



**Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL FINAL DE GRAU

TÍTOL: Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

AUTORS: MARTÍNEZ ARCO, MARCEL

DATA DE PRESENTACIÓ: Juny, 2020

COGNOMS: MARTÍNEZ ARCO NOM: MARCEL

TITULACIÓ: GRAU EN ENGINYERIA ELÈCTRICA

PLA: 2009

DIRECTOR: MARCEL TORRENT

DEPARTAMENT: ENGINYERIA ELÈCTRICA

QUALIFICACIÓ DEL TFG

TRIBUNAL

PRESIDENT

SECRETARI

VOCAL

DATA DE LECTURA:

Aquest Projecte té en compte aspectes mediambientals: Sí No

RESUM

L'objectiu principal d'aquest projecte és veure com influeixen els paràmetres del circuit equivalent del motor d'inducció trifàsic en les corbes característiques del propi motor. S'ha estudiat com afecten les variacions d'alguns d'aquests paràmetres, concretament les resistències, en l'esquema equivalent i en les corbes característiques a partir de variacions constructives en el motor.

Els objectius prefixats s'han intentat assolir fent un estudi sobre 3 motors existents i modificant els seus paràmetres constructius. Com a eines per la realització del treball s'han utilitzat el software de dibuix AutoCad, el software de simulació amb elements finits FEMM i el full de càlcul Excel.

Els paràmetres que es modificaran són: la resistència d'estator, associada als conductors que conformen els debanats de l'estator; la resistència de rotor, associada als conductors de la gàbia del rotor i la resistència de pèrdues al ferro, associada al tipus de material de xapa magnètica que conforma el nucli ferromagnètic del motor. S'ha modificat la reactància magnetitzant en els casos en que ha estat necessari per la modificació del circuit magnètic del motor. En totes les variacions s'intentarà mantenir el total de la suma de pèrdues, per motius d'escalfament, i és conservarà la dimensió externa del motor, per no variar la mida del motor.

El software d'elements finits FEMM permet simular la circulació de corrent per elements dissenyats per l'usuari i permet obtenir una gran quantitat de paràmetres referits al circuit magnètic, en el nostre cas, els 3 motors d'inducció i les seves variacions. És cert que aquest software presenta algunes limitacions a l'hora de realitzar un anàlisi magnetoestàtic, com per exemple que és un software que només permet anàlisis en 2D, però té l'avantatge que és de lliure disposició.

Un cop obtinguts els resultats de l'anàlisi del circuit magnètic, aquestes dades serviran per ajudar a realitzar els càlculs a partir de l'esquema equivalent de cada motor. La resolució del circuit equivalent i l'aplicació del balanç de potències, mitjançant fulls de càlcul amb Excel, permet elaborar les corbes característiques pertinents en cada motor, tant en les condicions inicials com després de cada variació constructiva aplicada. L'anàlisi de resultats ha permès en cada un dels 3 motors estudiats aplicar una estratègia de millora del rendiment, combinant variacions dels paràmetres estudiats.

A més de l'obtenció de les diferents corbes característiques en les diferents variacions, s'ha realitzat un estudi d'estalvi energètic i econòmic en els 3 motors seleccionats, a partir dels motors modificats per la millora del seu rendiment comparat amb el motor inicial.

En conclusió, resulta interessant veure l'obtenció de corbes característiques per analitzar el comportament de motors, fruit de variacions en les seves característiques constructives a partir de mètodes combinats com els vistos en el treball, això sí, no sense abans haver contrastat els mètodes amb dades reals i conegudes.

Paraules clau (màxim 10):

Rotor	Estator	Xapa magnètica	Motor d'inducció
Ranura	Gàbia	Pèrdues	Circuit equivalent
Resistència	Rendiment		

ÍNDIX

1. Introducció.	1
2. Objectius.	3
3. Motor d'inducció trifàsic: generalitats.	4
3.1 Aplicacions.	8
3.2 Característiques constructives.	11
3.3 Principi de funcionament.	15
3.4 Circuit equivalent.	17
3.5 Corbes característiques en règim permanent.	21
4. Simulació del motor d'inducció mitjançant elements finits.	25
4.1 Utilització del programa de simulació FEMM.	25
4.2 Introducció de les dades que caracteritzen un motor d'inducció amb FEMM.	28
5. Motors d'inducció seleccionats per l'estudi.	36
5.1 Motor de 250 W.	36
5.1.1 Paràmetres nominals.	36
5.1.2 Característiques constructives.	37
5.1.3 Paràmetres del circuit equivalent.	38
5.1.4 Corbes característiques en règim permanent.	39
5.1.5 Simulació amb FEMM.	43
5.2 Motor de 7,5 kW.	46
5.2.1 Paràmetres nominals.	46
5.2.2 Característiques constructives.	47
5.2.3 Paràmetres del circuit equivalent.	48
5.2.4 Corbes característiques en règim permanent.	50
5.2.5 Simulació amb FEMM.	54
5.3 Motor de 1020 kW.	57
5.3.1 Paràmetres nominals.	58
5.3.2 Característiques constructives.	58
5.3.3 Paràmetres del circuit equivalent.	60
5.3.4 Corbes característiques en règim permanent.	60
5.3.5 Simulació amb FEMM.	65
6. Criteris utilitzats per la variació de paràmetres del circuit equivalent.	69
6.1 Definició i abast de l'estudi.	69
6.2 Variació de la resistència de l'estator.	70
6.3 Variació de la resistència del rotor.	71
6.4 Variació del tipus de xapa magnètica.	73
6.5 Afectació de les modificacions constructives en les pèrdues al ferro	73

7. Resultats obtinguts de l'estudi efectuat.	76
7.1 Motor de 250 W.	76
7.1.1 Variació de la resistència de l'estator.	76
7.1.2 Variació de la resistència del rotor.	79
7.1.3 Variació del tipus de xapa magnètica.	82
7.2 Motor de 7,5 kW.	85
7.2.1 Variació de la resistència de l'estator.	85
7.2.2 Variació de la resistència exterior del rotor.	88
7.2.3 Variació de la resistència interior del rotor.	91
7.2.4 Variació del tipus de xapa magnètica.	94
7.3 Motor de 1020 kW.	97
7.3.1 Variació de la resistència de l'estator.	97
7.3.2 Variació de la resistència del rotor.	100
7.3.3 Variació del tipus de xapa magnètica.	103
8. Anàlisis dels resultats obtinguts.	107
8.1 Motor de 250 W.	107
8.1.1 Variacions de la resistència de l'estator.	107
8.1.2 Variacions de la resistència del rotor.	108
8.1.3 Variació del tipus de xapa magnètica.	109
8.1.4 Proposta combinada per obtenir un rendiment millorat.	109
8.2 Motor de 7,5 kW	113
8.2.1 Variacions de la resistència de l'estator.	113
8.2.2 Variacions de la resistència exterior del rotor.	113
8.2.3 Variacions de la resistència interior del rotor.	114
8.2.4 Variació del tipus de xapa magnètica.	115
8.2.5 Proposta combinada per obtenir un rendiment millorat.	115
8.3 Motor de 1020 kW.	118
8.3.1 Variacions de la resistència de l'estator.	118
8.3.2 Variacions de la resistència del rotor.	119
8.3.3 Variació del tipus de xapa magnètica.	120
8.3.4 Proposta combinada per obtenir un rendiment millorat.	120
9. Estudi econòmic.	124
9.1 Motor de 250 W.	126
9.2 Motor de 7,5 kW.	130
9.3 Motor de 1020 kW.	134
10. Conclusions.	138
11. Acrònims.	140
12. Agraïments.	142
13. Bibliografia.	143
14. Annex	144
14.1 Plànol seccional del motor original de 250 W.	145
14.2 Plànol seccional del motor original de 7,5 kW.	146
14.3 Plànol seccional del motor original de 1020 kW.	147

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

1. INTRODUCCIÓ

Des de la invenció i utilització de les màquines elèctriques rotatives com a motor, aquestes han experimentat grans canvis que han permès la millora contínua d'aquests dispositius, així com del seu control.

A partir del descobriment de la Llei de Lorentz fins a l'actualitat, s'han patentat una gran varietat de motors elèctrics amb diferents principis de funcionament, diferents paràmetres constructius, diferents tipus de bobinats, etc.

Tot això és lògic, ja que existeixen infinitat d'aplicacions que precisen d'un motor, és a dir, d'un moviment rotatiu. Hi ha un gran grup de motors elèctrics que destaca per sobre dels altres i que avui dia s'utilitza a la majoria d'aplicacions que necessiten d'un motor elèctric: el motor d'inducció o motor asíncron.

El motor d'inducció és, sens dubte, el més utilitzat en els temps actuals. El seu principi de funcionament relativament senzill, l'experiència adquirida, les millores introduïdes en el seu procés de fabricació, el seu elevat rendiment, les prestacions dels equips de regulació i els control actuals aplicats a aquest motor són, entre d'altres, les causes del seu èxit.

A més, si tenim en compte el context social actual, sembla ser que aquests motors cada cop tindran més importància, ja que són una bona eina i un bon exemple de com minimitzar l'impacte ambiental a la indústria (cal destacar que ho seran sempre i quan la manera d'obtenir l'electricitat per alimentar-los sigui d'una manera sostenible), ja que el motor elèctric en funcionament no genera emissions contaminants per a l'atmosfera.

Per aquests motius, sembla que la millora continua en aquest tipus de motor seguirà en els propers anys, així com dels elements de control d'aquest.

Hi ha eines o mètodes de càlcul que permeten aquesta millora continua i necessària dels motors elèctrics d'inducció trifàsics. Una d'aquestes eines, l'esquema equivalent del motor, ens ajuda a interpretar i a relacionar elements constructius del motor amb paràmetres elèctrics reals, per tant, és una eina que ens ajudarà a modificar paràmetres constructius que es refljexen en valors elèctrics reals com són les impedàncies.

A més d'aquesta eina de l'esquema equivalent d'un motor, també trobem eines informàtiques que reconeixen les propietats físiques dels materials sotmesos a un corrent quantificat. Cal incidir en que es pot geometritzar l'element a estudiar, per tant, això ens obre un ventall enorme de possibles modificacions a l'hora de buscar possibles optimitzacions.

En el cas que ens ocupa, el software emprat per a la modelització dels motors del pertinent estudi, s'ha fet amb el programa de simulació amb elements finits FEMM (Finite Element Magnetic Methods). Juntament amb la utilització de fulls de càlcul com Excel, que permeten analitzar de forma ràpida els esquemes equivalents i els mètodes de càlcul derivats d'aquest esquema, podem obtenir resultats fiables en els paràmetres que defineixen l'eficiència i el comportament del motor.

Poder modificar els paràmetres constructius d'un motor en una simulació i obtenir resultats fiables, sense la necessitat d'elaborar prototips costosos des del punt de vista temporal i econòmic, facilita molt la investigació en aquest camp. A priori, sembla

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

impossible la idea d'optimitzar o buscar unes prestacions en un motor modificant els seus paràmetres físics "in situ" sense tenir una idea de com afecten aquests paràmetres físics en un esquema equivalent del motor.

Amb aquestes eines tant poderoses ens podem permetre fer el disseny d'un motor i podem deduir-ne el comportament i les prestacions sense ni tan sols haver fet els assajos pertinents per a la seva caracterització, ja que amb aquests mètodes ens aproximem moltíssim a la realitat i a mesura que aquests mètodes avancin, els marges d'error encara seran més petits entra un mesurament real i una simulació amb metodologia de càlcul.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

2. OBJECTIUS

L'objectiu principal del següent estudi i com el propi nom indica, és trobar les relacions que hi ha entre els paràmetres del circuit equivalent dels motors d'inducció amb el comportament de les seves corbes característiques de funcionament.

Veurem com els paràmetres constructius del motors, ja siguin paràmetres de forma o bé de la composició del propi material emprat, afecten als valors dels paràmetres elèctrics que conformen el circuit equivalent de cada motor. Per tant, veurem també com aquests paràmetres constructius condicionen les corbes característiques del comportament del motor.

Aquests dos objectius principals es duran a terme estudiant 3 motors d'inducció reals, modificant alguns paràmetres constructius per a veure com afecten a les seves prestacions en el punt de treball nominal, així com en diferents condicions de càrrega.

Un dels objectius de l'estudi, és també, reforçar els coneixements adquirits durant les classes de les matèries referents a les màquines elèctriques, ja que amb aquest estudi podrem conèixer amb més profunditat com afecten paràmetres del motor sobre el seu rendiment, potència, parell o altres propietats que són interessants des de el punt de vista d'un funcionament òptim per a determinades aplicacions.

Un objectiu destacable, és el fet d' obtenir alguns coneixements sobre un tipus de motor d'inducció que no s'ha estudiat en profunditat durant el Grau d'Enginyeria Elèctrica. Aquest motor, és el motor d'inducció amb un rotor de doble gàbia, així com el seu circuit equivalent.

Per últim, queda l'objectiu de poder aprendre i aprofundir els coneixements a l'hora de redactar documents tècnics com aquest mateix i poder aprendre els estàndards bàsics en relació a aquest tipus de document tècnic.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

3. MOTOR D'INDUCCIÓ TRIFÀSIC: GENERALITATS

Com es cita anteriorment, existeixen una gran quantitat d'aplicacions industrials que utilitzen motors d'inducció trifàsics. És enorme el nombre de varietats constructives, tant en aspectes de potència, que generalment poden anar des de potències molt petites fins a potències de l'ordre de milers de kW, com de volum, refrigeració, fabricants, etc.

Per tant, els motors d' inducció trifàsics poden ser bastant diferents els uns dels altres, però l'aspecte general que solen presentar és el que mostra la següent imatge:



Figura 1: Motor d' inducció trifàsic Hanzel YE2-160L-2, 18.5KW / 25HP, B3.

Tots els motors d' inducció trifàsics, així com altres màquines elèctriques, han de constar d'una placa de característiques col·locada en una part visible i exterior del motor.

La placa de característiques ens proporciona informació dels paràmetres nominals més significatius del motor per a que l'usuari pugui fer un ús correcte, fent-lo treballar dins d'aquests paràmetres.

Els paràmetres nominals que solen aparèixer en la placa de característiques són:

- Potència útil, és a dir, la que entrega l'eix del motor en Watts (W)
- Tensions triangle/estrella en Volts (V).
- Corrents absorbits triangle/estrella en Ampers (A).
- Factor de potència (adimensional).
- Velocitat nominal en revolucions per minut (rpm o min^{-1}).
- Freqüència en Hertz (Hz).

És important per a una correcta interpretació destacar que tots aquests paràmetres depenen de la freqüència que ens ofereixi la xarxa. Per tant, la placa de característiques ja sol donar aquests valors, distingint entre la freqüència europea (50 Hz) i la americana (60 Hz).

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

En la següent imatge es mostra un exemple de placa de característiques d'un motor d'inducció trifàsic:

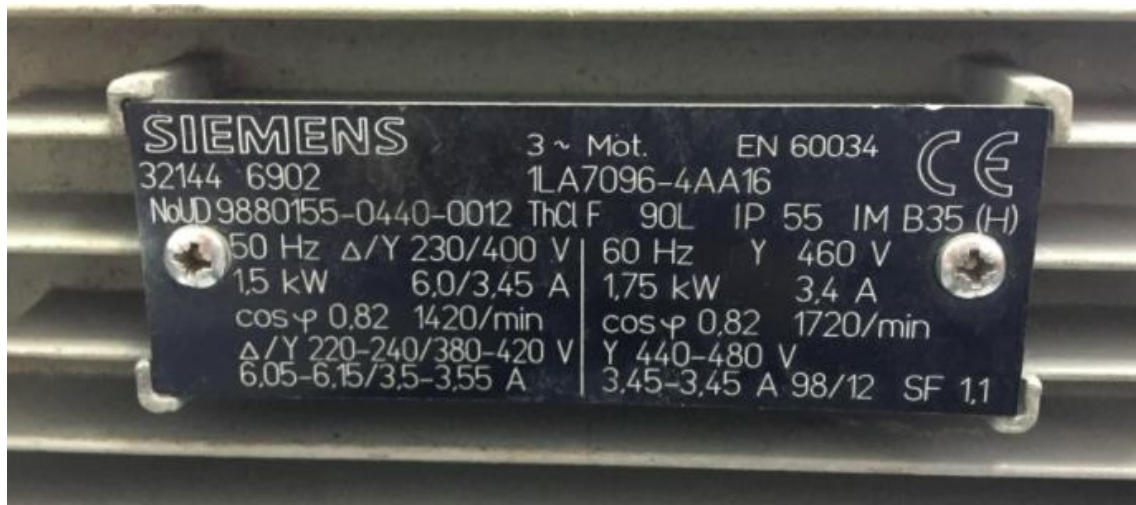


Figura 2: Exemple de placa de característiques del motor d'inducció trifàsic.

A més d'aquestes dades quantitatives, també hi trobem d'altres com el model, la marca del fabricant, el número de sèrie pertanyent a cada motor, el tipus de servei, la normativa de construcció, la forma constructiva, per a quines substàncies el motor és impermeable, etc.

Alguns paràmetres donen informació sobre com s'ha de muntar i disposar aquest motor, sobre la direcció i el sentit de l'eix, sobre com fixar el motor a la bancada i sobre el tipus de carcassa. A la següent imatge podem veure alguns dels tipus de forma constructiva segons la IEC 60034 – 7.:

Forma Constructiva	Configuración																	
	Referencia	B3R(E)	B3L(D)	B3T	B5R(E)	B5L(D)	B5T	B35R(E)	B35L(D)	B35T	B14R(E)							
Detalles	Carcasa	Con patas			Sin patas			Con patas			Sin patas							
	Punta del eje	A la izquierda			A la izquierda			A la izquierda			A la izquierda							
	Montaje	Base o rieles			Brida FF			Base o brida FF			Brida FC							
Forma Constructiva	Configuración																	
	Referencia	B14L(D)	B14T	B34R(E)	B34L(D)	B34T	V5L(D)	V5R(E)	V5T	V6L(D)	V6R(E)	V6T	V1	V3				
Detalles	Carcasa	Sin patas		Con patas	Con patas		Con patas			Con patas	Sin patas	Sin patas						
	Punta del eje	A la derecha		A la izquierda	A la derecha		Abajo			Arriba	Abajo	Arriba						
	Fijación	Brida FC		Base o brida FC	Base o brida FC		Pared			Pared	Brida FF	Brida FF						
Forma Constructiva	Configuración																	
	Referencia	V15L(D)	V15R(E)	V15T	V36L(D)	V36R(E)	V36T	V18	V19	B6L(D)	B6R(E)	B6T	B7L(D)	B7R(E)	B7T	B8L(D)	B8R(E)	B8T
Detalles	Carcasa	Con patas			Con patas			Sin patas	Sin patas	Con patas			Con patas			Con patas		
	Eje de salida	Abajo			Arriba			Abajo	Arriba	De frente			De frente			De frente		
	Fijación	Pared o brida FF			Pared o brida FF			Brida C	Brida C	Pared			Pared			Techo		

Figura 3: Taula de formes constructives del motor d'inducció.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Una dada que pot oferir la placa de característiques és la classe tèrmica, que és la temperatura fins la qual els cables que conformen els debanats poden garantir un bon funcionament i no fondre la seva protecció tèrmica (que normalment és un vernís o una resina que aguanta fins a un determinat nivell de temperatura).

La classe tèrmica se sol representar amb una lletra majúscula, la qual equival a una temperatura en concret. Aquesta manera de classificar l'aïllament tèrmic és la estipulada segons la normativa de la "Comisión Electrotécnica Internacional (CEI)", la més comuna i coneguda per les seves sigles en anglès (IEC). Tot i així, també existeixen altres tipus de classificació com ho pot ser la UL.

La següent figura mostra la relació entre la temperatura en graus centígrads (°C) i la seva corresponent lletra triada per la IEC:

Temperatura	Clase tèrmica IEC	Clase tèrmica UL
90 °C	Y	-
105 °C	A	-
120 °C	E	120 (E)
130 °C	B	130 (B)
155 °C	F	155 (F)
180 °C	H	180 (H)
200 °C	200	200 (N)
220 °C	220	220 (R)
240 °C	-	240 (S)
250 °C	250	Superior a 240, C

Figura 4: Relacions de classe tèrmica IEC i UL.

Un altre paràmetre que podem trobar a la placa de característiques és el de la eficiència. Els motors d'inducció tenen cada vegada rendiments més elevats i, per tant, la eficiència és un paràmetre que pot ser important en la seva selecció per una determinada aplicació, especialment si el nivell d'hores de servei és alt.

Tot i semblar una paradoxa, es poden utilitzar motors menys eficients (i més econòmics) per aplicacions en que la posta en servei del motor es requereixi amb molt poca freqüència. D'aquesta manera, amb un motor menys eficient, s'incrementarà el consum en el corrent de la xarxa, però s'estalviarà capital en la compra del propi motor.

La manera de classificar la eficiència dels motors es realitza amb un codi alfanumèric el qual comença amb les sigles IE (*International Efficiency*) i un número que, a mesura que augmenta, també ho fa la eficiència. Anteriorment, els motors duïen les sigles EFF en comptes de les IE, per tant, és possible veure algunes plaques de característiques amb les lletres EFF fent referència a l'eficiència del motor. Aquesta legislació està regida per la IEC 60034 – 2 / 30 / 31.

Els tipus d'eficiència que existeixen actualment són tres:

- IE1: Eficiència estàndard.
- IE2: Alta eficiència.
- IE3: Eficiència Premium.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

De moment, aquestes són les tres eficiències més comuns, tot hi que es comença a parlar de motors súper eficients: l'IE4 i l'IE5.

En la següent gràfica es mostren les relacions de potència i rendiment amb les classes d'eficiència:

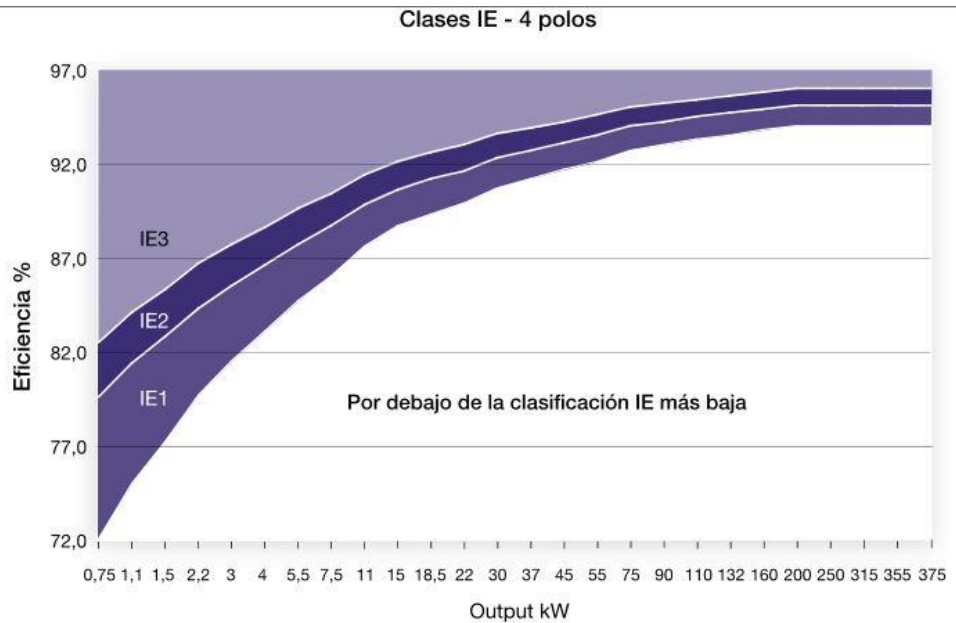


Figura 5: Clases IE dels motors de 4 pols.

El tipus de refrigeració també és un dels paràmetres que podem trobar a la placa de característiques, ja que és important mantenir el motor amb una temperatura en el servei inferior a la classe tèrmica, sinó, es podria fer malbé durant el seu funcionament. Els mètodes de refrigeració més habituals solen ser:

- Per ventilació forçada per aire amb un ventilador solidari a l'eix.
- Per aigua.
- Per radiació a través de la carcassa.
- Sense refrigeració.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

La següent figura mostra un motor d'inducció trifàsic refrigerat per ventilació forçada:



Figura 6: Motor d'inducció trifàsic refrigerat per ventilació forçada.

3.1 APLICACIONES

Pel que fa a les aplicacions del motor elèctric, és rellevant parlar dels accionaments elèctrics, que són, per definició, el sistema que transforma una energia primària d'entrada (corrent) en el moviment (rotació de l'eix) que impulsa una màquina o un dispositiu (càrrega del motor). Per tant, el que fa que l'aplicació del motor sigui possible és l'accionament elèctric en general, no tan sols el motor.

La següent imatge mostra l'esquema típic d'un accionament elèctric:

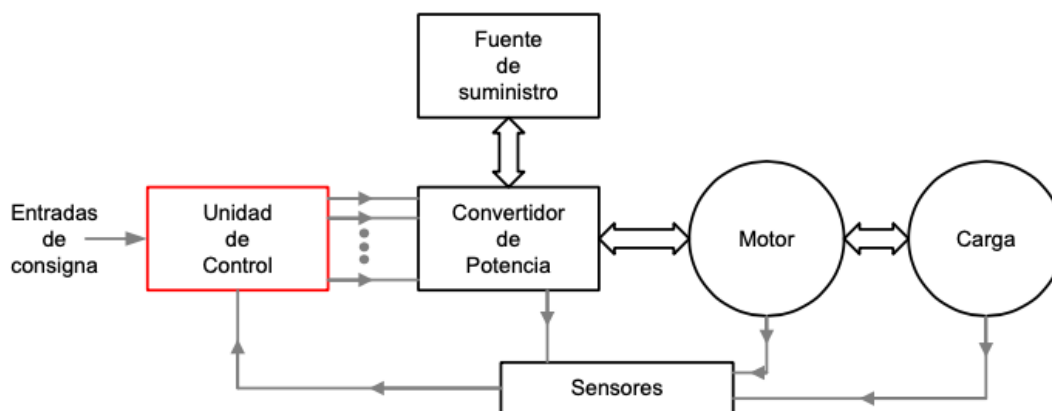


Figura 7: Esquema d'accionament elèctric.

Un factor molt important per a una gran quantitat d'aplicacions és la necessitat de regulació i control d'aquests motors. Gràcies a dispositius electrònics, podem adaptar el motor a una determinada necessitat. Cal recordar que un accionament elèctric permet treballar en els quatre quadrants del pla parell-velocitat i això encara amplia més el ventall d'aplicacions realitzables.

Aquests sistemes de control permeten variar la freqüència, la tensió, reduir el pic del corrent d'arranc, corregir la velocitat amb realimentació, etc.

Com s'ha esmentat anteriorment, és pràcticament impossible citar tots els equips que s'impulsen a través d'un motor d'inducció trifàsic, ja que és el més utilitzat en la indústria.

Algunes de les aplicacions més comuns són les següents:

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

- Acondicionadors d'aire.
- Ascensors.
- Bombes.
- Compressors.
- Escales mecàniques.
- Portes automàtiques.
- Cadenes de muntatge.

A més de trobar aquest tipus de motor en entorns industrials, també el podem trobar en edificis d'habitatges, centres comercials o instal·lacions esportives, entre d'altres.

Que aquest tipus de motor sigui tan habitual és degut, entre altres aspectes, al seu alt rendiment, fet que indica un menor impacte a la factura de consum elèctric.

Però hi ha un altre factor igual o més important per la infinitat d'aplicacions, que és el gran marge de potències que ofereixen els fabricants en llistes de potències normalitzades dels diferents tipus de motor d'inducció trifàsics, *figura 8*.

Potencia			Eficiencia [%]						Factor de potencia			Corriente			Torque			Momento de inercia			
[kW]	[HP]	Tipo	% de la potencia nominal						FS			In	Is	Ivacio	Tn	Ts	Tmax	J=1/4GD2	Peso	Ruido	
			r/min	50	75	100	50	75	100		[A]	[A]	[A]	[Nm]	[Nm]	[Nm]	Tn	Tn	[kgm2]	[kg]	[dBA]
2 polos = 3000 r/min																					
400 V 50 Hz																					
Diseño básico																					
0,37	0,5	M2QA	71 M2A	2780	62,2	68,0	70,0	0,68	0,79	0,81	1,15	0,94	6,1	0,5	1,3	2,2	3,0	0,00030	10	56	
0,55	0,74	M2QA	71 M2B	2785	69,2	72,4	73,0	0,71	0,80	0,82	1,15	1,3	6,1	0,7	1,9	2,2	2,7	0,00037	11	56	
0,75	1	M2QA	80 M2A	2840	72,4	75,5	75,0	0,74	0,84	0,85	1,15	1,7	6,1	0,7	2,5	2,2	3,0	0,00091	16	57	
1,1	1,5	M2QA	80 M2B	2855	72,7	77,9	78,0	0,72	0,82	0,85	1,15	2,4	7,0	1,1	3,7	2,2	2,2	0,00107	17	58	
1,5	2	M2QA	90 S2A	2850	75,7	79,0	79,0	0,73	0,83	0,87	1,15	3,2	7,0	1,4	5,0	2,2	2,5	0,00135	21	61	
2,2	2,9	M2QA	90 L2A	2850	78,8	81,8	81,5	0,71	0,81	0,86	1,15	4,5	7,0	2,2	7,4	2,2	3,5	0,00163	24	61	
3	4	M2QA	100 L2A	2860	80,1	83,2	83,0	0,74	0,85	0,88	1,15	5,9	7,0	2,5	10,0	2,2	3,0	0,00402	33	65	
4	5,4	M2QA	112 M2A	2900	80,3	84,6	85,0	0,78	0,89	0,90	1,15	7,6	7,0	2,9	13,2	2,2	3,2	0,00671	42	67	
5,5	7,4	M2QA	132 S2A	2920	84,9	87,9	87,5	0,79	0,89	0,89	1,15	10,2	7,0	3,3	18,0	2,2	3,0	0,01241	58	70	
7,5	10	M2QA	132 S2B	2920	88,2	90,1	88,5	0,82	0,88	0,90	1,15	13,6	7,0	3,9	24,5	2,2	3,5	0,01491	63	70	
11	15	M2QA	160 M2A	2930	86,9	90,5	90,0	0,73	0,86	0,89	1,15	19,8	6,5	6,8	36	2,5	3,1	0,04360	112	72	
15	20	M2QA	160 M2B	2920	90,1	90,1	90,0	0,81	0,87	0,89	1,15	27	6,5	8,1	49	2,5	2,6	0,05510	122	72	
18,5	25	M2QA	160 L2A	2930	90,1	90,9	90,5	0,84	0,89	0,90	1,15	33	6,5	9,3	60	2,5	2,7	0,06549	142	72	
22	29	M2QA	180 M2A	2940	90,0	91,0	90,8	0,85	0,89	0,90	1,15	39	6,5	10,2	71	2,3	2,5	0,08805	170	72	
30	40	M2QA	200 L2A	2955	89,5	91,1	91,4	0,84	0,89	0,90	1,15	52	6,5	12,9	97	2,2	2,6	0,14821	235	81	
37	50	M2QA	200 L2B	2955	90,3	91,8	92,2	0,85	0,89	0,90	1,15	64	6,5	15,7	120	2,3	2,6	0,16822	254	81	
45	60	M2QA	225 M2A	2970	90,2	92,2	92,6	0,81	0,86	0,89	1,15	78	7,0	23,6	145	2,5	2,7	0,29345	328	81	
55	74	M2QA	250 M2A	2960	90,3	91,7	93,4	0,83	0,90	0,89	1,15	96	7,5	25,9	177	2,4	2,7	0,37840	390	84	
75	101	M2QA	280 S2A	2972	91,0	92,2	94,0	0,82	0,86	0,90	1,15	128	7,5	35	241	2,5	3,0	0,58700	504	85	
90	121	M2QA	280 M2A	2972	91,7	92,3	94,3	0,84	0,89	0,91	1,15	153	7,5	37	289	2,3	3,0	0,61500	560	85	
110	147	M2QA	315 S2A	2980	90,2	92,2	94,0	0,79	0,85	0,91	1,15	187	7,1	65	352	1,8	3,4	1,40830	910	88	
132	177	M2QA	315 M2A	2980	90,3	92,3	94,5	0,81	0,87	0,91	1,15	223	7,1	70	423	1,8	3,3	1,55840	1010	88	
160	214	M2QA	315 L2A	2979	91,8	93,5	94,6	0,78	0,85	0,92	1,15	267	7,2	78	513	1,8	3,2	1,72560	1070	88	
200	268	M2QA	315 L2B*	2978	92,3	94,0	94,8	0,78	0,86	0,92	1,15	332	7,2	91	641	1,8	3,2	1,94050	1120	88	
250	335	M2QA	355 M2A*	2980	94,4	94,5	95,4	0,84	0,90	0,92	1,15	415	7,1	87	801	2,3	2,8	3,05000	1438	89	
315	422	M2QA	355 L2A*	2980	95,0	95,3	96,0	0,84	0,90	0,92	1,15	520	6,9	109	1009	2,0	2,8	3,60000	1726	89	

Figura 8: Exemple de potències de llista normalitzades en un catàleg.

Amb l'ajuda dels convertidors electrònics de potència, encara es poden explotar més aquestes aplicacions.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

La següent taula mostra els convertidors de potència més utilitzats pels motors asíncrons trifàsics:

CONVERTIDOR DE POTÈNCIA	FUNCIÓ	APLICACIÓ
Regulador	CA →CA (tensió variable, freqüència fixa).	Arrancador de motors asíncrons
Inversor	CC→CA (tensió i freqüència variables).	Control de motors de CA síncrons i asíncrons.
Cicloconvertidor	CC→CA (tensió i freqüència variables).	Grans motors de CA síncrons i asíncrons.

Taula 1: Convertidors de potència utilitzats en accionaments elèctrics.

Queda clar que la gran quantitat d'aplicacions en les que es poden fer servir aquests motors són degudes al propi motor, però també les possibiliten els elements que conformen l'accionament elèctric en general.

Les següents imatges mostren algunes de les aplicacions citades anteriorment:

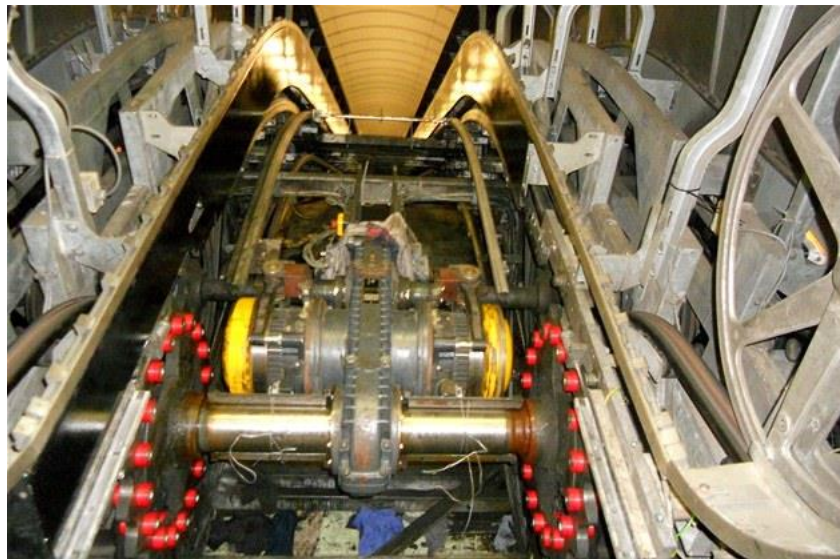


Figura 9: Conjunt del grup motriu d'escaleres mecàniques.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.
Marcel Martínez Arco



Figura 10: Compressor d'ús industrial.



Figura 11: Accionament de porta automàtica.

3.2 CARACTERÍSTIQUES CONSTRUCTIVES

Tal i com hem vist en l'apartat anterior, tot i que s'identifiquin com a motors d'inducció trifàsics, existeixen molts tipus diferents d'aquests mateixos motors, ja que comprenen una gran varietat de potències i prestacions.

Sigui quin sigui el model de motor, hi trobem característiques constructives i elements que, de forma general, apareixen en tots els motors d'inducció trifàsics.

Els components que generalment conformen un motor d'inducció trifàsic són els següents:

- **La carcassa:** És la part exterior del motor, encarregada de contenir i protegir l'estator i el rotor en el seu interior. Pot ser de diferents materials i grandàries depenent del disseny del motor en sí mateix i de l'aplicació a la qual estigui destinada.

El grau de protecció enfront la penetració de sòlids i aigua s'identifica a la placa de característiques normalment amb les sigles "IP" i dos dígit, el primer referit al grau de penetració de sòlids i, el segon, al grau de penetració de l'aigua.

Sólidos		Agua	
1	1 Protegido contra un objeto más grande que 50mm así como una mano.	1	1 Protegido contra la caída vertical de gotas de agua, limita el ingreso permitido.
2	2 Protegido contra un objeto más grande de 12.5mm así como un dedo.	2	2 Protegido contra la caída vertical de gotas de agua con una inclinación de 15° sobre el eje vertical. Limita el ingreso permitido.
3	3 Protegido contra un objeto más grande de 2.5mm así como un destornillador.	3	3 Protegido contra el rocío de agua con una inclinación de 60° sobre el eje vertical. Limita el ingreso permitido por 3 minutos.
4	4 Protegido contra un objeto más grande de 1mm así como un cable.	4	4 Protegido contra el rocío del agua desde todas las direcciones. Limita el ingreso permitido.
5	5 Protegido contra el polvo. Limita el ingreso del polvo permitido. No interferirá con la operación del equipo. Dos u ocho horas.	5	5 Protegido contra chorros de agua. Limita el ingreso permitido.
6	6 Antipolvo. No ingresa el polvo. Dos u ocho horas.	6	6 Agua de fuertes olas de agua o agua proyectada desde fuertes chorros, no entrará en el dispositivo en grandes cantidades.
Ejemplo:		7	7 Protección contra los efectos de la inmersión en agua entre 15cm y 1m por 30 minutos.
IP65		8	8 Protección contra los efectos de la inmersión en agua bajo presión por largos periodos.
Ingreso Protección			

Figura 12: Guia de classificacions de protecció en front la penetració de la carcassa.

Existeixen també diferents tipus de carcassa:

- Totalment tancada.
- Oberta.
- A prova de goteig.
- A prova d' explosions.
- De tipus submergible.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco



Figura 13: Exemple de carcassa d'un motor d'inducció trifàsic a prova d'explosions.

Aquestes especificacions relatives a la carcassa del motor estan sotmeses a la norma UNE50347, que marca el tipus de carcassa depenent de les característiques constructives del propi motor.

- **L'estator:** Part inductora, que constitueix la part fixa del motor. Està format per xapes de material ferromagnètic. Depenent de la qualitat d'aquest material, el paràmetre de la inductància magnetitzant ($L\mu$) variarà, fet que afectarà directament a la reactància magnetitzant ($X\mu$), que influeix força sobre el corrent de buit.

La qualitat de la xapa magnètica utilitzada té un efecte directe sobre les pèrdues al ferro que tindrà el motor i, en conseqüència, sobre la resistència que les avalua (R_{fe}).

A l'interior del material ferromagnètic es genera el flux magnètic. Les característiques principals d'aquest camp magnètic són que és variable en el temps i que és giratori. Es genera quan es fan circular els corrents trifàsics a través dels debanats.

El camp magnètic tindrà un nombre de pols determinat en funció del disseny del bobinat del motor. L'estator, en aquests motors, és del tipus distribuït en ranures.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco



Figura 14: Exemple d'estator ranurat.

- **El rotor:** Conformava l'induït del motor i constitueix la part mòbil del motor on s'indueixen les forces electromotrius i els corrents a partir del flux generat a l'estator. És on l'energia elèctrica es converteix en energia mecànica. Aquesta part del motor és solidària a l'eix i és precisament aquest element l'encarregat d'aquesta transmissió d'energia mecànica a la càrrega del motor.

Els tipus de rotor més habituals en els motors d'inducció trifàsics són dos:

- a) El rotor de gàbia d'esquirol (el més utilitzat, de forma majoritària).
- b) El rotor bobinat.

En aquest estudi veurem un motor amb el rotor anomenat de doble gàbia d'esquirol, fet que canviarà l'esquema equivalent típic del motor d'inducció trifàsic i també la seva metodologia d'estudi i prestacions. També hi ha altres tipus de gàbia, com la gàbia profunda i la gàbia circular simple.

- **Els debanats o bobinats:** És el conjunt de fils que omplen les ranures i conformen els pols de l'estator. Estan connectats a les fases de la xarxa (o a l'equip electrònic). Juntament amb el material ferromagnètic, són els responsables de crear les forces electromotrius que generen el moviment del motor.
- **La caixa de connexions o de bornes:** És l'element que uneix els conductors d'alimentació dels debanats de l'estator des de la xarxa trifàsica. Normalment, la caixa de bornes, constructivament, possibilita l'alimentació en connexió triangle o estrella.

En la connexió estrella, el motor s'alimenta a la tensió elevada, fet que permet que el corrent absorbit pel motor sigui el més baix.

En el cas de la connexió triangle, succeeix el contrari, la tensió d'entrada és més baixa però el corrent és més alt, ja que amb les dues configuracions, tant la potència com la velocitat nominal, es mantenen iguals.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

La següent imatge mostra l'esquema de connexions estrella i triangle respectivament:

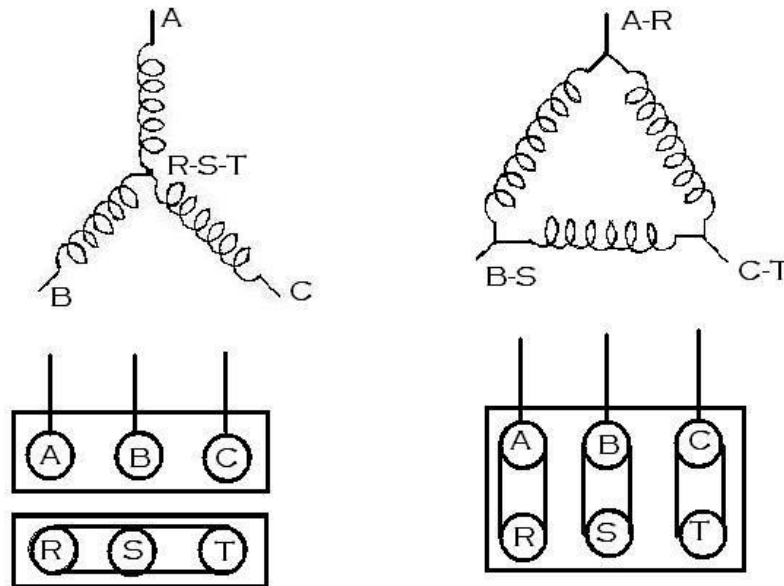


Figura 15: Connexions estrella i triangle.

Les connexions de la caixa de bornes tenen sortides i entrades reglades segons la norma IEC60034-8, distingint cada borna de connexió, ja sigui d'entrada o de sortida amb una lletra majúscula i un dígit que defineix si és una entrada o sortida.

Alguns d'aquests components es citen al article tècnic de "Motores eléctricos trifásicos: usos, componentes y funcionamiento" del professor en enginyeria elèctrica Alberto Luis Farina.

Cal afegir que hi ha més elements comuns que conformen els motors d'inducció trifàsics com per exemple els coixinets, la fixació a la bancada o la placa de característiques (ja mencionada anteriorment). Aquests elements però, no intervenen en el principi físic del funcionament del motor, ja que fan una funció mecànica per a fixar o per disminuir forces del propi moviment del motor o bé, com en el cas de la placa de característiques, a nivell informatiu.

3.3 PRINCIPI DE FUNCIONAMENT

El concepte del qual parteix el principi de funcionament dels motors d'inducció asíncrons és el de la inducció mútua de Faraday. En el motor d'inducció trifàsic, s'alimenten els debanats de l'estator de cada una de les fases que han d'estar decalades (120° si el sistema de la xarxa està ben equilibrat).

Un cop alimentat l'estator, es produeix un camp magnètic giratori que girarà a una velocitat determinada en funció de la freqüència a la qual s'alimenti, segons el Teorema de Ferraris.

Aquest camp magnètic és generat pel flux d'excitació variable de l'alimentació de la xarxa. Això provoca la generació d'una força electromotriu que s'induirà en el rotor, generant en aquest una circulació de corrent que provocarà una força mecànica en el rotor. Per tant, els conductors de l'induït es veuran arrossegats per una força amb la

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

mateixa direcció que la velocitat del camp magnètic giratori de l'estator, coneguda com velocitat de sincronisme.

El rotor seguirà, per tant, aquest flux giratori sense arribar a atrapar-lo, provocant un parell mecànic que es transmetrà a l'eix.

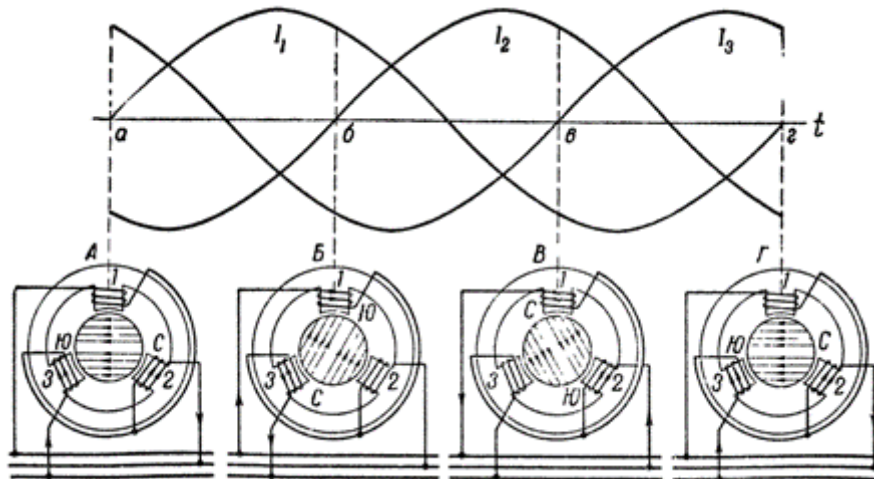


Figura 16: Funcionament motor asíncron.

Tal i com mostra la *figura 16*, la intensitat del camp magnètic de l'estator varia en funció del temps, degut al decalatge de les fases (flux magnètic variable). Aquesta força electromotriu s'indueix al rotor i, per tant, hi circula un corrent sota la influència del camp magnètic. Es crearà doncs, la força mecànica citada anteriorment en el sentit del camp magnètic inductor.

Segons la Llei de Lenz, la velocitat del rotor mai serà igual a la de sincronisme, ja que el parell mecànic del rotor intentarà reduir les variacions de flux sense aconseguir-ho mai, ja que llavors no hi circularia corrent pel rotor.

Aquesta velocitat relativa deguda a la diferència de velocitats s'anomena lliscament. Existeixen diverses maneres de relacionar de forma teòrica el lliscament, la velocitat síncrona i la velocitat de gir del rotor:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} \quad [\text{rpm}] \quad [1] \quad , \quad s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad [2]$$

On:

n_1 = Velocitat síncrona (rpm).

n = Velocitat de gir del rotor (rpm).

f = Freqüència (Hz).

p = Parells de pols.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

3.4 CIRCUIT EQUIVALENT

Una bona modelització per a un estudi teòric d'un motor d'inducció trifàsic és la utilització del circuit equivalent.

En ell s'hi representen les tensions, les intensitats i les impedàncies, tant de l'estator com del rotor. A més, s'hi representen les impedàncies de la branca de buit, que valoren les pèrdues al ferro pròpies del material constructiu i que valoren la generació del flux magnètic.

La disposició de l'esquema equivalent per fase més utilitzat és la següent:

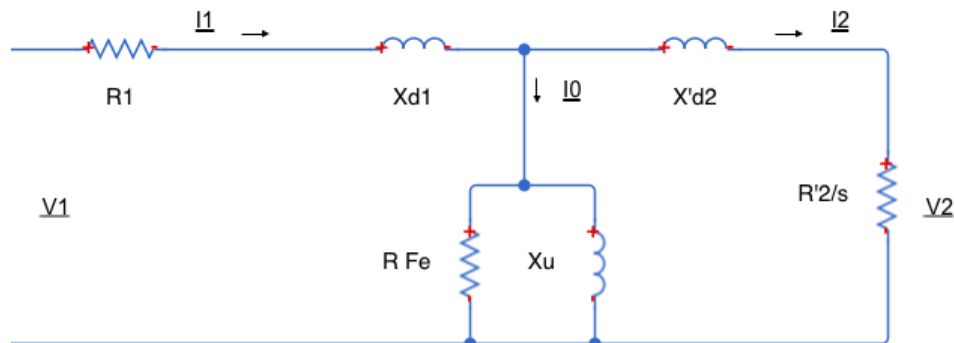


Figura 17: Circuit equivalent del motor d'inducció trifàsic.

On:

$R1$: resistència de l'estator.

$Xd1$: 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.

$X\mu$: reactància magnetitzant.

RFe : resistència de pèrdues al ferro.

s : lliscament.

Aquest és l'esquema equivalent en el qual es basa aquest estudi per a l'elaboració de càlculs. L'objectiu és obtenir els pertinents resultats dels diferents motors amb gàbia simple.

L'esquema del circuit per als motors de gàbia simple sempre serà el mateix, per tant, un cop extretes les equacions, només caldrà modificar els paràmetres per a obtenir resultats en els diferents motors a analitzar.

ASSAJOS PER A LA SEVA DETERMINACIÓ

Per obtenir el circuit equivalent en un motor d'inducció, es pot procedir a efectuar assajos de laboratori:

- Mesura de la resistència de l'estator (obtenció directa de $R1$).
- Assaig en curt circuit.
- Assaig en buit.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Prèviament però, cal determinar el valor de R_1 amb una mesura de la resistència dels debanats.

- **Assaig en curt circuit:**

- a) $s=1$, per tant, $R'_2/s= R'_2$
- b) $R'_2, X'_{d2} \ll R_{FE}, X_\mu$, per tant, es pot menysprear la branca de buit
- c) $V_{cc} < V_{1n}$

S'aplica el corrent nominal (I_{1n}) amb el rotor bloquejat i es mesuren les potències absorbides en aquestes condicions (P_{cc} i Q_{cc}).

Resolem:

$$P_{cc} = 3 (R_1 + R'_2) I_{1n}^2 \rightarrow R'_2 \quad [\Omega] \quad [3]$$

$$Q_{cc} = 3 (X_{d1} + X'_{d2}) I_{1n}^2 \rightarrow (X_{d1} + X'_{d2}) \quad [\Omega] \quad [4]$$

Sabem que, segons la classe del motor, la relació de reactàncies és:

Classe de motor	X_{d1}/X'_{d2}
A	1
B	0,67
C	0,43
D	1
Bobinat	1

Taula 2: Relació de reactàncies segons la classe del motor.

Classe de motor

Aplicant aquesta relació, s'obtenen els valors de X_{d1} i de X'_{d2} .

- **Assaig en buit:**

- a) $s \approx 0$, per tant, $R'_2/s \approx \infty$
- b) $I'_2 \approx 0$

S'aplica la tensió nominal (V_{1n}) amb el rotor girant sense càrrega i es mesuren les potències absorbides en aquestes condicions (P_0 i Q_0).

Resolem:

$$Q_0 = 3 X_{d1} X_1^2 + 3 \frac{E^2}{X_\mu} \rightarrow X_\mu \quad [\Omega] \quad [5]$$

A més, cal determinar la força electromotriu:

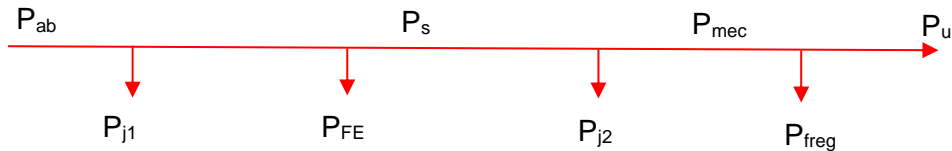
$$E' = \left(\frac{R'_2}{s} + jX'_{d2} \right) I'_2 \quad [V] \quad [6]$$

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

BALANÇ DE POTÈNCIES

Un altre aspecte interessant per a l'estudi del comportament del motor és el balanç de potències. Aquest balanç permet conèixer la potència, el parell o bé les pèrdues en cada part del procés de funcionament del motor asíncron.



On:

P_{ab} : potència absorbida.

P_{j1} : pèrdues Joule a l'estator.

P_{FE} : pèrdues al ferro.

P_s : potència síncrona.

P_{j2} : pèrdues Joule al rotor.

P_{mec} : potència mecànica.

P_{freg} : pèrdues per fregaments o mecàniques.

P_u : potència útil.

