



Tal i com es pot veure a la figura, a més del mallat podem veure el tipus de material que conforma cada espai geomètric corresponent a les diferents peces del motor. Aquest material té associades les seves propietats físiques i s'hi pot fer circular corrent, o no, depenent de les necessitats del problema.

Aquesta tria de propietats es fa un cop s'ha importat el dibuix seccional del motor estudiar, es genera el mallat, es determinen les condicions de contorn i s'imposen els corrents abans d'activar el pre-processor de FEMM.

Un cop finalitzada la modelització de l'element a estudiar es posa en marxa el processador (figura 2). Es duen a terme tots els càlculs en cada punt del mallat, donant com a resultat múltiples variables magnètiques que resultaran interessants per a l'anàlisi electromagnètic del motor.

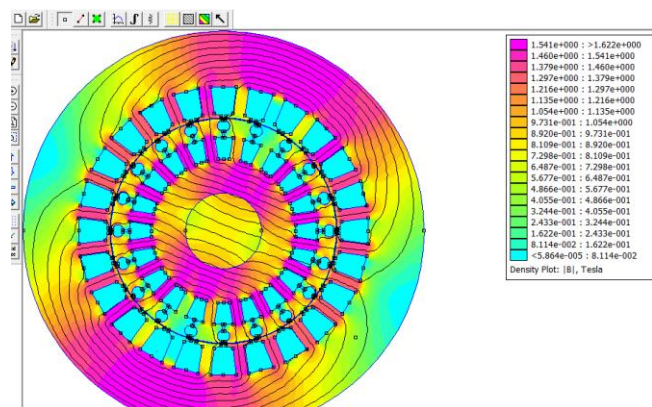


Figura 2. Resultats en el post-processador de FEMM.

Com es pot veure a la Figura 2, en el post-processador obtenim resultats gràfics i numèrics de diverses variables (línies de flux, induccions,...). Aquests resultats, es poden veure en un punt en concret de la interfície de FEMM de manera numèrica i precisa, o bé com es mostra la imatge, en forma de llegenda, com és l'exemple del mapa d'induccions de la figura.

El programa utilitzat té les limitacions d'efectuar les simulacions en 2D, així l'efecte dels caps de bobina s'haurà d'estimar, per tant, podem tenir un cert marge d'error. No obstant, la seva lliure disposició i facilitat d'ús el fan una opció molt interessant per a aquest tipus d'estudi.

### 3. Motors d'inducció seleccionats per l'estudi

Per a efectuar aquest estudi, és imprescindible conèixer les dades dels 3 motors de partida, no solament els seus paràmetres nominals, sinó les dimensions constructives i materials utilitzats per la seva fabricació, així com l'esquema equivalent complet, fruit d'assajos en el motor. Cal recordar, que els esquemes equivalents són una aproximació al comportament real del motor (veure Annex). En conseqüència, com major quantitat de dades del motor disposem, millor aproximació de l'anàlisi del motor al seu funcionament real, tant en la seva estructura inicial com en les variacions constructives plantejades.

Els 3 motors dels quals s'ha trobat més informació, són els següents:

- Motor de 250 W: és un motor d'inducció trifàsic amb connexió estrella, de quatre pols, amb classe d'aïllament "F". Les dades d'aquest motor s'han

obtingut (Tabla 1) del llibre "Design of Small Electric Machines", de l'autor E.S. Hamdi.

| PARÀMETRE                             | VALOR | UNITAT |
|---------------------------------------|-------|--------|
| Potència útil ( $P_{un}$ )            | 250   | W      |
| Velocitat ( $n_n$ )                   | 1380  | rpm    |
| Parell ( $M_n$ )                      | 1,73  | Nm     |
| Tensió de línia ( $V_l$ )             | 415   | V      |
| Corrent de línia ( $I_l$ )            | 0,7   | A      |
| Factor de potència ( $\cos \varphi$ ) | 0,78  | -      |
| Rendiment ( $\eta$ )                  | 0,63  | -      |

Tabla 1. Paràmetres nominals del motor de 250 W.

- Motor de 7,5 kW: és un motor d'inducció trifàsic, connexió estrella, de dos pols. Les dades d'aquest motor (Tabla 2) s'han extret del document "Flux: Induction motor tutorial 2D technical exemple" de l'empresa Altair.

| PARÀMETRE                             | VALOR | UNITAT |
|---------------------------------------|-------|--------|
| Potència útil ( $P_{un}$ )            | 7500  | W      |
| Velocitat ( $n_n$ )                   | 2904  | rpm    |
| Parell ( $M_n$ )                      | 24,66 | Nm     |
| Tensió de línia ( $V_l$ )             | 660   | V      |
| Corrent de línia ( $I_l$ )            | 8,48  | A      |
| Factor de potència ( $\cos \varphi$ ) | 0,834 | -      |
| Rendiment ( $\eta$ )                  | 0,927 | -      |

Tabla 2. Paràmetres nominals del motor de 7,5 kW.

