \geq \frac{65,35 \cdot 1000}{800000} \cdot k \Rightarrow 3,5 \geq 0,082 \cdot k \quad (36)$$

Coneixent que k no pot tenir un valor molt elevat, es veu clarament que es compleix la condició de desmagnetització.

CAPÍTOL 2: ANÀLISI TÈRMIC ANALÍTIC

2.1. Pèrdues

2.1.1. Resistència de fase

Abans de poder calcular la resistència dels conductors, cal determinar la conductivitat del coure considerant un escalfament aproximat de 80°C i coneixent α_{Cu} (coeficient de temperatura del coure).

$$\sigma_{Cu80} = \frac{\sigma_{Cu20}}{1 + \theta \cdot \alpha_{Cu}} = \frac{57 \cdot 10^6}{1 + 80 \cdot 3,81 \cdot 10^{-3}} = 43,68 \text{ MS/m} \quad (37)$$

Coneixent que la conductivitat del coure a 20°C és de $57 \cdot 10^6$ S/m i la longitud d'una espira és igual a:

$$l_{av} = 2 \cdot L + 2,3 \cdot \tau_p = 2 \cdot 0,035 + 2,3 \cdot 0,02094 = 0,12 \text{ m} \quad (38)$$

Podem calcular la resistència de fase amb la següent expressió:

$$R = \frac{N_f \cdot l_{av}}{\sigma_{Cu} \cdot S_c} = \frac{93 \cdot 0,12}{43,68 \cdot 10^6 \cdot 0,33 \cdot 10^{-6}} = 0,77 \Omega \quad (39)$$

2.1.2. Pèrdues Joule

Les pèrdues Joule aplicant el corrent del punt de centrifugat són:

$$P_{Joule} = 3 \cdot R \cdot I_{ef_centrifuga}^2 = 3 \cdot 0,77 \cdot 2,3^2 = 12,28 \text{ W} \quad (40)$$

2.1.3. Pèrdues al ferro

Les pèrdues al ferro es consideren aproximadament una tercera part de les pèrdues Joule:

$$P_{Fe} = \frac{1}{3} \cdot P_{Joule} = \frac{1}{3} \cdot 12,28 = 4,06 \text{ W} \quad (41)$$

2.1.4. Pèrdues mecàniques

Tot hi no tenir dades de les pèrdues mecàniques de la màquina es coneix una relació entre la velocitat de gir i la quantitat de pèrdues generades amb la qual es podria aproximar un valor. La relació té en compte el quadrat de les pèrdues.

La relació coneguda per motors d'una potència aproximada a la nostre és:

$$3000 \text{ rpm} \rightarrow 5 \text{ W} \quad (42)$$

Mitjançant una regla de tres, es pot aconseguir una aproximació a les nostres pèrdues:

$$P_{mecàniques} = \left(\frac{600 \cdot 5}{3000} \right)^2 = 1 \text{ W} \quad (43)$$

S'han considerat la velocitat en el punt de rentat, ja que és el punt de treball on el motor passarà més temps i on ens interessa més conèixer les pèrdues.

2.1.5. Pèrdues totals

Les pèrdues totals del motor són la suma de les anteriors:

$$P_T = P_{Joule} + P_{Fe} + P_{mecàniques} = 12,28 + 4,06 + 1 = 17,37 \text{ W} \quad (44)$$

2.2. Escalfament

2.2.1. Superfície de ventilació

Com el motor no té carcassa a causa de la seva finalitat, una aproximació de la superfície de ventilació és la següent:

$$S_v = \pi \cdot D_{exterior} \cdot L = \pi \cdot 0,08 \cdot 0,035 = 0,0088 \text{ m}^2 \quad (45)$$

2.2.2. Ventilació natural

Per poder calcular l'escalfament del motor quan es troba refrigerat amb ventilació natural, primer cal calcular el coeficient de convecció:

$$h_{natural} = 1,32 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta T}{D_{exterior}}} = 1,32 \cdot \sqrt[4]{\frac{90}{0,08}} = 7,64 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \quad (46)$$

Cal recordar que la variació de temperatura és entre 80 i 100°C i, que s'ha triat el valor mig per dur realitzar el càlcul. Un cop tenim el coeficient de convecció, l'escalfament es troba de la següent forma:

$$\theta = \frac{P_T}{h_{natural} \cdot S_v} = \frac{17,37}{7,64 \cdot 0,0088} = 258,36^\circ C \quad (47)$$

$$T = \theta + T_{amb} = 258,36 + 40 = 298,36^\circ C \quad (48)$$

La temperatura resultant és massa elevada, per tant, cal realitzar una ventilació forçada.

2.2.3. Ventilació forçada

Per poder calcular l'escalfament del motor quan es troba refrigerat amb ventilació forçada, primer cal calcular el coeficient de convecció. Per calcular el coeficient, triarem una velocitat del ventilador de 10 m/s:

$$h_{forçada} = 3,89 \cdot \sqrt{\frac{v}{L}} = 3,89 \cdot \sqrt{\frac{10}{0,035}} = 65,75 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \quad (49)$$

Un cop tenim el coeficient de convecció, l'escalfament es troba de la següent forma:

$$\theta = \frac{P_T}{h_{natural} \cdot S_v} = \frac{17,37}{65,75 \cdot 0,0088} = 30,02^\circ C \quad (50)$$

$$T = \theta + T_{amb} = 30,02 + 40 = 70,02^\circ C \quad (51)$$

Amb una ventilació forçada s'aconsegueix un valor acceptable de temperatura al motor.

CAPÍTOL 3: ANÀLISIS MAGNÈTICS AMB ELEMENTS FINITS

3.1. Dibuix amb AutoCAD

Com s'ha comentat anteriorment, la xapa triada per dissenyar el motor és la SKS400, de la qual s'utilitzarà la xapa de l'estator. Pel que fa a la xapa del rotor, se'n dissenyarà un amb les mateixes dimensions que el rotor del model SKS400 i se li afegiran els imants.

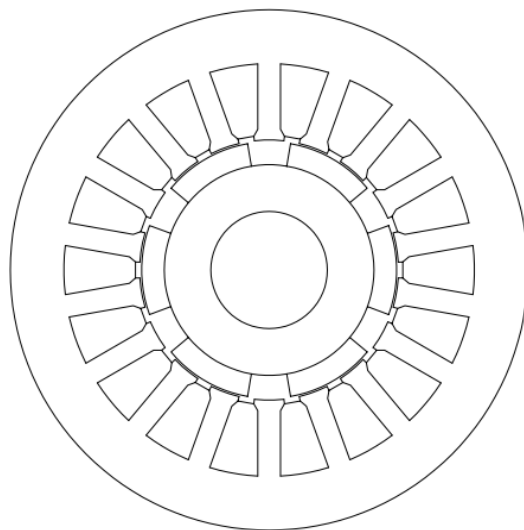


Figura 3. *Dibuix amb AutoCAD del motor.*

Cal comentar que s'ha simplificat el dibuix de la xapa estatòrica i el de la xapa rotòrica per tal de facilitar els anàlisis al programa. Podem notar les simplificacions en la inexistència d'arrodoniments i detalls a l'estator. Aquestes simplificacions no afecten al resultat dels anàlisis sinó al temps que triguen aquests a realitzar-se.

3.2. Configuració del problema

Un cop creat un nou arxiu de problema magnètic i importat el dibuix, caldrà definir les característiques del problema.

3.2.1. Definició del problema

Cal obrir la pestanya *problem* i especificar les unitats en que esta dibuixat el motor, la seva profunditat i la freqüència a la que realitzarem el anàlisis.

En aquest cas, al seleccionar com a unitat de longitud els mil·límetres, la profunditat (*depth*) serà 35 mm.

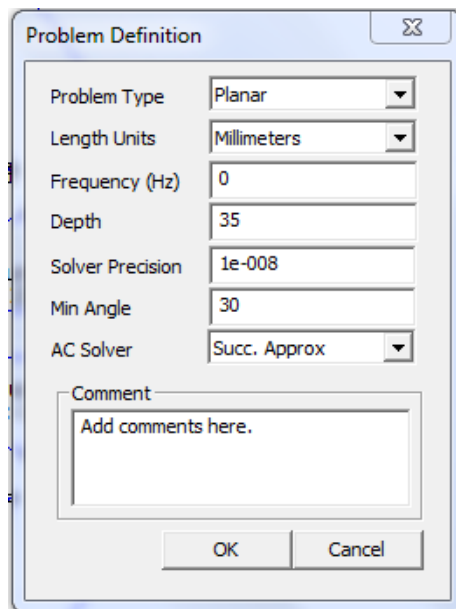


Figura 4. Quadre de diàleg problem.

3.2.2. Definició dels materials

El programa ens dona l'opció d'escollir un material ja definit de la seva llibreria o de crear-ne un de nou. La creació d'un nou material es realitza mitjançant la introducció d'algunes de les seves característiques.

Per la caracterització d'un motor síncron d'ímants permanents, necessitarem els següents materials:

a) Xapa del rotor i estator

En aquest cas s'utilitzarà l'acer M600-50, per tant, caldrà introduir la corba B-H proporcionada pel fabricant per a la freqüència a la que es treballarà.

En aquest cas el valor de la freqüència no es molt important, ja que el motor no treballarà sempre a la mateixa freqüència ni treballarà durant

llargs períodes de temps, per tant, es tria la corba a 100 Hz; el valor mig dels proporcionats.

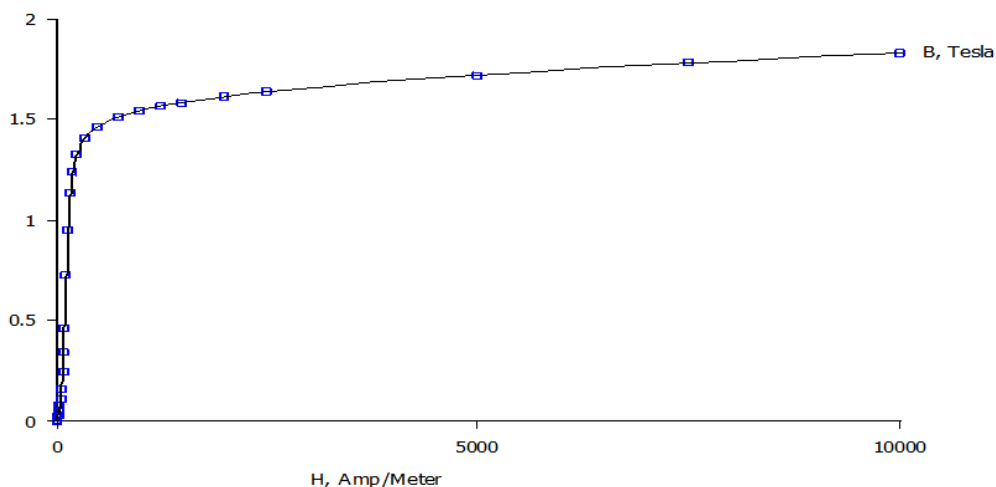


Figura 5. Corba B-H acer M600-50 100Hz.

Un cop introduïda la corba cal definir la conductivitat elèctrica i especificar que la xapa està laminada en el pla.

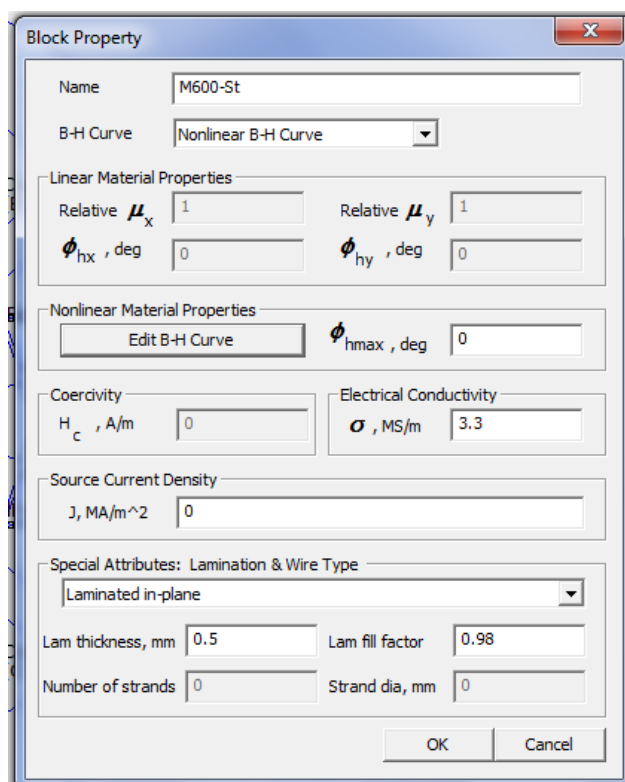


Figura 6. Propietats de l'acer M600-50 de l'estator.

Cal comentar que s'ha creat un acer per l'estator (M600-St) i un pel rotor (M600-rt) per tenir els acers diferenciats a l'hora de crear grups en el programa FEMM, aquesta opció també és vàlida per casos on el rotor és d'un material diferent. Els dos acers tenen les mateixes característiques en aquest projecte.

b) Imants

Pels imants utilitzats caldrà definir la permeabilitat relativa segons dades del fabricant ($\mu_r=1,065$), coercitivitat ($H_c=800.000$ A/m) i conductivitat elèctrica (1,57 MS/m).

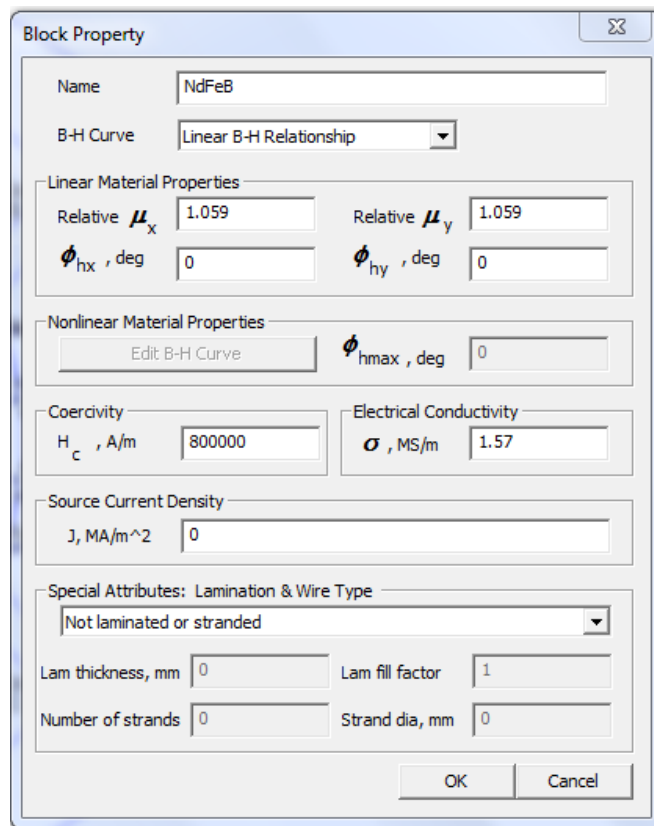


Figura 7. Propietats de l'imant.

c) Courc

S'haurà d'especificar el diàmetre corresponent a una espira (0,65 mm segons s'ha calculat prèviament) i com atribut especial, destacar que és cable magnètic (*magnet wire*). Respecte a la conductivitat de cada espira, primer s'ha de calcular la resistència equivalent a cadascuna i posteriorment trobar la conductivitat equivalent a aquella resistència.

$$R_{mitja_espira} = \frac{R}{2 \cdot N_f} = \frac{0,77}{2 \cdot 93} = 4,13 \cdot 10^{-3} \Omega \quad (52)$$

$$\sigma_{Cu_espira} = \frac{L}{R_{mitja_espira} \cdot S_c} = \frac{0,035}{4,13 \cdot 10^{-3} \cdot 0,33 \cdot 10^{-6}} = 25,7 \text{ MS/m} \quad (53)$$

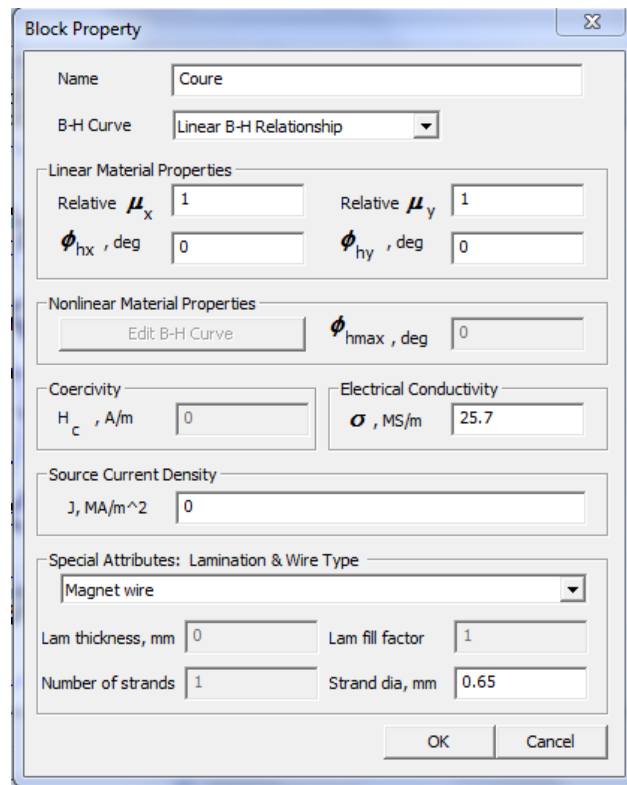


Figura 8. Propietats dels conductors de coure.

d) Aire

S'utilitzarà el material definit a la llibreria del programa.

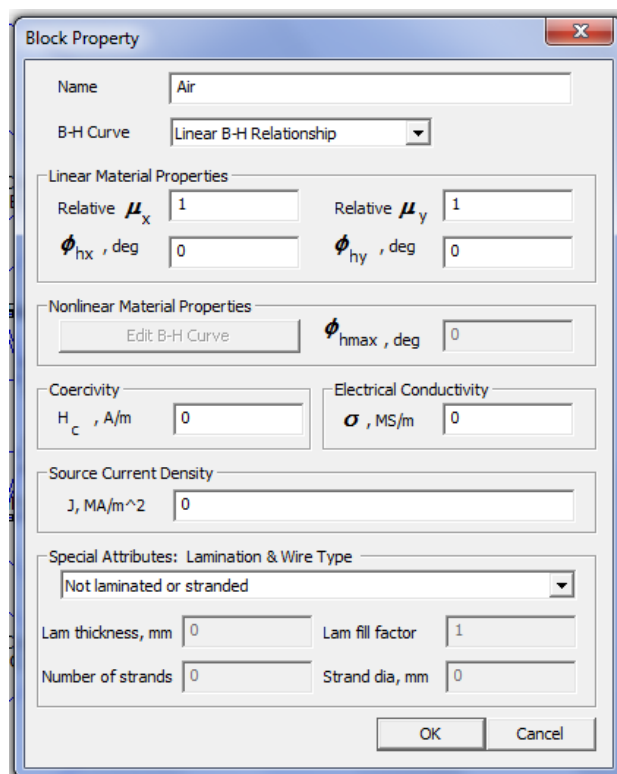


Figura 9. Propietats de l'aire.