La obtenció de cada un dels termes del balanç de potències és a partir de les següents relacions:

$$P_{ab} = 3 V_1 I_1 \cos \varphi \quad [\text{W}] \quad [7]$$

$$P_{j1} = 3 R_1 I_1^2 \quad [\text{W}] \quad [8]$$

$$P_{Fe} = \frac{3 E^2}{R_{Fe}} \quad [\text{W}] \quad [9]$$

$$P_s = 3 \frac{R'_2}{s} I_2'^2 = P_{ab} - P_{j1} - P_{FE} \quad [\text{W}] \quad [7]$$

$$P_{j2} = 3 R'_2 I_2'^2 = P_s s \quad [\text{W}] \quad [8]$$

$$P_{mec} = 3 \frac{R'_2}{s} (1 - s) I_2'^2 = P_s - P_{j2} = P_s (1 - s) \quad [\text{W}] \quad [9]$$

$$P_u = P_{mec} - P_{freg} = P_{ab} - \sum P_{èrdues} \quad [\text{W}] \quad [10]$$

$$M_u = \frac{P_u}{\Omega} \quad [\text{Nm}] \quad [11]$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_{ab}} \quad [12]$$

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

$$M_i = \frac{P_{mec}}{\Omega} = \frac{P_s}{\Omega_s} \quad [\text{Nm}] \quad [11]$$

Per resoldre el circuit equivalent, es pot procedir a la reducció de l'equivalent Thévenin, vist des del rotor:

$$V_{TH} = \frac{V_1}{R_1 + jX_{d1} + \frac{1}{\frac{1}{R_{FE} + jX_u} + \frac{1}{R'_{21/s} + jX'_{d21}} + \frac{1}{R'_{22/s} + jX'_{d22}}}} \quad [\text{V}] \quad [12]$$

$$Z_{TH} = \frac{1}{\frac{1}{R_1 + jX_{d1}} + \frac{1}{R_{FE} + jX_u} + \frac{1}{R'_{21/s} + jX'_{d21}} + \frac{1}{R'_{22/s} + jX'_{d22}}} \quad [\Omega] \quad [13]$$

Un dels motors de l'estudi està constituït per un rotor de doble gàbia, per tant, el seu esquema equivalent, així com la metodologia de càlcul, variaran lleugerament respecte allò explicat en aquest apartat:

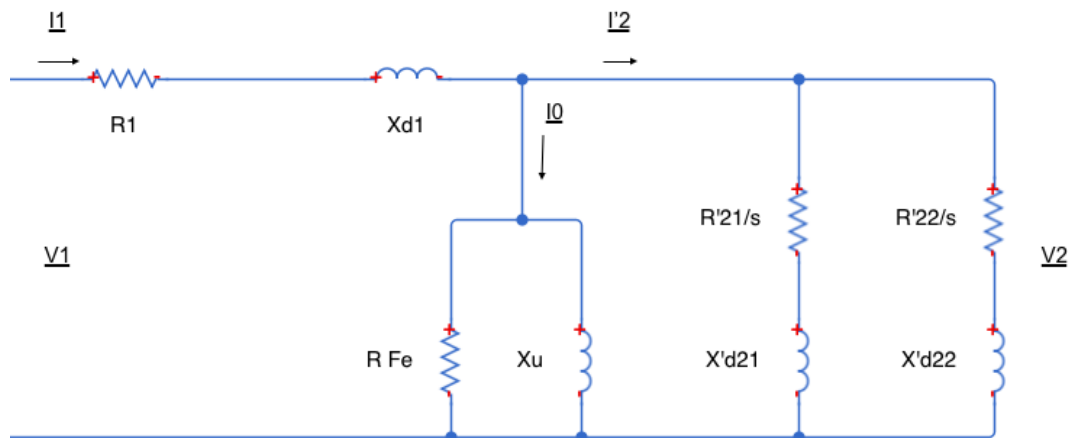


Figura 18: Esquema equivalent del motor d'inducció trifàsic amb rotor de doble gàbia.

On:

R'_{21} = resistència de la gàbia externa del rotor referida a l'estator.

X'_{21} = 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'_{22} = reactància de la gàbia interna del rotor referida a l'estator.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

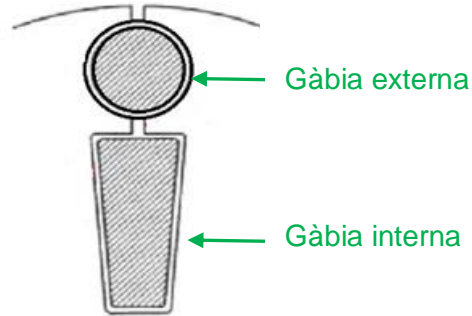


Figura 19: Rotor de doble gàbia.

Com es pot observar en aquest esquema, apareixen dues impedàncies de rotor, associades a la gàbia externa i a la gàbia interna.

La resolució de l'esquema equivalent en el rotor implica realitzar el paral·lel entre aquestes dues branques tal hi com explica l'article "Estimation of equivalent circuits for induction motors in steady state including mechanical and stray load losses." de Marcel Torrent.

3.5 CORBES CARACTERÍSTIQUES EN RÈGIM PERMANENT

Les corbes característiques són una eina gràfica molt útil en la que es descriu el comportament del motor tenint en compte les relacions de diferents paràmetres en diferents punts de funcionament de la màquina.

Les corbes característiques més significatives per a l' estudi dels motors asíncrons són les següents:

- **Parell - Velocitat:**

Permet visualitzar punts interessants en una relació de parell i velocitat. Contempla punts com (*figura 20*):

- a) Arranc, el parell és conegut com a parell d'arranc (M_a): És el parell necessari per a que, com el seu nom indica, la màquina comenci a girar. En aquest punt, el lliscament és 1 i la velocitat és de 0 rpm.
- b) Punt de parell màxim (M_{max}): És el punt de parell més gran que pot oferir el motor. En aquest punt, el lliscament ($s_{M_{max}}$) sol ser d'entre un 30 i un 15 per cent.
- c) Punt nominal, el parell és conegut com a parell nominal (M_n): És el punt definit en la placa de característiques. En aquest punt trobem lliscaments (s_n) entre el 3 i el 8 per cent.
- d) Punt de sincronisme: És un punt "límit" perquè la màquina mai treballarà realment en aquest punt, ja que la velocitat hauria de ser la de sincronisme (n_s). Si això arribés a passar, no circularia corrent per el rotor i la màquina es pararia. En aquest punt, tant el parell com el lliscament són igual a 0.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

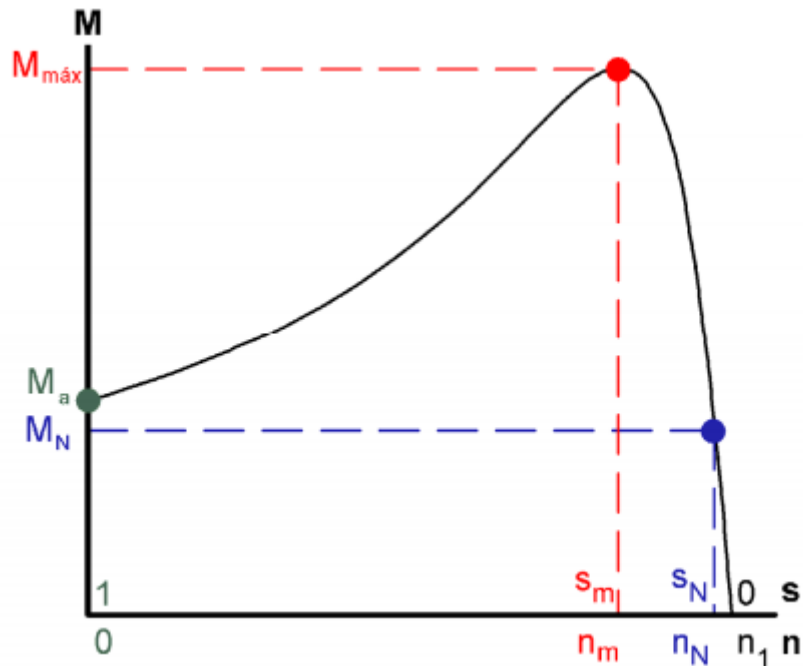


Figura 20: Corba Parell-Velocitat del motor asíncron.

El punt de funcionament del motor correspon amb la intersecció entre el parell resistent de la càrrega i el parell del motor (figura 21):

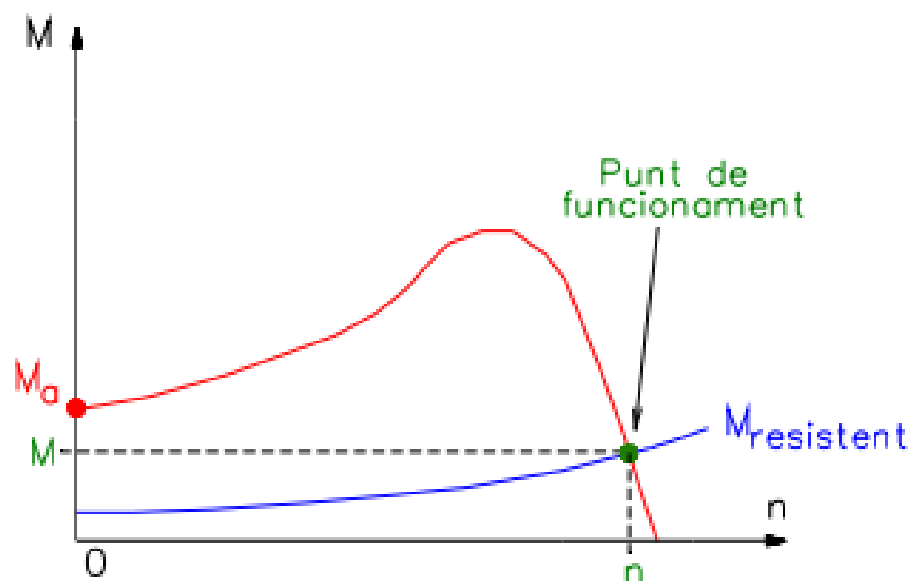


Figura 21: Punt de funcionament.

Cal destacar que se sol utilitzar molt la zona lineal de la corba Parell-Velocitat, ja que és en aquesta on normalment treballa el motor.

- **Corrent - Velocitat:**

Aquesta gràfica és interessant des del punt de vista del consum elèctric del motor. Permet veure quin és el consum a qualsevol velocitat a la que treballi el motor.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

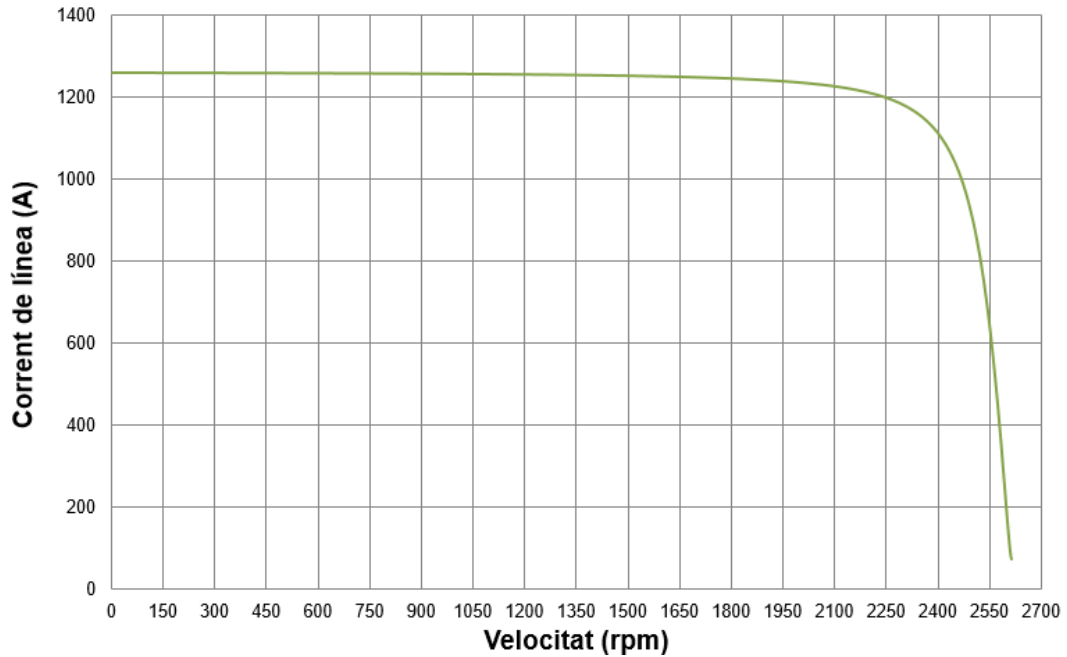


Figura 22: Corba Corrent-Velocitat del motor asíncron.

- **Factor de potència - Índex de càrrega:**

En aquesta gràfica podem observar el factor de potència i , per tant, l'afectació en els consums de reactiva del motor en funció de la càrrega aplicada. A mesura que la càrrega augmenta, també augmenta el factor de potència, és a dir, a mesura que augmenta la càrrega, el consum de potència reactiva disminueix.

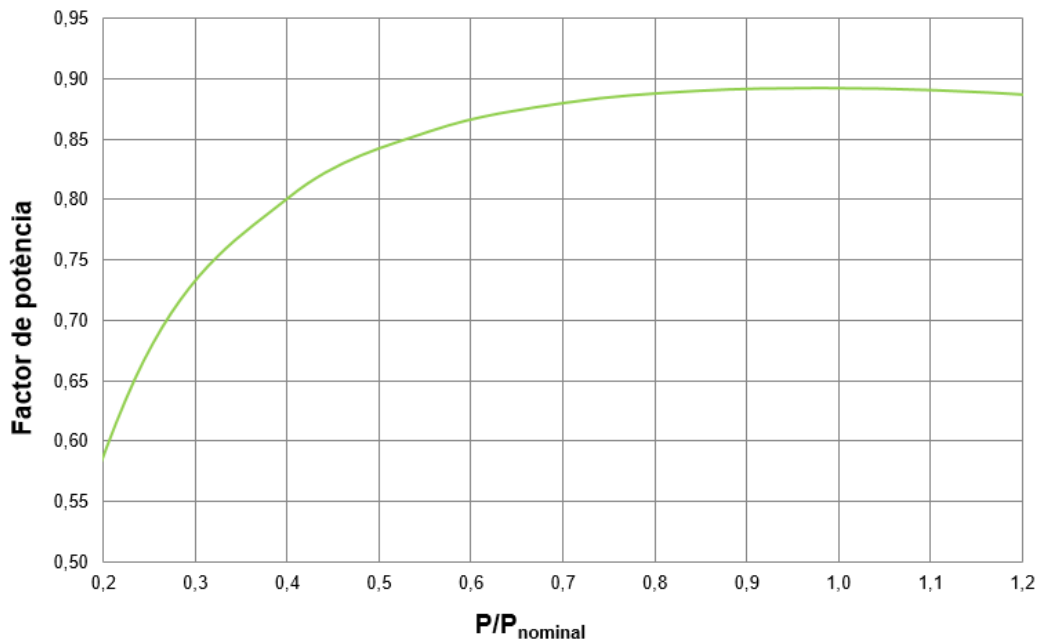


Figura 23: Corba factor de Potència-Índex de càrrega del motor asíncron.

- **Rendiment - Índex de càrrega:**

Aquesta corba permet veure el rendiment del motor per qualsevol índex de càrrega de la màquina. És important conèixer aquesta gràfica, ja que ens

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

ajudarà a veure quin és el punt de màxim rendiment que, normalment, sol ser d'entre un 0,6 i un 0,8 de l'índex de càrrega de la màquina.

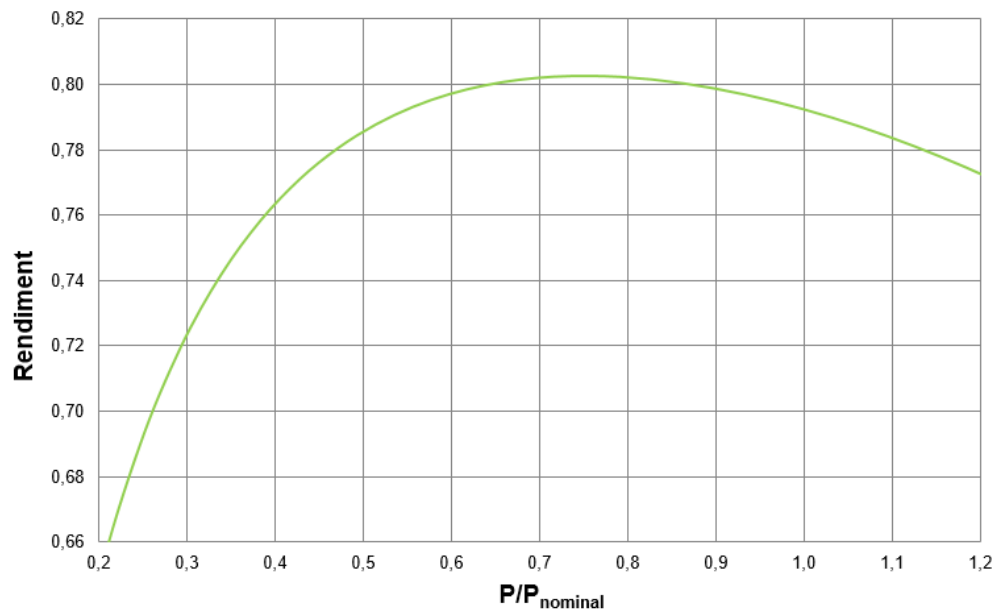


Figura 24: Corba Rendiment-Índex de càrrega.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

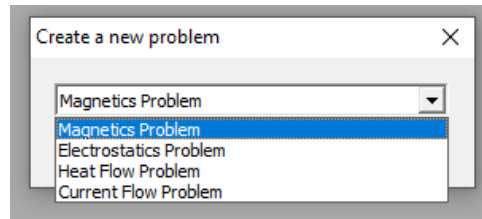


Figura 26: Pestanya d'elecció del tipus de problema.

Com la majoria de *softwares* que treballen amb el mètode d' elements finits, FEMM diferencia tres parts en el procés d' anàlisi d'un problema: pre-processor, processor i el post-processor.

- **Pre-processor:** En aquesta fase del programa s'introdueixen totes les dades del problema. A més del plànol de l'objecte a estudiar, ja sigui importat des de un arxiu ".dxf" elaborat en Cad o en el mateix editor del programa FEMM, s'han de definir totes les característiques dels diferents components de l'arxiu (els materials de les diferents geometries, el tipus de conductor, les corrents, les profunditats...).

Aquesta part del programa permet guardar la configuració final del problema abans d' analitzar-lo generant un arxiu ".fem" per a problemes magnètics, ".fee" per electrostàtics, ".feh" per als de transferència de calor i ".fec" per als de corrent. Així, podem tornar a carregar l'arxiu i editar parts del problema sense haver de configurar-lo de nou.

- **Processor:** Un cop generada la xarxa i amb les dades del problema introduïdes, el processor pot començar a fer càlculs. Mentre el programa està calculant, només veiem una pantalla amb el progrés de càlcul amb el nombre d'iteracions i el nombre de nodes, entre d'altres (*figura 27*).

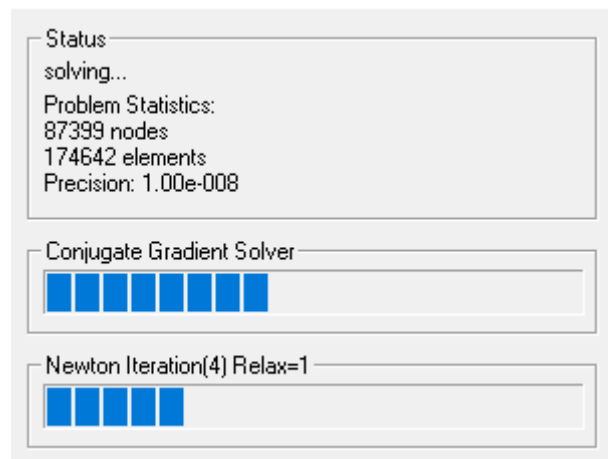


Figura 27: Pantalla del processador de FEMM.

- **Post-processor:** Un cop acabat el procés de càlcul, el programa genera un arxiu de respostes amb l'extensió ".ans".

En aquest visor podem veure diferents els resultats calculats pel programa. A més, aquests resultats es poden veure en cadascun dels nodes o en una regió d'un mateix material, ja sigui de forma numèrica o gràfica (*figura 28*).

També tenim la possibilitat d'obtenir resultats amb una escala gràfica de colors

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

a través de la seva densitat de flux (figura 29) o bé per cada fase definida (figura 30).

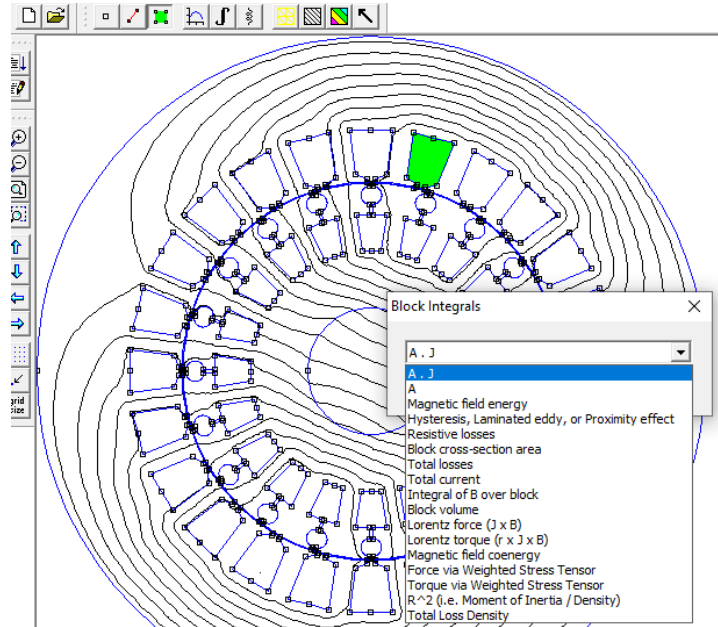


Figura 28: Resultats d'integrar un bloc seccionat d'iguals propietats.

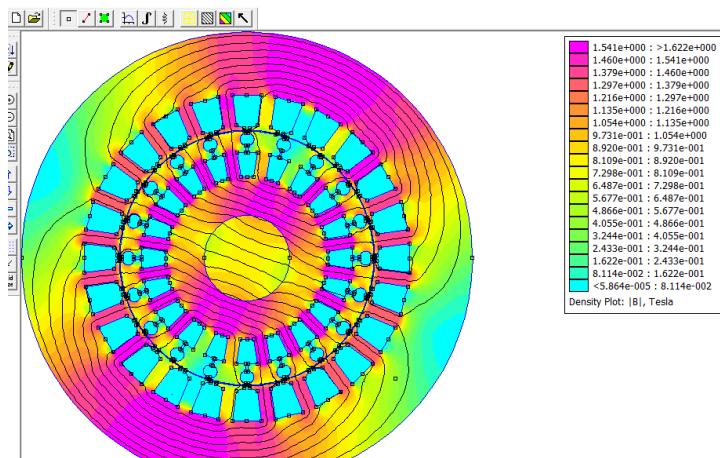


Figura 29: Resultats de densitat de flux (inducció) amb diferents colors.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

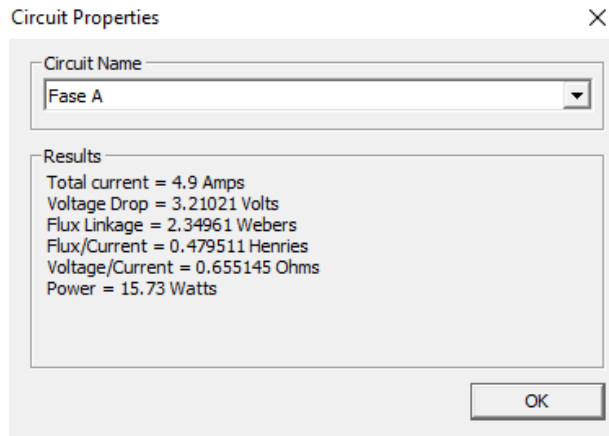


Figura 30: Resultats per a una de les fases definides.

4.2 INTRODUCCIÓ DE LES DADES QUE CARACTERITZEN UN MOTOR D'INDUCCIÓ AMB FEMM.

Per a la introducció de les dades necessàries que necessitem per a realitzar l'estudi, s'ha de començar triant el tipus de problema.

En aquest cas, és un problema de magnetisme:

File → New → *Magnetics Problem* (figura 26).

Un cop entrada aquesta instrucció, s'obre l'interfície del programa FEMM:

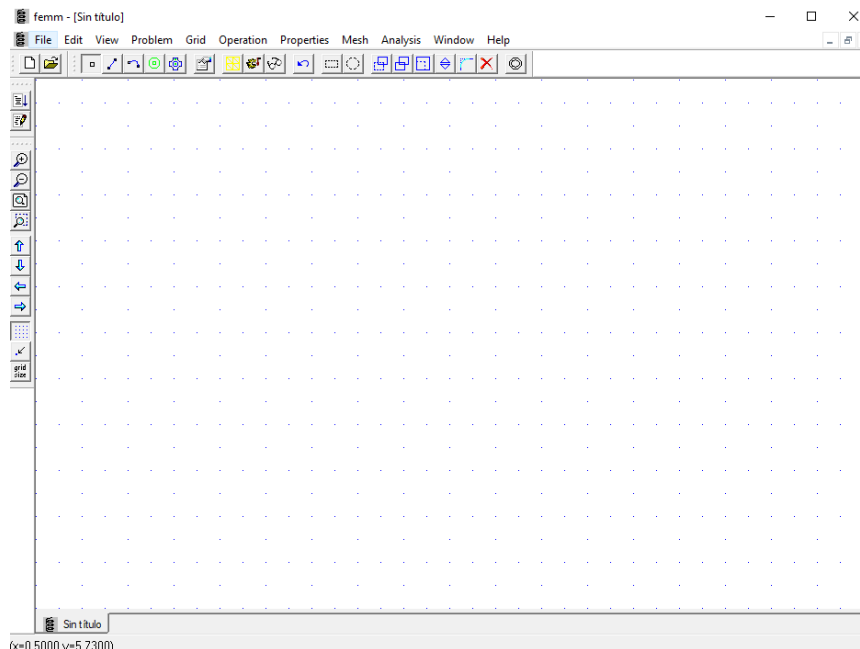


Figura 31: Interfície de FEMM.

El pas següent és definir el problema.

Com que FEMM treballa només en dues dimensions, cal especificar dades com la profunditat del motor en les unitats indicades (mil·límetres). La freqüència que cal posar és 0 en el cas d'un anàlisi magnetostàtic, que és el que s'utilitza en aquest treball.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Els altres paràmetres es poden modificar, però tal i com estan configurats de sèrie, són correctes per a l'anàlisi dels motors (*figura 32*):

Problem → **Problem Type** → **Planar** (*)
→ **Length units** → **Milimeters** (**)
→ **Frequency** → **0**
→ **Depth** → **Profunditat del motor**

(*) Ja que el programa FEMM només permet analitzar figures en 2D, amb la opció "Axisymmetric" perdriem la simetria de en l'eix del dibuix a l'hora d'efectuar l'anàlisi.

(**) És recomanable seleccionar mil·límetres com a unitat mètrica, ja que normalment a Europa, les acotacions o mesures constructives de catàleg venen donades en mil·límetres o en metres.

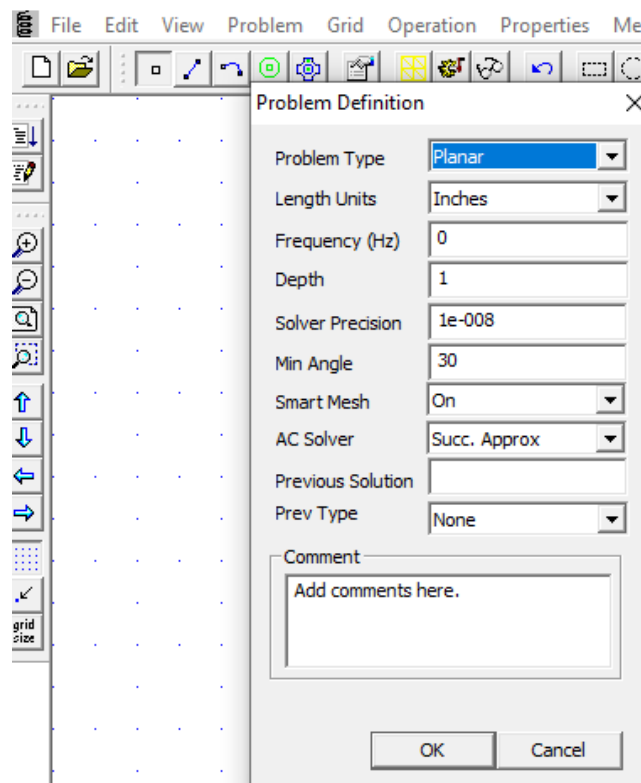


Figura 32: Pestanya de definició del problema.

El pròxim pas és confeccionar el plànol del motor mitjançant el propi sistema de dibuix cartesià del programa, o bé importar un arxiu ".dxf" amb la secció transversal del motor.

És recomanable realitzar el dibuix del motor amb un programa de Cad, ja que l'editor del programa FEMM fa servir un sistema d'unió de punts a través de rectes i arcs que pot dificultar, en alguns moments, l'edició del propi dibuix (*figura 33*).

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

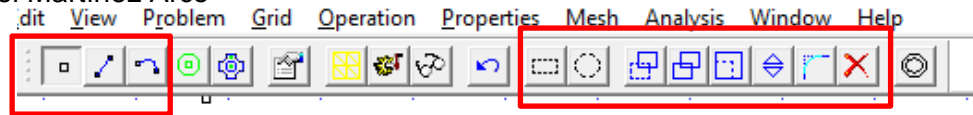


Figura 33: Eines de dibuix del programa FEMM.

Per tant, si el motor no presenta dificultats per a elaborar la seva secció, el podem dibuixar directament amb el programa o importar l'arxiu amb la següent instrucció:

File → Import → "Arxiu a importar en format dxf"

Com s'ha esmentat anteriorment, el programa FEMM treballa amb coordenades cartesianes. Concretament, a la part inferior esquerra de la interfície del *software*, apareix la coordenada a la qual es troba el cursor. Per aquest motiu és important situar el centre de l'eix del motor a la coordenada $x=0, y=0$.

Un cop importem l'arxiu, podem desplaçar tot el dibuix seleccionant l'opció **Move** (figura 34).

A més de traslladar el dibuix, també podem rotar la porció que es consideri, o bé el dibuix en la seva totalitat.

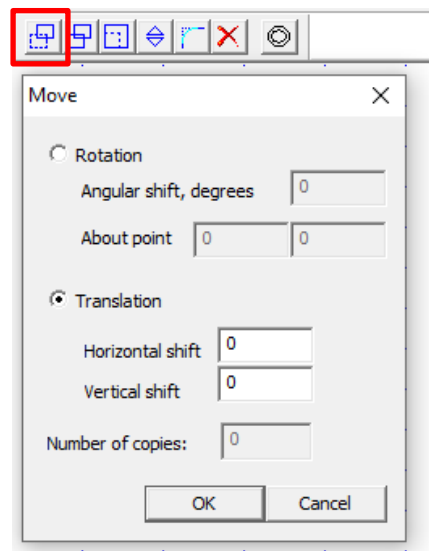


Figura 34: Opció Move del programa FEMM.

Un cop el dibuix estigui importat correctament amb l'eix a l'origen de coordenades, cal fer la selecció de materials i ubicar-los a les regions adequades en concordança amb el motor real.

Per realitzar aquest pas, cal conèixer els diferents materials que conformen el motor (no solament la geometria) amb la següent instrucció:

Properties → Materials Library (figura 35)

S'obrirà doncs la pestanya de la biblioteca de materials, en la qual trobem una gran varietat de materials que contenen les propietats elèctriques i magnètiques del material real.

A la biblioteca trobarem una classificació de materials segons si són: magnètics durs, magnètics tous, conductors d'estat sòlid no magnètics, conductors de coure i metalls amb corbes de magnetització específiques per a sistemes de corrent continu.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.
 Marcel Martínez Arco

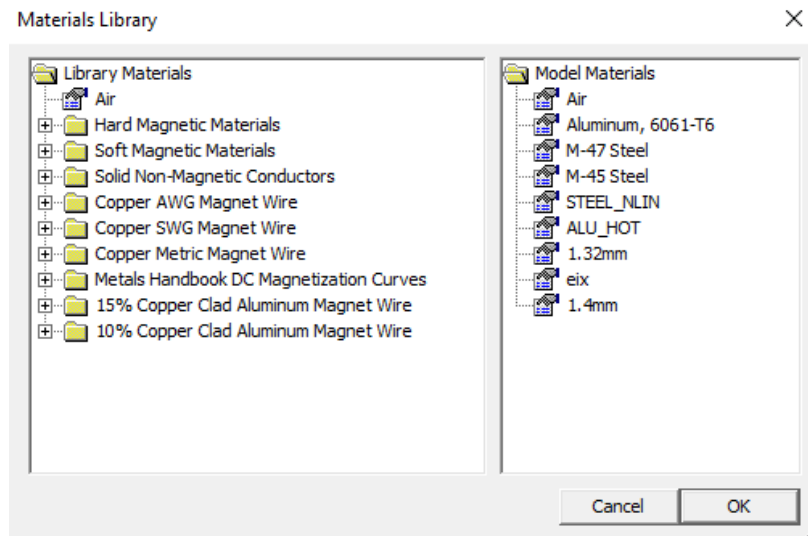


Figura 35: Biblioteca de materials del programa FEMM.

Cal arrossegar tots els materials que conformen el motor des de la biblioteca a la pestanya de **Model materials** per a poder-los disposar de la manera adient en el següent pas del procés.

El programa FEMM contempla la possibilitat d'editar les propietats dels materials i crear-ne de nous. Fins i tot podem entrar la corba de magnetització si el material escollit té un comportament no lineal. També podem editar el factor d'apilament depenent de si el material està conformat per làmines amb el respectiu gruix o per un bloc.

Amb la següent instrucció tindrem accés a la pantalla per a aquesta edició:

Properties → **Materials** → “Selecció del material anteriorment guardat” → **Modify Properties** → **Edit B-H Curve** (figura 36).

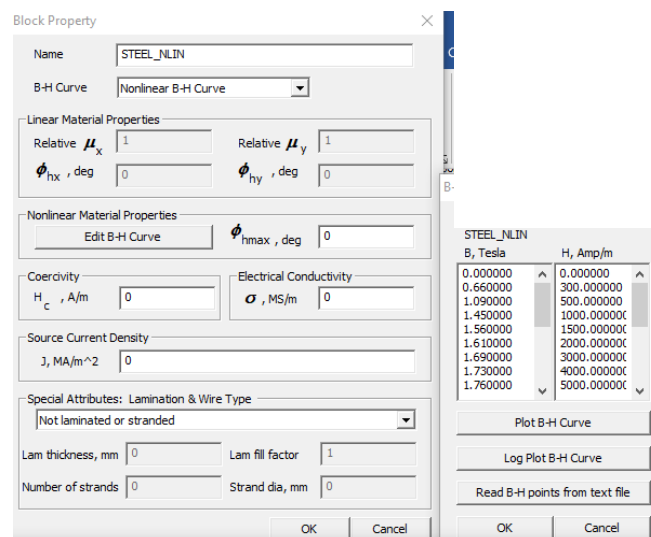


Figura 36: Edició de la corba de saturació.

A més, amb l'opció **Plot B-H Curve**, podem veure la corba de magnetització en format gràfic (figura 37):

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

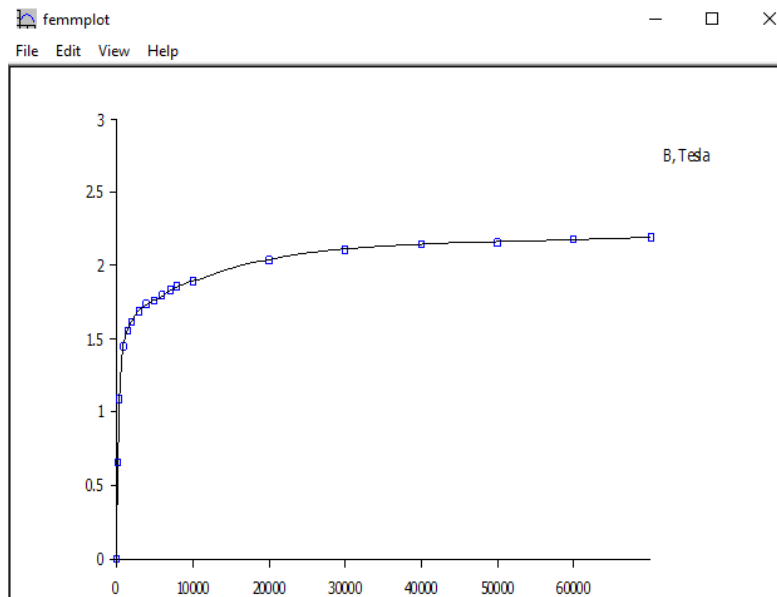


Figura 37: Corba de magnetització d'un material ferromagnètic creat.

Un cop creats o seleccionats tots els materials, definirem els elements que estan sotmesos al pas de corrent. En definitiva, crearem el circuit d'alimentació de l'estator. Amb l'instrucció:

Properties → Circuits → Add property (figura 38)

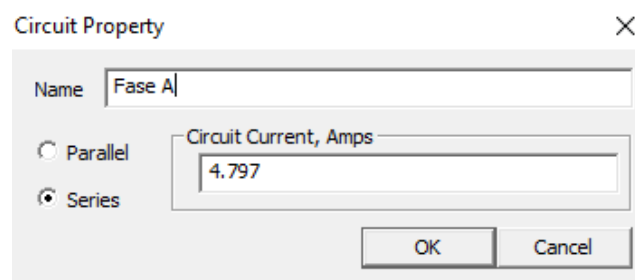


Figura 38: Editor de propietats del circuit.

En aquesta pestanya donem valor a la intensitat de corrent, nom al circuit i seleccionem si és sèrie o paral·lel.

És important saber que, per al correcte funcionament del circuit, en FEMM s'ha de donar el valor màxim i no pas el valor eficaç, per tant, caldrà multiplicar per arrel de dos el valor del corrent eficaç (en el circuit de la fase A de la figura 38, el corrent eficaç és 3,4 A).

Un cop creats els materials i els circuits, cal ubicar-los a les regions geomètriques adjacents, corresponents als materials i circuits del motor real.

Aquest procés es pot dur a terme de manera força intuïtiva, ja que, seleccionant la icona **Block** i clicant el botó esquerra dins de la regió seleccionada, apareix un petit quadre verd que, clicant el botó esquerra es tornarà vermell (vol dir que s'ha seleccionat aquell bloc que és d'un sol material) i amb la barra espaiadora s'obrirà la pestanya **Properties for selected Block** (figura 39).

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

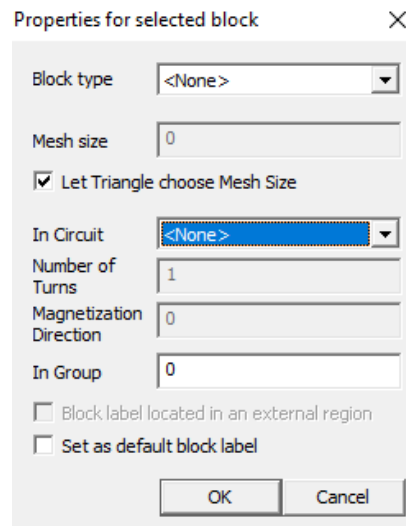


Figura 39: Pestanya per a l'adjudicació de propietats.

A la pestanya hi apareixen diversos submenús a completar. **Block type** fa referència a quin material és: seleccionarem el que correspongui en aquella regió en concret, ja que prèviament l'haurèm arrossegat a la pestanya de **Model materials** (apareixeran tots els materials guardats anteriorment).

Cal deixar seleccionada l'opció **Let Triangle choose Mesh Size** per a que el propi programa defineixi els punts necessaris per analitzar en aquella regió. Sinó, hauríem d'escollir personalment la grandària de la xarxa.

A la casella **In Circuit** s'ha de seleccionar el circuit al que qual pertanyi aquella regió, si és que pertany a algun circuit. Cal recordar que només els debanats de l'estator estan connectats a la xarxa trifàsica.

És rellevant seleccionar els **Number of Turns** (nombre de conductors), que formaran les bobines de l'estator. En aquesta casella, també s'hi defineix el sentit del corrent que circula per la bobina. Per a l'entrada de corrent no posarem signe o posarem signe "+", mentre que per a la sortida serà signe "-".

Un bloc ben definit (amb totes les propietats) mostrarà el següent aspecte en la interfície de FEMM (figura 40):

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

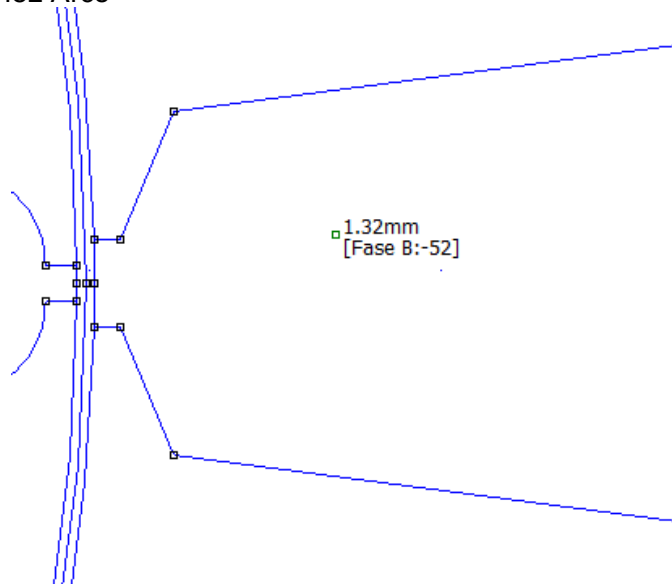


Figura 40: Bloc de material amb propietats de material i circuit.

El bloc rep el nom del material (**1.32mm** no és un nom de material, però els noms també es poden editar i aquest simplement ha estat escollit sabent que és un conductor de coure de 1,32 mm de diàmetre). Al ser part del debanat de l'estator, hi circula corrent, concretament el de la **Fase B** amb un signe “-”, per tant, corrent de sortida i, amb el número **52**, que és el nombre de conductors que té la bobina.

Evidentment, si aquest bloc formés part de la xapa utilitzada per conformar el motor, no apareixeria ni el nom del circuit, ni el nombre de conductors ni tampoc el signe.

Quan tots els blocs estiguin configurats adequadament, sense descuidar cap regió en blanc (cal vigilar amb l'entreferro ja que és una regió poc visible i no s'ha de descuidar

donar-li les propietats de l'aire), cal crear el contorn (*figura 41*), és a dir, marcar el límit físic del nostre motor. Si no es té en compte aquest pas, les línies de camp magnètic es comportaran de forma anòmala, tendint a sortir del motor.

Amb la següent instrucció:

Properties → **Boundary** → **Add Property** → **Name** → “Escrivim el nom”
→ **BC Type** → “Selecciónem el tipus de contorn”

Normalment, amb el tipus de contorn que dona el programa per defecte a la casella de **Boundary Condition Type (BC Type)**, és suficient (a no ser que es vulgui recrear alguna situació de contorn especial).

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

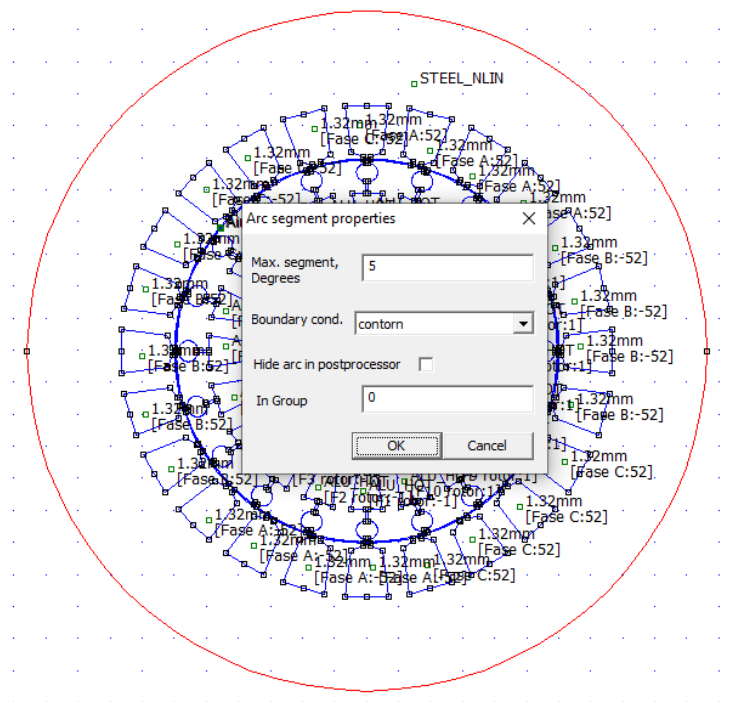


Figura 41: Imposició del contorn.

Un cop finalitzada la instrucció, com es cita anteriorment i tal com mostra la figura, amb el botó dret, seleccionem les arestes o els arcs que delimiten el motor (al clicar el botó dret les línies seleccionades queden de color vermell) i, amb la barra espaciadora, apareix la pestanya en la que podem escollir els contorns que hem creat amb anterioritat a la casella **Boundary condition**.

Arribats a aquest punt, ja hem entrat totes les dades necessàries per a l'anàlisi del motor. Només cal crear la xarxa amb la instrucció:

Mesh → Create Mesh

Quan aquesta estigui creada:

Analysis → Analyze

Quan l'anàlisi estigui complet, amb la instrucció:

Analysis → View Results

S'obrirà un arxiu amb extensió ".ans" pertanyent al post-processor on es mostraran els resultats explicats anteriorment.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

5. MOTORS D'INDUCCIÓ SELECCIONATS PER A L'ESTUDI

La intenció d'aquest estudi és l'anàlisi de tres motors existents modificant paràmetres constructius per a comprovar l'afectació de les modificacions en l'esquema equivalent, a poder ser, amb tres potències nominals diferents: petita, mitjana i gran.

És essencial per a l'estudi comptar amb totes les dades possibles del motor, no solament dades nominals, sinó dades obtingudes a partir dels assajos esmentats anteriorment. En altres paraules, dades de l'esquema equivalent complet. Contra més dades dels tres motors es coneguin, més precisos resultaran els càlculs de les futures variacions i, per tant, la simulació s'acostarà més als resultats que donarien aquestes variacions si es duen a terme en motors reals.

A partir de la cerca d'informació, s'han seleccionat tres motors dels quals s'ha pogut obtenir una gran quantitat d'informació necessària.

Els motors seleccionats han estat els següents:

- Motor de 250 W
- Motor de 7500 W de doble gàbia
- Motor de tracció tipus 4 FBA 5750 de 1020000 W

5.1 MOTOR DE 250 W

El 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 del llibre "Design of Small Electric Machines", de l'autor E.S. Hamdi.

5.1.1. Paràmetres nominals

Els paràmetres nominals que caracteritzen el motor que podríem trobar a la seva placa de característiques per al seu funcionament a Europa (50 Hz) són els següents:

PARÀMETRE	VALOR	UNITAT
Potència útil (P_u)	250	W
Velocitat (n_n)	1380	rpm
Parell (N_m)	1,73	Nm
Tensió de línia (V_l)	415	V
Tensió de fase (V_f)	239,6	V
Corrent de línia (I_l)	0,7	A
Corrent de fase (I_f)	0,7	A
Factor de potència ($\cos \varphi$)	0,78	-
Rendiment (η)	0,63	-

Taula 3: Paràmetres nominals del motor de 250 W

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

5.1.2. Característiques constructives

Les principals dimensions constructives del motor són:

PARÀMETRE	VALOR	UNITAT
Diàmetre exterior estator	100	mm
Diàmetre interior estator	55	mm
Diàmetre exterior rotor	54,5	mm
Diàmetre interior rotor	18	mm
Diàmetre eix	18	mm
Entreferro	0,5	mm
Amplada corona estator	22,75	mm
Amplada corona rotor	18,25	mm
Nombre ranures estator	24	-
Nombre ranures rotor	17	-
Àrea ranura estator	72,6	mm ²
Àrea ranura rotor	27,7	mm ²
Nombre conductors per ranura estator	230	-
Diàmetre conductor estator	0,4	mm
Tipus de xapa magnètica	M-47 Steel o M530-50A	- (*)
Material dels conductors de l'estator	Coure	- (**)
Material dels conductors del rotor	Alumini 1100	- (***)

Taula 4: Paràmetres constructius del motor de 250 W

(*) Les pèrdues específiques de l'acer del tipus M-47 són 2,3 W/kg.

(**) Els conductors de coure tenen una resistivitat de $0,0171 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

(***) Els conductors d'alumini 1100 tenen una resistivitat de $0,029 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

L'estator d'aquest motor de 250 W està conformat per 24 ranures amb un total de 230 conductors per ranura. Té un rotor de gàbia d'esquirol amb 17 ranures. L'entreferro és de 0,5 mm.

Els conductors de l'estator són de 0,4mm de diàmetre, el que suposa un factor d'ocupació de ranura de 0,4. És recomanable que aquest factor estigui entre 0,4 i 0,6.

$$f_{Cu} = \frac{S_{Cu}}{S_r} \quad [14]$$

Sabent que S_r són 72,6 mm² i que S_{Cu} :

$$S_{Cu} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot n_{cond} = 28,9 \quad [\text{mm}^2] \quad [15]$$

On:

f_{Cu} : Factor d'ocupació de ranura.

S_r : Superfície de la ranura.

S_{Cu} : Superfície de coure a la ranura.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

n_{cond} : Número de conductors per ranura (230).

d : Diàmetre del conductor (0,4 mm).

La següent figura mostra el dimensionat de les ranures de l'estator i el rotor:

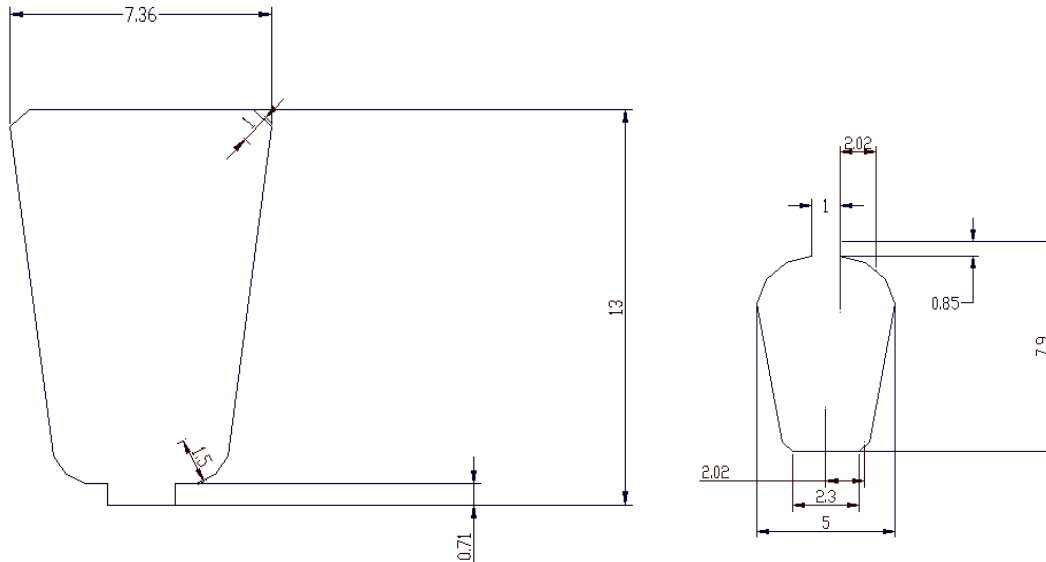


Figura 42: Ranures d'estator i rotor del motor de 250 W respectivament.
El plànol complet es troba a l'Annex, plànol número 1.

Pel que fa la composició dels materials que conformen el motor, aquest està compost en la seva generalitat d'un laminat de xapes d'acer del tipus M-47 en la nomenclatura estàndard AISI, o més coneguda com M530-50A amb un espessor de 0,5 mm, mentre que els conductors són fils de coure amb resistivitat $0,0171 \Omega \cdot mm^2/m$.

5.1.3. Paràmetres del circuit equivalent

L'esquema del circuit equivalent en el motor de 250 W és el següent:

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

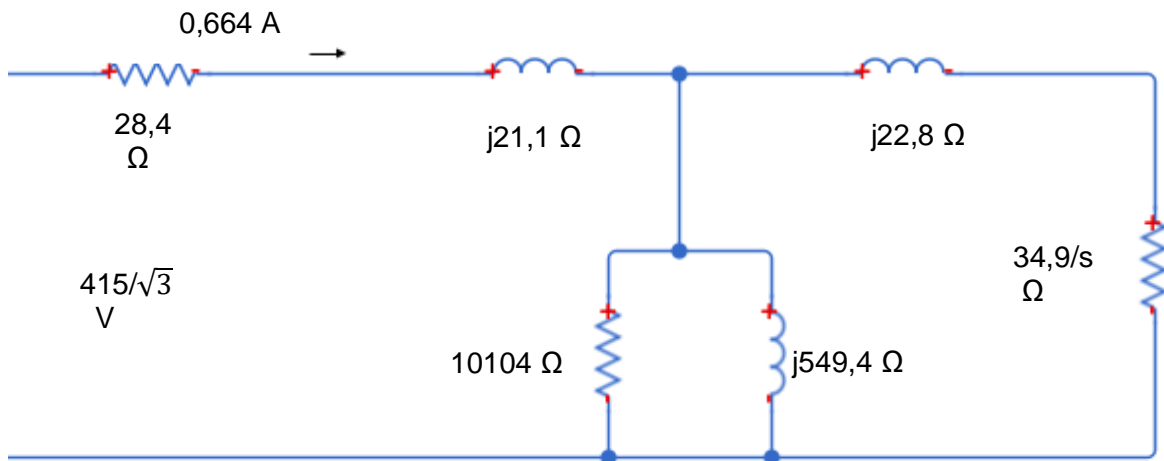


Figura 43: Esquema equivalent del motor de 250 W

On:

$$R_1 = 28,4 \Omega$$

$$X_{d1} = 21,1 \Omega$$

$$R'_2 = 34,9 \Omega$$

$$X'_{d2} = 22,8 \Omega$$

$$X_\mu = 549,4 \Omega$$

$$R_{FE} = 10104 \Omega$$

5.1.4 Corbes característiques en règim permanent

A continuació es presenten les corbes característiques del motor, obtingudes per la seva tensió i la seva freqüència nominals.

Per a l'obtenció de totes aquestes corbes característiques, s'han utilitzat les expressions del balanç de potències relacionades en el capítol 3.4 d'aquesta memòria.

