Escola Universitària d'Enginyeria
Tècnica Industrial de Barcelona
Consorci Escola Industrial de Barcelona
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

**Volum I**
Memòria

# "ELABORACIÓ D'UN PROGRAMARI D'ANÀLISI TÈRMIC PER A MÀQUINES ELÈCTRIQUES"

Projecte presentat per a optar al títol d'enginyeria tècnica industrial especialitat ELÈCTRICA
per **Rahuet Jané, Jaume**

Barcelona, 15 de Juny de 2011

Tutor projecte: Ramon Bargalló Perpiñà
Departament d'Enginyeria Eléctrica (DEE)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

# SUMARI GENERAL

VOLUM I: MEMÒRIA
VOLUM II: ANNEXES
VOLUM III: PRESSUPOST

# VOLUM I: MEMÒRIA

Resum ..... 1
Resumen ..... 1
Abstract ..... 2
Agraïments ..... 3
**Capítol 1: Objecte del projecte** ..... 4
1.1. Objecte del projecte ..... 4
1.2. Abast del projecte ..... 4
1.3. Justificació ..... 5
1.3.1. Justificació del projecte ..... 5
1.3.2. Justificació de l'ús de l'esquema equivalent ..... 5
1.3.3. Justificació del llenguatge de programació utilitzat ..... 6
**Capítol 2: Model Tèrmic** ..... 7
2.1. Esquema tèrmic equivalent ..... 7
2.2. Principis de transferència de calor ..... 8
2.2.1. Conducció ..... 9
2.2.2. Convecció ..... 12
2.2.3. Radiació ..... 16
2.2.4. Contacte ..... 17
2.3. Resolució de l'esquema tèrmic equivalent ..... 18
2.4. Esquema tèrmic equivalent per al motor d'inducció ..... 20
2.4.1. Carcassa ..... 23
2.4.2. Ferro de l'estator ..... 23
2.4.3. Dents de l'estator ..... 24
2.4.4. Bobines de l'estator ..... 25
2.4.5. Entreferro ..... 25
2.4.6. Caps de bobina ..... 26
2.4.7. Aire en els caps ..... 27
2.4.8. Bobines del rotor ..... 27
2.4.9. Ferro del rotor ..... 28
2.4.10. Eix ..... 29
2.4.11. Pèrdues ..... 29
2.5. Esquema tèrmic equivalent per al motor d'imants permanents exteriors ..... 30
2.5.1. Camisa d'aigua – Carcassa ..... 33
2.5.2. Carcassa ferro de l'estator ..... 33
2.5.3. Ferro de l'estator – Dents de l'estator ..... 34
2.5.4. Dents de l'estator – Bobines de l'estator ..... 36

2.5.5. Bobines – Caps de bobina ..... 37
2.5.6. Carcassa – Aire en els caps ..... 38
2.5.7. Rotor – Aire en els caps ..... 38
2.5.8. Caps de bobina – Aire en els caps ..... 39
2.5.9. Dents de l'estator – Imants del rotor ..... 39
2.5.10. Imants permanents – Coixinets ..... 41
2.5.11. Coixinets – Carcassa ..... 43
2.5.12. Pèrdues ..... 43
2.6. Esquema tèrmic equivalent per al motor de reluctància .... 44
2.6.1. Carcassa ..... 47
2.6.2. Ferro de l'estator ..... 47
2.6.3. Dents de l'estator ..... 48
2.6.4. Bobines de l'estator ..... 49
2.6.5. Entreferro 1 ..... 50
2.6.6. Entreferro 2 ..... 50
2.6.7. Caps de bobina ..... 51
2.6.8. Aire en els caps ..... 51
2.6.9. Dents del rotor ..... 52
2.6.10. Ferro del rotor ..... 53
2.6.11. Eix ..... 53
2.6.12. Pèrdues ..... 54
2.7. Esquema tèrmic equivalent per al motor d'imants permanents interiors ..... 55
2.7.1. Camisa d'aigua – Carcassa ..... 58
2.7.2. Carcassa – Ferro de l'estator ..... 58
2.7.3. Ferro de l'estator – Dents de l'estator ..... 59
2.7.4. Dents de l'estator – Bobines de l'estator ..... 61
2.7.5. Bobines de l'estator – Caps de bobina ..... 62
2.7.6. Carcassa – Aire en els caps ..... 63
2.7.7. Rotor – Aire en els caps ..... 63
2.7.8. Caps de bobina – Aire en els caps ..... 64
2.7.9. Dents de l'estator – Superfície del rotor ..... 64
2.7.10. Rotor – Coixinets ..... 65
2.7.11. Coixinets – Carcassa ..... 66
2.7.12. Rotor ..... 67
**Capítol 3: Programari d'anàlisi tèrmic** ..... 73
3.1. Elecció del motor ..... 73
3.2. Entrada de dades ..... 74
3.3. Sortida de dades ..... 76
**Capítol 4: Comparativa amb altres productes del mercat** ..... 79
4.1. Comparativa per al motor d'inducció ..... 80
4.1.1. Dades per al motor d'inducció ..... 80
4.1.2. Resultats ..... 81
4.2. Comparativa per al motor d'imants permanents exteriors . 82
4.2.1. Dades per al motor d'imants permanents exteriors ... 82
4.2.2. Resultats ..... 84
4.3. Comparativa per al motor d'imants permanents interiors .. 85
4.3.1. Dades per al motor d'imants permanents interiors .... 85
4.3.2. Resultats ..... 87
4.4. Comparativa per al motor de reluctància ..... 88
4.4.1. Dades per al motor de reluctància ..... 88

4.4.2. Resultats ..... 90
**Capítol 5: Conclusions** ..... 91
5.1. Conclusions ..... 91
5.2. Treball futur ..... 91
**Capítol 6: Biografia i webs** ..... 93
6.1. Llibres ..... 93
6.2. Documents que contenen els esquemes tèrmics equivalents escollits ..... 93
6.3. Documents diversos ..... 94
6.4. Webs ..... 94

# VOLUM II: ANNEXES

**Annex 1: Instal·lació del programa** ..... 1
**Annex 2: Exemple de simulació amb el programa del PFC** ..... 3

## RESUM

En el present projecte es presenta un programari que a partir de les dimensions, materials, pèrdues i altres condicions, determini la distribució de temperatures en una màquina elèctrica en règim permanent. El mètode implementat en el programa és l'esquema tèrmic equivalent.

Els models tèrmics emprats són formats per resistències i fonts d'alimentació independents.

A demés es validen els models comparant els resultats obtinguts amb altres programes del mercat.

Les màquines incloses en el programari són:

- Màquina d'inducció, totalment tancada.
- Màquina d'imants permanents, en forma de V.
- Màquina d'imants permanents, exteriors.
- Motor de reluctància commutada.

## RESUMEN

En el presente proyecto se presenta un programa que a partir de las dimensiones, materiales, pérdidas i otras condiciones, determine la distribución de temperatura en una máquina eléctrica en régimen permanente. El método implementado en el programa es el esquema térmico equivalente.

Los modelos térmicos usados son formados por resistencias i fuentes de alimentación independientes.

A demás se validan los modelos comparando el resultado obtenido con otros programas del mercado.

Las máquinas incluidas en el programa son:

- Máquina de inducción, totalmente cerrada.

- Máquina de imanes permanentes, en forma de V.
- Máquina de imanes permanentes, exteriores.
- Motor de reluctancia conmutada.

## ABSTRACT

In this project we present a software from the dimensions, materials, losses and other conditions, found the thermal distribution in steady state electric machine. The method implemented in the program is the lumped parameter thermal model.

The models used are formed by thermal resistances and independent power sources

Models are validated by comparing the results with other programs on the market.

The machines included in the software are:

- Totally enclosed induction machine.
- Permanent magnet machine, in V form.
- Permanent magnet machine, outside magnets.
- Switched reluctance motor.

**AGRAÏMENTS**

Al pare i la mare...
Agraeixo que m'hagueu donat l'oportunitat d'estudiar la carrera que volia. Fins aquí he arribat gràcies a l'esforç de les vostres espatlles. Sempre m'heu recordat que m'esforcés.

Als companys de carrera...
A tots els companys en general, tots m'heu ajudat en algun moment, no seria just mencionar algú per sobre dels altres.
Recordo els treballs en grup, els dies que hem quedat per estudiar a la biblioteca, els apunts que passaven per diverses mans, aquelles classes que no podia assistir i em veu explicar tot el que havíeu fet.

Als amics...
Sempre ús heu interessat per com m'anava la carrera. En sou testimonis del que m'ha costat, els dies sense sortir per poder estudiar o acabar algun treball.

Als professors i l'escola...
Als professors i l'escola per haver insistit tant en els punts importants. Per haver dedicat tant de temps en que aprenguem alguna cosa.

Al Ramón Bargalló...
En iniciar el projecte recordo que tant sols tenia clar que volia realitzar un projecte sobre màquines elèctriques. Tu em vas donar el tema concret i els primers documents. Sempre has tingut temps per mi.

# CAPÍTOL 1:OBJECTE DEL PROJECTE

## 1.1. OBJECTE DEL PROJECTE

El projecte té com a objectiu l'elaboració d'un programari que a partir de les dimensions, materials i altres condicions determini la distribució de la temperatura en una màquina elèctrica.

Les màquines incloses en el programari són les següents:

- Màquina d'inducció, totalment tancada.
- Màquina d'imants permanents, en forma de V.
- Màquina d'imants permanents, exteriors.
- Motor de reluctància commutada.

## 1.2. ABAST DEL PROJECTE

El projecte te com a objectiu la elaboració d'un programari d'anàlisi tèrmic de les màquines elèctriques esmentades en l'apartat 2. També la elaboració d'un exemple per al correcte ús del programa.

El programari realitzat és validat comparant-lo amb altres programes existents en el mercat.

Els esquemes equivalents utilitzats venen donats per treballs anteriors d'altres autors i són corregits, si fos necessari, en la implementació del programa.

# 1.3. JUSTIFICACIÓ

## 1.3.1. Justificació del projecte.

Les màquines estudiades, durant el seu funcionament, tenen pèrdues en forma de calor. Aquestes pèrdues originen un escalfament en els diversos components de la màquina.

Els components d'una màquina tenen diverses limitacions, entre elles, tenim les limitacions per temperatura. Superar aquestes limitacions pot provocar diversos fenòmens indesitjats: acceleració de l'oxidació, pèrdua de les propietats dielèctriques, pèrdua de les propietats lubricants, deformacions i variacions en les propietats elèctriques del materials.

Per aquests motius en el disseny d'una màquina elèctrica ens serà necessari analitzar el seu comportament: electromagnètic i tèrmic. En aquest projecte es pretén construir una eina d'anàlisi tèrmic per a una sèrie de màquines.

Les màquines detallades en l'apartat 1 s'han escollit, per ser de les més utilitzades.

## 1.3.2. Justificació de l'ús de l'esquema equivalent.

En l'actualitat disposem de diverses eines d'anàlisi tèrmic fent ús de mètodes numèrics. Aquests mètodes són: el mètode d'elements finits (FEM) i la computació de dinàmica de fluids (CFD).

També és possible analitzar tèrmicament una màquina sense utilitzar mètodes numèrics. Per a analitzar tèrmicament una màquina sense utilitzar mètodes numèrics podem recórrer al esquema tèrmic equivalent de la màquina. Aquest serà el nostre cas, analitzarem les diverses màquines fent ús dels seus respectius esquemes equivalents.

Els mètodes numèrics tenen dos avantatges molt clars davant la utilització del esquema equivalent: són més precisos i no requereixen un esquema per a cada geometria. Per contra, els mètodes numèrics requereixen més temps de computació i de desenvolupament.

Utilitzarem l'esquema equivalent en règim permanent, ja que, en règim transitori els components de la màquina s'escalfen poc uniformement i l'error és major.

### 1.3.3. Justificació del llenguatge de programació utilitzat.

Els programes d'edició valorats per a la edició del programa han sigut els següents:

- Matlab R2007b.
- Scilab 5.2.2
- Delphi 6
- Lazarus 0.9.28.2 beta

El programa Matlab R2007b té avantatges en el moment de fer els càlculs matricials, però té l'inconvenient que no disposa de suficients eines per a la elaboració de la part visual del programa. Matlab és un programa de pagament i disposa d'unes llibreries pròpies que són necessàries per a la execució de programes fets amb Matlab.

El programa Scilab 5.2.2 té avantatges en el moment de fer els càlculs matricials, però té l'inconvenient que no disposa de suficients eines per a la elaboració de la part visual del programa. Scilab és un programa de lliure distribució.

El programa Delphi 6 és laboriós en el moment de fer els càlculs, però té l'avantatge que disposa d'eines suficients per a la elaboració de la part visual del programa i és el que s'utilitza en alguna assignatura de la carrera d'enginyeria tècnica elèctrica. Delphi és un programa de pagament.

El programa Lazarus 0.9.28.2 beta és laboriós en el moment de fer els càlculs, però té l'avantatge que disposa d'eines suficients per a la elaboració de la part visual del programa. Lazarus és un programa de lliure distribució.

Per a la elaboració del programa hem fet ús del llenguatge "Object Pascal" del programa Delphi 6.

# CAPÍTOL 2: MODEL TÈRMIC

## 2.1. ESQUEMA TÈRMIC EQUIVALENT

L'esquema tèrmic equivalent és un mètode simple, però suficient per a identificar la temperatura en la majoria de regions de la màquina. Les pèrdues en forma de calor es situen en els nodes en forma concentrada i els diversos components de la màquina es redueixen a components simples utilitzant les simplificacions pertinents.

Aquest mètode soluciona les xarxes tèrmiques utilitzant la analogia amb els circuits elèctrics. Donat que es compleix la llei d'ohm, es poden aplicar els mètodes matemàtics destinats a solucionar circuits elèctrics, que són molt més senzills que solucionar les equacions de Maxwell.

La taula 2.1 representa la analogia entre les magnituds tèrmiques i elèctriques (Pyrhönen [1]).

| Magnitud tèrmica | Símbol | Unitat | Magnitud elèctrica | Símbol | Unitat |
|---|---|---|---|---|---|
| Quantitat de calor | $Q_{th}$ | J | Càrrega elèctrica | Q | C |
| Flux de calor | $\Phi_{th}$ | W | Corrent elèctric | I | A |
| Densitat de flux de calor | $q_{th}$ | $W/m^2$ | Densitat de corrent | J | $A/m^2$ |
| Temperatura | T | K | Potencial elèctric | V | V |
| Increment de temperatura | $\theta$ | K | Voltatge | U | V |
| Conductivitat tèrmica | $\lambda$ | W/(m·K) | Conductivitat elèctrica | $\sigma$ | S/m |
| Resistivitat tèrmica | $R_{th}$ | K/W | Resistivitat elèctrica | R | $\Omega$ |
| Conductivitat tèrmica | $G_{th}$ | W/K | Conductivitat elèctrica | G | S |
| Capacitat calorífica | $C_{th}$ | J/K | Capacitat | C | F |

*Taula 2.1: Analogia entre magnituds tèrmiques i elèctriques.*

La màquina elèctrica és dividida en diversos components tèrmics equivalents. Cada component tèrmic equivalent pot ser representat per una o varies resistències tèrmiques equivalents i una capacitat, el node de les quals representa la temperatura mitja del component. Les pèrdues produïdes en el component es concentren en el node representatiu de la temperatura mitja del component, representades per fonts d'energia.

Assumint simetria en el pla radial a través del centre de la màquina es pot dividir la màquina en diversos components, els quals es detallen en els apartats 2.4 a 2.7.

## 2.2. PRINCIPIS DE TRANSFERÈNCIA DE CALOR

La transferència de calor és un procés de propagació. Per a que existeixi transferència de calor ha d'existir una diferència de temperatura entre dos punts. El calor es transfereix del punt calent al punt fred. Els processos per els quals es transfereix calor són: Conducció, convecció i radiació.

En general el calor es transfereix d'un cos a un altre mitjançant una combinació de conducció, convecció i radiació. Però en molts casos un d'aquest processos és molt més significatiu que els altres i per tant es poden descartar el processos restants.

### 2.2.1. Conducció

Quan en un cos existeix un gradient de temperatura, la energia és transmesa del punt més calent al punt més fred. Aquesta transferència de calor es pot definir mitjançant la llei de Fourier de transferència de calor (2.1).

$$\Phi_{\text{th}} = -\lambda \cdot S \cdot \nabla T \tag{2.1}$$

On:
$\Phi_{th}$: Flux de calor [W]
λ: Conductivitat tèrmica del material [W/(m·K)]
S: Secció del material entre el punt calent i el punt fred [$m^2$]
∇T: Gradient de temperatura [K/m]

En l'esquema equivalent farem ús de resistències tèrmiques. Aquestes resistències tèrmiques, en el cas de conducció es defineixen com:

$$R_{\text{th}} = \frac{\theta}{\Phi_{\text{th}}} \tag{2.2}$$

$$R_{\text{th}} = \frac{l}{\lambda \cdot S} \tag{2.3}$$

On:
ϴ: Increment de temperatura [K]
$\Phi_{th}$: Flux de calor [W]
l: Longitud entre el punt calent i el punt fred [m]
λ: Conductivitat tèrmica del material [W/(m·K)]
S: Secció del material entre el punt calent i el punt fred [$m^2$]

A partir de l'equació 2.3 podrem obtenir les equacions pertinents per a un cilindre (Mellor [8]). Suposant les següents condicions:

- El flux de calor en direcció radia i axial són independents.
- Solsament tenim una temperatura mitja per ambdues direccions.
- No existeix flux de calor en direcció tangencial.
- La generació de calor és uniforme.

L'esquema tèrmic equivalent d'un cilindre queda de la següent forma:

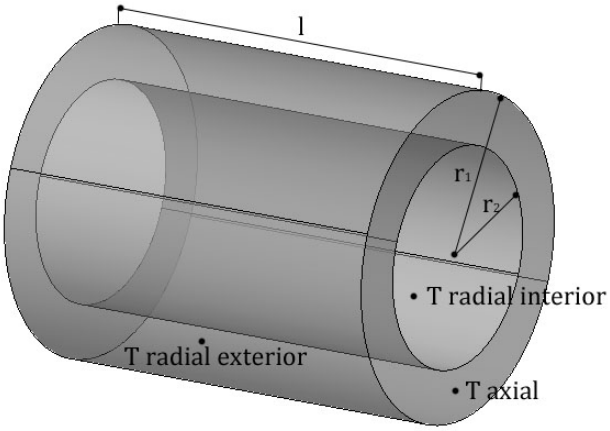


*Figura 2.1: Forma bàsica cilíndrica.*

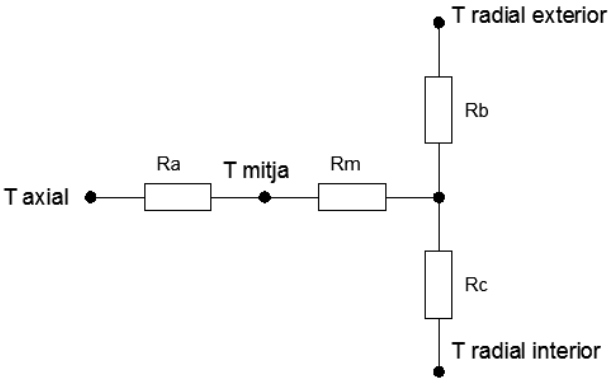


*Figura 2.2: Esquema tèrmic per a un cilindre.*

$$Ra = \frac{l}{6 \cdot \pi \cdot \lambda a \cdot ({r_1}^2 - {r_2}^2)} \tag{2.4}$$

$$Rb = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda r \cdot l \cdot S} \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot {r_2}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{({r_1}^2 - {r_2}^2)}\right] \tag{2.5}$$

$$Rc = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda r \cdot l \cdot S} \cdot \left[\frac{2 \cdot {r_1}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{{r_1}^2 - {r_2}^2} - 1\right] \tag{2.6}$$

$$Rm = -\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot ({r_1}^2 - {r_2}^2) \cdot \lambda r \cdot l \cdot S} \cdot \left[{r_1}^2 + {r_2}^2 - \frac{4 \cdot {r_1}^2 \cdot {r_2}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{{r_1}^2 - {r_2}^2}\right] \tag{2.7}$$

On:
T radial exterior: Temperatura en la superfície exterior del cilindre [T]
T radial interior: Temperatura en la superfície interior del cilindre [T]
T axial: Temperatura en les superfícies laterals del cilindre [T]
T mitja: Temperatura mitja del cilindre [T]

Ra,Rb,Rc,Rm: Resistències tèrmiques equivalents d'un cilindre [K/W]
λa: Conductivitat tèrmica del material en direcció axial [W/(m·K)]
λr: Conductivitat tèrmica del material en direcció radial [W/(m·K)]
l: Longitud del cilindre [m]
$r_1$: Radi exterior del cilindre [m]
$r_2$: Radi interior del cilindre [m]
S: Superfície a creuar per el flux de calor [$m^2$]

A partir de l'equació 2.3 podrem obtenir les equacions pertinents per a una forma rectangular (Yang [6]). Suposant les següents condicions:

- El flux de calor en direcció radia i axial són independents.
- Solsament tenim una temperatura mitja per ambdues direccions.
- La generació de calor és uniforme.

L'esquema tèrmic equivalent d'una forma rectangular queda de la següent forma:

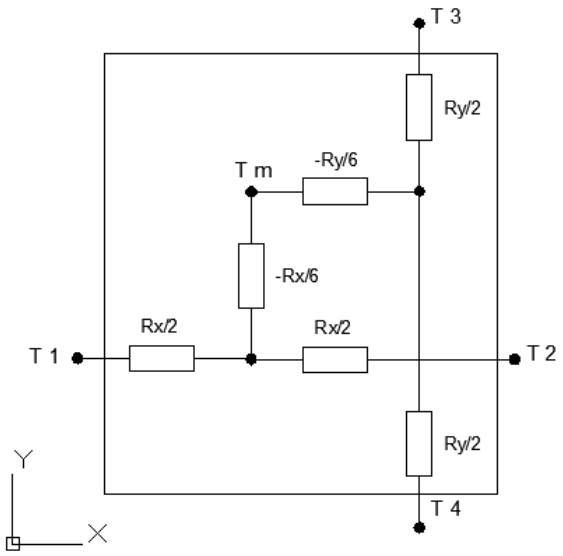


*Figura 2.3: Esquema tèrmic per a una forma rectangular*

On:
T1,T2,T3,T4: Temperatura en les diverses cares del rectangle [T]
Tm: Temperatura mitja del rectangle [T]
Rx: Resistència tèrmica equivalent en direcció x [K/W]
Ry: Resistència tèrmica equivalent en direcció y [K/W]

### 2.2.2. Convecció

El procés de convecció es defineix com la transferència de calor entre una superfície sòlida i un fluid en moviment. El procés de convecció es modela com una resistència tèrmica amb la següent funció:

$$R_{\text{th}} = \frac{1}{\lambda c \cdot S} \tag{2.8}$$

On:
$R_{th}$: Resistència tèrmica equivalent [K/W]
λc: Coeficient de convecció [W/(m$^2$·K)]
S: Superfície de contacte [m$^2$]

El coeficient λc pren diferents valors depenent de la geometria de la superfície, de les característiques del fluid, velocitat del fluid, temperatura. Per aquest motiu és difícil obtenir el valor d'aquest coeficient de forma analítica. El coeficient λc vindrà donat per funcions semi empíriques en les quals utilitzarem nombres adimensionals per descriure el comportament del fluid.

En una màquina elèctrica podem definir tres zones on es produeix el procés de convecció:

- $\lambda_{c1}$: Coeficient de convecció entre la carcassa i l'exterior.
- $\lambda_{c2}$: Coeficient de convecció entre rotor i estator a través de l'entreferro.
- $\lambda_{c3}$: Coeficient de convecció entre l'aire dels caps de la màquina, rotor, estator, caps de bobina i eix.

El coeficient $\lambda_{c1}$ es recomana que s'obtingui a partir d'assaig de la màquina. Aquest assaig consisteix en mesurar la diferència de temperatura entre carcassa i ambient, funcionant amb càrrega constant. El calor dissipat per la carcassa serà igual a la potència elèctrica consumida. A partir de l'equació 2.2 es pot trobar el valor de la resistència tèrmica equivalent entre carcassa i ambient.