3.2.3. Definició dels circuits

Cal crear els circuits que trobem en el funcionament del motor elèctric. Normalment són les tres fases que alimenten el motor, les quals les anomenarem circuit A, B i C.

Per crear els tres circuits que necessitem cal anar a *properties > circuits > add property*, allà s'ha d'especificar el corrent màxim de cada circuit, on de moment establirem 0 A. El corrent es modificarà en els anàlisis mitjançant el programa LUA.

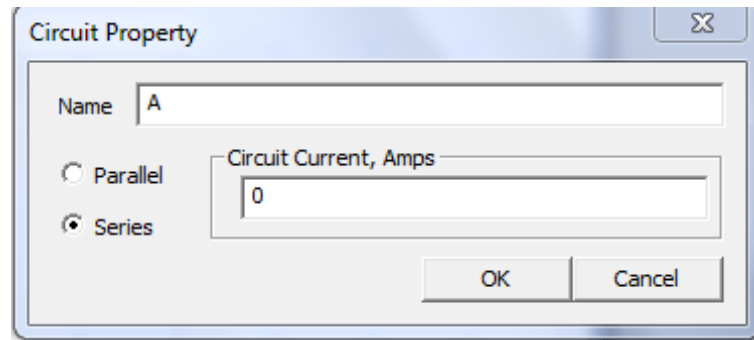


Figura 10. Propietats del circuit A.

3.2.4. Definició de les condicions de contorn

És necessari crear una nova condició de contorn del tipus *Prescribed A*, la qual s'aplicarà al contorn de l'estator i al contorn interior del rotor (a les cares del rotor que es trobarien en contacte amb l'eix). Aquesta condició de contorn ens estalviarà definir els materials de l'eix i que envolten el motor, zones que no són importants i no afecten en l'estudi que s'ha de realitzar.

Per crear la condició de contorn s'ha d'anar a *properties > boundary > add property*.

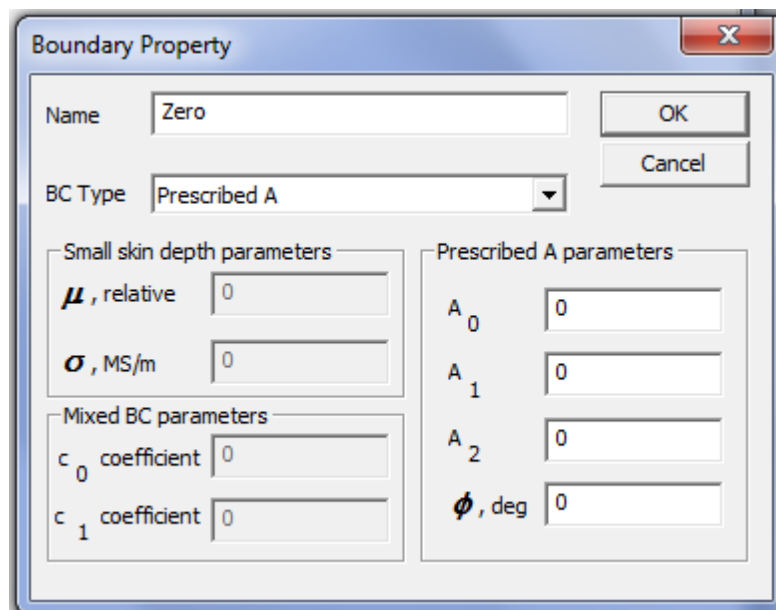


Figura 11. Propietats de la condició de contorn Zero.

3.2.5. Debanat estatòric

La distribució del bobinat estatòric es determina mitjançant el programa *Koil*, al qual s'han d'especificar les següents dades:

- Fases: 3
- Q: 18 ranures
- Pols: 6
- Tipus de bobinat: simple capa

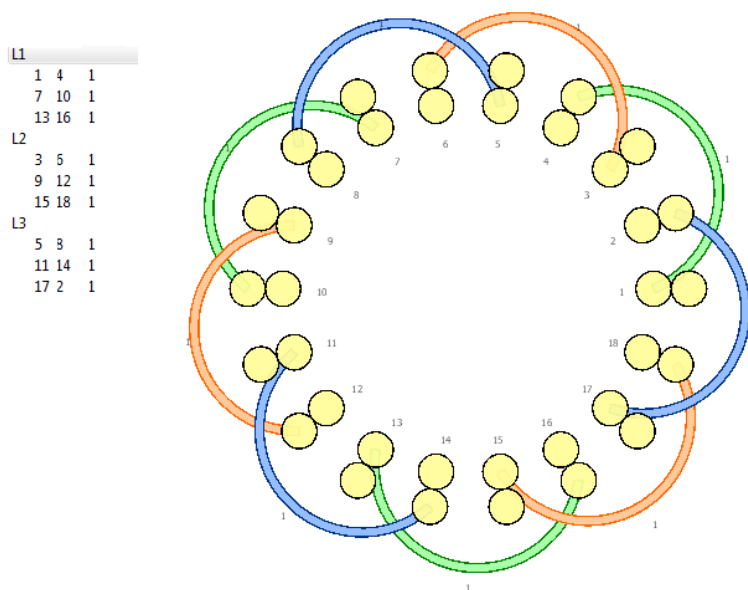


Figura12. Debanat per a un motor de 18 ranures i 6 pols.

```
-- File generated by Koil 2.0

-- Slot matrix of phase L1: 18 elements.
k_L1 = {1, 0, 0, -1, 0, 0, 1, 0, 0, -1, 0, 0, 1, 0, 0, -1, 0, 0}

-- Slot matrix of phase L2: 18 elements.
k_L2 = {0, 0, 1, 0, 0, -1, 0, 0, 1, 0, 0, -1, 0, 0, 1, 0, 0, -1}

-- Slot matrix of phase L3: 18 elements.
k_L3 = {0, -1, 0, 0, 1, 0, 0, -1, 0, 0, 1, 0, 0, -1, 0, 0, 1, 0}
```

Figura13. Matriu de bobinat per a un motor de 18 ranures i 6 pols.

3.2.6. Assignació dels materials

Un cop creats els materials que definiran el dibuix del motor, s'assignaran a cada una de les parts.

És important classificar-los per grups, és a dir, crear un grup amb tots els punts i línies de cada zona. Principalment s'ha de fer amb totes les línies que componen al rotor, ja que, posteriorment això ens permetrà fer-lo girar.

Els grups establerts són els següents:

Grup 0: Conductors de coure

Grup 4: Acer de l'estator

Grup 5: Acer del rotor

Grup 100: Aire de l'entreferro i imants

L'assignació dels material es realitza amb l'eina *materials*. Cal destacar dos aspectes importants, el primer és que a l'hora d'assignar els imants, cal especificar de forma individual la seva direcció de magnetització en graus. El segon aspecte a destacar és l'assignació dels circuits, en la qual cal definir quin circuit ocupa cada ranura, el nombre de conductors per ranura i el sentit d'aquests (positiu o negatiu).

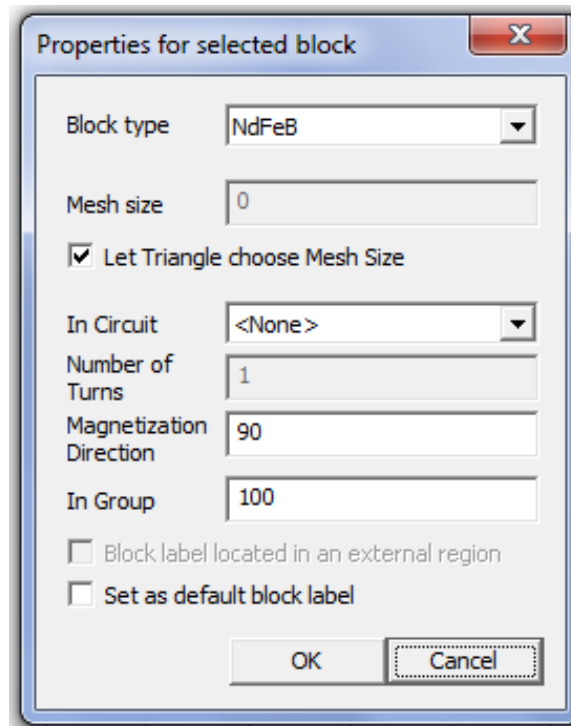


Figura14. Finestra d'assignació del material imant.

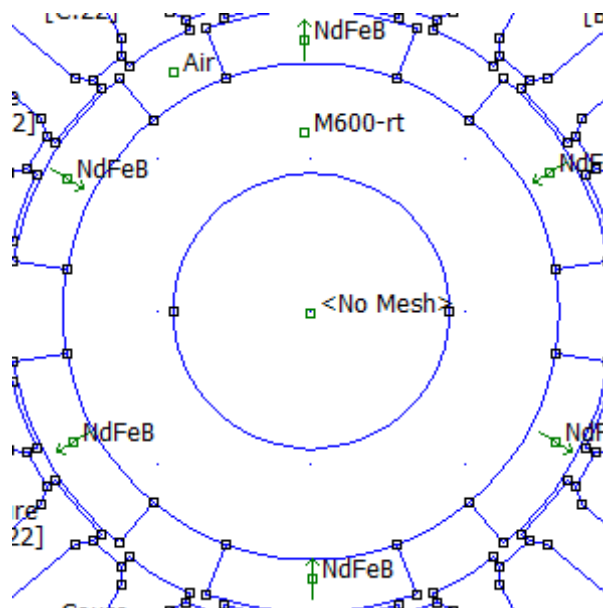


Figura15. Direcció de magnetització dels imants.

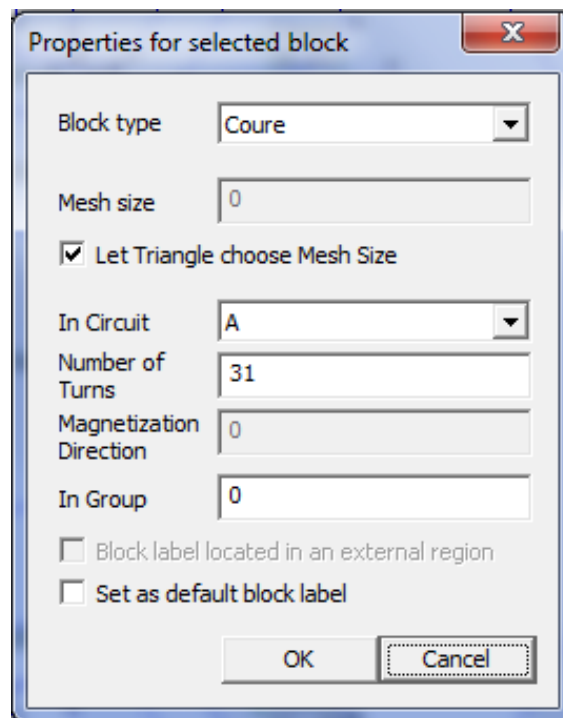


Figura16. Finestra d'assignació del circuit A.

3.3. Anàlisis magnètics

3.3.1. Verificació de les induccions

Per tal de comprovar els nivells d'inducció a les diferents parts del motor, s'executa un anàlisi en buit, és a dir, sense corrent als circuits i amb freqüència igual a 0 Hz. El resultat és el següent:

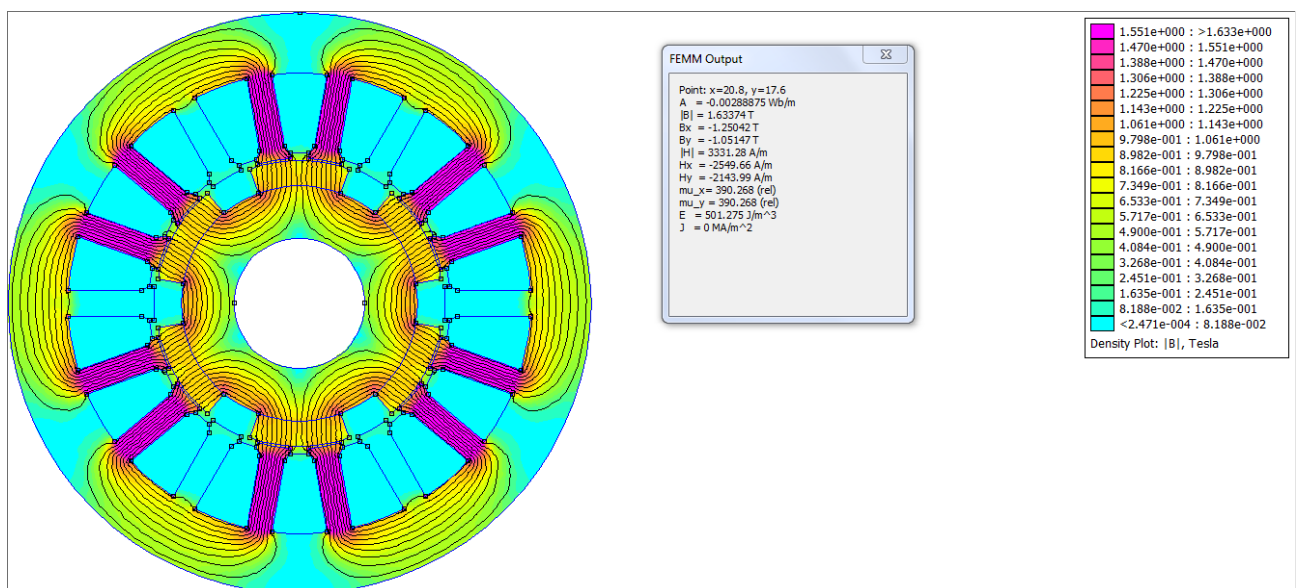


Figura 17. Densitat magnètica del motor.

El valor màxim d'inducció el trobem a les dents de l'estator, on tenim 1,63 T. La inducció a les dents és alta ,però acceptable, ja que no supera els 1,7 T que considerem com a valor límit.

3.3.2. Anàlisi en buit

L'objectiu d'aquest anàlisi és obtenir el flux induït a cada fase en un cicle elèctric per tal de poder calcular la FEM induïda a cada fase. El procés es durà a terme en buit i mitjançant el llenguatge LUA, amb el qual automatitzarem l'obtenció de dades i el procés de gir del motor.

L'angle mecànic que cal girar per realitzar un cicle elèctric complet és:

$$\alpha_{mecànic} = \frac{\alpha_{elèctric}}{p} = \frac{360}{3} = 120^\circ \text{ mecànics} \quad (54)$$

El programa LUA aplicat en aquest anàlisi és el següent:

```
m=120
p=120/m
--càlcul del flux i del parell de cogging
open("Motor_Simple_NOU.fem")
mi_saveas("tempcogg1.fem")
mi_modifycircprop("A",1,0)
mi_modifycircprop("B",1,0)
mi_modifycircprop("C",1,0)
handle=openfile("buitNormalitzat_NOU.txt","a")
write(handle,"punt ","Fa ","Fb ","Fc ","Mcog ","\n")
closefile(handle)
for n=1,m,1 do
  mi_analyse()
  mi_loadsolution()
  handle=openfile("buitNormalitzat_NOU.txt","a")
  ia,va,fa=mo_getcircuitproperties("A")
  ib,vb,fb=mo_getcircuitproperties("B")
  ic,vc,fc=mo_getcircuitproperties("C")
  mo_addcontour(0,19.85)
  mo_addcontour(0,-19.85)
  mo_bendcontour(180,1)
  mo_addcontour(0,-19.85)
  mo_addcontour(0,19.85)
  mo_bendcontour(180,1)
  mcog=mo_lineintegral(4)
  write(handle,n," ",fa," ",fb," ",fc," ",mcog,"\n")
  closefile(handle)
  mo_close()
  --rotor
  mi_selectgroup(100)
  mi_move_rotate(0,0,p,4)
end
mi_selectgroup(100)
mi_move_rotate(0,0,-m,4)
```

Aquest programa calcula el flux de cada fase a cada rotació que realitza el motor i crea un arxiu de text on guarda els resultats.

Al graficar els resultats, obtenim la següent gràfica:

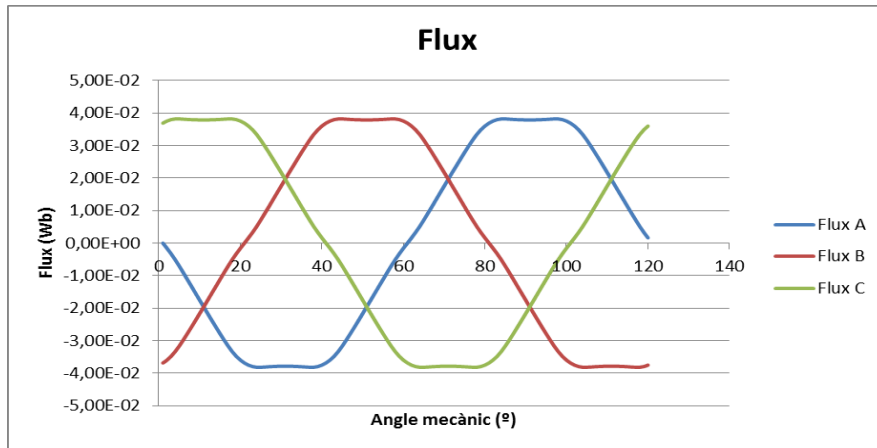


Figura 18. Flux en funció de la posició.

Un cop obtingut el flux és pot obtenir la FEM induïda a cada fase mitjançant el mètode de derivació directe o desenvolupant les sèries de Fourier.

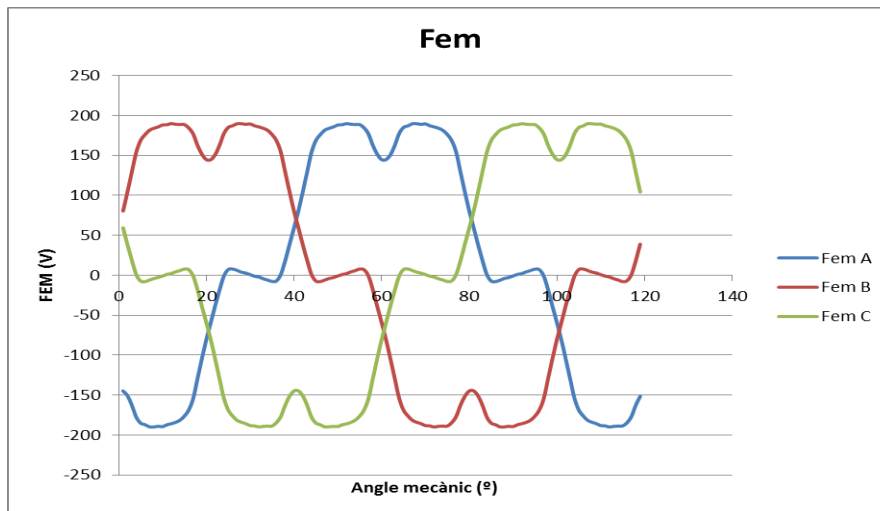


Figura 19. FEM en funció de la posició.