Les corbes característiques extretes mitjançant fulls de càlcul amb Excel són les següents:

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Parell-velocitat

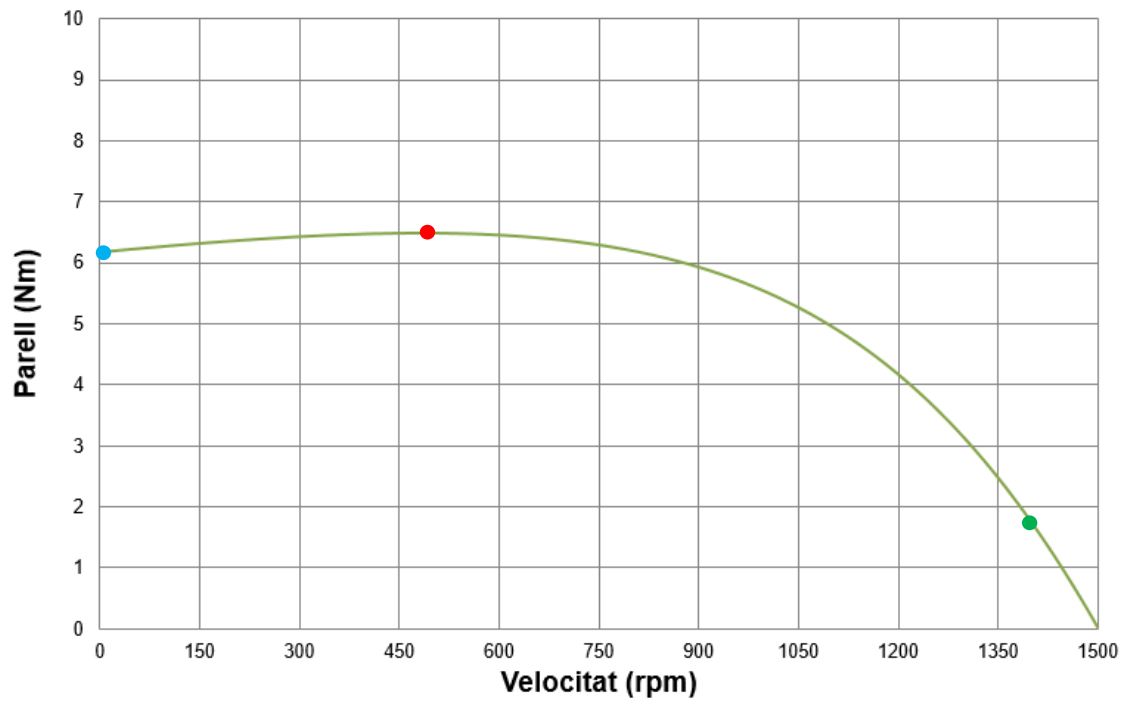


Figura 44: Corba parell-velocitat del motor de 250 W.

On es pot veure:

- Punt de treball nominal (1,73 Nm, 1380 rpm) → ●
- Punt de parell màxim (6,48 Nm, 483,6 rpm) → ●
- Punt d'arranc (6,17 Nm, 0 rpm) → ●

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corrent-velocitat

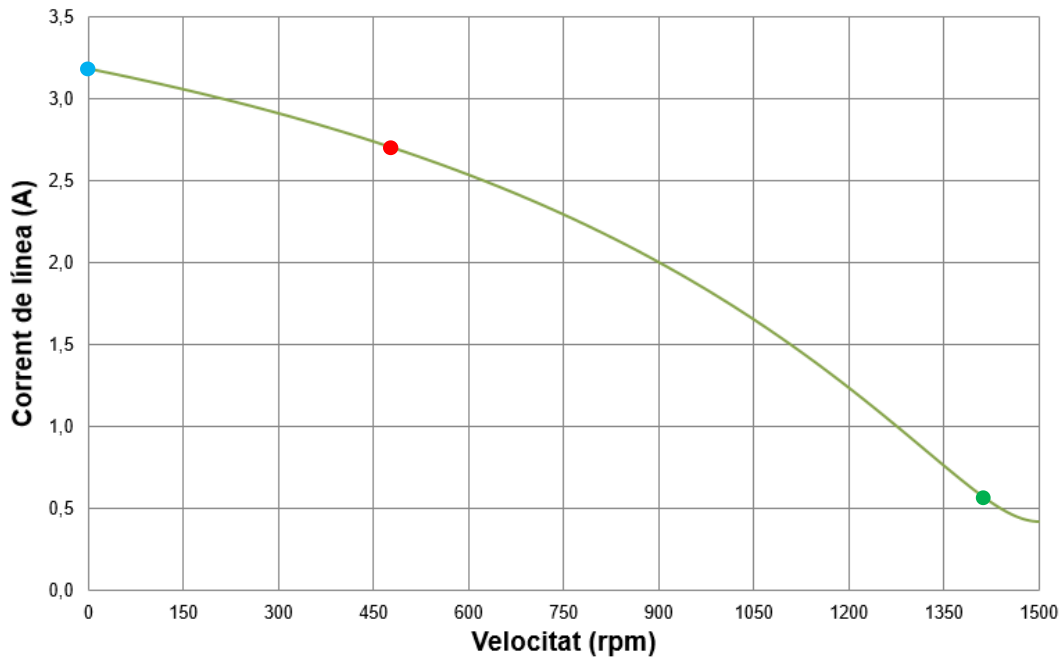


Figura 45: Corba corrent-velocitat del motor de 250 W.

On es pot veure:

Punt de treball nominal (0,664 A, 1380 rpm) → ●

Punt de parell màxim (2,698 A, 483,6 rpm) → ●

Punt d'arranc (3,185 A, 0 rpm) → ●

Factor de potència- índex de càrrega

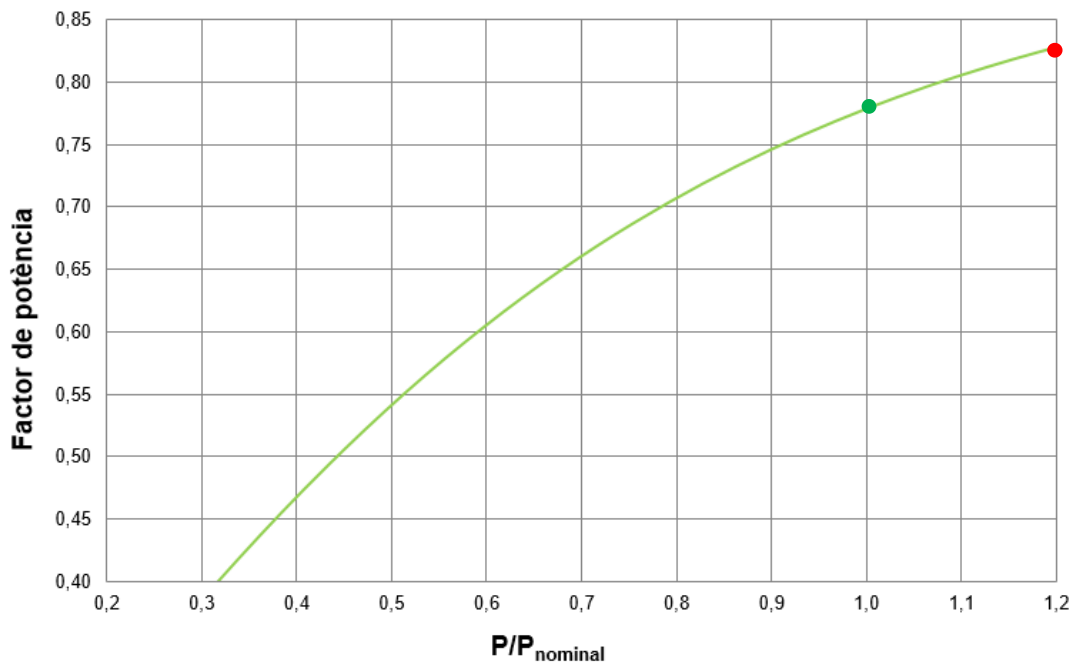


Figura 46: Corba factor de potència-índex de càrrega del motor de 250 W.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

On es pot veure:

Punt de treball nominal (0,77, 1) → ●

Punt de parell màxim (0,83, 1,2) → ●

Com a índex de càrrega s'ha utilitzat la relació: Putil / Putil nominal.

Rendiment- índex de càrrega.

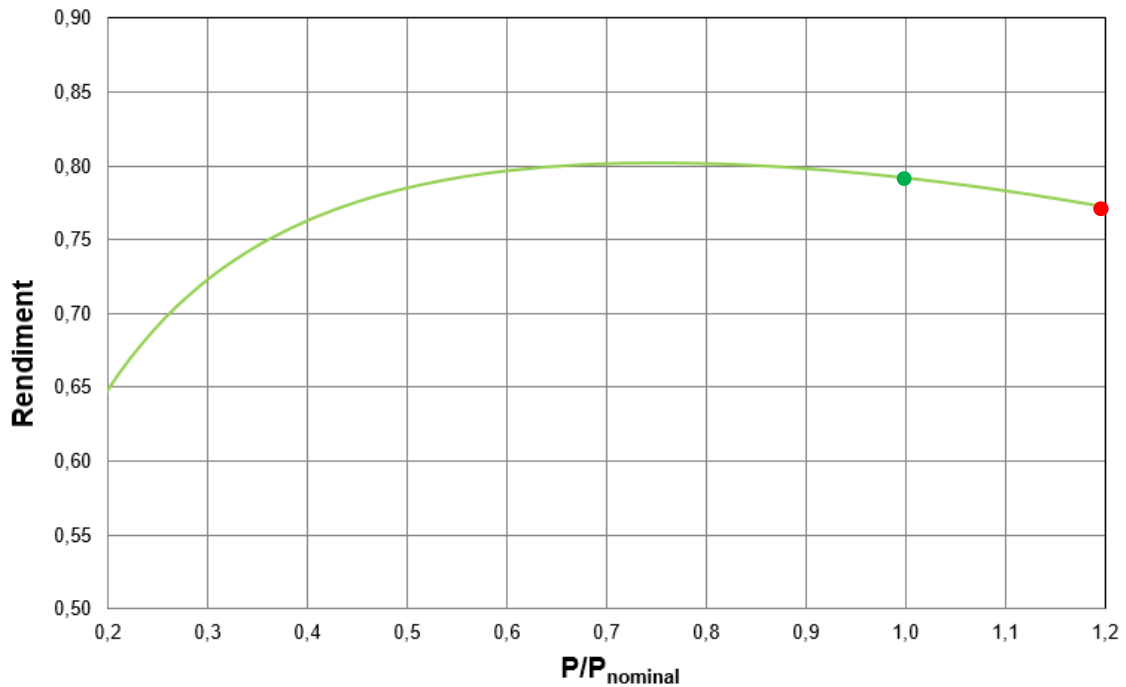


Figura 47: Corba de rendiment-índex de càrrega del motor de 250 W.

On es pot veure:

Punt de treball nominal (0,792, 1) → ●

Punt de parell màxim (0,768, 1,2) → ●

Com a índex de càrrega s'ha utilitzat la relació: Putil / Putil nominal.

Pot resultar interessant per observar un comportament més detallat en la zona lineal del motor (zona en la que el motor treballarà la major part del seu funcionament) la gràfica parell-velocitat de la zona lineal exclusivament:

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Parell- velocitat (zona lineal)

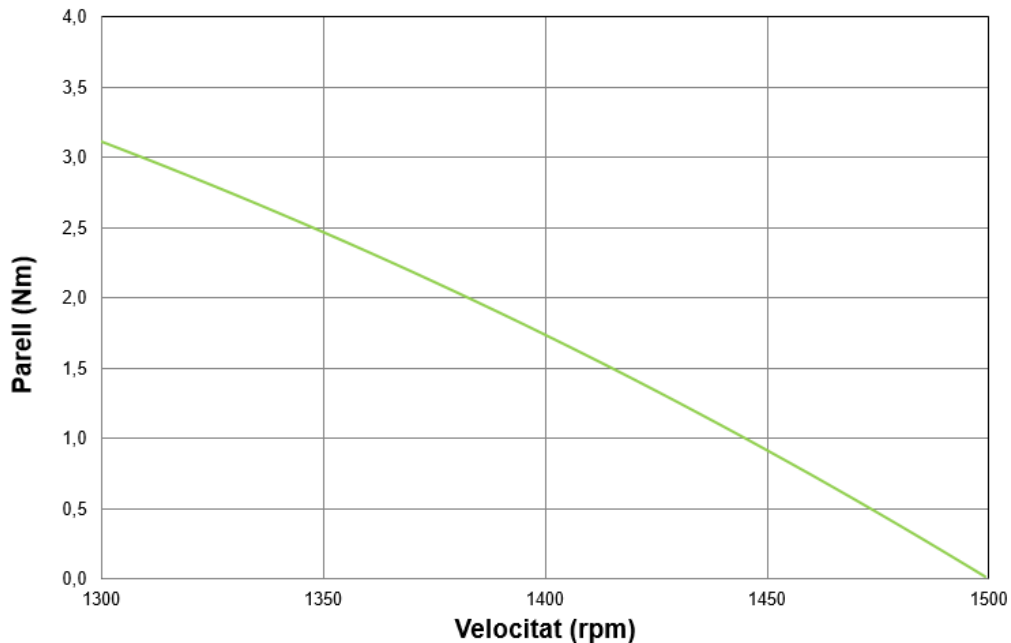


Figura 48: Zona lineal de la corba parell-velocitat del motor de 250 W.

5.1.5 Simulació amb FEMM

A continuació es presenten els resultats de la simulació electromagnètica amb elements finits corresponents al motor de 250 W original. Cal recalcar que la simulació s'ha fet alimentant només una fase amb el corrent en buit (en FEMM, correspondrà al corrent en valor màxim, ja que en els paràmetres magnètics obtinguts com el flux i la inducció es treballa en valors màxims).

Aquest corrent és aproximat, ja que podem aproximar que el corrent de buit és:

$$I_0 \approx 0,4 I_n \quad [\text{A}] \quad [16]$$

$$I_0 \approx 0,4 \cdot 0,7 = 0,28 \text{ A}$$

$$I_{0max} \approx \sqrt{2} \cdot 0,4 I_n \quad [\text{A}] \quad [17]$$

$$I_{0max} \approx \sqrt{2} \cdot 0,4 I_n = 0,395 \text{ A}$$

Efectuant la simulació amb aquest corrent, els resultats obtinguts són els següents:

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Línies de flux

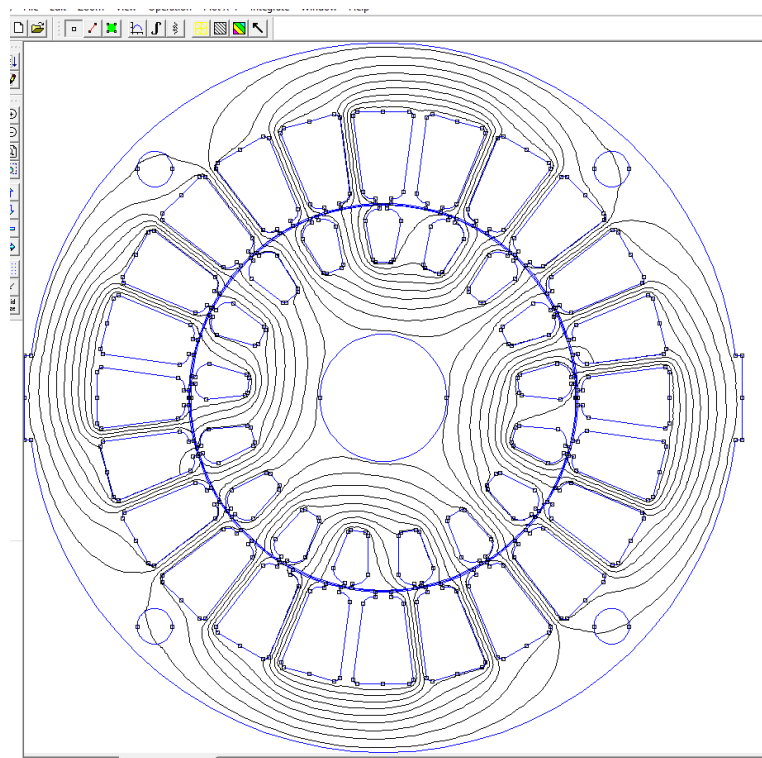


Figura 49: Línies de flux del motor de 250 W.

Mapa d'induccions

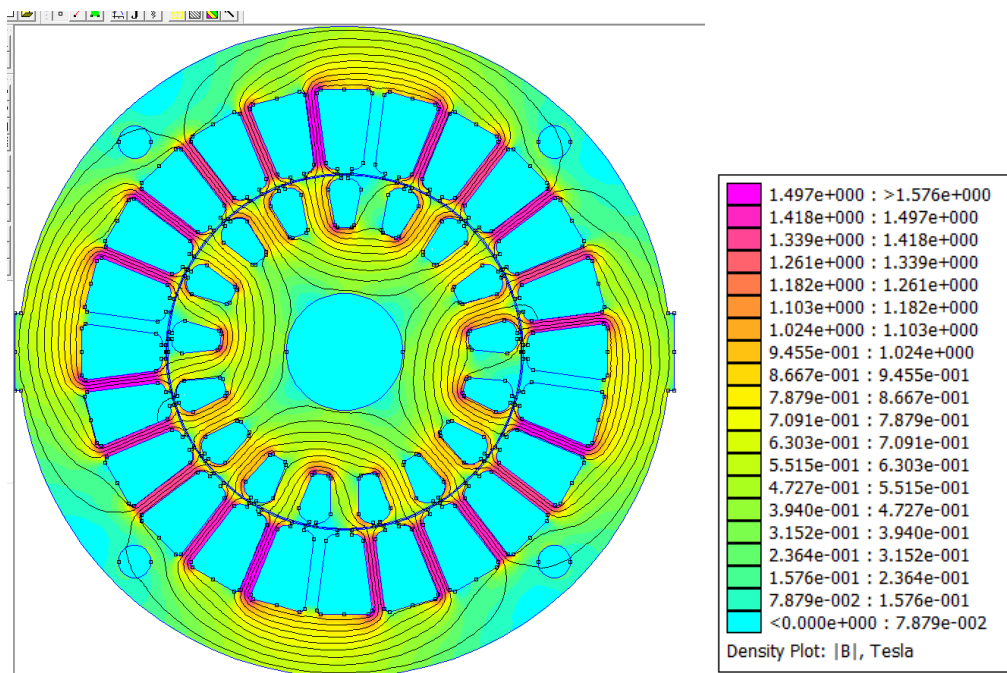


Figura 50: Mapa d'induccions del motor de 250 W.

Com podem observar, els punts on la inducció és més alta són els corresponents a les dents del rotor, al voltant de 1,5 T.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

FEMM Output	FEMM Output
Point: x=12.4, y=31.9	Point: x=12.6, y=39.3
A = 0.0052902 Wb/m	A = 0.00458971 Wb/m
B = 1.53216 T	B = 0.858398 T
Bx = 0.589712 T	Bx = -0.772587 T
By = 1.41413 T	By = 0.374107 T
H = 1108.97 A/m	H = 108.825 A/m
Hx = 426.833 A/m	Hx = -97.9459 A/m
Hy = 1023.54 A/m	Hy = 47.428 A/m
mu_x = 1099.44 (rel)	mu_x = 6276.99 (rel)
mu_y = 1099.44 (rel)	mu_y = 6276.99 (rel)
E = 247.588 J/m ³	E = 56.0127 J/m ³
J = 0 MA/m ²	J = 0 MA/m ²

Figura 51: Resultats en la dent i la corona d'estator del motor de 250 W respectivament.

Forma de la inducció a l'entreferro

Aquesta gràfica s'obté de la forma següent:

- 1) Es marca la circumferència de l'entreferro (marcant els punts que la defineixen).
- 2) Es selecciona *Plot XY*.
- 3) Es selecciona *B.n (normal flux density)*.

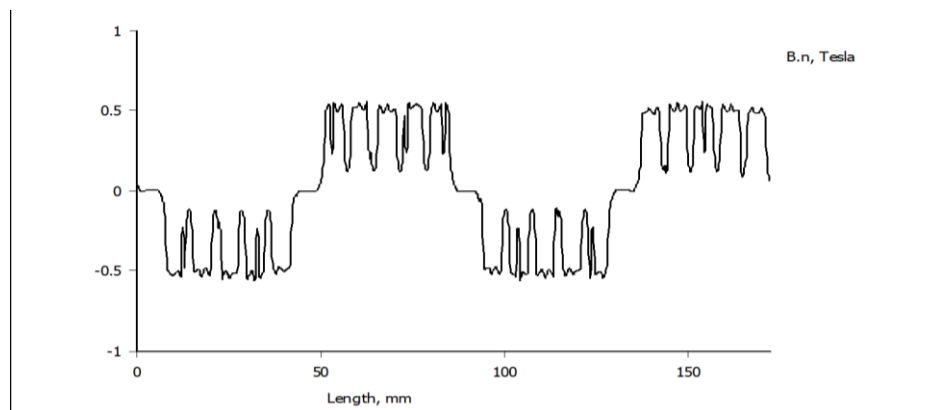


Figura 52: Forma de la inducció a l'entreferro del motor de 250 W.

Determinació del flux

Tal i com s'ha indicat anteriorment en l'apartat 4.1, podem obtenir resultats directament en el post-processor. Un d'ells és el flux:

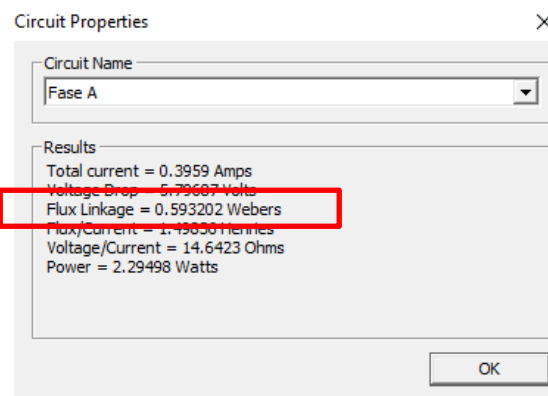


Figura 53: Determinació del flux en el motor de 250 W.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Determinació de la inductància magnetitzant

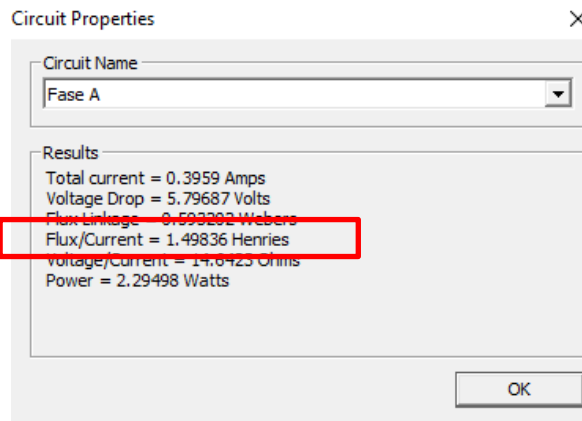


Figura 54: Determinació de la inductància magnetitzant del motor de 250 W.

Aquesta inductància magnetitzant servirà per calcular la reactància magnetitzant (X_{μ}):

$$X_{\mu} = L_{\mu} 2\pi f \quad [18] \quad [\Omega]$$

5.2 MOTOR DE 7,5 kW

El motor de 7,5 kW és un motor d'inducció trifàsic amb connexió estrella amb dos pols. Les dades d' aquest motor s'han extret del document "Flux: Induction motor tutorial 2D technical exemple" de l'empresa Altair, edició del 17 de novembre de 2016.

5.2.1. Paràmetres nominals

Els paràmetres nominals que caracteritzen el motor que podríem trobar a la seva placa de característiques per al seu funcionament a Europa (50 Hz) són els següents:

PARÀMETRE	VALOR	UNITAT
Potència útil (P_u)	7500	W
Velocitat (n_n)	2904	rpm
Parell (N_m)	24,66	Nm
Tensió de línia (V_l)	660	V
Tensió de fase (V_f)	381,05	V
Corrent de línia (I_l)	8,48	A
Corrent de fase (I_f)	8,48	A
Factor de potència ($\cos \varphi$)	0,834	-
Rendiment (η)	0,927	-

Taula 5: Paràmetres nominals del motor de 7,5 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

5.2.2 Característiques constructives

PARÀMETRE	VALOR	UNITAT
Diàmetre exterior estator	212	mm
Diàmetre interior estator	120	mm
Diàmetre exterior rotor	119	mm
Diàmetre interior rotor	40	mm
Diàmetre eix	40	mm
Entreferro	1	mm
Amplada corona estator	46	mm
Amplada corona rotor	39,5	mm
Nombre ranures estator	24	-
Nombre ranures rotor	20	-
Àrea ranura estator	177,49	mm ²
Àrea ranura exterior rotor	28,74	mm ²
Àrea ranura interior rotor	91,95	mm ²
Nombre conductors per ranura estator	52	-
Diàmetre conductor estator	1,32	mm
Tipus de xapa magnètica	M-45 Steel o M470-50A	- (*)
Material dels conductors de l'estator	Coure	- (**)
Material dels conductors del rotor	ALU_HOT	- (***)

Taula 6: Paràmetres constructius del motor de 7,5 kW

(*) Les pèrdues específiques de l'acer del tipus M-45 són 2 W/kg.

(**) Els conductors de coure tenen una resistivitat de $0,0171 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

(***) Aquest material és fictici, creat en el document esmentat anteriorment, amb una resistivitat de $4,8 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$.

L'estator d'aquest motor de 7,5 kW està conformat per 24 ranures amb un total de 52 conductors per ranura. Té un rotor de doble gàbia d'esquirol amb 20 barres per gàbia. L'entreferro és d'1 mm.

Els conductors de l'estator són de 1,32 mm de diàmetre, el que suposa un factor d'ocupació de ranura de 0,4. És recomanable que aquest factor estigui entre 0,4 i 0,6.

Fent ús de les equacions 14 i 15, obtenim:

$$S_{Cu} = 71,1 \text{ mm}^2$$

$$f_{Cu} = 0,4$$

La següent figura mostra el dimensionat de les ranures de l'estator i el rotor:

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

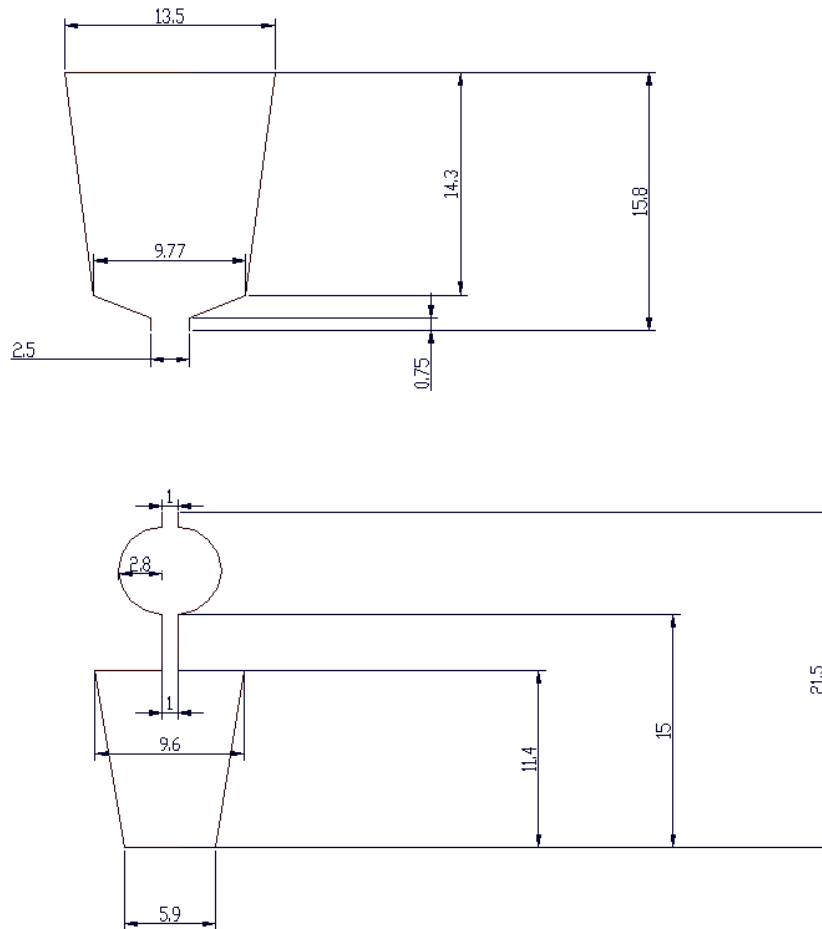


Figura 55: Ranures d'estator i rotor del motor de 7,5 kW respectivament. El plànol complet és troba a l'Annex, plànol número 2.

Pel que fa a la composició de materials que conformen el motor, aquest està compost en la seva generalitat d'un laminat de xapes d'acer del tipus M-45 en la nomenclatura estàndard AISI, o també coneguda com M470-50A amb un espessor de 0,5 mm, mentre que els conductors són fils de coure amb resistivitat $0,0171 \Omega \cdot mm^2/m$.

5.2.3 Paràmetres del circuit equivalent

L'esquema del circuit equivalent en el motor de 7,5 kW és el següent:

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

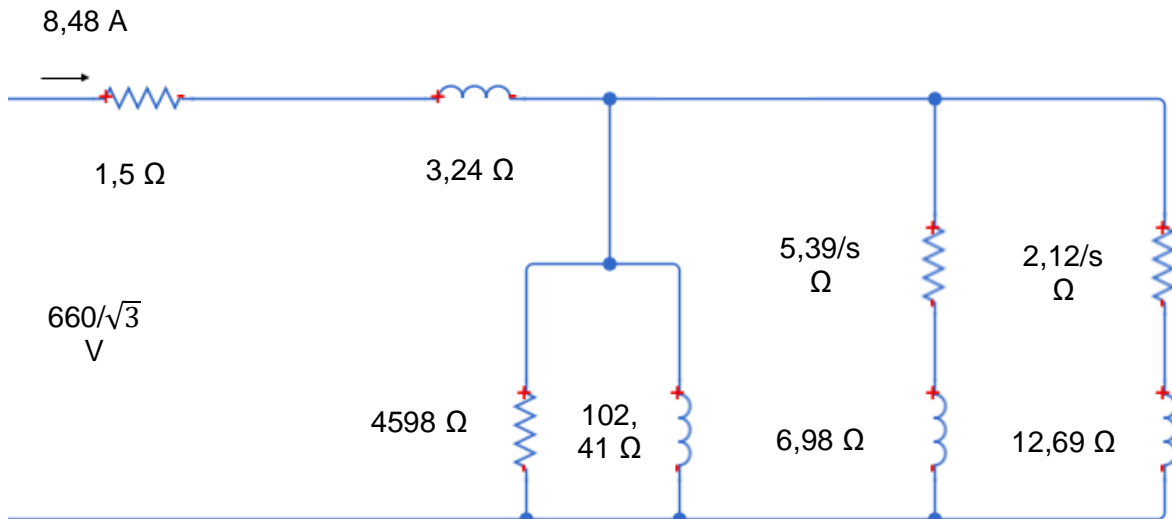


Figura 56 : Esquema equivalent del motor de 7,5 kW.

On:

$$R_1 = 1,5 \Omega$$

$$X_{d1} = 3,24 \Omega$$

$$R'_{21} = 5,39 \Omega$$

$$R'_{22} = 2,12 \Omega$$

$$X'_{d21} = 6,98 \Omega$$

$$X'_{d22} = 12,69 \Omega$$

$$X_{\mu} = 102,41 \Omega$$

$$R_{FE} = 4598 \Omega$$

Degut a que en el document d'on s'han extret les dades només es dona una sola resistència de rotor i una reactància de rotor, s'han establert relacions entre R'_{21} , R'_{22} i X'_{d21} , X'_{d22} amb les superfícies de les ranures del rotor. La relació entre superfícies ha de ser igual a la relació entre les dues resistències.

De la mateixa manera, relacionem $X'_{d21}/X'_{d22} = 0,55$ (s'ha adoptat aquest valor fent diverses proves de càlcul en el circuit del rotor per fer coincidir numèricament el valor de les resistències i de les reactàncies donades pel document identificatiu del motor amb els valors estimats per cada una de les gàbies del rotor).

El procediment és el següent: coneguts els valors de R' rotor i X' rotor i les seves relacions, podem descomposar el mòdul d'aquests dos paràmetres i donar valors a un dels dos paràmetres resistius (R'_{21} o R'_{22}) i a un dels de reactància (X'_{d21} o X'_{d22}). Amb la relació trobada, finalment podem trobar els paràmetres restants assegurant que el mòdul de R' rotor i de X' rotor no pateixi variacions.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

5.2.4 Corbes característiques en règim permanent

A continuació es presenten les corbes característiques del motor, obtingudes per la seva tensió i la seva freqüència nominal.

Per a l'obtenció de totes aquestes corbes característiques s'han utilitzat les expressions del balanç de potències relacionades en el capítol 3.4 d'aquesta memòria.

Les corbes característiques extretes mitjançant fulls de càlcul amb Excel són les següents:

Parell-velocitat

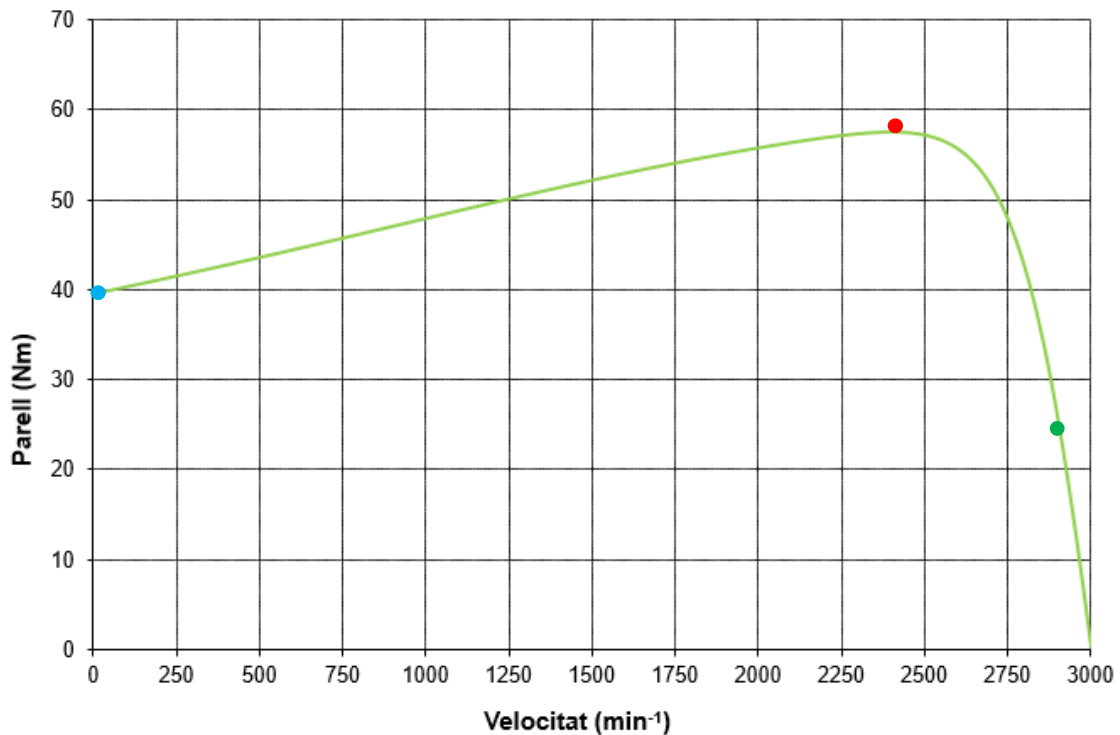


Figura 57 : Corba parell-velocitat del motor de 7,5 kW

On es pot veure:

- Punt de treball nominal (24,6 Nm, 2904 rpm) → ●
- Punt de parell màxim (57,47 Nm, 2395 rpm) → ●
- Punt d'arranc (39,75 Nm, 0 rpm) → ●

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corrent-velocitat

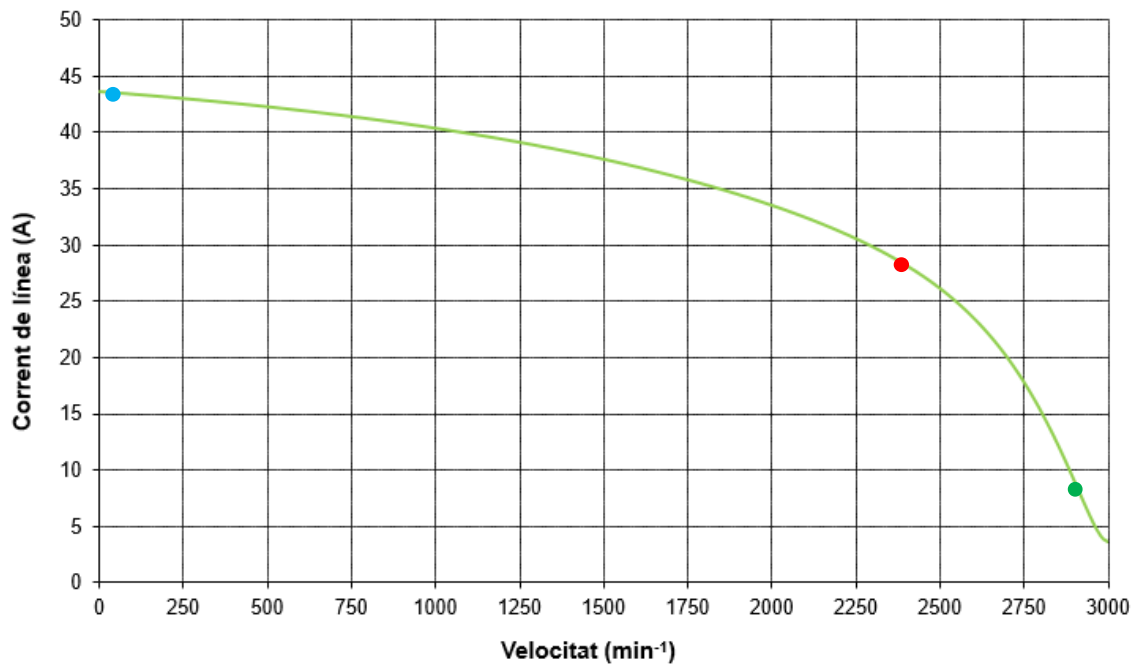


Figura 58: Corba corrent-velocitat del motor de 7,5 kW

On es pot veure:

- Punt de treball nominal (8,48 A, 2904 rpm) → ●
- Punt de parell màxim (28,25 A, 2395 rpm) → ●
- Punt d'arrancament (43,65 A, 0 rpm) → ●

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Factor de potència- índex de càrrega

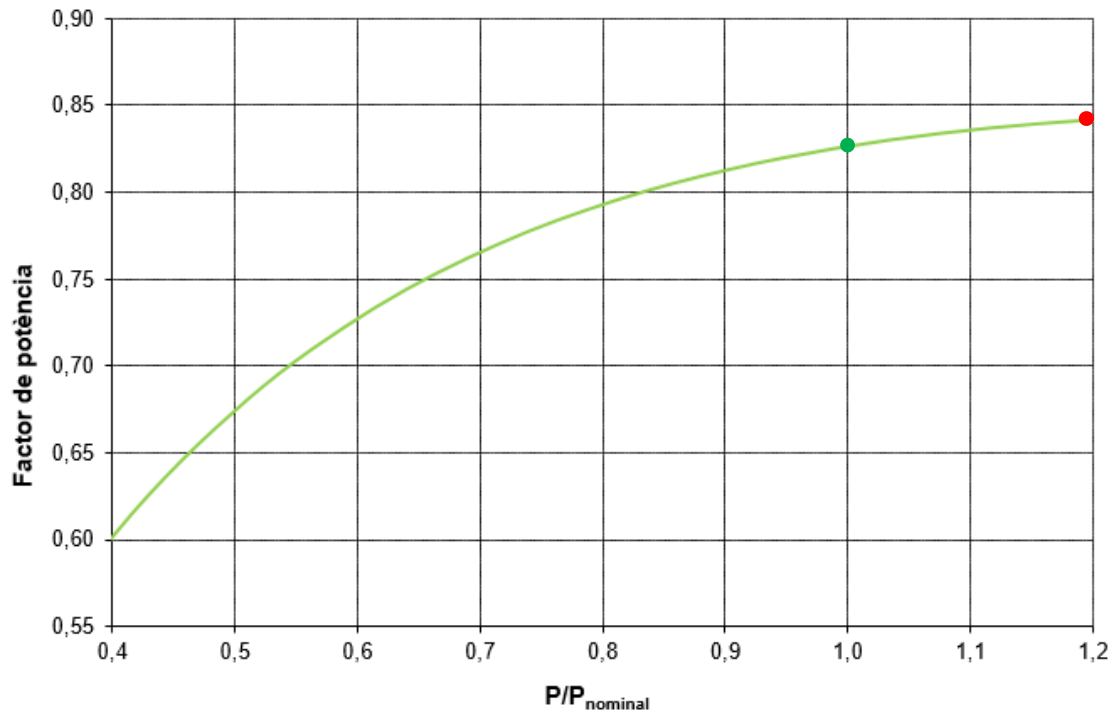


Figura 59 : Corba de factor de potència-índex de càrrega del motor de 7,5 kW

On es pot veure:

Punt de treball nominal (0,826, 1) → ●

Punt de parell màxim (0,84, 1,2) → ●

Com a índex de càrrega s'ha utilitzat la relació: $P_{\text{util}} / P_{\text{util nominal}}$.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Rendiment- índex de càrrega.

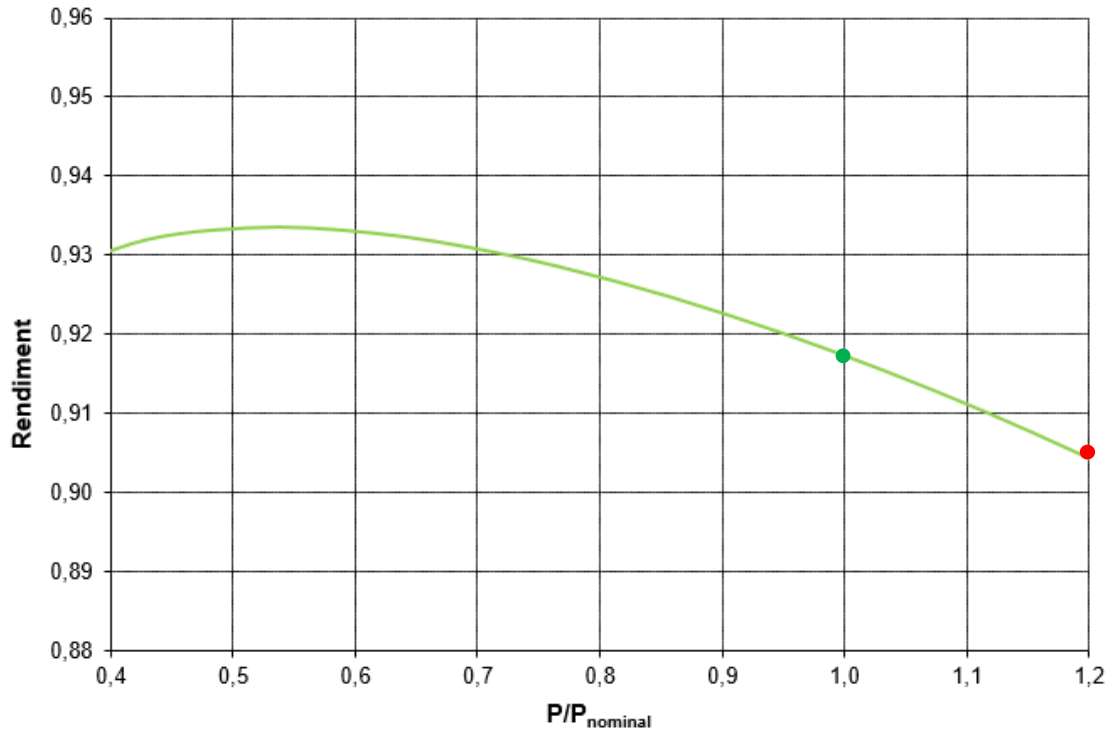


Figura 60: Corba de rendiment-índex de càrrega del motor de 7,5 kW.

On es pot veure:

Punt de treball nominal (0,9129, 1) → ●

Punt de parell màxim (0,9022, 1,2) → ●

Com a índex de càrrega s'ha utilitzat la relació: $P_{\text{util}} / P_{\text{util nominal}}$.

Pot ser interessant per a veure un comportament més detallat en la zona lineal del motor (zona a la que el motor treballarà la major part del seu funcionament) la gràfica parell-velocitat exclusivament de la zona lineal:

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Parell- velocitat (zona lineal)

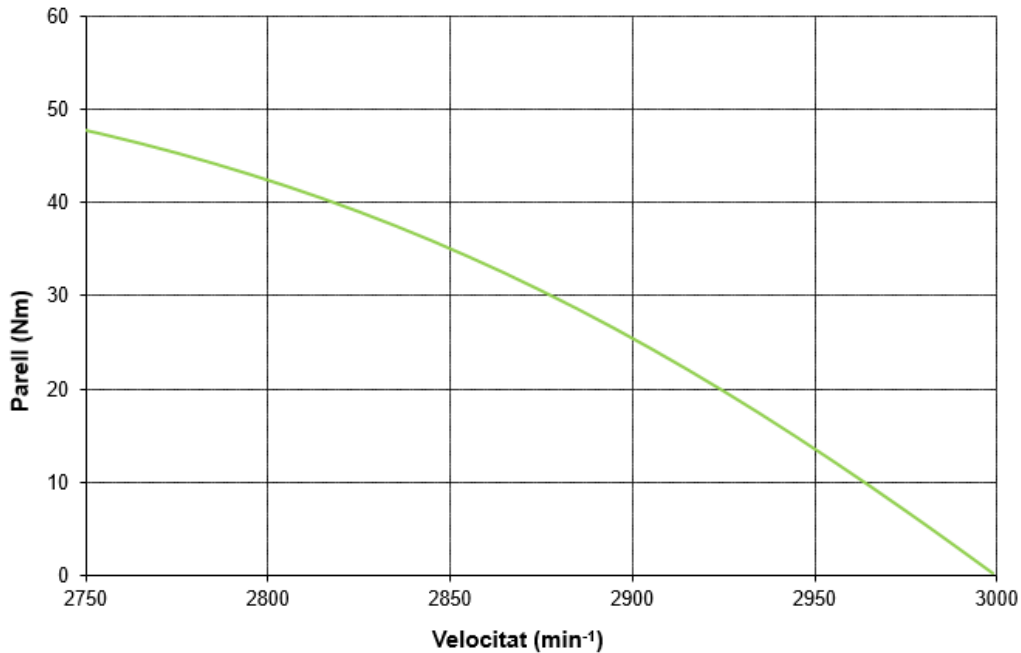


Figura 61: Zona lineal de la corba parell-velocitat del motor de 7,5 kW

5.2.5 Simulació amb FEMM

A continuació es presenten els resultats de la simulació electromagnètica amb elements finits corresponent al motor de 7,5 W original. Cal recalcar que la simulació, com en l'apartat 5.1.5., s'ha fet alimentant només una fase amb el corrent en buit (en FEMM, correspondrà al corrent en valor màxim, ja que en els paràmetres magnètics obtinguts com el flux i la inducció es treballa en valors màxims).

Aplicant les equacions 16 i 17:

$$I_0 \approx 3,392 \text{ A}$$

$$I_{0max} \approx 4,79 \text{ A}$$

Efectuant la simulació amb aquest corrent, els resultats obtinguts són els següents:

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Línies de flux

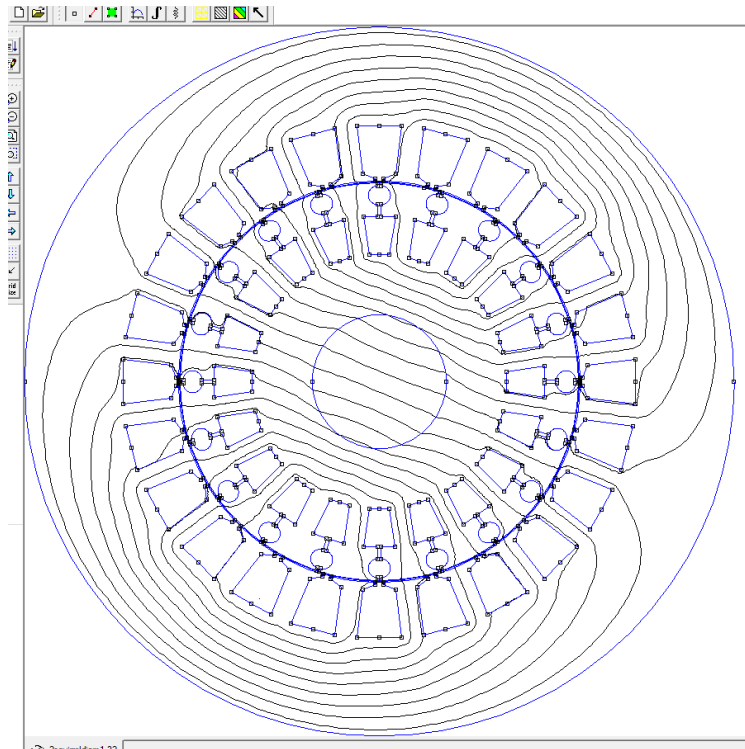


Figura 62: Línies de flux del motor de 7,5 kW.

Mapa d'induccions

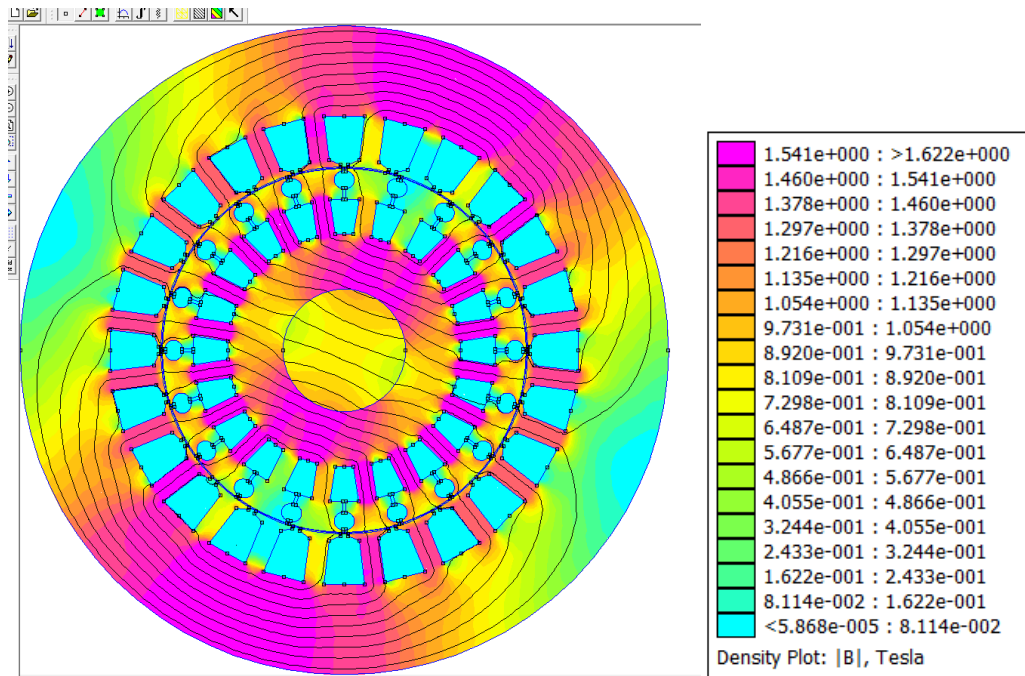


Figura 63: Mapa d'induccions del motor de 7,5 kW.

En aquest cas, tal i com podem observar, les induccions a la corona de l'estator són molt semblants, de l'ordre de 1,5 T, tot i que les induccions a la corona, coincidint a la part dels pols, són lleugerament superiors.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Point: x=48.7, y=38.5	Point: x=24.7, y=73.8
A = 0.0396263 Wb/m	A = 0.0453569 Wb/m
B = 1.54739 T	B = 1.66046 T
Bx = 1.32792 T	Bx = -1.5965 T
By = 0.794387 T	By = 0.456417 T
H = 1387.96 A/m	H = 3960.78 A/m
Hx = 1191.1 A/m	Hx = -3808.21 A/m
Hy = 712.537 A/m	Hy = 1088.71 A/m
mu_x= 887.185 (rel)	mu_x= 333.61 (rel)
mu_y = 887.185 (rel)	mu_y = 333.61 (rel)
E = 264.882 J/m ³	E = 547.766 J/m ³
J = 0 MA/m ²	J = 0 MA/m ²

Figura 64: Resultats en la dent i la corona de l'estator del motor de 7,5 kW respectivament.

Forma de la inducció a l'entreferro

El procés per a obtenir aquesta gràfica és exactament el mateix que el del punt 5.1.5.

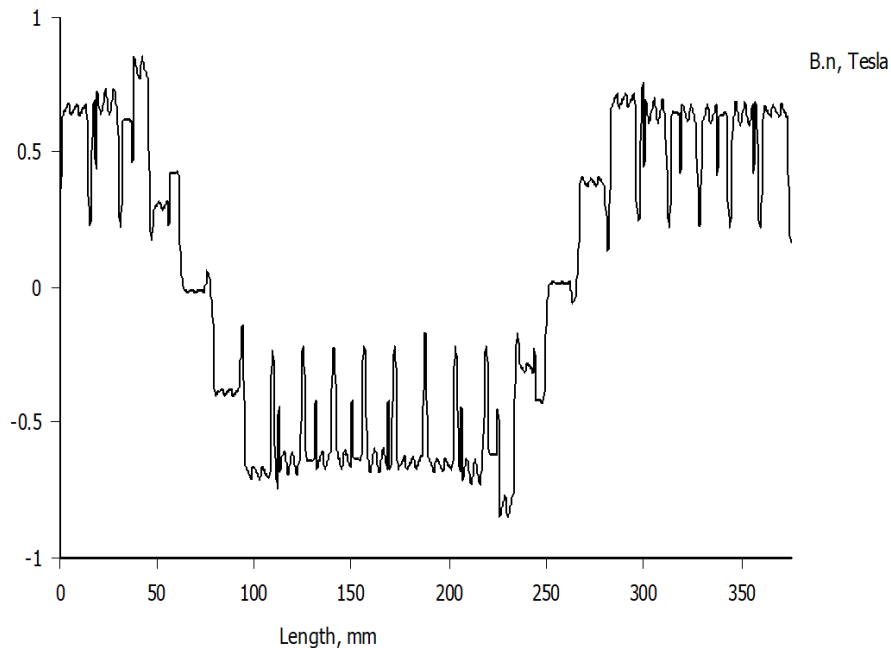


Figura 65: Forma de la inducció a l'entreferro del motor de 7,5 kW.

Determinació del flux

Tal i com s'indica en l'apartat 4.1., podem obtenir alguns resultats directament des del post-processor. El flux és:

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

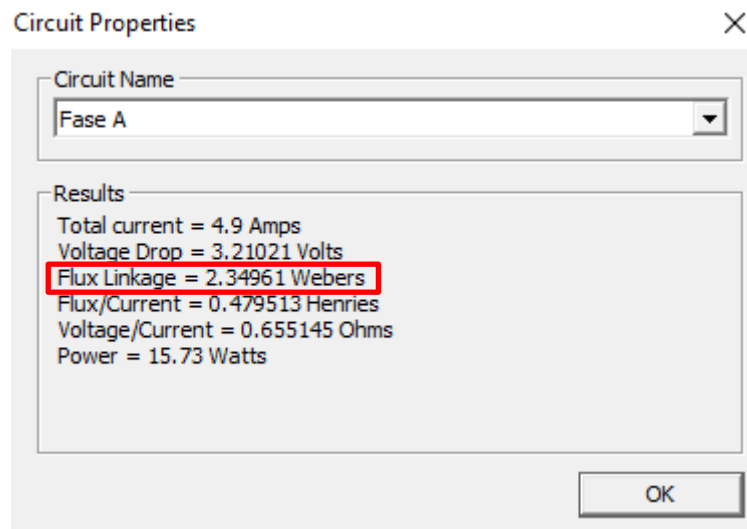


Figura 66: Determinació del flux del motor de 7,5 kW.