- Motor de 1020 kW: és un motor d'inducció trifàsic, connexió estrella, de quatre pols, de gàbia d'esquirol amb rotor de coure i ventilació forçada. És un motor dissenyat per ser alimentat des d'un ondulador amb regulació per control PWM i és per això que la seva freqüència nominal és de 87,1 Hz. Les dades del motor (Tabla 3) s'han extret del document "Apèndice 20: descripció del motor de tracció", documentació tècnica de Talgo RENFE.

| PARÀMETRE                             | VALOR   | UNITAT |
|---------------------------------------|---------|--------|
| Potència útil ( $P_{un}$ )            | 1020000 | W      |
| Velocitat ( $n_n$ )                   | 2587    | rpm    |
| Parell ( $M_n$ )                      | 3765,08 | Nm     |
| Tensió de línia ( $V_l$ )             | 2180    | V      |
| Corrent de línia ( $I_l$ )            | 313     | A      |
| Factor de potència ( $\cos \varphi$ ) | 0,892   | -      |
| Rendiment ( $\eta$ )                  | 0,96    | -      |

Tabla 3. Paràmetres nominals del motor de 1020 kW.

### 4. Criteris utilitzats per la variació de paràmetres del circuit equivalent

Com defineix el títol del treball, es pretén comprovar l'efecte de la variació d'alguns paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques de funcionament del motor. És per aquest motiu que s'ha realitzat un estudi per a cada variació deixant els altres paràmetres segons la composició inicial del motor.

S'han efectuat tres modificacions dels paràmetres constructius, que afecten els següents paràmetres elèctrics:

- Resistència de l'estator ( $R_1$ ): variant el diàmetre dels conductors de l'estator.
- Resistència del rotor ( $R'_2$  i  $R'_{21}$ ,  $R'_{22}$  per al motor de doble gàbia de 7,5 kW): variant la secció dels conductors de la gàbia del rotor.
- Tipus de xapa magnètica (afectarà als paràmetres  $R_{FE}$  i  $X_\mu$ ): utilitzant diferents tipus de xapa magnètica, amb pèrdues específiques diferents.

Per a l'estudi d'aquesta afectació en els paràmetres del circuit equivalent, s'ha realitzat el següent procés:

- Redibuixar els plànols del motor per a cadascuna de les variacions de la forma constructiva.
- Realitzar simulacions magnetoestàtiques de cadascuna de les modificacions en la forma constructiva.
- Determinar els paràmetres magnètics en diferents zones de cada motor.
- Calcular els nous paràmetres del circuit equivalent afectats per la variant constructiva i els materials.
- Resoldre l'esquema equivalent de cada motor amb els nous paràmetres.
- Elaborar les noves corbes característiques per a cada modificació per comparar amb la corba característica del motor original.

Per realitzar aquest procés, s'han establert diverses hipòtesis de càlcul. Algunes d'aquestes hipòtesis són:

- La tensió que alimenta els motors quedarà fixa (tensió nominal).
- Mantenim la suma de les pèrdues per efecte Joule i les del Ferro ( $P_{j1} + P_{j2} + P_{FE}$ ) iguals en totes les variacions (per mantenir el mateix punt d'escalfament).
- Mantenim els diàmetres exteriors i interiors tant d'estator com de rotor i respectem l'entreferro inicial, per tant, mantenim la mida del motor.
- Per falta d'algunes dades en alguns motors i per treballar amb el mateix criteri en els tres estudis, el corrent de buit s'ha aproximat segons la equació 1.
- No es consideraran les pèrdues addicionals ni les pèrdues per fregament.

$$I_0 \approx 0,4I_n \quad [A] \quad [1]$$

On:

$I_0$ : Corrent de buit.

$I_n$ : Corrent nominal.

#### 4.1. Variació de la resistència d'estator

Per a disminuir la resistència d'estator podem actuar sobre els conductors que conformen els debanats de l'estator. S'hi pot actuar de 3 maneres diferents:

- Amb un material de conductivitat més elevada.
- Disminuint la longitud del conductor.
- Augmentant la secció del conductor.

En el primer cas, s'hauria de fer una cerca de materials superconductors, que encarrirà molt el preu del motor.

Disminuir la longitud del conductor, per altra banda, no és concebible, ja que estaríem reduint la ocupació de ranura i aquest fet tindria un efecte negatiu: el camp magnètic seria inferior al del motor original.

Per tant, només podem actuar sobre la secció del conductor.

S'intentarà reduir la resistència de la següent manera:

$$\frac{R_1}{R'_1} = \frac{\rho \frac{l}{S_1}}{\rho \frac{l}{S'_1}} = \frac{S'_1}{S_1} \quad [2]$$

On:

$R_1$ : Resistència de l'estator.

$\rho$ : Resistivitat del material.

$l$ : Longitud del conductor.

$S_1$ : Secció del conductor.

$R'_1$ : Nova resistència d'estator.

$S'_1$ : Nova secció del conductor.