El valor màxim de la FEM és de 189,89 V, un valor molt per sobre de l'estimat en el càlcul analític, on s'ha estimat un valor de 135 V. Al trobar una diferència tant gran amb el valor esperat de forma analítica, ajustem el nombre de conductors per tal d'obtenir un valor de FEM més pròxim a l'esperat. El valor de la FEM induïda és directament proporcional al valor dels conductors per ranura, per tant, apliquem una regla de tres per poder estimar un valor de conductors per ranura que ens ajudi a proporcionar un valor de FEM més pròxim a l'esperat.

$$X \text{ conductors/ranura} = \frac{31 \text{ conductors/ranura} \cdot 135 \text{ V}}{189,89 \text{ V}} = 22,04 \approx 22 \text{ conductors/ranura} \quad (55)$$

La modificació del nombre de conductors per ranura comportarà un nou nombre d'espores per fase, el qual alhora fa variar la resistència dels conductors i la conductivitat de les espores en el programa FEMM. Els nous valors són:

- a) N_f : 66 espires/fase
- b) R : 0,549 Ω
- c) σ_{Cu_espira} : 25,5 MS/m

Amb la modificació del nombre de conductors per ranura, obtenim el següent flux i FEM induïda:

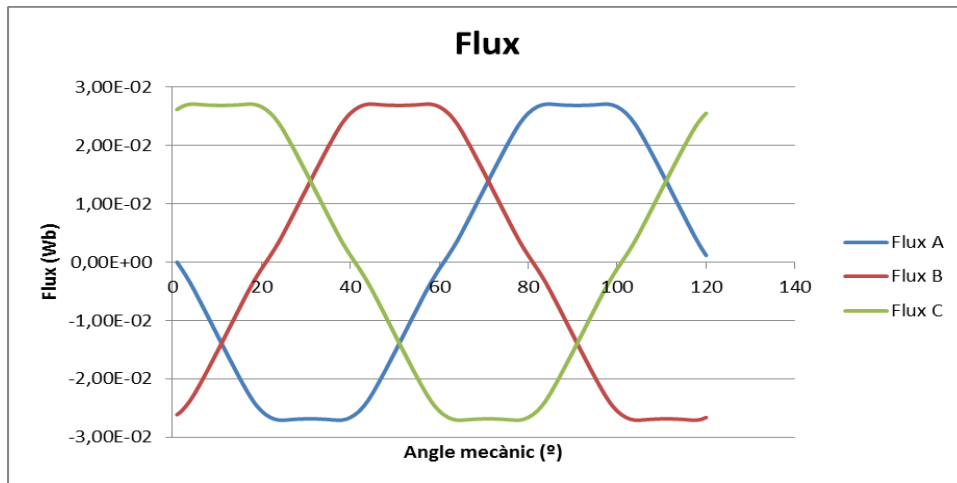


Figura 20. Nou flux en funció de la posició.

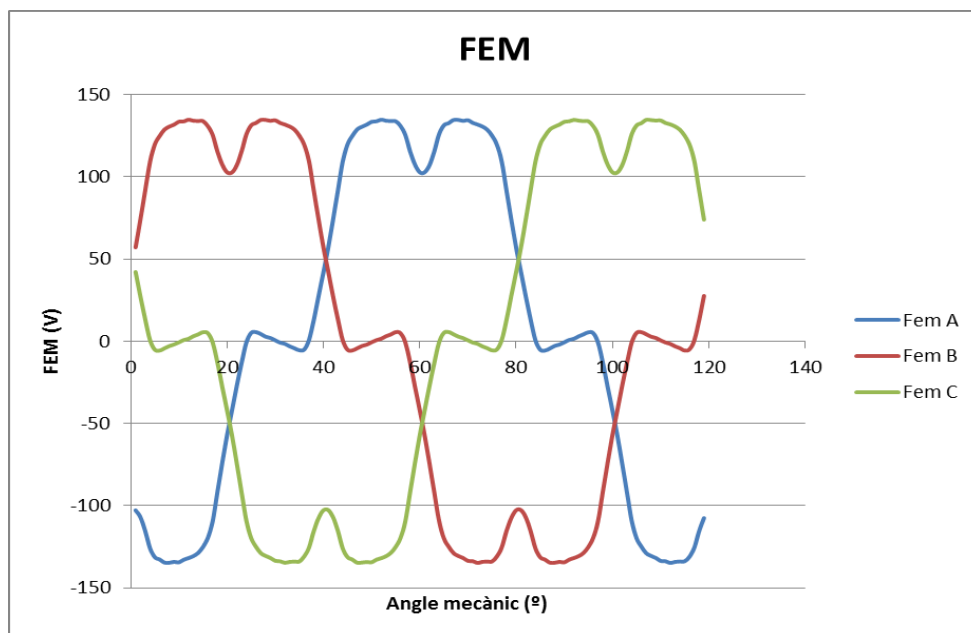


Figura 21. FEM obtinguda mitjançant derivació directe.

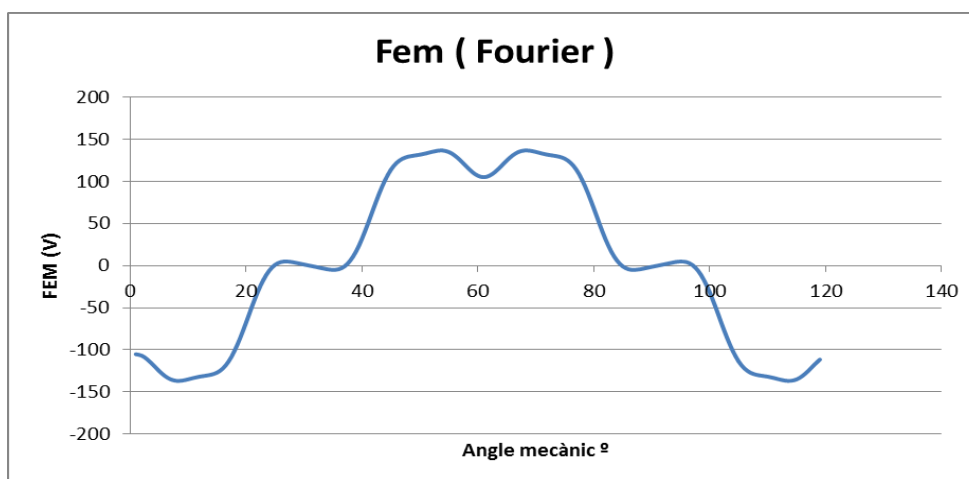


Figura 22. FEM obtinguda mitjançant sèries de Fourier.

El valor de la força electromotriu del motor obtingut amb el nou nombre de conductors per ranura és de 134,76 V, un valor molt pròxim al esperat de 135 V.

De la descomposició harmònica del flux podem extreure l'harmònic fonamental, amb el mòdul del qual calcularem el corrent de curtcircuit. Aquest flux té un valor de 0,085 Wb.

3.3.3. Parell de cogging

El parell de Cogging, també conegut com parell de buit, es produeix a causa de la interacció entre els imants permanents situats al rotor i les ranures de l'estator quan el motor es troba sense alimentació. El principal problema que ens causa a la màquina són unes vibracions al treballar en baixes velocitats.

Per determinar el cicle de Cogging, el primer pas que s'ha de realitzar és el de trobar el nombre d'impactes de pas per ranura:

$$N_{cogging} = \frac{2p}{MCD(Q,2p)} = \frac{6}{MCD(18,6)} = \frac{6}{6} = 1 \quad (56)$$

Un cop tenim aquest paràmetre, cal determinar quants graus mecànics equivalen a un cicle de cogging:

$$Cicle_{cogging} = \frac{360}{N_{cogging} \cdot Q} = \frac{360}{1 \cdot 18} = 20^\circ \quad (57)$$

Amb aquestes dades i el programa LUA que es presenta a continuació, podem obtenir el parell de cogging del motor.

```
m=120
p=20/m
--calcul del flux i del parell de cogging
open("Motor_Simple_NOU.fem")
mi_saveas("tempcogg.fem")
mi_modifycircprop("A",1,0)
mi_modifycircprop("B",1,0)
mi_modifycircprop("C",1,0)
handle=openfile("cogging_simplecapa_NOU.txt","a")
write(handle,"punt  ", "Mkog ", "\n")
closefile(handle)
for n=1,m,1 do
```



```

mi_analyse()
mi_loadsolution()
handle=fopen("cogging_simplecapa_NOU.txt","a")
ia,va,fa=mo_getcircuitproperties("A")
ib,vb,fb=mo_getcircuitproperties("B")
ic,vc,fc=mo_getcircuitproperties("C")
mo_addcontour(0,19.85)
mo_addcontour(0,-19.85)
mo_bendcontour(180,1)
mo_addcontour(0,-19.85)
mo_addcontour(0,19.85)
mo_bendcontour(180,1)
mcog=mo_lineintegral(4)
write(handle,n," ",mcog,"\n")
closefile(handle)
mo_close()
--rotor
mi_selectgroup(100)
mi_move_rotate(0,0,p,4)
end
mi_selectgroup(100)
mi_move_rotate(0,0,-m,4)

```

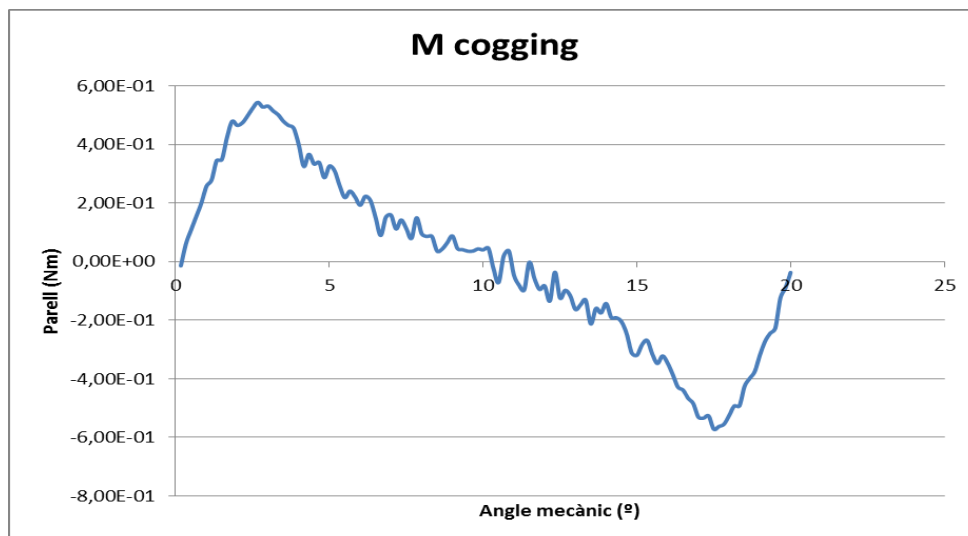


Figura 23. Parell de cogging en funció de la posició.

3.3.4. Anàlisi en càrrega

L'objectiu de realitzar l'anàlisi en càrrega és el d'analitzar i comparar el parell que atorgarà el motor si li apliquem una alimentació amb senyal sinusoidal i amb una quadrada. Es mostren els parells obtinguts amb cada alimentació a continuació.

a) Alimentació amb senyal sinusoidal:

Els valors de corrent de les tres fases seran els següents:

$$I_A = 2,79 \text{ A}$$

$$I_B = -1,39 \text{ A}$$

$$I_C = -1,39 \text{ A}$$

S'utilitza un programa LUA per calcular el valor del parell a cada posició, el programa és:

```
m=120
p=120/m
--anàlisi en càrrega
--alimentació sinusoidal
open("Motor_Simple_NOU.fem")
mi_saveas("tempcarrega.fem")
mi_modifycircprop("A",1,2.79)
mi_modifycircprop("B",1,-1.39)
mi_modifycircprop("C",1,-1.39)
handle=openfile("Parellcarrega_simple_NOU.txt","a")
write(handle,"punt  ", "M  ", "\n")
closefile(handle)
for n=1,m,1 do
  mi_analyze();
  mi_loadsolution()
  handle=openfile("Parellcarrega_simple_NOU.txt","a")
  mo_addcontour(0,19.85)
  mo_addcontour(0,-19.85)
  mo_bendcontour(180,1)
  mo_addcontour(0,-19.85)
  mo_addcontour(0,19.85)
  mo_bendcontour(180,1)
  m1=mo_lineintegral(4)
  write(handle,n," ",m1," \n")
  closefile(handle)
  mo_close()
  --rotor
  mi_selectgroup(100)
  mi_move_rotate(0,0,p,4)
end

mi_move_rotate(0,0,-m,4)
```

El resultat obtingut en aquest anàlisi és el següent:

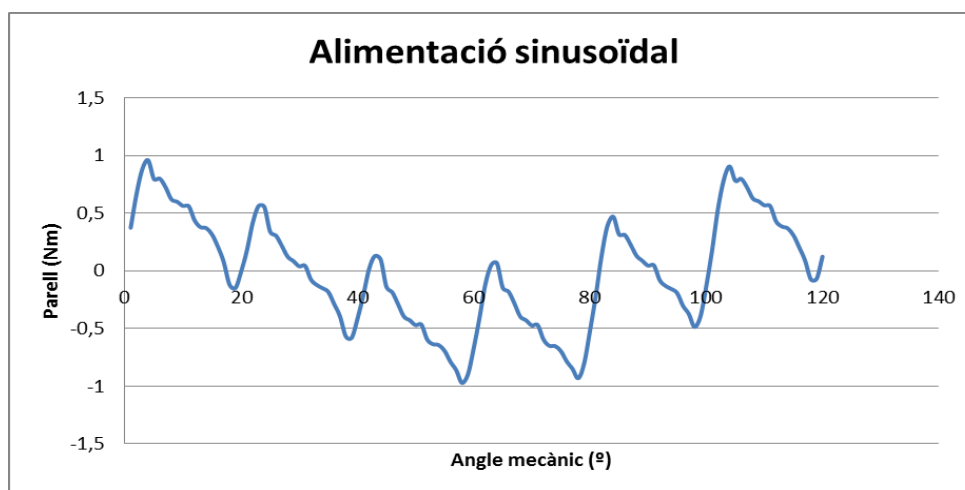


Figura 24. Parell en funció de la posició.

El valor màxim de parell és de 0,96 Nm, un valor que es troba molt lluny dels 1,4 Nm als que ha d'arribar el nostre motor quan treballa en el punt de centrifugació. I, sabent que amb una alimentació amb ona quadrada s'obté aproximadament un 14% més de parell, aquest no seria major a 1,09 Nm.

Aquest resultat ens fa plantejar una solució, la qual seria l'augment del corrent.

Un cop realitzades diverses iteracions, s'opta per alimentar la màquina de la següent forma:

$$I_A = 8 \text{ A}$$

$$I_B = -4 \text{ A}$$

$$I_C = -4 \text{ A}$$

Amb els nous valors de corrent, el programa i la nova gràfica del parell del motor, són els següents:

```

m=120
p=120/m
--anàlisi en càrrega
alimentació sinusoidal
open("Motor_Simple_NOU.fem")
mi_saveas("tempcarrega.fem")
mi_modifycircprop("A",1,8)
mi_modifycircprop("B",1,-4)
mi_modifycircprop("C",1,-4)
handle=openfile("Parellcarrega_simple_NOU.txt","a")
write(handle,"punt  ", "M  ", "\n")
closefile(handle)
for n=1,m,1 do
    mi_analyze();
    mi_loadsolution()
    handle=openfile("Parellcarrega_simple_NOU.txt","a")
    mo_addcontour(0,19.85)
    mo_addcontour(0,-19.85)
    mo_bendcontour(180,1)
    mo_addcontour(0,-19.85)
    mo_addcontour(0,19.85)
    mo_bendcontour(180,1)
    m1=mo_lineintegral(4)
    write(handle,n," ",m1," \n")
    closefile(handle)
    mo_close()
--rotor
mi_selectgroup(100)
mi_move_rotate(0,0,p,4)
end
mi_move_rotate(0,0,-m,4)

```

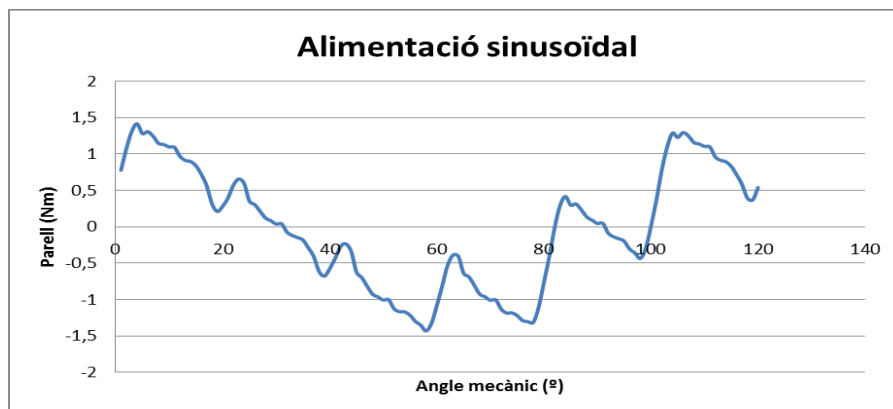


Figura 25. Nou parell en funció de la posició.

El valor màxim del parell és de 1,41 Nm.

b) Alimentació amb ona quadrada:

$$I_A = 8 \text{ A}$$

$$I_B = -8 \text{ A}$$

$$I_C = 0$$

El programa LUA utilitzat en aquest anàlisi i el parell obtingut són:

```
m=120
p=120/m
--anàlisi en càrrega
--alimentació de tipus BDCM
open("Motor_Simple_NOU.fem")
mi_saveas("temppcarrega.fem")
mi_modifycircprop("A",1,8)
mi_modifycircprop("B",1,-8)
mi_modifycircprop("C",1,0)
handle=openfile("Brussless_simple_NOU.txt","a")
write(handle,"punt  ", "M  ", "\n")
closefile(handle)
for n=1,m,1 do
  mi_analyze();
  mi_loadsolution()
  handle=openfile("Brussless_simple_NOU.txt","a")
  mo_addcontour(0,19.85)
  mo_addcontour(0,-19.85)
  mo_bendcontour(180,1)
  mo_addcontour(0,-19.85)
  mo_addcontour(0,19.85)
  mo_bendcontour(180,1)
  m1=mo_lineintegral(4)
  write(handle,n," ",m1," \n")
  closefile(handle)
  mo_close()
  --rotor
  mi_selectgroup(100)
  mi_move_rotate(0,0,p,4)
end
mi_move_rotate(0,0,-m,4)
```

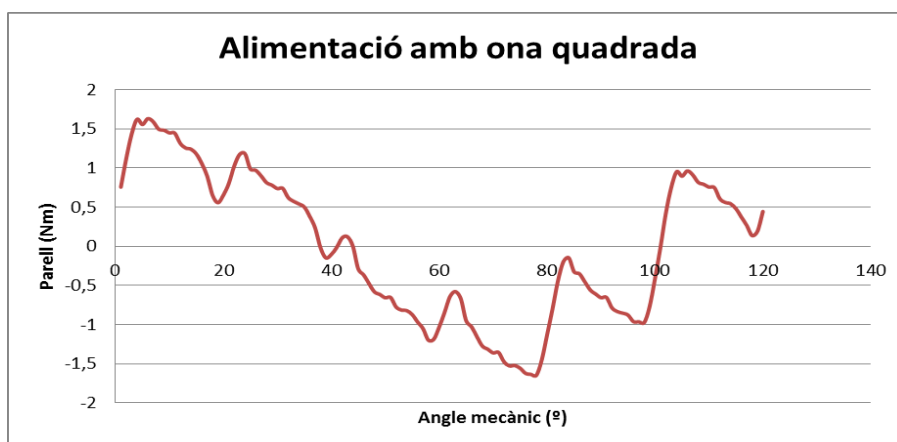


Figura 26. Parell obtingut amb alimentació d'ona quadrada.