Determinació de la inductància magnetitzant

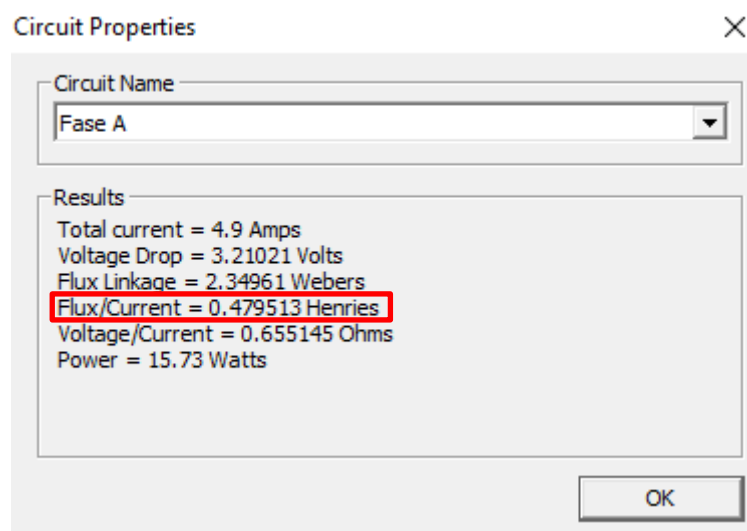


Figura 67: Determinació de la inductància magnetitzant del motor de 7,5 kW.

Igual que en l'apartat 5.1.5., amb l'equació 17 podem calcular la reactància magnetitzant per a comparar-la amb les futures modificacions del motor.

5.3 MOTOR DE 1020 kW.

El motor de 1020 kW és un motor d'inducció trifàsic amb connexió estrella, de quatre pols de gàbia d'esquirol i ventilació forçada. És un motor dissenyat per ser alimentat des d'un ondulator amb regulació per control PWM i és per això que la seva freqüència nominal és de 87,1 Hz.

Les dades d'aquest motor s'han extret del document "Apéndice 20: descripción del motor de tracción" de la documentació tècnica corresponent a Talgo RENFE.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

5.3.1. Paràmetres nominals

Els paràmetres nominals que caracteritzen el motor que podríem trobar a la seva placa de característiques per a la utilització amb una freqüència de 87,1 Hz són els següents:

PARÀMETRE	VALOR	UNITAT
Potència útil (Pu)	1020000	W
Velocitat (n_n)	2587	rpm
Parell (N_m)	3765,08	Nm
Tensió de línia (V_l)	2180	V
Tensió de fase (V_f)	1258,62	V
Corrent de línia (I_l)	313	A
Corrent de fase (I_f)	313	A
Factor de potència ($\cos \varphi$)	0,892	-
Rendiment (η)	0,96	-

Taula 7: Paràmetres nominals del motor de 1020 W

5.3.2. Característiques constructives

Les principals dimensions constructives del motor són:

PARÀMETRE	VALOR	UNITAT
Diàmetre exterior estator	675	mm
Diàmetre interior estator	406	mm
Diàmetre exterior rotor	400	mm
Diàmetre interior rotor	147	mm
Diàmetre eix	147	mm
Entreferro	6	mm
Amplada corona estator	134,5	mm
Amplada corona rotor	126,5	mm
Nombre ranures estator	60	-
Nombre ranures rotor	72	-
Àrea ranura estator	512,92	mm ²
Àrea ranura rotor	158,66	mm ²
Nombre conductors per ranura estator	4 (x2) (*)	-
Secció conductor estator	56,74	mm ²
Tipus de xapa magnètica	M-19 Steel o M290-50A	- (**)
Material dels conductors de l'estator	Coure	- (***)
Material dels conductors del rotor	Coure	- (****)

Taula 8: Paràmetres nominals del motor de 7,5 kW

(*) El bobinat d'aquest motor és doble, les ranures del rotor es poden dividir en dos i cadascuna d'elles amb quatre conductors

(**) Les pèrdues específiques de l'acer del tipus M-19 són 1,1 W/kg .

(***) Els conductors de coure tenen una resistivitat de $0,0171 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

L'estator d'aquest motor de 1020 kW està conformat per 60 ranures amb un total de 8 conductors per ranura. Té un rotor de gàbia d'esquirol amb 72 ranures. L'entreferro és de 6 mm.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Els conductors de l'estator són de secció rectangular, el que suposa un factor d'ocupació de ranura de 0,88. En els motors d'inducció de gran potència el factor d'ocupació sol oscil·lar entre 0,75 i 0,9.

Fent ús de les equacions 14 i 15, obtenim(*) :

$$S_{Cu} = 519,92 \text{ mm}^2$$

$$f_{Cu} = 0,88$$

(*) En aquest cas disposem de la S_{Cu} , però caldrà aplicar la fórmula per a obtenir el diàmetre de la superfície aproximada a una circumferència i poder introduir les dades dels conductors al programa FEMM de la forma més aproximada a la realitat.

La següent figura mostra el dimensionat de les ranures de l'estator i el rotor:

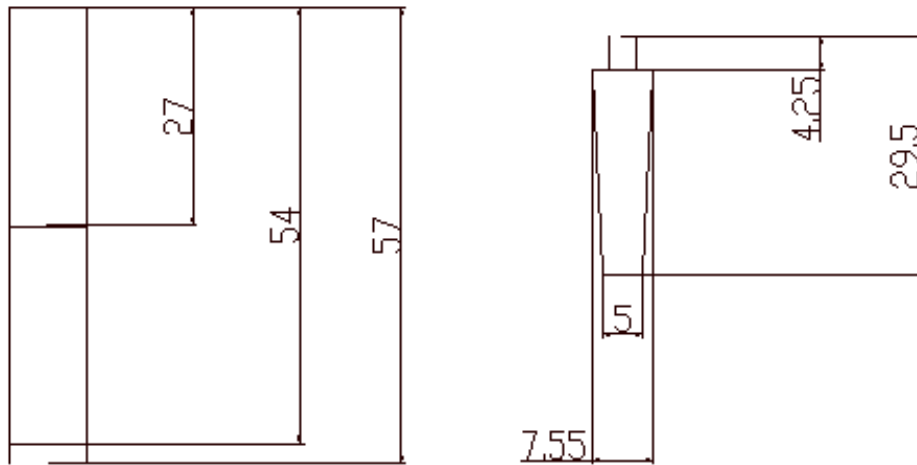


Figura 68: Ranures d'estator i rotor del motor de 1020 kW respectivament.

El plànol complet és troba a l'Annex, plànol número 3.

Pel que fa a la composició de materials que conformen el motor, aquest està compost en la seva generalitat d'un laminat de xapes d'acer del tipus M-19 en la nomenclatura estàndard AISI, o també coneguda com M290-50A amb un espessor de 0,5 mm, mentre que els conductors són fils de coure amb resistivitat $0,0171 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

5.3.3. Paràmetres del circuit equivalent.

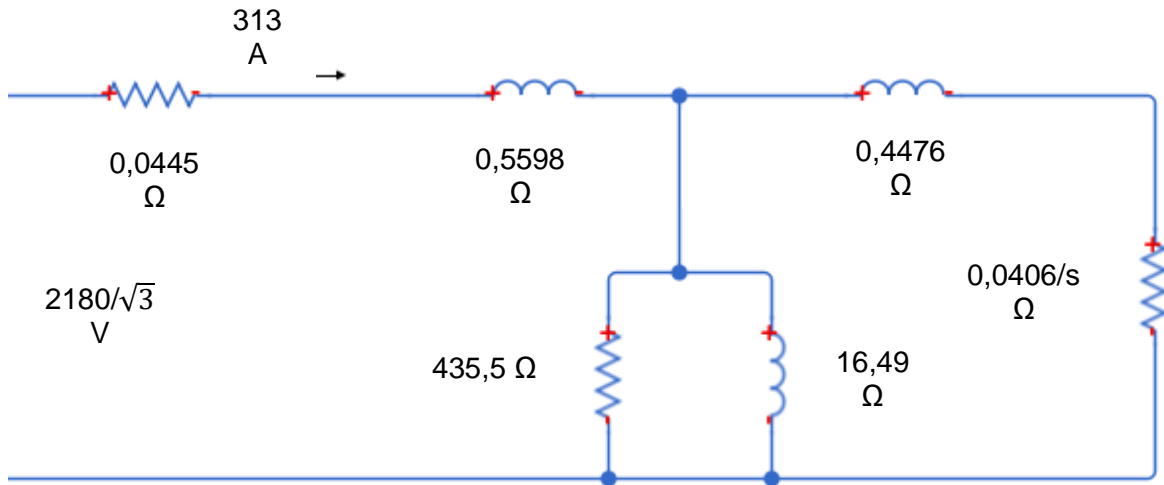


Figura 69: Esquema equivalent del motor de 1020 kW

On:

$$R_1 = 0,0445 \Omega$$

$$X_{d1} = 0,5598 \Omega$$

$$R'_2 = 0,0406 \Omega$$

$$X'_{d2} = 0,4476 \Omega$$

$$X_\mu = 16,49 \Omega$$

$$R_{FE} = 435,5 \Omega$$

5.3.4 Corbes característiques en règim permanent

A continuació es presenten les corbes característiques del motor, obtingudes per la seva tensió i la seva freqüència nominals.

Per a l'obtenció de totes aquestes corbes característiques s'han utilitzat les expressions del balanç de potències relacionades en el capítol 3.4 d'aquesta memòria.

Les corbes característiques extretes mitjançant fulls de càlcul amb Excel són les següents:

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Parell-velocitat

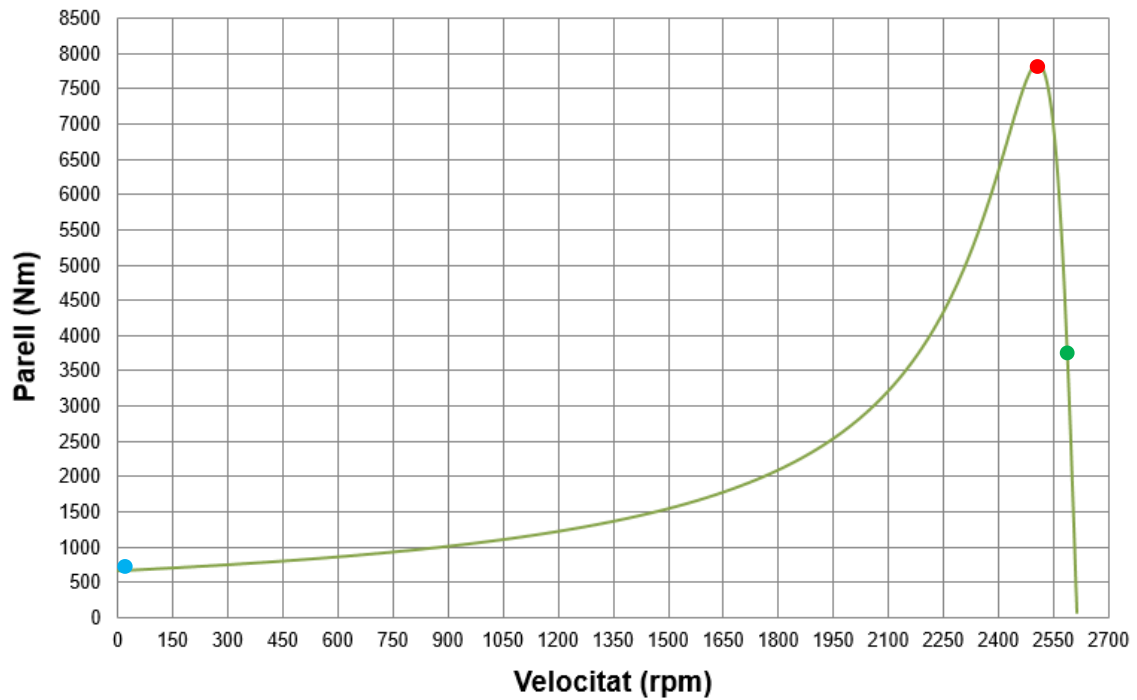


Figura 70: Corba parell-velocitat del motor de 1020 kW.

On es pot veure:

- Punt de treball nominal (3687 Nm, 2587 rpm) → ●
- Punt de parell màxim (7867,47 Nm, 2505 rpm) → ●
- Punt d'arranc (669,66 Nm, 0 rpm) → ●

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corrent-velocitat

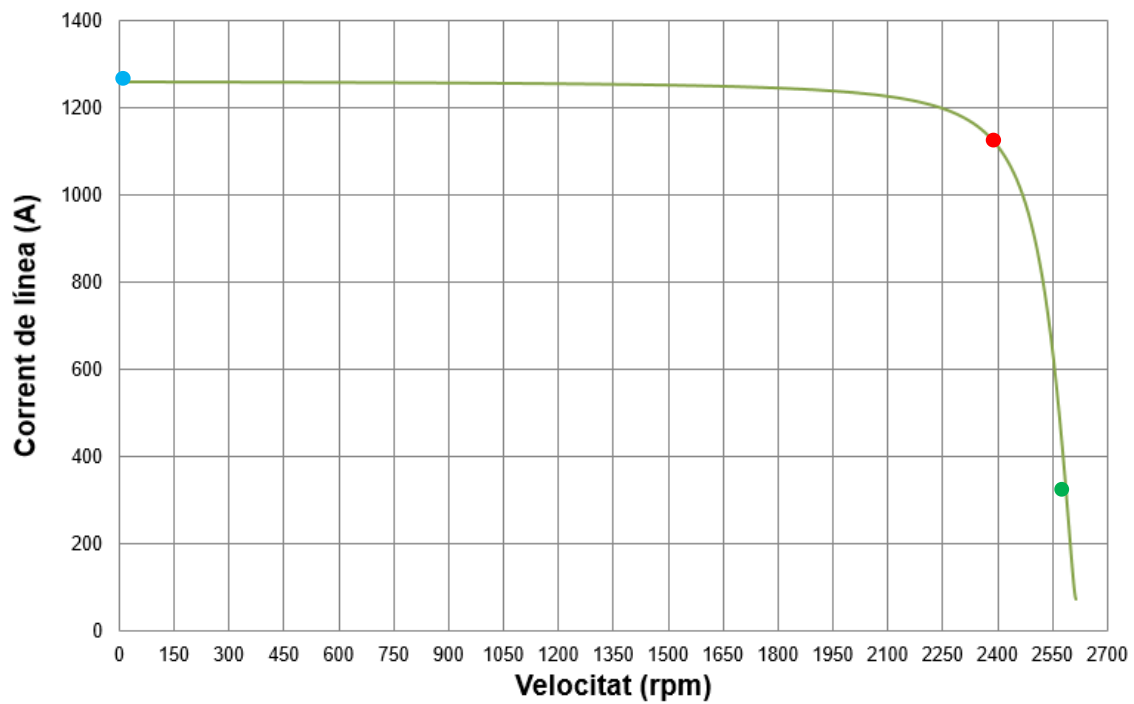


Figura 71: Corba corrent-velocitat del motor de 1020 kW.

On es pot veure:

- Punt de treball nominal (313 A, 2587 rpm) → ●
- Punt de parell màxim (1116,28 A, 2395 rpm) → ●
- Punt d'arranc (1259,72 A, 0 rpm) → ●

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Factor de potència- índex de càrrega

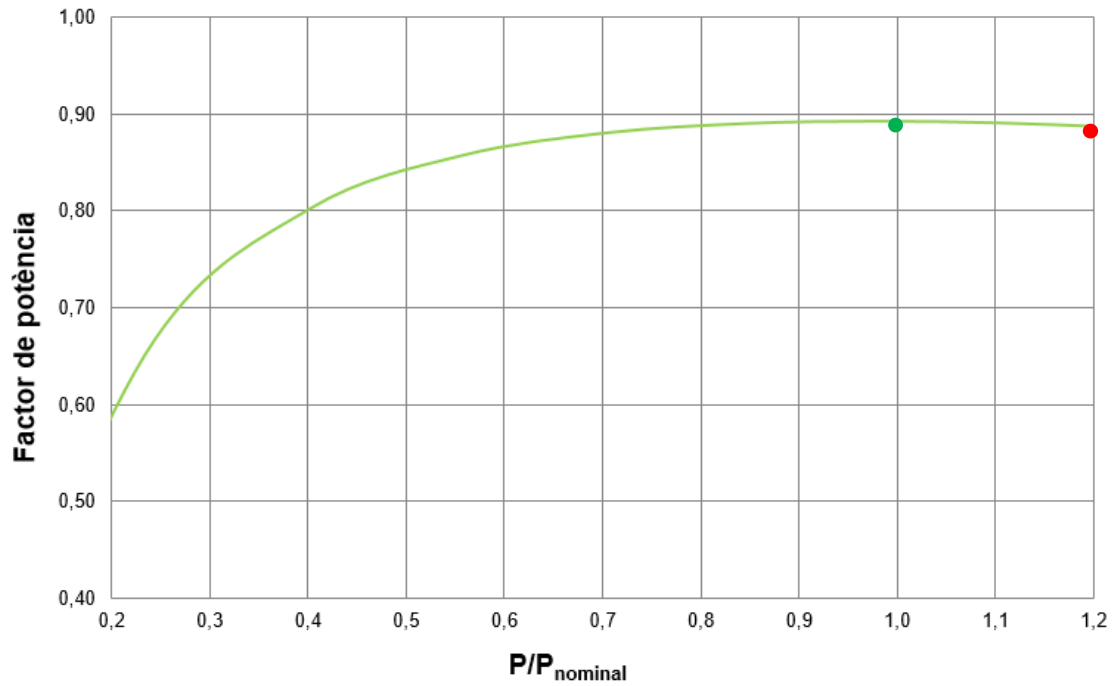


Figura 72: Corba de factor de potència-índex de càrrega del motor de 1020 kW.

On es pot veure:

Punt de treball nominal (0,892, 1) → ●

Punt de parell màxim (0,887, 1,2) → ●

Com a índex de càrrega s'ha utilitzat la relació: P_{util} / P_{util nominal}.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Rendiment- índex de càrrega.

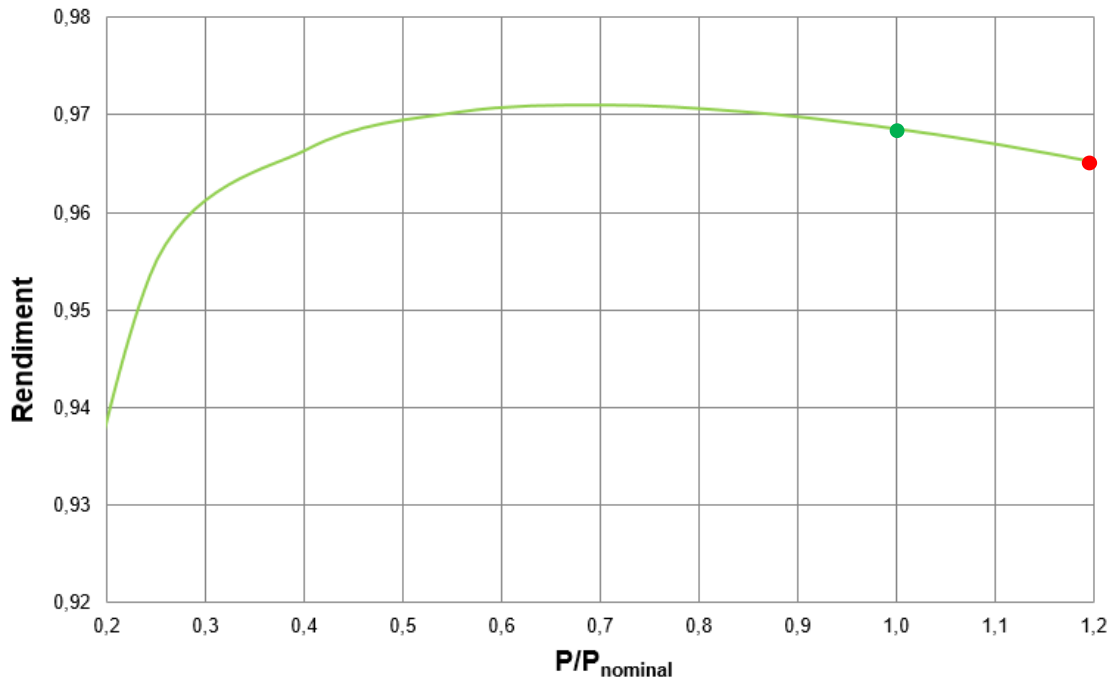


Figura 73: Corba de rendiment-índex de càrrega del motor de 1020 kW.

On es pot veure:

Punt de treball nominal (0,969, 1) → ●

Punt de parell màxim (0,967, 1,2) → ●

Com a índex de càrrega s'ha utilitzat la relació: Putil / Putil nominal.

Pot ser interessant per a veure un comportament més detallat en la zona lineal del motor (zona a la que el motor treballarà la major part del seu funcionament) la gràfica parell-velocitat de la zona lineal exclusivament:

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Parell- velocitat (zona lineal)

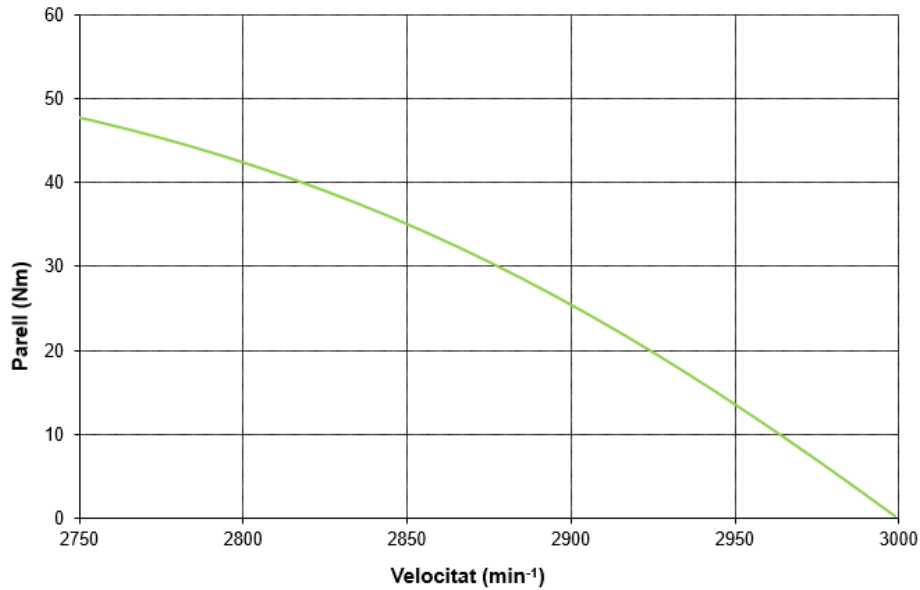


Figura 74: Zona lineal de la corba parell-velocitat del motor de 1020 kW.

5.3.5 Simulació amb FEMM

A continuació es presenten els resultats de la simulació electromagnètica amb elements finits corresponent al motor de 1020 W original. Cal recalcar que la simulació, com en l'apartat 5.1.5. i 5.2.5., s'ha fet alimentant només una fase amb el corrent en buit (en FEMM, correspondrà al corrent en valor màxim, ja que en els paràmetres magnètics obtinguts com el flux i la inducció es treballa en valors màxims).

Aplicant les equacions 16 i 17:

$$I_0 \approx 125,2 \text{ A}$$

$$I_{0max} \approx 177,059 \text{ A}$$

Efectuant la simulació amb aquest corrent, els resultats obtinguts són els següents:

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Línies de flux

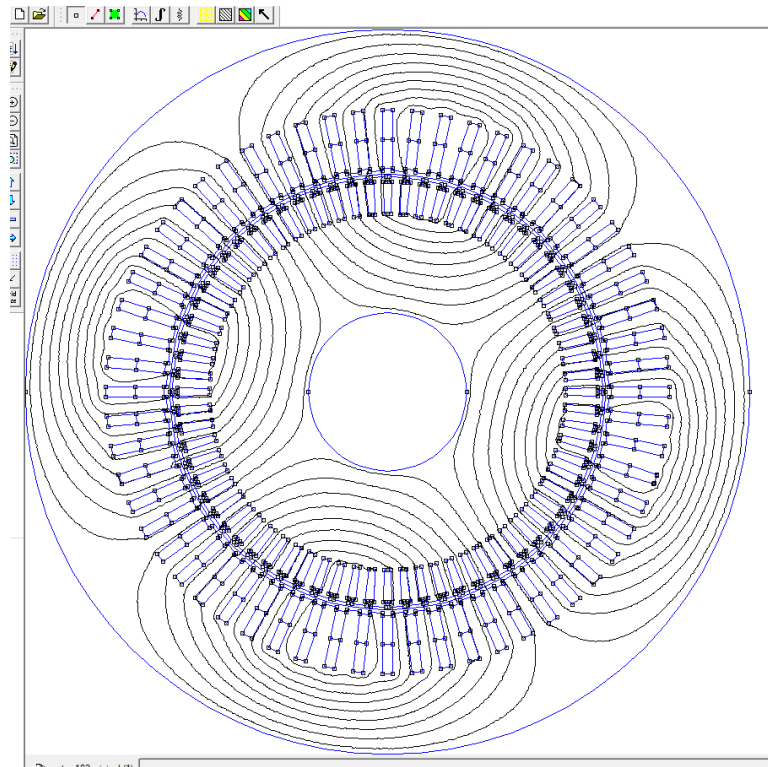


Figura 75: Línies de flux del motor de 1020 kW.

Mapa d'induccions

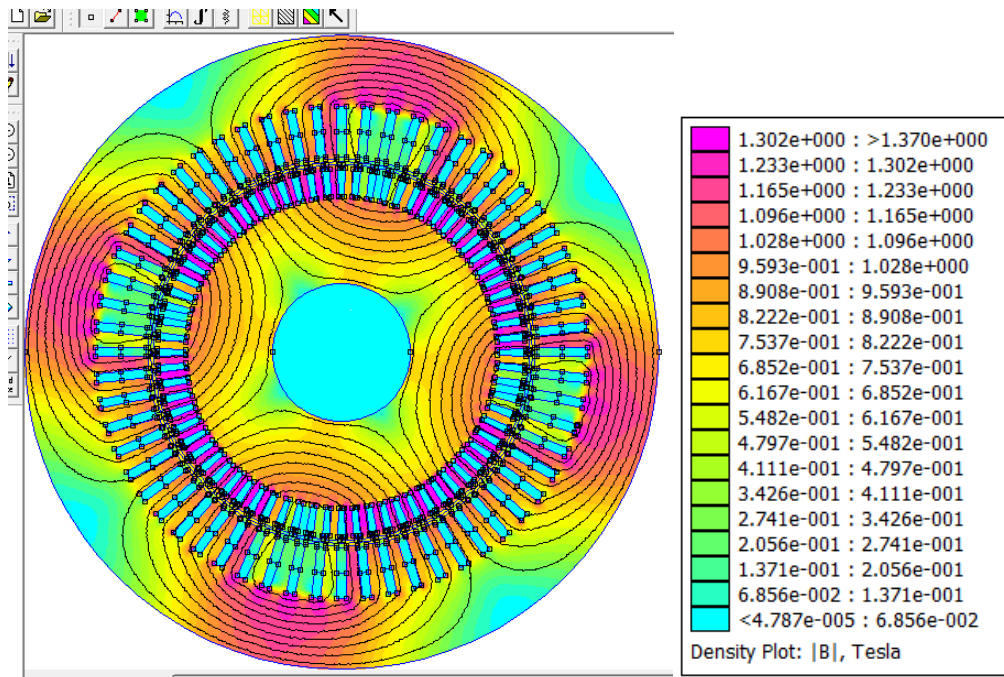


Figura 76: Mapa d'induccions del motor de 1020 kW.

Com es pot observar, en aquest motor les induccions varien força en funció de la dent en la que ens trobem, també succeeix el mateix a la corona de l'estator.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Per aquest motiu, igual que en els motors anteriors, s'han extret les dades des de punts molt similars intentant minimitzar al màxim l'error en l'extracció de dades per als motors amb variacions.

Point: x=144, y=214	Point: x=147, y=228
A = 0.0505079 Wb/m	A = 0.0479888 Wb/m
B = 0.685388 T	B = 0.886286 T
Bx = 0.26624 T	Bx = -0.281165 T
By = 0.631564 T	By = 0.840505 T
H = 67.1875 A/m	H = 90.6202 A/m
Hx = 26.0991 A/m	Hx = -28.7483 A/m
Hy = 61.9112 A/m	Hy = 85.9393 A/m
mu_x = 8117.8 (rel)	mu_x = 7782.85 (rel)
mu_y = 8117.8 (rel)	mu_y = 7782.85 (rel)
E = 27.8329 J/m ³	E = 43.5134 J/m ³
J = 0 MA/m ²	J = 0 MA/m ²

Figura 77: Resultats en la dent d'estator del motor de 1020 kW.

Forma de la inducció a l'entreferro

El procés per a obtenir aquesta gràfica és exactament el mateix que el del punt 5.1.5.

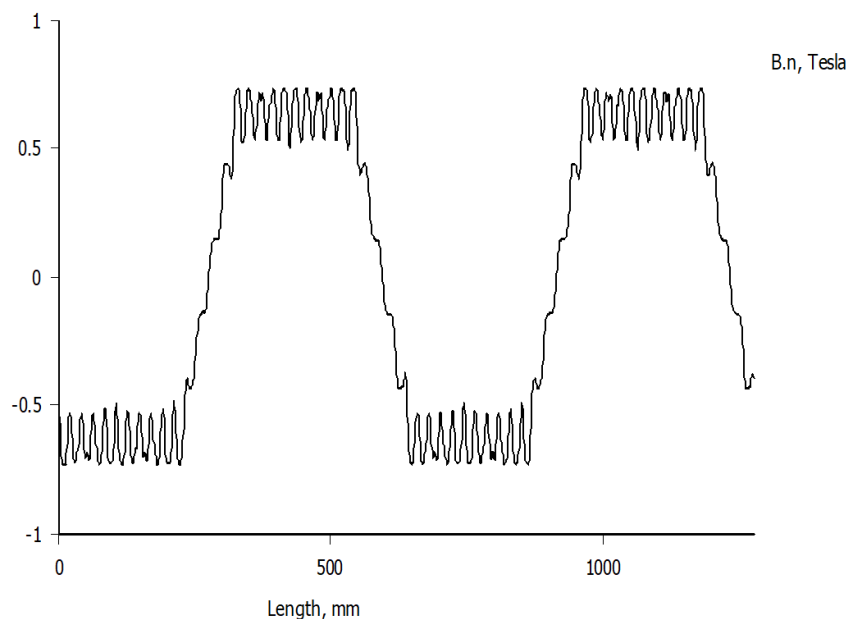


Figura 78: Forma de la inducció a l'entreferro del motor de 1020 kW.

Determinació del flux

Obtenim el resultat del flux directament des de el post-processor com explica l'apartat 4.1:

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

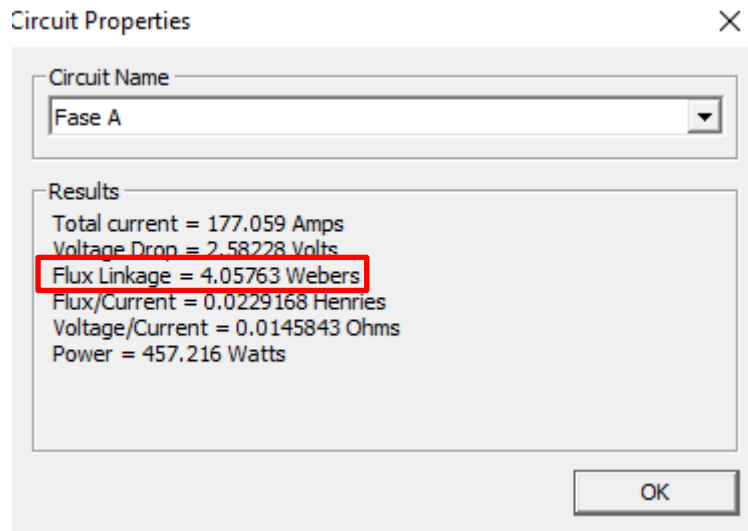


Figura 79: Determinació del flux en el motor de 1020 kW.

Determinació de la inductància magnetitzant

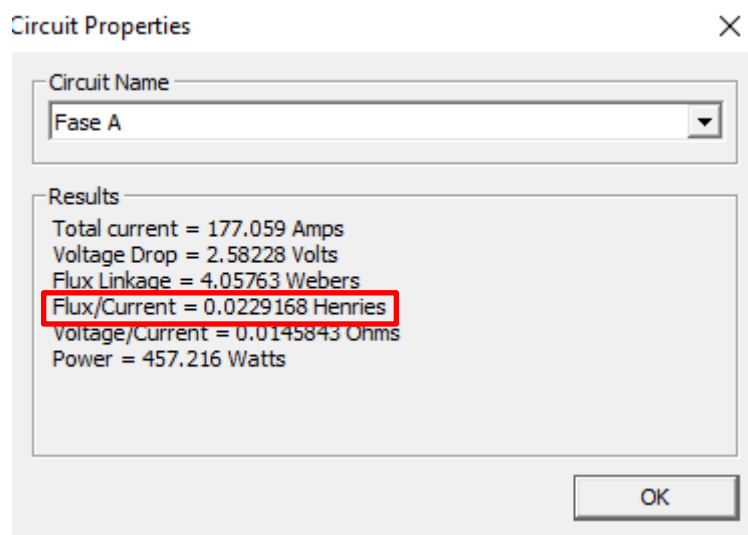


Figura 80: Determinació de la inductància magnetitzant del motor de 1020 kW.

Igual que en l'apartat 5.1.5. i 5.2.5., amb l'equació 17 podem calcular la reactància magnetitzant per a comparar-la amb les futures modificacions del motor.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

6. CRITERIS PER LA VARIACIÓ DELS PARÀMETRES DEL CIRCUIT EQUIVALENT

Com s'ha esmentat anteriorment, l'esquema equivalent és una aproximació dels paràmetres elèctrics que caracteritzen, en aquest cas, els motors d'inducció.

Aquests paràmetres variaran en funció de la forma constructiva i dels materials dels diferents components que formen el motor.

6.1. DEFINICIÓ I ABAST DE L'ESTUDI

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.

Per a cada paràmetre que s'esmenta a continuació, s'han efectuat tres variacions.

Els paràmetres sobre els que s'ha actuat són els següents:

- Resistència de l'estator (R_1).
- Resistència del rotor (R'_2 i R'_{21} , R'_{22} per al motor de doble gàbia de 7,5 kW).
- Tipus de xapa magnètica (afectarà als paràmetres de R_{FE} i X_μ).

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

1. Redibuixar els plànols del motor per a cadascuna de les variacions de la forma constructiva.
2. Realitzar simulacions magnetoestàtiques de cadascuna de les modificacions en la forma constructiva.
3. Determinar els paràmetres magnètics en diferents zones de cada motor.
4. Calcular els nous paràmetres del circuit equivalent afectats per la variant constructiva i els materials.
5. Resoldre l'esquema equivalent de cada motor amb els nous paràmetres.
6. Elaborar les noves corbes característiques per a cada modificació per comparar amb la corba característica del motor original.
7. Escollir variants constructives conjuntes per una millora del rendiment segons els resultats obtinguts i comparats amb el motor original.
8. Valorar-ho econòmicament.

Per realitzar aquest procés, s'han establert diverses hipòtesis en els diferents càlculs. Tot i així, algunes hipòtesis es compliran en tots els motors:

- 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} i 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.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

- Per falta d'algunes dades en alguns motors i a causa de treballar amb el mateix criteri en els tres estudis, s'ha mantingut l'aproximació de la equació 16.
- No es consideraran les pèrdues addicionals ni les pèrdues per fregament.

Cal recordar que l'esquema equivalent és una aproximació al comportant real del motor, per tant no és estrany que hi puguin haver petites diferències amb els resultats obtinguts al efectuar la seva resolució respecte dels paràmetres nominals definits pel fabricant en la placa de característiques.

Algunes de les aproximacions indicades anteriorment també condicionen els resultats finals com, per exemple, el fet de no considerar totes les pèrdues.

A més, el programa FEMM, al ser en 2D, només permet establir una profunditat, fet que no es absolutament real (no es tenen en consideració, per exemple, els efectes dels caps de bobina).

6.2. VARIACIÓ DE LA RESISTÈNCIA DE L'ESTATOR.

El primer paràmetre a modificar ha estat la resistència d'estator (R_1). Aquest paràmetre està directament relacionat amb els conductors que formen els bobinats de l'estator. Per tant, el que s'ha fet és actuar sobre aquests conductors a partir de la equació (19).

Com bé sabem, la fórmula de la resistència d'un conductor és:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad [\Omega] \quad [19]$$

On:

R : Resistència.

ρ : Resistivitat del material.

l : Longitud del conductor.

S : Secció del conductor.

Per tant, podem actuar de tres maneres:

- I. Buscant un material amb una conductivitat més elevada.
- II. Disminuint la longitud del conductor.
- III. Augmentant la secció del conductor.

Les dues primeres opcions s'han descartat.

En el primer cas, s'hauria de fer una cerca de materials superconductors, que òbviament encarirà molt el preu del motor (el següent millor conductor seria l'or).

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

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Per tant, només podem actuar sobre la secció del conductor. S'intentarà reduir la resistència de la següent manera:

$$\frac{R_1}{R'_1} = \frac{\rho \frac{l}{S_1}}{\rho \frac{l}{S'_1}} = \frac{S'_1}{S_1} \quad [20]$$

On:

R_1 : Resistència de l'estator.

ρ : Resistivitat del material.

l : Longitud del conductor.

S_1 : Secció del conductor.

R'_1 : Nova resistència d'estator.

S'_1 : Nova secció del conductor.

La variació de la secció del conductor es pot relacionar directament amb la variació de resistència: un augment de secció té com a conseqüència una disminució de resistència.

En conclusió, per disminuir la resistència escollirem tres conductors normalitzats de secció superior. Les seccions normalitzades 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.

A més de les hipòtesis reflexades en l'apartat 6.1. per a les variacions de la resistència de l'estator, s'afegeix la condició de respectar el factor d'ocupació de ranura de l'estator, mantenint aquesta entre 0,4 i 0,6 per al motor de 250 W i 7,5 kW i entre 0,85 i 0,9 per al motor de 1020 kW. Aquest fet implicarà fer modificacions en la mida de les ranures de l'estator. De forma simplificada, no es tenen en consideració les possibles variacions en la longitud del conductor a utilitzar al variar la secció del conductor.

És necessari tenir en compte que el corrent nominal de l'estator augmentarà amb cada una de les variacions. La tensió ve directament de la xarxa i no s'ha contemplat variar-la, per tant, és lògic pensar que si la tensió és la mateixa i disminuïm la resistència, el corrent nominal es veurà augmentat en proporció a la disminució de la resistència a l'hora de realitzar els càlculs de l'esquema equivalent.

6.3. VARIACIÓ DE LA RESISTÈNCIA DEL ROTOR.

Per a poder variar la resistència del rotor, com en l'apartat anterior, s'ha d'actuar sobre els conductors, en aquest cas, del rotor.

La diferència és que, en aquest cas, els conductors del rotor 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.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Per tant, en aquest cas, només s'han contemplat dues opcions per a variar la resistència:

- Buscar un material amb una conductivitat més elevada.
- Augmentar la secció del conductor.

Tenint en compte que en els tres motors el material que trobem a les ranures del rotor és diferent, s'han trobat els següents impediments:

- 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 aquests motius, s'ha decidit variar la secció dels conductors del rotor utilitzant el mateix principi que en l'equació 20.

Un augment de secció facilitarà el pas del corrent induït en el rotor, per tant:

$$\frac{R_2}{R'_2} = \frac{S'_2}{S_2} \quad [20]$$

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 (no podem deixar un espai de dent de rotor insuficient). Aquest augment pot ser més o menys aproximat al 5%.

En el cas del motor de doble gàbia, cal recordar que trobem dues ranures al rotor i que en l'esquema equivalent del motor les tractem com a resistències de rotor individuals, per tant, en el motor de 7,5 kW s'ha triplicat la secció de la ranura exterior, amb la ranura interior sense modificar.

Posteriorment, s'ha repetit el mateix procés a la inversa, augmentant la secció de la ranura interior en increments del 5% tres vegades, mantenint la ranura exterior amb una secció fixa.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

6.4. VARIACIÓ DEL TIPUS DE XAPA MAGNÈTICA.

Modificant el tipus de xapa magnètica incidim directament sobre els paràmetres del circuit equivalent que corresponen a la branca de buit.

Tant la reactància magnetitzant (X_{μ}) com la resistència de pèrdues al ferro (R_{FE}) es veuran afectades per la qualitat de l'acer que constitueix la xapa. Una xapa de més qualitat implica que les seves pèrdues específiques són menors, per tant, els paràmetres d'impedància corresponents a la xapa que constitueix l'estator i el rotor, augmenten i, a l'estar en derivació en la branca de buit, les pèrdues disminueixen.

Com en el cas de la variació de R_1 i R_2 , s'han realitzat tres modificacions de xapa per a cada motor, intentant millorar la qualitat del ferro al silici. L'espessor de la xapa magnètica s'ha mantingut als 0,5 mm.

És cert però, que a l'hora d'identificar la inductància magnetitzant (L_{μ}) amb FEMM per al càlcul de la reactància magnetitzant (X_{μ}), s'observen diferències amb les dades bibliogràfiques dels valors d'aquesta reactància.

Per a solucionar aquest impediment, s'ha decidit ser fidel a les dades dels informes dels motors reals igualant el valor de FEMM a l'original i només tenir en compte l'increment de la inductància magnetitzant en FEMM a l'hora de recalculer l'esquema equivalent.

$$L_{\mu FEMM} \neq L_{\mu real} \rightarrow \Delta L_{\mu FEMM} = \Delta L_{\mu real} \quad [21]$$

6.5. AFECTACIÓ DE LES MODIFICACIONS CONSTRUCTIVES EN LES PÈRDUES AL FERRO.

Tal i com s'esmenta als apartats 6.2. i 6.3, les ranures pertinents al rotor i a l'estator es modificaran per poder variar alguns paràmetres. No sempre serà necessari per a la variació de la resistència de l'estator, però aquesta modificació de ranura sí que serà necessària per la modificació de la resistència del rotor.

Aquesta modificació implica un canvi en la xapa magnètica. És lògic pensar que si ampliem ranures (ja siguin d'estator o de rotor), l'estructura del circuit magnètic i, per tant, els paràmetres magnètics es veuran afectats.

Igual que en l'apartat anterior, aquesta petita modificació de la xapa magnètica afectarà als mateixos paràmetres responsables de les pèrdues al ferro (P_{FE}) tot i que no s'hagi modificat el material, l'espessor de les xapes o el factor d'apilament.

Per a poder veure aquesta afectació, existeixen relacions matemàtiques que contemplin aquestes modificacions, tant de forma i quantitat de material, com de tipus de material i que permeten aproximar les pèrdues al ferro (P_{FE}) directament.

Aquesta equació no és una equació que es pugui aplicar directament coneixent els paràmetres nominals o el circuit equivalent, sinó que és necessari determinar alguns paràmetres constructius prèviament:

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

$$m_d = \left(\frac{\pi}{4} \cdot (D_{Md}^2 - D^2) - Q_1 \cdot S_{r1} \right) \cdot \gamma \cdot K_f \cdot L \quad [\text{kg}] \quad [22]$$

$$m_{ce} = \frac{\pi}{4} (D_y^2 - D_{Md}^2) \cdot \gamma \cdot K_f \cdot L \quad [\text{kg}] \quad [23]$$

On:

D_{Md} : Diàmetre màxim de la dent (m).

D : Diàmetre interior de l'estator (m).

D_y : Diàmetre de la corona de l'estator (m).

Q_1 : Nombre de ranures de l'estator.

S_r : Àrea d'una ranura de l'estator (m²)

γ : Pes específic de la xapa magnètica (kg/m³). (*)

K_f : factor d'apilament. (**)

L : longitud de l'estator (m).

m_d : Massa de la dent (kg).

m_{ce} : Massa de la corona de l'estator (kg).

(*) El pes específic de l'acer és 7860 kg/m³.

(**) El factor d'apilament de les xapes seleccionades és 0,98.

Un cop calculades les masses, podem passar a calcular el coeficient de pèrdues al ferro. Cal recordar que les masses de les equacions 22 i 23 s'han de recalculer per a cada variació.

$$K_{FE} = \frac{P_{FE0}}{f^{1,5} \cdot (m_{d0} \cdot B_{d0}^2 + m_{ce0} \cdot B_{ce0}^2)} \quad [24]$$

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, trobats aquests paràmetres, podem calcular les pèrdues al ferro dels nous dissenys de motor amb la següent expressió:

$$P_{FE} = K_{FE} \cdot \frac{P_{eFE}}{P_{eFE0}} \cdot f^{1,5} \cdot (m_d \cdot B_d^2 + m_{ce} \cdot B_{ce}^2) \quad [\text{W}] \quad [25]$$

On:

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

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

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

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

7. RESULTATS OBTINGUTS DE L'ESTUDI EFECTUAT

7.1. MOTOR DE 250 W

7.1.1. Variació de la resistència de l'estator

El següent quadre, així com les gràfiques, mostren els paràmetres que es veuen modificats al variar la resistència d'estator (R_1), amb els seus nous valors recalculats segons les equacions corresponents al model d'esquema equivalent mostrat a l'apartat 5.1.3 i mantenint les hipòtesis dels apartats 6.1, 6.2 i 6.5.

Variacions en els paràmetres nominals

	R_1	diam. cond.	Ranura modific.	I línia	Potència	Velocitat	Parell	cos ϕ	Rendiment
	Ω	mm	-	A	W	rpm	Nm	-	-
Original	28,4	0,4	-	0,664	294,67	1380	2,04	0,7786	0,7923
1era variació	22,43	0,45	no	0,702	320,32	1371	2,23	0,7883	0,805
2na variació	18,17	0,50	no	0,732	340,81	1364	2,38	0,7947	0,8143
3era variació	14,48	0,56	sí (*)	0,754	355,11	1360	2,49	0,7971	0,8214

Taula 9: Variacions en els paràmetres nominals del motor de 250 W.

(*) La forma de la ranura és la mateixa, s'ha ampliat la seva secció fins a 105,3 mm². Fent ús de l'equació 15, el factor d'ocupació de ranura és de 0,53.

Variacions dels ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals

	I_{arranc} / I_n	M_{arranc} / M_n	M_{max} / M_n
	-	-	-
Original	4,5514	3,0282	3,1819
1era variació	4,8552	3,1494	3,27
2na variació	4,8796	3,235	3,3368
3era variació	4,9494	3,36	3,45

Taula 10: Variacions en els ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals del motor de 250 W.

Variacions de les pèrdues joule a l'estator i suma de pèrdues

	P_{j1}	$P_{j1}+P_{j2}+P_{fe}$	P_{j1}
	W	W	%
Original	37,62	77,11	48,7
1era variació	33,18	77,44	42,77
2na variació	29,26	77,57	37,65
3era variació	24,73	77,07	32,03

Taula 11: Variacions de les pèrdues joule a l'estator del motor de 250 W.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corbes característiques parell - velocitat

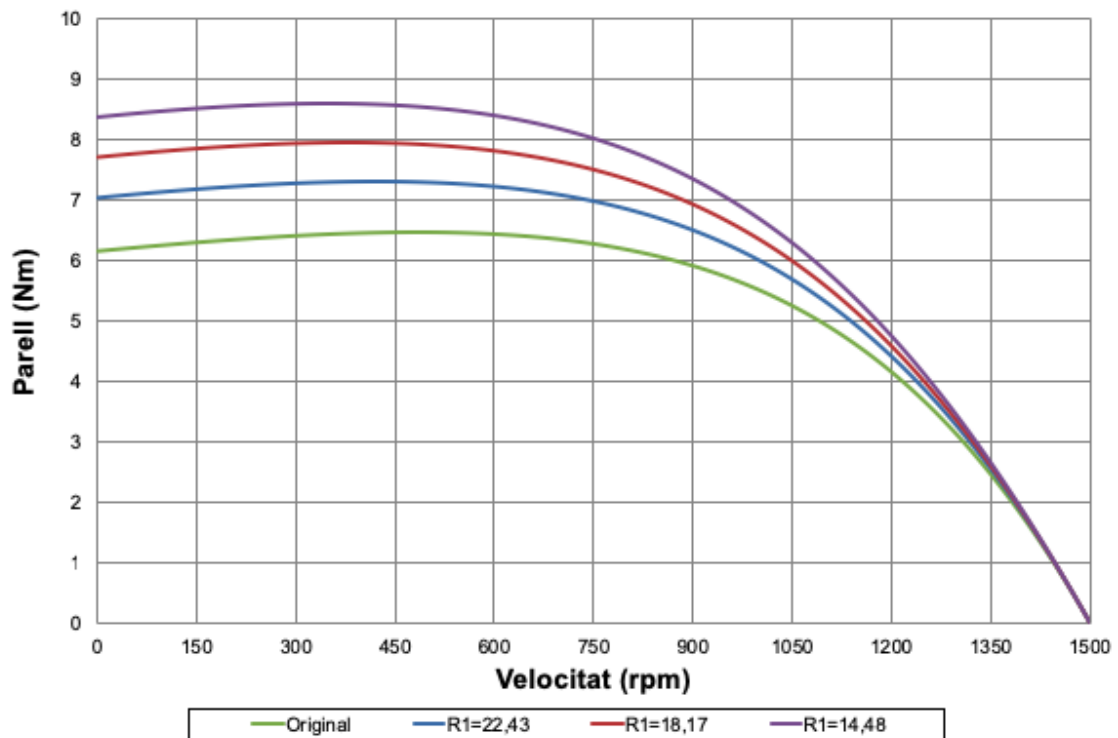


Figura 81: Corbes característiques parell-velocitat amb variacions de la resistència de l'estator en el motor de 250 W.

Corbes característiques corrent - velocitat

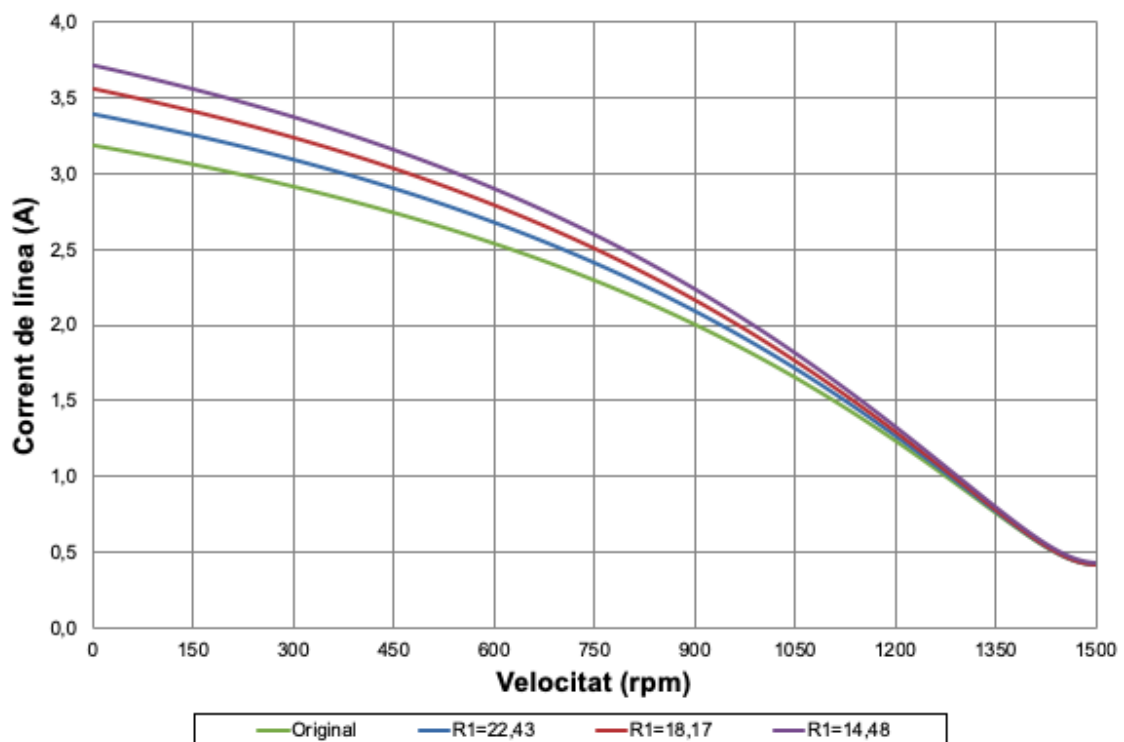


Figura 82: Corbes característiques corrent-velocitat amb variacions de la resistència de l'estator en el motor de 250 W.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corbes característiques del factor de potència - índex de càrrega

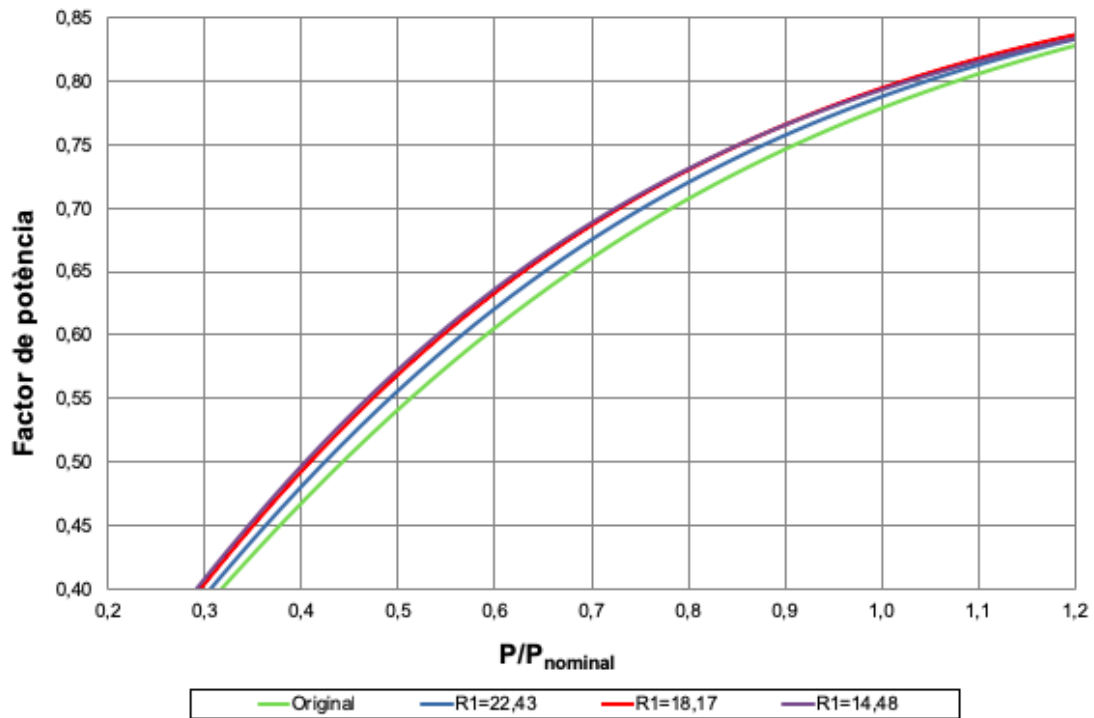


Figura 83: Corbes característiques factor de potència-índex de càrrega amb variacions de la resistència de l'estator en el motor de 250 W.