A més de les hipòtesis anomenades a l'apartat anterior, s'ha respectat el coeficient d'ocupació de ranura (equació 3) inferior a 0,5 per a tots els motors:

$$f_{cu} = \frac{S_{cu}}{S_r} \quad [3]$$

On:

$f_{cu}$ : Factor d'ocupació de ranura.

$S_r$ : Superfície de la ranura.

$S_{cu}$ : Superfície de coure a la ranura.

Els conductors adoptats per aquestes variacions són els de diàmetre superior consecutius al del motor original. Els valors normalitzats s'han extret del document "Tablas, formulas y gráficas para el cálculo de máquinas asíncronas" de Miguel Ángel Rodríguez Pozueta del Departament d'Enginyeria Elèctrica de la Universidad de Cantabria.

#### 4.2. Variació de la resistència de rotor

En quan a la variació de la resistència de rotor, ens trobem en un cas molt semblant a la variació de resistència d'estator. Per a poder variar aquesta resistència s'ha d'actuar en els conductors de rotor (gàbia). En aquest cas, els conductors no els formen bobinats connectats a la alimentació de la xarxa, sinó que el conformen pletines de material macís on hi circulen els corrents que s'indueixen per efecte de l'alimentació amb corrent altern de l'estator.

Les dues opcions per a modificar la resistència de rotor són:

- Amb un material de conductivitat més elevada.
- Augmentant la secció del conductor.

S'ha decidit adoptar la segona opció, més uniforme pels 3 motors utilitzats:

- El material utilitzat per al motor de 250 W és alumini tractat. L'alumini té una elevada conductivitat no superior a la del coure, però es tracta d'un motor petit i de molt poca potència. L'alumini és molt més lleuger que el coure tot i no

tenir una conductivitat tan elevada, però podria ser contraproductiu utilitzar un material més pesat per a moure una càrrega amb una potència petita. A més, aquest tipus de motor se sol utilitzar per a màquines portàtils, fet que afavoreix més aquesta petita reducció de pes.

- El material utilitzat per al motor de 7,5 kW és un material fictici, el qual difícilment podrà veure les seves propietats millorades per un material real contemplat a la biblioteca de FEMM.
- El material utilitzat per al motor de 1020 kW és el coure. Igual que en l'apartat 6.2, s'hauria de substituir aquest material per superconductors i això no seria viable econòmicament.

Per tant, seguint el mateix principi que en la modificació de la resistència d'estator:

$$\frac{R_2}{R'_2} = \frac{S_2}{S'_2} \quad [4]$$

On:

$R_2$ : Resistència del rotor.

$S_2$ : Secció de la gàbia del rotor.

$R'_2$ : Nova resistència de rotor.

$S'_2$ : Nova secció de la gàbia del rotor.

Aquesta reducció de resistència s'ha efectuat tres vegades en cada motor, incrementant la secció aproximadament un 5% en cada nou disseny, depenent de la geometria de les ranures del rotor i de l'espai entre ranures, vigilat de no deixar un espai de dent de rotor insuficient.

Cal recordar que el motor de 7,5 kW és de doble gàbia, per tant el procés s'ha decidit aplicar-lo tant per la gàbia exterior com per la interior.

### 4.3. Variació del tipus de xapa magnètica

Igual que en els anteriors casos, s'ha decidit efectuar 3 variacions sobre el tipus de xapa magnètica. S'ha intentat substituir la xapa original per altres de ferro al silici amb millor qualitat, el que es tradueix com a menys pèrdues específiques (W/kg).

Aquestes variacions de xapa afecten directament a la resistència de pèrdues al ferro. Caldrà vigilar la inductància magnetitzant i, per tant, el paràmetre de la reactància magnetitzant, ja que també es veu afectada.

Per corregir aquest efecte i ser fidel a les dades dels informes dels motors reals, a partir de les variacions en la inductància magnetitzant detectades amb FEMM s'ha recalculat l'esquema equivalent segons la equació 5:

$$L_{\mu FEMM} \neq L_{\mu real} \rightarrow \Delta L_{\mu FEMM} = \Delta L_{\mu real} \quad [5]$$

On:

$L_{\mu}$ : Inductància magnetitzant.

### 4.4. Afectació de les variacions constructives a la resistència de pèrdues al ferro

En els casos anteriors on és necessària una modificació de ranura per modificar alguns dels paràmetres explicats, implica un canvi en les quantitats de material i, per tant, això afecta a les pèrdues al ferro.

Per tant, en primera instància, és necessari calcular les noves masses tant d'estator com de rotor a partir de les següents equacions:

$$m_d = \left( \frac{\pi}{4} \cdot (D_{Md}^2 - D^2) - Q_1 \cdot S_{r1} \right) \cdot \gamma \cdot K_f \cdot L \quad [6]$$

[kg]

$$m_{ce} = \frac{\pi}{4} (D_y^2 - D_{Md}^2) \cdot \gamma \cdot K_f \cdot L \quad [7]$$

[kg]

On:

$D_{Md}$ : Diàmetre màxim de la dent.

$D$ : Diàmetre interior de l'estator.

$D_y$ : Diàmetre de la corona de l'estator.

$Q_1$ : Nombre de ranures de l'estator.