Normalment no podrem realitzar l'assaig de la màquina, per aquest motiu utilitzarem equacions empíriques. Es proposen dues equacions per a trobar el coeficient $\lambda_{c1}$ (Churchill-Chu). Aquestes equacions són vàlides per $10^4 \leq Ra \geq 10^9$ en qualsevol fluid.

$$\lambda_{c1} = \frac{\lambda_{\text{air}}}{D_{\text{frame}}} \cdot \left[ 1{,}36 \cdot \frac{0{,}518 \cdot Ra^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0{,}559}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}} \right]^2 \tag{2.9}$$

$$\lambda_{c1} = \frac{\lambda_{\text{air}}}{D_{\text{frame}}} \cdot \left[ 0{,}6 + 0{,}387 \cdot \frac{Ra^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0{,}559}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}} \right]^2 \tag{2.10}$$

On:
$\lambda_{air}$: Conductivitat tèrmica del fluid [W/(m·K)]
$D_{frame}$: Diàmetre exterior de la carcassa [m]
Ra: Nombre de Rayleigh
Pr: Nombre de Prandtl

El nombre de Rayleigh considerant una convecció natural és:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \nabla T \cdot {D_{\text{frame}}}^3}{v^2} \tag{2.11}$$

On:
g: Constant gravitacional 9,81 m/s$^2$
β: Coeficient d'expansió termal [1/K]
T: Diferència de temperatura entre la superfície i el fluid [K]
$D_{frame}$: Diàmetre exterior de la carcassa [m]
v: Viscositat cinemàtica del fluid [m$^2$/s]

El nombre de Prandtl defineix la relació entre la difusió tèrmica i viscosa.

$$Pr = \frac{c_{\text{p}} \cdot \mu}{\lambda} \tag{2.12}$$

On:
$c_p$: Calor específic del fluid [J/(kg·K)]
μ: Viscositat dinàmica del fluid [kg/(m·s)]
λ: Conductivitat tèrmica del fluid [W/(m·K)]

El coeficient $\lambda_{c2}$ es considera el coeficient de transferència tèrmica entre dos cilindres concèntrics, rotatius entre si. S'assumeix que tot el calor provinent del rotor és transmès a l'estator directament a través del entreferro. Es suposa que l'aire del entreferro i dels caps és independent. És vàlid per a la majoria de fluids.

$$\lambda_{c2} = \frac{Nu \cdot \lambda_{air}}{\delta} \tag{2.13}$$

On:
$\lambda_{air}$: Conductivitat tèrmica del fluid [W/(m·K)]
δ: Gruix de l'entreferro entre rotor i estator [m]
Nu: Nombre de Nusselt

Segons Becker and Kaye el nombre de Nusselt es pot aproximar com:

$$\begin{aligned} Nu &= 2 && per\ a\ Ta_m < 1700 \\ Nu &= 0{,}128 Ta_m^{0{,}367} && per\ a\ 1700 < Ta_m < 10^4 \\ Nu &= 0{,}409 Ta_m^{0{,}241} && per\ a\ 10^4 < Ta_m < 10^7 \end{aligned} \tag{2.14}$$

Els mateixos autors proposen una segona aproximació per a trobar el nombre de Nusselt.

$$\begin{aligned} Nu &= 2 && per\ a\ Ta_m < 1740 \\ Nu &= 0{,}409 Ta_m^{0{,}241} - 137 Ta_m^{-0{,}75} && per\ a\ Ta_m > 1740 \end{aligned} \tag{2.15}$$

On:
$Ta_m$: Nombre de Taylor modificat

Per a conèixer l'estat del fluid utilitzem el nombre de Taylor i el nombre de Reynolds. Aquests nombres descriuen la relació entre la força centrifuga i la força lliscant en un fluid.

$$Ta = \frac{Re^2 \cdot 2 \cdot \delta}{Dr} \tag{2.16}$$

On:
Re: Nombre de Reynolds
δ: Gruix de l'entreferro entre rotor i estator [m]
Dr: Diàmetre del rotor [m]

$$Re = \frac{\rho_{\text{air}} \cdot v \cdot \delta}{\mu} \tag{2.17}$$

On:
$\rho_{air}$: Densitat del fluid [kg/m$^3$]
v: Velocitat del fluid [m/s]
δ: Gruix de l'entreferro entre rotor i estator [m]
μ: Viscositat dinàmica del fluid [kg/(m·s)]

El nombre de Taylor és modificat per un factor geomètric Fg.

$$Ta_{\text{m}} = \frac{Ta}{F_{\text{g}}} \tag{2.18}$$

$$F_{\text{g}} = \frac{\pi^4 \cdot \left[\frac{2 \cdot r - 2{,}304 \cdot \delta}{2 \cdot r - \delta}\right]}{1697 \cdot \left[0{,}0056 + 0{,}0571 \cdot \left(\frac{2 \cdot r - 2{,}304 \cdot \delta}{2 \cdot r - \delta}\right)^2\right] \cdot [1 - 2 \cdot r]^2} \tag{2.19}$$

On:
r: Radi del rotor [m]
δ: Gruix de l'entreferro entre rotor i estator [m]

Una altre forma de trobar el nombre de Taylor segons Kylander[10] és:

$$Ta = \frac{{\omega_{\text{r}}}^2 \cdot \frac{D_\delta}{2} \cdot \delta^3}{\nu^2} \tag{2.20}$$

On:
$\omega_r$: Velocitat de rotació del rotor [rad/s]
$D_\delta$: Diàmetre del entreferro entre rotor i estator [m]
δ: Gruix de l'entreferro [m]
v: Viscositat cinemàtica del fluid [m$^2$/s]

El coeficient $\lambda_{c3}$ es pot trobar utilitzant una o diverses equacions experimentals. Luke considera que una sola equació és suficient per a totes les regions en contacte amb l'aire dels caps, mentre que Kylander utilitza tres equacions, una per a l'aire en contacte amb el rotor, una per a l'aire en contacte amb la carcassa i una per l'aire en contacte amb els caps de bobina. Ambdós autors consideren que la circulació de l'aire és forçat per mitjà dels àleps del rotor. Les equacions 2.21,2.23,2.24,2.25 sols són vàlides en cas que el fluid sigui aire.

Segons Luke el coeficient $\lambda_{c3}$ queda de la següent forma:

$$\lambda_{c3} = 15{,}5 \cdot (0{,}29 \cdot v_f + 1) \tag{2.21}$$

On:
vf: Velocitat del fluid en els caps [m/s]

$$v_f = r_8 \cdot \omega_r \cdot n_f \tag{2.22}$$

On:
r8: Radi del rotor [m]
$\omega_r$: Velocitat de rotació del rotor [rad/s]
nf: Eficiència dels àleps del rotor. És la velocitat de l'aire en els caps respecte la velocitat dels àleps.

Segons Kylander el coeficient $\lambda_{c3}$ per a la resistència tèrmica entre l'aire dels caps i la carcassa:

$$\alpha_1 = 15 + 6{,}75^{0{,}65} \cdot {v_r}^{0{,}65} \tag{2.23}$$

Segons Kylander el coeficient $\lambda_{c3}$ per a la resistència tèrmica entre l'aire dels caps i el rotor:

$$\alpha_2 = 16{,}5^{0{,}65} \cdot {v_r}^{0{,}65} \tag{2.24}$$

Segons Kylander el coeficient $\lambda_{c3}$ per a la resistència tèrmica entre l'aire dels caps i els caps de bobina:

$$\alpha_3 = 6{,}5 + 5{,}25^{0{,}6} \cdot {v_r}^{0{,}6} \tag{2.25}$$

On:
vr: Velocitat del fluid en els caps [m/s], equació (2.22)

### 2.2.3. Radiació

La transferència de calor es pot dur a terme en el buit. Aquesta transferència de calor es realitza mitjançant radiació electromagnètica. La

radiació electromagnètica es propaga com a resultat de la diferència de temperatura.

En màquines elèctriques tot i que existeix l'efecte de la radiació es pot negligir en comparar-lo amb la transferència de calor per conducció i convecció.

La resistència tèrmica equivalent en cas de radiació queda de la següent forma:

$$R_{\text{th}} = \frac{1}{\lambda \text{r} \cdot S} \tag{2.26}$$

On:
λr: Coeficient de transferència de calor per radiació [W/(m$^2$·K)]
S: Superfície del cos fred exposada al cos calent [m$^2$]

El coeficient λr es pot trobar amb la següent equació:

$$\lambda r = \sigma \cdot \varepsilon \cdot F \cdot \frac{{T_1}^4 - {T_2}^4}{T_1 - T_2} \tag{2.27}$$

On:
σ: Constant de Stefan-Boltzmann [W/(m$^2$·K$^4$)]
ε: Factor d'emissió de la superfície del cos calent
F: Factor de visió entre superfícies
T1: Temperatura de la superfície 1 [K]
T2: Temperatura de la superfície 2 [K]

### 2.2.4. Contacte

La transferència de calor per contacte no segueix un procés propi, sinó que és una fusió entre conducció, convecció i radiació. La transferència de calor per contacte es produeix en aquells cossos que són units mitjançant pressió i que a nivell microscòpic queden bosses d'aire entre ambdós cossos.

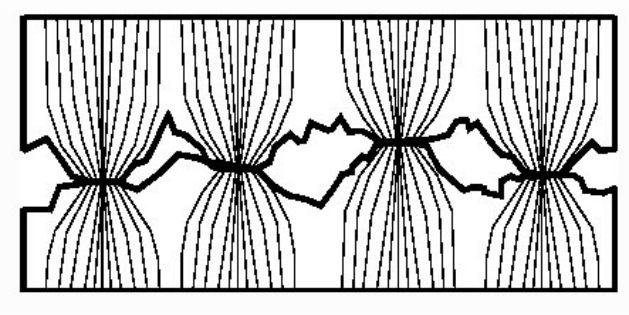

*Figura 2.4: Representació de la transferència de calor entre dues superfícies en contacte a nivell microscòpic.*

La resistència tèrmica equivalent en cas de contacte queda de la següent forma:

$$R_{\text{th}} = \frac{1}{\lambda_{\text{cont}} \cdot S} \tag{2.28}$$

On:
$\lambda_{cont}$: Coeficient de contacte [W/(m$^2$·K)]
S: Superfície de contacte [m$^2$]

Segons Pyrhönen el coeficient de contacte és:

| Tipus d'unió | Coeficient de contacte [W/(m$^2$·K)] |
|---|---|
| Carcassa d'alumini i cos de l'estator | 650-870 |
| Carcassa d'acer i cos de l'estator | 350-550 |
| Eix i rotor | 430-2600 |

*Taula 2.2: Coeficient de contacte.*

# 2.3. RESOLUCIÓ DE L'ESQUEMA TÈRMIC EQUIVALENT

L'esquema tèrmic equivalent és format per resistències i fonts de corrent. La temperatura és representada per la tensió. Es pren com a tensió de referència la temperatura ambient.

En règim permanent l'increment de temperatura per a cada node es calcula de forma matricial.

$$\Delta T = G^{-1} \cdot P \tag{2.29}$$

On:
G: Matriu de conductivitats [W/K]
P: Matriu de pèrdues [W]

La matriu de conductivitats es composa de la forma següent:

$$G = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_{1,\mathrm{i}}} & -\frac{1}{R_{1,2}} & \dots & -\frac{1}{R_{1,\mathrm{n}}} \\ -\frac{1}{R_{2,1}} & \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_{2,\mathrm{i}}} & \dots & -\frac{1}{R_{2,\mathrm{n}}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{1}{R_{\mathrm{n},1}} & -\frac{1}{R_{\mathrm{n},2}} & \dots & \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_{\mathrm{n},\mathrm{i}}} \end{bmatrix} \tag{2.30}$$

On:
n: Quantitat de nodes
R: Resistència tèrmica [W/K]

La diagonal de la matriu és formada per la suma de conductivitats que van cap al node x,y on x=y. Les conductivitats R x,y es situen en signe negatiu. On x,y són la fila i columna respectivament i el nombre de la columna i fila representa el nombre dels nodes entre els que està la resistència.

Donat que tindrem sols fonts de corrent independents i resistències la matriu serà simètrica. Algunes conductivitats són dependents de la temperatura i es solucionarà de forma iterativa.

# 2.4. ESQUEMA TÈRMIC EQUIVALENT PER AL MOTOR D'INDUCCIÓ

El motor d'inducció estudiat tindrà la següent representació constructiva.

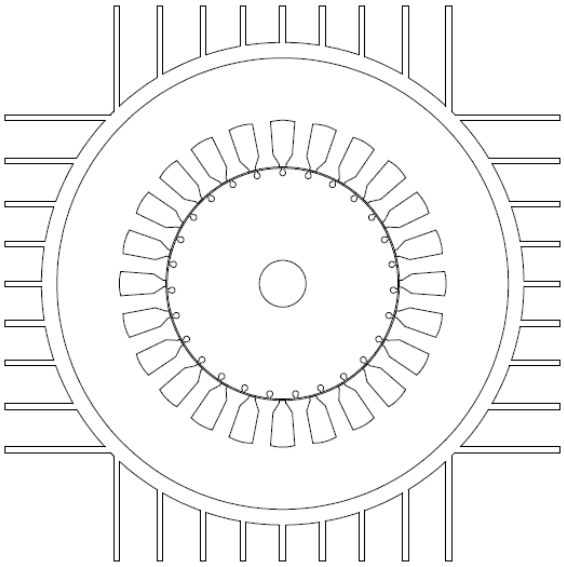

*Figura 2.5: Representació de la secció radial del motor d'inducció*

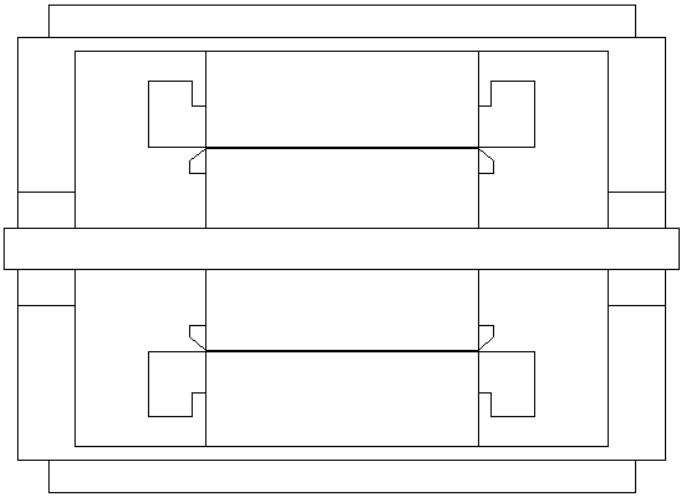

*Figura 2.6: Representació de la secció axial del motor d'inducció*

El motor d'inducció és dividit en 10 components:

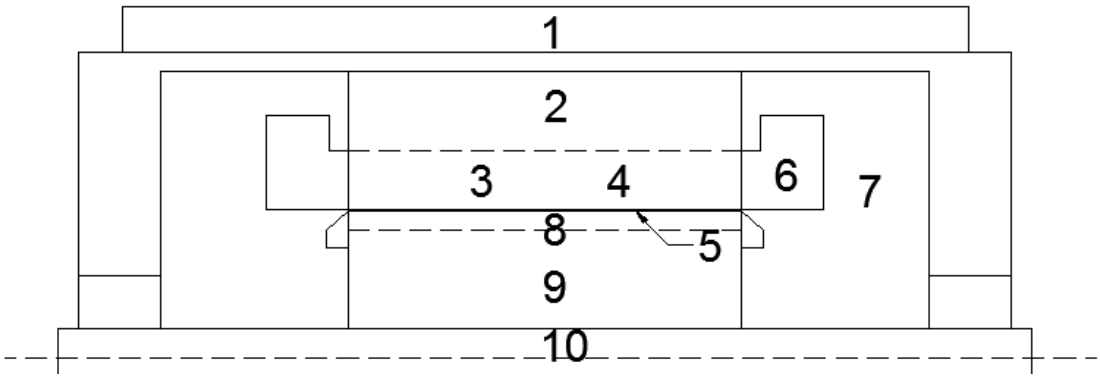


*Figura 2.7: Representació components del motor d'inducció*

1: Carcassa
2: Ferro de l'estator
3: Dents de l'estator
4: Bobines de l'estator
5: Entreferro
6: Caps de bobina
7: Aire en els caps
8: Bobines del rotor
9: Ferro del rotor
10: Eix

Donat la simetria de la màquina en l'eix radial, es pot dividir la màquina en dos. Això serà tingut en compte tant en el moment de trobar les resistències tèrmiques com en el moment d'aplicar les pèrdues com a fonts de corrent.

L'esquema tèrmic equivalent resultant per al motor d'inducció queda de la següent forma:

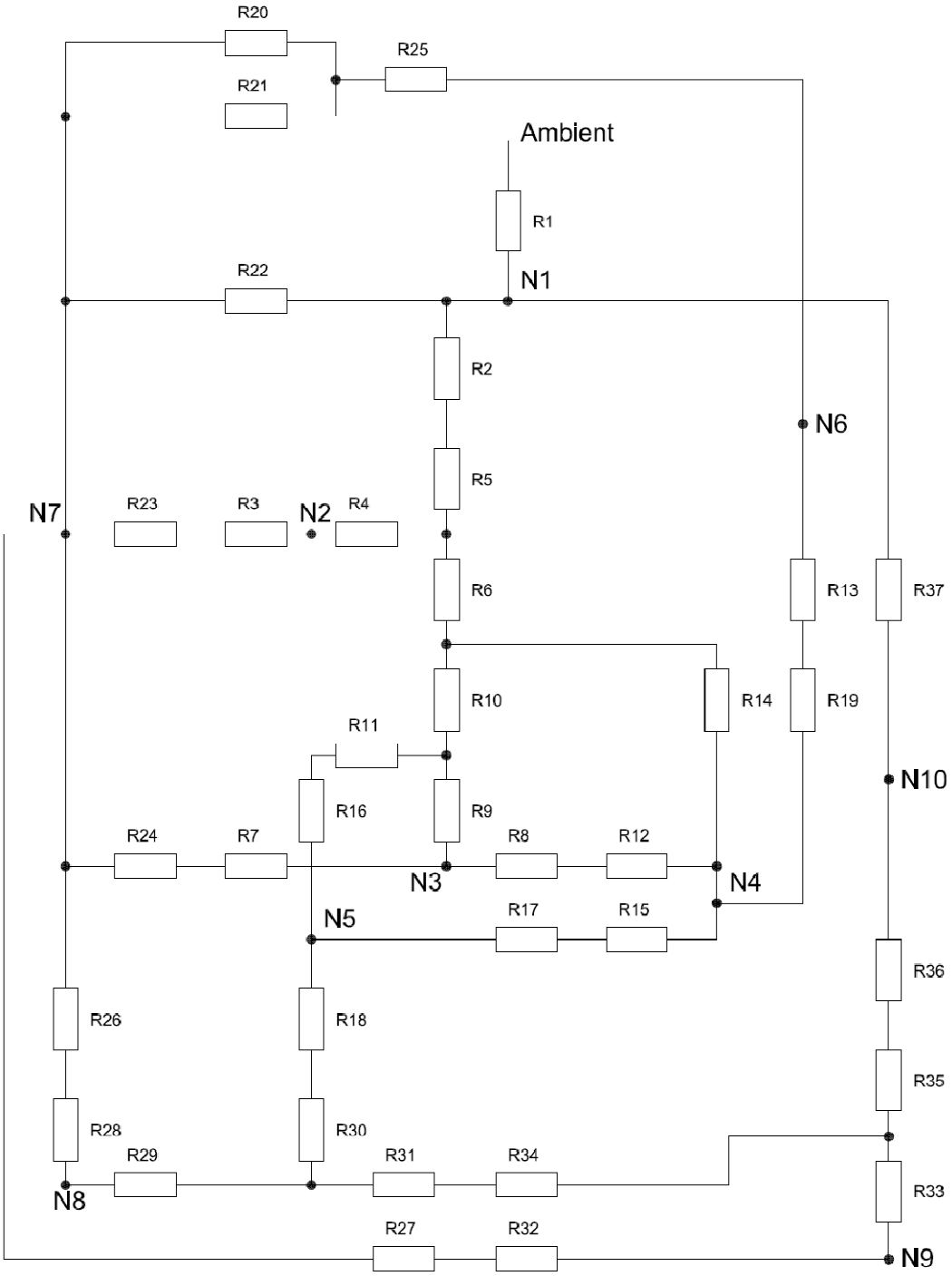


*Figura 2.8: Esquema tèrmic equivalent per al motor d'inducció*

On la numeració dels nodes es correspon amb la numeració dels components que componen un motor d'inducció. Els nodes numerats representen els punts mig de temperatura de cada component.

### 2.4.1. Carcassa

Es considera com a carcassa el cilindre tancat que recobreix el rotor amb els seus pertinents àleps. Per a tindre en compte l'efecte dels àleps es considera que la superfície del cilindre és la meitat més amplia.