El valor màxim del parell en aquest cas és de 1,63 Nm

La comparació entre els parells obtinguts ens mostra que el parell obtingut amb una alimentació d'ona quadrada és un 14% major al parell obtingut amb una senyal sinusoidal.

Cal tenir en compte que l'alimentació amb ona quadrada és més difícil de controlar.

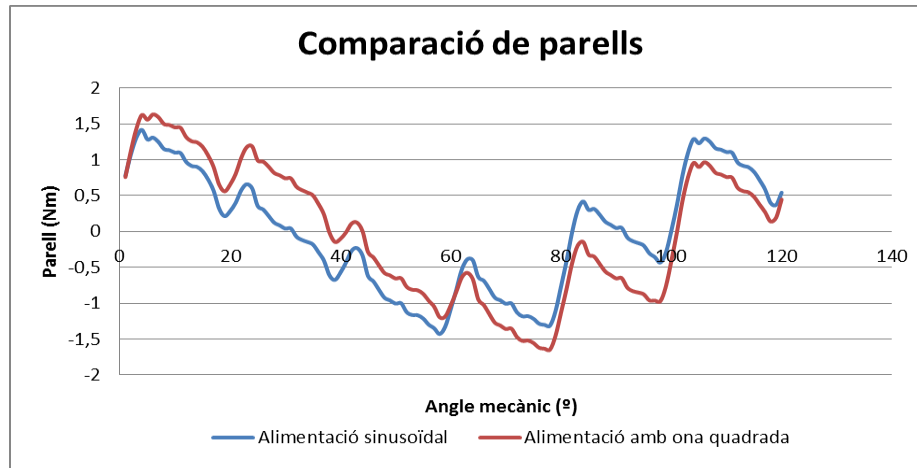


Figura 27. Comparació dels parells obtinguts.

Al ser l'alimentació amb ona quadrada més difícil de controlar i al obtenir el parell necessari amb l'alimentació sinusoidal, s'opta per triar alimentar el motor amb l'alimentació d'ona sinusoidal.

3.3.5. Anàlisi d'energia

L'objectiu d'aquest anàlisi és poder calcular les inductàncies directe i de quadratura, per això, cal obtenir el flux del motor amb la màquina alimentada sinusoidalment i amb els imants desactivats per tal d'anular la seva coercitivitat (H_c).

La inductància directe es correspon a la posició on l'energia o el flux són màxims, i la inductància de quadratura a la posició en que són mínims. Com en els anàlisis anteriors, s'utilitza el programa LUA per obtenir els valors del flux de la màquina:

```
m=120
p=120/m
--anàlisi calcul inductàncies(al imant eliminar Hc, Hc=0)
open("Motor_Simple_NOU.fem")
mi_saveas("tempenergia.fem")
mi_modifycircprop("A",1,8);
mi_modifycircprop("B",1,-4);
mi_modifycircprop("C",1,-4);
handle=openfile("energia_simple_NOU_S.txt","a")
write(handle,"punt ","enegia1 ","energia2 ","fa ","fb ","fc ","\n")
closefile(handle)
for n=1,m,1 do
    mi_analyze();
    mi_loadsolution()
    handle=openfile("energia_simple_NOU_S.txt","a")
    ia, va,fa=mo_getcircuitproperties("A");
    ib, vb,fb=mo_getcircuitproperties("B");
    ic, vc,fc=mo_getcircuitproperties("C");
    mo_seteditmode("areas");
```

```

mo_groupselectblock();
e1=mo_blockintegral(2);
mo_clearblock();
mo_groupselectblock(100);
e2=mo_blockintegral(2);
mo_clearblock();
mo_addcontour(0,19.85)
mo_addcontour(0,-19.85)
mo_bendcontour(180,1)
mo_addcontour(0,-19.85)
mo_addcontour(0,19.85)
mo_bendcontour(180,1)
m1=mo_lineintegral(4)
write(handle,n," ",e1," ",e2," ",fa," ",fb," ",fc," \n")
closefile(handle)
mo_close()
--rotor
mi_selectgroup(100)
mi_move_rotate(0,0,p,4)
end
mi_move_rotate(0,0,-m,4)

```

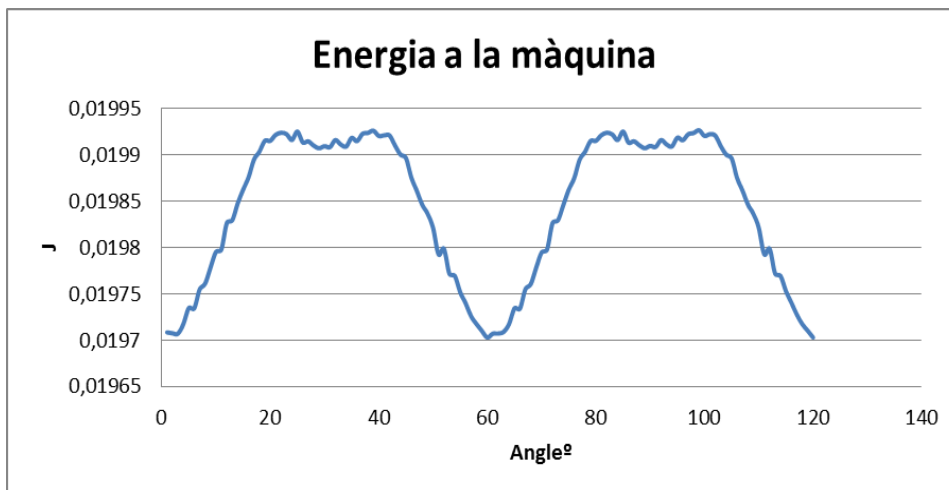


Figura 28. Energia en funció de la posició.

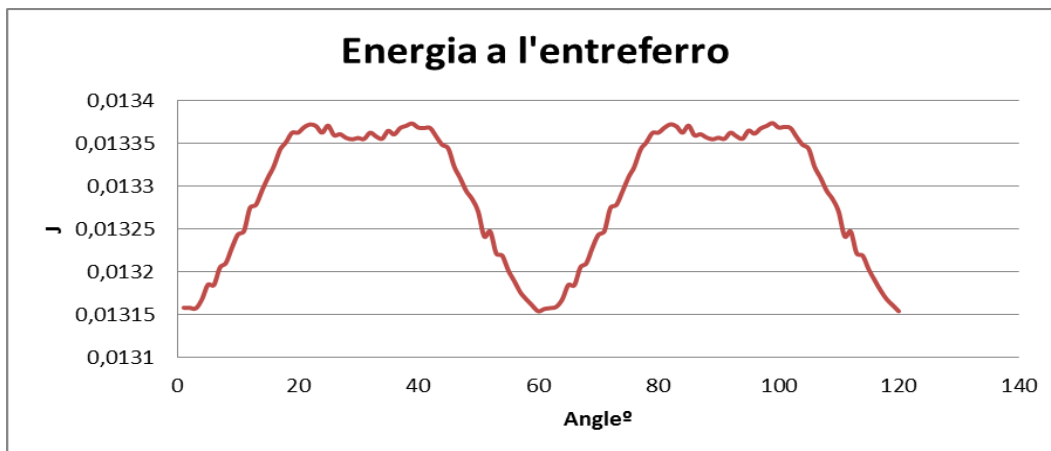


Figura 29. Energia a l'entreferro en funció de la posició.

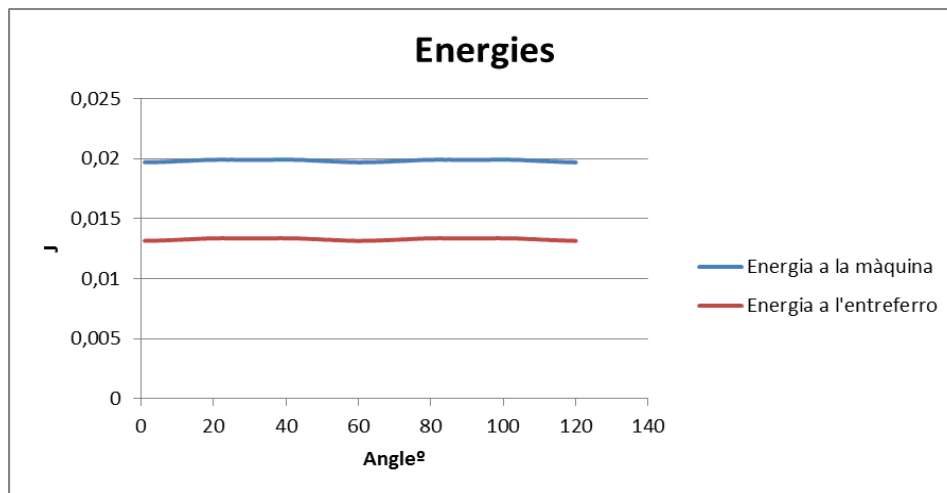


Figura 30. Comparació de les dos energies.

Les expressions de les inductàncies són:

$$L_{d_energia_de_la_màquina} = \frac{\frac{2}{3} \cdot \min(Energia)}{\left(\frac{I}{\sqrt{2}}\right)^2} \cdot 1000 = \frac{\frac{2}{3} \cdot 0,0197}{\left(\frac{8}{\sqrt{2}}\right)^2} \cdot 1000 = 0,41 \text{ mH} \quad (58)$$

$$L_{q_energia_de_la_màquina} = \frac{\frac{2}{3} \cdot \max(Energia)}{\left(\frac{I}{\sqrt{2}}\right)^2} \cdot 1000 = \frac{\frac{2}{3} \cdot 0,0199}{\left(\frac{8}{\sqrt{2}}\right)^2} \cdot 1000 = 0,41 \text{ mH} \quad (59)$$

També podem trobar les inductàncies a través de l'energia de l'entreferro o del flux de cada fase, l'única diferència que trobarem és que si fem servir els valors de flux les expressions canviaran de la següent forma:

$$L_{d_fluxA} = \frac{\min(\phi_A)}{I} \cdot 1000 = \frac{0,00328}{8} \cdot 1000 = 0,41 \text{ mH} \quad (60)$$

$$L_{q_fluxA} = \frac{\max(\phi_A)}{I} \cdot 1000 = \frac{0,0033}{8} \cdot 1000 = 0,412 \text{ mH} \quad (61)$$

Utilitzem les dades que utilitzem sempre obtindrem el mateix resultat, i al ser L_d igual a L_q , significa que el nostre motor és de pols llisos

3.3.6. Anàlisi de pèrdues

Per tal de determinar les pèrdues al ferro i les pèrdues Joule, realitzarem un anàlisi amb càrrega del motor.

Per determinar les pèrdues a l'estator i al rotor del motor utilitzarem el següent programa LUA:

```
mo_smooth("off")
numelm = mo_numelements()
-- vigilar amb freq
freq=30
depth=0.040
Pfer=0
Kc=1.357
```

```

Kh=216.83
Ka=9.2184
for k=1,numelm do
  p1,p2,p3,x,y,a,g=mo_getelement(k)
  if (g == 5) then
    dv=depth*a*mm^2;
    a,bx,by,Sig,E,hx,hy=mo_getpointvalues(x,y)
    Bxmod=abs(bx)
    Bymod=abs(by)
    Bmod=sqrt(Bxmod^2+Bymod^2)
    Pfer=Pfer+(Kh*freq*Bmod^2+Kc*freq^2*Bmod^2+Ka*sqrt(freq^3*Bmod^3))*dv
  end
end
-- A partir d'aquí és calcula l'altre, borra anterior per trobar lloc (
-- estar o rotor)--
-- El g == 4 ens indica que s'agafa el grup 4, per tant hem de mirar de
-- tenir el rotor o l'estator al grup 5 i 4--
Pfest=0
for k=1,numelm do
  p1,p2,p3,x,y,a,g=mo_getelement(k)
  if (g == 4) then
    dv=depth*a*mm^2;
    a,bx,by,Sig,E,hx,hy=mo_getpointvalues(x,y)
    Bxmod=abs(bx)
    Bymod=abs(by)
    Bmod=sqrt(Bxmod^2+Bymod^2)
    Pfest=Pfest+(Kh*freq*Bmod^2+Kc*freq^2*Bmod^2+Ka*sqrt(freq^3*Bmod^3))*dv
  end
end
print("Pèrdues ferro estator: ",Pfest)

print("Pèrdues ferro rotor: ",Pfer)

```

Aquest programa s'utilitza en la finestra de post-procés i ens donarà les pèrdues al ferro del rotor i a l'estator. Cal destacar que es busquen les pèrdues per a una freqüència de 30 Hz, la qual és la freqüència corresponent al punt de rentat. S'analitzen les pèrdues a aquesta freqüència perquè és al punt on més temps treballarà el motor i on més risc té d'escalfar-se.

Els resultats obtinguts són els següents:

Rotor: 0,14 W

Estator: 0,73 W

També cal calcular els volums de les dos parts perquè necessitem conèixer la densitat de pèrdues al ferro per el posterior anàlisi tèrmic. El volum de cada part l'obtidrem al seleccionar aquesta en el post-procés del programa FEMM i triar la opció d'integrar *block volume*. Els volums són:

Rotor: $1,99 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$

Estator: $9,19 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$

I en conseqüència, les densitats de pèrdues a cada part:

$$VHG_{rotor} = \frac{P_{fe_rotor}}{V_{rotor}} = \frac{0,14}{1,99 \cdot 10^{-5}} = 7.035,18 \text{ W/m}^3 \quad (62)$$

$$VHG_{estator} = \frac{P_{fe_estator}}{V_{estator}} = \frac{0,73}{9,19 \cdot 10^{-5}} = 7.943,42 \text{ W/m}^3 \quad (63)$$

Respecte a les pèrdues Joule o al coure, podem trobar aquestes directament amb el programa FEMM i la integral *total losses* un cop haguem seleccionat totes les ranures.

Pèrdues al coure: 40,98 W

El procediment per trobar la densitat de pèrdues és el mateix, amb l'única diferència de que enlloc d'utilitzar la funció *total losses* utilitzar *Total los density*.

Densitat de pèrdues als conductors: $1,057 \cdot 10^6 \text{ W/m}^3$

CAPÍTOL 4: CARACTERÍSTIQUES DE LA MÀQUINA

4.1. Inductàncies

4.1.1. Inductància de dispersió

Dins la inductància de dispersió podem diferenciar 4 tipus:

- a) Inductància de dispersió diferencial o d'entreferro

Es calcula a partir de la inductància principal i el coeficient de dispersió ($\sigma_{\delta s}$).

$$k_{\delta 1} = \sum_{k=1}^{300} \left[\frac{\sin \left[(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot W_p \cdot \frac{\pi}{2} \right] \cdot \frac{\sin \left[(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot q \cdot \frac{\alpha_{us}}{2} \right]}{3 \cdot \sin \left[(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot q \cdot \frac{\alpha_{us}}{2} \right]}}{(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot k_{w1}} \right]^2 = \sum_{k=1}^{300} \left[\frac{\sin \left[(1+2 \cdot k \cdot 3) \cdot 1 \cdot \frac{\pi}{2} \right] \cdot \frac{\sin \left[(1+2 \cdot k \cdot 3) \cdot 3 \cdot \frac{1,047}{2} \right]}{3 \cdot \sin \left[(1+2 \cdot k \cdot 3) \cdot 3 \cdot \frac{1,047}{2} \right]}}{(1+2 \cdot k \cdot 3) \cdot 0,96} \right]^2 = 0,0176 \quad (64)$$

$$k_{\delta 12} = \sum_{k=-1}^{-300} \left[\frac{\sin \left[(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot W_p \cdot \frac{\pi}{2} \right] \cdot \frac{\sin \left[(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot q \cdot \frac{\alpha_{us}}{2} \right]}{q \cdot \sin \left[(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot q \cdot \frac{\alpha_{us}}{2} \right]}}{(1+2 \cdot k \cdot m) \cdot k_{w1}} \right]^2 = \sum_{k=-1}^{-300} \left[\frac{\sin \left[(1+2 \cdot k \cdot 3) \cdot 1 \cdot \frac{\pi}{2} \right] \cdot \frac{\sin \left[(1+2 \cdot k \cdot 3) \cdot 3 \cdot \frac{1,047}{2} \right]}{3 \cdot \sin \left[(1+2 \cdot k \cdot 3) \cdot 3 \cdot \frac{1,047}{2} \right]}}{(1+2 \cdot k \cdot 3) \cdot 0,96} \right]^2 = 0,0289 \quad (65)$$

On α_{us} és:

$$\alpha_{us} = \frac{p \cdot 2\pi}{Q} = \frac{3 \cdot 2\pi}{18} = 1,047 \quad (66)$$

I $\sigma_{\delta s}$ és:

$$\sigma_{\delta s} = k_{\delta 12} + k_{\delta 1} = 0,0176 + 0,0289 = 0,0465 \quad (67)$$

$$L_{\delta s} = 0,8 \cdot \sigma_{\delta s} \cdot L_d = 0,8 \cdot 0,0465 \cdot 0,00041 = 1,53 \cdot 10^{-5} \text{ [H]} \quad (68)$$

b) Inductància de dispersió de ranura

El càlcul de la inductància de dispersió de ranura està condicionat pel paràmetre λ_{usr} , ja que aquest depèn de la geometria de la ranura estatòrica.

Abans de començar el càlcul del paràmetre λ_{usr} , cal aproximar la forma de la ranura a la normalització més semblant. En aquest cas la forma de la ranura i la seva aproximació són les següents:

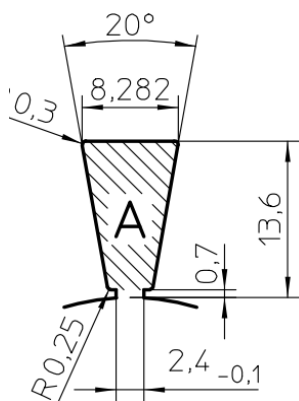


Figura 31a. Ranura estatòrica.

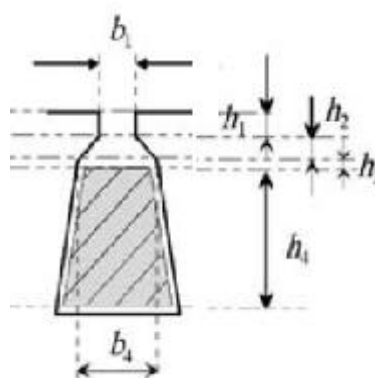


Figura 31b. Forma de ranura normalitzada.