$S_r$ : Àrea d'una ranura de l'estator.

$\gamma$ : Pes específic de la xapa magnètica.

$K_f$ : factor d'apilament.

$L$ : longitud de l'estator.

$m_d$ : Massa de la dent.

$m_{ce}$ : Massa de la corona de l'estator.

Un cop calculades les noves masses, determinem el coeficient de pèrdues al ferro de la següent manera:

$$K_{FE} = \frac{P_{FEO}}{f^{1.5} \cdot (m_{d0} \cdot B_{d0}^2 + m_{ce0} \cdot B_{ce0}^2)} \quad [8]$$

On:

$K_{FE}$ : Factor de pèrdues al ferro.

$f$ : Freqüència.

$m_{d0}$ : Massa de la dent inicial.

$B_{d0}$ : Inducció inicial a les dents.

$m_{ce0}$ : Massa de la corona de l'estator inicial.

$B_{ce0}$ : Inducció inicial a la corona de l'estator.

Finalment, amb aquests 3 paràmetres calculats, s'obtenen les pèrdues al ferro en els motors modificats, als quals se'ls hagi variat les masses del materials, a partir de l'equació 9:

$$P_{FE} = K_{FE} \cdot \frac{P_{eFE}}{P_{eFE0}} \cdot f^{1.5} \cdot (m_d \cdot B_d^2 + m_{ce} \cdot B_{ce}^2)$$

[W] [9]

On:

$P_{eFE0}$ : Pèrdues al ferro específiques inicials (W/kg).

$P_{eFE}$ : Pèrdues al ferro específiques modificades (W/kg).

## 5. Resultats obtinguts.

Aplicant els procediments explicats en l'apartat 4, podem recalculer els esquemes equivalents del circuit en cada motor, i així obtenir les noves corbes característiques i comparar el seu comportament amb el motor inicial. Cal destacar que en aquest resum es presenten només algunes les corbes més significatives, però en la memòria del treball s'hi poden trobar, a més a més de les corbes presents, les corbes característiques de factor de potència-índex de càrrega, de corrent-velocitat i de rendiment-índex de càrrega. També s'hi poden trobar taules resum de valors nominals, variacions de ratis respecte els nominals i variacions de pèrdues a la zona afectada (pèrdues joule a l'estator, pèrdues joule al rotor o pèrdues al ferro) i la suma de pèrdues total per cada variació.

### 5.1. Motor de 250 W

En totes les gràfiques es pot observar el resultat obtingut en el motor original i en les variacions constructives aplicades. En el cas de la resistència d'estator (Figura 3):

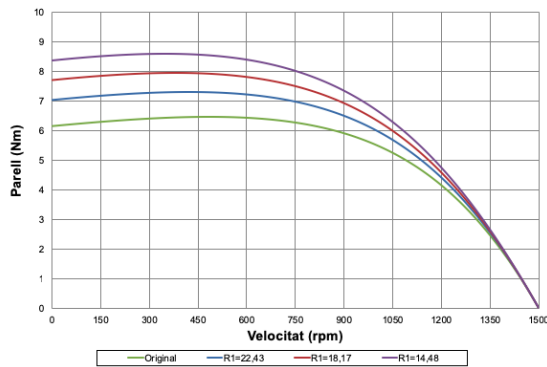


Figura 3: Corbes característiques parell-velocitat amb variacions de la resistència de l'estator en el motor de 250 W.

Pel que fa a la resistència de rotor (Figura 4):

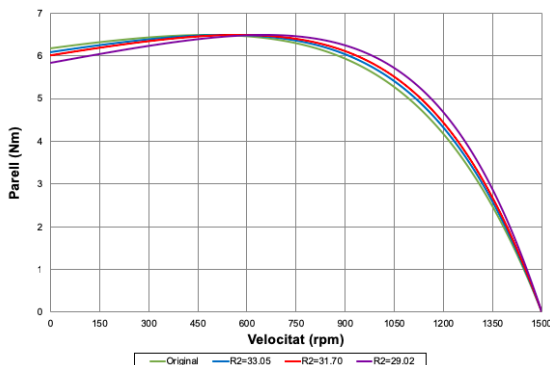


Figura 4: Corbes característiques parell-velocitat amb variacions

de la resistència del rotor en el motor de 250 W.

Pel que fa al tipus de xapa magnètica (Figura 5):

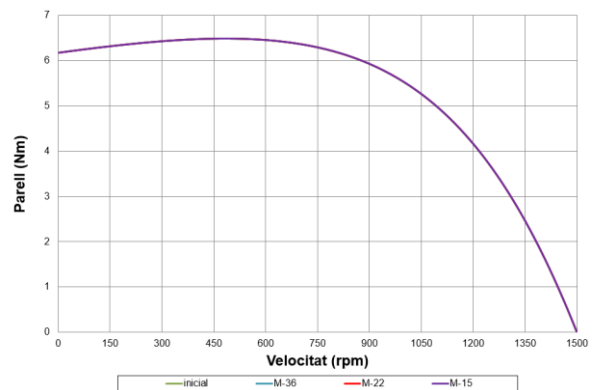


Figura 5: Corbes característiques parell-velocitat amb variacions del tipus de xapa magnètica en el motor de 250 W.