Corbes característiques rendiment - índex de càrrega

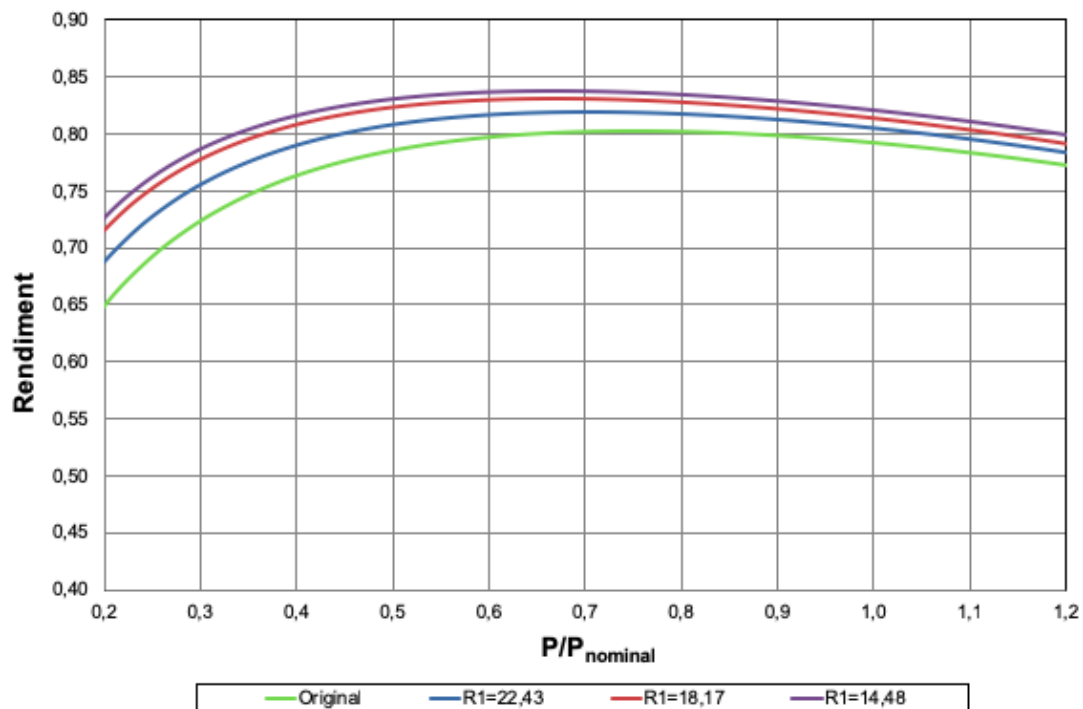


Figura 84: Corbes característiques rendiment-índex de càrrega amb variacions de la resistència de l'estator en el motor de 250 W.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

7.1.2. Variació de la resistència del rotor

El següent quadre, així com les gràfiques, mostren els paràmetres que es veuen modificats al variar la resistència de rotor (R_2'), amb els seus nous valors recalculats segons les equacions corresponents al model d'esquema equivalent mostrat a l'apartat 5.1.3 i mantenint les hipòtesis dels apartats 6.1, 6.3 i 6.5.

Variacions en els paràmetres nominals

	R_2'	S ranura rotor	Modifica ció de ranura	I línia	Potència	Velocitat	Parell	cos fi	Rendiment
	Ω	mm ²	-	A	W	rpm	Nm	-	-
Original	34,9	28,32	-	0,664	294,67	1380	2,04	0,7786	0,7923
1era variació	33,05	29,89	sí	0,672	300,76	1384	2,07	0,7833	0,7947
2na variació	31,7	31,17	sí	0,675	303,41	1388	2,09	0,7849	0,7968
3era variació	29,03	34,04	sí	0,684	311,18	1395	2,13	0,7901	0,8006

Taula 12: Variacions en els paràmetres nominals del motor de 250 W.

Variacions dels ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals

	I_{arranc} / I_n	M_{arranc} / M_n	M_{max} / M_n
Original	-	-	-
1era variació	4,5514	3,0282	3,1819
2na variació	4,8486	2,9325	3,1264
3era variació	4,883	2,8792	3,108
3era variació	4,9567	2,7392	3,0455

Taula 13: Variacions en els ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals del motor de 250 W.

Variacions de les pèrdues joule al rotor i suma de pèrdues

	P_{j2}	$P_{j1}+P_{j2}+P_{fe}$	P_{j2}
	W	W	%
Original	25,62	77,11	33,16
1era variació	25,21	77,53	32,45
2na variació	24,48	77,24	31,63
3era variació	23,42	77,36	30,21

Taula 14: Variacions de les pèrdues joule a l'estator del motor de 250 W.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corbes característiques parell - velocitat

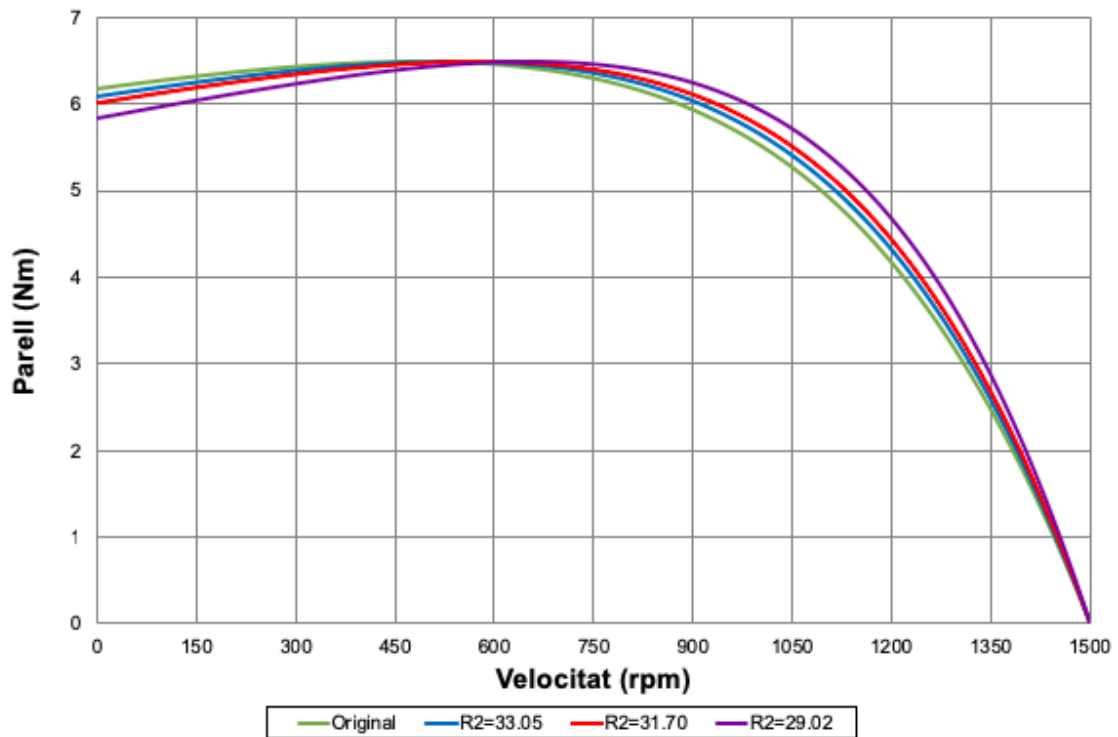


Figura 85: Corbes característiques parell-velocitat amb variacions de la resistència del rotor en el motor de 250 W.

Corbes característiques corrent - velocitat

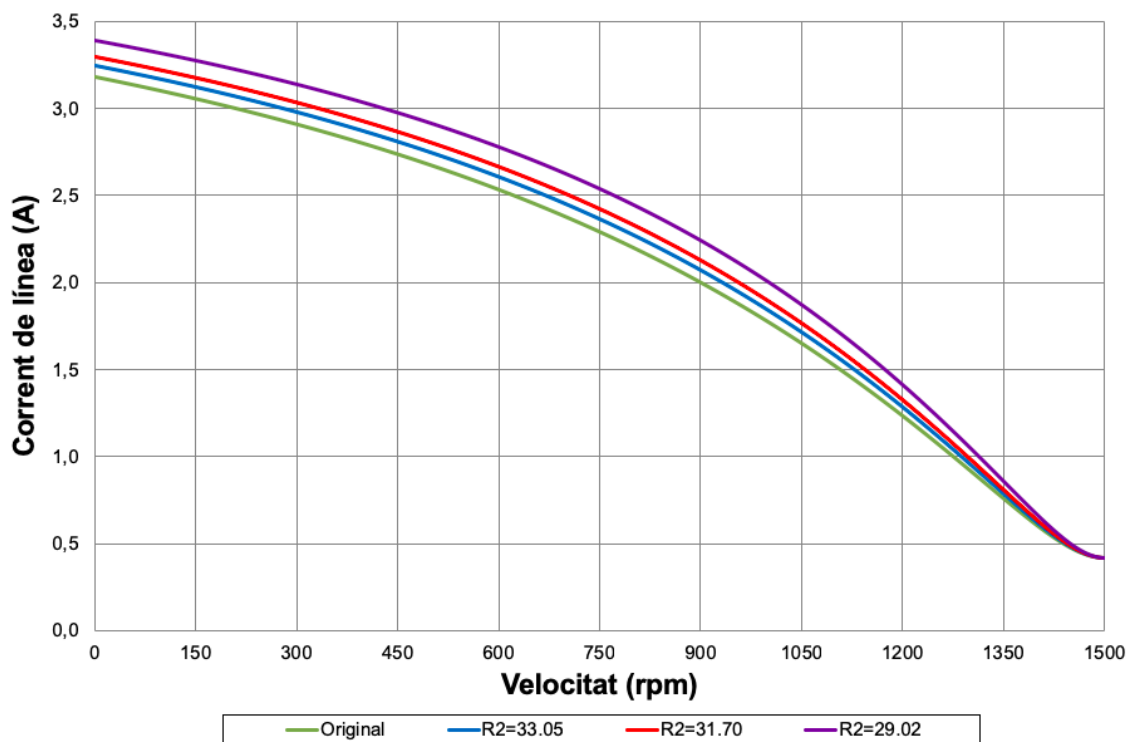


Figura 86: Corbes característiques corrent-velocitat amb variacions de la resistència del rotor en el motor de 250 W.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corbes característiques del factor de potència - índex de càrrega

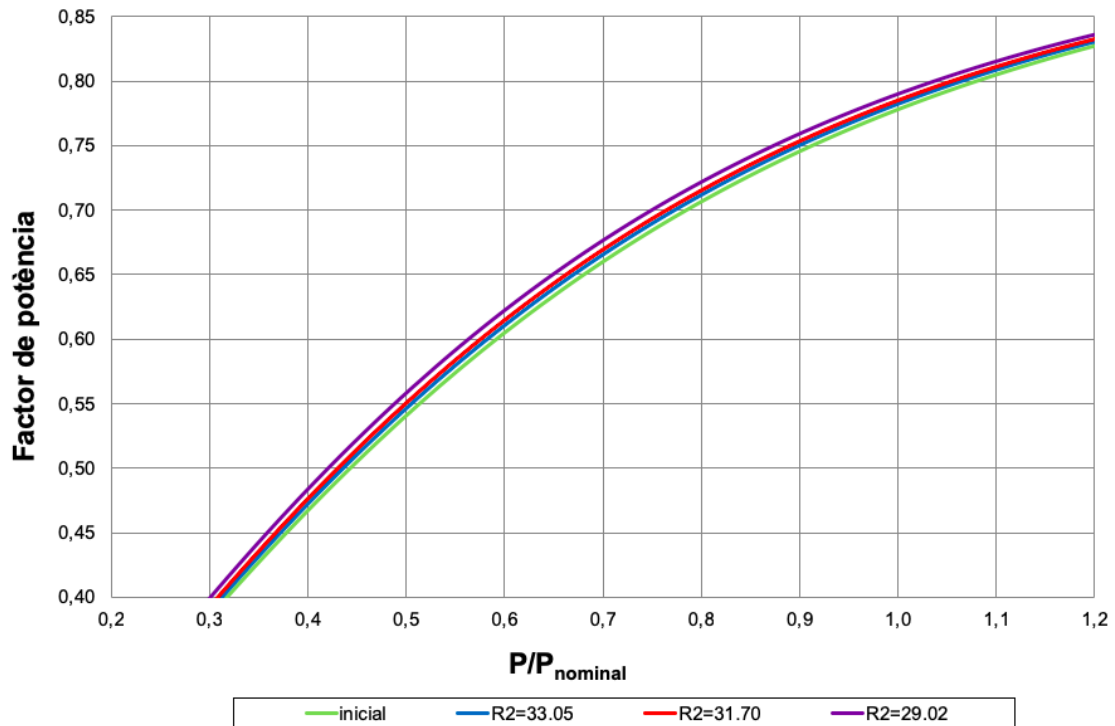


Figura 87: Corbes característiques factor de potència-índex de càrrega amb variacions de la resistència del rotor en el motor de 250 W.

Corbes característiques de rendiment - índex de càrrega

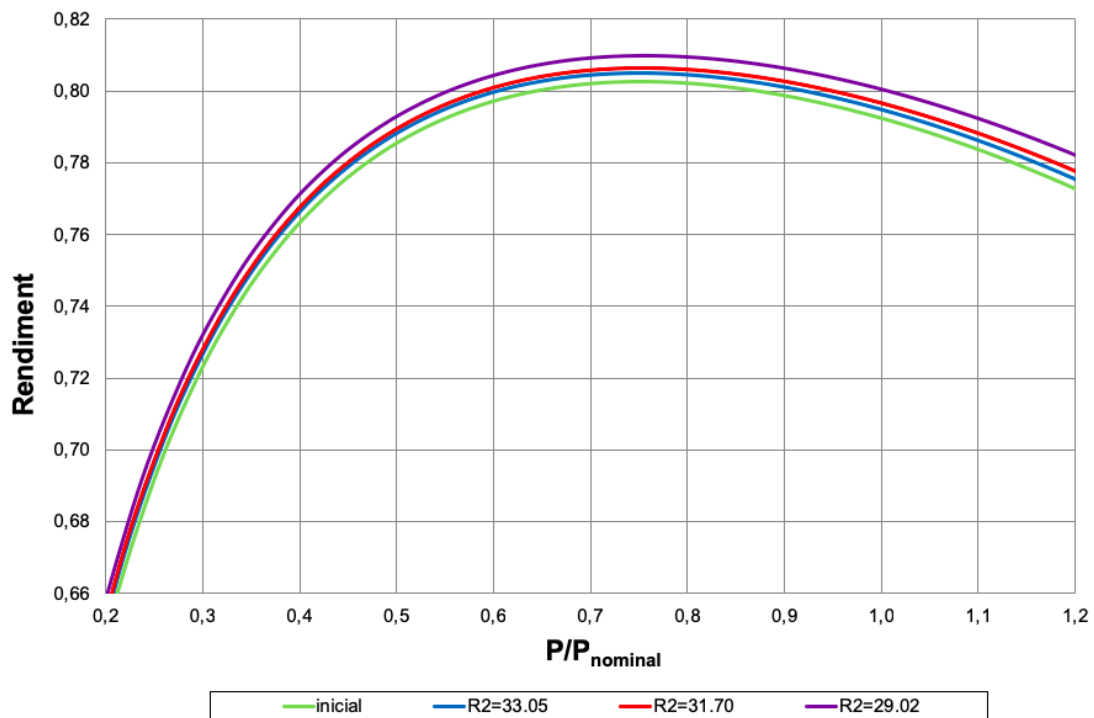


Figura 88: Corbes característiques rendiment-índex de càrrega amb variacions de la resistència del rotor en el motor de 250 W.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

7.1.3. Variació del tipus de xapa magnètica

El següent quadre, així com les gràfiques, mostren els paràmetres que es veuen modificats al variar la xapa magnètica que constitueix el motor, amb els seus nous valors recalculats segons les equacions corresponents al model d'esquema equivalent mostrat a l'apartat 5.1.3 i mantenint les hipòtesis dels apartats 6.1, 6.4 i 6.5.

Variacions en els paràmetres nominals

	Perdues esp.	Tipus	Modif. ranura	I línia	Potència	Velocitat	Parell	cos fi	Rendiment
	W/kg	xapa	ranura	A	W	rpm	Nm	-	-
Original	2,3	M-47		0,664	294,67	1380	2,04	0,7786	0,7923
1era variació	1,5	M-36	no	0,687	310,04	1372	2,15	0,7855	0,7992
2na variació	1,2	M-22	no	0,694	313,65	1370	2,18	0,7844	0,8012
3era variació	1	M-15	no	0,696	315,59	1369	2,20	0,7855	0,8024

Taula 15: Variacions en els paràmetres nominals del motor de 250 W.

Variacions dels ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals

	Iarranc / In	Marranc / Mn	Mmax / Mn
	-	-	-
Original	4,5514	3,0282	3,1819
1era variació	4,6356	2,8629	3,0087
2na variació	4,5878	2,8253	2,9693
3era variació	4,5729	2,8065	2,9496

Taula 16: Variacions en els ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals del motor de 250 W.

Variacions de les pèrdues al ferro i suma de pèrdues

	Pfe	Pj1+Pj2+Pfe	Pfe
	W	W	%
Original	13,86	77,11	17,94
1era variació	8,6	77,74	11,04
2na variació	6,85	77,69	8,81
3era variació	6,01	77,54	7,74

Taula 17: Variacions de les pèrdues joule a l'estator del motor de 250 W.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.
Marcel Martínez Arco

Corbes característiques parell - velocitat

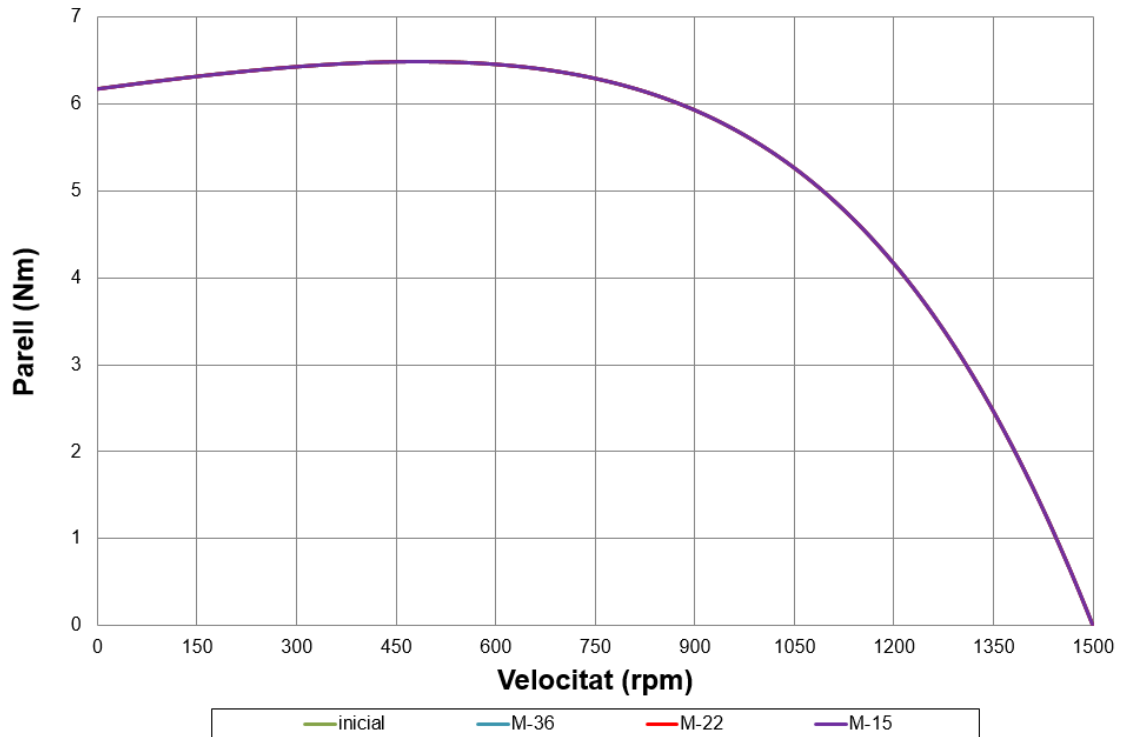


Figura 89: Corbes característiques parell-velocitat amb variacions del tipus de xapa magnètica en el motor de 250 W.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corbes característiques corrent - velocitat

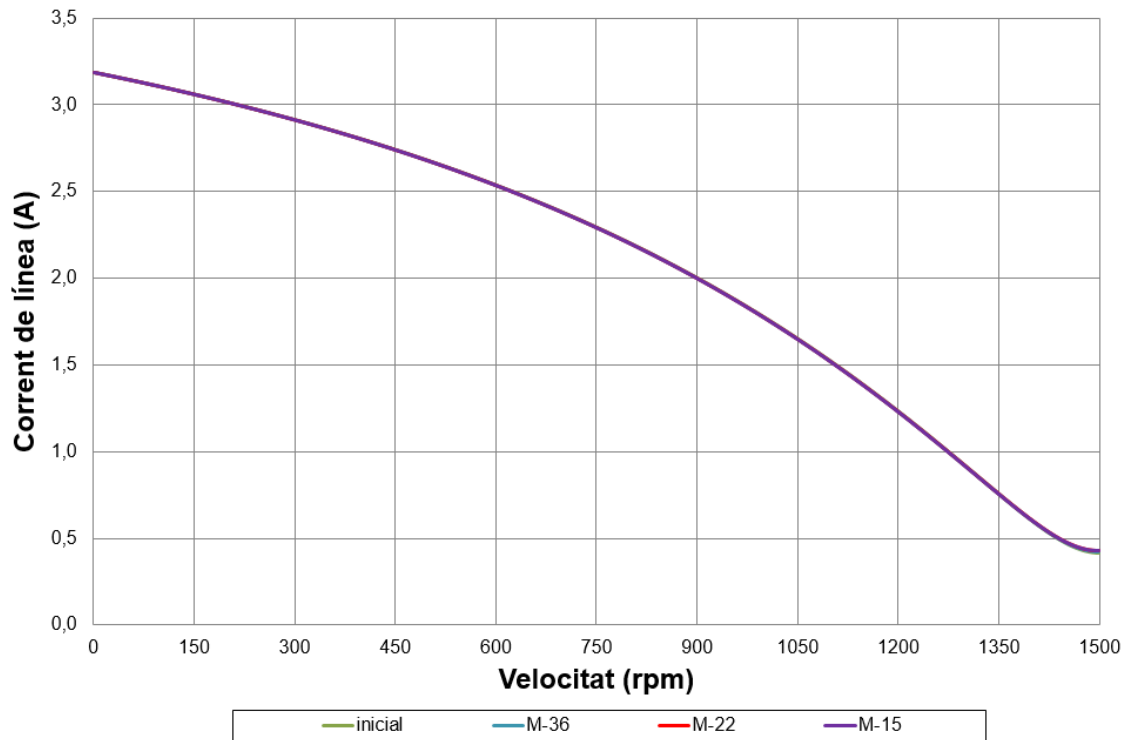


Figura 90: Corbes característiques corrent-velocitat amb variacions del tipus de xapa magnètica en el motor de 250 W.

Corbes característiques del factor de potència - índex de càrrega

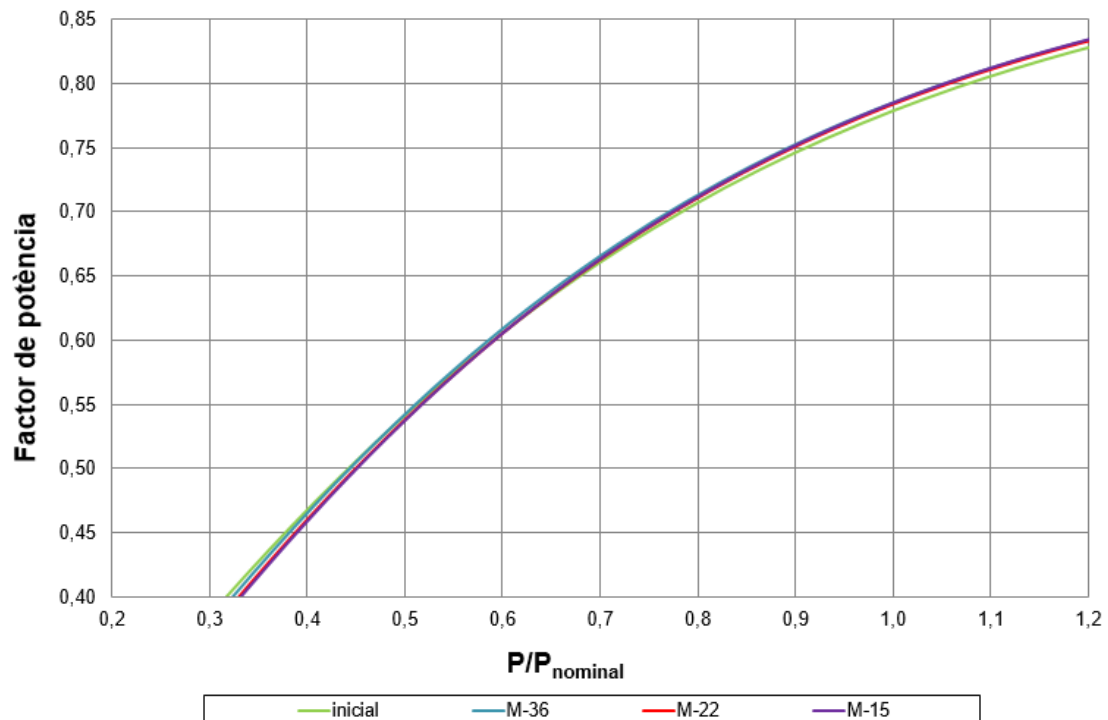


Figura 91: Corbes característiques factor de potència-índex de càrrega amb variacions del tipus de xapa magnètica en el motor de 250 W.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corbes característiques de rendiment - índex de càrrega

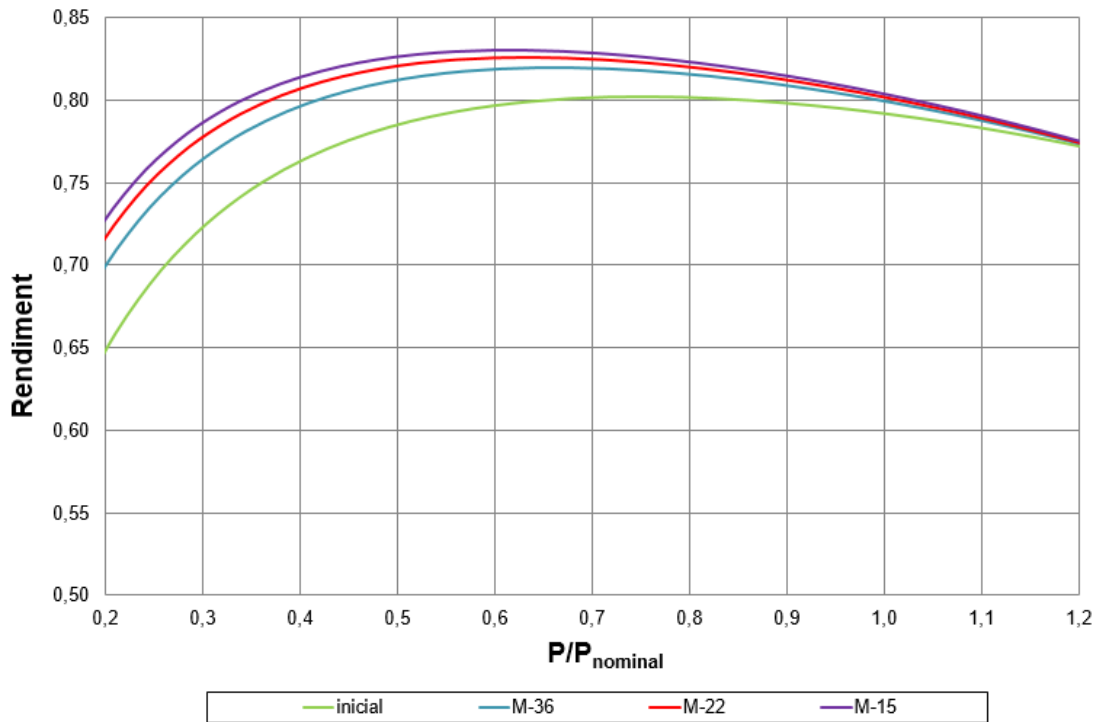


Figura 92: Corbes característiques rendiment-índex de càrrega amb variacions del tipus de xapa magnètica en el motor de 250 W.

7.2. MOTOR DE 7,5 kW

7.2.1. Variació de la resistència de l'estator

El següent quadre, així com les gràfiques, mostren els paràmetres que es veuen modificats al variar la resistència d'estator (R_1), amb els seus nous valors recalculats segons les equacions corresponents al model d'esquema equivalent mostrat a l'apartat 5.2.3 i mantenint les hipòtesis dels apartats 6.1, 6.2 i 6.5.

Variacions en els paràmetres nominals

	R_1	diam. cond.	Modif. ranura	I línia	Potència	Velocitat	Parell	cos fi	Rendiment
	Ω	mm	-	A	W	rpm	Nm	-	-
Original	1,54	1,32	-	8,633	7483,73	2904	24,61	0,8266	0,9174
1era variació	1,452	1,36	no	8,763	7617,42	2902,3	25,06	0,8276	0,9188
2na variació	1,355	1,41	no	8,924	7779,98	2900,2	25,61	0,8287	0,9203
3era variació	1,27	1,45	sí (*)	9,274	7761,52	2899,6	25,56	0,7956	0,9201

Taula 18: Variacions en els paràmetres nominals del motor de 7,5 kW.

(*) La forma de la ranura és la mateixa, s'ha ampliat la seva secció fins a 209,4 mm². Fent ús de l'equació 15, el factor d'ocupació de ranura és de 0,5.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.
 Marcel Martínez Arco

Variacions dels ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals

	I_{arranc} / I_n	M_{arranc} / M_n	M_{max} / M_n
Original	-	-	-
1era variació	5,0567	1,6057	2,275
2na variació	5,0026	1,59	2,2538
3era variació	4,9355	1,5702	2,2269
3era variació	4,7915	1,5754	2,233

Taula 19: Variacions en els ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals del motor de 7,5 kW.

Variacions de les pèrdues joule a l'estator i suma de pèrdues

	P_{j1}	$P_{j1}+P_{j2}+P_{fe}$	P_{j1}
	W	W	%
Original	344,32	673,79	51,1
1era variació	334,54	673,17	49,69
2na variació	323,71	673,79	48,04
3era variació	327,69	673,57	48,65

Taula 20: Variacions de les pèrdues joule a l'estator del motor de 7,5 kW.

Corbes característiques parell - velocitat

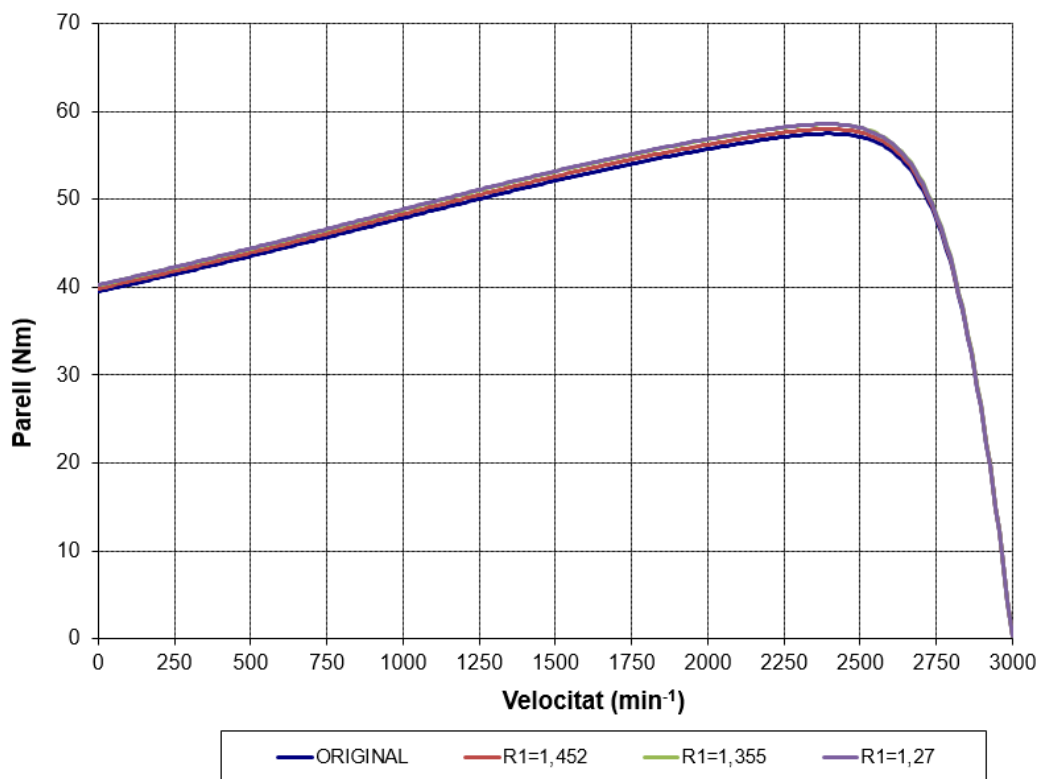


Figura 93: Corbes característiques parell-velocitat amb variacions de la resistència de l'estator en el motor de 7,5 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corbes característiques corrent - velocitat

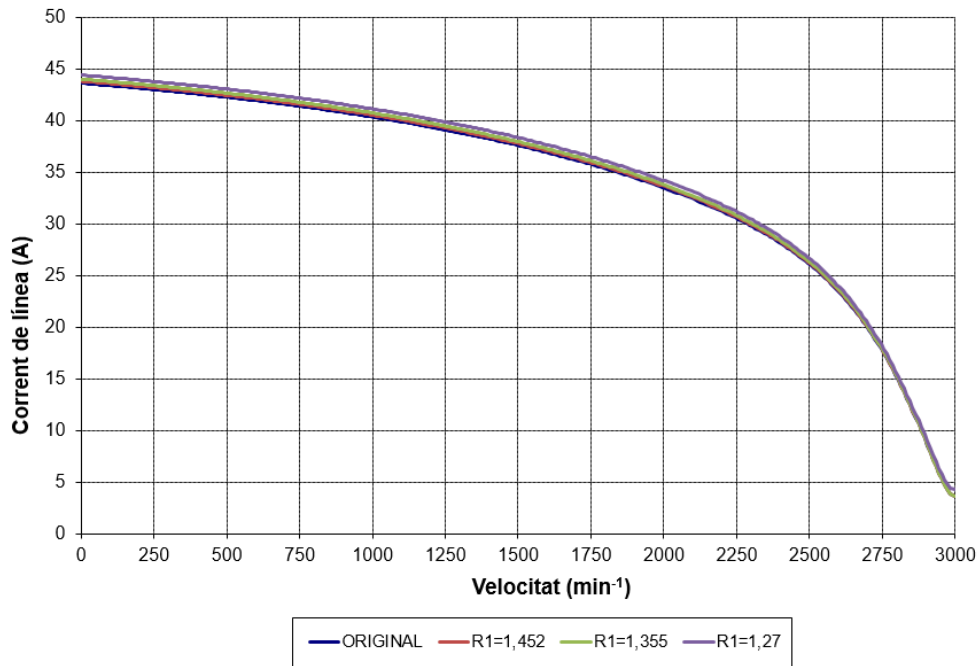


Figura 94: Corbes característiques corrent-velocitat amb variacions de la resistència de l'estator en el motor de 7,5 kW.

Corbes característiques del factor de potència - índex de càrrega

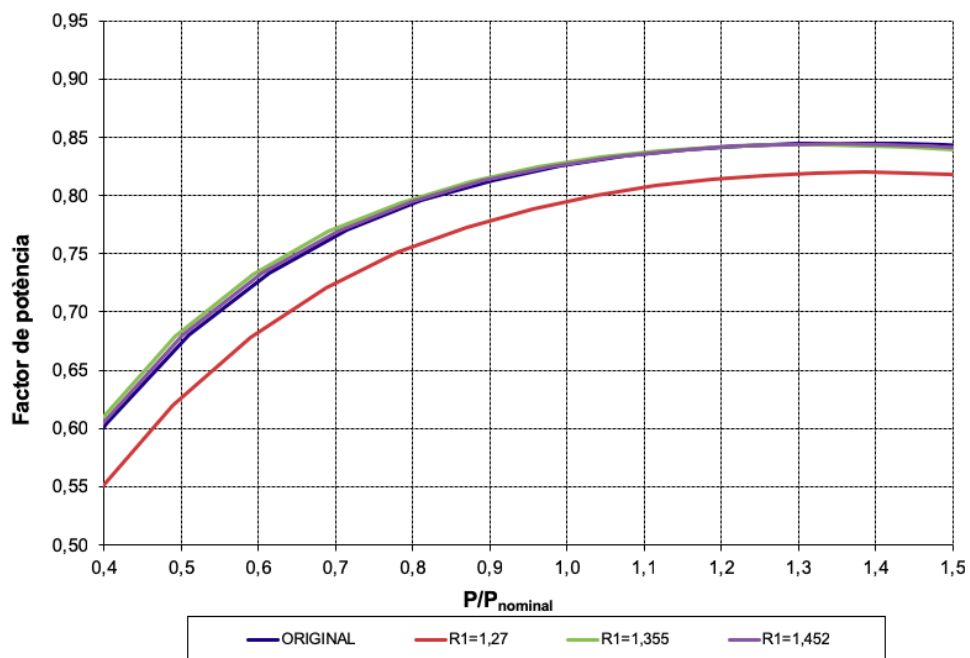


Figura 95: Corbes característiques factor de potència-índex de càrrega amb variacions de la resistència de l'estator en el motor de 7,5 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corbes característiques de rendiment - índex de càrrega

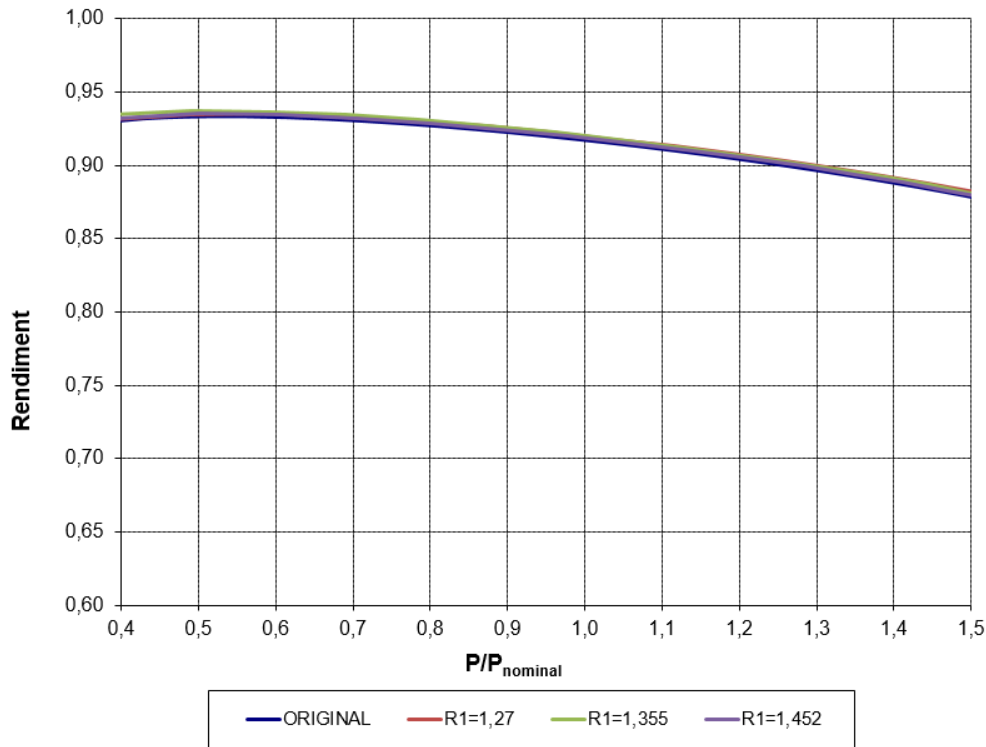


Figura 96: Corbes característiques rendiment-índex de càrrega amb variacions de la resistència de l'estator en el motor de 7,5 kW.

7.2.2. Variació de la resistència de la gàbia exterior del rotor

El següent quadre, així com les gràfiques, mostren els paràmetres que es veuen modificats al variar la resistència de la gàbia exterior del rotor (R'_{21}), amb els seus nous valors recalculats segons les equacions corresponents al model d'esquema equivalent mostrat a l'apartat 5.2.3 i mantenint les hipòtesis dels apartats 6.1, 6.3 i 6.5.

Variacions en els paràmetres nominals

	R'_{21}	S ran. Rotor	Modif. ranura	I línia	Potència	Velocitat	Parell	cos fi	Rendiment
	Ω	mm ²	-	A	W	rpm	Nm	-	-
Original	5,39	34,72	-	8,633	7483,73	2904	24,61	0,8266	0,9174
1era variació	4,95	37,75	sí	8,625	7529,09	2906,1	24,74	0,832	0,9179
2na variació	4,56	40,97	sí	8,646	7574,52	2908,1	24,87	0,8345	0,9184
3era variació	4,21	44,36	sí	8,686	7625,48	2910	25,02	0,8358	0,9188

Taula 21: Variacions en els paràmetres nominals del motor de 7,5 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Variacions dels ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals

	I_{arranc} / I_n	M_{arranc} / M_n	M_{max} / M_n
	-	-	-
Original	5,0567	1,6057	2,275
1era variació	5,1263	1,5367	2,3135
2na variació	5,1723	1,467	2,3478
3era variació	5,201	1,3969	2,3775

Taula 22: Variacions en els ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals del motor de 7,5 kW.

Variacions de les pèrdues joule al rotor i suma de pèrdues

	P_{j2}	$P_{j1}+P_{j2}+P_{fe}$	P_{j2}
	W	W	%
Original	247,39	673,79	36,71
1era variació	243,27	673,62	36,11
2na variació	239,36	673,19	35,55
3era variació	235,84	673,6	35,01

Taula 23: Variacions de les pèrdues joule a l'estator del motor de 7,5 kW.

Corbes característiques parell – velocitat

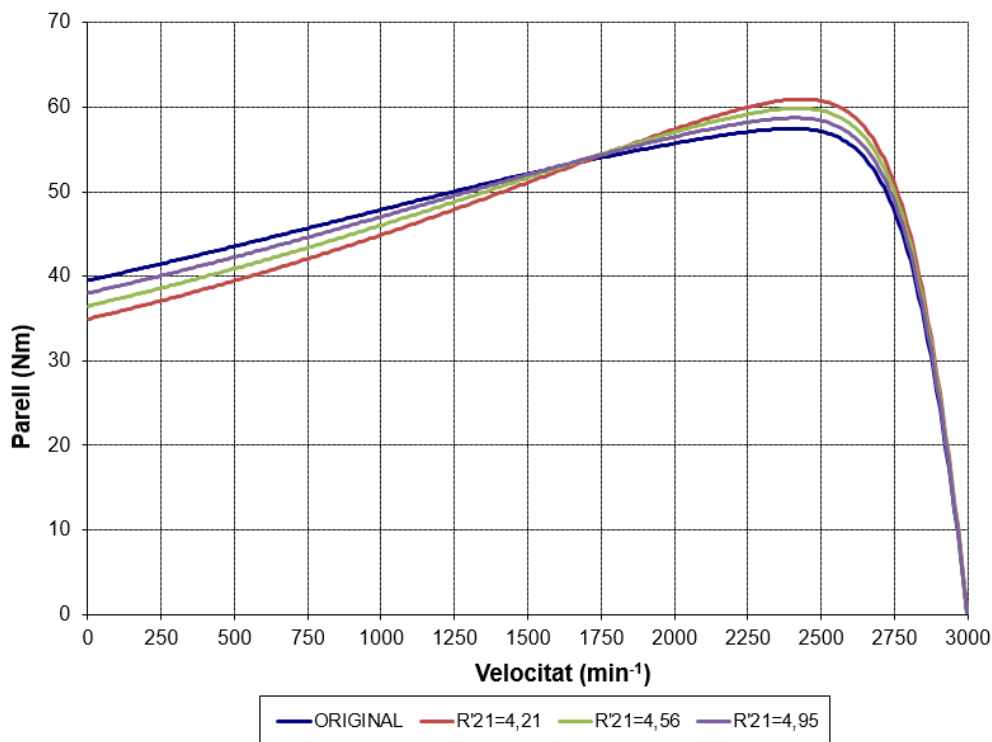


Figura 97: Corbes característiques parell-velocitat amb variacions de la resistència de la gàbia exterior del rotor en el motor de 7,5 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corbes característiques corrent - velocitat

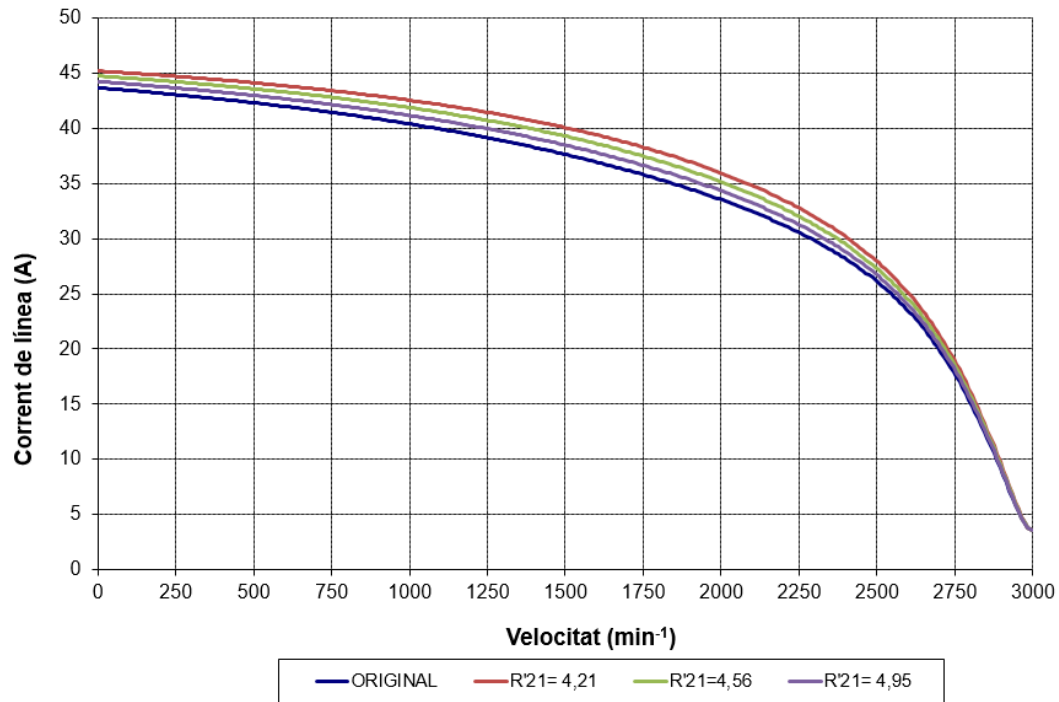


Figura 98: Corbes característiques corrent-velocitat amb variacions de la resistència de la gàbia exterior del rotor en el motor de 7,5 kW.

Corbes característiques del factor de potència - índex de càrrega

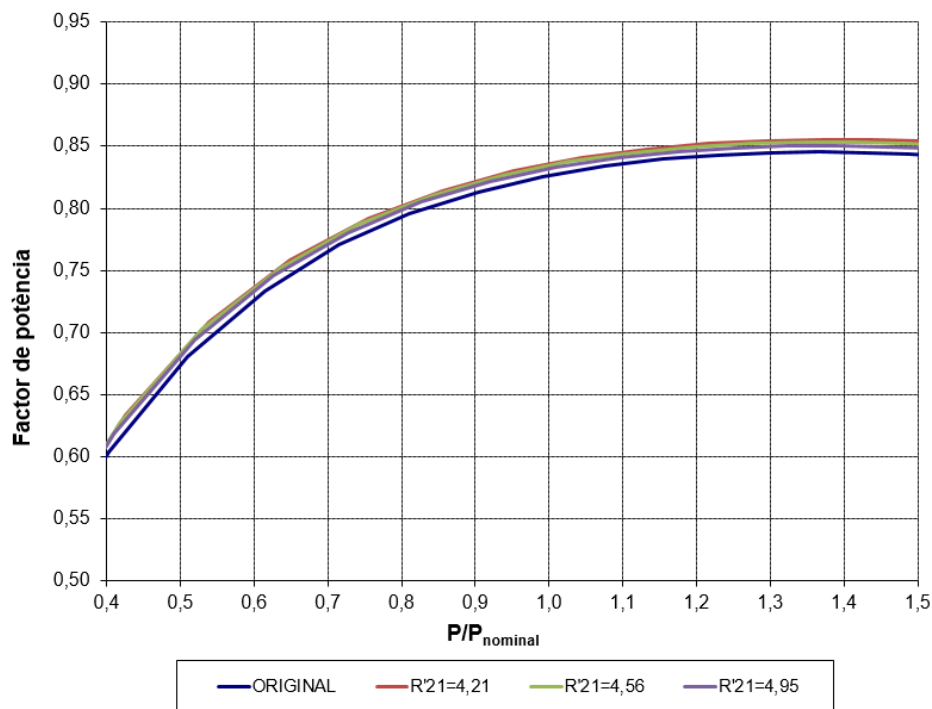


Figura 99: Corbes característiques factor de potència-índex de càrrega amb variacions de la resistència de la gàbia exterior del rotor en el motor de 7,5 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corbes característiques de rendiment - índex de càrrega

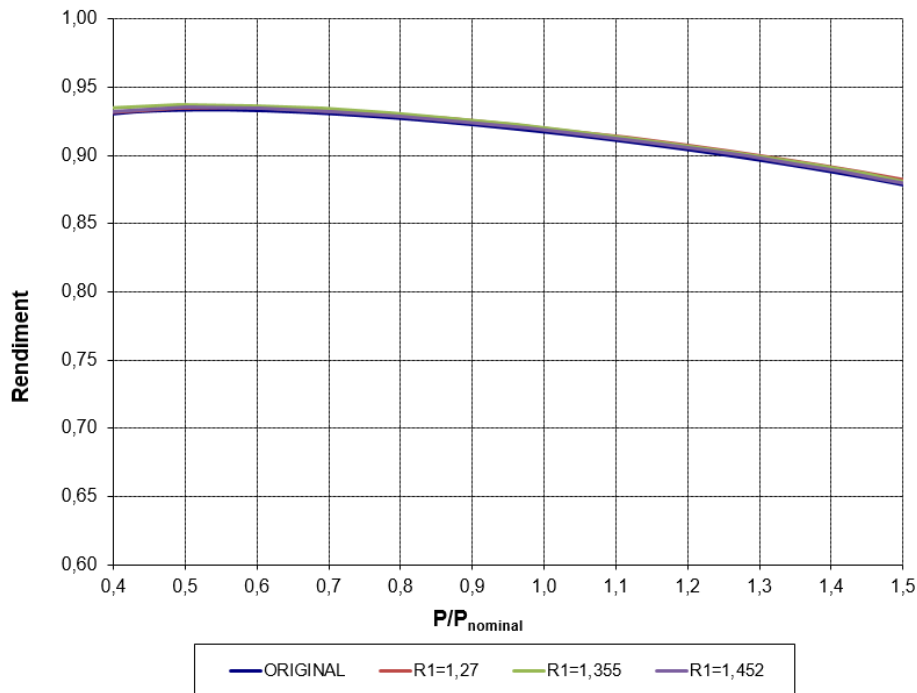


Figura 100: Corbes característiques rendiment-índex de càrrega amb variacions de la resistència de la gàbia exterior del rotor en el motor de 7,5 kW.

7.2.3. Variació de la resistència de la gàbia interior del rotor

El següent quadre, així com les gràfiques, mostren els paràmetres que es veuen modificats al variar la resistència de la gàbia interior del rotor (R'_{22}), amb els seus nous valors recalculats segons les equacions corresponents al model d'esquema equivalent mostrat a l'apartat 5.2.3 i mantenint les hipòtesis dels apartats 6.1, 6.3 i 6.5.

Variacions en els paràmetres nominals

	R'_{22}	S ran. Rotor	Modif. ranura	I línia	Potència	Velocitat	Parell	cos fi	Rendiment
	Ω	mm ²	-	A	W	rpm	Nm	-	-
Original	2,12	88,35	-	8,633	7483,73	2904	24,61	0,8266	0,9174
1era variació	1,93	96,80	sí	8,745	7570,09	2909	24,85	0,8246	0,9183
2na variació	1,77	105,65	sí	8,9	7626,33	2913,6	24,99	0,8157	0,9189
3era variació	1,63	114,87	sí	9,065	7662,13	2918	25,07	0,8043	0,9193

Taula 24: Variacions en els paràmetres nominals del motor de 7,5 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Variacions dels ratís d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals.