Les mesures són:

b_1 : 0,0024 m

h_1 : 0,0007 m

h_2 : 0 m

h_3 : 0 m

h_4 : 0,0136 m

b_4 : 0,00828 m

el paràmetre λ_{us} ve donat per:

$$\lambda_{us} = k_1 \cdot \frac{h_4}{3 \cdot b_4} + k_2 \cdot \left(\frac{h_3}{b_4} + \frac{h_1}{b_1} + \frac{h_2}{b_4 - b_1} \cdot \ln \left(\frac{b_4}{b_1} \right) \right) = 1 \cdot \frac{0,0136}{3 \cdot 0,00828} + 1 \cdot \left(\frac{0}{0,00828} + \frac{0,0007}{0,0024} + \frac{0}{0,00828 - 0,0024} \cdot \ln \left(\frac{0,00828}{0,0024} \right) \right) \quad (69)$$

= 0,8392

$$k_1 = 1 - \frac{9}{16} \cdot \varepsilon = 1 - \frac{9}{16} \cdot (1 - W_p) = 1 - \frac{9}{16} \cdot (1 - 1) = 1 \quad (70)$$

$$k_2 = 1 - \frac{3}{4} \cdot \varepsilon = 1 - \frac{3}{4} \cdot (1 - W_p) = 1 - \frac{3}{4} \cdot (1 - 1) = 1 \quad (71)$$

$$L_{us} = \frac{4 \cdot m}{Q} \cdot \mu_0 \cdot L \cdot N_f^2 \cdot \lambda_{us} = \frac{4 \cdot 3}{18} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,035 \cdot 66^2 \cdot 0,8392 = 1,072 \cdot 10^{-4} \text{ H} \quad (72)$$

c) Inductància de cap de dent (zig-zag)

La inductància de dispersió de cap de dent es pot quantificar utilitzant un factor de permeància:

$$L_{\sigma\delta s} = \frac{4 \cdot m}{Q} \cdot \mu_0 \cdot L \cdot N_f^2 \cdot \lambda_{\delta s} = \frac{4 \cdot 3}{18} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,035 \cdot 66^2 \cdot 0,113 = 1,44 \cdot 10^{-5} \text{ H} \quad (73)$$

On:

$$\lambda_{\delta s} = k_2 \cdot \frac{5 \cdot \frac{\delta}{b_1}}{5 + 4 \cdot \frac{\delta}{b_1}} = 1 \cdot \frac{5 \cdot \frac{0,0003}{0,0024}}{5 + 4 \cdot \frac{0,0003}{0,0024}} = 0,113 \quad (74)$$

d) Inductància de cap de bobina

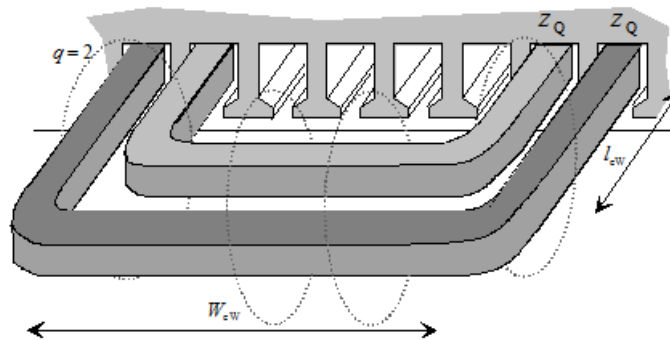


Figura32. Dimensions del cap de bobina.

La inductància de cap de bobina es calcula:

$$L_{ws} = \frac{4 \cdot m}{Q} \cdot q \cdot \mu_0 \cdot l_w \cdot N_f^2 \cdot \lambda_{ws} = \frac{4 \cdot 3}{18} \cdot 1 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,025 \cdot 66^2 \cdot 0,44 = 4 \cdot 10^{-5} \text{ H} \quad (75)$$

El nombre de parells de ranures ocupades per pol i fase són:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot m \cdot p} = \frac{18}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 1 \quad (76)$$

L'expressió del factor de permeància és la següent:

$$\lambda_{ws} = \frac{2 \cdot l_{ew} \cdot \lambda_{lew} + W_{ew} \cdot \lambda_w}{l_w} = \frac{2 \cdot 0,01 \cdot 0,5 + 0,005 \cdot 0,2}{0,025} = 0,44 \quad (77)$$

Per poder determinar la longitud d'un cap de bobina és necessari determinar la longitud d'una espira:

$$l_{av} = 2 \cdot L + 2,3 \cdot \tau_p = 2 \cdot 0,035 + 2,3 \cdot 0,2094 = 0,12 \text{ m} \quad (78)$$

I la longitud dels caps de l'espira es troba de la següent forma:

$$l_w = \frac{l_{av} - 2 \cdot L}{2} = \frac{0,12 - 2 \cdot 0,035}{2} = 0,025 \text{ m} \quad (79)$$

Respecte a la longitud W_{ew} , aquesta és pot aproximar amb:

$$W_{ew} = l_w - 2 \cdot l_{ew} = 0,025 - 2 \cdot 0,01 = 0,005 \text{ m} \quad (80)$$

La inductància total de dispersió serà la suma de totes les inductàncies determinades en aquest subapartat:

$$L_{s\sigma} = L_{\delta\delta} + L_{us} + L_{\sigma\delta\delta} + L_{ws} = 1,53 \cdot 10^{-5} + 1,072 \cdot 10^{-4} + 1,44 \cdot 10^{-5} + 4 \cdot 10^{-5} = 1,77 \cdot 10^{-4} \text{ H} \quad (81)$$

4.1.2. Inductància total

La inductància total és la suma de la inductància de dispersió amb la inductància principal, la qual s'ha trobat amb el mètode dels elements finits:

$$L_{Td} = L_d + L_{s\sigma} = 0,00041 + 1,77 \cdot 10^{-4} = 5,87 \cdot 10^{-4} \text{ H} \quad (82)$$

4.2. Paràmetres característics

4.2.1. Corrent de curtcircuit

El corrent de curtcircuit l'obtenim amb el flux calculat en l'anàlisi en buit i amb la inductància total del motor.

$$I_{dk} = \frac{\phi}{L_q} = \frac{0,085}{5,87 \cdot 10^{-4}} = 146,55 \text{ A} \quad (83)$$

El resultat ens mostra que el valor del corrent de curtcircuit és molt més alt que el corrent nominal, el qual cal recordar que era de 5.65 A. Com s'ha explicat a la memòria, aquesta relació entre els dos corrents ens mostra que el motor té una velocitat finita.

4.2.2. Parell

A l'hora de calcular i representar el parell del motor, tindrem en compte els dos trams en que podem dividir la corba de parell-velocitat.

En el primer tram el motor mostra un parell de valor constant, el qual acaba en un punt que anomenem punt base i que és l'últim punt on és motor dona el seu parell màxim. Per calcular aquest primer tram, utilitzarem les fórmules següents:

$$M = 3 \cdot p \cdot (\phi \cdot I_q + (L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q) [\text{Nm}] \quad (84)$$

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} [\text{A}] \quad (85)$$

$$U^2 = (R \cdot I_d - \omega \cdot L_q \cdot I_q)^2 + (R \cdot I_q + \omega \cdot L_d \cdot I_d + \omega \cdot \phi)^2 [\text{V}] \quad (86)$$

La velocitat base i el parell màxim del motor els podem trobar de la següent forma:

$$I_{d0} = 0 \text{ A} \quad (87)$$

$$I_{q0} = \sqrt{I_n^2 - I_{d0}^2} = \sqrt{5,65^2 - 0^2} = 5,65 \text{ A} \quad (88)$$

$$\omega_b = \frac{U_n}{\sqrt{(L_q \cdot I_{q0})^2 + (\phi + L_d \cdot I_{d0})^2}} = \frac{225,167}{\sqrt{(5,87 \cdot 10^{-4} \cdot 5,65)^2 + (0,085 + 5,87 \cdot 10^{-4} \cdot 0)^2}} = 2.647 \text{ rad/s} = 8.426 \text{ rpm} \quad (89)$$

$$M_b = 3 \cdot p \cdot (\phi \cdot I_{q0} + (L_d - L_q) \cdot I_{d0} \cdot I_{q0}) = 3 \cdot 3 \cdot (0,085 \cdot 5,65 + (5,87 \cdot 10^{-4} - 5,87 \cdot 10^{-4}) \cdot 0 \cdot 5,65) = 4,32 \text{ Nm} \quad (90)$$

A partir de la velocitat base, tindrem que el corrent I_d creixerà fins a assolir el valor de I_n , i el corrent I_q decreixerà fins a ser nul. Per calcular els diferents valors dels corrents en aquest segon tram, utilitzarem les següents expressions que depenen de la velocitat:

$$I_{d2}(\omega) = \frac{1}{2 \cdot L_d \cdot \phi} \cdot \left[\left(\frac{U_n}{\omega} \right) - \phi^2 - (L_d \cdot I_n)^2 \right] \text{ A} \quad (91)$$

$$I_{q2}(\omega) = \sqrt{I_n^2 - I_{d2}(\omega)^2} \text{ A} \quad (92)$$

Amb aquestes expressions, obtenim la corba de parell-velocitat del motor:

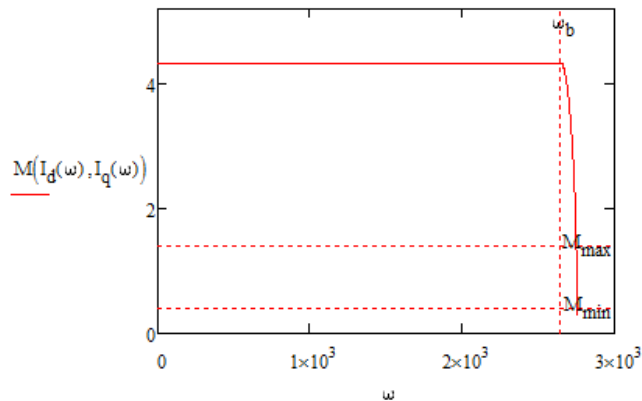


Figura 33. Corba parell-velocitat del motor.

La corba ens mostra que la velocitat màxima que pot assolir el motor es troba per sota dels 3.000 rad/s o 9.549 rpm, una velocitat que alhora es troba per sota de les 15.000 rpm que ha d'assolir el motor en el punt de centrifugació. Respecte al parell, veiem que aquest és molt superior al parell mínim requerit per la seva operació com a motor per a una rentadora. Al trobar-nos amb un parell tant per sobre dels mínims requerits, ajustem el corrent a 5 A, ja que el podem reduir una mica sense témer per reduir massa el parell i així també reduïrem les pèrdues de la màquina.

Respecte a la velocitat, la solució que es decideix adoptar és la de fer que el motor tingui velocitat infinita. Com s'ha explicat a la memòria, per dur a terme la solució proposada, s'ha d'igualar o tenir per sota el valor del corrent de curtcircuit respecte al valor del corrent nominal. En aquest cas, igualarem el corrent de curtcircuit al nominal augmentat la inductància.

S'haurà d'afegir una inductància externa al motor, de la qual es calcula el seu valor.

$$L_d' = \frac{\phi}{I_n} = \frac{0,085}{5} = 0,017 \text{ H} \quad (93)$$

$$L_{ext} = L_d' - L_d = 0,017 - 0,00058 = 0,016 \text{ H} \quad (94)$$

La inductància externa que s'ha d'afegir per aconseguir igualar el valor de I_{dk} amb el valor de I_n és de 0,016 H.

Si repetim els càlculs realitzats substituint L_d per L_d' i reduint el corrent nominal a 5 A, els nous valors base i la corba de parell-velocitat seran els següents:

$$\omega_b = \frac{U_n}{\sqrt{(L_q \cdot I_{q0})^2 + (\phi + L_d \cdot I_{d0})^2}} = \frac{225,167}{\sqrt{(0,017 \cdot 5)^2 + (0,085 + 0,017 \cdot 0)^2}} = 1.883 \text{ rad/s} = 5.994 \text{ rpm} \quad (95)$$

$$M_b = 3 \cdot p \cdot (\phi \cdot I_{q0} + (L_d - L_q) \cdot I_{d0} \cdot I_{q0}) = 3 \cdot 3 \cdot (0,085 \cdot 5 + (0,017 - 0,017) \cdot 0 \cdot 5) = 3,825 \text{ Nm} \quad (96)$$

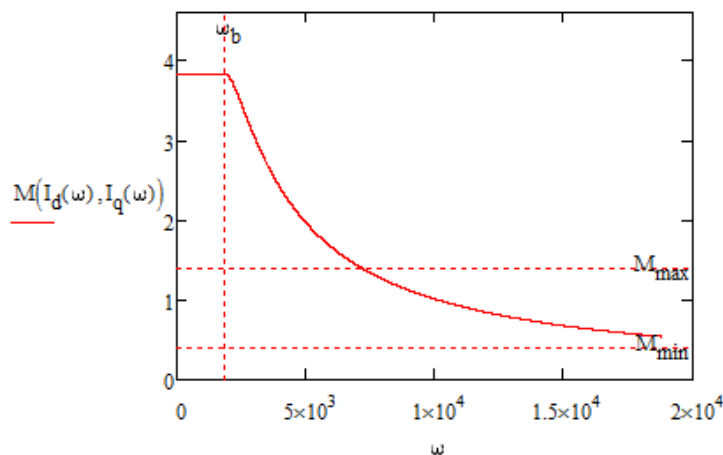


Figura 34. Corba parell-velocitat amb $I_{dk}=I_n$.

En aquesta nova característica podem apreciar com el motor arriba a velocitats superiors de 15.000 rpm, i com arriba a 15.000 rpm amb un parell per sobre del

requerit a aquella velocitat. A la corba parell-velocitat del motor s'ha marcat un parell màxim (M_{\max}), el qual és el parell necessari en el punt de rentat i el més alt al que ha d'arribar el motor, aquest parell s'ha d'assolir a 600 rpm, una velocitat molt per sota de la velocitat base (ω_b). Un altre parell que s'ha marcat és el parell necessari per la centrifugació, el qual s'hauria d'assolir a una velocitat de 15.000 rpm, i que com veiem, també es compleix.

4.2.3. Potència

La potència desenvolupada pel motor ve donada per la següent fórmula:

$$P = M \cdot \frac{\omega}{p} \text{ [W]} \tag{97}$$

La característica de potència-velocitat té la següent forma:

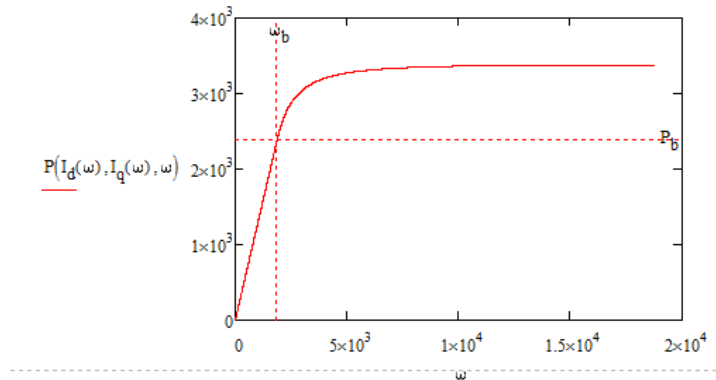


Figura 35. Potència-velocitat.

4.2.4. Corrent

Finalment s'ha establert un valor de corrent de 5 A, el qual sempre té un valor constant. Aquest està compost per el corrent I_q i el corrent I_d , la relació entre aquests últims és:

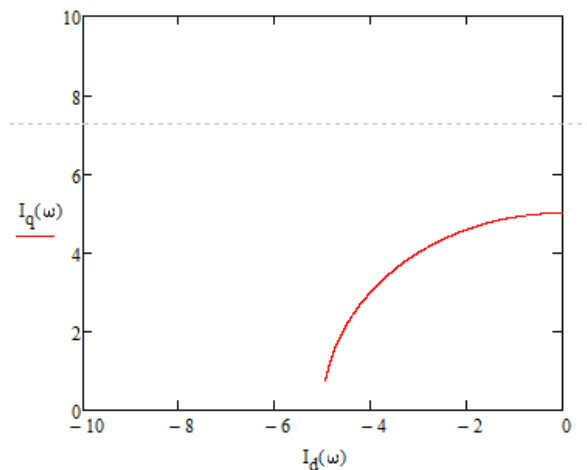


Figura 36. Relació entre I_d i I_q .

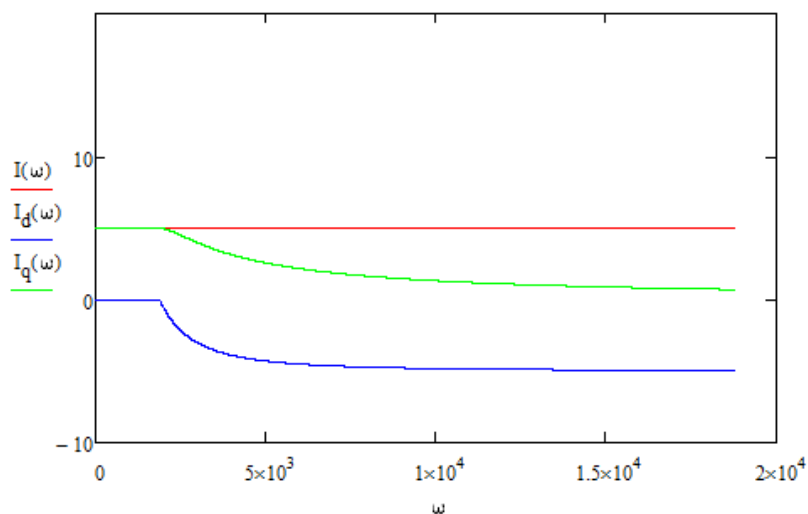


Figura 37. Corrent-velocitat.

En aquesta última gràfica es pot veure com varien les components del corrent amb la velocitat, escenificant així l'explicació realitzada a la memòria sobre el corrent i les seves components. Cal comentar que el corrent I_q creix de forma negativa un cop arriba a la velocitat base, tal com mostra la gràfica.

4.2.5. Tensió

La tensió en funció de la velocitat la obtindrem mitjançant la següent expressió:

$$U(\omega) = \omega \cdot \sqrt{(L_q \cdot I_q(\omega))^2 + (\phi + L_d \cdot I_d \cdot (\omega))^2} \quad [V] \quad (98)$$

Així, mitjançant el programa Mathcad podem obtenir la corba tensió-velocitat del motor.

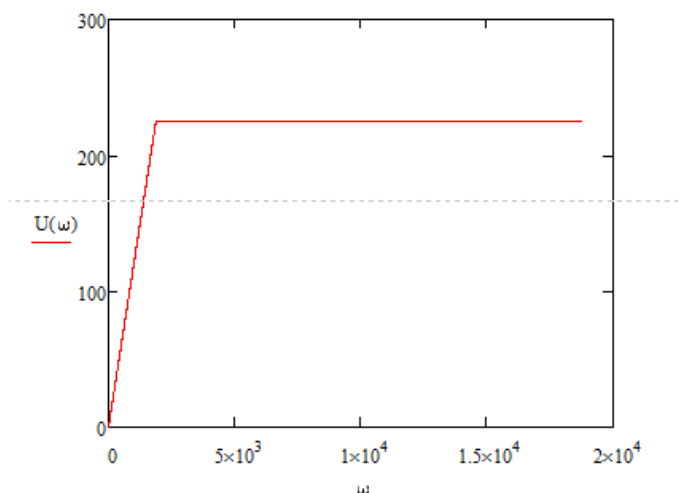


Figura 38. Tensió-velocitat.

Com s'observa a la gràfica, la tensió va augmentat fins assolir el valor de 225,16 V, tensió a la qual s'alimenta el motor.

4.2.6. Rendiment

Per trobar el rendiment del motor, primer s'ha de calcular la potència absorbida. Aquesta és la suma de la potència útil més les pèrdues del motor.