### 5.2. Motor de 7,5 kW

En el cas de la resistència d'estator (Figura 6):

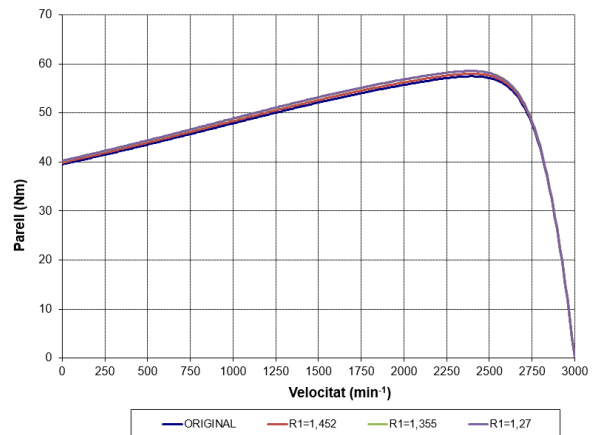


Figura 6: Corbes característiques parell-velocitat amb variacions de la resistència de l'estator en el motor de 7,5 kW.

Cal recordar que aquest motor és de doble gàbia, per tant s'apliquen variacions a la gàbia exterior i a la gàbia interior. Pel que fa referència a les tres variacions de la resistència de la gàbia exterior del rotor (Figura 7):

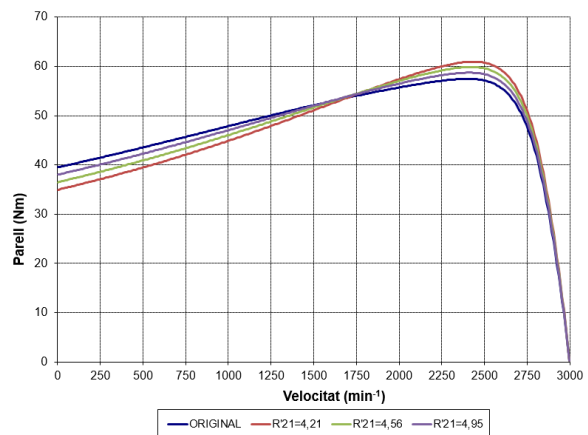


Figura 7: Corbes característiques parell-velocitat amb variacions de la resistència del rotor (gàbia exterior) en el motor de 7,5 kW.

En quan a les variacions de la gàbia interior (Figura 8):

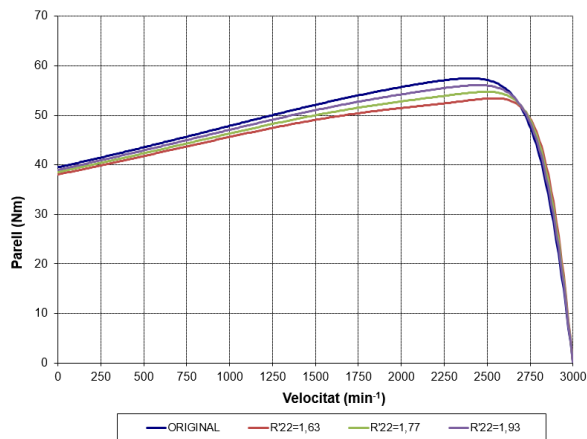


Figura 8: Corbes característiques parell-velocitat amb variacions de la resistència del rotor (gàbia interior) en el motor de 7,5 kW.

En quan al tipus de xapa magnètica (Figura 9):

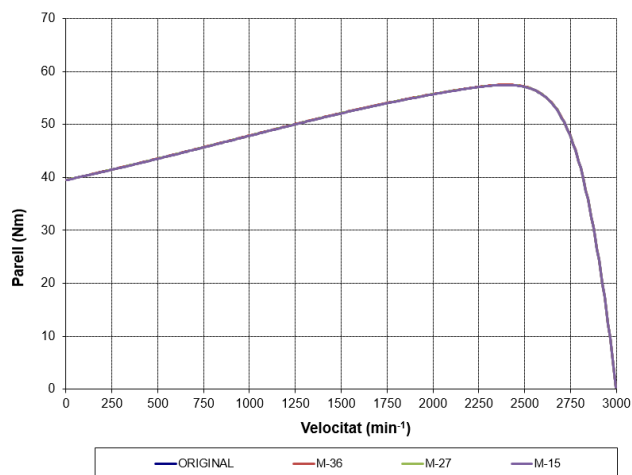


Figura 9: Corbes característiques parell-velocitat amb variacions del tipus de xapa magnètica en el motor de 7,5 kW.