	I_{arranc} / I_n	M_{arranc} / M_n	M_{max} / M_n
Original	5,0567	1,6057	2,275
1era variació	4,99	1,5696	2,1916
2na variació	4,9072	1,5411	2,1209
3era variació	4,8234	1,5182	2,0595

Taula 25: Variacions en els ratís d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals del motor de 7,5 kW.

Variacions de les pèrdues joule al rotor i suma de pèrdues.

	P_{j2} W	$P_{j1}+P_{j2}+P_{fe}$ W	P_{j2} %
Original	247,39	673,79	36,71
1era variació	236,81	673,95	35,14
2na variació	226,15	673,74	33,59
3era variació	215,31	673,62	32,01

Taula 26: Variacions de les pèrdues joule a l'estator del motor de 7,5 kW.

Corbes característiques parell - velocitat

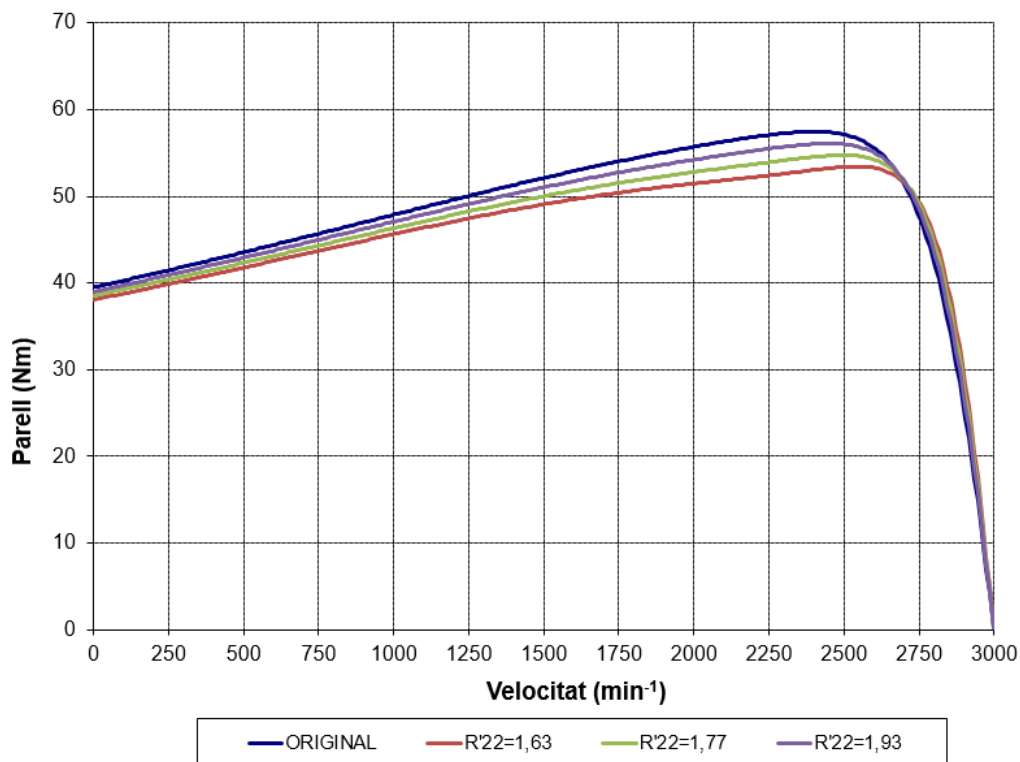


Figura 101: Corbes característiques parell-velocitat amb variacions de la resistència de la gàbia interior del rotor en el motor de 7,5 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.
Marcel Martínez Arco

Corbes característiques corrent - velocitat

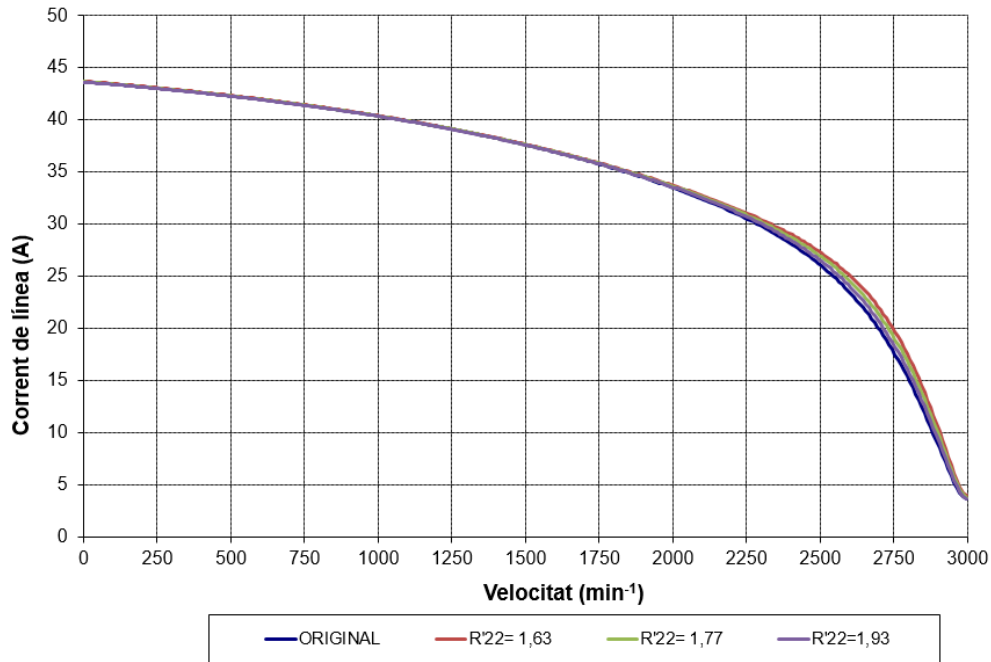


Figura 102: Corbes característiques corrent-velocitat amb variacions de la resistència de la gàbia interior del rotor en el motor de 7,5 kW.

Corbes característiques del factor de potència - índex de càrrega

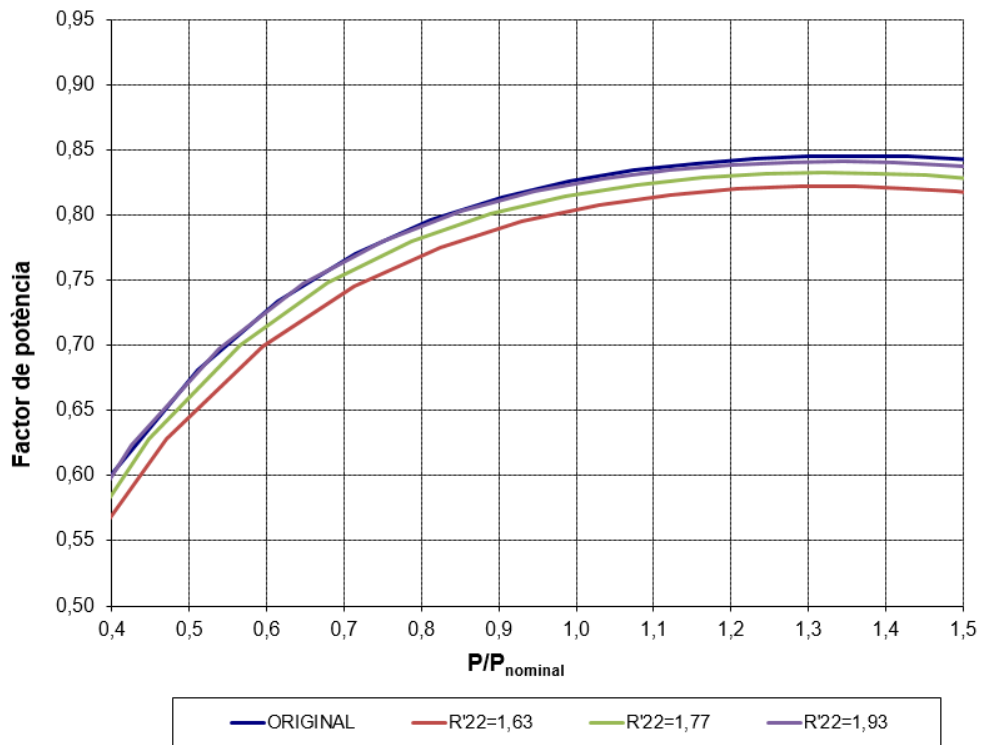


Figura 103: Corbes característiques factor de potència-índex de càrrega amb variacions de la resistència de la gàbia interior del rotor en el motor de 7,5 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corbes característiques de rendiment - índex de càrrega

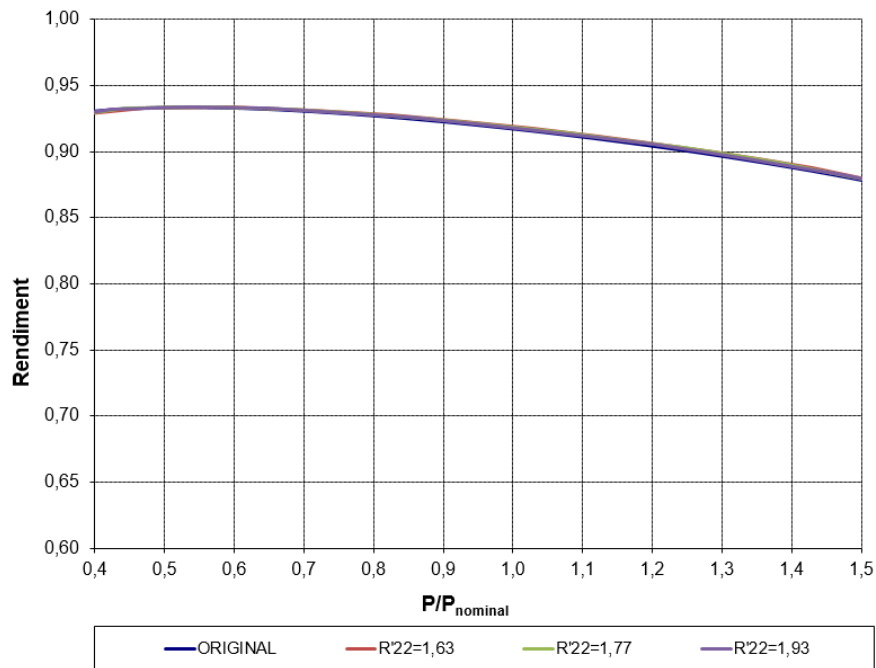


Figura 104: Corbes característiques rendiment-índex de càrrega amb variacions de la resistència de la gàbia interior del rotor en el motor de 7,5 kW.

7.2.4. Variació del tipus de xapa magnètica

El següent quadre, així com les gràfiques, mostren els paràmetres que es veuen modificats al variar la xapa magnètica que constitueix el motor, amb els seus nous valors recalculats segons les equacions corresponents al model d'esquema equivalent mostrat a l'apartat 5.2.3 i mantenint les hipòtesis dels apartats 6.1, 6.4 i 6.5.

Variacions en els paràmetres nominals

	Perdues esp.	Tipus	Modif. ranura	I línia	Potència	Velocitat	Parell	cos fi	Rendiment
	W/kg	xapa	ranura	A	W	rpm	Nm	-	-
Original	2	M-45		8,633	7483,73	2904	24,61	0,8266	0,9174
1era variació	1,5	M-36	no	8,75	7637,96	2901,7	25,136	0,8309	0,919
2na variació	1,35	M-27	no	8,813	7651,96	2901,3	25,18	0,8263	0,9192
3era variació	1	M-15	no	8,923	7741,52	2899,8	25,49	0,825	0,92

Taula 27: Variacions en els paràmetres nominals del motor de 7,5 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Variacions dels ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals

	I_{arranc} / I_n	M_{arranc} / M_n	M_{max} / M_n
	-	-	-
Original	5,0567	1,6057	2,275
1era variació	4,9867	1,5731	2,2291
2na variació	4,9543	1,5685	2,2223
3era variació	4,8948	1,5489	2,1945

Taula 28: Variacions en els ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals del motor de 7,5 kW.

Variacions de les pèrdues al ferro i suma de pèrdues

	P_{fe} W	$P_{j1}+P_{j2}+P_{fe}$ W	P_{fe} %
Original	82,07	673,79	12,18
1era variació	60,63	673,17	9,01
2na variació	53,8	673,13	7,99
3era variació	37,96	673,51	5,63

Taula 29: Variacions de les pèrdues joule a l'estator del motor de 7,5 kW.

Corbes característiques parell - velocitat

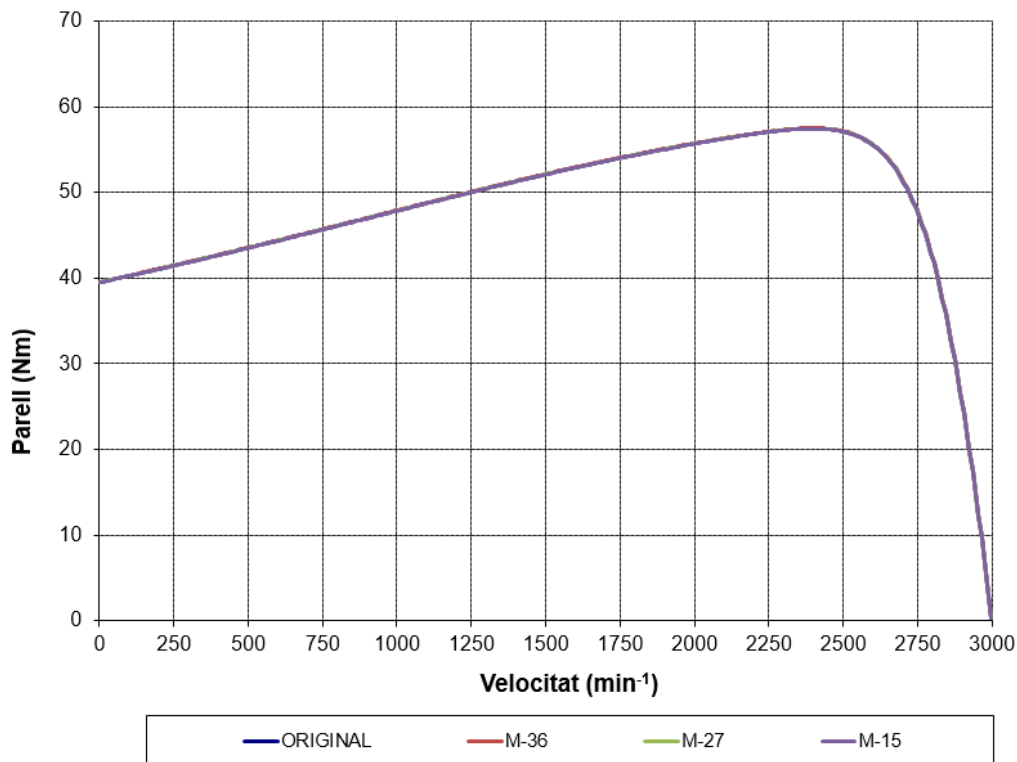


Figura 105: Corbes característiques parell-velocitat amb variacions del tipus de xapa magnètica en el motor de 7,5 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corbes característiques corrent - velocitat

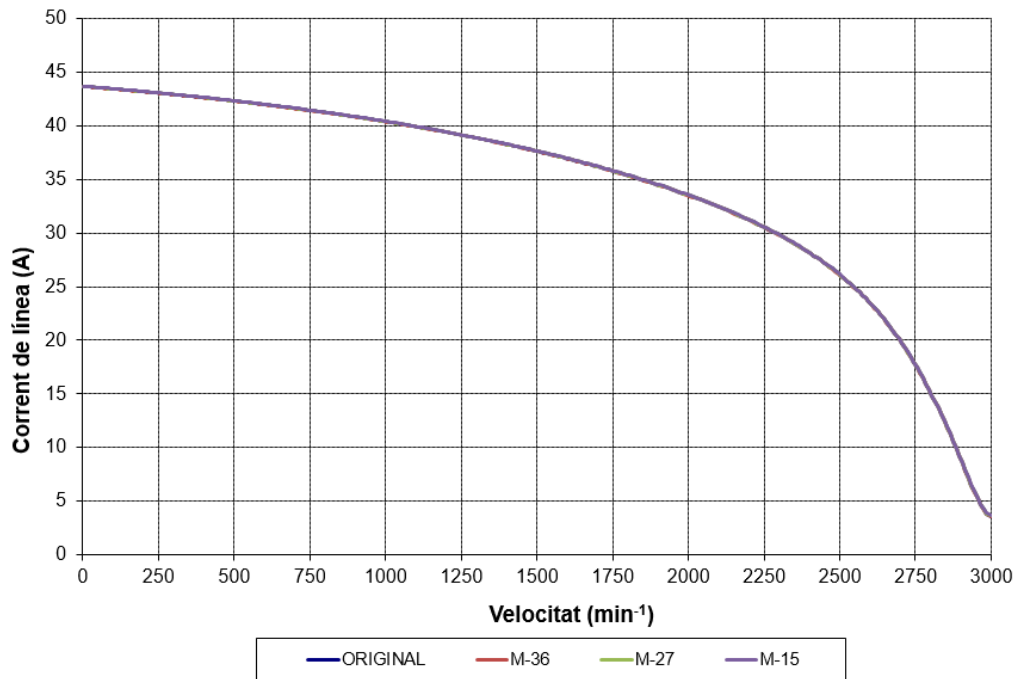


Figura 106: Corbes característiques corrent-velocitat amb variacions del tipus de xapa magnètica en el motor de 7,5 kW.

Corbes característiques del factor de potència - índex de càrrega

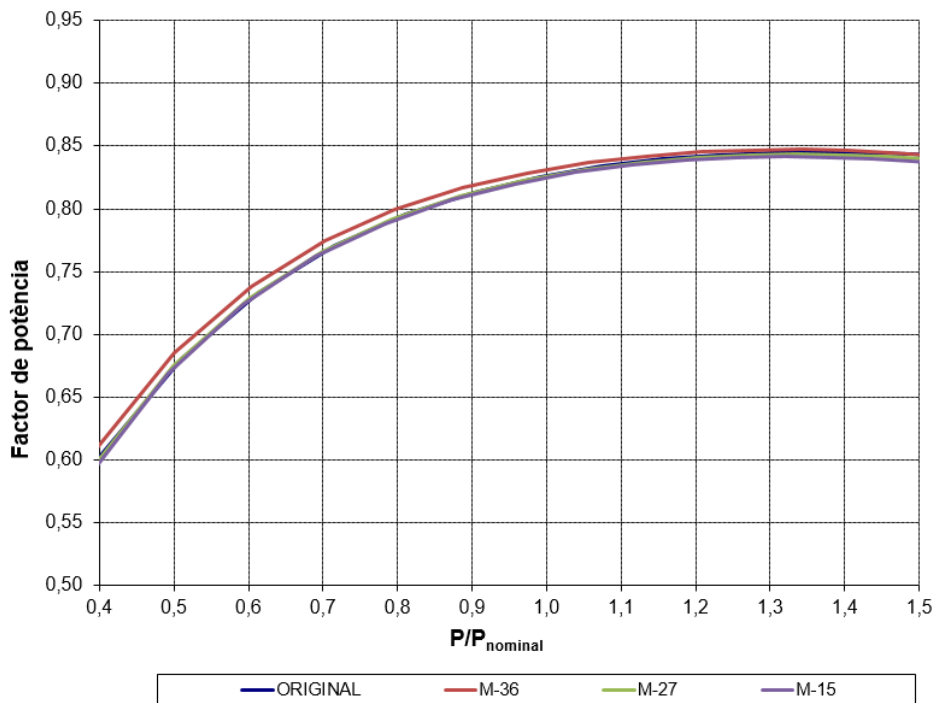


Figura 107: Corbes característiques factor de potència-índex de càrrega amb variacions del tipus de xapa magnètica en el motor de 7,5 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corbes característiques de rendiment - índex de càrrega

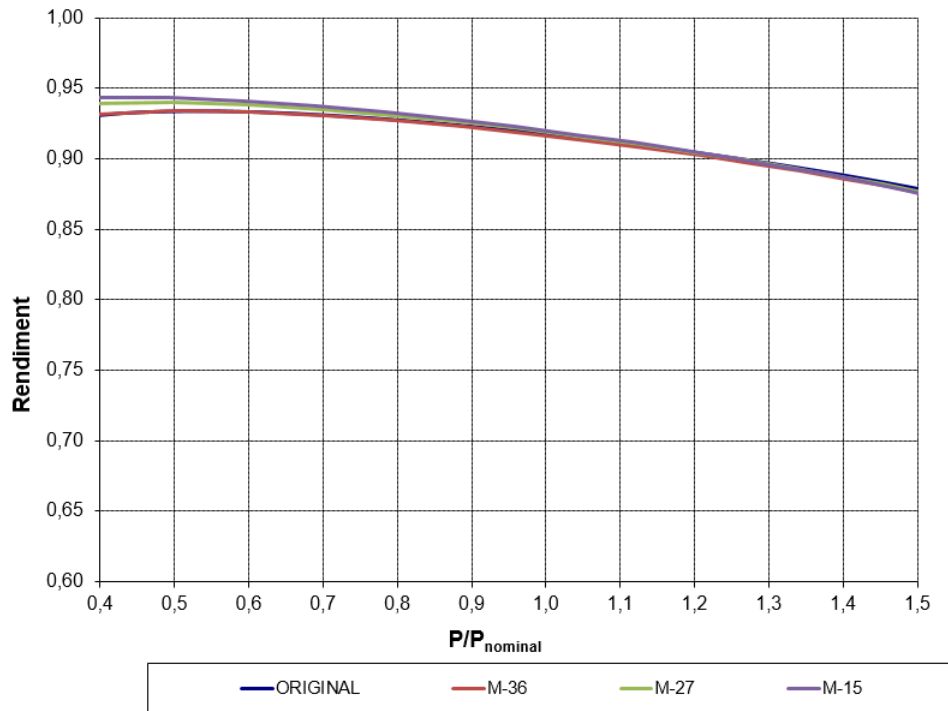


Figura 108: Corbes característiques rendiment-índex de càrrega amb variacions del tipus de xapa magnètica en el motor de 7,5 kW.

7.3 MOTOR DE 1020 kW

7.3.1. Variació de la resistència de l'estator

El següent quadre, així com les gràfiques, mostren els paràmetres que es veuen modificats al variar la resistència d'estator (R_1), amb els seus nous valors recalculats segons les equacions corresponents al model d'esquema equivalent mostrat a l'apartat 5.1.3 i mantenint les hipòtesis dels apartats 6.1, 6.2 i 6.5.

Variacions en els paràmetres nominals

	R_1	Diam. Cond.	Modif. ranura	I línia	Potència	Velocitat	Parell	cos ϕ	Rendiment
	Ω	mm	ranura	A	W	rpm	Nm	-	-
Original	0,0445	8,5		305,8	998917	2587	3687,2	0,8927	0,9688
1era variació	0,0424	8,7	no	310,1	1013053	2586,6	3740	0,8925	0,9692
2na variació	0,0406	8,96	sí (*)	305,1	1039300	2586,6	3836,8	0,9299	0,9701
3era variació	0,0386	9,13	sí (**)	306,8	1045372	2586,5	3859,5	0,9298	0,9703

Taula 30: Variacions en els paràmetres nominals del motor de 1020 kW.

(*) La forma de la ranura és la mateixa, s'ha ampliat la seva secció fins a 568,75 mm². Fent

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

ús de l'equació 15, el factor d'ocupació de ranura és de 0,88.

(**) La forma de la ranura és la mateixa, s'ha ampliat la seva secció fins a 612,71 mm². Fent ús de l'equació 15, el factor d'ocupació de ranura és de 0,85.

Variacions dels ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals

	I_{arranc} / I_n	M_{arranc} / M_n	M_{max} / M_n
Original	-	-	-
1era variació	4,0247	0,1815	2,1337
2na variació	4,0643	0,179	2,1078
3era variació	4,1114	0,1768	2,0984
3era variació	4,0852	0,1758	2,0902

Taula 31: Variacions en els ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals del motor de 1020 kW.

Variacions de les pèrdues joule a l'estator i suma de pèrdues

	P_{j1}	$P_{j1}+P_{j2}+P_{fe}$	P_{j1}
	W	W	%
Original	12490,2	32096	38,91
1era variació	12233,79	32133	38,07
2na variació	11337,96	32050	35,37
3era variació	10904	31981	34,09

Taula 33: Variacions de les pèrdues joule a l'estator del motor de 1020 kW.

Corbes característiques parell - velocitat

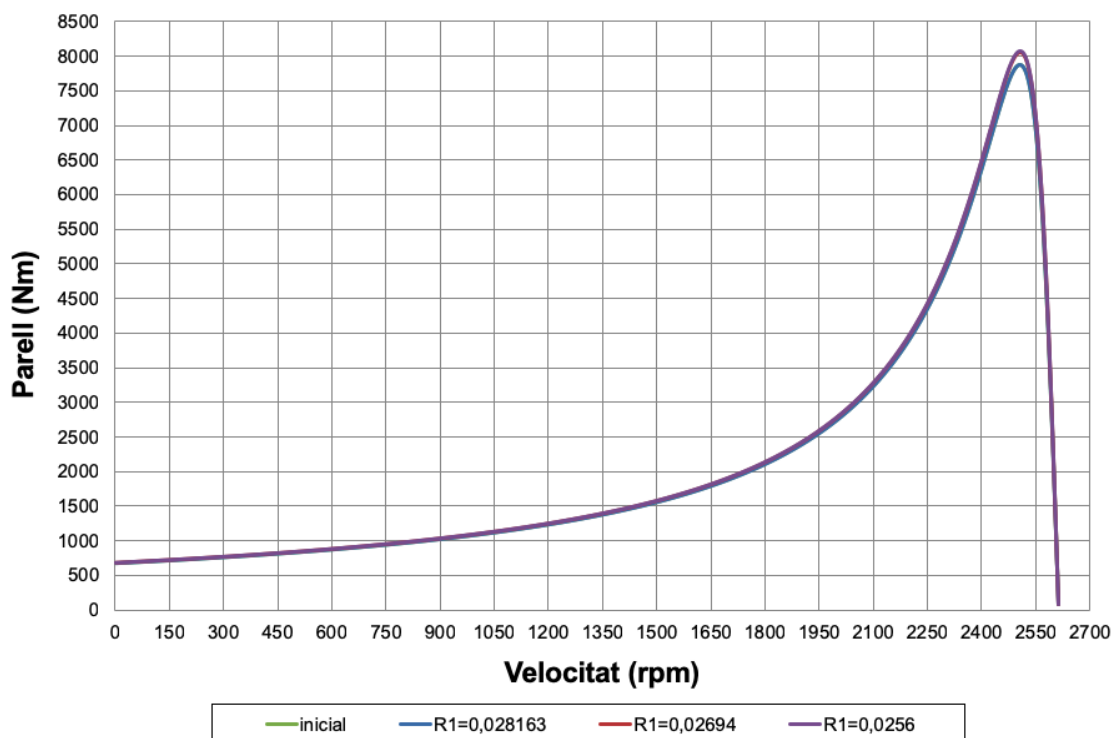


Figura 109: Corbes característiques parell-velocitat amb variacions de la resistència de l'estator en el motor de 1020 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corbes característiques corrent - velocitat

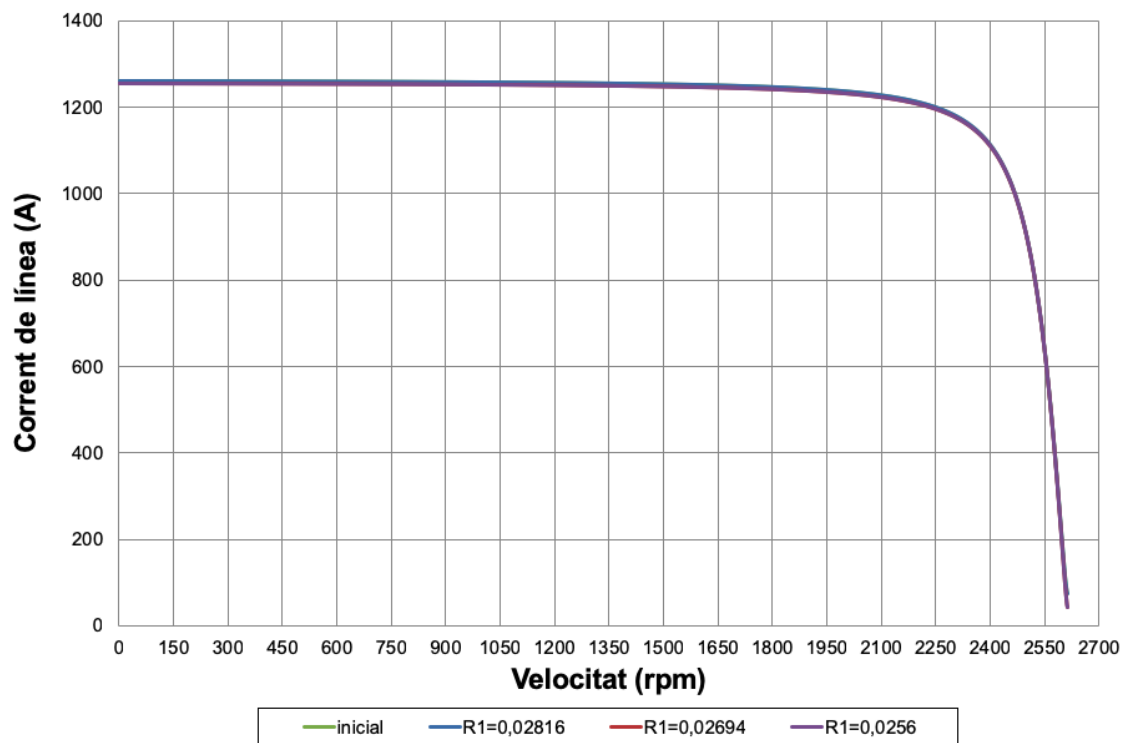


Figura 110: Corbes característiques corrent-velocitat amb variacions de la resistència de l'estator en el motor de 1020 kW.

Corbes característiques del factor de potència - índex de càrrega

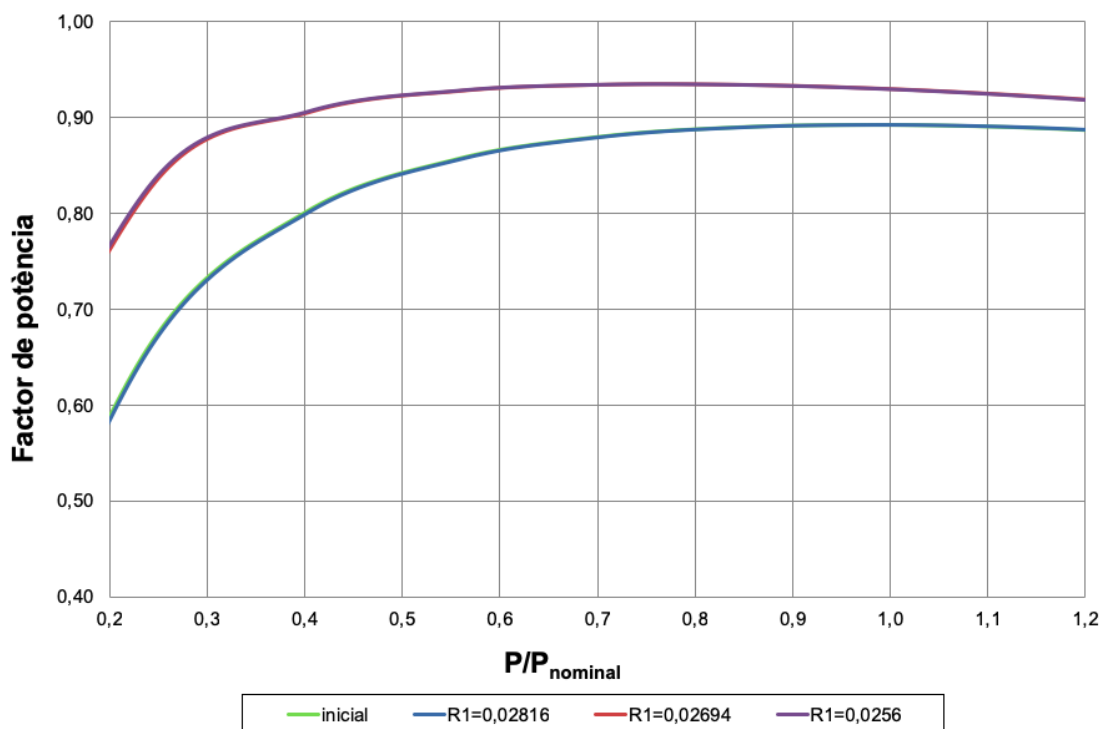


Figura 111: Corbes característiques factor de potència-índex de càrrega amb variacions de la resistència de l'estator en el motor de 1020 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corbes característiques de rendiment - índex de càrrega

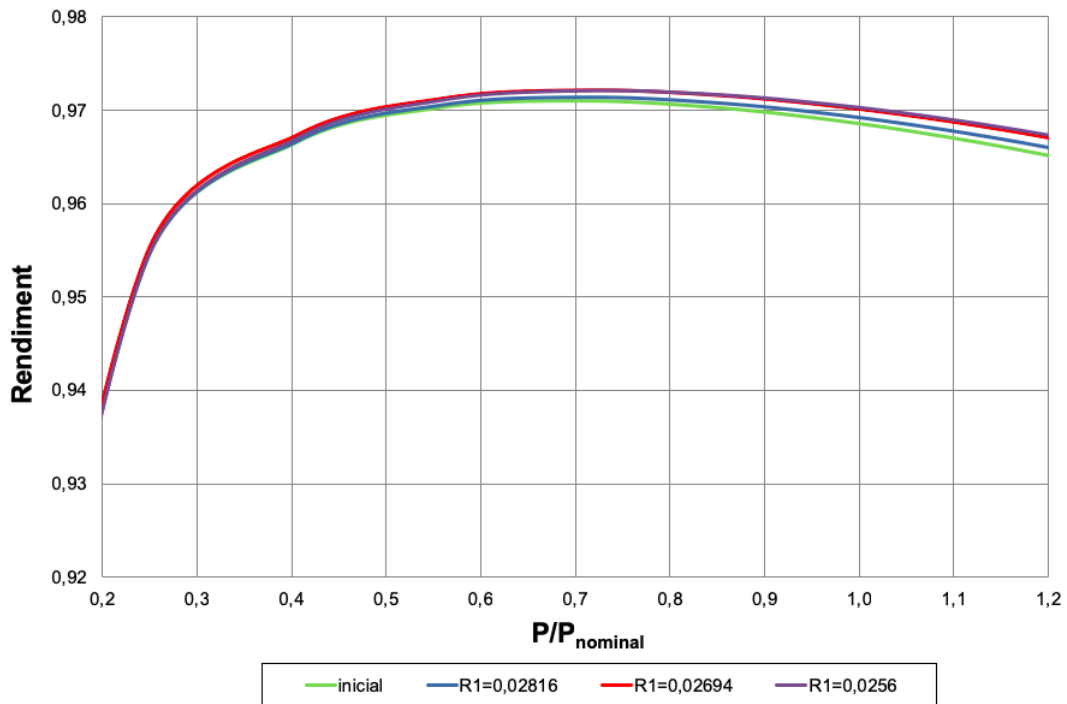


Figura 112: Corbes característiques rendiment-índex de càrrega amb variacions de la resistència de l'estator en el motor de 1020 kW.

7.3.2. Variació de la resistència del rotor

El següent quadre, així com les gràfiques, mostren els paràmetres que es veuen modificats al variar la resistència de rotor (R'_2), amb els seus nous valors recalculats segons les equacions corresponents al model d'esquema equivalent mostrat a l'apartat 5.1.3 i mantenint les hipòtesis dels apartats 6.1, 6.3 i 6.5.

Variacions en els paràmetres nominals

	$R'2$	S ranura rotor	Modif. ranura	I línia	Potència	Velocitat	Parell	cos fi	Rendiment
	Ω	mm ²	-	A	W	rpm	Nm	-	-
Original	0,0406	0,000158	-	305,87	998917	2587	3687,2	0,8927	0,9688
1era variació	0,03959	0,000162	sí	309,6	1056764	2586,8	3901,1	0,9314	0,9704
2na variació	0,03729	0,000172	sí	311,1	1061924	2588,2	3918	0,9313	0,9707
3era variació	0,0371	0,000173	sí	311,33	1062313	2588,3	3919,3	0,9311	0,9706

Taula 34: Variacions en els paràmetres nominals del motor de 1020 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Variacions dels ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals

	I_{arranc} / I_n	M_{arranc} / M_n	M_{max} / M_n
	-	-	-
Original	4,0247	0,1815	2,1337
1era variació	4,0559	0,1696	2,0587
2na variació	4,0306	0,1591	2,0498
3era variació	4,0308	0,1583	2,0489

Taula 35: Variacions en els ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals del motor de 1020 kW.

Variacions de les pèrdues joule al rotor i suma de pèrdues

	P_{j2} W	$P_{j1}+P_{j2}+P_{fe}$ W	P_{j2} %
Original	10039,37	32096	31,27
1era variació	10703,27	32172	33,26
2na variació	10175	32064	31,72
3era variació	10137	32175	31,5

Taula 36: Variacions de les pèrdues joule a l'estator del motor de 1020 kW.

Corbes característiques parell - velocitat

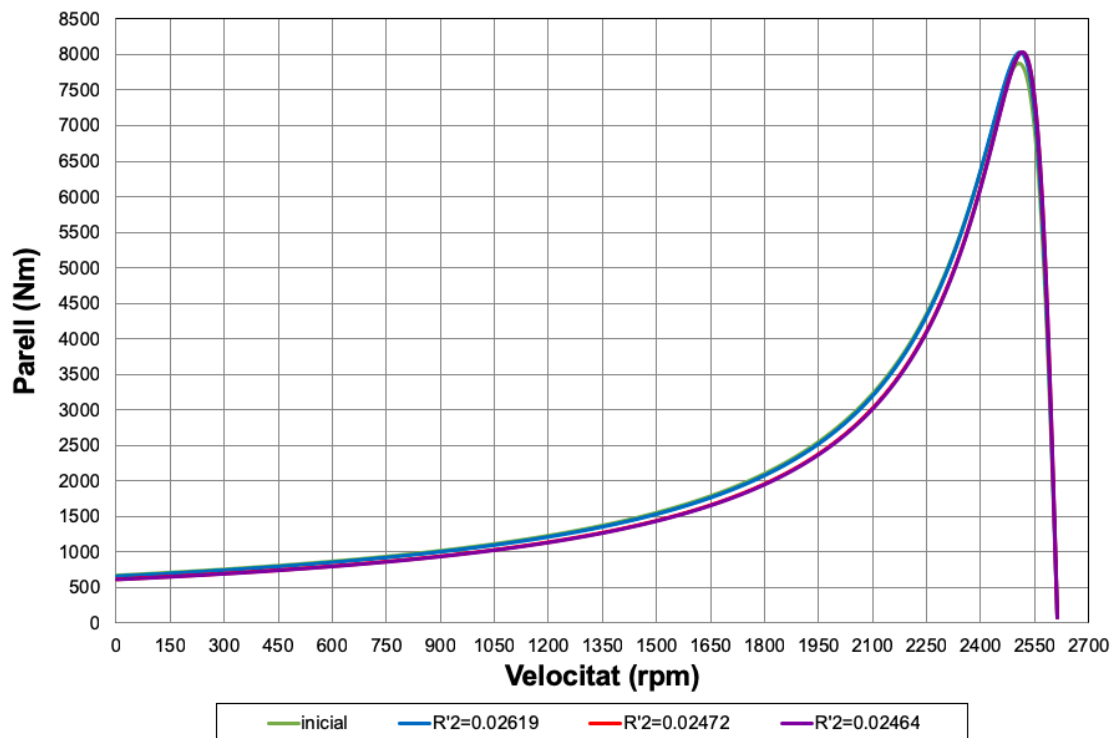


Figura 113: Corbes característiques parell-velocitat amb variacions de la resistència del rotor en el motor de 1020 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corbes característiques corrent - velocitat

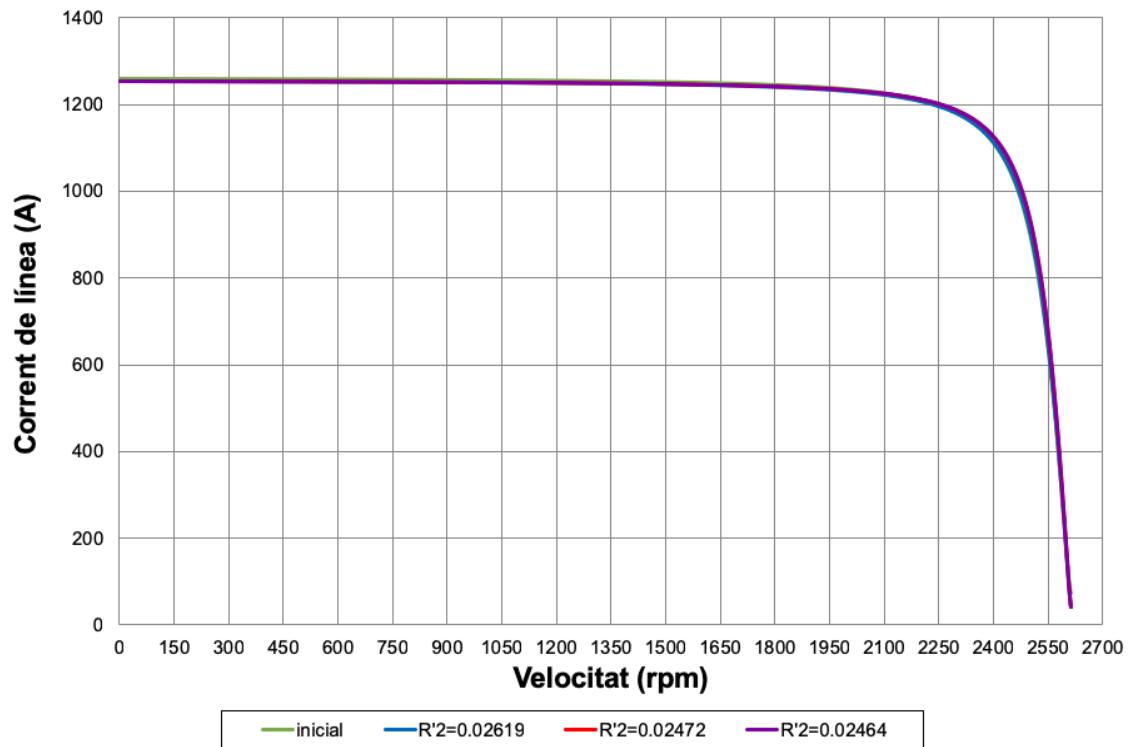


Figura 114: Corbes característiques corrent-velocitat amb variacions de la resistència del rotor en el motor de 1020 kW.

Corbes característiques del factor de potència - índex de càrrega

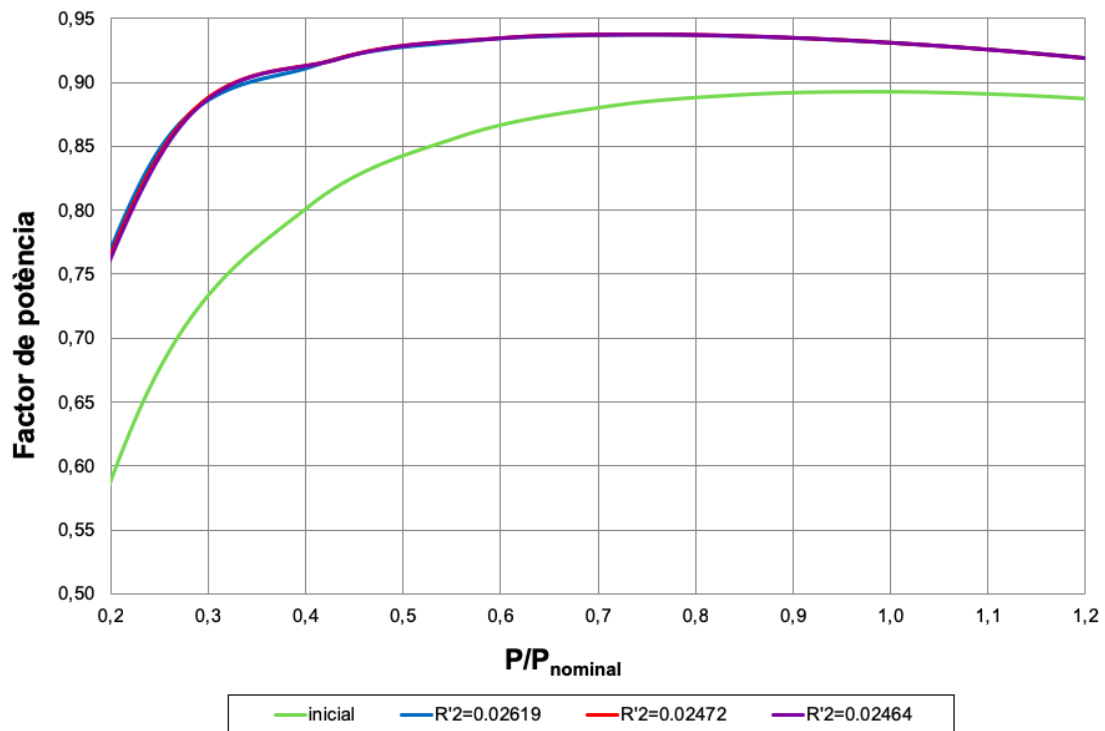


Figura 115: Corbes característiques factor de potència-índex de càrrega amb variacions de la resistència del rotor en el motor de 1020 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corbes característiques de rendiment - índex de càrrega

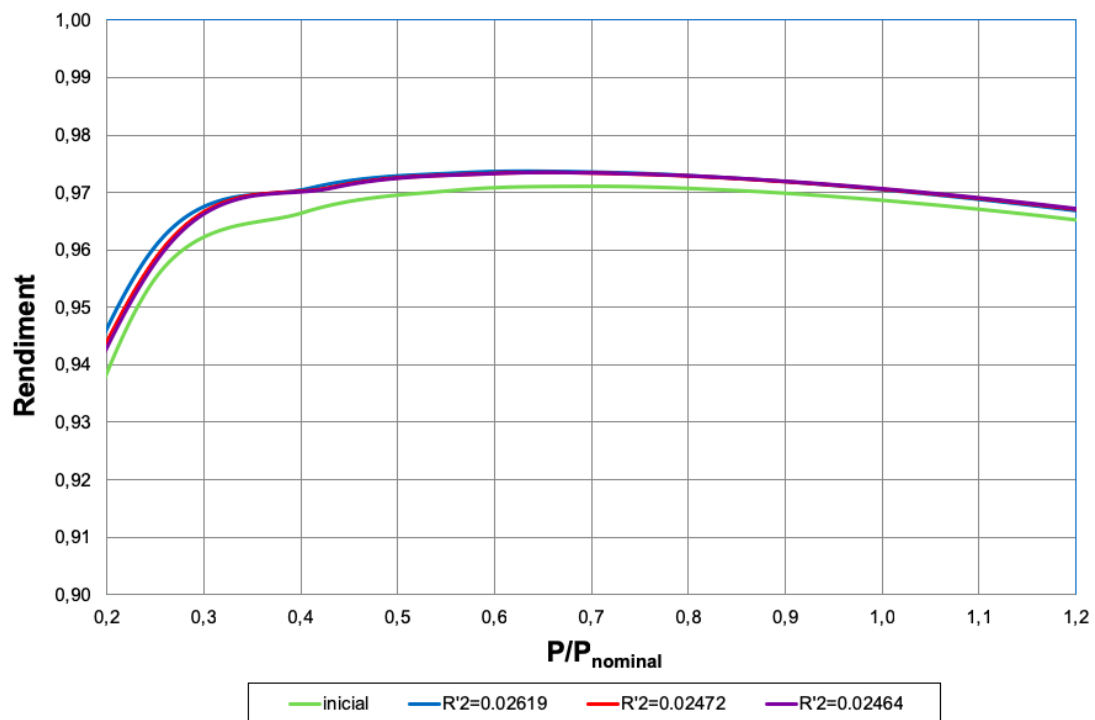


Figura 116: Corbes característiques rendiment-índex de càrrega amb variacions de la resistència del rotor en el motor de 1020 kW.

7.3.3. Variació del tipus de xapa magnètica

El següent quadre, així com les gràfiques, mostren els paràmetres que es veuen modificats al variar la xapa magnètica que constitueix el motor, amb els seus nous valors recalculats segons les equacions corresponents al model d'esquema equivalent mostrat a l'apartat 5.1.3 i mantenint les hipòtesis dels apartats 6.1, 6.4 i 6.5.

Variacions en els paràmetres nominals

	Perdues esp.	Tipus xapa	Modif. ranura	I línia A	Potència W	Velocitat rpm	Parell Nm	cos fi	Rendiment
1era variació	1,7	M-43		268,42	870820	2590,75	3209,8	0,8908	0,9645
2na variació	1,35	M-27	no	288,96	941733	2588,7	3473,1	0,8924	0,9671
Original	1,1	M-19	no	305,87	998917	2587	3687,3	0,8927	0,9689
3era variació	1	M-15	no	314,75	1028581	2586,1	3798,1	0,8925	0,9697

Taula 37: Variacions en els paràmetres nominals del motor de 1020 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Variacions ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals

	I_{arranc} / I_n	M_{arranc} / M_n	M_{max} / M_n
	-	-	-
1era variació	4,7	0,2085	2,4497
2na variació	4,4357	0,1927	2,2642
Original	4,0247	0,1815	2,1337
3era variació	4,0505	0,1763	2,0716

Taula 38: Variacions en els ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals del motor de 1020 kW.

Variacions de les pèrdues al ferro i suma de pèrdues

	P_{fe} W	$P_{j1+P_{j2}+P_{fe}}$ W	P_{fe} %
1era variació	14956	32054	46,65
2na variació	12038	32084	37,58
Original	9566	32096	29,8
3era variació	8190,8	32115	25,5

Taula 39: Variacions de les pèrdues joule a l'estator del motor de 1020 kW.

Corbes característiques parell - velocitat

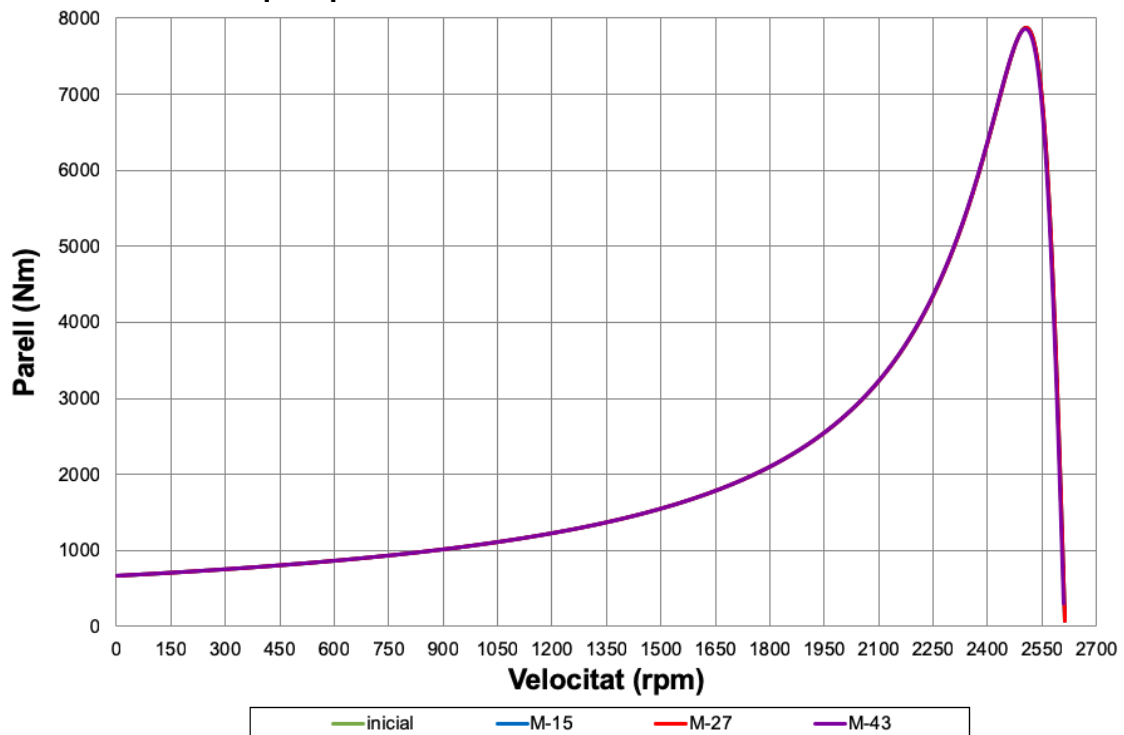


Figura 117: Corbes característiques parell-velocitat amb variacions del tipus de xapa magnètica en el motor de 1020 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corbes característiques corrent - velocitat

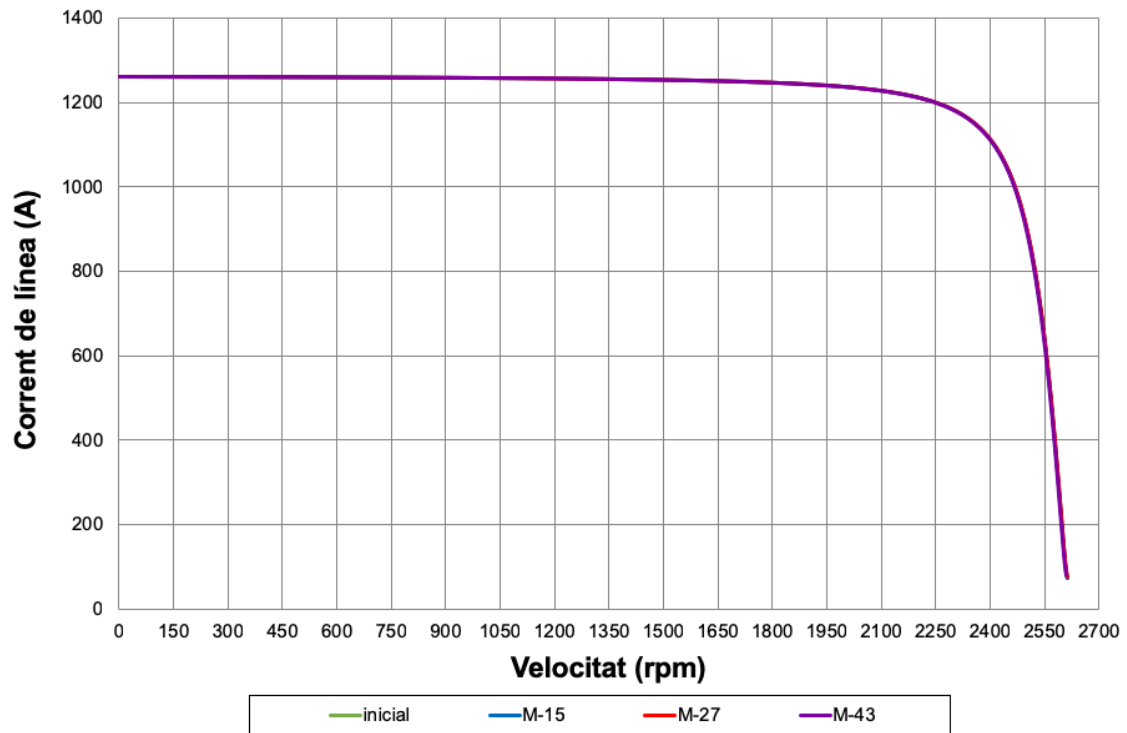


Figura 118: Corbes característiques corrent-velocitat amb variacions del tipus de xapa magnètica en el motor de 1020 kW.