A partir de la equació 2.8 obtenim R1, que representa l'oposició a la dissipació de calor de la màquina cap a l'ambient.

$$R1 = \frac{1}{2 \cdot \lambda_{\mathrm{c1}} \cdot 1{,}5 \cdot S_{\mathrm{frame}}} \tag{2.31}$$

On:
$S_{frame}$: Superfície de la carcassa, considerada un cilindre tapat [$m^2$]
$\lambda_{c1}$: Coeficient de convecció a partir de l'equació 2.9 [$W/(m^2 \cdot K)$]

A partir de l'equació 2.28 obtenim R2, que és la resistència tèrmica entre la carcassa i l'estator.

$$R2 = \frac{1}{\pi \cdot \lambda_{\mathrm{cont}} \cdot le \cdot r_1} \tag{2.32}$$

On:
$\lambda_{cont}$: Coeficient de contacte [$W/(m^2 \cdot K)$]
le: Longitud de l'estator [m]
$r_1$: Radi de l'estator [m]

### 2.4.2. Ferro de l'estator

Es considera com a ferro de l'estator, el laminat entre la carcassa i les dents de l'estator. El cilindre tindrà una conductivitat diferent en direcció axial o radial. A partir de les equacions 2.4-2.7, obtindrem les equacions per al ferro de l'estator.

$$R3 = \frac{le}{6 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{la}} \cdot ({r_1}^2 - {r_2}^2)} \tag{2.33}$$

$$R4 = \frac{-1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{lr}} \cdot le \cdot Fa \cdot ({r_1}^2 - {r_2}^2)} \cdot \left[ {r_1}^2 + {r_2}^2 - \frac{4 \cdot {r_1}^2 \cdot {r_2}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{{r_1}^2 - {r_2}^2} \right] \tag{2.34}$$

$$R5 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{lr}} \cdot le \cdot Fa} \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot {r_2}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{{r_1}^2 - {r_2}^2}\right] \tag{2.35}$$

$$R6 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{lr}} \cdot le \cdot Fa} \cdot \left[\frac{2 \cdot {r_1}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{{r_1}^2 - {r_2}^2} - 1\right] \tag{2.36}$$

On:
$\lambda_{lr}$:Conductivitat tèrmica del laminat en direcció radial [W/(m·K)]
$\lambda_{la}$:Conductivitat tèrmica del laminat en direcció axial [W/(m·K)]
le: Longitud de l'estator [m]
Fa: Factor d'apilament
$r_1$: Radi exterior de l'estator [m]
$r_2$: Radi exterior de les dents de l'estator [m]

### 2.4.3. Dents de l'estator

El laminat que forma les dents de l'estator es pot modelar com a segments de cilindre, connectats en paral·lel. En aquest cas, sí que tindrem conducció circular cap a les bobines del estator. Per aquest motiu afegim una resistència entre les cares de les dents i el punt de temperatura mitja.

$$R7 = \frac{le \cdot \tau_{\mathrm{u}}}{6 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{la}} \cdot b_{\mathrm{ds}} \cdot ({r_2}^2 - {r_3}^2)} \tag{2.37}$$

$$R8 = \frac{\pi \cdot b_{\mathrm{ds}} \cdot ({r_2}^2 - {r_3}^2)}{\lambda_{\mathrm{lr}} \cdot le \cdot Fa \cdot \tau_{\mathrm{u}} \cdot ({r_2}^2 - {r_3}^2)^2 \cdot Qs^2} \tag{2.38}$$

$$R9 = \frac{(-\tau_{\mathrm{u}})}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{lr}} \cdot le \cdot Fa \cdot b_{\mathrm{ds}} \cdot ({r_2}^2 - {r_3}^2)} \cdot \left[{r_2}^2 + {r_3}^2 - \frac{4 \cdot {r_2}^2 \cdot {r_3}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_3}\right)}{{r_2}^2 - {r_3}^2}\right] \tag{2.39}$$

$$R10 = \frac{\tau_{\mathrm{u}}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{lr}} \cdot le \cdot Fa \cdot b_{\mathrm{ds}}} \cdot \left[1 - \frac{2 \cdot {r_3}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_3}\right)}{{r_2}^2 - {r_3}^2}\right] \tag{2.40}$$

$$R11 = \frac{\tau_{\mathrm{u}}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{lr}} \cdot le \cdot Fa \cdot b_{\mathrm{ds}}} \cdot \left[\frac{2 \cdot {r_3}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_3}\right)}{{r_2}^2 - {r_3}^2} - 1\right] \tag{2.41}$$

On:
Qs: Nombre de ranures de l'estator
bds: Gruix de les dents de l'estator [m]
$\tau_u$: Distància entre dents [m]
$\lambda_{lr}$: Conductivitat tèrmica del laminat en direcció radial [W/(m·K)]

$\lambda_{la}$: Conductivitat tèrmica del laminat en direcció axial [W/(m·K)]
le: Longitud de l'estator [m]
Fa: Factor d'apilament
$r_2$: Radi exterior de les dents de l'estator [m]
$r_3$: Radi interior de les dents de l'estator [m]

### 2.4.4. Bobines de l'estator

Les bobines de l'estator es modelen com a barres sòlides que consisteixen en un conjunt de fils i aïllaments. Es considera que axialment el coure és el conductor de calor, però radialment la conductivitat és 2,5 vegades la conductivitat del aïllament sol.

$$R12 = \frac{2 \cdot d_{\mathrm{i}}}{\pi \cdot \lambda_{\mathrm{i}} \cdot le \cdot r_4 \cdot Qs} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{v}} \cdot le \cdot Fr \cdot Qs} \tag{2.42}$$

$$R13 = \frac{le}{6 \cdot \lambda_{\mathrm{cu}} \cdot Sc \cdot Qs} \tag{2.43}$$

$$R14 = \frac{4 \cdot d_{\mathrm{i}}}{\pi \cdot \lambda_{\mathrm{i}} \cdot le \cdot r_4 \cdot Qs} + \frac{1}{\pi \cdot \lambda_{\mathrm{v}} \cdot le \cdot Fr \cdot Qs} \tag{2.44}$$

$$R15 = \frac{1}{\pi \cdot \lambda_{\mathrm{v}} \cdot le \cdot Fr \cdot Qs} \tag{2.45}$$

On:
di: Espessor de l'aïllament de la ranura de l'estator [m]
$\lambda_i$: Conductivitat tèrmica de l'aïllament de la ranura de l'estator [W/(m·K)]
$\lambda_v$: Conductivitat tèrmica del vernís que recobreix els filaments de coure [W/(m·K)]
$\lambda_{cu}$: Conductivitat tèrmica del coure [W/(m·K)]
le: Longitud de l'estator [m]
Qs: Nombre de ranures de l'estator
$r_4$: Radi equivalent del bobinat de l'estator [m]
Fr: Factor de conductivitat radial (2,5).
Sc: Secció del coure per a cada ranura de l'estator [$m^2$]

### 2.4.5. Entreferro

L'entreferro és aquell espai d'aire que queda entre les dents del rotor i de l'estator. També ens queda entreferro entre les bobines de l'estator i el rotor. A partir de l'equació 2.8 obtenim les tres equacions necessàries per descriure l'entreferro i a partir de les equacions 2.13 i 2.14 els coeficients de conductivitat.

$$R16 = \frac{\tau_{\mathrm{u}}}{b_{\mathrm{ds}} \cdot \pi \cdot r_3 \cdot le \cdot \lambda_{\mathrm{c2}}} \tag{2.46}$$

$$R17 = \frac{\tau_{\mathrm{u}}}{(\tau_{\mathrm{u}} - b_{\mathrm{ds}}) \cdot \pi \cdot r_3 \cdot le \cdot \lambda_{\mathrm{c2}}} \tag{2.47}$$

$$R18 = \frac{1}{\pi \cdot r_5 \cdot le \cdot \lambda_{\mathrm{c2}}} \tag{2.48}$$

On:
bds: Gruix de les dents de l'estator [m]
$\tau_u$: Distància entre dents [m]
$\lambda_{c2}$: Coeficient de convecció a partir de l'equació 2.13 [W/(m$^2$·K)]
le: Longitud de l'estator [m]
$r_3$: Radi interior de les dents de l'estator [m]
$r_5$: Radi exterior de les dents del rotor [m]

### 2.4.6. Caps de bobina

Els caps de bobina es consideren com una estructura homogènia. Es considera un toroide sostingut per la prolongació dels bobinats.

La temperatura pic és més important que la temperatura mitja, per aquest motiu aplicarem un factor ω per a simular els pics de temperatura. Es considera que axialment el coure és el conductor de calor, però radialment la conductivitat és 2,5 vegades la conductivitat de l'aïllament sol.

$$R19 = \frac{l_0 \cdot \varpi}{Qs \cdot S_{\mathrm{cu}} \cdot \lambda_{\mathrm{cu}}} \tag{2.49}$$

$$R20 = \frac{\varpi}{16 \cdot \pi^2 \cdot r_{\mathrm{t}} \cdot Fr \cdot \lambda_{\mathrm{v}}} \tag{2.50}$$

$$R21 = \frac{\varpi \cdot {r_6}^2}{8 \cdot \pi \cdot {r_4}^2 \cdot l_0 \cdot Fr \cdot \lambda_{\mathrm{v}} \cdot Qs} \tag{2.51}$$

On:
$l_0$: Longitud del bobinat que sobresurt de la ranura de l'estator [m]
ω: Factor corrector per a simular els pics de temperatura (1,5)
Qs: Nombre de ranures de l'estator
$S_{cu}$:Secció del coure per a cada ranura de l'estator [m$^2$]
$\lambda_{cu}$: Conductivitat tèrmica del coure [W/(m·K)]
$r_t$: Radi del toroide [m]
$r_4$: Radi equivalent del bobinat de l'estator [m]
$r_6$: Radi de la secció del coure [m]
Fr: Factor de conductivitat radial (2,5).

$\lambda_v$: Conductivitat tèrmica del vernís que recobreix els filaments de coure [W/(m·K)]

### 2.4.7. Aire en els caps

L'aire en els caps és l'aire que queda al voltant dels caps de bobina. Aquest aire és impulsat per els àleps del rotor.

L'àrea en contacte amb el toroide considerat per als caps de bobina, s'incrementa en un 50% per a tindre en compte les irregularitats de la superfície. A partir de l'equació 2.8 i del coeficient trobat en l'equació 2.21 trobem les següents equacions:

$$R22 = \frac{1}{S_1 \cdot \lambda_{c3}} \tag{2.52}$$

$$R23 = \frac{1}{S_2 \cdot \lambda_{c3}} \tag{2.53}$$

$$R24 = \frac{1}{S_3 \cdot \lambda_{c3}} \tag{2.54}$$

$$R25 = \frac{1}{1{,}5 \cdot S_4 \cdot \lambda_{c3}} \tag{2.55}$$

$$R26 = \frac{1}{S_5 \cdot \lambda_{c3}} \tag{2.56}$$

$$R27 = \frac{1}{S_6 \cdot \lambda_{c3}} \tag{2.57}$$

On:
$S_1$: Àrea de la carcassa en contacte amb l'aire dels caps [$m^2$]
$S_2$: Àrea de l'estator en contacte amb l'aire dels caps [$m^2$]
$S_3$: Àrea dels dents de l'estator en contacte amb l'aire dels caps [$m^2$]
$S_4$: Àrea del toroide en contacte amb l'aire dels caps [$m^2$]
$S_5$: Àrea del bobinat rotòric en contacte amb l'aire dels caps [$m^2$]
$S_6$: Àrea del ferro del rotor en contacte amb l'aire dels caps [$m^2$]
$\lambda_{c3}$: Coeficient de convecció a partir de l'equació 2.21 [W/($m^2$·K)]

### 2.4.8. Bobines del rotor

El bobinat del rotor és de tipus gàbia d'esquirol, construït a partir de barres d'alumini injectades en les ranures del rotor. Donat que el contacte entre

les barres del rotor i el rotor és bo podem suposar que tenim una capa d'alumini uniforme. Es modela dons, com un cilindre d'alumini.

$$R28 = \frac{le}{6 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{al}} \cdot (r_5{}^2 - r_8{}^2)} \tag{2.58}$$

$$R29 = \frac{-1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{al}} \cdot le \cdot (r_5{}^2 - r_8{}^2)} \cdot \left[ r_5{}^2 + r_8{}^2 - \frac{4 \cdot r_5{}^2 \cdot r_8{}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_5}{r_8}\right)}{r_5{}^2 - r_8{}^2} \right] \tag{2.59}$$

$$R30 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{al}} \cdot le} \cdot \left[ 1 - \frac{2 \cdot r_8{}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_5}{r_8}\right)}{r_5{}^2 - r_8{}^2} \right] \tag{2.60}$$

$$R31 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{al}} \cdot le} \cdot \left[ \frac{2 \cdot r_5{}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_5}{r_8}\right)}{r_5{}^2 - r_8{}^2} - 1 \right] \tag{2.61}$$

On:
le: Longitud de l'estator [m]
$\lambda_{al}$: Conductivitat tèrmica de l'alumini [W/(m·K)]
$r_5$: Radi exterior de les dents del rotor [m]
$r_8$: Radi interior de les dents del rotor [m]

### 2.4.9. Ferro del rotor

Es considera com a ferro del rotor el laminat entre l'eix i el bobinat del rotor. El cilindre tindrà una conductivitat diferent en direcció axial o radial. A partir de les equacions 2.4-2.7, obtindrem les equacions per al ferro del rotor.

$$R32 = \frac{le}{6 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{la}} \cdot (r_8{}^2 - r_9{}^2)} \tag{2.62}$$

$$R33 = \frac{-1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{lr}} \cdot le \cdot Fa \cdot (r_8{}^2 - r_9{}^2)} \cdot \left[ r_8{}^2 + r_9{}^2 - \frac{4 \cdot r_8{}^2 \cdot r_9{}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_8}{r_9}\right)}{r_8{}^2 - r_9{}^2} \right] \tag{2.63}$$

$$R34 = \frac{r_8{}^2 - r_9{}^2}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{lr}} \cdot le \cdot Fa \cdot (r_8{}^2 - r_9{}^2)} \cdot \left[ 1 - \frac{2 \cdot r_9{}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_8}{r_9}\right)}{r_8{}^2 - r_9{}^2} \right] \tag{2.64}$$

$$R35 = \frac{r_8{}^2 - r_9{}^2}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{lr}} \cdot le \cdot Fa \cdot (r_8{}^2 - r_9{}^2)} \cdot \left[ \frac{2 \cdot r_9{}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_8}{r_9}\right)}{r_8{}^2 - r_9{}^2} - 1 \right] \tag{2.65}$$

On:
le: Longitud de l'estator [m]
$\lambda_{lr}$: Conductivitat tèrmica del laminat en direcció radial [W/(m·K)]
$\lambda_{la}$: Conductivitat tèrmica del laminat en direcció axial [W/(m·K)]
Fa: Factor d'apilament
$r_8$: Radi interior de les dents del rotor [m]
$r_9$: Radi de l'eix [m]

### 2.4.10. Eix

L'eix es considera un cilindre massís, amb bon contacte amb els coixinets i amb el rotor. Es considera que no tenim pèrdues en els coixinets, a baixes velocitats. Els coixinets i la part d'eix que sobresurt es considera part de la carcassa en el model tèrmic. El punt de temperatura mitja es situa a 1/6 part de la longitud de l'eix entre ambdós coixinets.

$$R36 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{s}} \cdot le} + \frac{l_{\mathrm{m}}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{s}} \cdot {r_9}^2} \tag{2.66}$$

$$R37 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{s}} \cdot l_{\mathrm{b}}} + \frac{l_{\mathrm{m}}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{s}} \cdot {r_9}^2} \tag{2.67}$$

On:
le: Longitud de l'estator [m]
lm: Longitud entre el punt de temperatura mitja del rotor i el punt de temperatura mitja del coixinet. Es mesura des de el centre del coixinet a 1/6 part del rotor [m]
lb: Longitud del coixinet [m]
$\lambda_s$: Conductivitat tèrmica de l'acer de l'eix [W/(m·K)]

### 2.4.11. Pèrdues

Les pèrdues en una màquina elèctrica es produeixen al llarg de tot el material, però en l'esquema tèrmic equivalent són situades en punts, com a fonts de corrent. Aquests punts es corresponen als nodes de l'esquema tèrmic equivalent.

Es considera que en la carcassa, l'eix i l'aire que conté la màquina, no tenim pèrdues.

L'esquema tèrmic equivalent de la màquina d'inducció s'ha obtingut a partir de mitja màquina, per tant les pèrdues es divideixen per dos.

Empíricament es demostra la següent distribució de pèrdues:

$$P_{\mathrm{N2}} = \frac{P_{\mathrm{Feys}}}{2} \tag{2.68}$$

$$P_{\mathrm{N3}} = \frac{P_{\mathrm{Feds}} + 0{,}3 \cdot P_{\mathrm{ad}}}{2} \tag{2.69}$$

$$P_{\mathrm{N4}} = \frac{0{,}48 \cdot P_{\mathrm{cus}} + 0{,}4 \cdot P_{\mathrm{ad}}}{2} \tag{2.70}$$

$$P_{\mathrm{N6}} = \frac{0{,}52 \cdot P_{\mathrm{cus}}}{2} \tag{2.71}$$

$$P_{\mathrm{N8}} = \frac{P_{\mathrm{cur}}}{2} \tag{2.72}$$

$$P_{\mathrm{N9}} = \frac{0{,}3 \cdot P_{\mathrm{ad}}}{2} \tag{2.73}$$

On:
$P_{Feys}$: Pèrdues produïdes en el ferro de l'estator [W]
$P_{Feds}$: Pèrdues produïdes en les dents de l'estator [W]
$P_{cus}$: Pèrdues produïdes en el bobinat de l'estator [W]
$P_{cur}$: Pèrdues produïdes en el bobinat del rotor [W]
$P_{ad}$: Pèrdues addicionals [W]

## 2.5. ESQUEMA TÈRMIC EQUIVALENT PER AL MOTOR D'IMANTS PERMANENTS EXTERIORS

El motor d'imants permanents exteriors estudiat tindrà la següent representació constructiva.

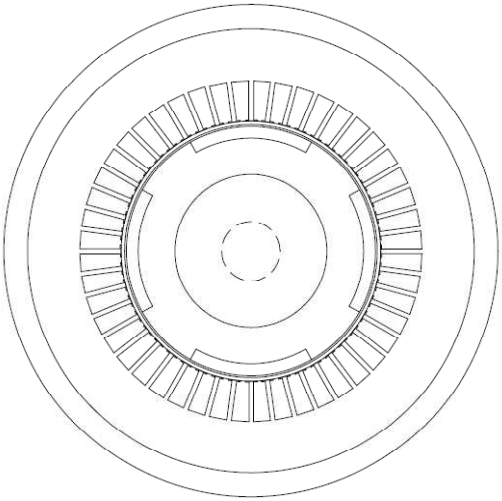

*Figura 2.9: Representació de la secció radial del motor d'imants permanents exteriors*

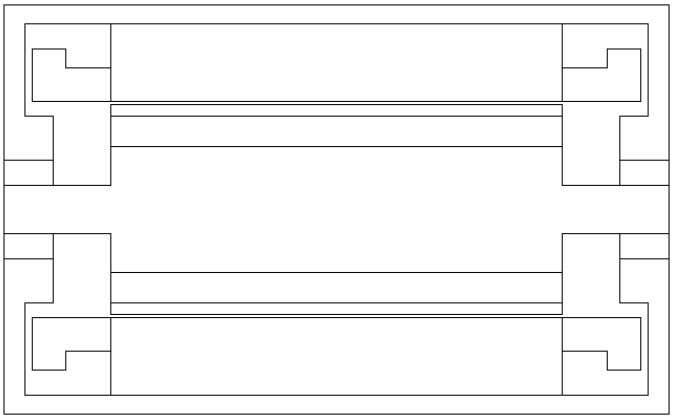

*Figura 2.10: Representació de la secció axial del motor d'imants permanents exteriors*

El motor d'imants permanents exteriors és dividit en 11 components:

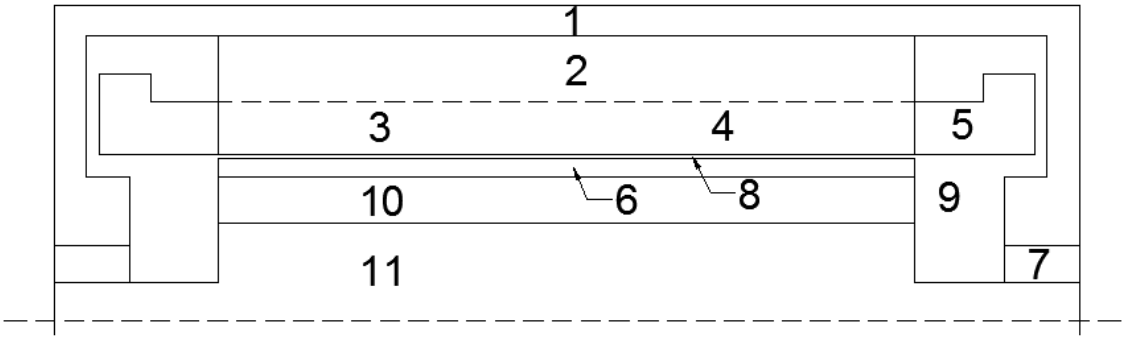


*Figura 2.11: Representació components del motor d'imants permanents exteriors*

1: Carcassa
2: Ferro de l'estator
3: Dents de l'estator
4: Bobines de l'estator
5: Caps de bobina
6: Imants permanents
7: Coixinets
8: Entreferro
9: Aire en els caps
10: Ferro del rotor
11: Eix

Donat la simetria de la màquina en l'eix radial, es pot dividir la màquina en dos. Això serà tingut en compte tant en el moment de trobar les resistències tèrmiques com en el moment d'aplicar les pèrdues com a fonts de corrent.

L'esquema tèrmic equivalent resultant per al motor d'imants permanents exteriors queda de la següent forma:

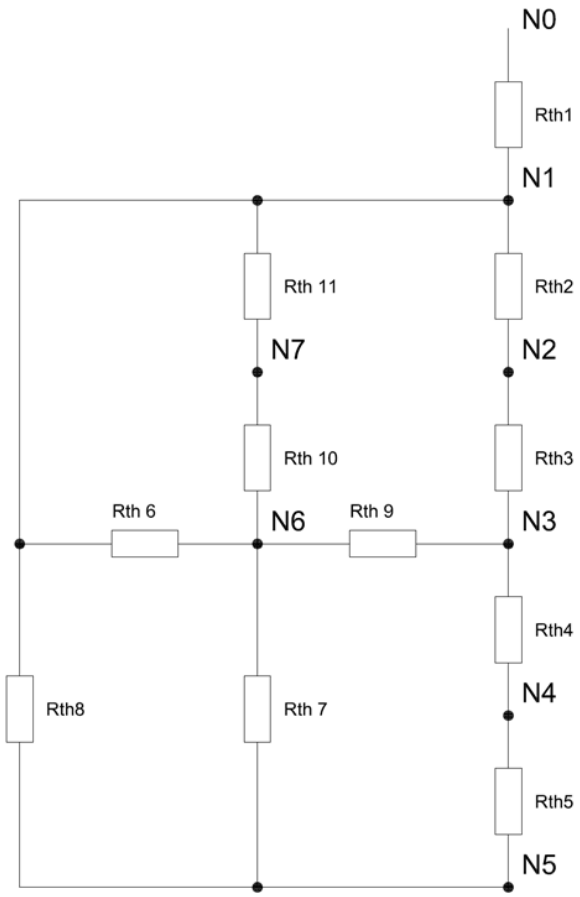


*Figura 2.12: Esquema tèrmic equivalent per al motor d'imants permanents exteriors*

Els nodes numerats representen els punts mig de temperatura de cada component estudiat. Els components que no tenen cap node assignat es considera que no és d'interès estudiar la temperatura en la que es troben.

### 2.5.1. Camisa d'aigua - Carcassa

Es considera com a carcassa el cilindre tancat que recobreix l'estator. En el motor estudiat la carcassa conté una camisa d'aigua.

La resistència tèrmica de la carcassa és la oposició al pas de calor entre la camisa d'aigua i l'estator. Es pot obtindre a partir de l'equació 2.3.

$$R_{\mathrm{thfr}} = \frac{h_{\mathrm{fr}}}{2 \cdot \pi \cdot l_{\mathrm{fe}} \cdot \lambda_{\mathrm{al}} \cdot \left(\frac{D_{\mathrm{se}}}{2} + h_{\mathrm{fr}}\right)} \tag{2.74}$$

On:
$h_{fr}$: Espai mig entre l'estator i la camisa d'aigua [m]
$l_{fe}$: Longitud de l'estator [m]
$\lambda_{al}$: Conductivitat tèrmica del material de la carcassa [W/(m·K)]
$D_{se}$: Diàmetre exterior de l'estator [m]

En aquest cas situem el punt mig de calor en el centre de la carcassa. La resistència tèrmica entre la camisa d'aigua i el centre de la carcassa queda:

$$Rth1 = \frac{1}{2} \cdot R_{\mathrm{thfr}} \tag{2.75}$$

On:
$R_{thfr}$: Resistència tèrmica de la carcassa [K/W]

### 2.5.2. Carcassa – Ferro de l'estator

Entre el punt mig de la carcassa i el punt mig del ferro de l'estator tenim la contribució de tres resistències tèrmiques.

A partir de l'equació 2.28 obtenim $R_{they}$, que és la resistència tèrmica entre la carcassa i el ferro de l'estator.

$$R_{\mathrm{they}} = \frac{1}{\lambda_{\mathrm{cont}} \cdot Ag} \tag{2.76}$$

On:
$\lambda_{cont}$: Coeficient de contacte [W/(m$^2$·K)]

Ag: Àrea de contacte entre carcassa i estator [$m^2$]

A partir de l'equació 2.3 obtenim $R_{thys}$, que és la resistència tèrmica del ferro de l'estator, entre la carcassa i les dents de l'estator.

$$R_{\text{thys}} = \frac{\ln\left(\frac{Dse}{2}\right) - \ln\left(\frac{Ds}{2} + hs\right)}{2 \cdot \pi \cdot l_{\text{fe}} \cdot k_{\text{fe}} \cdot \lambda_{\text{fe}}} \tag{2.77}$$

On:
$D_{se}$: Diàmetre exterior de l'estator [m]
Ds: Diàmetre interior de l'estator [m]
hs: Alçada de les dents de l'estator [m]
$l_{fe}$: Longitud de l'estator [m]
$k_{fe}$: Factor d'apilament
$\lambda_{fe}$:Conductivitat tèrmica del laminat en direcció radial [W/(m·K)]

La resistència tèrmica equivalent entre el centre de la carcassa i el centre del ferro de l'estator queda de la forma següent:

$$Rth2 = \frac{1}{2} \cdot R_{\text{thys}} + \frac{1}{2} \cdot R_{\text{thfr}} + R_{\text{they}} \tag{2.78}$$

On:
$R_{thys}$: Resistència tèrmica del ferro de l'estator [K/W]
$R_{thfr}$: Resistència tèrmica de la carcassa [K/W]
$R_{they}$: Resistència tèrmica de contacte entre carcassa i el ferro de l'estator [K/W]

### 2.5.3. Ferro de l'estator – Dents de l'estator

Entre el punt mig del ferro de l'estator i el punt mig de les dents de l'estator tenim la contribució de dues resistències tèrmiques.