### 5.3. Motor de 1020 kW

Podem observar les gràfiques de les tres variacions de la resistència d'estator (Figura 10):

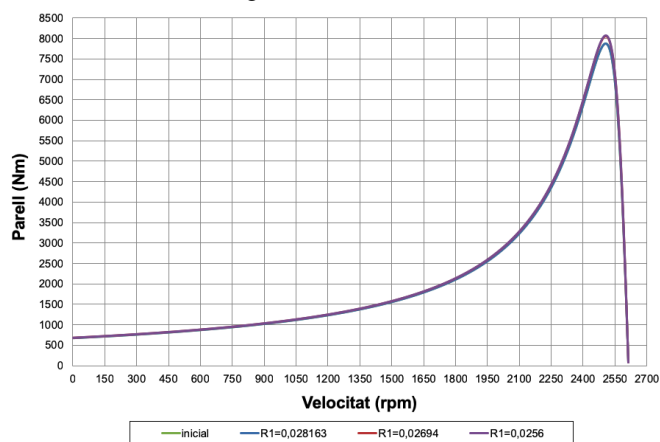


Figura 10: Corbes característiques parell-velocitat amb variacions de la resistència de l'estator en el motor de 1020 kW.

Pel que fa referència a les tres variacions de la resistència de rotor (Figura 11):

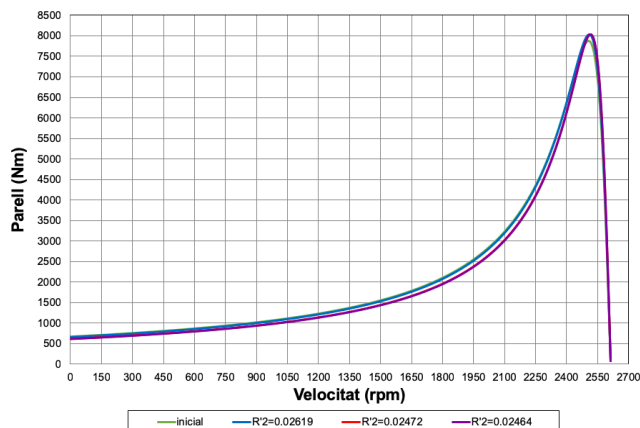


Figura 11: Corbes característiques parell-velocitat amb variacions de la resistència del rotor en el motor de 1020 kW.

## 6. Estrategia de millora del rendiment

L'amplitud del estudi realitzat de forma quantitativa permet establir possibles estratègies de millora sobre el motor inicial. En aquest treball s'ha escollit establir una estratègia de millora del rendiment.

Degut a la gran quantitat de possibles variacions vistes anteriorment, s'han seleccionat tres combinacions possibles per a cada motor per aconseguir una millora de rendiment.

### 6.1. Motor de 250 W

Els paràmetres seleccionats són:

- $R_1 = 18,17 \Omega$  (2na variació).
- $R_2 = 29,02 \Omega$  (3era variació).
- Xapa= M-15 (3era variació).

El criteri principal per adoptar aquesta decisió en cada cas ha estat el següent:

- **Diàmetre del conductor de l'estator:** s'ha seleccionat el diàmetre que permet ocupar la ranura al límit del coeficient d'utilització de ranura aconsellada, sense que sigui necessari modificar la ranura de l'estator.

- **Secció de la ranura del rotor:** s'ha seleccionat la secció més elevada de les estudiades, ja que s'ha comprovat en les simulacions electromagnètiques que no incrementa de forma negativa les induccions en el circuit magnètic. Evidentment, aquesta decisió té l'efecte colateral d'empitjorar les prestacions a l'engegada.

- **Tipus de xapa magnètica:** s'ha seleccionat la xapa de més qualitat i, per tant, amb menors pèrdues específiques. Aquesta decisió té l'efecte colateral de disminuir el parell d'arranc del motor.

A continuació es mostra la comparativa entre les dos corbes de la característica rendiment-índex de càrrega del motor original i de la proposta combinada de millora del rendiment en el motor de 250 W (Figura 12):

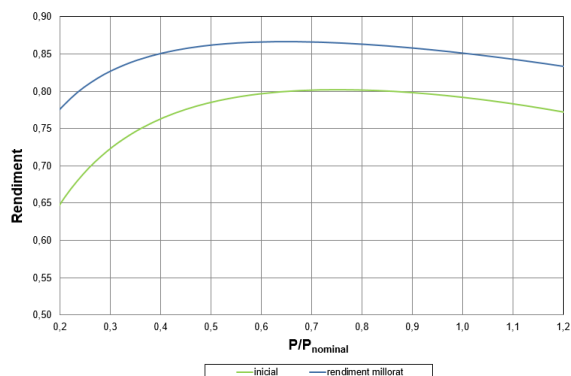


Figura 12: Característica rendiment-índex de càrrega de rendiment millorat comparada amb l'inicial del motor de 250 W.

## 6.2. Motor de 7,5 kW

Els paràmetres seleccionats són:

- $R_1 = 1,35 \Omega$  (2na variació).
- $R'_{2,1} = 4,21 \Omega$  (3era variació).
- $R'_{2,2} = 1,63 \Omega$  (3era variació).
- Xapa= M-15 (3era variació).