Corbes característiques del factor de potència - índex de càrrega

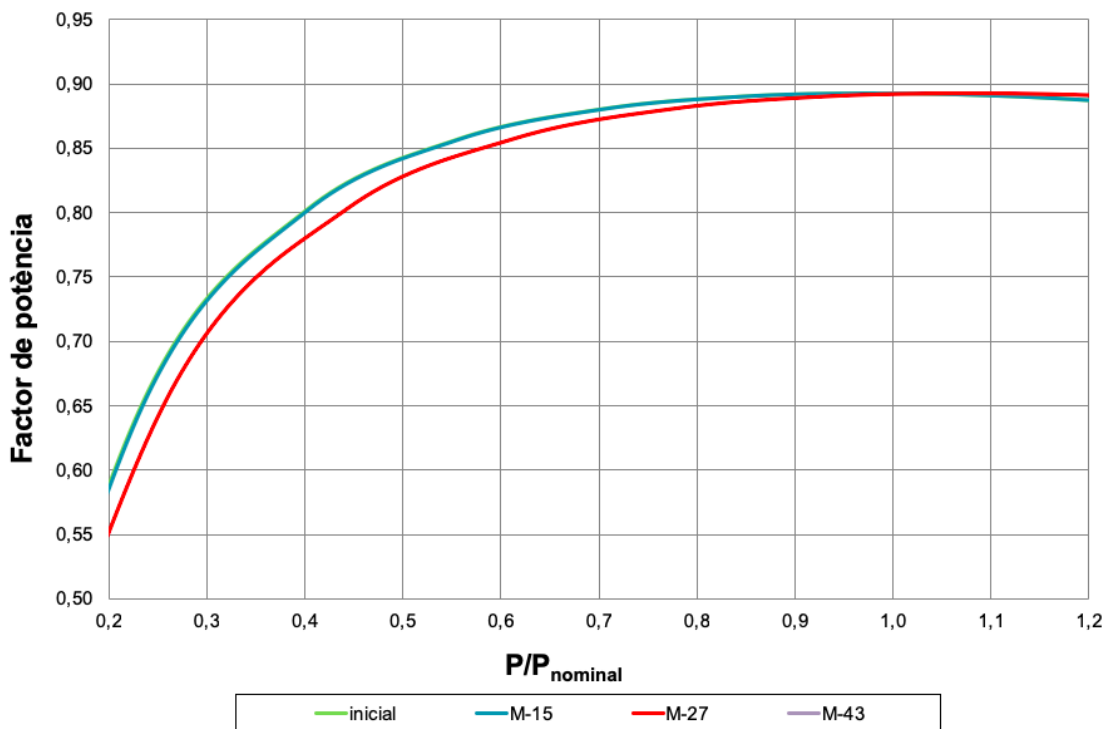


Figura 119: Corbes característiques factor de potència-índex de càrrega amb variacions del tipus de xapa magnètica en el motor de 1020 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Corbes característiques de rendiment - índex de càrrega

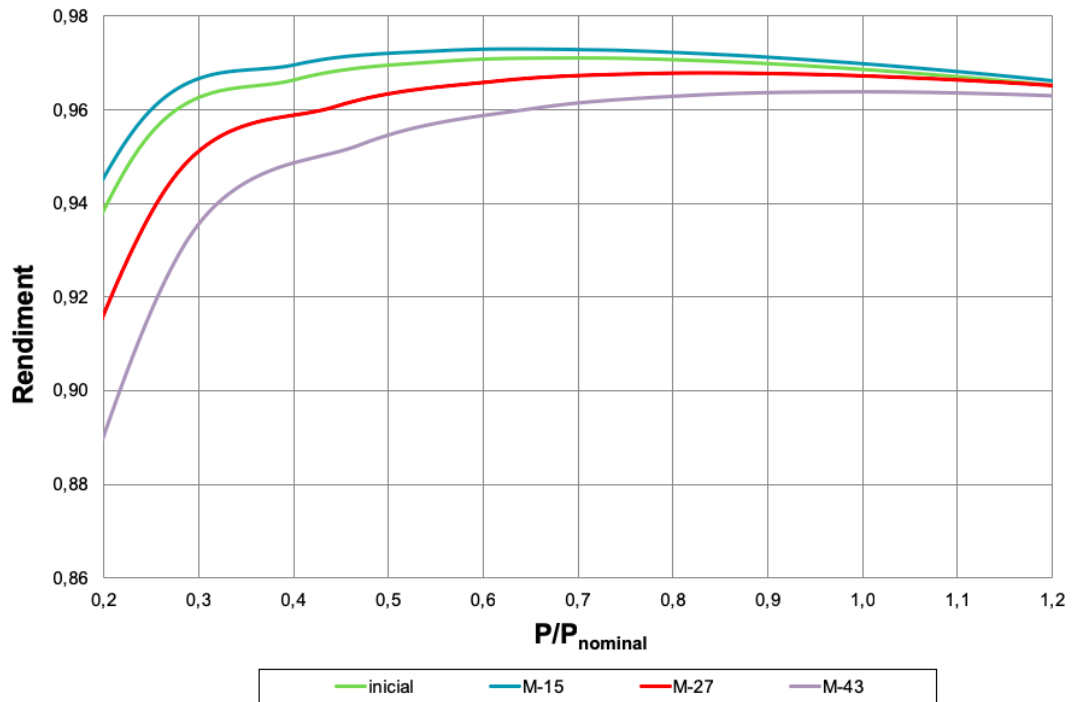


Figura 120: Corbes característiques rendiment-índex de càrrega amb variacions del tipus de xapa magnètica en el motor de 1020 kW.

8. ANÀLISI DELS RESULTATS OBTINGUTS

En aquest apartat veurem les variacions dels paràmetres calculats en el capítol 7 de forma relativa. Els valors relatius s'han calculat a partir de l'equació següent, tant pel que fa al punt de funcionament nominal com als ratis d'engegada i de parell màxim (el valor base es correspon amb l'estructura inicial del motor):

$$\text{Variació relativa (\%)} = \frac{(\text{valor base} - \text{valor modificat})}{\text{valor base}} \cdot 100 \quad [26]$$

Els resultats en forma relativa permeten un anàlisi quantitatiu més acurat i objectiu, especialment en el cas de que a partir d'aquest estudi es prenguessin decisions sobre estratègies de possibles modificacions en el disseny o redisseny dels motors estudiats, amb la possibilitat de ser extensible a altres motors de característiques similars.

A partir de tots els resultats obtinguts en el capítol 7, s'obre un ventall de possibilitats en el que fa referència a possibles actuacions per millorar algun o alguns dels paràmetres de funcionament del motor. Aquesta tasca pot ser extraordinàriament extensa, per tant, com a mostra del potencial dels resultats obtinguts en aquest estudi, es fixarà únicament l'estratègia de millora del rendiment, combinant simultàniament varies accions de millora estudiades per separat en capítols anteriors. L'abast del treball realitzat aquí, a més, permet veure quins paràmetres es poden veure millorats o perjudicats de forma colateral pel fet d'establir aquesta estratègia en particular.

Un cop fixada l'estratègia de millora del rendiment, es presentaran també en aquest capítol les corbes característiques resultants fruit de la combinació de les variacions seleccionades que donen un millor rendiment en cada motor. Aquestes corbes es comparen amb les corbes inicials que presenta cada motor.

8.1. MOTOR DE 250 W

8.1.1. Variacions de la resistència de l'estator

Variacions relatives en els paràmetres nominals

	<i>R1</i>	<i>diam. cond.</i>	<i>Ranura modific.</i>	<i>I linia</i>	<i>Potència</i>	<i>Velocitat</i>	<i>Parell</i>	<i>cos fi</i>	<i>Rendiment</i>
	%	%	-	%	%	%	%	%	%
<i>Original</i>	0	0	-	0	0	0	0	0	0
<i>1era variació</i>	-21,02	12,52	no	5,67	8,70	-0,65	9,46	1,25	1,6
<i>2na variació</i>	-36,02	25,02	no	10,26	15,66	-1,16	17,06	2,07	2,78
<i>3era variació</i>	-49,01	40,05	sí	13,54	20,51	-1,45	22,33	2,38	3,67

Taula 40: Variacions relatives en els paràmetres nominals del motor de 250 W.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Variacions relatives dels ratis d'intensitat, de parell (arranc i màxim) respecte els nominals i de pèrdues joule a l'estator

	I_{arranc} / I_n	M_{arranc} / M_n	M_{max} / M_n	P_{j1}
	%	%	%	%
Original	0	0	0	0
1era variació	6,67	4,00	2,77	-11,80
2na variació	7,21	6,83	4,87	-22,22
3era variació	8,74	10,96	8,43	-34,27

Taula 41: Variacions relatives en els ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals i pèrdues joule del motor de 250 W.

8.1.2. Variacions de la resistència del rotor

Variacions relatives en els paràmetres nominals

	R^2	S ranura rotor	Modificació de ranura	$I_{línia}$	Potència	Velocitat	Parell	cos ϕ_i	Rendiment
	%	%	-	%	%	%	%	%	%
Original	0	0	-	0	0	0	0	0	0
1era variació	-5,30	5,56	sí	1,14	2,07	0,29	1,81	0,60	0,30
2na variació	-9,17	10,08	sí	1,57	2,97	0,58	2,44	0,81	0,57
3era variació	-16,82	20,22	sí	2,99	5,60	1,09	4,51	1,48	1,05

Taula 42: Variacions relatives en els paràmetres nominals del motor de 250 W.

Variacions relatives dels ratis d'intensitat, de parell (arranc i màxim) respecte els nominals i de pèrdues joule al rotor

	I_{arranc} / I_n	M_{arranc} / M_n	M_{max} / M_n	P_{j2}
	%	%	%	%
Original	0	0	0	0
1era variació	6,53	-3,16	-1,74	-1,62
2na variació	7,29	-4,92	-2,32	-4,45
3era variació	8,90	-9,54	-4,29	-8,59

Taula 43: Variacions relatives en els ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals i pèrdues joule del motor de 250 W.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

8.1.3. Variacions del tipus de xapa magnètica

Variacions relatives en els paràmetres nominals

	Perdues esp.	Tipus	Modif. ranura	I línia	Potència	Velocitat	Parell	cos fi	Rendiment
	%	xapa	ranura	%	%	%	%	%	%
Original	0	M-47		0	0	0	0	0	0
1era variació	-34,78	M-36	no	3,40	5,22	-0,58	5,87	0,89	0,87
2na variació	-47,83	M-22	no	4,48	6,44	-0,72	7,26	0,74	1,12
3era variació	-56,52	M-15	no	4,82	7,10	-0,80	8,00	0,89	1,27

Taula 44: Variacions relatives en els paràmetres nominals del motor de 250 W.

Variacions relatives dels ratis d'intensitat, de parell (arranc i màxim) respecte els nominals i de pèrdues al ferro

	Iarranc / In	Marranc / Mn	Mmax / Mn	Pfe
	%	%	%	%
Original	0	0	0	0
1era variació	1,85	-5,46	-5,44	-37,98
2na variació	0,80	-6,70	-6,68	-50,57
3era variació	0,47	-7,32	-7,30	-56,62

Taula 45: Variacions relatives en els ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals i pèrdues joule del motor de 250 W.

8.1.4. Proposta combinada per obtenir un rendiment millorat

Combinant les tres actuacions analitzades, el diàmetre del conductor de l'estator, la secció de la ranura del rotor i el tipus de xapa magnètica, que afecten especialment de forma directa als paràmetres del circuit equivalent R_1 , R'_2 , R_{fe} i X_{μ} , s'ha decidit efectuar les següents actuacions per la millora del rendiment en aquest motor:

- $R_1 = 18,17 \Omega$ (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 que el 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'engageda.

- **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

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

d'arranc del motor.

A continuació es mostren les corbes característiques amb les decisions de millora adoptades, comparades amb les corbes obtingudes prèviament a les modificacions constructives seleccionades.

Característica parell - velocitat

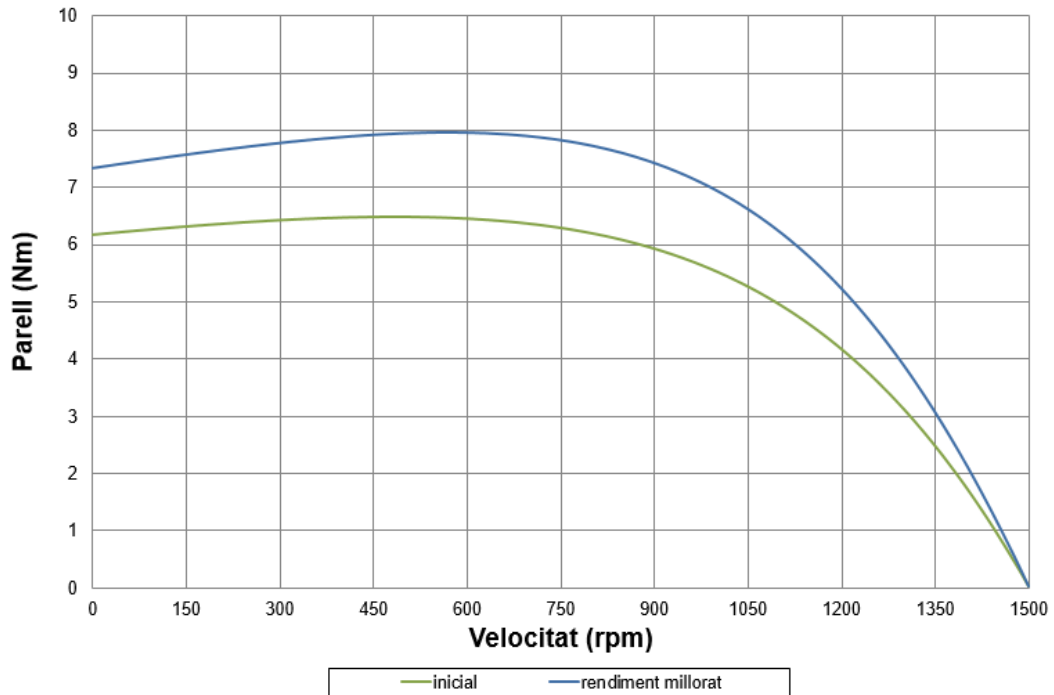


Figura 121: Característica parell-velocitat de rendiment millorat comparada amb l'inicial del motor de 250 W.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Característica corrent - velocitat

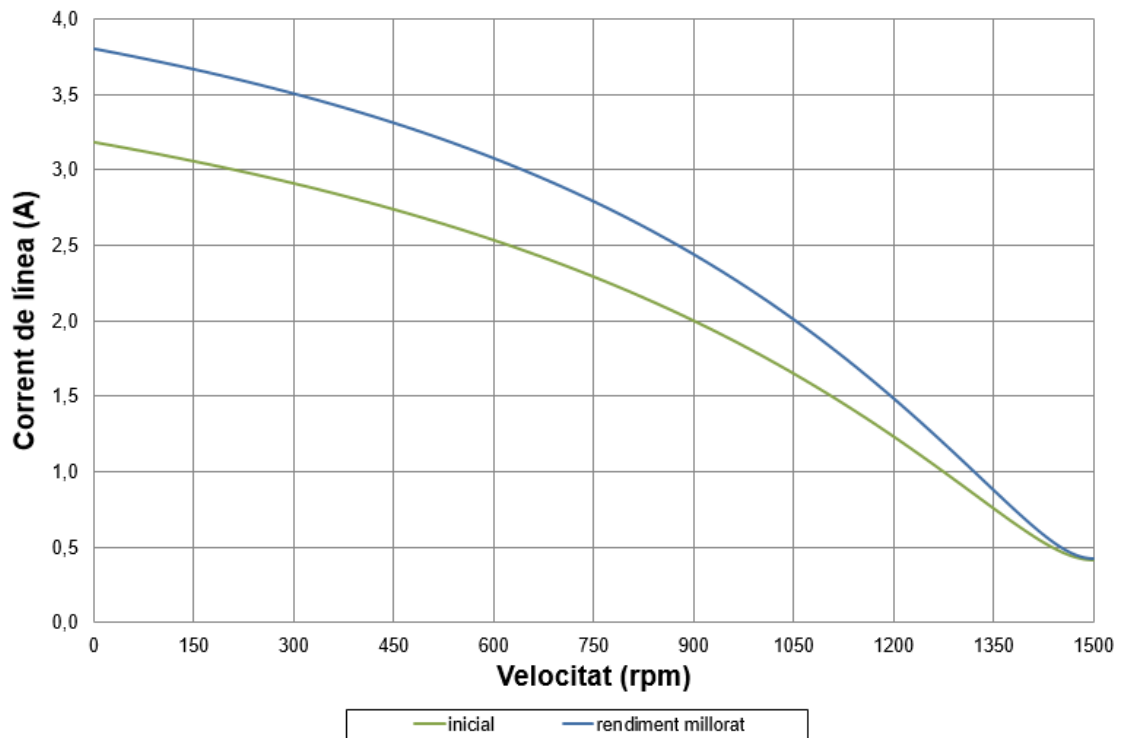


Figura 122: Característica corrent-velocitat de rendiment millorat comparada amb l'inicial del motor de 250 W.

Característica del factor de potència - índex de càrrega

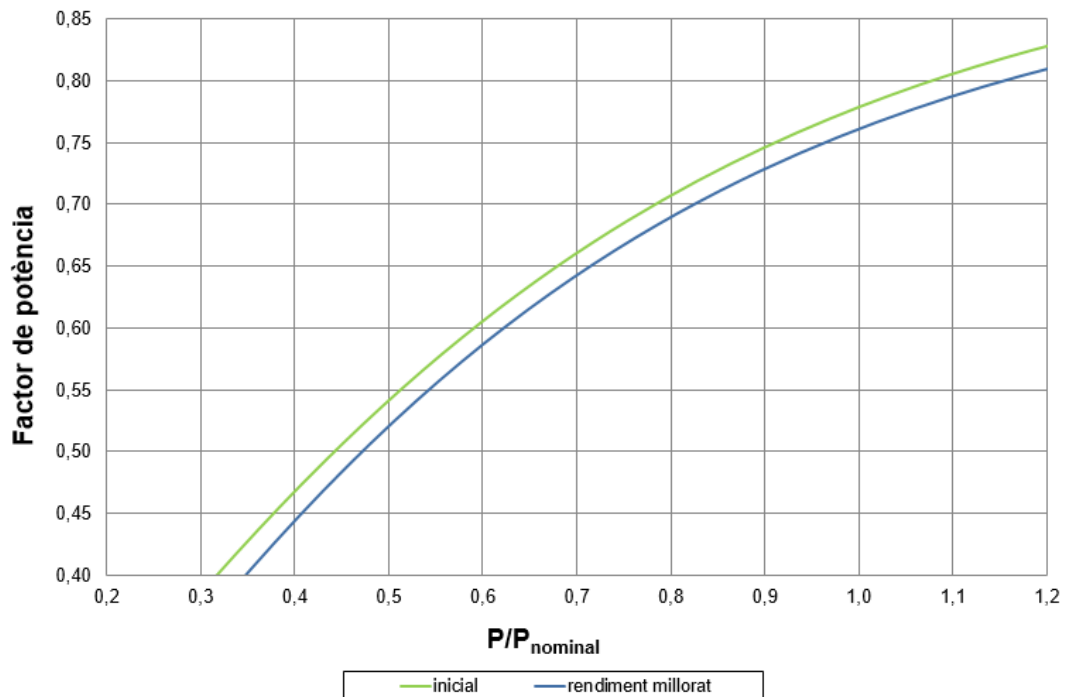


Figura 123: Característica factor de potència-índex de càrrega de rendiment millorat comparada amb l'inicial del motor de 250 W.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Característica del rendiment - índex de càrrega

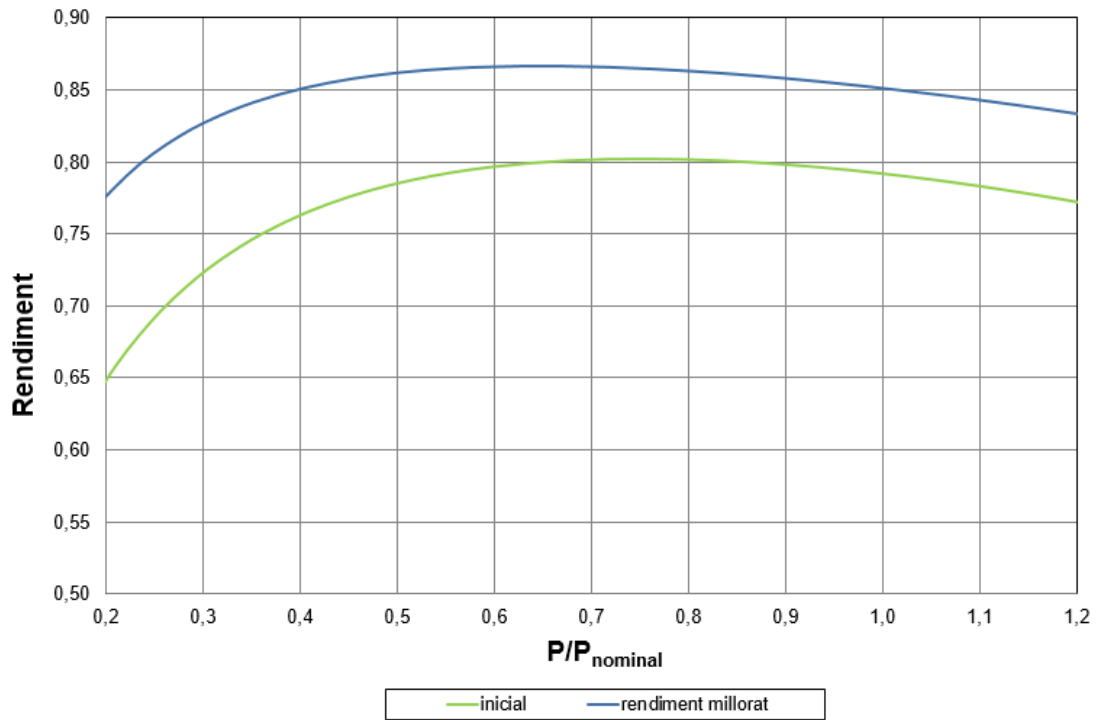


Figura 124: Característica factor de rendiment-índex de càrrega de rendiment millorat comparada amb l'inicial del motor de 250 W.

Canvi dels percentatges en la suma de pèrdues

Resulta d'interès poder veure com estan distribuïdes percentualment els diferents tipus de pèrdues en el motor. En la figura següent es mostra com s'han redistribuït després d'adoptar les modificacions indicades (*diagrama dreta*), comparades respecte la distribució inicial (*diagrama esquerra*).

Cal recordar que en aquest estudi no s'han considerat ni les pèrdues mecàniques ni les pèrdues addicionals en càrrega.

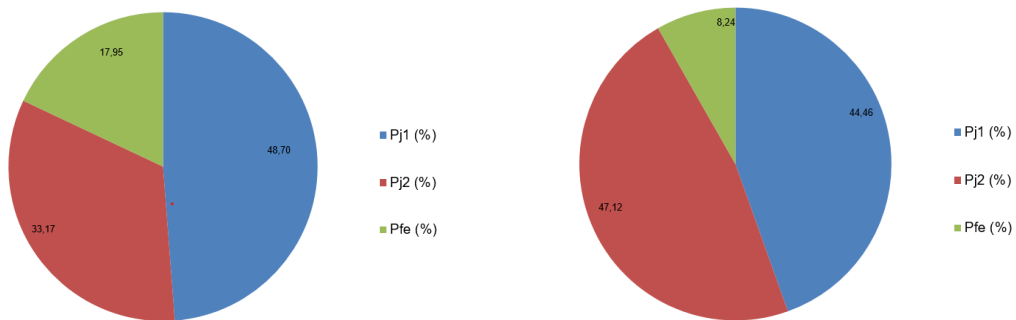


Figura 125: Suma de pèrdues en el motor original i en el motor de rendiment millorat (250 W).

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.
 Marcel Martínez Arco

8.2. MOTOR DE 7,5 kW

8.2.1. Variacions de la resistència de l'estator

Variacions relatives en els paràmetres nominals

	<i>R1</i>	<i>diam. cond.</i>	<i>Ranura modific.</i>	<i>I linia</i>	<i>Potència</i>	<i>Velocitat</i>	<i>Parell</i>	<i>cos fi</i>	<i>Rendiment</i>
	%	%	-	%	%	%	%	%	%
<i>Original</i>	0	0		0	0	0	0	0	0
<i>1era variació</i>	-5,71	2,99	no	1,51	1,79	-0,06	1,83	0,12	0,15
<i>2na variació</i>	-12,01	6,61	no	3,37	3,96	-0,13	4,09	0,25	0,32
<i>3era variació</i>	-17,53	10,12	sí	7,43	3,71	-0,15	3,86	-3,75	0,29

Taula 46: Variacions relatives en els paràmetres nominals del motor de 7,5 kW.

Variacions relatives dels ratis d'intensitat, de parell (arranc i màxim) respecte els nominals i de pèrdues joule a l'estator

	<i>Iarranc / In</i>	<i>Marranc / Mn</i>	<i>Mmax / Mn</i>	<i>Pj1</i>
	%	%	%	%
<i>Original</i>	0	0	0	0
<i>1era variació</i>	-1,07	-0,98	-0,93	-2,84
<i>2na variació</i>	-2,40	-2,21	-2,11	-5,99
<i>3era variació</i>	-5,24	-1,89	-1,85	-4,83

Taula 47: Variacions relatives en els ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals i pèrdues joule del motor de 7,5 kW.

8.2.2. Variacions de la resistència de la gàbia exterior del rotor

Variacions relatives en els paràmetres nominals

	<i>R'21</i>	<i>S ranura ext. rotor</i>	<i>Modificació de ranura</i>	<i>I linia</i>	<i>Potència</i>	<i>Velocitat</i>	<i>Parell</i>	<i>cos fi</i>	<i>Rendiment</i>
	%	%	-	%	%	%	%	%	%
<i>Original</i>	0	0		0	0	0	0	0	0
<i>1era variació</i>	-8,16	8,72	sí	-0,09	0,61	0,07	0,53	0,65	0,05
<i>2na variació</i>	-15,40	18,00	sí	0,15	1,21	0,14	1,06	0,96	0,11
<i>3era variació</i>	-21,89	27,75	sí	0,61	1,89	0,21	1,67	1,11	0,15

Taula 48: Variacions relatives en els paràmetres nominals del motor de 7,5 kW

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Variacions relatives dels ratis d'intensitat, de parell (arranc i màxim) respecte els nominals i de pèrdues joule al rotor

	<i>I</i> arranc / <i>I</i> n	<i>M</i> arranc / <i>M</i> n	<i>M</i> max / <i>M</i> n	<i>P</i> _{j2}
	%	%	%	%
<i>Original</i>	0	0	0	0
<i>1era variació</i>	1,38	-4,30	1,69	-1,67
<i>2na variació</i>	2,29	-8,64	3,20	-3,25
<i>3era variació</i>	2,85	-13,00	4,51	-4,67

Taula 49: Variacions relatives en els ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals i pèrdues joule del motor de 7,5 kW.

8.2.3. Variacions de la resistència de la gàbia interior del rotor

Variacions relatives en els paràmetres nominals

	<i>R</i> '22	S ranura int. rotor	Modifica ció de ranura	<i>I</i> línia	Potència	Velocitat	Parell	cos <i>fi</i>	Rendiment
	%	%	-	%	%	%	%	%	%
<i>Original</i>	0	0		0	0	0	0	0	0
<i>1era variació</i>	-8,96	9,57	sí	1,31	1,15	0,17	0,98	-0,24	0,10
<i>2na variació</i>	-16,50	19,58	sí	3,09	1,91	0,33	1,57	-1,32	0,16
<i>3era variació</i>	-23,11	30,02	sí	5,00	2,38	0,48	1,89	-2,70	0,21

Taula 50: Variacions relatives en els paràmetres nominals del motor de 7,5 kW

Variacions relatives dels ratis d'intensitat, de parell (arranc i màxim) respecte els nominals i de pèrdues joule al rotor

	<i>I</i> arranc / <i>I</i> n	<i>M</i> arranc / <i>M</i> n	<i>M</i> max / <i>M</i> n	<i>P</i> _{j2}
	%	%	%	%
<i>Original</i>	0	0	0	0
<i>1era variació</i>	-1,32	-2,25	-3,67	-4,28
<i>2na variació</i>	-2,96	-4,02	-6,77	-8,59
<i>3era variació</i>	-4,61	-5,45	-9,47	-12,96

Taula 51: Variacions relatives en els ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals i pèrdues joule del motor de 7,5 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

8.2.4. Variacions del tipus de xapa magnètica

Variacions relatives en els paràmetres nominals

	Perdues esp.	Tipus	Modif. ranura	I línia	Potència	Velocitat	Parell	cos fi	Rendiment
	%	xapa	ranura	%	%	%	%	%	%
Original	0	M-45		0	0	0	0	0	0
1era variació	-25,00	M-36	no	1,36	2,06	-0,08	2,14	0,52	0,17
2na variació	-32,50	M-27	no	2,09	2,25	-0,09	2,34	-0,04	0,20
3era variació	-50,00	M-15	no	3,36	3,44	-0,14	3,59	-0,19	0,28

Taula 52: Variacions relatives en els paràmetres nominals del motor de 7,5 kW

Variacions relatives dels ratis d'intensitat, de parell (arranc i màxim) respecte els nominals i de pèrdues al ferro

	Iarranc / In	Marranc / Mn	Mmax / Mn	Pfe
	%	%	%	%
Original	0	0	0	0
1era variació	-1,38	-2,03	-2,02	-26,12
2na variació	-2,03	-2,32	-2,32	-34,45
3era variació	-3,20	-3,54	-3,54	-53,75

Taula 53: Variacions relatives en els ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals i pèrdues joule del motor de 7,5 kW.

8.2.5. Proposta combinada per obtenir un rendiment millorat

Combinant les tres actuacions analitzades, diàmetre del conductor de l'estator, secció de la ranura del rotor i tipus de xapa magnètica, que afecten especialment de forma directa als paràmetres del circuit equivalent R_1 , R'_{21} , R'_{22} , R_{fe} i X_μ , s'ha decidit efectuar les actuacions següents per la millora del rendiment en aquest motor:

- $R_1 = 1,35 \Omega$ (2na variació).
- $R'_{21} = 4,21 \Omega$ (3era variació).
- $R'_{22} = 1,63 \Omega$ (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 que el coeficient d'utilització de ranura aconsella, 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'engageda.

- **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

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco
d'arranc del motor.

A continuació es mostren les corbes característiques amb les decisions de millora adoptades, comparades amb les corbes obtingudes prèviament a les modificacions constructives seleccionades.

Característica parell - velocitat

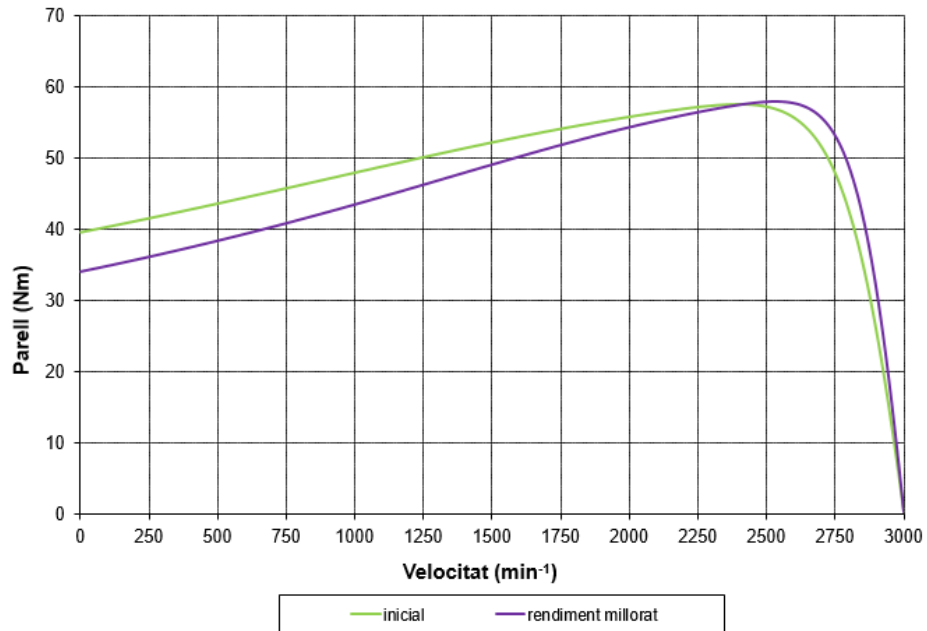


Figura 126: Característica parell-velocitat de rendiment millorat comparada amb l'inicial del motor de 7,5 kW.

Característica corrent - velocitat

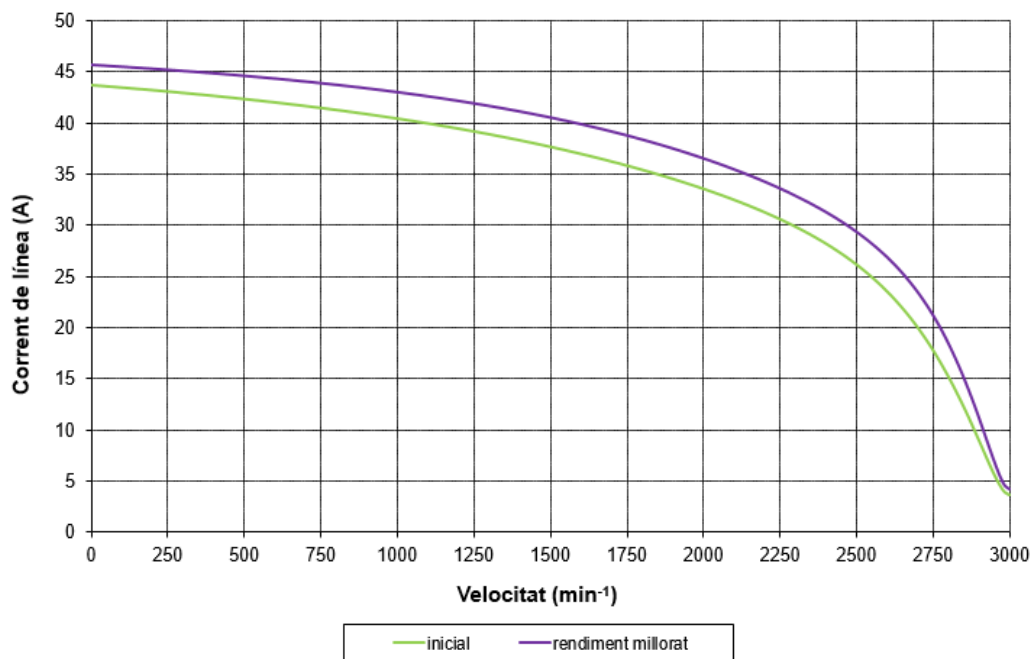


Figura 127: Característica corrent-velocitat de rendiment millorat comparada amb l'inicial del motor de 7,5 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Característica del factor de potència - índex de càrrega

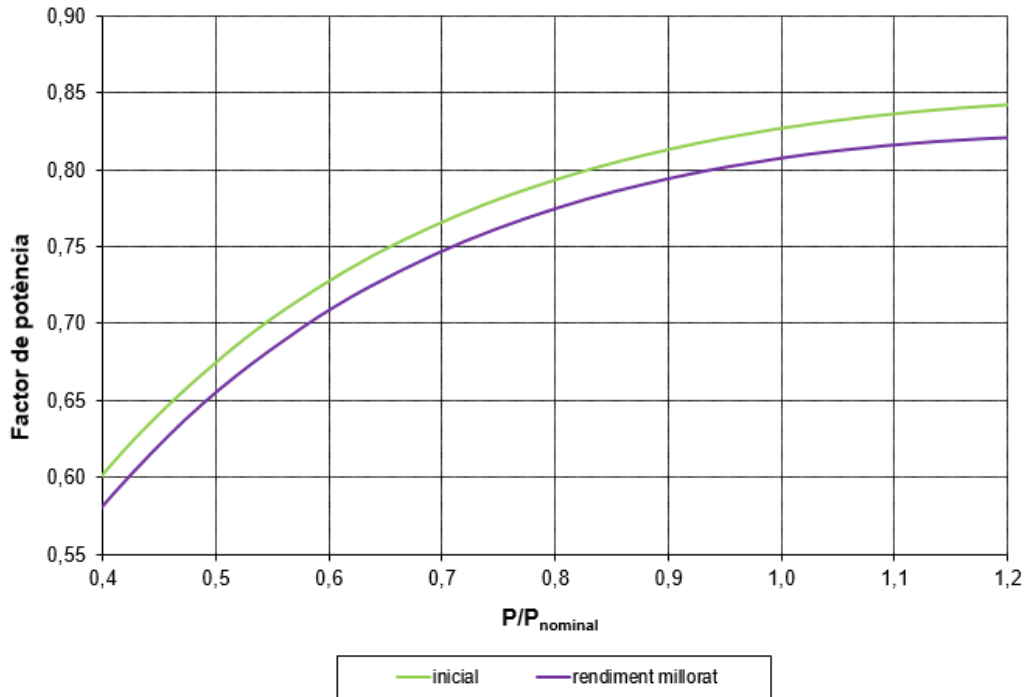


Figura 128: Característica factor de potència-índex de càrrega de rendiment millorat comparada amb l'inicial del motor de 7,5 kW.

Característica del rendiment - índex de càrrega

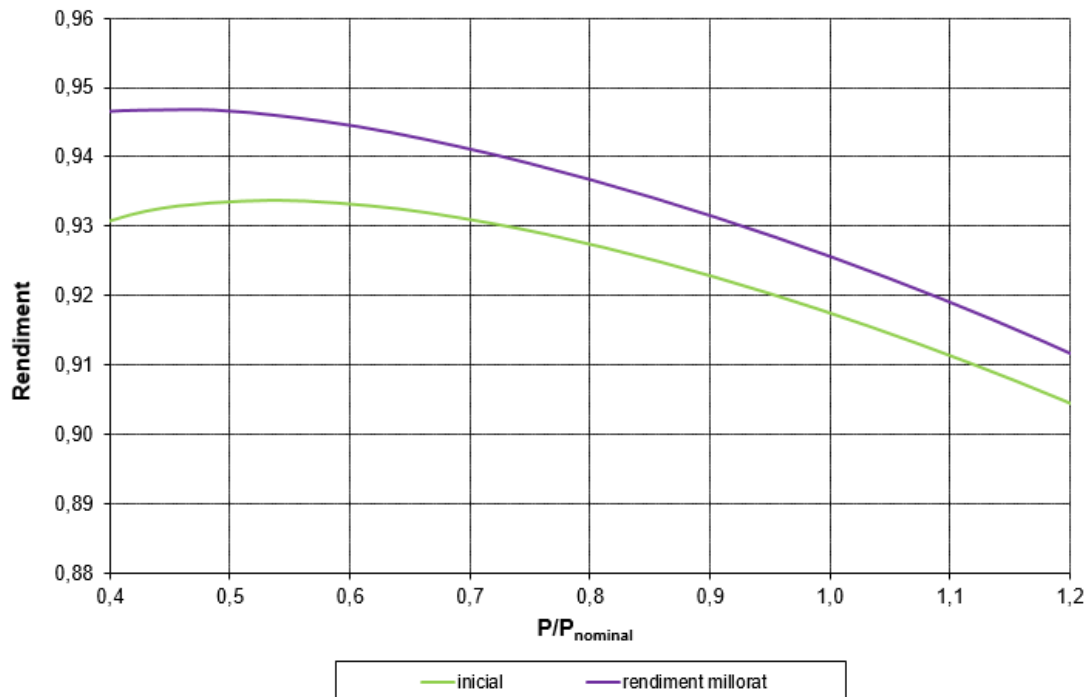


Figura 129: Característica factor de rendiment-índex de càrrega de rendiment millorat comparada amb l'inicial del motor de 7,5 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Canvi dels percentatges en la suma de pèrdues

Resulta d'interès poder veure com estan distribuïdes percentualment els diferents tipus de pèrdues en el motor. En la figura següent es mostra com s'han redistribuït després d'adoptar les modificacions indicades (*diagrama dreta*), comparades respecte la distribució inicial (*diagrama esquerra*).

Cal recordar que en aquest estudi no s'han considerat ni les pèrdues mecàniques ni les pèrdues addicionals en càrrega.

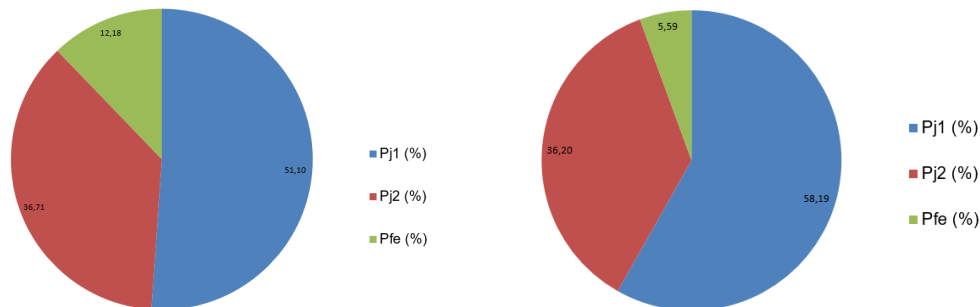


Figura 129: Suma de pèrdues en el motor original i en el motor de rendiment millorat (motor de 7,5 kW).

8.3. MOTOR DE 1020 kW

8.3.1. Variacions de la resistència de l'estator

Variacions relatives en els paràmetres nominals

	R1	diam. cond.	Ranura modific.	I línia	Potència	Velocitat	Parell	cos fi	Rendiment
	%	%	-	%	%	%	%	%	%
Original	0	0	-	0	0	0	0	0	0
1era variació	-4,72	2,35	no	1,39	1,42	-0,02	1,43	-0,01	0,04
2na variació	-8,76	5,41	sí	-0,25	4,04	-0,01	4,06	4,18	0,12
3era variació	-13,26	7,41	sí	0,32	4,65	-0,02	4,67	4,16	0,15

Taula 54: Variacions relatives en els paràmetres nominals del motor de 1020 kW.

Variacions relatives dels ratios d'intensitat, de parell (arranc i màxim) respecte els nominals i de pèrdues joule a l'estator

	I_{arranc} / I_n	M_{arranc} / M_n	M_{max} / M_n	P_{j1}
	%	%	%	%
Original	0	0	0	0
1era variació	0,98	-1,38	-1,21	-2,05
2na variació	2,15	-2,59	-1,65	-9,23
3era variació	1,50	-3,14	-2,04	-12,70

Taula 55: Variacions relatives en els ratios d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals i pèrdues joule del motor de 1020 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

8.3.2. Variacions de la resistència del rotor

Variacions relatives en els paràmetres nominals

	R^2	S ranura rotor	Modifica ció de ranura	I línia	Potència	Velocitat	Parell	cos ϕ	Rendiment
	%	%	-	%	%	%	%	%	%
Original	0	0		0	0	0	0	0	0
1era variació	2,49	2,53	sí	1,22	5,79	-0,01	5,80	4,34	0,16
2na variació	8,15	8,86	sí	1,71	6,31	0,05	6,26	4,32	0,19
3era variació	8,62	9,37	sí	1,79	6,35	0,05	6,29	4,30	0,18

Taula 56: Variacions relatives en els paràmetres nominals del motor de 1020 kW.

Variacions relatives dels ratís d'intensitat, de parell (arranc i màxim) respecte els nominals i de pèrdues joule al rotor

	I_{arranc} / I_n	M_{arranc} / M_n	M_{max} / M_n	P_j^2
	%	%	%	%
Original	0	0	0	0
1era variació	0,78	-6,56	-3,51	6,61
2na variació	0,15	-12,34	-3,93	1,35
3era variació	0,15	-12,78	-3,97	0,97

Taula 57: Variacions relatives en els ratís d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals i pèrdues joule del motor de 1020 kW.

8.3.3. Variacions del tipus de xapa magnètica

Variacions relatives en els paràmetres nominals

	Perdues esp.	Tipus	Modif. ranura	I línia	Potència	Velocitat	Parell	cos ϕ	Rendiment
	%	xapa	ranura	%	%	%	%	%	%
Original	0	M-43		0	0	0	0	0	0
1era variació	-20,59	M-27	no	7,65	8,14	-0,08	8,23	0,18	0,27
2na variació	-35,29	M-19	no	13,95	14,71	-0,14	14,88	0,21	0,45
3era variació	-41,18	M-15	no	17,26	18,12	-0,18	18,33	0,19	0,54

Taula 58: Variacions relatives en els paràmetres nominals del motor de 1020 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Variacions relatives dels ratis d'intensitat, de parell (arranc i màxim) respecte els nominals i de pèrdues al ferro

	I_{arranc} / I_n	M_{arranc} / M_n	M_{max} / M_n	P_{fe}
	%	%	%	%
Original	0	0	0	0
1era variació	-5,62	-7,58	-7,57	-19,51
2na variació	-14,37	-12,95	-12,90	-36,04
3era variació	-13,82	-15,44	-15,43	-45,23

Taula 59: Variacions relatives en els ratis d'intensitat i de parell (arranc i màxim) respecte els nominals i pèrdues joule del motor de 1020 kW.

8.1.4. Proposta combinada per obtenir un rendiment millorat

Combinant les tres actuacions analitzades, diàmetre del conductor de l'estator, secció de la ranura del rotor i tipus de xapa magnètica, que afecten especialment de forma directa als paràmetres del circuit equivalent R_1 , R'_2 , R_{fe} i X_μ , s'ha decidit efectuar les actuacions següents per la millora del rendiment en aquest motor:

- $R_1 = 0,0424$ (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 que el coeficient d'utilització de ranura aconsella, 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 mostren les corbes característiques amb les decisions de millora adoptades, comparades amb les corbes obtingudes prèviament a les modificacions constructives seleccionades.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Característica parell - velocitat

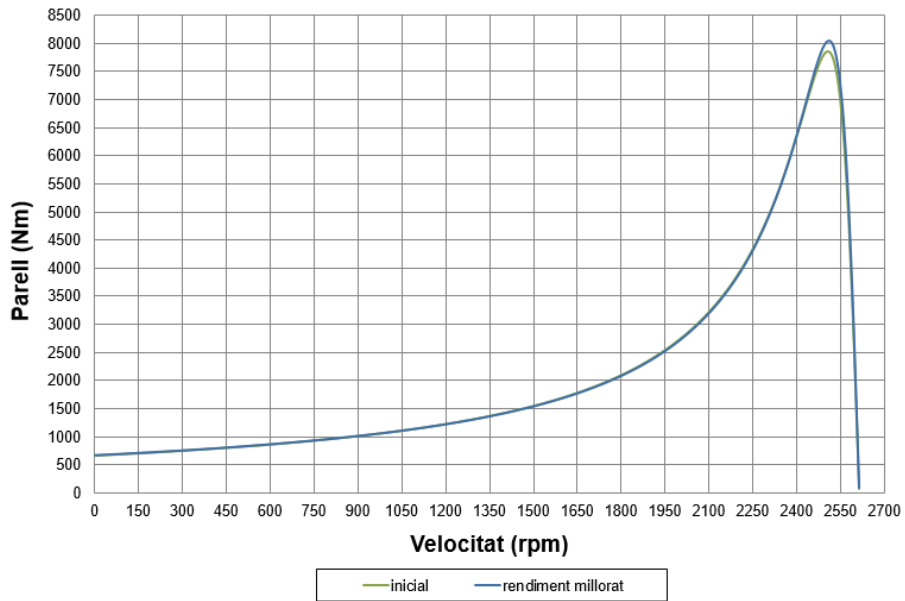


Figura 130: Característica parell-velocitat de rendiment millorat comparada amb l'inicial del motor de 1020 kW.

Característica corrent - velocitat

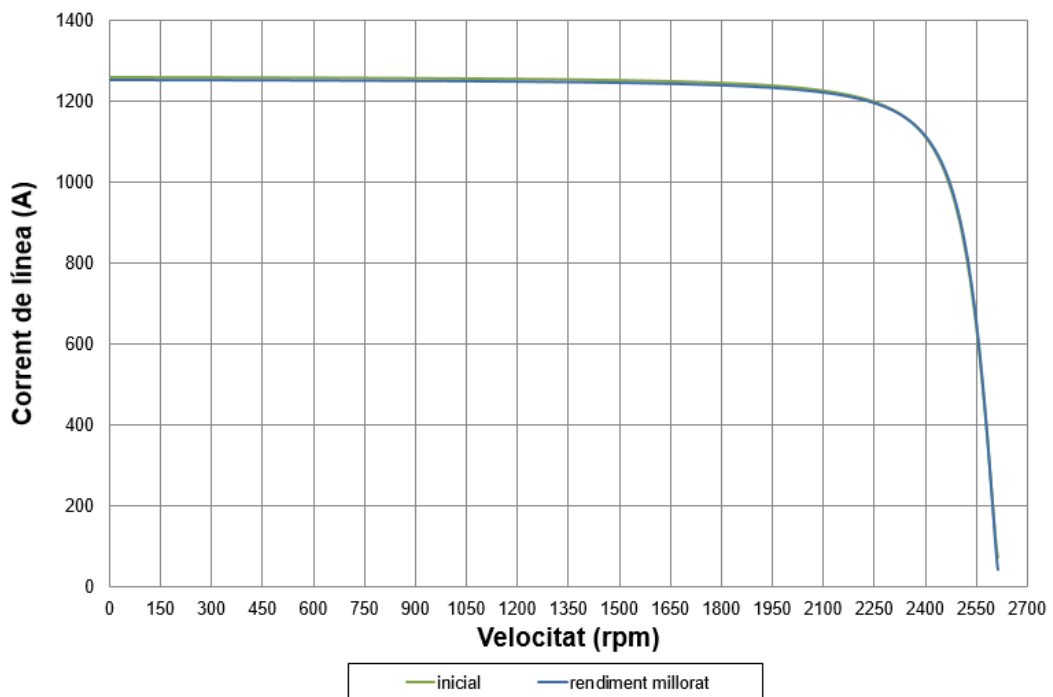


Figura 131: Característica corrent-velocitat de rendiment millorat comparada amb l'inicial del motor de 1020 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Característica del factor de potència - índex de càrrega

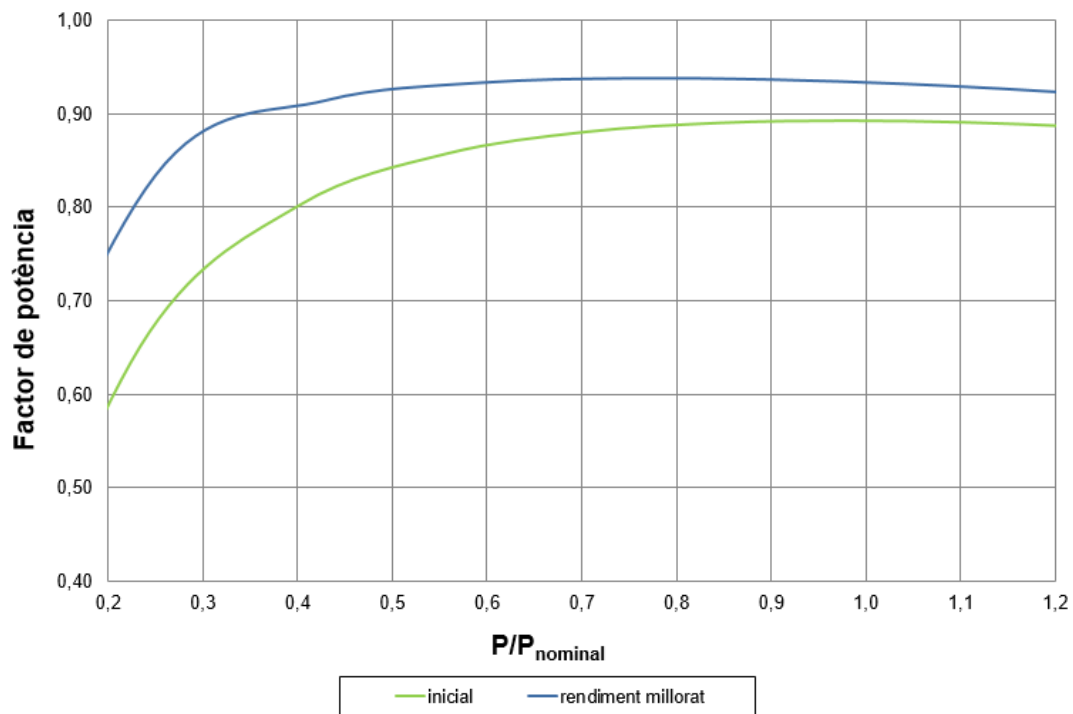


Figura 132: Característica factor de potència-índex de càrrega de rendiment millorat comparada amb l'inicial del motor de 1020 kW.