La resistència tèrmica que descriu una dent depèn de la forma d'aquesta. A continuació es mostra la forma típica de dent i l'equació resultant de la integració de l'àrea d'aquesta.

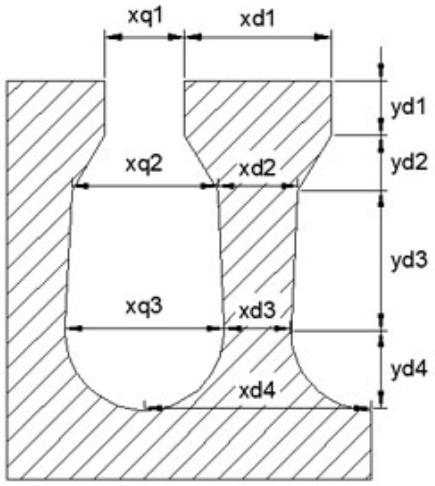


*Figura 2.13: Forma típica d'una dent de l'estator*

$$a = \frac{xd3 + 2 \cdot yd4}{2 \cdot yd4} \tag{2.79}$$

$$R_{\text{thd}} = \frac{1}{\lambda_{\text{fe}} \cdot Qs \cdot l_{\text{fe}} \cdot k_{\text{fe}}} \cdot \left[\frac{yd1}{xd1} + \frac{yd3}{xd3} + \frac{yd2}{xd1 - xd2} \cdot \left(ln\left|\frac{xd1 \cdot yd2}{xd1 - xd2}\right| - ln\left|yd2 - \left(\frac{xd1 \cdot yd2}{xd1 - xd2}\right)\right|\right) - \frac{\pi}{4} + \frac{a}{\sqrt{a^2 - 1}} \cdot \arctan\left(\frac{a+1}{\sqrt{a^2 - 1}}\right)\right] \tag{2.80}$$

On:
Qs: Nombre de ranures de l'estator
$l_{fe}$: Longitud de l'estator [m]
$k_{fe}$: Factor d'apilament
$\lambda_{fe}$:Conductivitat tèrmica del laminat en direcció radial [W/(m·K)]
xd1,xd2,xd3,xd4,yd1,yd2,yd3,yd4: Mesures de ranura descrites en la figura 2.13 [m]

La resistència tèrmica entre el punt mig del ferro de l'estator i el punt mig de les dents de l'estator queda de la següent forma:

$$Rth3 = \frac{1}{2} \cdot (R_{\text{thys}} + R_{\text{thd}}) \tag{2.81}$$

On:
$R_{thys}$: Resistència tèrmica del ferro de l'estator [K/W]
$R_{thd}$: Resistència tèrmica del ferro de les dents de l'estator [K/W]

### 2.5.4. Dents de l'estator – Bobines de l'estator

Entre el punt mig de les dents de l'estator i el punt mig de les bobines de l'estator, tenim diverses resistències tèrmiques equivalents als diversos materials que recobreixen el coure. A demés tenim la contribució del coure i del laminat de les ranures. Per a simplificar la geometria de la ranura direm que és de forma rectangular.

Les dimensions equivalents del rectangle són:

$$b = \frac{xq3 + xq2}{2} - 2 \cdot d \tag{2.82}$$

$$h = \frac{2 \cdot Aq}{xq3 + xq2} - 2 \cdot d \tag{2.83}$$

On el material que forma la ranura contribueix de la següent forma:

$$Rxo = \frac{b}{h \cdot \lambda_{\mathrm{Q}}} \tag{2.84}$$

$$Ryo = \frac{h}{b \cdot \lambda_{\mathrm{Q}}} \tag{2.85}$$

L'aïllament de la ranura i l'aire de la ranura contribueix amb:

$$Rix = \frac{di}{h + \lambda i} + \frac{dA}{h + \lambda A} \tag{2.86}$$

$$Riy = \frac{di}{b + \lambda i} + \frac{dA}{b + \lambda A} \tag{2.87}$$

La resistència per unitat de longitud és:

$$Rx = \frac{1}{2} \cdot \left( Rix + \frac{Rxo}{6} \right) \tag{2.88}$$

$$Ry = \frac{1}{2} \cdot \left( Riy + \frac{Ryo}{6} \right) \tag{2.89}$$

Un cop simplificada la geometria i materials la resistència tèrmica equivalent entre les dents de l'estator i les bobines de l'estator queda de la següent forma.

$$Rth4 = \frac{Rx \cdot Ry}{Qs \cdot l_{\mathrm{fe}} \cdot k_{\mathrm{fe}} \cdot (Rx + Ry)} \cdot \left(1 - \frac{Rxo \cdot Ryo}{720 \cdot Rx \cdot Ry}\right) \tag{2.90}$$

On:
Qs: Nombre de ranures de l'estator
$l_{fe}$: Longitud de l'estator [m]
$k_{fe}$: Factor d'apilament
$\lambda_i$:Conductivitat tèrmica de l'aïllament de ranura [W/(m·K)]
$\lambda_v$:Conductivitat tèrmica del vernís del coure [W/(m·K)]
di: Gruix de l'aïllament de ranura [m]
dA: Gruix del vernís del coure [m]
Aq: Secció del coure en cada ranura de l'estator [$m^2$]
xq2,xq3: Mesures de ranura descrites en la figura 2.13 [m]

### 2.5.5. Bobines – Caps de bobina

La transferència de calor del centre de l'estator cap als caps de bobina es du a terme a través del coure de les bobines. Un dels factors més importants en els caps de bobina és la longitud de la bobina. La longitud de mitja bobina per a màquines elèctriques petites es pot trobar amb l'expressió següent:

$$l_{\mathrm{av}} = l_{\mathrm{fe}} + 1{,}2 \cdot pip + 0{,}05 \tag{2.91}$$

On:
$l_{fe}$: Longitud de l'estator [m]
pip: Pas polar [m]

Coneixent la longitud de mitja bobina i l'equació de conducció de calor obtenim:

$$R_{\mathrm{thw}} = \frac{l_{\mathrm{av}}}{3 \cdot A_{\mathrm{cu}} \cdot \lambda_{\mathrm{cu}}} \tag{2.92}$$

$$Rth5 = \frac{R_{\mathrm{thw}}}{2 \cdot Qs} \tag{2.93}$$

On:
$l_{av}$: Longitud de mitja bobina [m]

$A_{cu}$: Secció del coure d'una bobina [$m^2$]
$\lambda_{cu}$:Conductivitat tèrmica del coure [W/(m·K)]
Qs: Nombre de ranures

### 2.5.6. Carcassa – Aire en els caps

La transferència de calor entre la carcassa i l'aire en els caps es realitza per mitjà de convecció. La resistència tèrmica equivalent s'obté a partir de l'equació 2.8 i el seu coeficient de convecció segons l'equació 2.23.

$$\alpha_1 = 15 + 6{,}75^{0{,}65} \cdot v_r{}^{0{,}65} \tag{2.94}$$

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1 \cdot A_1} \tag{2.95}$$

On:
$v_r$: Velocitat del fluid en els caps, equació 2.22 [m/s]
$A_1$: Àrea de contacte entre la carcassa i l'aire en els caps [$m^2$]

Com que no és interessant conèixer la temperatura assolida per l'aire dels caps es redueix aquest node utilitzant una conversió estrella – triangle. R1,R2 i R3 seran les resistències tèrmiques en estrella i Rth6, Rth7 i Rth8 seran les resistències tèrmiques en triangle.

### 2.5.7. Rotor – Aire en els caps

La transferència de calor entre el rotor i l'aire en els caps es realitza per mitjà de convecció. La resistència tèrmica equivalent s'obté a partir de l'equació 2.8 i el seu coeficient de convecció segons l'equació 2.24.

$$\alpha_2 = 16{,}5^{0{,}65} \cdot v_r{}^{0{,}65} \tag{2.96}$$

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_2 \cdot A_2} \tag{2.97}$$

On:
$v_r$: Velocitat del fluid en els caps, equació 2.22 [m/s]
$A_2$: Àrea de contacte entre el rotor i l'aire en els caps [$m^2$]

Com que no és interessant conèixer la temperatura assolida per l'aire dels caps es redueix aquest node utilitzant una conversió estrella – triangle.

R1,R2 i R3 seran les resistències tèrmiques en estrella i Rth6, Rth7 i Rth8 seran les resistències tèrmiques en triangle.

### 2.5.8. Caps de bobina – Aire en els caps

La transferència de calor entre els caps de bobina i l'aire en els caps es realitza per mitjà de convecció. La resistència tèrmica equivalent s'obté a partir de l'equació 2.8 i el seu coeficient de convecció segons l'equació 2.25.

$$\alpha_3 = 6{,}5 + 5{,}25^{0{,}6} \cdot v_{\mathrm{r}}{}^{0{,}6} \tag{2.98}$$

$$R_3 = \frac{1}{\alpha_3 \cdot A_3} \tag{2.99}$$

On:
$v_r$: Velocitat del fluid en els caps, equació 2.22 [m/s]
$A_3$: Àrea de contacte entre els caps de bobina i l'aire en els caps [$m^2$]

Com que no és interessant conèixer la temperatura assolida per l'aire dels caps es redueix aquest node utilitzant una conversió estrella – triangle. R1,R2 i R3 seran les resistències tèrmiques en estrella i Rth6, Rth7 i Rth8 seran les resistències tèrmiques en triangle.

### 2.5.9. Dents de l'estator – Imants del rotor

Entre el centre de les dents de l'estator i el centre dels imants del rotor tenim diverses resistències tèrmiques. Corresponents a l'aire de l'entreferro, el retenidor dels imants, les dents de l'estator i els imants del rotor.

La calor es transmet a través de l'entreferro per mitjà de convecció, radiació i conducció. El fenomen de radiació es pot negligir per la poca diferència de temperatura entre la superfície dels imants i de les dents de l'estator. Per conèixer la naturalesa de l'aire en l'entreferro utilitzarem el nombre de Taylor, equació 2.20 i el nombre de Nusselt, equació 2.15. La resistència tèrmica de l'entreferro entre rotor i estator queda:

$$\alpha_\delta = \frac{Nu \cdot \lambda_{\mathrm{air}}}{2 \cdot \delta} \tag{2.100}$$

$$R_{\mathrm{th}\delta} = \frac{1}{\alpha_\delta \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_\delta}{2} \cdot l_{\mathrm{fe}}} \tag{2.101}$$

On:
$\lambda_{air}$: Conductivitat tèrmica de l'aire [W/(m·K)]
δ: Gruix de l'entreferro [m]
$\alpha_\delta$: Coeficient de transferència de calor a través de l'entreferro [W/(m$^2$·K)]
$D_\delta$: Diàmetre de l'entreferro [m]
$l_{fe}$: Longitud de l'estator [m]

Els motors d'imants permanents exteriors solen tenir un recobriment per damunt del rotor. Aquest recobriment és l'encarregat de sostenir els imants i protegir-los. El retenidor dels imants es pot descriure partint de l'equació 2.3 i sabent que el gruix del retenidor és molt inferior al radi del rotor.

$$R_{\mathrm{thsl}} = \frac{h_{\mathrm{sl}}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{Dr}{2} \cdot l_{\mathrm{fe}} \cdot \lambda_{\mathrm{sl}}} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{2 \cdot p \cdot \gamma_{\mathrm{m}}} \tag{2.102}$$

On:
$h_{sl}$: Gruix del retenidor dels imants [m]
Dr: Diàmetre del rotor [m]
$l_{fe}$: Longitud de l'estator [m]
$\lambda_{sl}$: Conductivitat tèrmica del retenidor dels imants [W/(m·K)]
$\gamma_m$: Factor de recobriment polar
p: Nombre de parell de pols

Els imants permanents es modelen com una capa cilíndrica en la que no existeix transferència de calor en direcció axial o circular. La resistència tèrmica dels imants permanents es troba amb:

$$R_{\mathrm{thpm}} = \frac{\ln\left(\frac{Dri}{2} + h_{\mathrm{yr}} + h_{\mathrm{pm}}\right) - \ln\left(\frac{Dri}{2} + h_{\mathrm{yr}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot l_{\mathrm{fe}} \cdot \lambda_{\mathrm{pm}}} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{2 \cdot p \cdot \gamma_{\mathrm{m}}} \tag{2.103}$$

On:
Dri: Diàmetre interior del rotor [m]
$h_{yr}$: Gruix del ferro del rotor del centre als imants [m]
hpm: Gruix dels imants [m]
$l_{fe}$: Longitud de l'estator [m]
$\lambda_{pm}$: Conductivitat tèrmica dels imants [W/(m·K)]
$\gamma_m$: Factor de recobriment polar
p: Nombre de parell de pols

Aplicant totes les contribucions de les diverses resistències tèrmiques trobem la resistència tèrmica entre el centre de les dents de l'estator i el centre dels imants del rotor.

$$Rth9 = R_{\text{th}\delta} + \frac{1}{2} \cdot R_{\text{thd}} + R_{\text{thsl}} + \frac{1}{2} \cdot R_{\text{thpm}} \tag{2.104}$$

On:
$R_{th\delta}$: Resistència tèrmica de l'entreferro [K/W]
$R_{thd}$: Resistència tèrmica de les dents de l'estator [K/W]
$R_{thsl}$: Resistència tèrmica del retenidor dels imants [K/W]
$R_{thpm}$: Resistència tèrmica dels imants [K/W]

### 2.5.10. Imants permanents – Coixinets

Entre el centre dels imants permanents fins el centre dels coixinets tenim la contribució de diverses resistències tèrmiques.

Els imants permanents van units al rotor per mitjà d'una pasta aïllant. Aquest component és molt prim, però no el suficient per a ser menyspreat. Així dons tenint en compte que el gruix de la capa d'aïllament és molt inferior al diàmetre del rotor obtenim:

$$R_{\text{thins}} = \frac{dir}{2 \cdot \pi \cdot \frac{Dri + 2 \cdot h_{\text{yr}}}{2} \cdot l_{\text{fe}} \cdot \lambda_{\text{ir}}} \cdot \frac{2 \cdot \pi}{2 \cdot p \cdot \gamma_{\text{m}}} \tag{2.105}$$

On:
dir: Gruix de l'aïllament que uneix imants amb rotor [m]
Dri: Diàmetre interior del rotor [m]
$h_{yr}$: Gruix del ferro del rotor del centre als imants [m]
$l_{fe}$: Longitud de l'estator [m]
$\lambda_{pm}$: Conductivitat tèrmica del l'aïllament que uneix els imants amb rotor [W/(m·K)]
$\gamma_m$: Factor de recobriment polar
p: Nombre de parell de pols

La conductivitat tèrmica radial del laminat del rotor es calcula amb analogia a la conductivitat tèrmica del laminat de l'estator.

$$R_{\text{thyr}} = \frac{\ln\left(\frac{Dri}{2} + hyr\right) - \ln\left(\frac{Dri}{2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot l_{\text{fe}} \cdot k_{\text{fe}} \cdot \lambda_{\text{fe}}} \tag{2.106}$$

On:
Dri: Diàmetre interior del rotor [m]
$h_{yr}$: Gruix del ferro del rotor des de el centre als imants [m]

$l_{fe}$: Longitud de l'estator [m]
$k_{fe}$: Factor d'apilament
$\lambda_{pm}$: Conductivitat tèrmica del laminat del rotor [W/(m·K)]

Entre el laminat del rotor i l'eix ens queda una zona irregular, en la que tindrem bosses d'aire de dimensions microscòpiques. Aquest fet és tingut en compte com una resistència tèrmica per contacte.

$$R_{\mathrm{thcr}} = \frac{1}{\lambda_{\mathrm{cont2}} \cdot A_{\mathrm{shaft}}} \tag{2.107}$$

On:
$\lambda_{cont2}$: Coeficient de contacte entre el laminat del rotor i l'eix [W/m$^2$·K]
$A_{shaft}$: Àrea de contacte entre el laminat del rotor i l'eix [m$^2$]

L'eix contribueix amb una resistència tèrmica en direcció axial. A partir de l'equació 2.3 trobem:

$$R_{\mathrm{thsh}} = \frac{l_{\mathrm{bb}}}{\pi \cdot \left(\frac{Dri}{2}\right)^2 \cdot \lambda_{\mathrm{sh}}} \tag{2.108}$$

On:
$l_{bb}$: Distància entre els dos coixinets de la màquina [m]
Dri: Diàmetre interior del rotor [m]
$\lambda_{sh}$: Conductivitat tèrmica de l'acer de l'eix [W/(m·K)]

Els coixinets són uns components compostos per diversos elements en contacte. En els coixinets un dels elements més significatius en la conducció de calor és la grassa. Degut al continu moviment de l'element és complicat trobar una equació analítica, per el que es defineix la resistència tèrmica dels coixinets com una resistència tèrmica per contacte.

$$R_{\mathrm{thb}} = \frac{\lambda_{\mathrm{cont3}}}{4 \cdot \pi \cdot \frac{Db}{2} \cdot l_{\mathrm{b}}} \tag{2.109}$$

On:
$\lambda_{cont3}$: Coeficient de contacte per als coixinets [W/m$^2$·K]
Db: Diàmetre dels coixinets [m]
lb: Longitud dels coixinets [m]

Entre el centre dels imants permanents fins el centre dels coixinets tenim una resistència tèrmica expressada de la següent forma:

$$Rth10 = \frac{1}{2} \cdot R_{\text{thpm}} + R_{\text{thins}} + R_{\text{thyr}} + R_{\text{thcr}} + \frac{1}{2} \cdot R_{\text{thsh}} + \frac{1}{4} \cdot R_{\text{thb}} \qquad (2.110)$$

On:
$R_{thpm}$: Resistència tèrmica dels imants permanents [K/W]
$R_{thins}$: Resistència tèrmica de l'aïllament que uneix els imants al rotor [K/W]
$R_{thyr}$: Resistència tèrmica del laminat del rotor [K/W]
$R_{thcr}$: Resistència tèrmica per contacte entre rotor i l'eix [K/W]
$R_{thsh}$: Resistència tèrmica de l'eix en direcció axial [K/W]
$R_{thb}$:Resistència tèrmica dels coixinets [K/W]

### 2.5.11. Coixinets – Carcassa

Des del centre dels coixinets a la carcassa sols tindrem en compte la resistència tèrmica dels coixinets. Que per simetria resulta:

$$Rth11 = \frac{1}{4} \cdot R_{\text{thb}} \qquad (2.111)$$

On:
$R_{thb}$: Resistència tèrmica dels coixinets [K/W]

### 2.5.12. Pèrdues

Les pèrdues en una màquina elèctrica es produeixen al llarg de tot el material, però en l'esquema tèrmic equivalent són situades en punts, com a fonts de corrent. Aquests punts es corresponen als nodes de l'esquema tèrmic equivalent.

Es considera que en la carcassa, l'eix i l'aire que conté la màquina, no tenim pèrdues.

La matriu de pèrdues queda de la forma següent:

$$P = \begin{bmatrix} 0 \\ P_{\text{yoke}} \\ P_{\text{teeth}} \\ P_{\text{coilsides}} \\ P_{\text{endwindings}} \\ P_{\text{magnets}} \\ P_{\text{bearings}} \end{bmatrix} \tag{2.112}$$

On:
$P_{yoke}$: Pèrdues produïdes en el ferro de l'estator [W]
$P_{teeth}$: Pèrdues produïdes en les dents de l'estator [W]
$P_{cpilsides}$: Pèrdues produïdes en el bobinat de l'estator, dins l'estator [W]
$P_{endwindings}$: Pèrdues produïdes en el bobinat de l'estator, en els caps [W]
$P_{magnets}$: Pèrdues en els imants [W]
$P_{bearings}$: Pèrdues en els coixinets [W]

## 2.6. ESQUEMA TÈRMIC EQUIVALENT PER AL MOTOR DE RELUCTÀNCIA

El motor de reluctància commutada estudiat tindrà la següent representació constructiva.

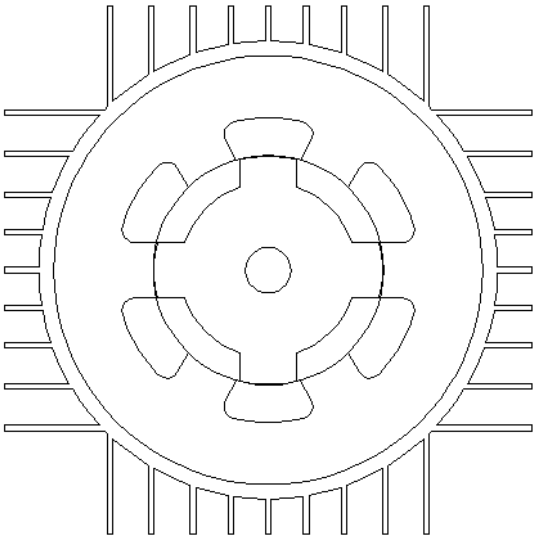

*Figura 2.14: Representació de la secció radial del motor de reluctància commutada*

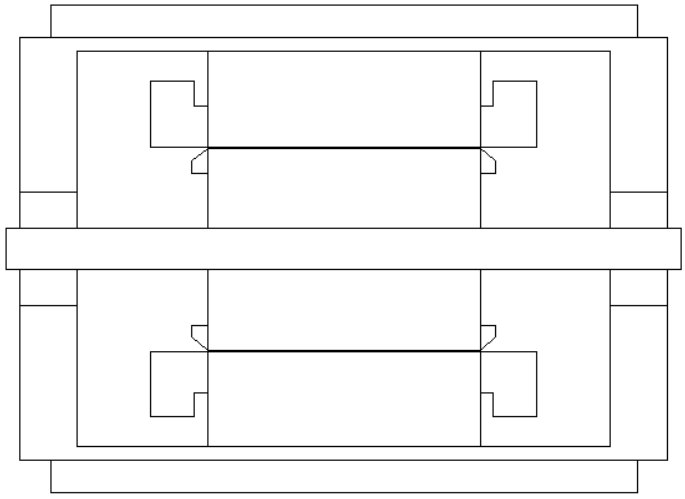

*Figura 2.15: Representació de la secció axial del motor de reluctància commutada*

El motor de reluctància es dividit en 11 components:

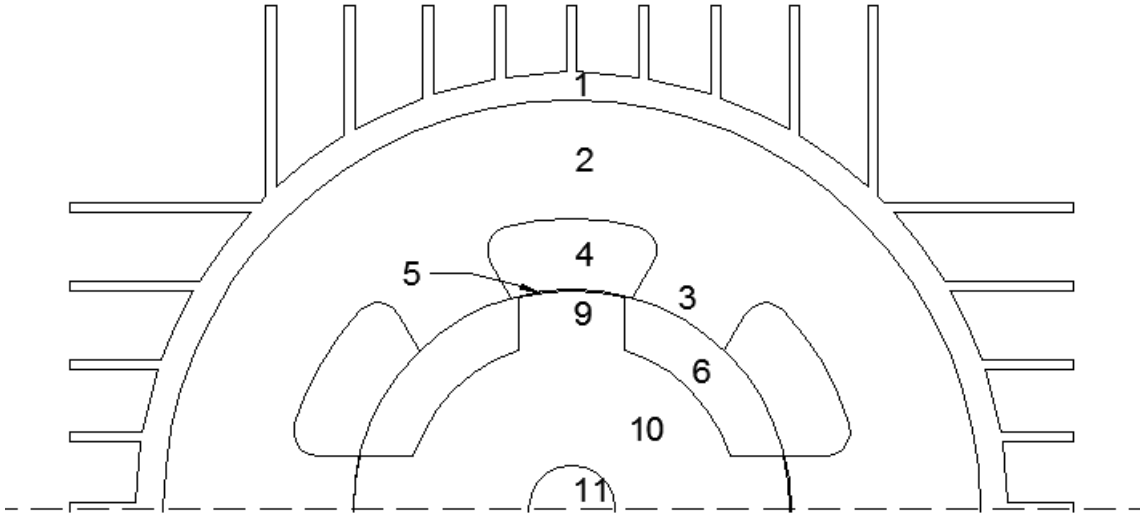


*Figura 2.16: Representació components del motor de reluctància*

1: Carcassa
2: Ferro de l'estator
3: Dents de l'estator
4: Bobines de l'estator
5: Entreferro 1
6: Entreferro 2
7: Caps de bobina
8: Aire en els caps
9: Dent del rotor
10: Ferro del rotor
11: Eix

Donat la simetria de la màquina en l'eix radial, es pot dividir la màquina en dos. Això serà tingut en compte tant en el moment de trobar les resistències tèrmiques com en el moment d'aplicar les pèrdues com a fonts de corrent.