El criteri principal per adoptar aquesta decisió en cada cas ha estat el següent:

- **Diàmetre del conductor de l'estator:** s'ha seleccionat el diàmetre que permet ocupar la ranura al límit del coeficient d'utilització de ranura aconsellada, sense que sigui necessari modificar la ranura de l'estator.

- **Secció de la ranura del rotor:** s'ha seleccionat la secció més elevada de les estudiades, ja que s'ha comprovat en les simulacions electromagnètiques que no incrementa de forma negativa les induccions en el circuit magnètic. Evidentment, aquesta decisió té l'efecte colateral d'empitjorar les prestacions a l'engegada.

- **Tipus de xapa magnètica:** s'ha seleccionat la xapa de més qualitat i, per tant, amb menors pèrdues específiques. Aquesta decisió té l'efecte colateral de disminuir el parell d'arranc del motor.

La comparativa de rendiment en el motor de 7,5 kW es mostra a la Figura 13:

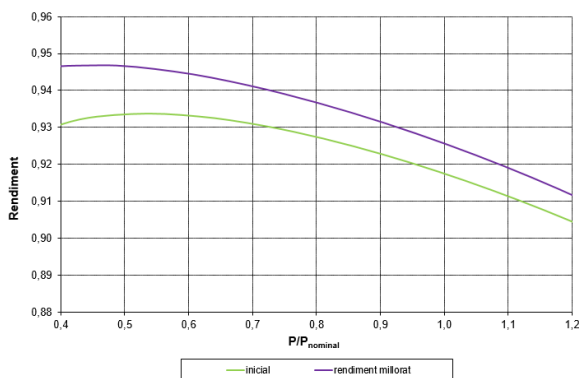


Figura 13: Característica rendiment-índex de càrrega de rendiment millorat comparada amb l'inicial del motor de 7,5 kW.

## 6.3. Motor de 1020 kW

Els paràmetres seleccionats són:

- $R_1 = 0,0424$  (1era variació).
- $R'_2 = 0,0395$  (1era variació).
- Xapa= M-15 (3era variació).

El criteri principal per adoptar aquesta decisió en cada cas ha estat el següent:

- **Diàmetre del conductor de l'estator:** s'ha seleccionat el diàmetre que permet ocupar la ranura al límit del coeficient d'utilització de ranura aconsellada, sense que sigui necessari modificar la ranura de l'estator.

- **Secció de la ranura del rotor:** A diferència dels altres motors, aquí s'ha optat per no incrementar tant la ranura del rotor, ja que a partir de la segona variació la millora de rendiment ha estat molt baixa. Fins i tot, en la tercera variació no ha augmentat tant com en la segona variació.

- **Tipus de xapa magnètica:** s'ha seleccionat la xapa de més qualitat i, per tant, amb menors pèrdues específiques. Aquesta decisió té l'efecte colateral de disminuir el parell d'arranc del motor.

A continuació es mostra la comparativa entre les dos corbes amb la característica rendiment-índex de càrrega del motor original i la proposta combinada del motor de 1020 kW (Figura 14):

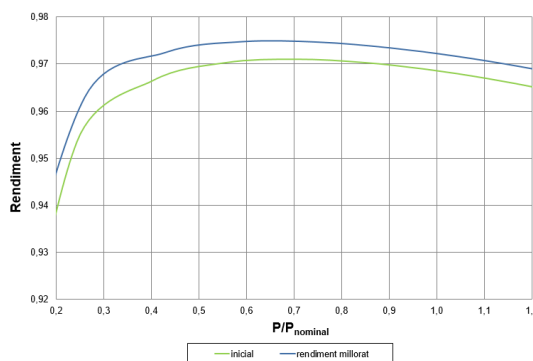


Figura 14: Característica rendiment-índex de càrrega de rendiment millorat comparada amb l'inicial del motor de 1020kW.

## 7. Estudi econòmic

S'ha plantejat com a estudi econòmic la comparativa entre el funcionament del motor amb el rendiment millorat respecte del motor inicial. S'han establert diferents condicions de càrrega i un cicle de treball determinat, aplicant el rendiment obtingut en l'estudi efectuat.

Cal considerar en aquest estudi l'estalvi energètic aconseguit, l'estalvi econòmic (a partir del cost de l'energia) i la inversió necessària en materials addicionals o de més qualitat.

L'estudi econòmic s'ha efectuat sobre les 3 versions dels motors amb el rendiment millorat.

L'estudi s'ha fet a partir de les suposicions de cicle de treball de 1000, 2000, 3000, 4000 i 5000 hores de funcionament anual, amb els índex de càrrega següents:

- plena càrrega (40 % del total d'hores).
- tres quarts de càrrega (40 % del total d'hores).
- mitja càrrega (20 % del total d'hores).