Les pèrdues del motor les obtindrem realitzant una mitja entre els valors calculats analíticament i els trobats mitjançant la simulació amb elements finits.

$$R = \frac{N_f \cdot I_{av}}{\sigma_{Cu} \cdot S_c} = \frac{66 \cdot 0,12}{43,68 \cdot 10^6 \cdot 0,33 \cdot 10^{-6}} = 0,55 \Omega \quad (99)$$

$$P_{Joule_analítiques} = 3 \cdot R \cdot I^2 = 3 \cdot 0,55 \cdot 5^2 = 41,25 \text{ W} \quad (100)$$

$$P_{Fe_analítiques} = \frac{1}{3} \cdot P_{Joule} = \frac{1}{3} \cdot 41,25 = 13,75 \text{ W} \quad (101)$$

$$P_J = \frac{P_{J_analítiques} + P_{J_FEMM}}{2} = \frac{41,25 + 40,98}{2} = 41,12 \text{ W} \quad (102)$$

$$P_{Fe} = \frac{P_{Fe_analítiques} + P_{Fe_estator} + P_{Fe_rotor}}{3} = \frac{13,75 + 0,73 + 0,14}{3} = 4,9 \text{ W [W]} \quad (103)$$

S'agafen les pèrdues mecàniques calculades en l'anàlisi analític.

$$P_{mecàniques} = \left(\frac{600 \cdot 5}{3000} \right)^2 = 1 \text{ W} \quad (104)$$

Considerant les pèrdues constants la potència absorbida depenent de la velocitat té la següent expressió:

$$P_{abs}(\omega) = P(\omega) + P_{Fe} + P_J + P_{mecàniques} [\text{W}] \quad (105)$$

La corba P_{abs} -velocitat és:

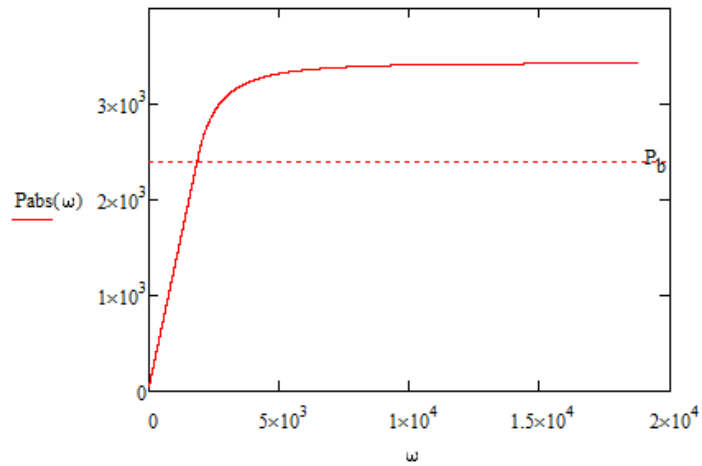


Figura 39. P_{abs} -velocitat.

I el rendiment del motor ve donat per:

$$\eta(\omega) = \frac{P(\omega)}{P_{abs}(\omega)} \cdot 100 \quad (106)$$

I té la següent característica:

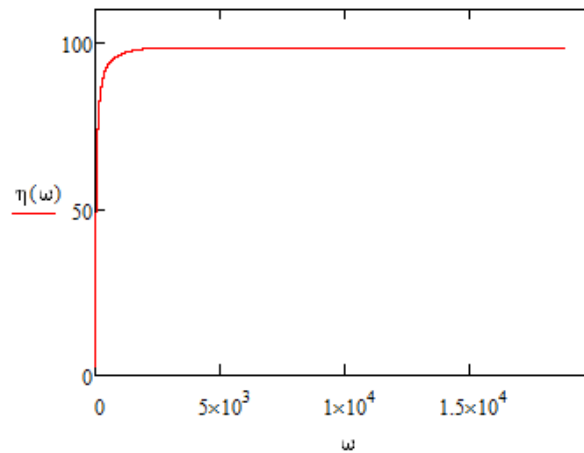


Figura 40. Rendiment-velocitat.

Obtenim un rendiment màxim del 98,6% a la velocitat de 1825 rad/s. Cal aclarir que aquest rendiment no té en compte les pèrdues mecàniques del motor, ja que no es desconeixen.

CAPÍTOL 5: ANÀLISI TÈRMIC AMB ELEMENTS FINITS

5.1. Importació i caracterització del problema

Com hem dit prèviament, per poder efectuar l'anàlisi tèrmic del problema amb FEMM cal crear un nou arxiu, en aquest cas un arxiu de flux de calor (*Heat Flux Problem*), i importar de nou l'arxiu CAD del motor. Abans de realitzar la importació s'ha dibuixat un l'aïllament que recobreix les ranures de l'estator i que té un gruix típic de 0,25 mm.

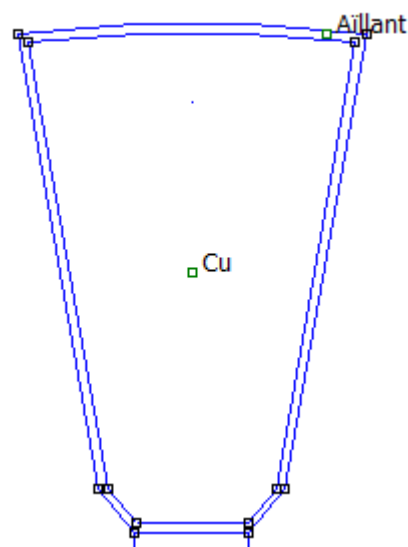


Figura 41. Ranura recoberta per aïllant.

Un cop importat l'arxiu CAD amb l'aïllament, s'han configurat les propietats del sistema, és a dir, les unitats de dibuix i la profunditat del motor.

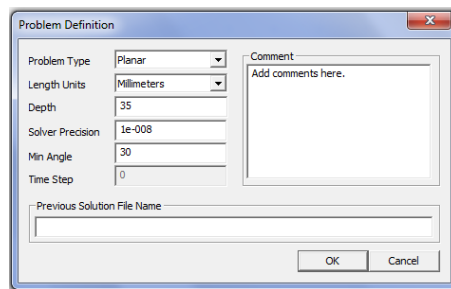


Figura 42. Configuració del problema tèrmic.

5.2. Definició dels materials

5.2.1. Aire

S'agafarà el material ja establert de la biblioteca del FEMM.

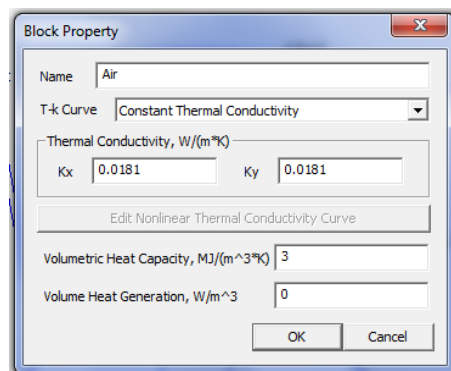


Figura 43. Propietats de l'aire.

5.2.2. Imant

Es considera una conductivitat tèrmica de 16,5 W/(m·K)

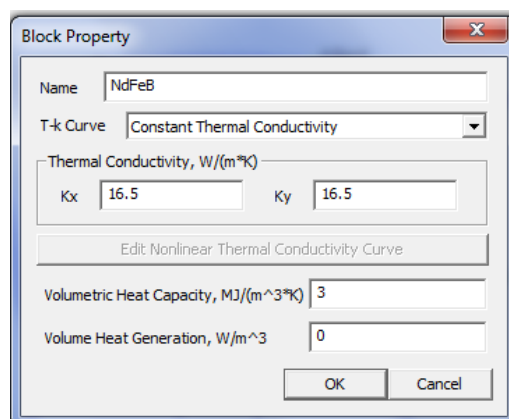


Figura 44. Propietats del Neodimi.

5.2.3. Aïllant

L'aïllant que s'utilitza és el kapok, i podem agafar el material de la biblioteca del FEMM.

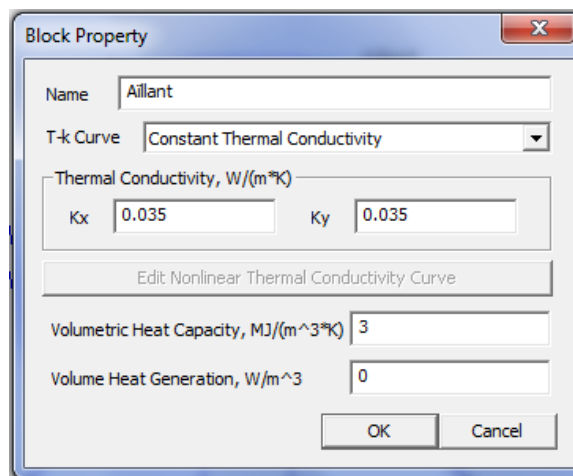


Figura 45. Propietats de l'aïllant.

5.2.4. Coure

Per definir el coure dels conductors cal definir el *Volume Heat Generation* o densitat de pèrdues del material. Aquesta dada s'ha calculat prèviament en el apartat 3.3.6.

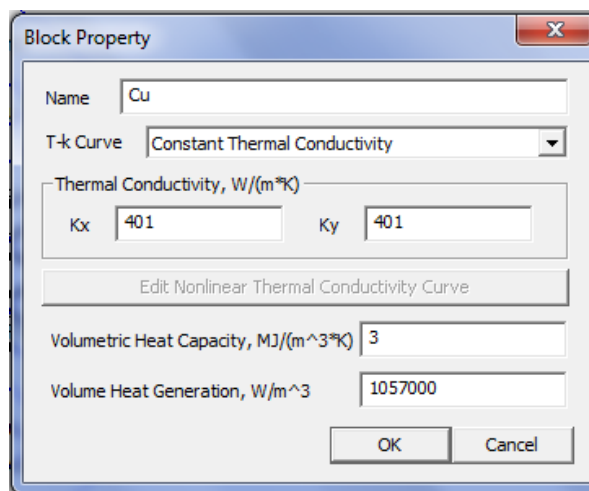


Figura 46. Propietats del coure.

5.2.5. Acer

Per caracteritzar l'acer de l'estator i el rotor cal definir el *Volume Heat Generation* o densitat de pèrdues del material. Aquesta dada s'ha calculat prèviament en el apartat 3.3.6.

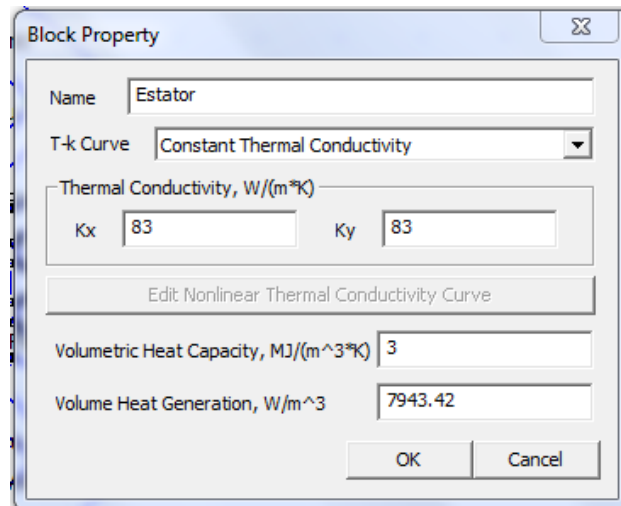


Figura 47. Propietats de l'acer de l'estator.

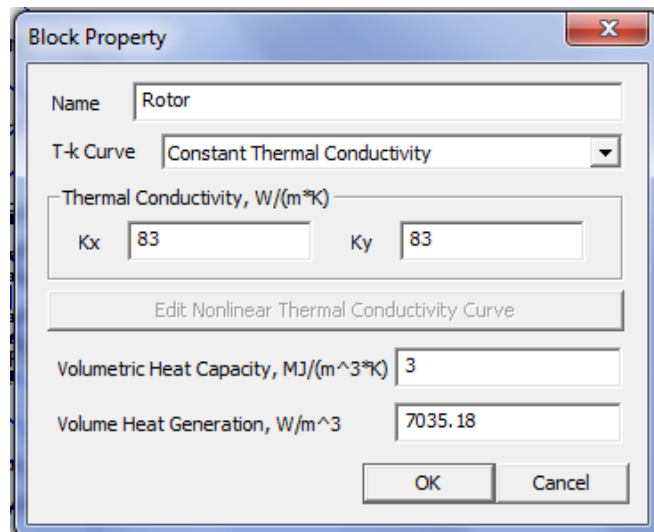


Figura 48. Propietats de l'acer del rotor.

5.3. Anàlisis tèrmics i condicions de contorn

5.3.1. Anàlisi amb ventilació natural

Un motor evacua la calor per convecció a través de la carcassa i de l'entreferro.

El programa FEMM simula l'efecte de la convecció a través de les condicions de contorn, les quals es defineixen a partir del coeficient de convecció (h) i de la temperatura ambient (T_0).

El coeficient de convecció per a una ventilació natural es calcula amb la següent expressió:

$$h_{estator} = 1,32 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta T}{D_{estator}}} = 1,32 \cdot \sqrt[4]{\frac{90}{0,08}} = 7,64 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (107)$$

$$h_{entreferro} = 1,32 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta T}{D_{estator}}} = 1,32 \cdot \sqrt[4]{\frac{90}{0,0394}} = 9,12 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (108)$$

A l'hora de calcular el coeficient de convecció per la condició de contorn de la superfície de l'estator (cal recordar que el nostre motor no utilitza cap carcassa) utilitzarem 90°C com a diferència de temperatura, el valor mig de l'interval que s'utilitza normalment, i el diàmetre exterior de l'estator. La temperatura ambient que es considera normalment és de 40°C.

Pel coeficient de convecció de l'entreferro es considera la mateixa diferència de temperatura, però es canvia el diàmetre pel diàmetre exterior del rotor. La temperatura ambient la considerarem lleugerament superior perquè és una zona del motor que està més calenta, així que és considera de 60°C.

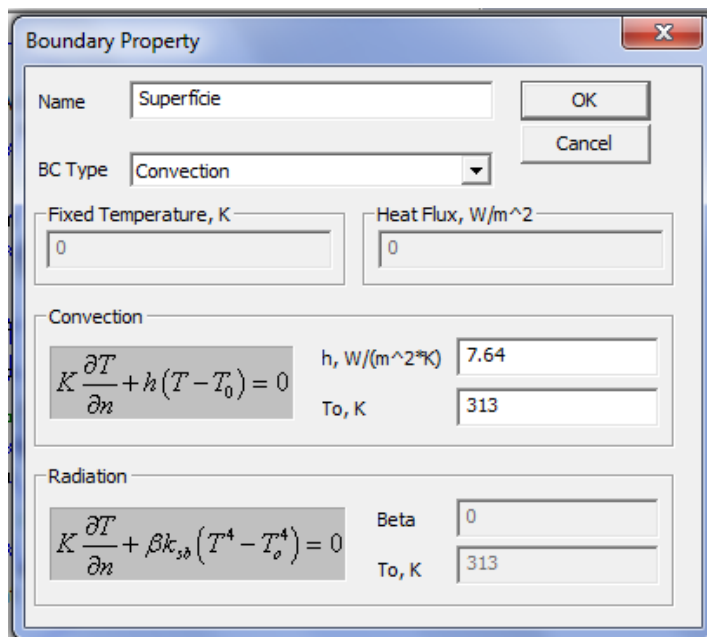


Figura 49. Caracterització de la convecció de l'estator.

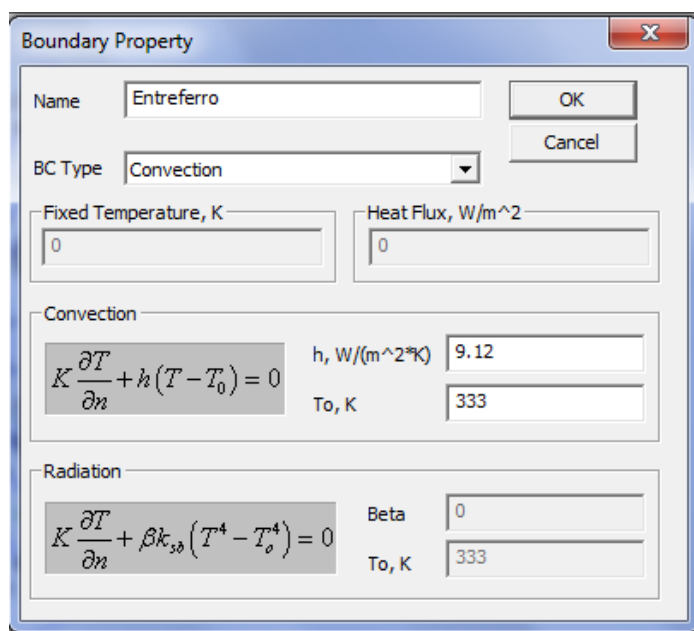


Figura 50. Caracterització de la convecció de l'entreferro.

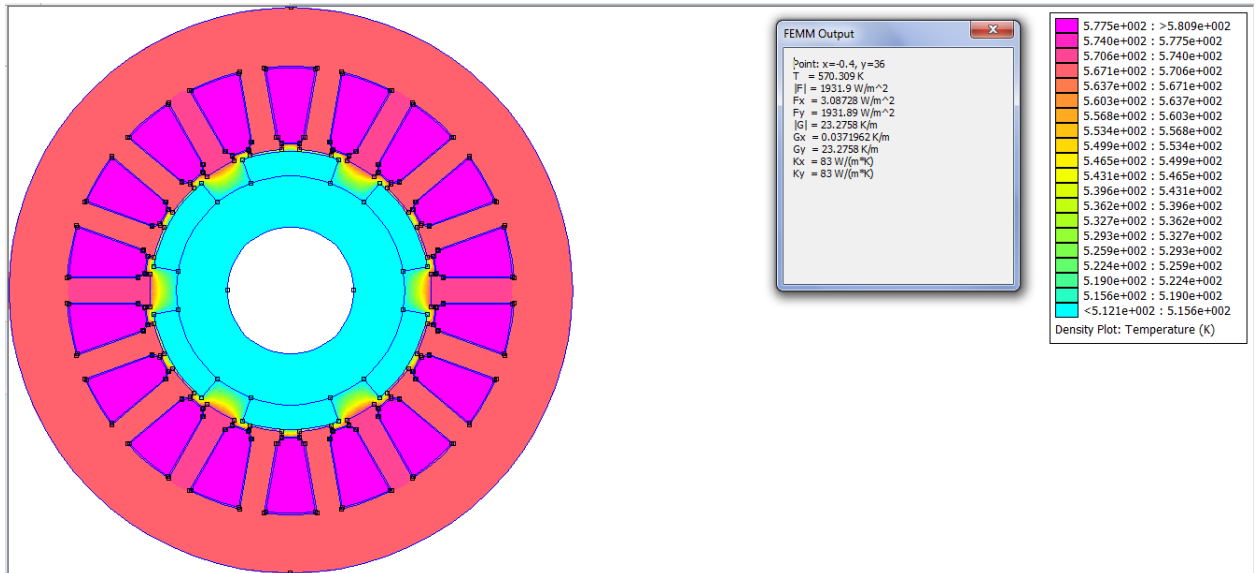


Figura 51. Resultats de l'anàlisi amb ventilació natural.