L'esquema tèrmic equivalent resultant per al motor de reluctància queda de la següent forma:

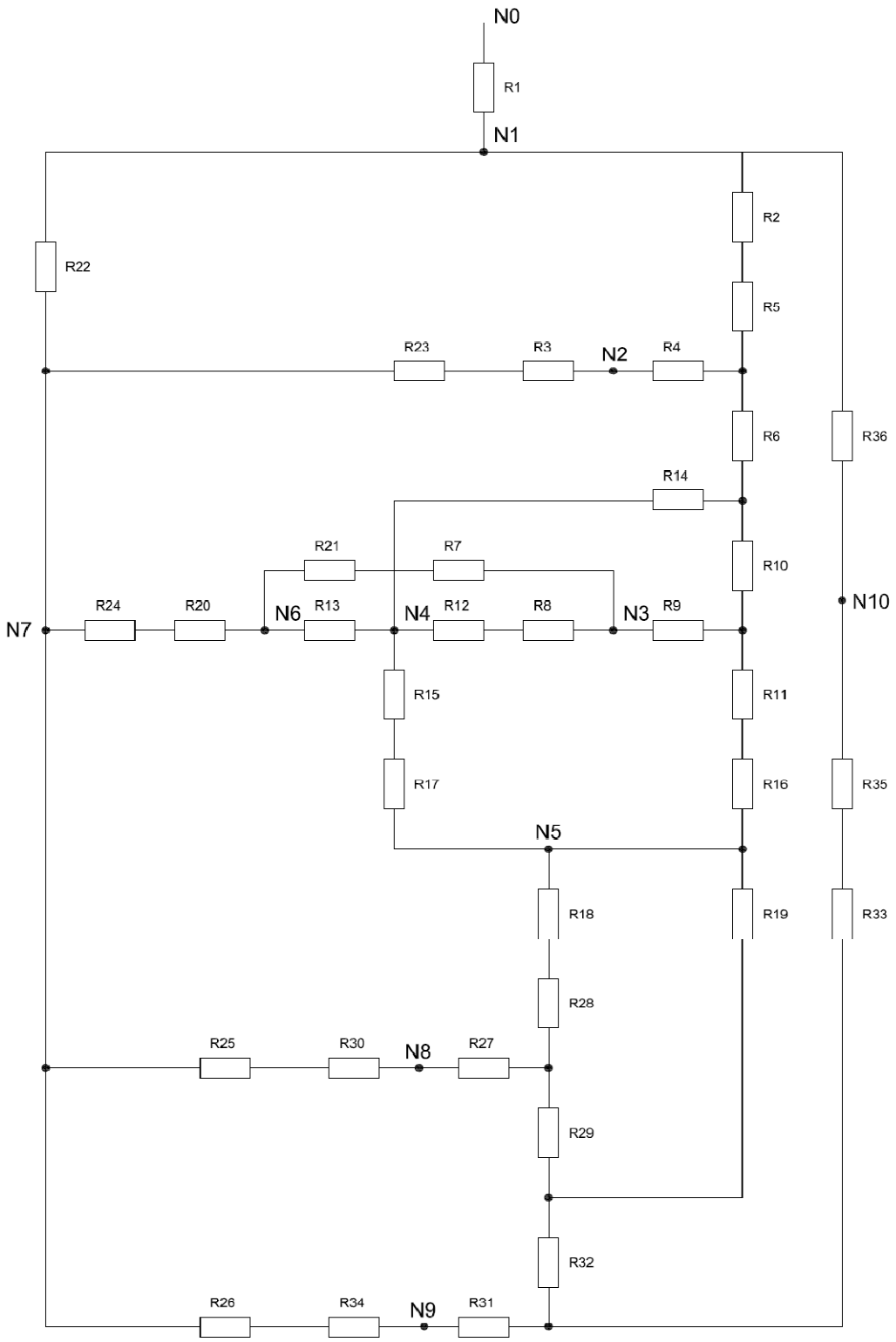


*Figura 2.17: Esquema tèrmic equivalent per al motor de reluctància*

Els nodes numerats representen els punts mig de temperatura de cada component estudiat. Els components que no tenen cap node assignat es considera que no és d'interès estudiar la temperatura en la que es troben.

### 2.6.1. Carcassa

Es considera com a carcassa el cilindre tancat que recobreix el rotor amb els seus pertinents àleps. Per a tindre en compte l'efecte dels àleps es considera que la superfície del cilindre és la meitat més amplia.

A partir de l'equació 2.8 obtenim R1, que representa l'oposició a la dissipació de calor de la màquina cap a l'ambient.

$$R1 = \frac{1}{2 \cdot \lambda_{\mathrm{c1}} \cdot 1{,}5 \cdot S_{\mathrm{frame}}} \tag{2.113}$$

On:
$S_{frame}$: Superfície de la carcassa, considerada un cilindre tapat [$m^2$]
$\lambda_{c1}$: Coeficient de convecció a partir de l'equació 2.10 [$W/(m^2 \cdot K)$]

A partir de l'equació 2.28 obtenim R2, que és la resistència tèrmica entre la carcassa i l'estator.

$$R2 = \frac{1}{\pi \cdot \lambda_{\mathrm{cont}} \cdot le \cdot r_1} \tag{2.114}$$

On:
$\lambda_{cont}$: Coeficient de contacte [$W/(m^2 \cdot K)$]
le: Longitud de l'estator [m]
$r_1$: Radi de l'estator [m]

### 2.6.2. Ferro de l'estator

Es considera com a ferro de l'estator el laminat entre la carcassa i les dents de l'estator. El cilindre tindrà una conductivitat diferent en direcció axial o radial. A partir de les equacions 2.4-2.7, obtindrem les equacions per al ferro de l'estator.

$$R3 = \frac{le}{6 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{la}} \cdot ({r_1}^2 - {r_2}^2)} \tag{2.115}$$

$$R4 = \frac{-1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{lr}} \cdot le \cdot Fa \cdot ({r_1}^2 - {r_2}^2)} \cdot \left[ {r_1}^2 + {r_2}^2 - \frac{4 \cdot {r_1}^2 \cdot {r_2}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{{r_1}^2 - {r_2}^2} \right] \quad (2.116)$$

$$R5 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{lr}} \cdot le \cdot Fa} \cdot \left[ 1 - \frac{2 \cdot {r_2}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{{r_1}^2 - {r_2}^2} \right] \quad (2.117)$$

$$R6 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{lr}} \cdot le \cdot Fa} \cdot \left[ \frac{2 \cdot {r_1}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{{r_1}^2 - {r_2}^2} - 1 \right] \quad (2.118)$$

On:
$\lambda_{lr}$:Conductivitat tèrmica del laminat en direcció radial [W/(m·K)]
$\lambda_{la}$:Conductivitat tèrmica del laminat en direcció axial [W/(m·K)]
le: Longitud de l'estator [m]
Fa: Factor d'apilament
$r_1$: Radi exterior de l'estator [m]
$r_2$: Radi exterior dels dents de l'estator [m]

### 2.6.3. Dents de l'estator

El laminat que forma les dents de l'estator es pot modelar com a segments de cilindre, connectats en paral·lel. En aquest cas sí que tindrem conducció circular cap a les bobines de l'estator. Per aquest motiu afegim una resistència entre les cares de les dents i el punt de temperatura mitja.

$$R7 = \frac{le \cdot \tau_{\mathrm{u}}}{6 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{la}} \cdot b_{\mathrm{ds}} \cdot ({r_2}^2 - {r_3}^2)} \quad (2.119)$$

$$R8 = \frac{\pi \cdot b_{\mathrm{ds}} \cdot ({r_2}^2 - {r_3}^2)}{\lambda_{\mathrm{lr}} \cdot le \cdot Fa \cdot \tau_{\mathrm{u}} \cdot ({r_2}^2 - {r_3}^2)^2 \cdot Qs^2} \quad (2.120)$$

$$R9 = \frac{(-\tau_{\mathrm{u}})}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{lr}} \cdot le \cdot Fa \cdot b_{\mathrm{ds}} \cdot ({r_2}^2 - {r_3}^2)} \cdot \left[ {r_2}^2 + {r_3}^2 - \frac{4 \cdot {r_2}^2 \cdot {r_3}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_3}\right)}{{r_2}^2 - {r_3}^2} \right] \quad (2.121)$$

$$R10 = \frac{\tau_{\mathrm{u}}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{lr}} \cdot le \cdot Fa \cdot b_{\mathrm{ds}}} \cdot \left[ 1 - \frac{2 \cdot {r_3}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_3}\right)}{{r_2}^2 - {r_3}^2} \right] \quad (2.122)$$

$$R11 = \frac{\tau_{\mathrm{u}}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{lr}} \cdot le \cdot Fa \cdot b_{\mathrm{ds}}} \cdot \left[ \frac{2 \cdot {r_3}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_3}\right)}{{r_2}^2 - {r_3}^2} - 1 \right] \quad (2.123)$$

On:
Qs: Nombre de ranures de l'estator
bds: Gruix de les dents de l'estator [m]
$\tau_u$: Distància entre dents de l'estator [m]
$\lambda_{lr}$: Conductivitat tèrmica del laminat en direcció radial [W/(m·K)]
$\lambda_{la}$: Conductivitat tèrmica del laminat en direcció axial [W/(m·K)]
le: Longitud de l'estator [m]
Fa: Factor d'apilament
$r_2$: Radi exterior de les dents de l'estator [m]
$r_3$: Radi interior de les dents de l'estator [m]

### 2.6.4. Bobines de l'estator

Les bobines de l'estator es modelen com a barres sòlides que consisteixen en un conjunt de fils i aïllaments. Es considera que axialment el coure és el conductor de calor, però radialment la conductivitat és 2,5 vegades la conductivitat de l'aïllament sol.

$$R12 = \frac{2 \cdot d_{\mathrm{i}}}{\pi \cdot \lambda_{\mathrm{i}} \cdot le \cdot r_4 \cdot Qs} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{v}} \cdot le \cdot Fr \cdot Qs} \tag{2.124}$$

$$R13 = \frac{le}{6 \cdot \lambda_{\mathrm{cu}} \cdot Sc \cdot Qs} + \frac{l_0 \cdot \varpi}{Qs \cdot Sc \cdot \lambda_{\mathrm{cu}}} \tag{2.125}$$

$$R14 = \frac{4 \cdot d_{\mathrm{i}}}{\pi \cdot \lambda_{\mathrm{i}} \cdot le \cdot r_4 \cdot Qs} + \frac{1}{\pi \cdot \lambda_{\mathrm{v}} \cdot le \cdot Fr \cdot Qs} \tag{2.126}$$

$$R15 = \frac{1}{\pi \cdot \lambda_{\mathrm{v}} \cdot le \cdot Fr \cdot Qs} \tag{2.127}$$

On:
$l_0$: Longitud del bobinat que sobresurt de la ranura de l'estator [m]
ω: Factor corrector per a simular els pics de temperatura (1,5)
di: Espessor de l'aïllament de la ranura de l'estator [m]
$\lambda_i$: Conductivitat tèrmica de l'aïllament de la ranura de l'estator [W/(m·K)]
$\lambda_v$: Conductivitat tèrmica del vernís que recobreix els filaments de coure [W/(m·K)]
$\lambda_{cu}$: Conductivitat tèrmica del coure [W/(m·K)]
le: Longitud de l'estator [m]
Qs: Nombre de ranures de l'estator
$r_4$: Radi equivalent del bobinat de l'estator [m]
Fr: Factor de conductivitat radial (2,5).
Sc: Secció del coure per a cada ranura de l'estator [$m^2$]

### 2.6.5. Entreferro 1

L'entreferro 1 és aquell espai d'aire que queda entre les dents del rotor i de l'estator. A partir de l'equació 2.8 obtenim les equacions necessàries per descriure l'entreferro 1 i a partir de les equacions 2.13 i 2.14 els coeficients de conductivitat.

$$R16 = \frac{\tau_{\mathrm{u}}}{b_{\mathrm{ds}} \cdot \pi \cdot r_3 \cdot le \cdot \lambda_{\mathrm{c2}}} \tag{2.128}$$

$$R17 = \frac{\tau_{\mathrm{u}}}{(\tau_{\mathrm{u}} - b_{\mathrm{ds}}) \cdot \pi \cdot r_3 \cdot le \cdot \lambda_{\mathrm{c2}}} \tag{2.129}$$

On:
$b_{ds}$: Gruix de les dents de l'estator [m]
$\tau_u$: Distància entre dents de l'estator [m]
$\lambda_{c2}$: Coeficient de convecció a partir d'equació 2.13 [W/(m$^2$·K)]
le: Longitud de l'estator [m]
$r_3$: Radi interior de les dents de l'estator [m]

### 2.6.6. Entreferro 2

L'entreferro 2 és aquell espai d'aire que queda entre les bobines de l'estator i el cos del rotor. A partir de l'equació 2.8 obtenim les equacions necessàries per descriure l'entreferro 2 i a partir de les equacions 2.13 i 2.14 els coeficients de conductivitat.

$$R18 = \frac{\tau_{\mathrm{u2}}}{b_{\mathrm{dr}} \cdot \pi \cdot r_5 \cdot le \cdot \lambda_{\mathrm{c2}}} \tag{2.130}$$

$$R19 = \frac{\tau_{\mathrm{u2}}}{(\tau_{\mathrm{u2}} - b_{\mathrm{dr}}) \cdot \pi \cdot r_{52} \cdot le \cdot \lambda_{\mathrm{c22}}} \tag{2.131}$$

On:
$b_{dr}$: Gruix de les dents del rotor [m]
$\tau_{u2}$: Distància entre dents del rotor [m]
$\lambda_{c2}$: Coeficient de convecció a partir de l'equació 2.13 [W/(m$^2$·K)]
le: Longitud de l'estator [m]
$r_{52}$: Radi mig de l'entreferro 2 [m]
$r_5$: Radi exterior de les dents del rotor [m]

### 2.6.7. Caps de bobina

Els caps de bobina es consideren com una estructura homogènia. Es considera un toroide sostingut per la prolongació dels bobinats.

La temperatura pic és més important que la temperatura mitja, per aquest motiu aplicarem un factor ω per a simular els pics de temperatura. Es considera que axialment el coure és el conductor de calor, però radialment la conductivitat és 2,5 vegades la conductivitat de l'aïllament sol.

$$R20 = \left(\left(\frac{\varpi \cdot r_6{}^2}{8 \cdot \pi \cdot r_4{}^2 \cdot l_0 \cdot Fr \cdot \lambda_{\mathrm{v}} \cdot Qs}\right)^{-1} + \left(\frac{\varpi}{16 \cdot \pi^2 \cdot r_{\mathrm{t}} \cdot Fr \cdot \lambda_{\mathrm{v}}}\right)^{-1}\right)^{-1} \qquad (2.132)$$

On:
$l_0$: Longitud del bobinat que sobresurt de la ranura de l'estator [m]
ω: Factor corrector per a simular els pics de temperatura (1,5)
Qs: Nombre de ranures de l'estator
$r_t$: Radi del toroide [m]
$r_4$: Radi equivalent del bobinat de l'estator [m]
$r_6$: Radi de la secció del coure [m]
Fr: Factor de conductivitat radial (2,5).
$\lambda_v$: Conductivitat tèrmica del vernís que recobreix els filaments de coure [W/(m·K)]

### 2.6.8. Aire en els caps

L'aire en els caps és l'aire que queda al voltant dels caps de bobina. Aquest aire és impulsat per els àleps del rotor.

L'àrea en contacte amb el toroide considerat per als caps de bobina, s'incrementa en un 50% per a tindre en compte les irregularitats de la superfície. A partir de l'equació 2.8 i del coeficient trobat en l'equació 2.21 trobem les següents equacions:

$$R21 = \frac{1}{S_3 \cdot \lambda_{c3}} \qquad (2.133)$$

$$R22 = \frac{1}{S_1 \cdot \lambda_{c3}} \qquad (2.134)$$

$$R23 = \frac{1}{S_2 \cdot \lambda_{c3}} \qquad (2.135)$$

$$R24 = \frac{1}{1{,}5 \cdot S_4 \cdot \lambda_{c3}} \tag{2.136}$$

$$R25 = \frac{1}{S_5 \cdot \lambda_{c3}} \tag{2.137}$$

$$R26 = \frac{1}{S_6 \cdot \lambda_{c3}} \tag{2.138}$$

On:
$S_1$: Àrea de la carcassa en contacte amb l'aire dels caps [$m^2$]
$S_2$: Àrea de l'estator en contacte amb l'aire dels caps [$m^2$]
$S_3$: Àrea de les dents de l'estator en contacte amb l'aire dels caps [$m^2$]
$S_4$: Àrea del toroide en contacte amb l'aire dels caps [$m^2$]
$S_5$: Àrea del bobinat rotòric en contacte amb l'aire dels caps [$m^2$]
$S_6$: Àrea del ferro del rotor en contacte amb l'aire dels caps [$m^2$]
$\lambda_{c3}$: Coeficient de convecció a partir de l'equació 2.21 [W/($m^2$·K)]

### 2.6.9. Dents del rotor

Les dents del rotor és la part del laminat del rotor que sobresurt d'aquest. Les dents del rotor es pot modelar com a segments de cilindre, connectats en paral·lel.

$$R27 = \frac{(-\tau_{u2})}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{lr} \cdot le \cdot Fa \cdot b_{dr} \cdot ({r_5}^2 - {r_8}^2)} \cdot \left[ {r_5}^2 + {r_8}^2 - \frac{4 \cdot {r_5}^2 \cdot {r_8}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_5}{r_8}\right)}{{r_5}^2 - {r_8}^2} \right] \tag{2.139}$$

$$R28 = \frac{\tau_{u2}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{lr} \cdot le \cdot Fa \cdot b_{dr}} \cdot \left[ 1 - \frac{2 \cdot {r_8}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_5}{r_8}\right)}{{r_5}^2 - {r_8}^2} \right] \tag{2.140}$$

$$R29 = \frac{\tau_{u2}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{lr} \cdot le \cdot Fa \cdot b_{dr}} \cdot \left[ \frac{2 \cdot {r_8}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_5}{r_8}\right)}{{r_5}^2 - {r_8}^2} - 1 \right] \tag{2.141}$$

$$R30 = \frac{le}{6 \cdot \pi \cdot \lambda_{la} \cdot ({r_5}^2 - {r_8}^2) \cdot Fa} \tag{2.142}$$

On:
$b_{dr}$: Gruix de les dents del rotor [m]
$\tau_{u2}$: Distància entre dents del rotor [m]
Fa: Factor d'apilament del laminat
$\lambda_{lr}$: Conductivitat tèrmica del laminat en direcció radial [W/(m·K)]
$\lambda_{la}$: Conductivitat tèrmica del laminat en direcció axial [W/(m·K)]
le: Longitud de l'estator [m]

$r_5$: Radi exterior de les dents del rotor [m]
$r_8$: Radi del cos del rotor [m]

### 2.6.10. Ferro del rotor

Es considera com a ferro del rotor el laminat entre l'eix i les dents del rotor. El cilindre tindrà una conductivitat diferent en direcció axial o radial. A partir de les equacions 2.4-2.7, obtindrem les equacions per al ferro del rotor.

$$R31 = \frac{-1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{lr}} \cdot le \cdot Fa \cdot (r_8{}^2 - r_9{}^2)} \cdot \left[ r_8{}^2 + r_9{}^2 - \frac{4 \cdot r_8{}^2 \cdot r_9{}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_8}{r_9}\right)}{r_8{}^2 - r_9{}^2} \right] \quad (2.143)$$

$$R32 = \frac{r_8{}^2 - r_9{}^2}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{lr}} \cdot le \cdot Fa \cdot (r_8{}^2 - r_9{}^2)} \cdot \left[ 1 - \frac{2 \cdot r_9{}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_8}{r_9}\right)}{r_8{}^2 - r_9{}^2} \right] \quad (2.144)$$

$$R33 = \frac{r_8{}^2 - r_9{}^2}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{lr}} \cdot le \cdot Fa \cdot (r_8{}^2 - r_9{}^2)} \cdot \left[ \frac{2 \cdot r_9{}^2 \cdot \ln\left(\frac{r_8}{r_9}\right)}{r_8{}^2 - r_9{}^2} - 1 \right] \quad (2.145)$$

$$R34 = \frac{le}{6 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{la}} \cdot (r_8{}^2 - r_9{}^2)} \quad (2.146)$$

On:
le: Longitud de l'estator [m]
$\lambda_{lr}$: Conductivitat tèrmica del laminat en direcció radial [W/(m·K)]
$\lambda_{la}$: Conductivitat tèrmica del laminat en direcció axial [W/(m·K)]
Fa: Factor d'apilament
$r_8$: Radi del cos del rotor [m]
$r_9$: Radi de l'eix [m]

### 2.6.11. Eix

L'eix es considera un cilindre massís, amb bon contacte amb els coixinets i amb el rotor. Es considera que no tenim pèrdues en els coixinets, a baixes velocitats. Els coixinets i la part d'eix que sobresurt es considera part de la carcassa en el model tèrmic. El punt de temperatura mitja es situa en 1/6 part de la longitud de l'eix entre ambdós coixinets.

$$R35 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{s}} \cdot le} + \frac{l_{\mathrm{m}}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{s}} \cdot r_9{}^2} \quad (2.147)$$

$$R36 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{s}} \cdot l_{\mathrm{b}}} + \frac{l_{\mathrm{m}}}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\mathrm{s}} \cdot r_9{}^2} \tag{2.148}$$

On:
le: Longitud de l'estator [m]
lm: Longitud entre el punt de temperatura mitja del rotor i el punt de temperatura mitja del coixinet. Es mesura des del centre del coixinet a 1/6 part del rotor [m]
lb: Longitud del coixinet [m]
$\lambda_s$: Conductivitat tèrmica de l'acer de l'eix [W/(m·K)]

### 2.6.12. Pèrdues

Les pèrdues en una màquina elèctrica es produeixen al llarg de tot el material, però en l'esquema tèrmic equivalent són situades en punts, com a fonts de corrent. Aquests punts es corresponen als nodes de l'esquema tèrmic equivalent.

Es considera que en la carcassa, l'eix i l'aire que conté la màquina, no tenim pèrdues.

L'esquema tèrmic equivalent de la màquina de reluctància s'ha obtingut a partir de mitja màquina, per tant les pèrdues es divideixen per dos.

Empíricament es demostra la següent distribució de pèrdues:

$$P_{\mathrm{N2}} = \frac{P_{\mathrm{Feys}}}{2} \tag{2.149}$$

$$P_{\mathrm{N3}} = \frac{P_{\mathrm{Feds}}}{2} \tag{2.150}$$

$$P_{\mathrm{N4}} = \frac{0{,}48 \cdot P_{\mathrm{cus}}}{2} \tag{2.151}$$

$$P_{\mathrm{N6}} = \frac{0{,}52 \cdot P_{\mathrm{cus}}}{2} \tag{2.152}$$

$$P_{\mathrm{N8}} = \frac{P_{\mathrm{cur}}}{2} \tag{2.153}$$

$$P_{\mathrm{N9}} = \frac{P_{\mathrm{ad}}}{2} \tag{2.154}$$

On:
$P_{Feys}$: Pèrdues produïdes en el ferro de l'estator [W]
$P_{Feds}$: Pèrdues produïdes en les dents de l'estator [W]
$P_{cus}$: Pèrdues produïdes en el bobinat de l'estator [W]
$P_{cur}$: Pèrdues produïdes en les dents del rotor [W]
$P_{ad}$: Pèrdues addicionals [W]

## 2.7. ESQUEMA TÈRMIC EQUIVALENT PER AL MOTOR D'IMANTS PERMANENTS INTERIORS

El motor d'imants permanents interiors estudiat tindrà la següent representació constructiva.