S'ha calculat l'increment de cost en les materials necessari i, a partir d'aquest increment i de l'estalvi econòmic pel consum d'energia, s'ha determinat el període de recuperació de la inversió inicial en materials respecte als motors originals. Com a exemple, en la Tabla 4 es mostren els resultats per un cicle de treball de 5000 hores per any.

| Motor   | Estalvi energètic (kWh/any) | Estalvi econòmic (€/any) | Període recup. (Anys) |
|---------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 250 W   | 1169,4                      | 116,94                   | 0,6                   |
| 7,5 kW  | 433,08                      | 43,31                    | 0,6                   |
| 1020 kW | 24748,45                    | 2474,84                  | 0,58                  |

Tabla 4: Estalvi energètic, econòmic i període de recuperació dels motors amb un cicle de treball de 5000 h/any.

## 8. Conclusions.

Una de les conclusions més interessants que podem extreure és que la modificació de les resistències de l'esquema equivalent afecta directament el rendiment del motor. S'ha vist que utilitzar conductors de secció lleugerament superior, sempre i quan aquesta secció no sigui massa gran per no superar el coeficient d'utilització de ranura, augmenta significativament aquest rendiment. Així com utilitzar seccions superiors de gàbia de rotor i xapes del nucli ferromagnètic amb menys pèrdues específiques. Tot i així, no s'ha de descuidar un anàlisi transversal de les demés variables de funcionament del motor, ja que les modificacions en el circuit magnètic poden empitjorar el comportament magnètic i portar algunes zones a saturacions elevades i, per tant, a incrementar-se les pèrdues al ferro per aquest efecte. També, en el cas de la resistència del rotor, s'ha vist que una reducció massa elevada condiona les prestacions del motor a l'engegada.

Una conclusió interessant que es pot treure de l'estudi econòmic és que, sempre i quan el nombre d'hores de funcionament del motor sigui prou elevat, la inversió addicional en més quantitat i en més qualitat dels materials es recupera en un temps relativament curt.

És molt interessant la possibilitat de poder aproximar comportaments reals de motors d'inducció a partir de models resolts amb eines de càlcul com Excel i de software de simulació amb elements finits com FEMM, ja que permeten valorar de forma quantitativa i objectiva diferents aspectes relacionats amb les prestacions del motor i a plantejar possibles accions de millora a adoptar per a un disseny definitiu.

## 9. Referències

- [1] E.S. Hamdi. (1994). *Design of small electric motors*. Ed Jhon Wiley & Sons.
- [2] Altair Engineering. (2016). FLUX, *Induction motor tutorial*. Chemin de Malacher-Inovallée.
- [3] Consorcio Talgo ADtranz. Daimier Chrysler Rail Systems. *Apéndice 20: Descripción del motor de tracción*. RENFE.

- [4] Rodriguez Pozueta, Miguel Angel. (2015). *Tablas, fórmulas y gráficas para el cálculo de máquinas asíncronas*. Universidad de Cantabria (España).

### ANNEX: Esquemes equivalents utilitzats

En la Figura A1 es mostra el circuit equivalent utilitzat en els càlculs dels motors de gàbia simple (250 W i 1020 kW) i en la Figura A2 es mostra el circuit equivalent pel motor de doble gàbia (7,5 kW).

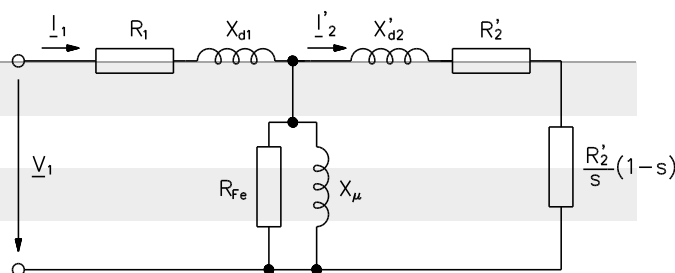


Figura A1: Esquema equivalent: motors de gàbia simple

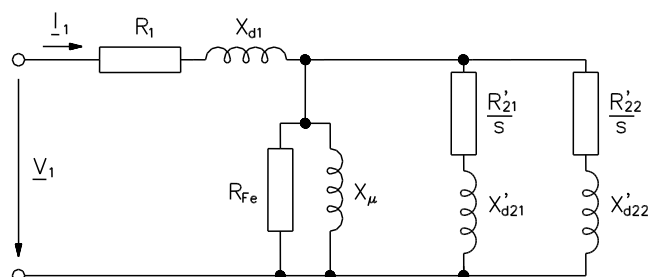


Figura A2: Esquema equivalent: motors de doble gàbia

On:

- $R_1$  = resistència de l'estator
- $X_{d1}$  = reactància de dispersió de l'estator
- $R'_2$  = resistència del rotor referida a l'estator
- $X'_{d2}$  = reactància de dispersió del rotor referida a l'estator
- $R'_{21}$  = resistència de la gàbia externa del rotor referida a l'estator
- $X'_{d21}$  = reactància de la gàbia externa del rotor referida a l'estator
- $R'_{22}$  = resistència de la gàbia interna del rotor referida a l'estator
- $X'_{d22}$  = reactància de la gàbia interna del rotor referida a l'estator
- $X_\mu$  = reactància magnetitzant
- $R_{Fe}$  = resistència de pèrdues al ferro
- $s$  = lliscament