Els resultats mostren que l'estator del motor s'escalfa fins a una temperatura de 297,3 °C. La temperatura assolida en el motor mitjançant una ventilació natural és excessiva i cal exercir una ventilació forçada per millorar la refrigeració.

Aquest motor no té l'opció d'incorporar una carcassa o una carcassa amb aletes ja que la seva finalitat no ho permet.

5.3.2. Anàlisi amb ventilació forçada

La ventilació forçada consisteix en acoblar un ventilador que crea un corrent d'aire per l'exterior de la carcassa i per l'entreferro.

Normalment l'aire aplicat sol tenir una velocitat compresa entre els 5 i 15 m/s, en aquest cas aplicarem 10 m/s.

L'expressió del coeficient de convecció de ventilació forçada és:

$$h = 3,89 \cdot \sqrt{\frac{v}{L_{empilat}}} = 3,89 \cdot \sqrt{\frac{10}{0,035}} = 65,75 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] \quad (109)$$

Tindrem el mateix coeficient de convecció per l'exterior de l'estator que per l'entreferro.

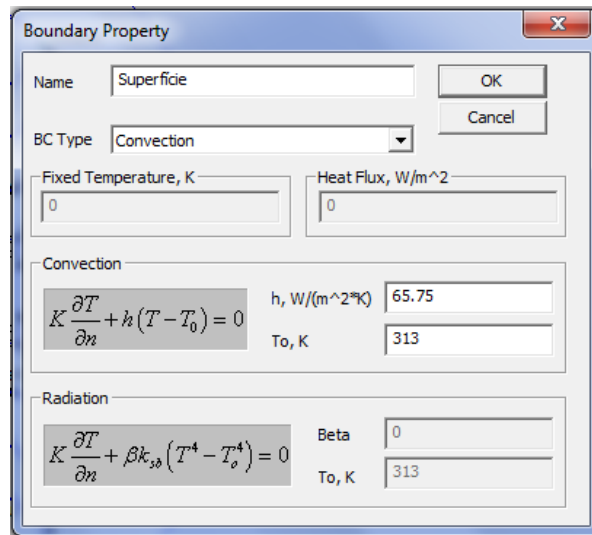


Figura 52. Caracterització de la convecció de l'estator.

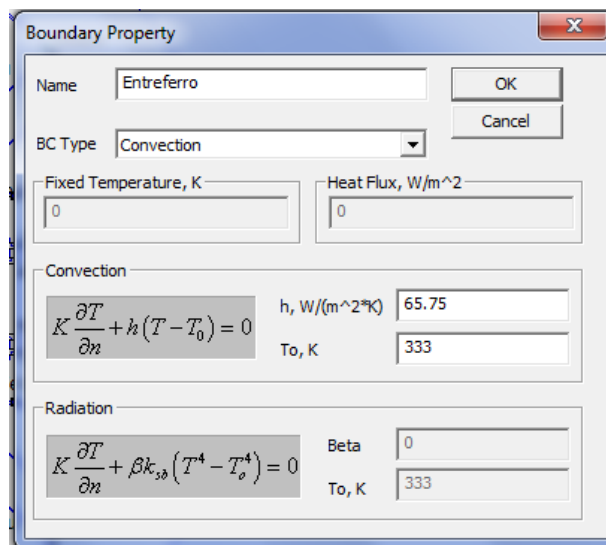


Figura 53. Caracterització de la convecció de l'entreferro.

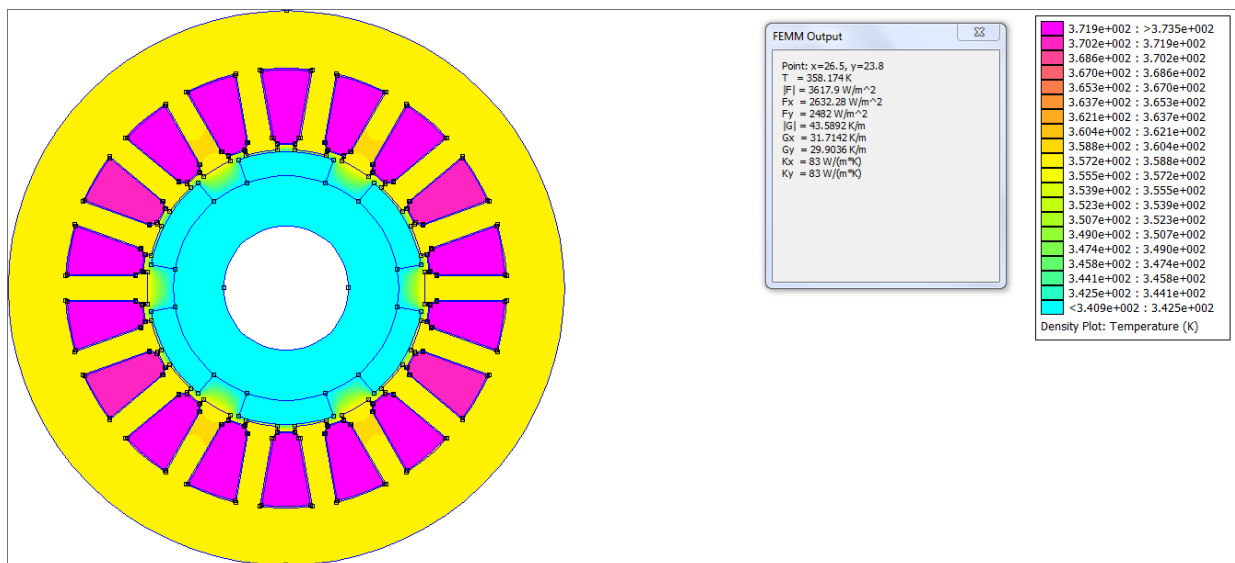


Figura 54. Resultats de l'anàlisi amb ventilació forçada.

Exercint una ventilació forçada la temperatura es redueix de forma important. A l'estator tenim una temperatura de 85,17 °C i a l'entreferro de 76,7 °C.

L' aïllament del motor serà de classe F, el qual té una temperatura màxima de treball de 155 °C. Aquest aïllant és el tipus d'aïllament que s'utilitza actualment.



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Annex 2 Resultats



Barcelona, 11 de Juny de 2014

Director: Ramon Bargalló Perpiñà
Departament d'Enginyeria Elèctrica (EE)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ÍNDIX

| | |
|--|-----------|
| Capítol 1: Resultats pauta analítica | 3 |
| 1.1. Característiques en els punts de treball | 3 |
| 1.2. Dimensions del motor..... | 4 |
| 1.2.1. Estator | 4 |
| 1.2.2. Entreferro | 4 |
| 1.2.3. Rotor | 4 |
| 1.2.4. Imants | 4 |
| 1.2.5. Debanat | 4 |
| 1.2.6. Eix..... | 4 |
| Capítol 2: resultats anàlisis magnètics..... | 6 |
| 2.1. Anàlisi en buit | 6 |
| 2.1.1. Verificació de les induccions | 6 |
| 2.1.2. Flux en buit..... | 7 |
| 2.1.3. FEM | 7 |
| 2.1.4. Parell de cogging..... | 8 |
| 2.2. Anàlisi en càrrega | 8 |
| 2.2.1. Parell | 8 |
| 2.2.2. Inductàncies..... | 8 |
| Capítol 3: Característiques de la màquina | 11 |
| 3.1. Pèrdues | 11 |
| 3.2. Corbes característiques..... | 11 |
| 3.2.1. Potència-velocitat..... | 11 |
| 3.2.2. Parell-velocitat..... | 12 |
| 3.2.3. Tensió-velocitat | 12 |
| 3.2.4. Corrent-velocitat | 13 |
| 3.2.5. Rendiment-velocitat..... | 13 |
| Capítol 4: Resultat anàlisi tèrmic..... | 15 |
| 4.1. Ventilació forçada | 15 |
| 4.1.1. Temperatures | 15 |
| 4.1.2. Aïllament | 16 |

CAPÍTOL 1:

RESULTATS PAUTA

ANALÍTICA

1.1. Característiques en els punts de treball

Les característiques del motor en el punt de rentat són:

- a) Potència: 240 W
- b) Velocitat: 600 rpm
- c) Parell: 3,82 Nm (El parell mínim necessari és de 1,4 Nm)
- d) Corrent: 5A
- e) Tensió: 22,6 V
- f) Rendiment: 84%

Les característiques del motor en el punt de centrifugat són:

- a) Potència: 3290 W
- b) Velocitat: 15000 rpm
- c) Parell: 2,1 Nm (El parell mínim necessari és de 0,4 Nm)
- d) Corrent: 5A
- e) Tensió: 225 V
- f) Rendiment: 98,6%

Altres dades que cal comentar del motor són:

- Pols: 6

1.2. Dimensions del motor

1.2.1. Estator

- a) Longitud empilat: 35 mm
- b) Model de xapa: SKS 400
- c) Ranures: 18
- d) Diàmetre exterior: 80 mm
- e) Diàmetre interior: 40 mm
- f) Secció de la ranura: 78,9 mm²
- g) Gruix: 0,5 mm
- h) Material: Acer M600

1.2.2. Entreferro

-Amplada de l'entreferro: 0,3 mm

1.2.3. Rotor

- a) Longitud de l'empilat: 35 mm
- b) Diàmetre exterior: 32,4 mm
- c) Material: Acer M600

1.2.4. Imants

- a) Amplada: 14 mm
- b) Alçada: 3,5 mm
- c) Llargada: 35 mm

1.2.5. Debanat

Les característiques del debanat són:

- a) Nombre total de conductors: 396 conductors
- b) Conductors per ranura: 22 conductors
- c) Diàmetre del conductor: 0,65 mm
- d) Secció del conductor: 0,33 mm²
- e) Densitat de corrent: 7 A/mm²
- f) Factor d'ocupació: 9,25 %

1.2.6. Eix

-Diàmetre: 18 mm

CAPÍTOL 2: RESULTATS ANÀLISIS MAGNÈTICS

2.1. Anàlisi en buit

2.1.1. Verificació de les induccions

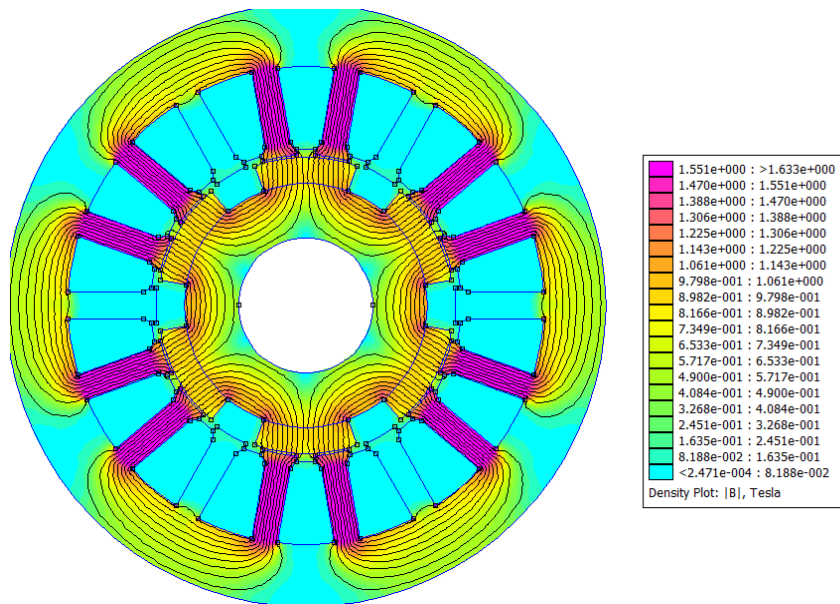


Figura 1. Densitat magnètica del motor.

- Inducció a les dents: 1,63 T
- Inducció a la corona estatòrica: 0,7 T
- Inducció a l'entreferro: 0,9 T

2.1.2. Flux en buit

El flux de cada fase per el gir corresponent a un cicle elèctric és:

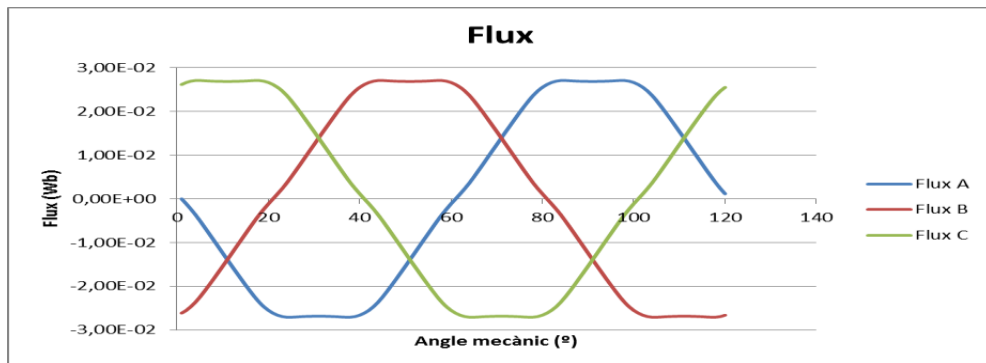


Figura 2. Flux en funció de la posició.

2.1.3. FEM

La força electromotriu per a cada fase calculada mitjançant derivació directa és:

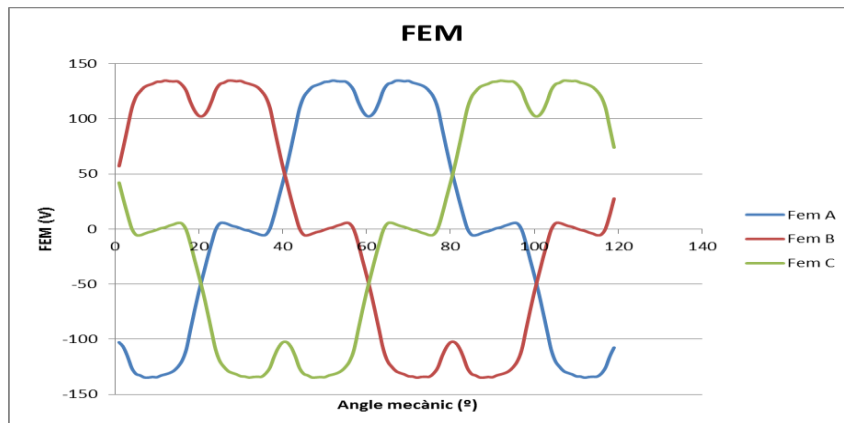


Figura 3. FEM en funció de la posició.

La força electromotriu d'una fase calculada mitjançant sèries de Fourier:

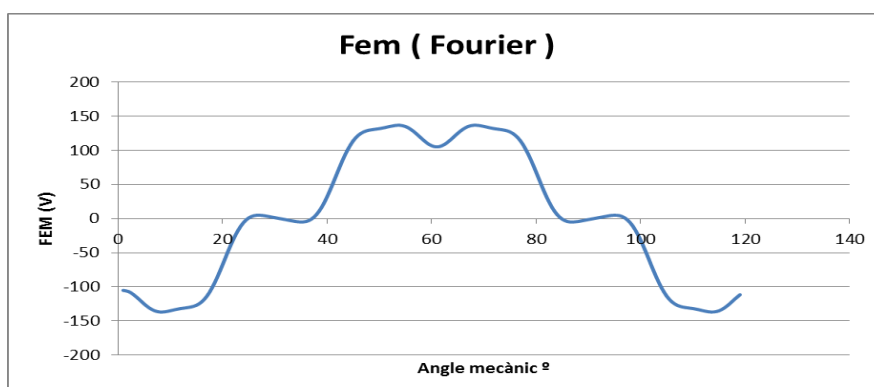


Figura 4. FEM d'una fase en funció de la posició.

-Valor màxim: 134,76 V

2.1.4. Parell de cogging

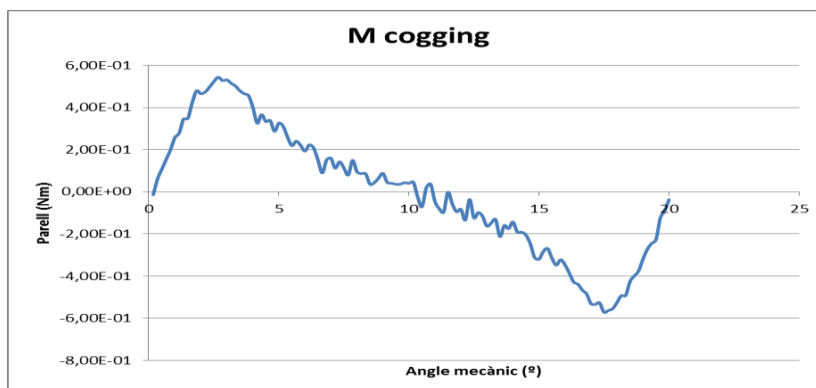


Figura 5. Parell de cogging en funció de la posició.

2.2. Anàlisi en càrrega

2.2.1. Parell

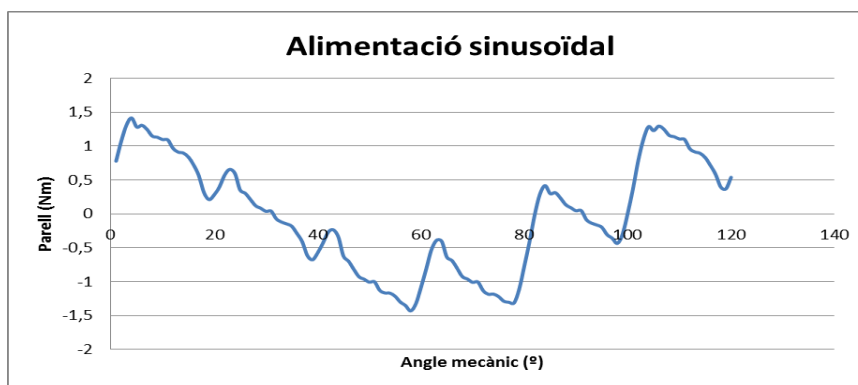


Figura 6. Parell en funció de la posició.

-Valor màxim: 1,41 Nm

2.2.2. Inductàncies

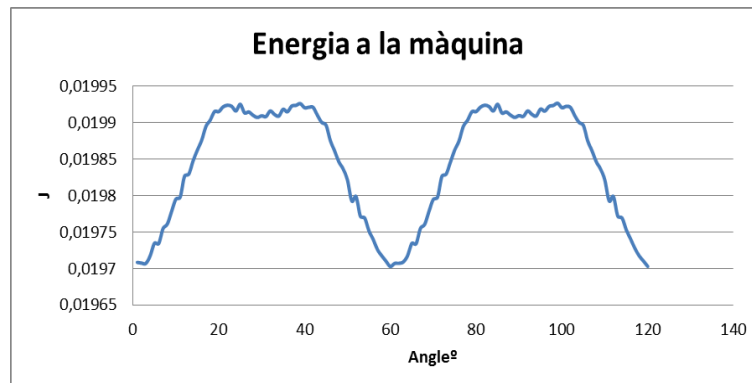


Figura 7. Energia en funció de la posició.