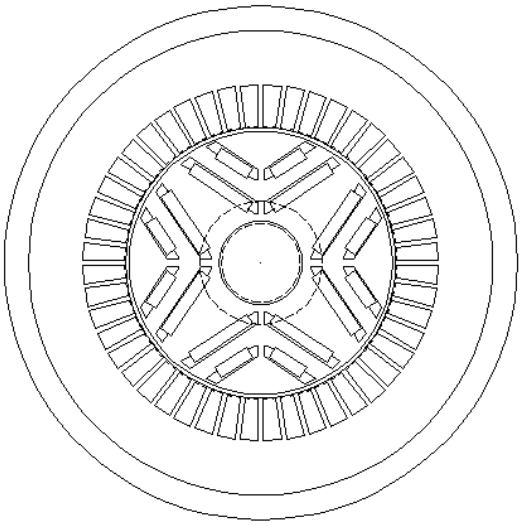

*Figura 2.18: Representació de la secció radial del motor d'imants permanents interiors*

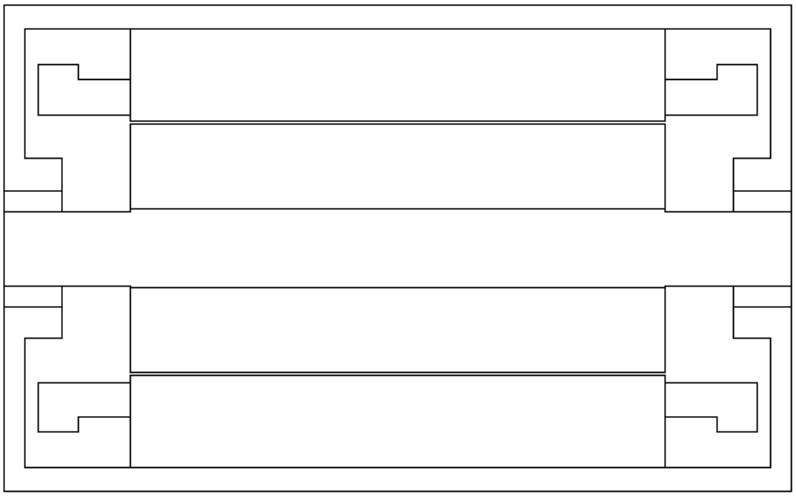

*Figura 2.19: Representació de la secció axial del motor d'imants permanents interiors*

El motor d'imants permanents interiors es dividit en 12 components:

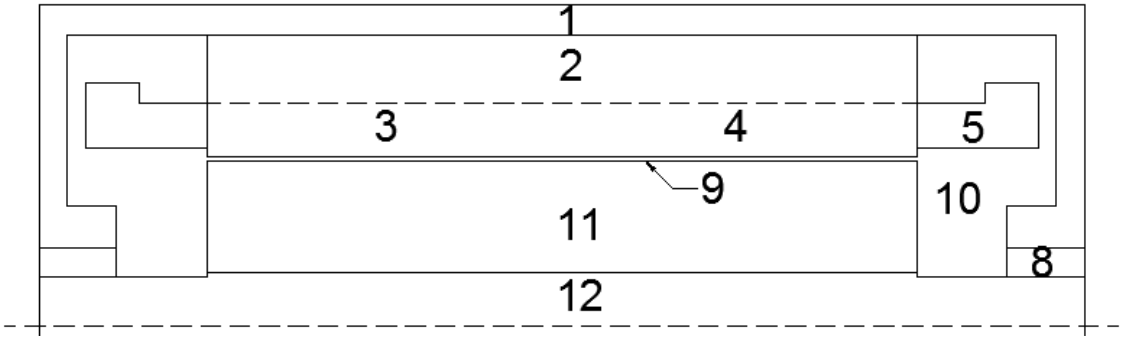


*Figura 2.20: Representació components del motor d'imants permanents interiors*

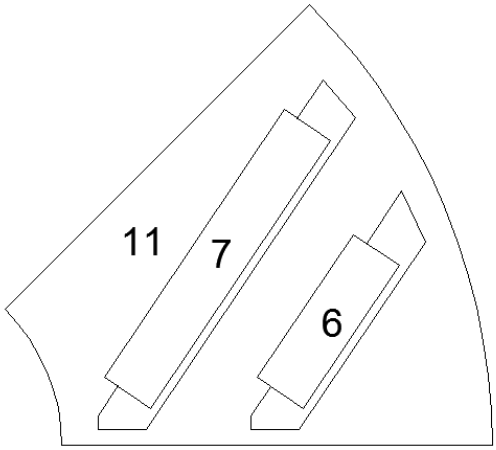


*Figura 2.21: Representació d'una vuitena part de rotor d'imants permanents interiors*

1: Carcassa
2: Ferro de l'estator
3: Dents de l'estator
4: Bobines de l'estator
5: Caps de bobina
6: Imants permanents c
7: Imants permanents p
8: Coixinets
9: Entreferro
10: Aire en els caps
11: Ferro del rotor
12: Eix

Donat la simetria de la màquina en l'eix radial, es pot dividir la màquina en dos. Això serà tingut en compte tant en el moment de trobar les resistències tèrmiques com en el moment d'aplicar les pèrdues com a fonts de corrent. En l'estudi del rotor es divideix en vuit, per simetria.

L'esquema tèrmic equivalent resultant per al motor d'imants permanents interiors queda de la següent forma:

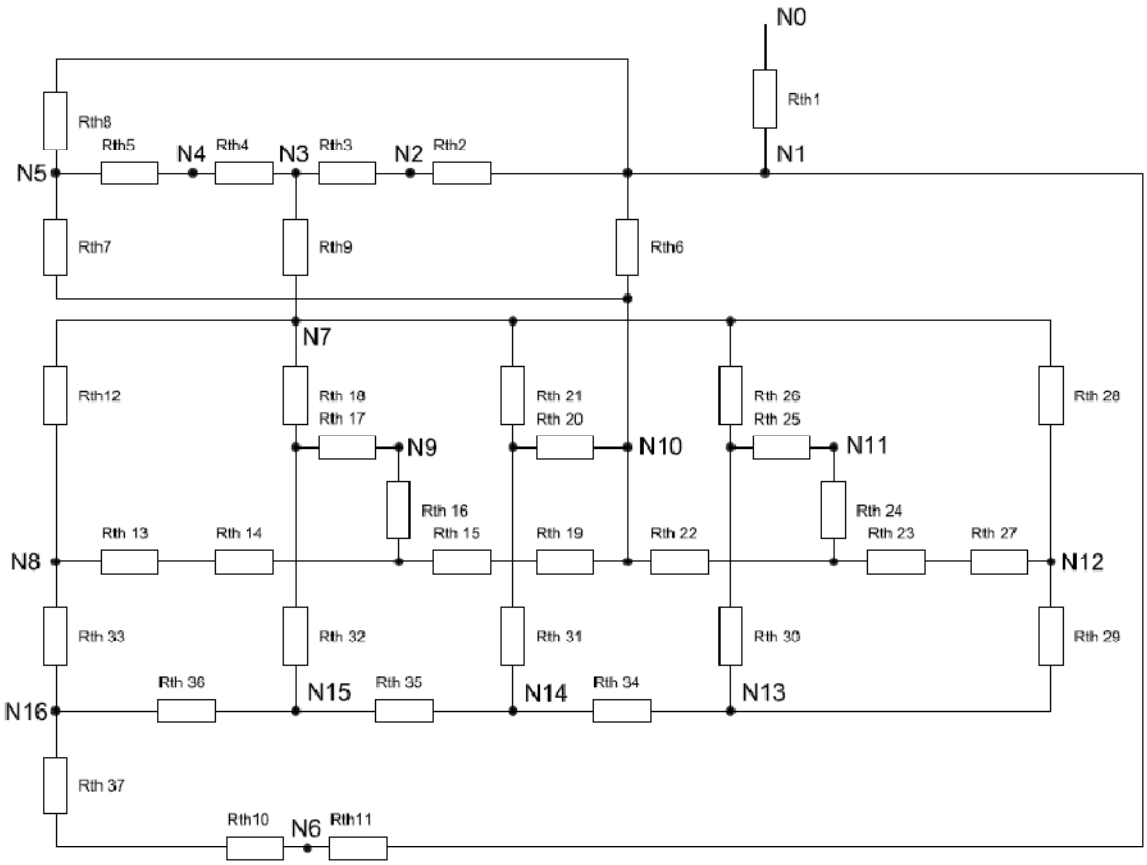


*Figura 2.22: Esquema tèrmic equivalent per al motor d'imants permanents interiors*

Els nodes numerats representen els punts mig de temperatura de cada component estudiat. Els components que no tenen cap node assignat es considera que no és d'interès estudiar la temperatura en la que es troben.

L'esquema tèrmic equivalent del motor d'imants interiors s'ha obtingut a partir de l'esquema tèrmic equivalent del motor d'imants exteriors modificant el rotor.

### 2.7.1. Camisa d'aigua - Carcassa

Es considera com a carcassa el cilindre tancat que recobreix l'estator. En el motor estudiat la carcassa conté una camisa d'aigua.

La resistència tèrmica de la carcassa és la oposició al pas de calor entre la camisa d'aigua i l'estator. Es pot obtindre a partir de l'equació 2.3.

$$R_{\mathrm{thfr}} = \frac{h_{\mathrm{fr}}}{2 \cdot \pi \cdot l_{\mathrm{fe}} \cdot \lambda_{\mathrm{al}} \cdot \left(\frac{D_{\mathrm{se}}}{2} + h_{\mathrm{fr}}\right)} \tag{2.155}$$

On:
$h_{fr}$: Espai mig entre l'estator i la camisa d'aigua [m]
$l_{fe}$: Longitud de l'estator [m]
$\lambda_{al}$: Conductivitat tèrmica del material de la carcassa [W/(m·K)]
$D_{se}$: Diàmetre exterior de l'estator [m]

En aquest cas situem el punt mig de calor en el centre de la carcassa. La resistència tèrmica entre la camisa d'aigua i el centre de la carcassa queda:

$$Rth1 = \frac{1}{2} \cdot R_{\mathrm{thfr}} \tag{2.156}$$

On:
$R_{thfr}$: Resistència tèrmica de la carcassa [K/W]

### 2.7.2. Carcassa – Ferro de l'estator

Entre el punt mig de la carcassa i el punt mig del ferro de l'estator tenim la contribució de tres resistències tèrmiques.

A partir de l'equació 2.28 obtenim $R_{they}$, que és la resistència tèrmica entre la carcassa i el ferro de l'estator.

$$R_{\text{they}} = \frac{1}{\lambda_{\text{cont}} \cdot Ag} \tag{2.157}$$

On:
$\lambda_{cont}$: Coeficient de contacte [W/(m$^2$·K)]
Ag: Àrea de contacte entre carcassa i estator [m$^2$]

A partir de l'equació 2.3 obtenim $R_{thys}$, que és la resistència tèrmica del ferro de l'estator, entre la carcassa i les dents de l'estator.

$$R_{\text{thys}} = \frac{\ln\left(\frac{Dse}{2}\right) - \ln\left(\frac{Ds}{2} + hs\right)}{2 \cdot \pi \cdot l_{\text{fe}} \cdot k_{\text{fe}} \cdot \lambda_{\text{fe}}} \tag{2.158}$$

On:
$D_{se}$: Diàmetre exterior de l'estator [m]
Ds: Diàmetre interior de l'estator [m]
hs: Alçada de les dents de l'estator [m]
$l_{fe}$: Longitud de l'estator [m]
$k_{fe}$: Factor d'apilament
$\lambda_{fe}$:Conductivitat tèrmica del laminat en direcció radial [W/(m·K)]

La resistència tèrmica equivalent entre el centre de la carcassa i el centre del ferro de l'estator queda de la forma següent:

$$Rth2 = \frac{1}{2} \cdot R_{\text{thys}} + \frac{1}{2} \cdot R_{\text{thfr}} + R_{\text{they}} \tag{2.159}$$

On:
$R_{thys}$: Resistència tèrmica del ferro de l'estator [K/W]
$R_{thfr}$: Resistència tèrmica de la carcassa [K/W]
$R_{they}$: Resistència tèrmica de contacte entre la carcassa i el ferro de l'estator [K/W]

### 2.7.3. Ferro de l'estator – Dents de l'estator

Entre el punt mig del ferro de l'estator i el punt mig de les dents de l'estator tenim la contribució de dues resistències tèrmiques.

La resistència tèrmica que descriu una dent depèn de la forma d'aquesta. A continuació es mostra la forma típica de dent i l'equació resultant de la integració de l'àrea d'aquesta.

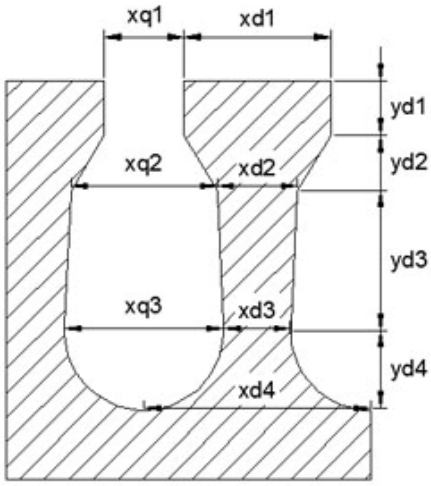


*Figura 2.23: Forma típica d'una dent de l'estator*

$$a = \frac{xd3 + 2 \cdot yd4}{2 \cdot yd4} \tag{2.160}$$

$$R_{\text{thd}} = \frac{1}{\lambda_{\text{fe}} \cdot Qs \cdot l_{\text{fe}} \cdot k_{\text{fe}}} \cdot \left[\frac{yd1}{xd1} + \frac{yd3}{xd3} + \frac{yd2}{xd1 - xd2} \cdot \left(ln\left|\frac{xd1 \cdot yd2}{xd1 - xd2}\right| - ln\left|yd2 - \left(\frac{xd1 \cdot yd2}{xd1 - xd2}\right)\right|\right) - \frac{\pi}{4} + \frac{a}{\sqrt{a^2 - 1}} \cdot \arctan\left(\frac{a + 1}{\sqrt{a^2 - 1}}\right)\right] \tag{2.161}$$

On:
Qs: Nombre de ranures de l'estator
$l_{fe}$: Longitud de l'estator [m]
$k_{fe}$: Factor d'apilament
$\lambda_{fe}$:Conductivitat tèrmica del laminat en direcció radial [W/(m·K)]
xd1,xd2,xd3,xd4,yd1,yd2,yd3,yd4: Mesures de ranura descrites en la figura 2.13 [m]

La resistència tèrmica entre el punt mig del ferro de l'estator i el punt mig de les dents de l'estator queda de la següent forma:

$$Rth3 = \frac{1}{2} \cdot (R_{\text{thys}} + R_{\text{thd}}) \tag{2.162}$$

On:
$R_{thys}$: Resistència tèrmica del ferro de l'estator [K/W]
$R_{thd}$: Resistència tèrmica del ferro de les dents de l'estator [K/W]

### 2.7.4. Dents de l'estator – Bobines de l'estator

Entre el punt mig de les dents de l'estator i el punt mig de les bobines de l'estator, tenim diverses resistències tèrmiques equivalents als diversos materials que recobreixen el coure. A demés tenim la contribució del coure i del laminat de les ranures. Per a simplificar la geometria de la ranura direm que és de forma rectangular.

Les dimensions equivalents del rectangle són:

$$b = \frac{xq3 + xq2}{2} - 2 \cdot d \tag{2.163}$$

$$h = \frac{2 \cdot Aq}{xq3 + xq2} - 2 \cdot d \tag{2.164}$$

On el material que forma la ranura contribueix de la següent forma:

$$Rxo = \frac{b}{h \cdot \lambda_{\mathrm{Q}}} \tag{2.165}$$

$$Ryo = \frac{h}{b \cdot \lambda_{\mathrm{Q}}} \tag{2.166}$$

L'aïllament de la ranura i l'aire de la ranura contribueix amb:

$$Rix = \frac{di}{h + \lambda i} + \frac{dA}{h + \lambda A} \tag{2.167}$$

$$Riy = \frac{di}{b + \lambda i} + \frac{dA}{b + \lambda A} \tag{2.168}$$

La resistència per unitat de longitud és:

$$Rx = \frac{1}{2} \cdot \left( Rix + \frac{Rxo}{6} \right) \tag{2.169}$$

$$Ry = \frac{1}{2} \cdot \left( Riy + \frac{Ryo}{6} \right) \tag{2.170}$$

Un cop simplificada la geometria i materials la resistència tèrmica equivalent entre les dents de l'estator i les bobines de l'estator queda de la següent forma.

$$Rth4 = \frac{Rx \cdot Ry}{Qs \cdot l_{\mathrm{fe}} \cdot k_{\mathrm{fe}} \cdot (Rx + Ry)} \cdot \left(1 - \frac{Rxo \cdot Ryo}{720 \cdot Rx \cdot Ry}\right) \tag{2.171}$$

On:
Qs: Nombre de ranures de l'estator
$l_{fe}$: Longitud de l'estator [m]
$k_{fe}$: Factor d'apilament
$\lambda_i$:Conductivitat tèrmica de l'aïllament de ranura [W/(m·K)]
$\lambda_v$:Conductivitat tèrmica del vernís del coure [W/(m·K)]
di: Gruix de l'aïllament de ranura [m]
dA: Gruix del vernís del coure [m]
Aq: Secció del coure en cada ranura de l'estator [$m^2$]
xq2,xq3: Mesures de ranura descrites en la figura 2.13 [m]

### 2.7.5. Bobines de l'estator – Caps de bobina

La transferència de calor del centre de l'estator cap als caps de bobina es du a terme a través del coure de les bobines. Un dels factors més importants en els caps de bobina és la longitud de la bobina. La longitud de mitja bobina per a màquines elèctriques petites es pot trobar amb l'expressió següent:

$$l_{\mathrm{av}} = l_{\mathrm{fe}} + 1{,}2 \cdot pip + 0{,}05 \tag{2.172}$$

On:
$l_{fe}$: Longitud de l'estator [m]
pip: Pas polar [m]

Coneixent la longitud de mitja bobina i l'equació de conducció de calor obtenim:

$$R_{\mathrm{thw}} = \frac{l_{\mathrm{av}}}{3 \cdot A_{\mathrm{cu}} \cdot \lambda_{\mathrm{cu}}} \tag{2.173}$$

$$Rth5 = \frac{R_{\mathrm{thw}}}{2 \cdot Qs} \tag{2.174}$$

On:
$l_{av}$: Longitud de mitja bobina [m]

$A_{cu}$: Secció del coure d'una bobina [$m^2$]
$\lambda_{cu}$:Conductivitat tèrmica del coure [W/(m·K)]
Qs: Nombre de ranures

### 2.7.6. Carcassa – Aire en els caps

La transferència de calor entre la carcassa i l'aire en els caps es realitza per mitjà de convecció. La resistència tèrmica equivalent s'obté a partir de l'equació 2.8 i el seu coeficient de convecció segons l'equació 2.23.

$$\alpha_1 = 15 + 6{,}75^{0{,}65} \cdot v_{\mathrm{r}}{}^{0{,}65} \tag{2.175}$$

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1 \cdot A_1} \tag{2.176}$$

On:
$v_r$: Velocitat del fluid en els caps, equació 2.22 [m/s]
$A_1$: Àrea de contacte entre la carcassa i l'aire en els caps [$m^2$]

Com que no és interessant conèixer la temperatura assolida per l'aire dels caps es redueix aquest node utilitzant una conversió estrella – triangle. R1,R2 i R3 seran les resistències tèrmiques en estrella i Rth6, Rth7 i Rth8 seran les resistències tèrmiques en triangle.

### 2.7.7. Rotor – Aire en els caps

La transferència de calor entre el rotor i l'aire en els caps es realitza per mitjà de convecció. La resistència tèrmica equivalent s'obté a partir de l'equació 2.8 i el seu coeficient de convecció segons l'equació 2.24.

$$\alpha_2 = 16{,}5^{0{,}65} \cdot v_{\mathrm{r}}{}^{0{,}65} \tag{2.177}$$

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_2 \cdot A_2} \tag{2.178}$$

On:
$v_r$: Velocitat del fluid en els caps, equació 2.22 [m/s]
$A_2$: Àrea de contacte entre el rotor i l'aire en els caps [$m^2$]

Com que no és interessant conèixer la temperatura assolida per l'aire dels caps es redueix aquest node utilitzant una conversió estrella – triangle.

R1,R2 i R3 seran les resistències tèrmiques en estrella i Rth6, Rth7 i Rth8 seran les resistències tèrmiques en triangle.

### 2.7.8. Caps de bobina – Aire en els caps

La transferència de calor entre els caps de bobina i l'aire en els caps es realitza per mitjà de convecció. La resistència tèrmica equivalent s'obté a partir de l'equació 2.8 i el seu coeficient de convecció segons l'equació 2.25.

$$\alpha_3 = 6{,}5 + 5{,}25^{0{,}6} \cdot v_{\mathrm{r}}{}^{0{,}6} \tag{2.179}$$

$$R_3 = \frac{1}{\alpha_3 \cdot A_3} \tag{2.180}$$

On:
$v_r$: Velocitat del fluid en els caps. Equació 2.22 [m/s]
$A_3$: Àrea de contacte entre els caps de bobina i l'aire en els caps [$m^2$]

Com que no és interessant conèixer la temperatura assolida per l'aire dels caps es redueix aquest node utilitzant una conversió estrella – triangle. R1,R2 i R3 seran les resistències tèrmiques en estrella i Rth6, Rth7 i Rth8 seran les resistències tèrmiques en triangle.

### 2.7.9. Dents de l'estator – Superfície del rotor

Entre el centre de les dents de l'estator i la superfície del rotor tenim dues resistències tèrmiques. Corresponents a l'aire de l'entreferro i les dents de l'estator.

La calor es transmet a través de l'entreferro per mitjà de convecció, radiació i conducció. El fenomen de radiació es pot negligir per la poca diferència de temperatura entre la superfície dels imants i de les dents de l'estator. Per conèixer la naturalesa de l'aire en l'entreferro utilitzarem el nombre de Taylor, equació 2.20 i el nombre de Nusselt, equació 2.15. La resistència tèrmica de l'entreferro entre rotor i estator queda:

$$\alpha_\delta = \frac{Nu \cdot \lambda_{\mathrm{air}}}{2 \cdot \delta} \tag{2.181}$$

$$R_{\mathrm{th}\delta} = \frac{1}{\alpha_\delta \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{D_\delta}{2} \cdot l_{\mathrm{fe}}} \tag{2.182}$$

On:
$\lambda_{air}$: Conductivitat tèrmica de l'aire [W/(m·K)]
δ: Gruix de l'entreferro [m]
$\alpha_{\delta}$: Coeficient de transferència de calor a través de l'entreferro [W/(m$^2$·K)]
$D_{\delta}$: Diàmetre de l'entreferro [m]
$l_{fe}$: Longitud de l'estator [m]

Aplicant les contribucions de les diverses resistències tèrmiques trobem la resistència tèrmica entre el centre les dents de l'estator i la superfície del rotor.

$$Rth9 = R_{\text{th}\delta} + \frac{1}{2} \cdot R_{\text{thd}} \tag{2.183}$$

On:
$R_{th\delta}$: Resistència tèrmica de l'entreferro [K/W]
$R_{thd}$: Resistència tèrmica de les dents de l'estator [K/W]

### 2.7.10. Rotor – Coixinets

Entre el rotor i el centre dels coixinets tenim la contribució de diverses resistències tèrmiques.

Entre el laminat del rotor i l'eix ens queda una zona irregular, en la que tindrem bosses d'aire de dimensions microscòpiques. Aquest fet és tingut en compte com una resistència tèrmica per contacte.

$$R_{\text{thcr}} = \frac{1}{\lambda_{\text{cont2}} \cdot A_{\text{shaft}}} \tag{2.184}$$

On:
$\lambda_{cont2}$: Coeficient de contacte entre el laminat del rotor i l'eix [W/m$^2$·K]
$A_{shaft}$: Àrea de contacte entre el laminat del rotor i l'eix [m$^2$]

L'eix contribueix amb una resistència tèrmica en direcció axial. A partir de l'equació 2.3 trobem:

$$R_{\text{thsh}} = \frac{l_{\text{bb}}}{\pi \cdot \left(\frac{Dri}{2}\right)^2 \cdot \lambda_{\text{sh}}} \tag{2.185}$$

On:
$l_{bb}$: Distància entre els dos coixinets de la màquina [m]
Dri: Diàmetre interior del rotor [m]
$\lambda_{sh}$: Conductivitat tèrmica de l'acer de l'eix [W/(m·K)]

Els coixinets són uns components compostos per diversos elements en contacte. En els coixinets un dels elements més significatius en la conducció de calor és la grassa. Degut al continu moviment de l'element és complicat trobar una equació analítica, per el que es defineix la resistència tèrmica dels coixinets com una resistència tèrmica per contacte.

$$R_{\mathrm{thb}} = \frac{\lambda_{\mathrm{cont3}}}{4 \cdot \pi \cdot \frac{Db}{2} \cdot l_{\mathrm{b}}} \tag{2.186}$$

On:
$\lambda_{cont3}$: Coeficient de contacte per als coixinets [W/m$^2$·K]
Db: Diàmetre dels coixinets [m]
lb: Longitud dels coixinets [m]

Entre el centre dels imants permanents fins al centre dels coixinets tenim una resistència tèrmica expressada de la següent forma:

$$Rth10 = R_{\mathrm{thcr}} + \frac{1}{2} \cdot R_{\mathrm{thsh}} + \frac{1}{4} \cdot R_{\mathrm{thb}} \tag{2.187}$$

On:
$R_{thcr}$: Resistència tèrmica per contacte entre rotor i eix [K/W]
$R_{thsh}$: Resistència tèrmica de l'eix en direcció axial [K/W]
$R_{thb}$:Resistència tèrmica dels coixinets [K/W]

### 2.7.11. Coixinets - Carcassa

Des de el centre dels coixinets a la carcassa sols tindrem en compte la resistència tèrmica dels coixinets. Que per simetria resulta:

$$Rth11 = \frac{1}{4} \cdot R_{\mathrm{thb}} \tag{2.188}$$

On:
$R_{thb}$: Resistència tèrmica dels coixinets [K/W]

### 2.7.12. Rotor

El rotor és modelat com un cilindre compost per diversos materials. Tots els elements que componen el rotor són sòlids que transmeten el calor per conducció. Els imants permanents són els components més interessants que conté el rotor. No es considera la transferència de calor axial.

El rotor de mostra és de 2 parells de pols, divisible per simetria en 8 parts.

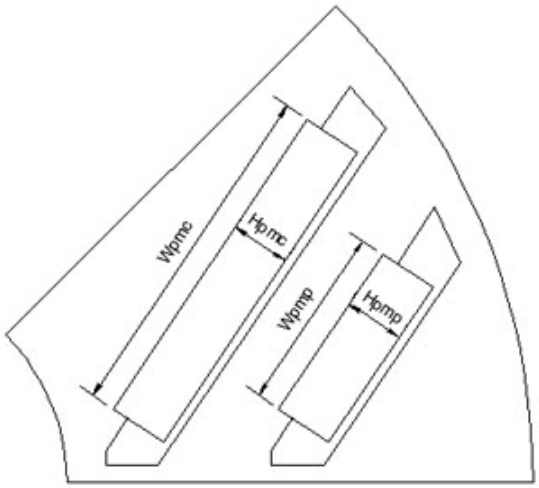


*Figura 2.24:Dimensions dels imants del rotor*

Les resistències tèrmiques per als imants permanents del rotor es descriuen amb les equacions següents:

$$Rth32 = \frac{Wpmc}{(8 \cdot p \cdot \lambda_{\mathrm{pm}} \cdot l_{\mathrm{fe}} \cdot Hpmc)} \tag{2.189}$$

$$Rth17 = -\frac{1}{3} \cdot Rth32 \tag{2.190}$$

$$Rth14 = \frac{Hpmc}{8 \cdot p \cdot \lambda_{\mathrm{pm}} \cdot l_{\mathrm{fe}} \cdot Wpmc} \tag{2.191}$$

$$Rth15 = Rth14 \tag{2.192}$$

$$Rth16 = -\frac{1}{3} \cdot Rth14 \tag{2.193}$$

$$Rth30 = \frac{Wpmp}{8 \cdot p \cdot \lambda_{\mathrm{pm}} \cdot l_{\mathrm{fe}} \cdot Hpmp} \tag{2.194}$$

$$Rth25 = -\frac{1}{3} \cdot Rth30 \tag{2.195}$$

$$Rth22 = \frac{Hpmp}{8 \cdot p \cdot \lambda_{\mathrm{pm}} \cdot l_{\mathrm{fe}} \cdot Wpmp} \tag{2.196}$$

$$Rth23 = Rth22 \tag{2.197}$$

$$Rth24 = -\frac{1}{3} \cdot Rth22 \tag{2.198}$$

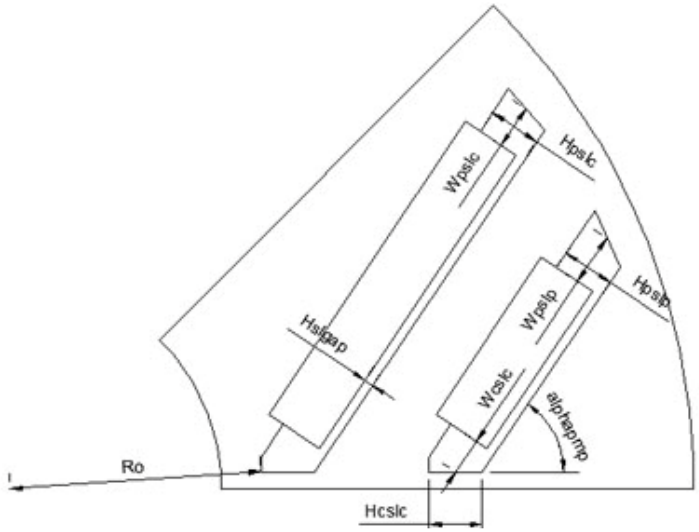


*Figura 2.25: Dimensions de l'aïllament que sosté els imants*

Les resistències tèrmiques de l'aïllament que sosté els imants es descriuen amb les equacions següents:

$$R_{\mathrm{pslcrad}} = \frac{Wpslc}{4 \cdot p \cdot \lambda_{\mathrm{sl}} \cdot l_{\mathrm{fe}} \cdot Hpslc} \tag{2.199}$$

$$Rth19 = \frac{Hslgap}{4 \cdot p \cdot \lambda_{\mathrm{sl}} \cdot l_{\mathrm{fe}} \cdot Wpmc} \tag{2.200}$$

$$R_{\mathrm{pslprad}} = \frac{Wpslp}{4 \cdot p \cdot \lambda_{\mathrm{sl}} \cdot l_{\mathrm{fe}} \cdot Hpslp} \tag{2.201}$$

$$Rth27 = \frac{Hslgap}{4 \cdot p \cdot \lambda_{\mathrm{sl}} \cdot l_{\mathrm{fe}} \cdot Wpmp} \tag{2.202}$$

$$R_{\mathrm{cslctg}} = \frac{Hcslc}{8 \cdot p \cdot \lambda_{\mathrm{sl}} \cdot l_{\mathrm{fe}} \cdot Wcslc \cdot \sin(alphapmp)} \tag{2.203}$$

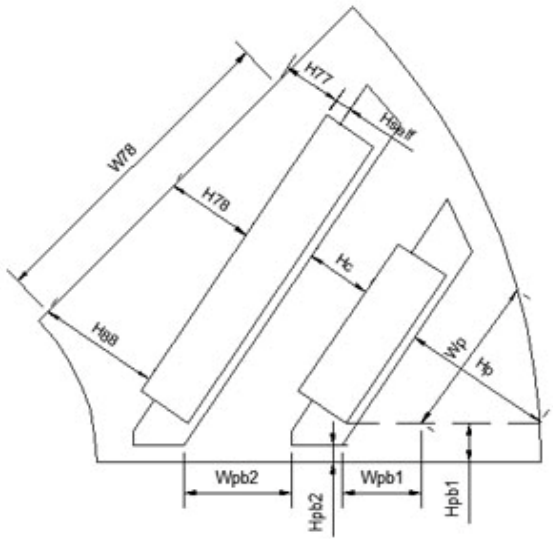


*Figura 2.26: Dimensions de la xapa del rotor*

Les resistències tèrmiques per a la xapa del rotor es descriuen amb les equacions següents:

$$Rth33 = \frac{W78}{8 \cdot p \cdot \lambda_{\text{fe}} \cdot l_{\text{fe}} \cdot \frac{H88 + H78}{2}} \tag{2.204}$$

$$R_{\text{rotqp1}} = \frac{W78}{8 \cdot p \cdot \lambda_{\text{fe}} \cdot l_{\text{fe}} \cdot \frac{H78 + H77}{2}} \tag{2.205}$$

$$Rth13 = -\frac{Rth33 + R_{\text{rotqp1}}}{6} \tag{2.206}$$

$$R_{\text{rotqp2}} = \frac{Wcslc}{4 \cdot p \cdot \lambda_{\text{fe}} \cdot l_{\text{fe}} \cdot H77} \tag{2.207}$$

$$Rth21 = \frac{\frac{Wpmc}{2} + \frac{Wpmp}{2} + Wpslc + Wpslp}{8 \cdot p \cdot \lambda_{\text{fe}} \cdot l_{\text{fe}} \cdot (Hc + Hself)} \tag{2.208}$$

$$Rth31 = \frac{Wpmc + Wpmp + Wcslc}{16 \cdot p \cdot \lambda_{\text{fe}} \cdot l_{\text{fe}} \cdot (Hc + Hself)} \tag{2.209}$$

$$Rth20 = -\frac{Rth31 + Rth21}{6} \tag{2.210}$$

$$Rth28 = \frac{Wp}{8 \cdot p \cdot \lambda_{\text{fe}} \cdot l_{\text{fe}} \cdot Hp} \tag{2.211}$$

$$R_{\text{rotdc1}} = Rth28 \tag{2.212}$$

$$R_{\text{rotdc2}} = \frac{Wpb1}{8 \cdot p \cdot \lambda_{\text{fe}} \cdot l_{\text{fe}} \cdot Hpb1} \tag{2.213}$$

$$R_{\text{rotdc3}} = \frac{Hcslc}{8 \cdot p \cdot \lambda_{\text{fe}} \cdot l_{\text{fe}} \cdot Hpb2} \tag{2.214}$$

$$R_{\text{rotdc4}} = \frac{Wpb2}{8 \cdot p \cdot \lambda_{\text{fe}} \cdot l_{\text{fe}} \cdot Hpb1} \tag{2.215}$$

$$Rth37 = 8 \cdot \frac{\ln\left(\frac{Ro}{Ri}\right)}{8 \cdot p \cdot \pi \cdot l_{\text{fe}} \cdot \lambda_{\text{fe}}} \tag{2.216}$$

$$Rth12 = R_{\text{rotqp1}} + R_{\text{rotqp2}} \tag{2.217}$$

Per a simplificar el circuit tèrmic s'utilitzen unions de resistències en sèrie i paral·lel.

$$Rth18 = Rth30 + R_{\text{pslcrad}} \tag{2.218}$$

$$R_{\text{pmctgmid}} = Rth15 + Rth19 \tag{2.219}$$

$$Rth26 = Rth30 + R_{\text{pslprad}} \tag{2.220}$$

$$R_{\text{pmptgd}} = Rth23 + Rth27 \tag{2.221}$$

$$Rth29 = R_{\text{rotdc1}} + R_{\text{rotdc2}} + \frac{R_{\text{cslctg}} \cdot R_{\text{rotdc3}}}{R_{\text{cslctg}} + R_{\text{rotdc3}}} \tag{2.222}$$

$$Rth34 = R_{\text{rotdc4}} + \frac{R_{\text{cslctg}} \cdot R_{\text{rotdc3}}}{R_{\text{cslctg}} + R_{\text{rotdc3}}} \tag{2.223}$$

$$Rth35 = Rth34 \tag{2.224}$$

$$Rth36 = \frac{R_{\text{cslctg}} \cdot R_{\text{rotdc3}}}{R_{\text{cslctg}} + R_{\text{rotdc3}}} \tag{2.225}$$

On:
Hpmp, Hpmc, Wpmp, Wpmc: Dimensions dels imants del rotor segons figura 2.24 [m]
Wpslc, Hpslc, Wpslp, Hpslp, Wcslc, Hcslc, Hslgap, Ro: Dimensions de l'aïllament que sosté els imants segons figura 2.25 [m]
Hself, Wp, Hp, Hc, Hpb1, Hpb2, Wpb1, Wpb2, H88, H77, H78, W78: dimensions de la xapa del rotor segons figura 2.26 [m]
alphapmp: Angle d'inclinació dels imants [rad]
Ri: Radi de l'eix [m]
$l_{fe}$: Longitud de l'estator [m]
$\lambda_{pm}$: Conductivitat tèrmica dels imants [W/(m·K)]
$\lambda_{sl}$: Conductivitat tèrmica de l'aïllament que sosté els imants [W/(m·K)]

$\lambda_{fe}$: Conductivitat tèrmica del laminat del rotor en direcció radial [W/(m·K)]
p: Nombre de parell de pols

# CAPÍTOL 3: PROGRAMARI D'ANÀLISI TÈRMIC

El programa d'anàlisi tèrmic és una eina destinada al disseny de motors elèctrics. En aquest cas consta de vàries pantalles en les quals es poden entrar les dades conegudes de forma, materials, pèrdues i obtenir les sortides en forma de temperatura. El programa permet guardar les dades per a usos posteriors.

## 3.1. ELECCIÓ DEL MOTOR

En iniciar el programa la primera imatge que ens apareix és una pantalla en la que tenim un botó per a cada model de màquina. Un click sobre el botó ens dona pas a la pantalla d'entrada de dades.

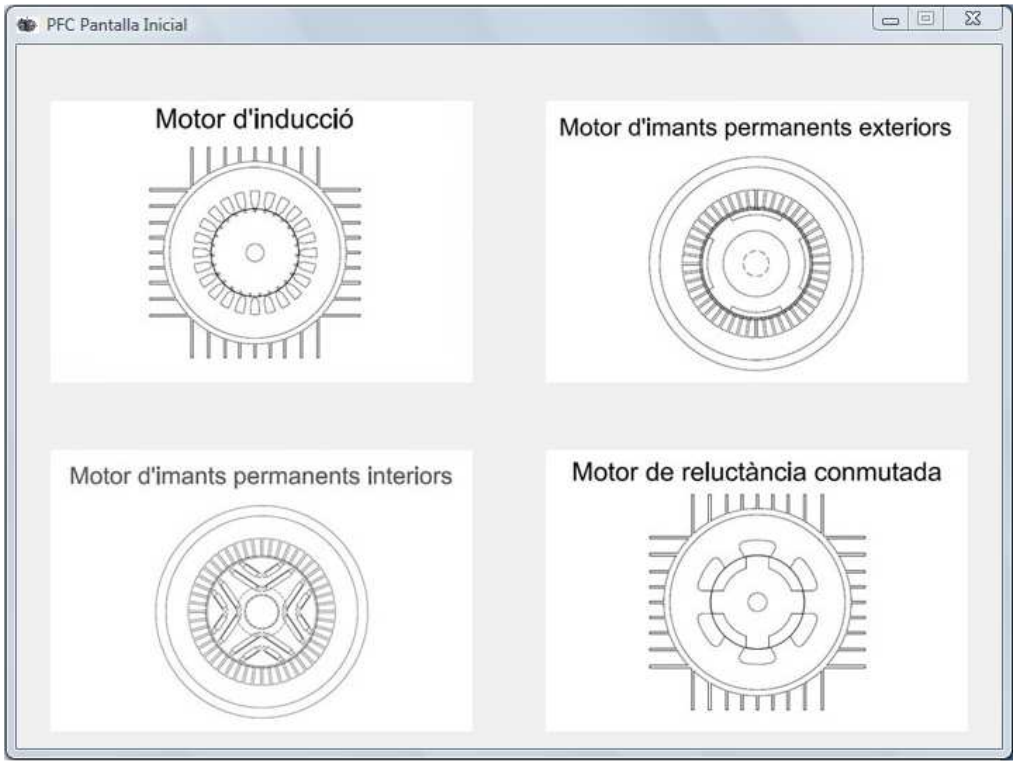


*Figura 3.1: Pantalla d'elecció del model de motor*

## 3.2. ENTRADA DE DADES

L'entrada de dades de la màquina es pot fer per mitjà de 3 mètodes: Carregant la màquina per defecte, entrant les dades en les caselles de dades o carregant una màquina prèviament guardada.

En cada model de màquina elèctrica tenim diverses pantalles d'entrada de dades. En entrar en una casella obtenim una ajuda sobre la dada que es demana. A continuació es mostra una pantalla exemple d'entrada de dades.

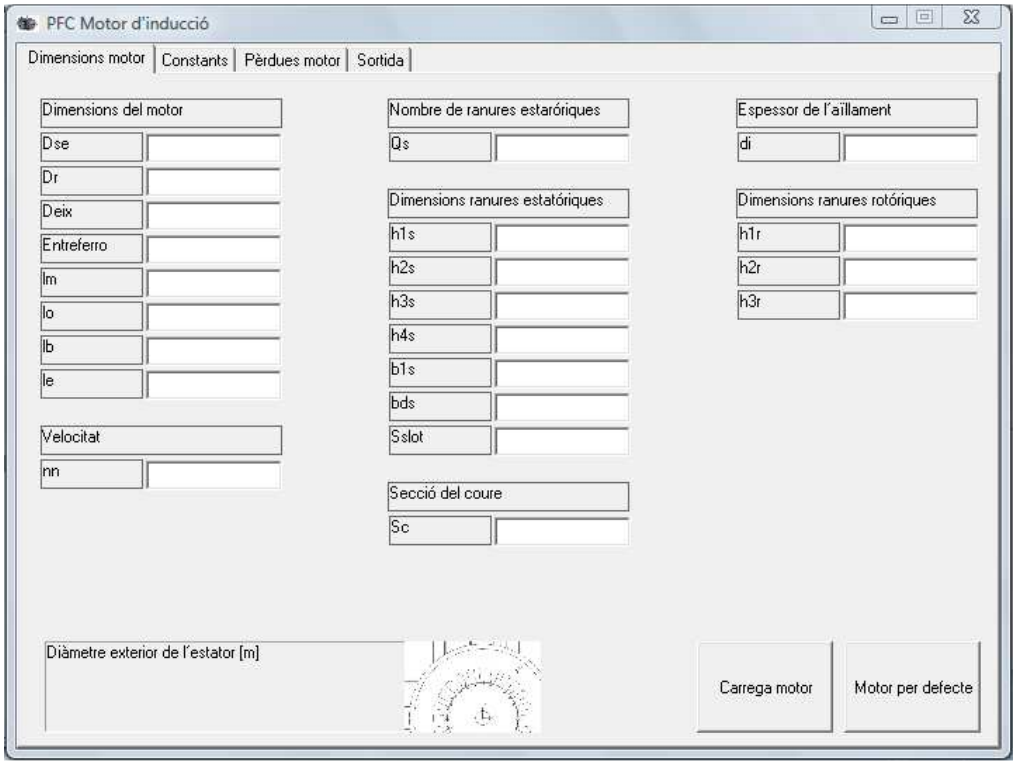


*Figura 3.2: Exemple de pantalla d'entrada de dades*

És interessant guardar les dades dels diferents models i posteriorment poder-los recuperar. Per aquest motiu el programa disposa d'una eina de càrrega d'arxius.

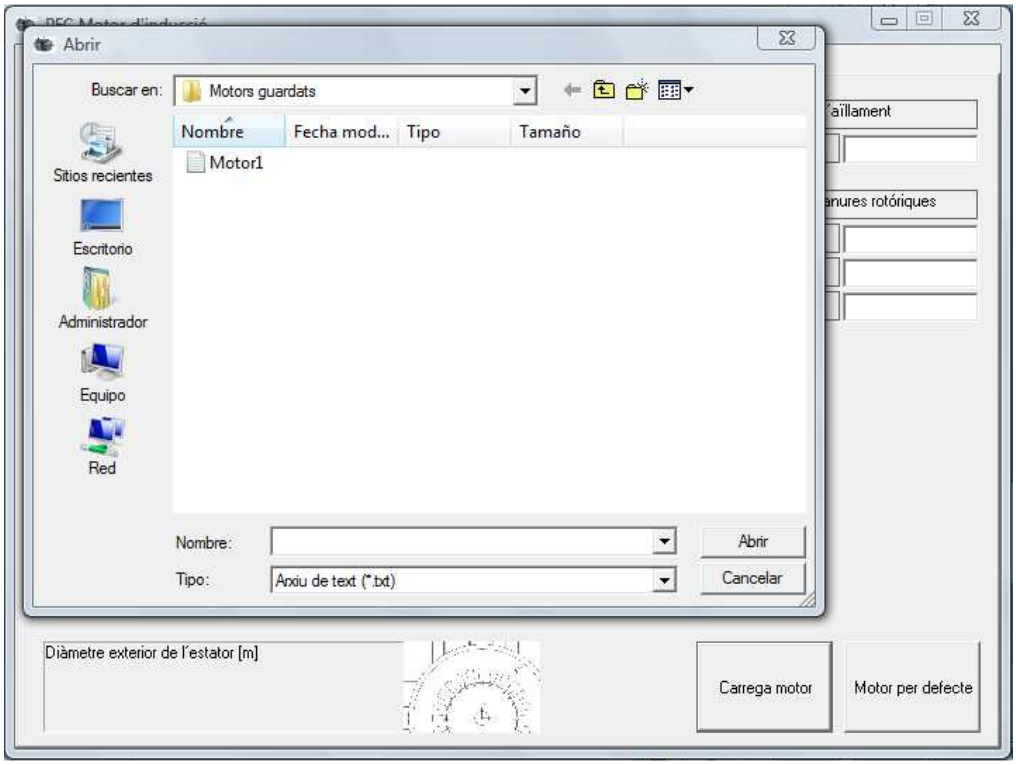


*Figura 3.3: Exemple de pantalla de càrrega d'arxiu*

## 3.3. SORTIDA DE DADES

Les dades de sortida es mostren en la pantalla sortida, desprès de prémer el botó calcular. Aquestes dades es poden guardar en un arxiu amb format .txt i es poden imprimir des de l'arxiu creat.

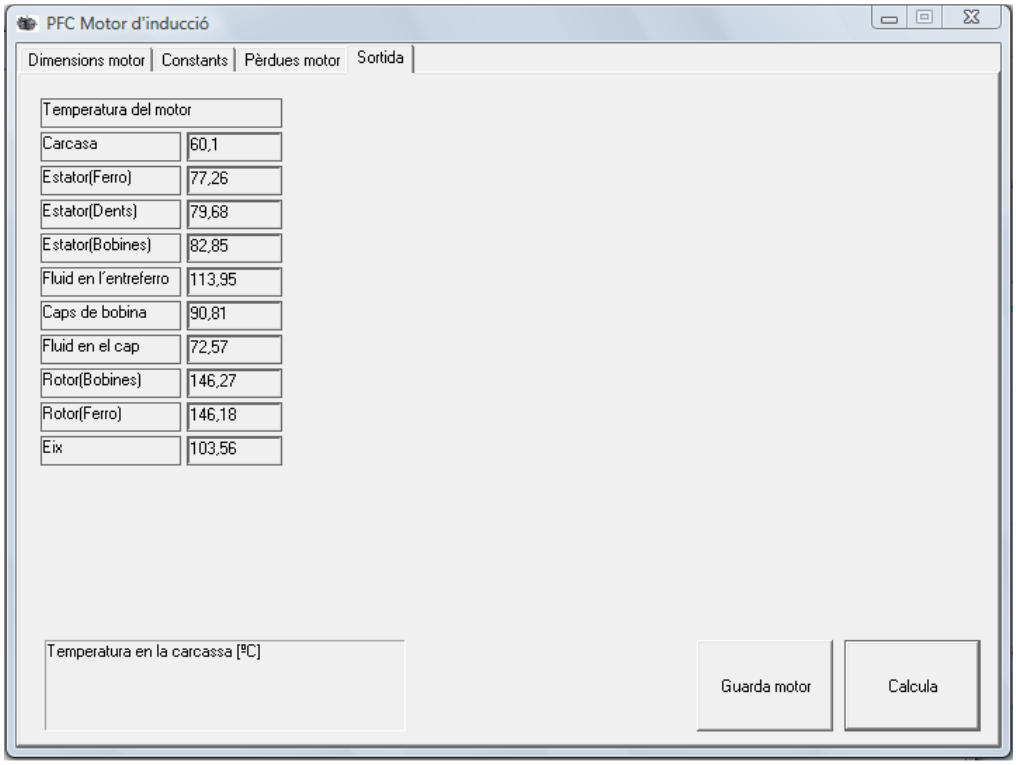


*Figura 3.4: Exemple de pantalla de sortida de dades*

Els arxius creats com a mostra es troben en el CD, junt amb el programa.