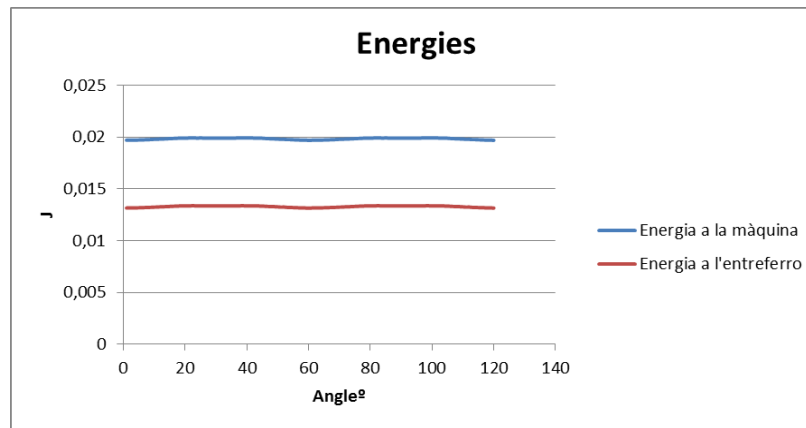


Figura 8. Comparativa de les energies en funció de la posició.

La inductància directa i de quadratura es determinen amb els valors màxims de l'energia de la màquina:

$$L_d: 0,41 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

$$L_q: 0,41 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

El motor és de pols llisos.

CAPÍTOL 3: CARACTERÍSTIQUES DE LA MÀQUINA

3.1. Pèrdues

- P_{Fe} : 4,9 W

- P_j : 41,12 W

- P_{mec} : 1 W

3.2. Corbes característiques

3.2.1. Potència-velocitat

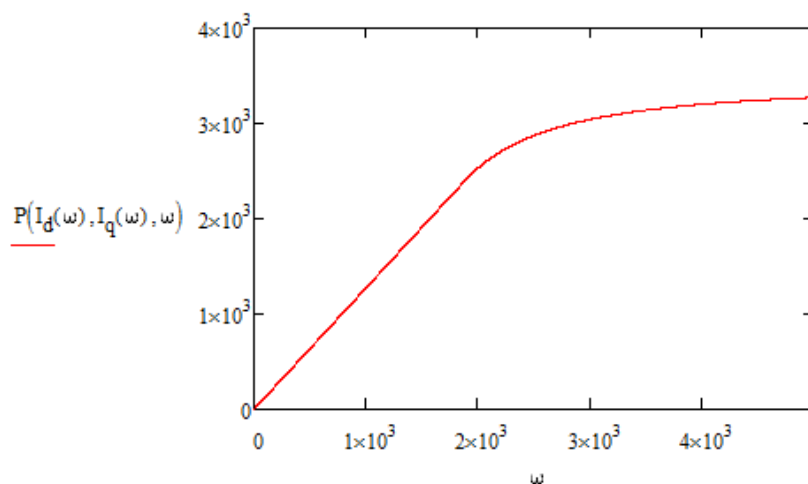


Figura 9. Potència-velocitat.

3.2.2. Parell-velocitat

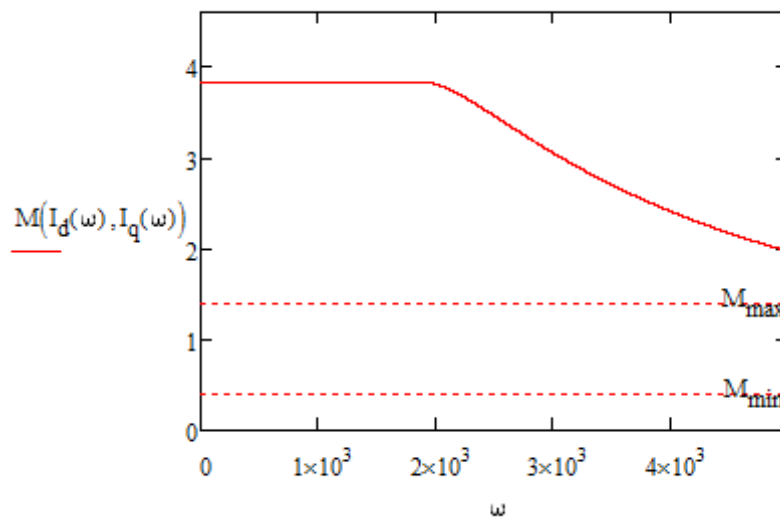


Figura 10. Parell-velocitat.

El parell màxim que pot proporcionar el motor és de 3,8 Nm, un parell molt per sobre dels necessaris en els dos punts de treball.

Trobem marcats a la gràfica els valors de parells màxim i mínim que necessita el motor.

3.2.3. Tensió-velocitat

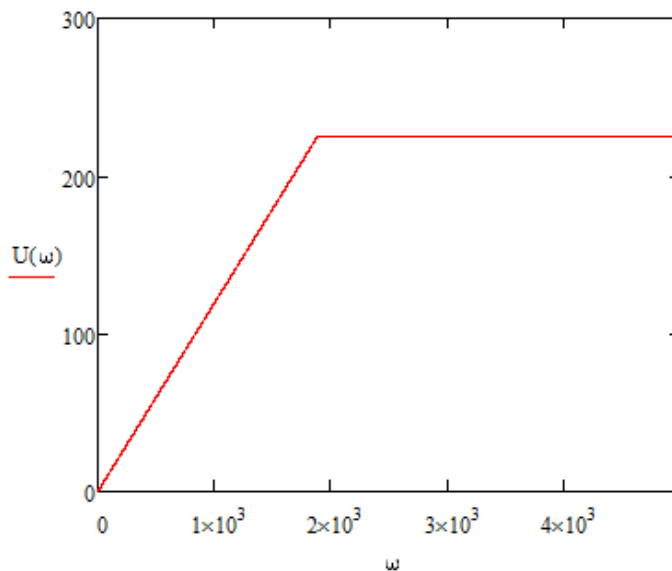


Figura 11. Tensió-velocitat

3.2.4. Corrent-velocitat

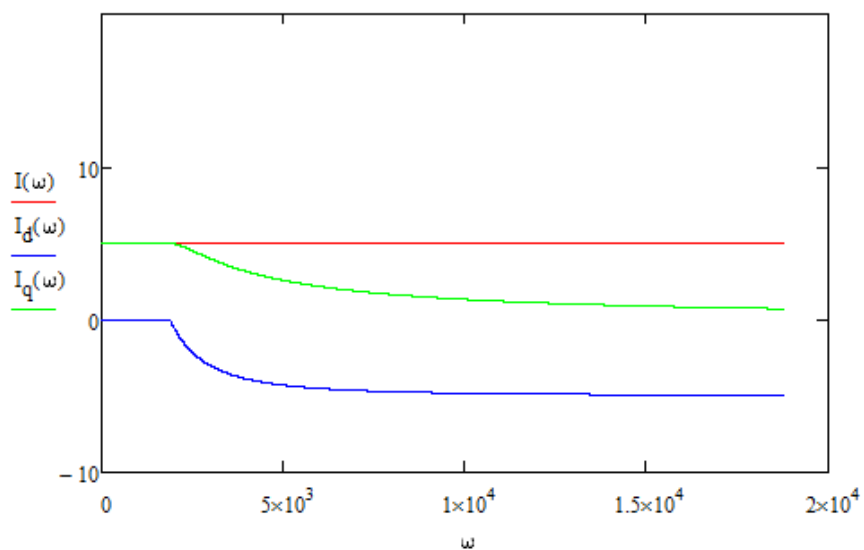


Figura 12. corrent-velocitat.

3.2.5. Rendiment-velocitat

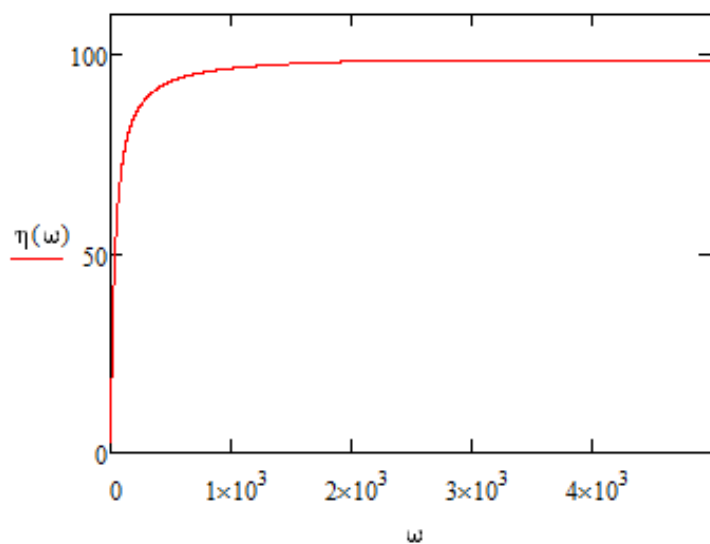


Figura 13. Rendiment-velocitat.

El rendiment elèctric s'ha calculat considerant les pèrdues en el punt de rentat, ja que serà el punt on més temps passarà treballant el motor i, per tant, on més es pot escalfar.

CAPÍTOL 4:

RESULTAT ANÀLISI

TÈRMIC

4.1. Ventilació forçada

4.1.1. Temperatures

Aplicant una ventilació forçada on s'ha considerat una velocitat de l'aire de 10 m/s, les temperatures són:

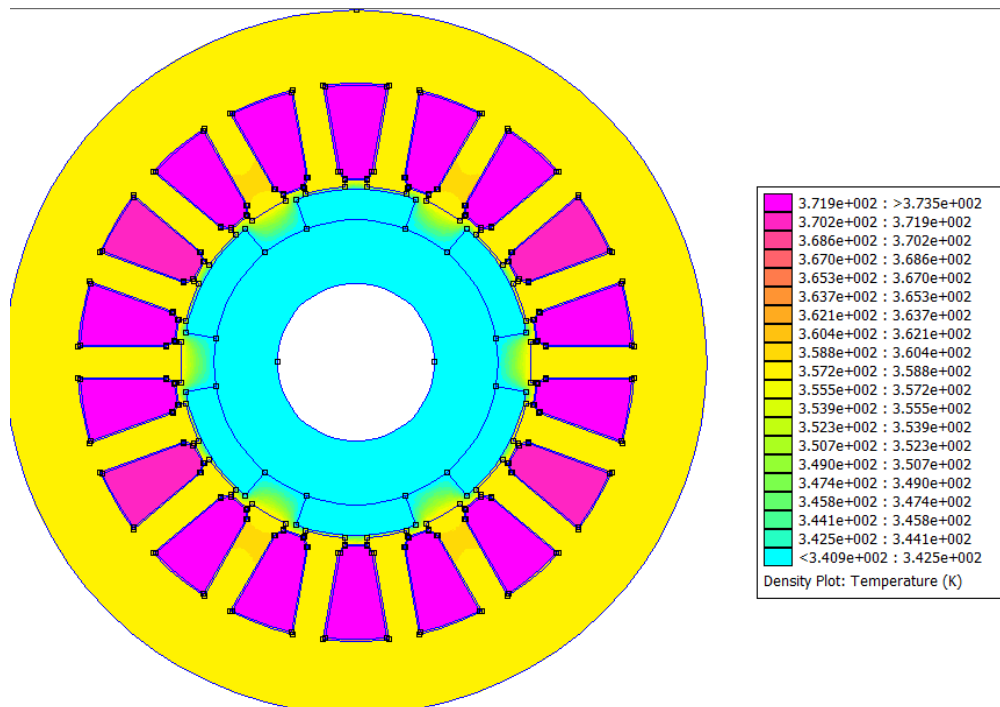


Figura 14. Resultats de l'anàlisi amb ventilació forçada.

-Temperatura al bobinat: 98°C

-Temperatura als imants: 68°C

-Temperatura a l'estator: 85°C

4.1.2. Aïllament

S'utilitzarà aïllament de classe F.



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Annex 3 Pressupost



Barcelona, 11 de Juny de 2014

Director: Ramon Bargalló Perpiñà
Departament d'Enginyeria Elèctrica (EE)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

ANNEX 3

PRESSUPOST

En aquest annex es realitza un pressupost del projecte on es desglossa el pressupost final en un pressupost dels materials i un per la mà d'obra.

Taula 1. *Pressupost dels materials*

| | Quantitat (kg) | Cost del quilo (€/kg) | Cost total (€) |
|-----------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|
| Acer M600 | 0,88 | 10 | 8,78 |
| Coure | 0,07 | 7,1 | 0,5 |
| Neodimi N35 | 0,064 | 80 | 5,08 |
| Materials de muntatge | | | 30 |
| TOTAL | | | 44,36 |

Taula 2. *Pressupost de la mà d'obra*

| | Temps (h) | Cost l'hora (€/h) | Cost total (€) |
|----------|--------------|----------------------|-------------------|
| Disseny | 200 | 30 | 6000 |
| Muntatge | 10 | 20 | 200 |
| TOTAL | | | 6200 |

Taula 3. *Pressupost final*

| | Cost (€) |
|-----------|-------------|
| Mà d'obra | 6200 |
| Material | 44,36 |

| | |
|----------|---------|
| IVA(21%) | 1311,32 |
| TOTAL | 7555,67 |



Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona

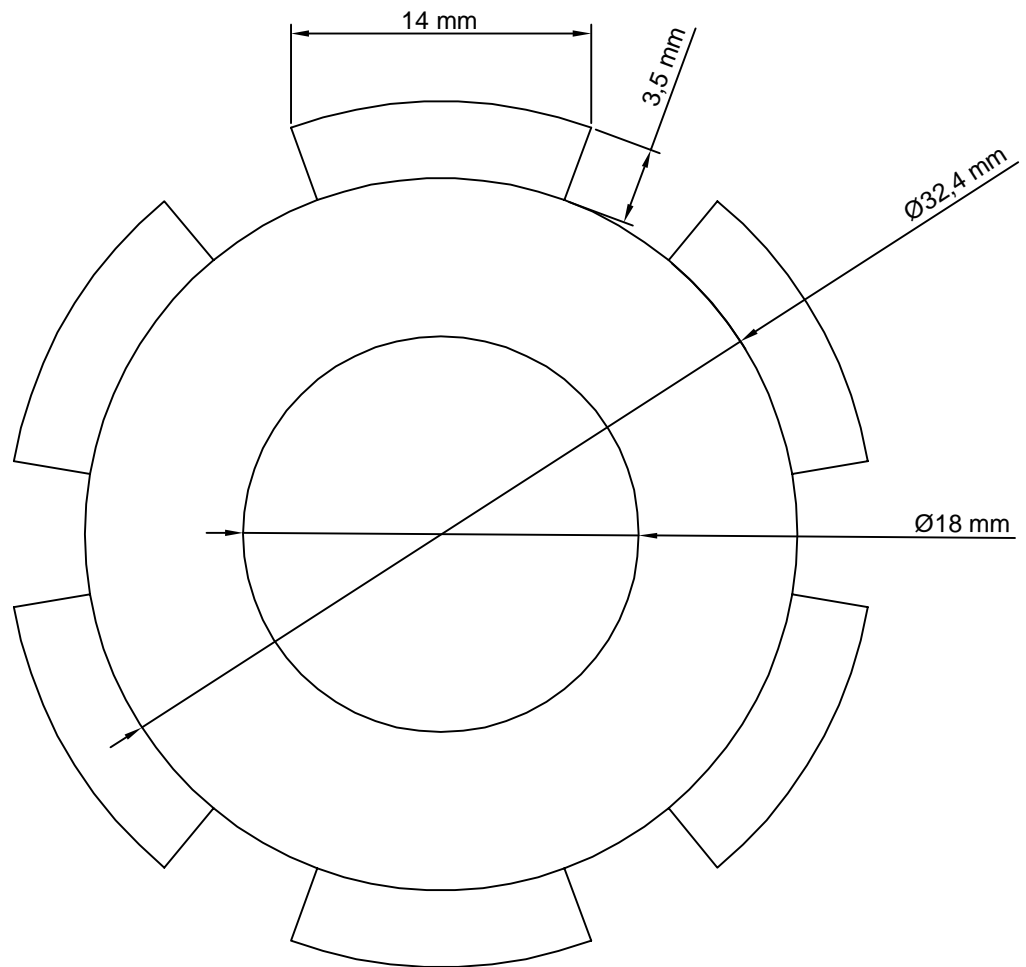
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA


Annex 4 Plànols i xapes

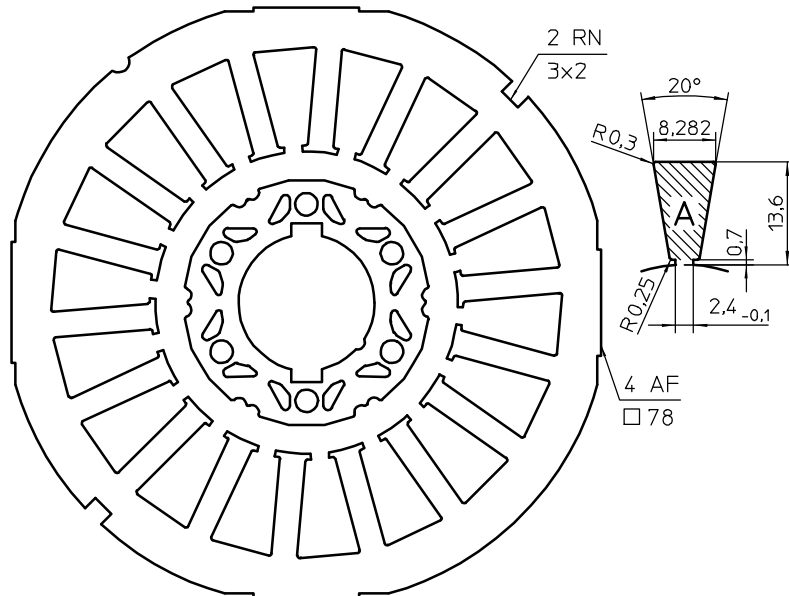


Barcelona, 11 de Juny de 2014

Director: Ramon Bargalló Perpiñà
Departament d'Enginyeria Elèctrica (EE)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)



| | | | | | | |
|----------------|------------------------|-------------------|----------|---|---------------------------------------|---|
| Dibuixat per: | Gerard Vilarrasa López | Data d'edició: | 9-6-2014 | Disseny d'un motor per una rentadora industrial | EUETIB |  |
| Comprovat per: | Ramón Bargalló Perpiñà | Data comprovació: | 9-6-2014 | | Rotor amb imants permanents del motor | Nº plànol |
| Escala: | 3:1 | | | | Observacions: | |



Blechdicke: 0,5mm



Kienle + Spiess GmbH
 Bahnhofstraße 23
 D-74343 Sachsenheim / Germany
 Tel: +49 (7147) 29 0
 Fax: +49 (7147) 29 1488
 E-mail: info@kienle-spiess.com
 Web: www.kienle-spiess.com

| SKS 400 | | Maße und Varianten | | | | |
|-----------------------|-----------------------|--------------------|----------------|----|------|----------------|
| | | D ₀ | D _i | N | A | b _z |
| SB 080.23.X.00 | | 80 +0,074 | 40 +0,06 | 18 | 78,9 | 3,4 |
| 01 | wie Abbildung | | | | | |
| RB 032.14.Y.00 | | | SW | P | M/P | B |
| | d _i | | 32,4 -0,1 | 6 | 3 | 4,7 |
| 01 | 18 +0,027 M 2xK4x19,5 | | | | | |

These sketch drawings are meant for information only. Detailed product drawings are available on request
 Dies ist eine unverbindliche Schnittzeichnung. Detaillierte Produktzeichnungen erhalten Sie auf Anfrage