# CAPÍTOL 4: COMPARATIVA AMB ALTRES PRODUCTES DEL MERCAT

Per a justificar el correcte funcionament del programa i dels esquemes escollits es compara el programa creat amb un programa comercial anomenat Motor-CAD v3.1. El programa Motor-CAD està testejat i demostrat a partir d'assajos amb motors de diverses característiques.

Considerarem que els valors obtinguts del programa Motor-CAD són els valors reals de la màquina i els nostres són els valors a comprovar. Es compararà un motor de cada model.

# 4.1. COMPARATIVA PER AL MOTOR D'INDUCCIÓ

## 4.1.1. Dades per al motor d'inducció

**Dimensions del motor**
Diàmetre exterior de l'estator: 0,174 m
Diàmetre exterior del rotor: 0,089 m
Entreferro entre rotor i estator: 0,0005 m
Diàmetre de l'eix: 0,018 m
Longitud entre el centre del coixinet i el centre del rotor: 0,09 m
Part del bobinat que sobresurt de la ranura: 0,05 m
Longitud del coixinet: 0,025 m
Longitud de l'estator: 0,12 m

**Velocitat**
Velocitat nominal de gir: 2870 rpm

**Nombre de ranures estatòriques**
Nombre de dents de l'estator: 24

**Dimensions ranures estatòriques**
Dimensió de les dents de l'estator h1s: 0,00105 m
Dimensió de les dents de l'estator h2s: 0,00376 m
Dimensió de les dents de l'estator h3s: 0 m
Dimensió de les dents de l'estator h4s: 0,01269 m
Dimensió de les dents de l'estator b1s: 0,00745 m
Gruix de les dents de l'estator bds: 0,0056 m
Secció de les ranures de l'estator: 0,000122 m^2

**Secció del coure**
Secció del coure de les dents de l'estator: 3,4E-5 m^2

**Espessor de l'aïllament**
Espessor de l'aïllament de les dents de l'estator: 0,0005 m

**Dimensions de les ranures rotòriques**
Dimensió de les dents del rotor h1r: 0,0004 m
Dimensió de les dents del rotor h2r: 0 m
Dimensió de les dents del rotor h3r: 0,01978 m

**Característiques del fluid**
Coeficient d'expansió termal per al fluid exterior a la màquina: 0,0032 1/K
Viscositat cinemàtica del fluid a l'exterior de la màquina: 1,6E-5 m^2/s
Viscositat cinemàtica del fluid en l'entreferro: 1,6E-5 m^2/s
Número de Prandtl per al fluid exterior a la màquina: 0,708

**Eficiència del ventilador**
Eficiència del ventilador: 0,5

**Coeficients de contacte**
Coeficient de contacte entre carcassa i nucli: 400 W/(m^2*K)

**Coeficients de conductivitat**
Conductivitat tèrmica radial del laminat: 39 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica axial del laminat: 4 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica de l'acer de l'eix: 40 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica del coure: 400 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica de l'alumini: 237 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica de l'aïllament de la ranura: 0,8 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica del vernís que cobreix el coure: 0,8 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica del fluid exterior a la màquina: 0,026 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica del fluid a l'interior de l'entreferro: 0,0235 W/(m*K)
Factor d'apilament del laminat: 0,97

**Temperatures esperades**
Temperatura ambient: 40 ºC

**Pèrdues del motor**
Pèrdues en el ferro de l'estator: 114,37 W
Pèrdues en les dents de l'estator: 10,21 W
Pèrdues addicionals: 54,21 W
Pèrdues Joule a l'estator: 198,76 W
Pèrdues Joule al rotor: 144,39 W

### 4.1.2. Resultats

Tant el programa creat en el PFC com el Motor-CAD ens proporcionen moltes dades de temperatura en els components. S'han escollit les més importants per a comparar els resultats obtinguts.

| Component | Temperatura segons Motor-CAD [ºC] | Temperatura segons el PFC [ºC] | Diferencia [ºC] |
|---|---|---|---|
| Carcassa | 66,39 | 60,10 | -6,29 |
| Ferro de l'estator | 74,73 | 77,26 | 2,53 |
| Dents de l'estator | 80,36 | 79,68 | -0,68 |
| Bobines de l'estator | 85,07 | 82,85 | -2,22 |
| Caps de bobina | 99,42 | 90,81 | -8,61 |
| Bobines del rotor | 147,10 | 146,27 | -0,83 |
| Ferro del rotor | 145,50 | 146,18 | -0,68 |
| Eix | 109,00 | 103,56 | -5,44 |

*Taula 4.1: Comparativa per al motor d'inducció*

# 4.2. COMPARATIVA PER AL MOTOR D'IMANTS PERMANENTS EXTERIORS

## 4.2.1. Dades per al motor d'imants permanents exteriors

**Refrigeració líquida**

**Dimensions del motor**
Diàmetre exterior de l'estator: 0,189 m
Diàmetre interior de l'estator: 0,11 m
Diàmetre exterior del rotor: 0,1071 m
Gruix de l'imant permanent: 0,005 m
Diàmetre de l'eix a l'interior del rotor: 0,0646 m
Diàmetre de l'eix a l'interior dels coixinets: 0,025 m
Gruix del material d'unió entre l'imant i el rotor: 0,0001 m
Diàmetre exterior dels coixinets: 0,05 m
Gruix mig de la carcassa entre estator i canals d'aigua: 0,01 m
Gruix del retenidor dels imants: 0,00075 m
Longitud de la màquina: 0,34 m
Longitud de l'estator: 0,231 m
Longitud dels coixinets: 0,025 m

**Dimensions ranures estatòriques**
Dimensió de les dents de l'estator yd1: 0,0004 m
Dimensió de les dents de l'estator yd2: 1E-7 m
Dimensió de les dents de l'estator yd3: 0,017 m
Dimensió de les dents de l'estator yd4: 1E-7 m

Dimensió de les dents de l'estator xd1: 0,005 m
Dimensió de les dents de l'estator xd2: 0,002 m
Dimensió de les dents de l'estator xd3: 0,002 m
Dimensió de les dents de l'estator xq1: 0,003 m
Dimensió de les dents de l'estator xq2: 0,0076 m
Dimensió de les dents de l'estator xq3: 0,0076 m
Àrea de cada ranura: 8,98E-5 m^2
Factor de plenitud de ranura: 0,45

**Espessor de l'aïllament**
Gruix de l'aïllament del coure: 0,0001 m
Gruix de l'aïllament de la ranura: 0,0003 m

**Nombre de ranures estatòriques**
Nombre de ranures estatòriques: 48

**Factor de recobriment polar**
Factor de recobriment polar: 0,65

**Nombre de parell de pols**
Nombre de parell de pols: 2

**Velocitat**
Velocitat del motor: 6000 rpm

**Coeficients de conductivitat**
Conductivitat tèrmica del material de la carcassa: 230 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica del laminat: 38 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica dels imants permanents: 7500 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica de l'acer de l'eix: 51 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica del coure: 395 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica de l'aïllament del coure: 0,2 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica de l'aïllament de la ranura: 0,03 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica del material entre l´imant permanent i el rotor: 0,5 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica del retenidor dels imants: 0,5 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica del fluid en l'entreferro: 0,0234 W/(m*K)

**Coeficients de contacte**
Coeficient de contacte entre la carcassa i l'estator: 700 W/(m^2*K)
Coeficient de contacte entre el rotor i l'eix: 1000 W/(m^2*K)

**Factor d'apilament**
Factor d'apilament: 0,965

**Característiques del fluid**
Viscositat cinemàtica del fluid en l'entreferro: 1,6E-5 m^2/s

**Temperatures esperades**
Temperatura del fluid refrigerant: 30 ºC

**Eficiència del ventilador**
Eficiència del ventilador: 0,5

**Pèrdues en el motor**
Pèrdues en el ferro de l'estator: 464 W
Pèrdues en les dents de l'estator: 387 W
Pèrdues en el coure dins l'estator: 822 W
Pèrdues en els caps de bobina: 513 W
Pèrdues en els imants permanents: 22 W
Pèrdues en els coixinets: 90 W

**Temperatura del motor**
Temperatura en la carcassa: 30,33 ºC
Temperatura en el ferro de l'estator: 54,91 ºC
Temperatura en les dents de l'estator: 74,79 ºC
Temperatura en les bobines de l'estator: 102,32 ºC
Temperatura en els caps de bobina: 134,82 ºC
Temperatura en els imants del rotor: 80,89 ºC
Temperatura en els coixinets: 65,45 ºC

### 4.1.2. Resultats

Tant el programa creat en el PFC com el Motor-CAD ens proporcionen moltes dades de temperatura en els components. S'han escollit les més importants per a comparar els resultats obtinguts.

| Component | Temperatura segons Motor-CAD [ºC] | Temperatura segons el PFC [ºC] | Diferencia [ºC] |
|---|---|---|---|
| Carcassa | 36,61 | 30,33 | -6,28 |
| Ferro de l'estator | 57,85 | 54,91 | -2,94 |
| Dents de l'estator | 83,07 | 74,79 | -8,28 |
| Bobines de l'estator | 113,20 | 102,32 | -10,88 |
| Caps de bobina | 128,80 | 134,82 | 6,02 |
| Imants | 91,55 | 80,89 | -10,66 |
| Coixinets | 51,20 | 65,45 | 14,25 |

*Taula 4.2: Comparativa per al motor d'imants permanents exteriors*

# 4.3. COMPARATIVA PER AL MOTOR D'IMANTS PERMANENTS INTERIORS

## 4.3.1. Dades per al motor d'imants permanents interiors

**Dimensions del motor**
Diàmetre exterior de l'estator: 0,189 m
Diàmetre interior de l'estator: 0,11 m
Diàmetre exterior del rotor: 0,1071 m
Diàmetre de l'eix a l'interior del rotor: 0,0646 m
Diàmetre de l'eix a l'interior dels coixinets: 0,025 m
Diàmetre exterior dels coixinets: 0,05 m
Gruix mig de la carcassa entre l'estor i els canals d'aigua: 0,01 m
Longitud de la màquina: 0,34 m
Longitud de l'estator: 0,231 m
Longitud dels coixinets: 0,025 m

**Dimensions ranures estatòriques**
Dimensió de les dents de l'estator yd1: 0,0004 m
Dimensió de les dents de l'estator yd2: 1E-7 m
Dimensió de les dents de l'estator yd3: 0,017 m
Dimensió de les dents de l'estator yd4: 1E-7 m
Dimensió de les dents de l'estator xd1: 0,005 m
Dimensió de les dents de l'estator xd2: 0,002 m
Dimensió de les dents de l'estator xd3: 0,002 m
Dimensió de les dents de l'estator xq1: 0,003 m
Dimensió de les dents de l'estator xq2: 0,0076 m
Dimensió de les dents de l'estator xq3: 0,0076 m
Àrea de cada ranura: 8,98E-5 m^2
Factor de plenitud de ranura: 0,45

**Espessor de l'aïllament**
Gruix de l'aïllament del coure: 0,0001 m
Gruix de l'aïllament de la ranura: 0,0003 m

**Nombre de ranures estatòriques**
Nombre de ranures estatòriques: 48

**Velocitat**
Velocitat del motor: 6000 rpm

**Dimensions del rotor**
Dimensió dels imants Hpmp: 0,01731 m
Dimensió dels imants Hpmc: 0,01731 m
Dimensió dels imants Wpmp: 0,05364 m
Dimensió dels imants Wpmc: 0,10035 m
Dimensió del rotor Wpslc: 0,01243 m
Dimensió del rotor Hpslc: 0,01557 m
Dimensió del rotor Wpslp: 0,01491 m
Dimensió del rotor Hpslp: 0,015 m
Dimensió del rotor Wcslc: 0,01054 m
Dimensió del rotor Hcslc: 0,01516 m
Dimensió del rotor Hslgap: 0,00268 m
Dimensió del rotor Hself: 0,005 m
Dimensió del rotor Wp: 0,04372 m
Dimensió del rotor Hp: 0,04149 m
Dimensió del rotor Hc: 0,01978 m
Dimensió del rotor Hpb1: 0,01163 m
Dimensió del rotor Hpb2: 0,00489 m
Dimensió del rotor Wpb1: 0,02324 m
Dimensió del rotor Wpb2: 0,03254 m
Dimensió del rotor alphapmp: 0,9773 rad
Dimensió del rotor H88: 0,03703 m
Dimensió del rotor H77: 0,01774 m
Dimensió del rotor H78: 0,02743 m
Dimensió del rotor W78: 0,09962 m
Dimensió del rotor Ro: 0,07136 m

**Nombre de parell de pols**
Nombre de parell de pols: 2

**Coeficients de conductivitat**
Conductivitat tèrmica del material de la carcassa: 230 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica del laminat: 38 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica del fluid en l'entreferro: 0,0234 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica de l'aïllament de la ranura: 0,03 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica de l'aïllament del coure: 0,2 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica del coure: 395 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica dels imants permanents: 7500 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica de l'acer de l'eix: 51 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica de la pasta de retenció dels imants: 0,2 W/(m*K)

**Coeficients de contacte**
Coeficient de contacte entre la carcassa i l'estator: 700 W/(m^2*K)
Coeficient de contacte entre el rotor i l'eix: 1000 W/(m^2*K)

**Factor d'apilament**
Factor d'apilament: 0,965

**Viscositat cinemàtica del fluid**
Viscositat cinemàtica del fluid en l'entreferro: 1,6E-5 m^2/s

**Temperatures esperades**
Temperatura del fluid de la camisa d'aigua: 30 ºC

**Eficiència del ventilador**
Eficiència del ventilador: 0,5

**Pèrdues motor**
Pèrdues en el ferro de l'estator: 464 W
Pèrdues en les dents de l'estator: 387 W
Pèrdues en el coure dins l'estator: 822 W
Pèrdues en els caps de bobina: 513 W
Pèrdues en els imants permanents: 22 W
Pèrdues en els coixinets: 90 W
Pèrdues en el ferro del rotor: 10 W

**Temperatura del motor**
Temperatura en la carcassa: 30,33 ºC
Temperatura en el ferro de l'estator: 55,03 ºC
Temperatura en les dents de l'estator: 75,03 ºC
Temperatura en les bobines de l'estator: 102,55 ºC
Temperatura en els caps de bobina: 135,02 ºC
Temperatura en els imants exteriors del rotor: 81,91 ºC
Temperatura en els imants interiors del rotor: 81,96 ºC
Temperatura en el ferro del rotor: 81,91 ºC
Temperatura en els coixinets: 65,58 ºC

### 4.3.2. Resultats

El programa Motor-CAD no té el model de motor analitzat, però en té un de similar. El model del Motor-CAD és el mateix que el model per als imants exteriors, però situant els imants a dins del rotor.

Tant el programa creat en el PFC com el Motor-CAD ens proporcionen moltes dades de temperatura en els components. S'han escollit les més importants per a comparar els resultats obtinguts. En el cas dels imants es comparen els dos resultats amb el resultat donat per el Motor-CAD.

| Component | Temperatura segons Motor-CAD [ºC] | Temperatura segons el PFC [ºC] | Diferencia [ºC] |
|---|---|---|---|
| Carcassa | 36,64 | 30,33 | -6,31 |
| Ferro de l'estator | 57,96 | 55,03 | -2,93 |
| Dents de l'estator | 83,31 | 75,03 | -8,28 |
| Bobines de l'estator | 113,50 | 102,55 | -10,95 |
| Caps de bobina | 129,10 | 135,02 | 5,92 |
| Imants exteriors | 93,49 | 81,91 | -11,58 |
| Imants interiors | 93,49 | 81,96 | -11,53 |
| Ferro del rotor | 93,51 | 81,91 | -11,60 |
| Coixinets | 54,57 | 65,58 | 11,01 |

*Taula 4.3: Comparativa per al motor d'imants permanents interiors*

# 4.4. COMPARATIVA PER AL MOTOR DE RELUCTÀNCIA

## 4.4.1. Dades per al motor de reluctància

**Dimensions del motor**
Diàmetre exterior de l'estator: 0,17 m
Diàmetre exterior del rotor: 0,0906 m
Radi de l'eix: 0,019 m
Entreferro entre estator i dents del rotor: 0,0003 m
Entreferro entre estator i cos del rotor: 0,0105 m
Longitud entre el centre del coixinet i el centre tèrmic del rotor: 0,08 m
Part del bobinat que sobresurt de la ranura: 0,05 m
Longitud del coixinet: 0,015 m
Longitud de l'estator: 0,114 m

**Velocitat**
Velocitat nominal de gir: 3000 rpm

**Nombre de ranures estatòriques**
Nombre de dents de l'estator: 6

**Dimensions ranures estatòriques**
Dimensió de les dents de l'estator h1s: 0 m
Dimensió de les dents de l'estator h2s: 0 m
Dimensió de les dents de l'estator h3s: 0 m
Dimensió de les dents de l'estator h4s: 0,015 m
Dimensió de les dents de l'estator b1s: 0,025 m

Gruix de les dents de l'estator bds: 0,022 m
Secció de les ranures de l'estator: 0,00047 m^2

**Secció del coure**
Secció del coure de les dents de l'estator: 0,00013 m^2

**Espessor de l'aïllament**
Espessor de l'aïllament de les dents de l'estator: 0,0005 m

**Dimensions de les ranures rotòriques**
Dimensió de les dents del rotor b1r: 0,041 m
Dimensió de les dents del rotor bdr: 0,022 m

**Característiques del fluid**
Coeficient d'expansió termal per al fluid exterior a la màquina: 0,0032 1/K
Viscositat cinemàtica del fluid exterior a la màquina: 1,6E-5 m^2/s
Viscositat cinemàtica del fluid en l'entreferro: 1,6E-5 m^2/s
Número de Prandtl per al fluid exterior a la màquina: 0,708

**Eficiència del ventilador**
Eficiència del ventilador: 0,5

**Coeficients de contacte**
Coeficient de contacte entre carcassa i nucli: 400 W/(m^2*K)

**Coeficients de conductivitat**
Conductivitat tèrmica radial del laminat: 39 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica axial del laminat: 4 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica de l'acer de l'eix: 40 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica del coure: 400 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica de l'alumini: 237 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica de l'aïllament de la ranura: 0,8 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica del vernís del coure: 0,8 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica del fluid a l'exterior de la màquina: 0,026 W/(m*K)
Conductivitat tèrmica del fluid en l'entreferro: 0,026 W/(m*K)
Factor d'apilament del laminat: 0,97

**Temperatures esperades**
Temperatura del fluid exterior: 40 ºC

**Pèrdues del motor**
Pèrdues en el ferro de l'estator: 75,6 W
Pèrdues en les dents de l'estator: 7,2 W

Pèrdues addicionals: 4 W
Pèrdues Joule a l'estator: 120 W
Pèrdues en les dents del rotor: 3 W

### 4.4.2. Resultats

Tant el programa creat en el PFC com el Motor-CAD ens proporcionen moltes dades de temperatura en els components. S'han escollit les més importants per a comparar els resultats obtinguts.

| **Component** | **Temperatura segons Motor-CAD [ºC]** | **Temperatura segons el PFC [ºC]** | **Diferencia [ºC]** |
|---|---|---|---|
| Carcassa | 92,55 | 92,16 | -0,39 |
| Ferro de l'estator | 96,56 | 99,00 | 2,44 |
| Dents de l'estator | 97,89 | 99,60 | 1,71 |
| Bobines de l'estator | 111,10 | 103,40 | -7,70 |
| Caps de bobina | 112,60 | 106,24 | -6,36 |
| Dents del rotor | 99,59 | 100,31 | 0,72 |
| Ferro del rotor | 99,76 | 100,29 | 0,53 |
| Eix | 100,80 | 97,46 | -3,34 |

*Taula 4.4: Comparativa per al motor de reluctància*

# CAPÍTOL 5: CONCLUSIONS

## 5.1. CONCLUSIONS

El programa obtingut és ràpid, ens permet analitzar configuracions diverses en pocs minuts. L'error obtingut és acceptable en els models seguits per al motor d'inducció i per al motor de reluctància. En el model seguit per als motors amb imants el model és bo, però millorable.

El programa obtingut és fruit de l'esforç en la correcció d'equacions i l'implementació d'aquestes. Tot i ser un bon PFC encara dista molt de ser un programa comercial.

## 5.2. TREBALL FUTUR

El treball futur consisteix en millorar el programa fins a obtenir un programa que pugui rivalitzar amb la competència. A continuació es detallen alguns punts en els que s'ha d'incidir per millorar el programa.

- Comparar els resultats obtinguts en assajos amb els resultats del programa i millorar els esquemes.
- Implementació de més models de motors.

- Introduir més detalls en la definició de carcassa i components.
- Introduir el règim transitori.

# CAPÍTOL 6: BIBLIOGRAFIA I WEBS

## 6.1. LLIBRES:

- [1]Pyrhönen, J., Jokinen, T.,and Hrabovcova, V. "Design of Rotating Electrical Machines" ED John Wiley & Sons, Ltd. Great Britain, 2008.

## 6.2. DOCUMENTS QUE CONTENEN ELS ESQUEMES EQUIVALENTS ESCOLLITS:

- [2]Faiz, J., Lucas, C., Rouhani, H. "Lumped thermal model for switched reluctance motor applied to mechanical design optimization" University of Tehran, Tehran, 2006.

- [3]Lindstöom, J. "Thermal Model of a Permanent-Magnet Motor for a Hybrid Electric Vehicle" Chalmers University of Technology, Göteborg, 1999.

- [4]Popova, L., "COMBINED ELECTROMAGNETIC AND THERMAL DESIGN PLATFORM FOR TOTALLY ENCLOSED INDUCTION MACHINES" Master Thesis, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, 2010.

- [5]Richardson, Z.J., Tang, W.H., Wu, Q.H. "Equivalent heat circuit based power transformer thermal model" IEE Proc. Electr. Power Appl. Vol 149,No 2, 2002.

- [6]Yang, B. "Development of Thermal Models for Permanent-Magnet Traction Motors" Master Thesis, School of Electrical Engineering Royal Institute of Technology, Stockholm, 2009.

## 6.3. DOCUMENTS DIVERSOS:

- [7]Bargalló R. "Exemple motor 5.5kW" EUETIB, Espanya.

- [8]Mellor, P.H., Roberts, D., Turner, D.R. "Lumped parameter thermal model for electical machines of TEFC design" IEE Proc. Vol 138, No 5, 1991.

- [9]Soong W.L. "Thermal Analysis of Electrical Machines : Lumped-Circuit, FE Analysis and Testing" School of Electrical and Electronic Engineering University of Adelaide, Australia, 2008.

- [10]Kylander G. "Thermal modeling of small cage induction motors" Chalmers University of Thecnology, Göteborg, 1995.

## 6.4. WEBS:

- http://www.clubdelphi.com/foros/(Forum delphi)

- http://www.delphibasics.co.uk/(Forum delphi)

- http://www.delphipages.com/forum/(Forum delphi)

- http://es.w3support.net/(Forum programació)

- http://www.festra.com/(Pàgina de delphi bàsic)

- http://forums.devshed.com/(Forum)

- http://www.enciclopedia.cat/(Enciclopedia Català)