Característica del rendiment - índex de càrrega

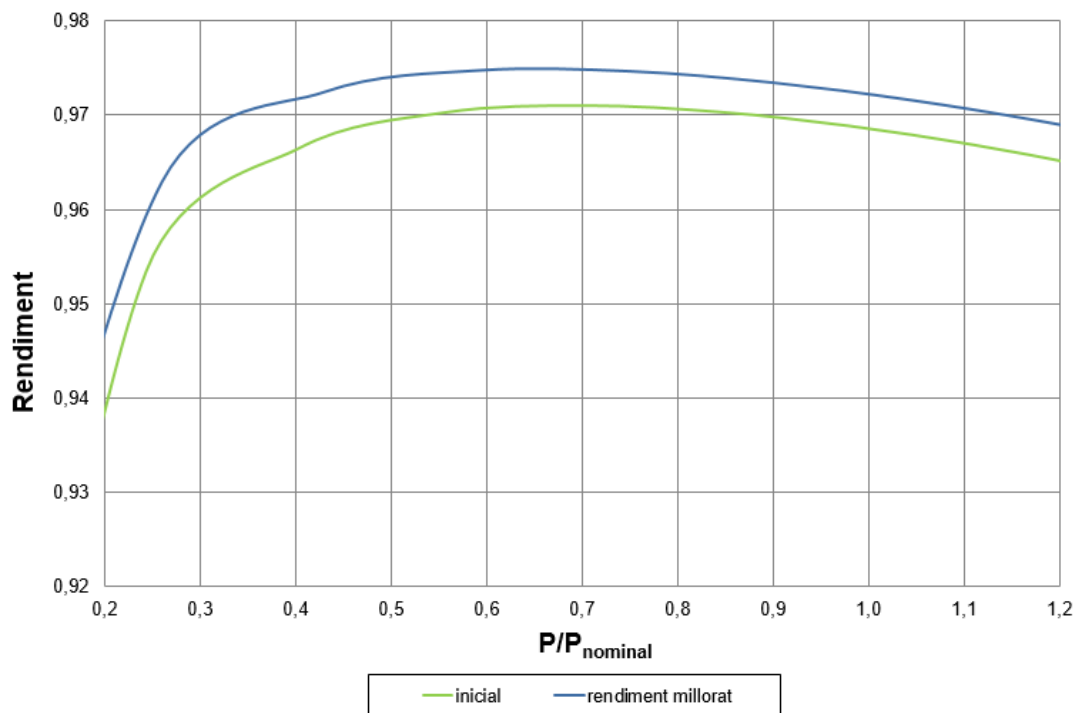


Figura 133: Característica factor de rendiment-índex de càrrega de rendiment millorat comparada amb l'inicial del motor de 1020 kW.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Canvi dels percentatges en la suma de pèrdues

Resulta d'interès poder veure com estan distribuïdes percentualment els diferents tipus de pèrdues en el motor. En la figura següent es mostra com s'han redistribuït després d'adoptar les modificacions indicades (*diagrama dreta*), comparades respecte la distribució inicial (*diagrama esquerra*).

Cal recordar que en aquest estudi no s'han considerat ni les pèrdues mecàniques ni les pèrdues addicionals en càrrega.

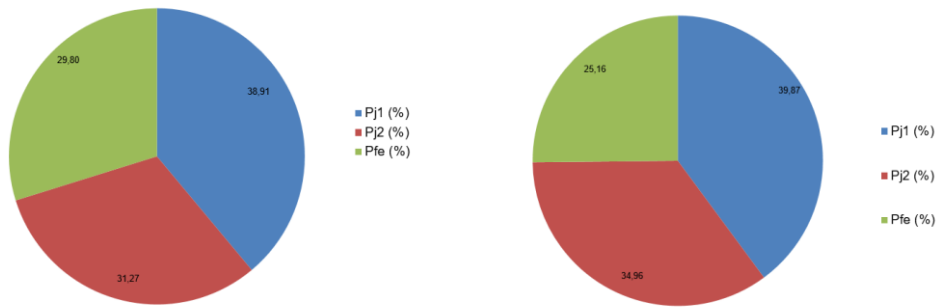


Figura 134: Suma de pèrdues en el motor original i en el motor de rendiment millorat (motor de 1020 kW).

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

9. ESTUDI ECONÒMIC.

Es planteja com a estudi econòmic la utilització dels motors de rendiment millorat dimensionats respecte dels motors inicials seleccionats.

Aquest estudi econòmic contempla:

- l'estalvi d'energia anual (kWh/any).
- l'increment de cost dels materials de cada motor de rendiment millorat respecte de l'inicial.
- el temps de recuperació de la inversió en la modificació del motor.

Aquest estudi s'ha realitzat per als 3 motors estudiats i fent les següents hipòtesis sobre el seu funcionament en càrrega:

- Es fan 5 suposicions diferents sobre el cicle de treball anual de cada motor (1000, 2000, 3000, 4000 i 5000 hores anuals).
- Per a cada una de les 5 suposicions s'estableixen règims de funcionament. En cada una de les suposicions el motor treballarà un 40% de les hores a plena càrrega, un altre 40% a $\frac{3}{4}$ de plena càrrega i un 20% a mitja càrrega.

Per a realitzar l'estudi caldrà tenir en compte les següents equacions:

$$E_{\eta 0} = \frac{P_u}{\eta_0} \cdot h_t \quad [\text{kWh}] \quad [27]$$

$$E_{\eta m} = \frac{P_u}{\eta_m} \cdot h_t \quad [\text{kWh}] \quad [28]$$

$$E_{\text{estalviada}} = \sum E_{\eta 0} - \sum E_{\eta m} \quad [\text{kWh/any}] \quad [29]$$

$$U = E_{\text{estalviada}} \cdot C \quad [€/any] \quad [30]$$

$$V_{Cu0} = V_{\text{ranuraE0}} \cdot n_{\text{ranuraE}} \cdot f_{Cu0} \cdot k_{Cucb} \quad [\text{m}^3] \quad [31]$$

$$M_{Cu0} = V_{Cu0} \cdot \rho_{Cu} \quad [\text{kg}] \quad [32]$$

$$V_{Cum} = V_{\text{ranuraEm}} \cdot n_{\text{ranuraE}} \cdot f_{Cum} \cdot k_{Cucb} \quad [\text{m}^3] \quad [33]$$

$$M_{Cum} = V_{Cum} \cdot \rho_{Cu} \quad [\text{kg}] \quad [34]$$

$$\Delta C_{Cu} = (M_{Cum} - M_{Cu0}) \cdot B \quad [€] \quad [35]$$

$$V_{Al0} = V_{\text{ranuraR0}} \cdot n_{\text{ranuraR}} \cdot L_{Al} \cdot k_{Alcb} \quad [\text{m}^3] \quad [36]$$

$$M_{Al0} = V_{Al0} \cdot \rho_{Al} \quad [\text{kg}] \quad [37]$$

$$V_{Alm} = V_{\text{ranuraR0}} \cdot n_{\text{ranuraR}} \cdot L_{Al} \cdot k_{Alcb} \quad [\text{m}^3] \quad [38]$$

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

$$M_{Alm} = V_{Alm} \cdot \rho_{Al} \quad [\text{kg}] \quad [39]$$

$$\Delta C_{Al} = (M_{Alm} - M_{Al0}) \cdot H \quad [€] \quad [40]$$

$$M_{Xapa} = (V_{estator} + V_{rotor}) \rho_{Fe} \quad [\text{kg}] \quad [41]$$

$$\Delta C_{Xapa} = M_{Xapa} \cdot G \quad [€] \quad [42]$$

$$\Delta C_{Materials} = \Delta C_{Cu} + \Delta C_{Al} + \Delta C_{Xapa} \quad [€] \quad [43]$$

$$T = \frac{\Delta C_{Materials}}{U} \quad [\text{anys}] \quad [44]$$

On:

$E_{\eta 0}$: Energia consumida pel motor (amb rendiment inicial).

P_u : Potència útil.

η_0 : Rendiment inicial.

h_t : Hores del cicle de treball.

$E_{\eta m}$: Energia consumida pel motor (amb rendiment millorat).

η_m : Rendiment millorat.

$E_{estalviada}$: Energia estalviada anual.

U : Estalvi econòmic anual.

C : Preu del kWh.

V_{Cu0} : Volum de coure dels conductors del motor inicial.

$V_{ranuraE0}$: Volum de la ranura d'estator del motor inicial.

$n_{ranuraE}$: Nombre de ranures d'estator.

f_{Cu0} : Factor d'ocupació de ranura.

k_{Cucb} : Coeficient de caps de bobina d'estator.

M_{Cu0} : Massa de coure dels conductors del motor inicial.

V_{Cum} : Volum de coure dels conductors del motor amb rendiment millorat.

$V_{ranuraEm}$: Volum de la ranura d'estator del motor amb rendiment millorat.

k_{Alcb} : Coeficient de caps de bobina del rotor.

L_{Al} : Longitud de l'alumini.

V_{Al0} : Volum d'alumini a la gàbia del rotor del motor inicial.

V_{Alm} : Volum d'alumini a la gàbia del rotor del motor amb rendiment millorat.

M_{Al0} : Massa d'alumini de la gàbia del rotor del motor inicial.

M_{Alm} : Massa d'alumini de la gàbia del rotor del motor amb rendiment millorat.

$V_{ranuraR0}$: Volum de la ranura del rotor del motor inicial.

$V_{ranuraRm}$: Volum de la ranura del rotor del motor amb rendiment millorat.

ρ_{Al} : Densitat de l'alumini.

ρ_{Cu} : Densitat del coure.

H : Preu de l'alumini per kilogram.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

B : Preu del coure per kilogram.

ΔC_{Al} : Increment de preu de l'alumini.

ΔC_{Cu} : Increment de preu del coure.

ΔC_{Xapa} : Increment del preu de la xapa magnètica.

G : Increment del preu de la xapa magnètica per kilogram.

$\Delta C_{Materials}$: Increment del cost dels materials.

T : Període de retorn de la inversió.

9.1. MOTOR DE 250 W

Tenint en compte que els rendiments del motor inicial i el motor amb el rendiment millorat són els següents segons el seu índex de càrrega:

Índex de càrrega	Inicial	Rendiment millorat
PC	0,7923	0,8501
3 / 4	0,8025	0,8641
1 / 2	0,7814	0,8611

Taula 60: Índex de càrrega dels motors de 250 W.

Podem completar la següent taula que mostra l'energia anual (kWh/any) que consumirà el motor inicial de 250 W en els diferents cicles de treball i diferent índex de càrrega tal i com s'explica a l'apartat 9. Aquesta taula s'obté a partir de l'equació 27:

TOTAL	PC	3 / 4	1 / 2
Hores anuals	40%	40%	20%
1000	126,2148	124,6106	63,9877
2000	252,4296	249,2211	127,9754
3000	378,6444	373,8317	191,9631
4000	504,8592	498,4423	255,9508
5000	631,0741	623,0529	319,9385

Taula 61: Energia consumida pel motor original de 250 W.

A continuació es mostra la taula que conté l'energia anual (kWh/any) que consumirà el motor amb rendiment millorat de 250 W en els diferents cicles de treball i diferent índex de càrrega tal i com s'explica a l'apartat 9. Aquesta taula s'obté a partir de l'equació 28:

TOTAL	PC	3 / 4	1 / 2
Hores anuals	40%	40%	20%
1000	117,6332	115,7273	58,0652
2000	235,2664	231,4546	116,1305
3000	352,8996	347,1820	174,1957
4000	470,5328	462,9093	232,2610
5000	588,1661	578,6367	290,3263

Taula 62: Energia consumida pel motor amb rendiment millorat de 250 W.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Per tant, de la diferència d'aquestes taules, obtenim l'estalvi energètic anual (equació 29) i multiplicat per el cost del kWh (0,1 €/kWh) obtenim l'estalvi econòmic anual pels diferents cicles de treball (equació 30):

<i>TOTAL</i>	<i>Estalvi energètic anual</i>	<i>Estalvi econòmic anual</i>
<i>Hores anuals</i>	(kWh/any)	(€/any)
1000	23,39	2,34
2000	46,77	4,68
3000	70,16	7,02
4000	93,55	9,35
5000	116,94	11,69

Taula 63: Estalvi econòmic i energètic del motor amb rendiment millorat de 250 W.

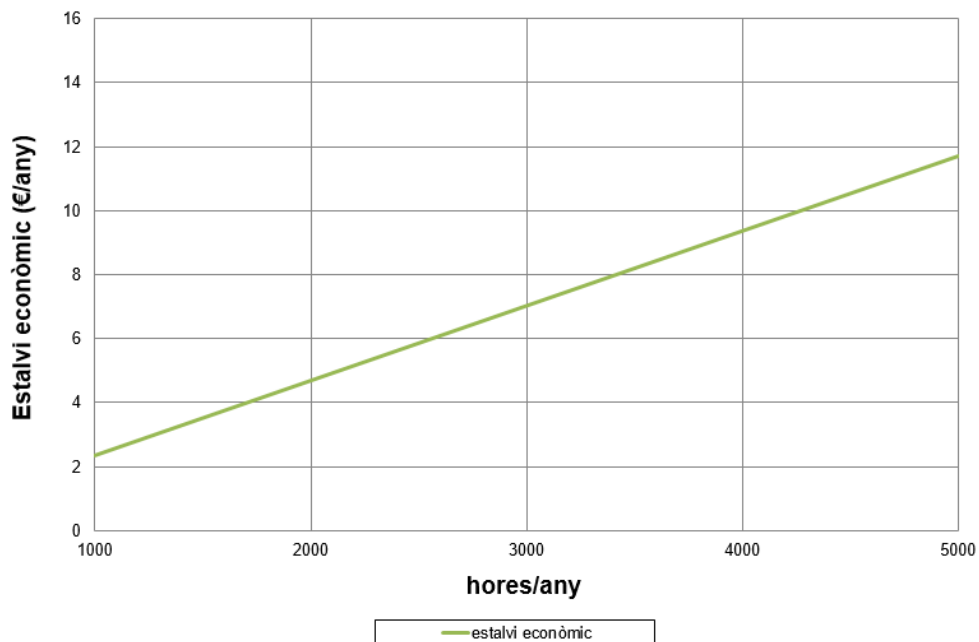


Figura 135: Gràfic de l'estalvi econòmic anual en el motor de 250 W amb rendiment millorat.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

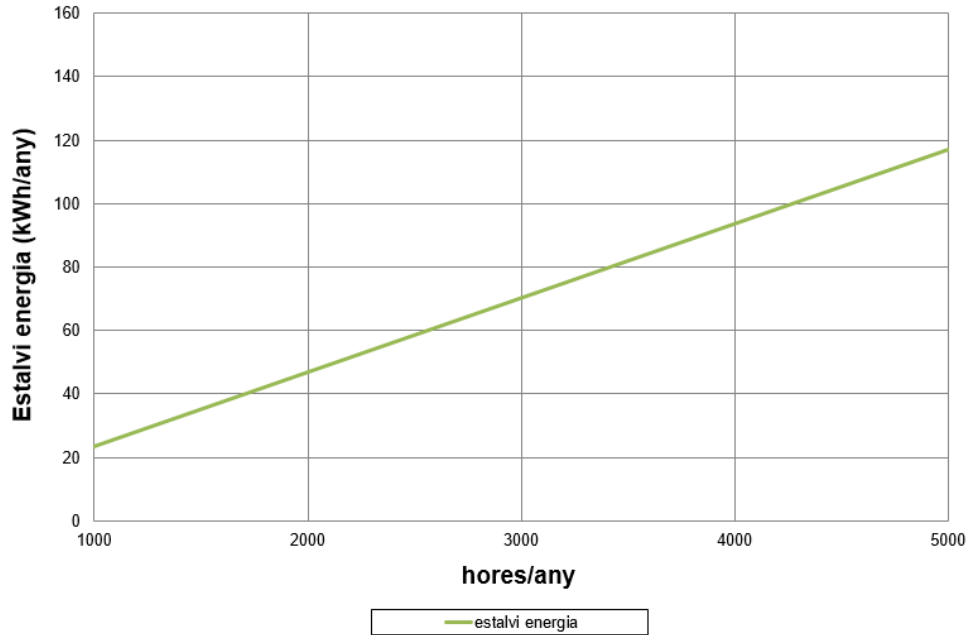


Figura 136: Gràfic de l'estalvi energètic anual en el motor de 250 W amb rendiment millorat.

Per al càlcul de l'increment de costos, és necessari saber el valor econòmic per kilogram dels materials utilitzats. Aquesta dada és força complicat d'obtenir, ja que el cost dels materials depèn de la fluctuació dels mercats i de les condicions comercials que pot obtenir cada fabricant enfront dels seus proveïdors.

S'ha optat per escollir les dades de costos dels materials obtinguda en l'article "Re-Use and Recycling of Different Electrical Machines" (més dades en la bibliografia):

Coire (€/kg)	Alumini (€/kg)	Xapa (€/kg)
5,5	1,7	2,3 (*)

Taula 64: Costos dels materials que formen el motor.

(*) Aquest valor fa referència a l'increment de cost de la xapa de major qualitat.

El següent pas, és conèixer la quantitat de pes per cada material que forma tant el motor inicial com el de rendiment millorat. Un cop determinada la seva diferència, multiplicada pels costos que apareixen a la taula anterior, s'obté l'increment de costos per materials, a partir de les equacions des de la 31 fins a la 43. Tots els paràmetres són coneguts excepte els coeficients dels caps de bobina, tant d'estator (k_{Cucb}) com de rotor (k_{Alcb}).

Com s'esmenta al capítol 4, el software de FEMM treballa en un domini en 2D. Per tant l'efecte del volum dels caps de bobina s'ha estimat a partir d'un coeficient. Per a l'estudi del motor de 250 W s'ha establert:

$$k_{Cucb} : 1,3$$

$$k_{Alcb} : 1,1$$

Per tant, un cop resoltes les equacions, obtenim:

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Material	Increment de pes (kg)	Increment de cost (€)
Coure	0,32044	1,7624
Alumini	0,01215	0,02066
Xapa	0	5,1869
Total	0,3325	6,9699

Taula 65: Increments de pes i cost del motor amb rendiment millorat de 250 W.

Finalment, aplicant l'equació 44 trobem el període de recuperació de la inversió en el cost dels materials per a cada cicle de treball:

TOTAL	Període de recuperació de la inversió (anys)
Hores anuals	(anys)
1000	2,98
2000	1,49
3000	0,99
4000	0,75
5000	0,60

Taula 66: Període de recuperació econòmica del motor amb rendiment millorat de 250 W.

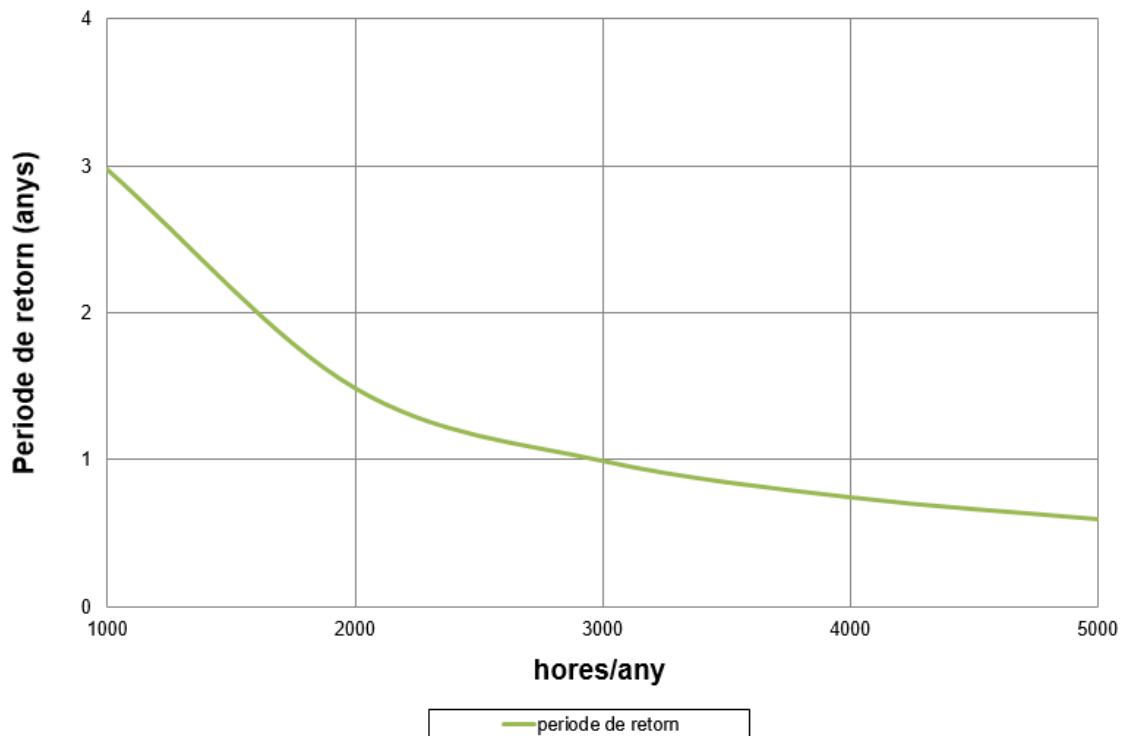


Figura 137: Gràfic del període de recuperació de la inversió en materials en el motor de 250 W amb rendiment millorat.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

9.2. MOTOR DE 7,5 kW

Tenint en compte que els rendiments del motor inicial i el motor amb el rendiment millorat són els següents segons el seu índex de càrrega:

<i>Índex de càrrega</i>	<i>Original</i>	<i>Rendiment millorat</i>
<i>PC</i>	0,9179	0,9255
<i>3 / 4</i>	0,9284	0,9385
<i>1 / 2</i>	0,9318	0,9465

Taula 67: Índex de càrrega dels motors de 7,5 kW.

Podem completar la següent taula que mostra l'energia anual (kWh/any) que consumirà el motor inicial de 7,5 kW en els diferents cicles de treball i diferent índex de càrrega tal i com s'explica a l'apartat 9. Aquesta taula s'obté a partir de l'equació 27:

<i>TOTAL</i>	<i>PC</i>	<i>3 / 4</i>	<i>1 / 2</i>
<i>Hores anuals</i>	40%	40%	20%
<i>1000</i>	3268,3298	3231,3658	1609,7875
<i>2000</i>	6536,6597	6462,7316	3219,5750
<i>3000</i>	9804,9896	9694,0973	4829,3625
<i>4000</i>	13073,3195	12925,4632	6439,15
<i>5000</i>	16341,6494	16156,8290	8048,9375

Taula 68: Energia consumida pel motor original de 7,5 kW.

A continuació es mostra la taula que conté l'energia anual (kWh/any) que consumirà el motor amb rendiment millorat de 7,5 kW en els diferents cicles de treball i diferent índex de càrrega tal i com s'explica a l'apartat 9. Aquesta taula s'obté a partir de l'equació 28:

<i>TOTAL</i>	<i>PC</i>	<i>3 / 4</i>	<i>1 / 2</i>
<i>Hores anuals</i>	40%	40%	20%
<i>1000</i>	3241,4911	3196,5903	1584,7861
<i>2000</i>	6482,9821	6393,1806	3169,5721
<i>3000</i>	9724,4732	9589,7709	4754,3581
<i>4000</i>	12965,9643	12786,3612	6339,1442
<i>5000</i>	16207,4554	15982,9515	7923,9302

Taula 69: Energia consumida pel motor amb rendiment millorat de 7,5 kW.

Per tant, de la diferència d'aquestes taules, obtenim l'estalvi energètic anual (equació 29) i multiplicat per el cost del kWh (0,1 €/kWh) obtenim l'estalvi econòmic anual pels diferents cicles de treball (equació 30):

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

<i>TOTAL</i>	<i>Estalvi energètic anual</i>	<i>Estalvi econòmic anual</i>
<i>Hores anuals</i>	(kWh/any)	(€/any)
1000	86,62	8,66
2000	173,23	17,32
3000	259,85	25,98
4000	346,46	34,65
5000	433,08	43,31

Taula 70: Estalvi econòmic i energètic del motor amb rendiment millorat de 7,5 kW.

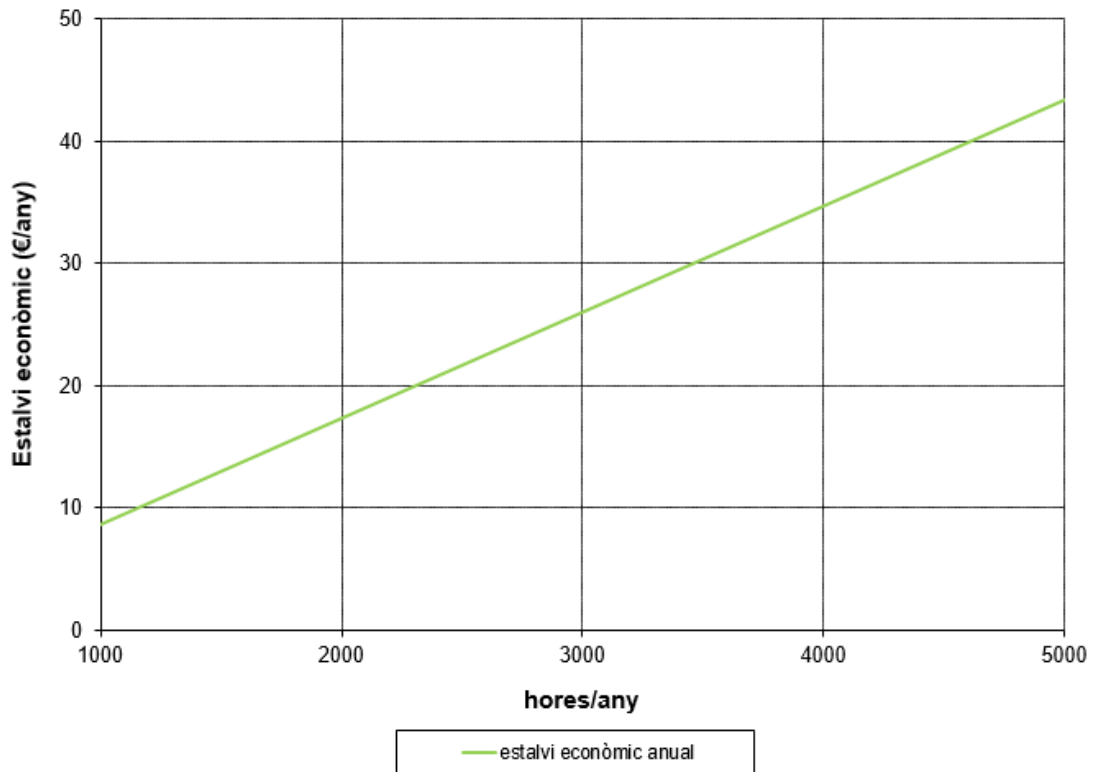


Figura 138: Gràfic de l'estalvi econòmic anual en el motor de 7,5 kW amb rendiment millorat.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

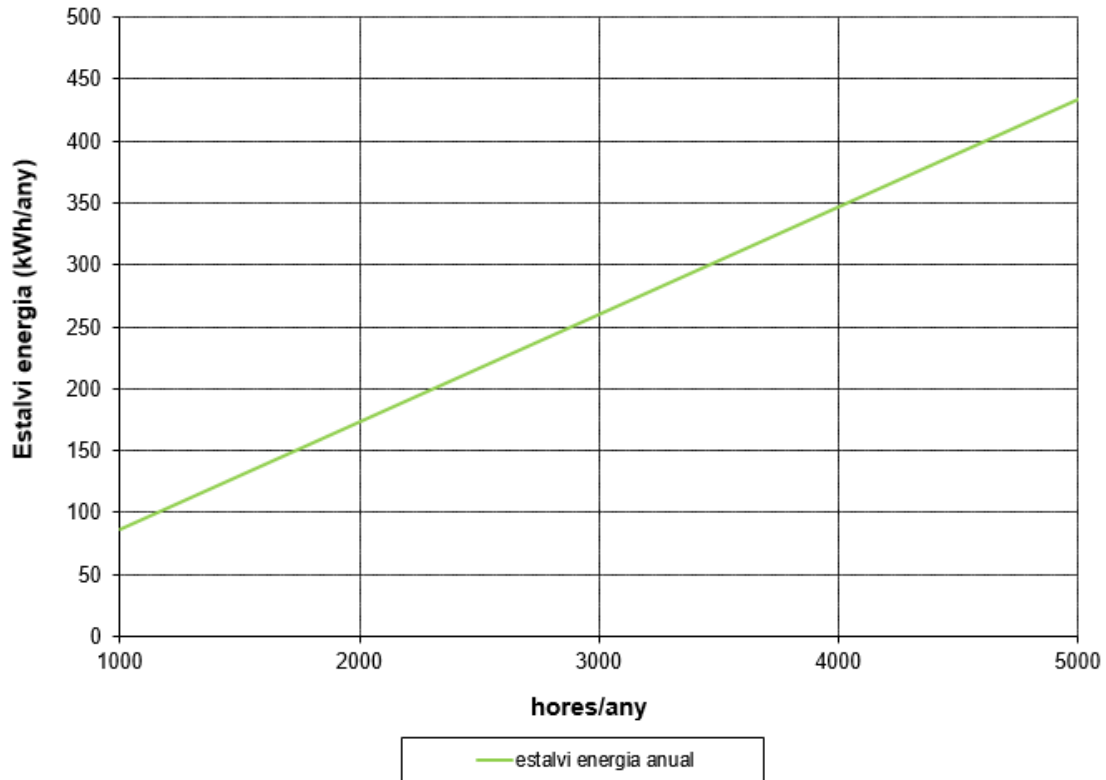


Figura 139: Gràfic de l'estalvi energètic anual en el motor de 7,5 kW amb rendiment millorat.

Per al càlcul de l'increment de costos, s'ha optat per escollir les dades de costos dels materials obtinguda en l'article "Re-Use and Recycling of Different Electrical Machines" (més dades en la bibliografia):

Coure	Alumini	Xapa
(€/kg)	(€/kg)	(€/kg)
5,5	1,7	2,3 (*)

Taula 71: Costos dels materials que formen el motor.

(*) Aquest valor fa referència a l'increment de cost de la xapa de major qualitat.

El següent pas, es conèixer la quantitat de pes per cada material que forma tant el motor inicial com el de rendiment millorat. La seva diferència, multiplicada pels costos que apareixen a la taula anterior, donarà l'increment de costos per materials a partir de les equacions des de la 31 fins a la 43. Tots els paràmetres són coneguts excepte els coeficients dels caps de bobina, tant d'estator (k_{Cucb}) com de rotor (k_{Alcb}).

Tal com s'ha explicat anteriorment, per aquests coeficients s'ha establert:

$$k_{Cucb} : 1,3$$

$$k_{Alcb} : 1,1$$

Per tant, un cop resoltes les equacions, obtenim:

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Material	Increment de pes (kg)	Increment de cost (€)
Coure	0,6155	3,3854
Alumini	0,1411	0,2398
Xapa	0	61,4518
Total	0,7565	65,0772

Taula 72: Increments de pes i cost del motor amb rendiment millorat de 7,5 kW.

Finalment, aplicant l'equació 44 trobem el període de recuperació de la inversió en el cost dels materials per a cada cicle de treball:

TOTAL	Període de recuperació de la inversió (any)
Hores anuals	(any)
1000	7,51
2000	3,76
3000	2,50
4000	1,88
5000	0,60

Taula 73: Període de recuperació econòmica del motor amb rendiment millorat de 7,5 kW.

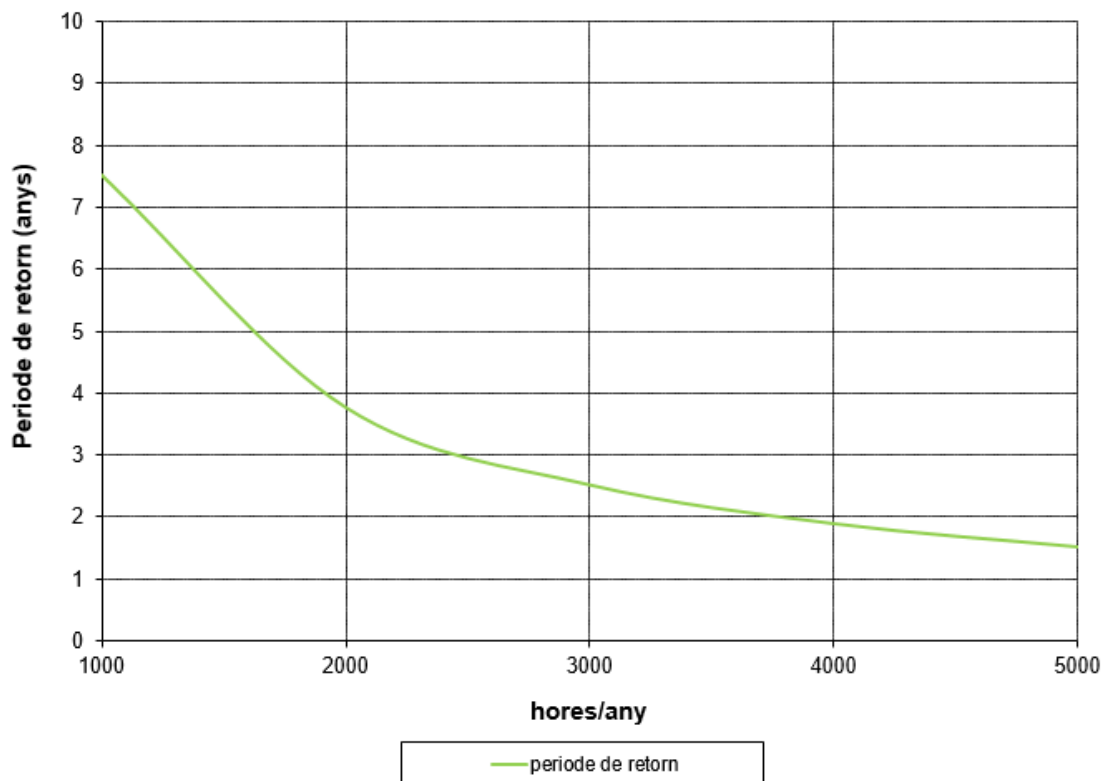


Figura 140: Gràfic del període de recuperació de la inversió en materials en el motor de 7,5 kW amb rendiment millorat.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

9.3. MOTOR DE 1020 kW

Tenint en compte que els rendiments del motor inicial i el motor amb el rendiment millorat són els següents segons el seu índex de càrrega:

<i>Índex de càrrega</i>	<i>Original</i>	<i>Rendiment millorat</i>
<i>PC</i>	0,9688	0,9734
<i>3 / 4</i>	0,971	0,9746
<i>1 / 2</i>	0,9674	0,9739

Taula 74: Índex de càrrega dels motors de 1020 kW.

Podem completar la següent taula que mostra l'energia anual (kWh/any) que consumirà el motor inicial de 1020 kW en els diferents cicles de treball i diferent índex de càrrega tal i com s'explica a l'apartat 9. Aquesta taula s'obté a partir de l'equació 27:

<i>TOTAL</i>	<i>PC</i>	<i>3 / 4</i>	<i>1 / 2</i>
<i>Hores anuals</i>	40%	40%	20%
<i>1000</i>	421139,554	420185,376	210874,509
<i>2000</i>	842279,108	840370,752	421749,018
<i>3000</i>	1263418,66	1260556,128	632623,527
<i>4000</i>	1684558,22	1680741,504	843498,036
<i>5000</i>	2105697,77	2100926,88	1054372,545

Taula 75: Energia consumida pel motor original de 1020 kW.

A continuació es mostra la taula que conté l'energia anual (kWh/any) que consumirà el motor amb rendiment millorat de 1020 kW en els diferents cicles de treball i diferent índex de càrrega tal i com s'explica a l'apartat 9. Aquesta taula s'obté a partir de l'equació 28:

<i>TOTAL</i>	<i>PC</i>	<i>3 / 4</i>	<i>1 / 2</i>
<i>Hores anuals</i>	40%	40%	20%
<i>1000</i>	419149,373	418633,285	209467,091
<i>2000</i>	838298,747	837266,571	418934,182
<i>3000</i>	1257448,12	1255899,86	628401,273
<i>4000</i>	1676597,49	1674533,14	837868,364
<i>5000</i>	2095746,87	2093166,43	1047335,46

Taula 76: Energia consumida pel motor amb rendiment millorat de 1020 kW.

Per tant, de la diferència d'aquestes taules, obtenim l'estalvi energètic anual (equació 29) i multiplicat per el cost del kWh (0,1 €) obtenim l'estalvi econòmic anual pels diferents cicles de treball (equació 30):

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

<i>TOTAL</i>	<i>Estalvi energètic anual</i>	<i>Estalvi econòmic anual</i>
<i>Hores anuals</i>	(kWh/any)	(€/any)
1000	4949,69	494,97
2000	9899,38	989,94
3000	14849,07	1484,91
4000	19798,76	1979,88
5000	24748,45	2474,84

Taula 77: Estalvi econòmic i energètic del motor amb rendiment millorat de 1020 kW.

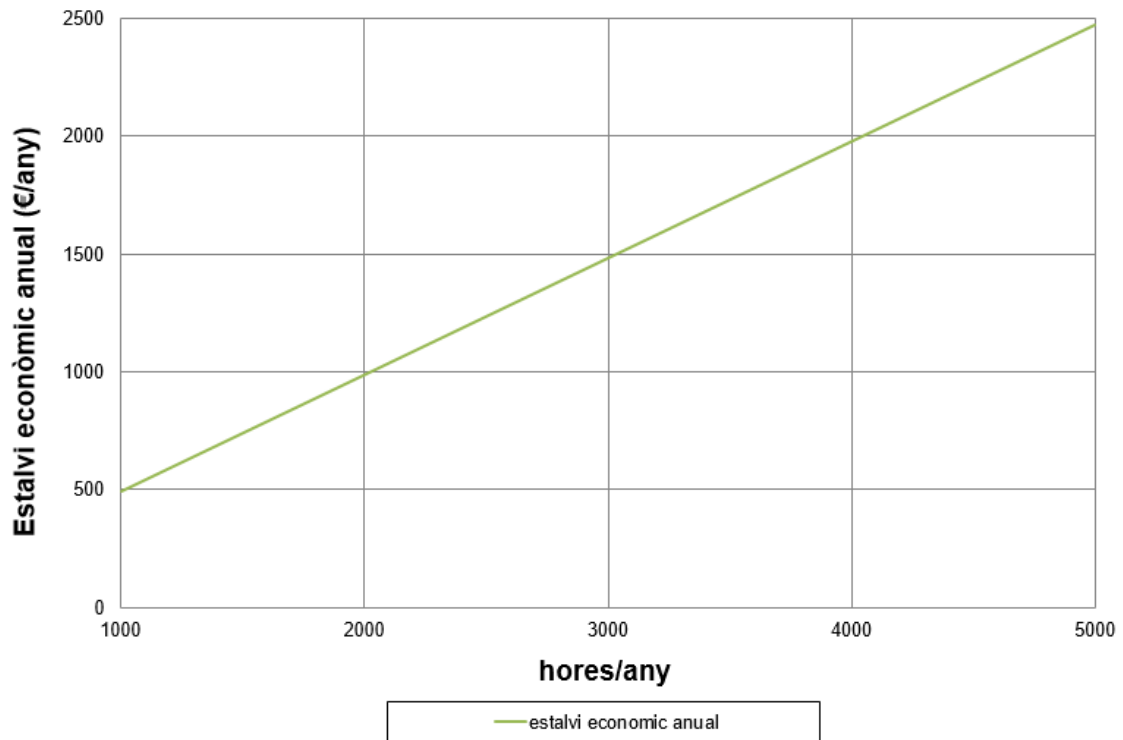


Figura 141: Gràfic de l'estalvi econòmic anual en el motor de 1020 kW amb rendiment millorat.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

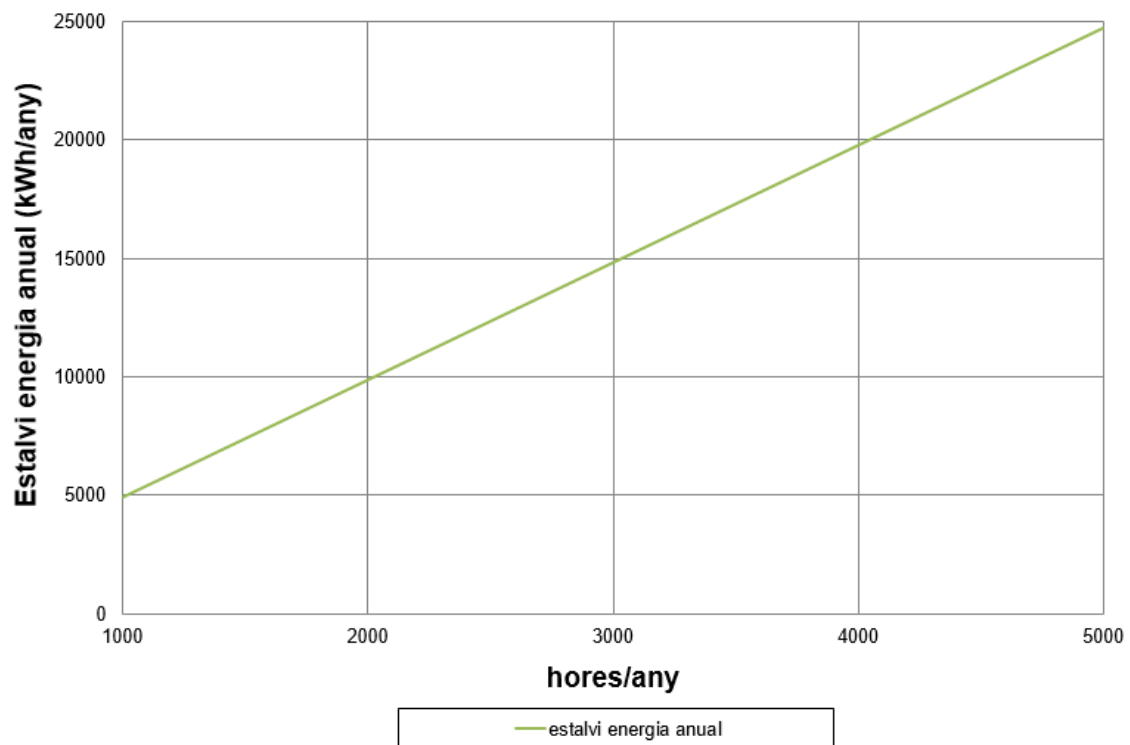


Figura 142: Gràfic de l'estalvi energètic anual en el motor de 1020 kW amb rendiment millorat.

S'ha optat per escollir les dades de costos dels materials obtinguda en l'article "Re-Use and Recycling of Different Electrical Machines" (més dades en la bibliografia):

Coure	Alumini	Xapa
(€/kg)	(€/kg)	(€/kg)
5,5	1,7	2,3 (*)

Taula 78: Costos dels materials que formen el motor.

(*) Aquest valor fa referència a l'increment de cost de la xapa de major qualitat.

El següent pas, es conèixer la quantitat de pes per cada material que forma tant el motor inicial com el de rendiment millorat. A partir de la seva diferència, multiplicada per els costos que apareixen a la taula anterior, s'obté l'increment de costos per materials a partir de les equacions des de la 31 fins a la 43. Cal destacar en aquest cas, que la gàbia del rotor està formada de coure a diferència dels altres dos motors, per tant, els valors dels paràmetres propis de l'alumini s'han de substituir pels del coure. Tots els paràmetres són coneguts excepte els coeficients dels caps de bobina, tant d'estator (k_{Cucb}) com de rotor (k_{Alcb}).

Tal com s'ha explicat anteriorment, per aquests coeficients s'ha establert:

$$k_{Cucb} : 1,3$$

$$k_{Alcb} : 1,1$$

Per tant, un cop resoltes les equacions, obtenim:

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

Material	Increment de pes (kg)	Increment de cost (€)
Coure	7,9414	43,67
Alumini	8,5385	46,96
Xapa	0	1345,48
Total	16,48	1436,12

Taula 79: Increments de pes i cost del motor amb rendiment millorat de 1020 kW.

Finalment, aplicant l'equació 44 trobem el període de recuperació de la inversió en el cost dels materials per a cada cicle de treball:

TOTAL	Període de recuperació de la inversió
Hores anuals	(any)
1000	2,90
2000	1,45
3000	0,97
4000	0,73
5000	0,58

Taula 80: Període de recuperació econòmica del motor amb rendiment millorat de 7,5 kW.

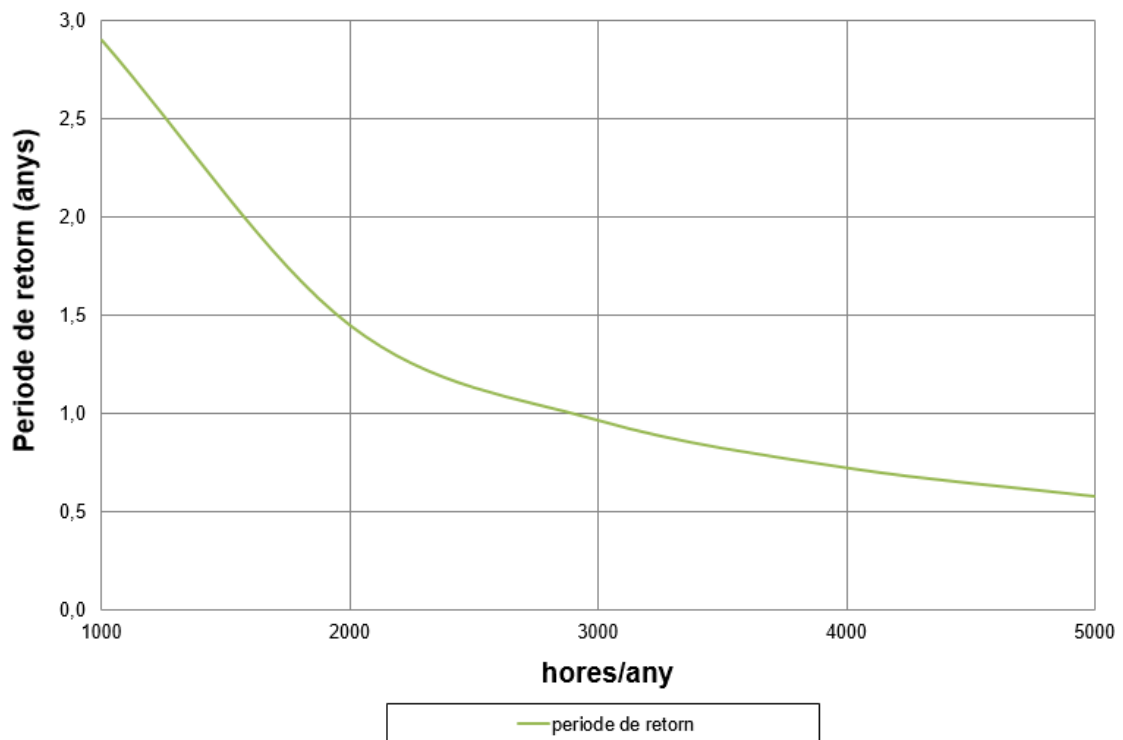


Figura 143: Gràfic del període de recuperació de la inversió en materials en el motor de 1020 kW amb rendiment millorat.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

10. CONCLUSIONS

Com a conclusió general d'aquest projecte, podem extreure que un mètode de càlcul que combina l'anàlisi magnetoestàtic amb elements finits mitjançant un software específic, com el FEMM, i la resolució teòrica de l'esquema equivalent i l'aplicació del balanç de potències utilitzant fulls de càlcul, com Excel, és una eina potent per analitzar i establir estratègies de millora en els motors d'inducció trifàsics, tot i algunes limitacions associades al mètode i a les eines utilitzades.

Un coneixement acurat de les dimensions constructives del motor permet realitzar un bon anàlisi magnetoestàtic del motor amb FEMM. Els resultats obtinguts pel que fa al flux magnètic i a les induccions en diferents parts de la màquina han estat molt valuosos per al desenvolupament del treball.

Degut a les limitacions que presenta el programa FEMM esmentades durant el projecte, com la simulació en 2D, fa que els resultats de l'anàlisi magnetoestàtic del motor d'inducció tinguin sempre un marge d'error. No obstant, la seva lliure disposició i facilitat d'ús el fan una opció molt interessant per aquest tipus d'estudis.

Quan es fan variacions constructives respecte d'un motor original, com ha estat el cas d'aquest treball, és una eina important l'ús d'un programa de dibuix potent com és AutoCad. D'aquesta manera, aquestes modificacions es poden incorporar amb facilitat en el programa d'elements finits i obtenir resultats en un temps relativament curt de com afecten aquestes variacions al comportament electromagnètic del motor.

La utilització d'un full de càlcul com Excel és també una gran eina per projectes com el que s'ha desenvolupat. La resolució de l'esquema equivalent del motor d'inducció permet obtenir el seu funcionament (paràmetres nominals, corbes característiques,...) amb relativa facilitat. Un cop programades les equacions que resolen el circuit, qualsevol canvi en els paràmetres del circuit equivalent permet obtenir en un temps relativament curt com es veu afectat el funcionament del motor.

Per a resoldre l'esquema equivalent complet s'utilitzen moltes dades, que poden ser dades directes, extretes de catàleg en el cas dels motors seleccionats inicialment, com dades derivades d'una modificació constructiva del motor plantejada com a objecte d'estudi. A l'hora d'elaborar les corbes característiques, que són la millor eina per veure el comportament dels motors modificats d'aquest projecte, és totalment necessari que aquest esquema estigui resolt amb rigor, ja que la mínima errada en una sola dada o càlcul, pot condicionar l'obtenció correcta de les corbes característiques i, dificultar així, el correcte anàlisi i interpretació dels resultats.

S'ha pogut constatar com les modificacions sobre les resistències del circuit equivalent tenen un efecte directe sobre el comportament del motor. Evidentment, com les resistències en el circuit equivalent valoren pèrdues en la transformació d'energia elèctrica en energia mecànica, el paràmetre que es veu més directament afectat és el rendiment.

S'ha vist que utilitzar conductors amb un diàmetre una mica superior, sempre i quan això permeti ubicar-los en la ranura, millora el rendiment del motor. També millora aquest rendiment si es pot incrementar la secció dels conductors de la gàbia del rotor, així com utilitzar un material ferromagnètic pel nucli del motor de menors 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

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

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 condiciona les prestacions del motor a l'engegada.

Són interessants les conclusions que es poden extreure de l'estudi econòmic realitzat per als tres motors, a partir d'aconseguir un millor rendiment. Ens adonem de que quan més potència té el motor, surt molt més rendible buscar una millora en aquest rendiment. Pot semblar una obvietat, però s'ha observat que millores que poden semblar poc significatives inicialment afecten al rendiment d'un motor i poden suposar un estalvi energètic i econòmic important, especialment si el nombre d'hores de funcionament del motor és relativament elevat. El càlcul del període de retorn ha demostrat que la inversió addicional en més materials o en materials de més qualitat es pot amortitzar en períodes de temps relativament curts.

En els temps que corren a l'actualitat, és important també adonar-nos de l'impacte ambiental que suposa un excés de consum d'energia elèctrica associada als motors d'inducció, que tenen un paper molt important en el consum d'energia elèctrica a escala mundial.

En definitiva, crec que és molt interessant poder aproximar el comportament real d'un motor i aplicar possibles modificacions per millorar-lo. Estudis com el realitzat en aquest treball permeten valorar diferents aspectes i accions possibles en el seu disseny definitiu. En el desenvolupament actual de les màquines elèctriques, en concret en els motors d'inducció que són objecte d'aquest estudi, és important que es continuïn desenvolupant eines de software cada cop més precises, ja que s'ha pogut comprovar que un petit error pot afectar notòriament a la interpretació posterior de les característiques de funcionament del motor.

11. ACRÒNIMS

M_u : Parell útil.
 M_i : Parell intern.
 n_1 : Velocitat síncrona.
 n : Velocitat de gir del rotor.
 p : Parells de pols.
 P_{ab} : potència absorbida.
 P_{j1} : pèrdues Joule a l'estator.
 P_{FE} : pèrdues al ferro.
 P_S : potència síncrona.
 P_{j2} : pèrdues Joule al rotor.
 P_{mec} : potència mecànica.
 P_{freg} : pèrdues per fregaments o mecàniques.
 P_u : potència útil.
 R_1 : Resistència de l'estator.
 ρ : Resistivitat del material.
 l : Longitud del conductor.
 S_1 : Secció del conductor.
 R'_1 : Nova resistència d'estator.
 S'_1 : Nova secció del conductor.
 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.
 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.
 γ : 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.
 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.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

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

P_{eFE0} : Pèrdues al ferro específiques inicials.

P_{eFE} : Pèrdues al ferro específiques modificades.

$E_{\eta 0}$: Energia consumida pel motor (amb rendiment inicial).

P_u : Potència útil.

η_0 : Rendiment inicial.

h_t : Hores del cicle de treball.

$E_{\eta m}$: Energia consumida pel motor (amb rendiment millorat).

η_m : Rendiment millorat.

$E_{estalviada}$: Energia estalviada anual.

η : Rendiment

U : Estalvi econòmic anual.

C : Preu del kWh.

V_{Cu0} : Volum de coure dels conductors del motor inicial.

$V_{ranuraE0}$: Volum de la ranura d'estator del motor inicial.

$n_{ranuraE}$: Nombre de ranures d'estator.

f_{Cu0} : Factor d'ocupació de ranura.

k_{Cucb} : Coeficient de caps de bobina d'estator.

M_{Cu0} : Massa de coure dels conductors del motor inicial.

V_{Cum} : Volum de coure dels conductors del motor amb rendiment millorat.

$V_{ranuraEm}$: Volum de la ranura d'estator del motor amb rendiment millorat.

k_{Alcb} : Coeficient de caps de bobina del rotor.

L_{Al} : Longitud de l'alumini.

V_{Al0} : Volum d'alumini a la gàbia del rotor del motor inicial.

V_{Alm} : Volum d'alumini a la gàbia del rotor del motor amb rendiment millorat.

M_{Al0} : Massa d'alumini de la gàbia del rotor del motor inicial.

M_{Alm} : Massa d'alumini de la gàbia del rotor del motor amb rendiment millorat.

$V_{ranuraR0}$: Volum de la ranura del rotor del motor inicial.

$V_{ranuraRm}$: Volum de la ranura del rotor del motor amb rendiment millorat.

ρ_{Al} : Densitat de l'alumini.

ρ_{Cu} : Densitat del coure.

H : Preu de l'alumini per kilogram.

B : Preu del coure per kilogram.

ΔC_{Al} : Increment de preu de l'alumini.

ΔC_{Cu} : Increment de preu del coure.

ΔC_{Xapa} : Increment del preu de la xapa magnètica.

G : Increment del preu de la xapa magnètica per kilogram.

$\Delta C_{Materials}$: Increment del cost dels materials.

T : Període de retorn de la inversió.

Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.

Marcel Martínez Arco

12. AGRAÏMENTS

M'agradaria expressar els meus agraïments al tutor d'aquest projecte, en Marcel Torrent, professor de màquines elèctriques, per la seva dedicació i ajuda durant totes les diferents parts del present projecte.

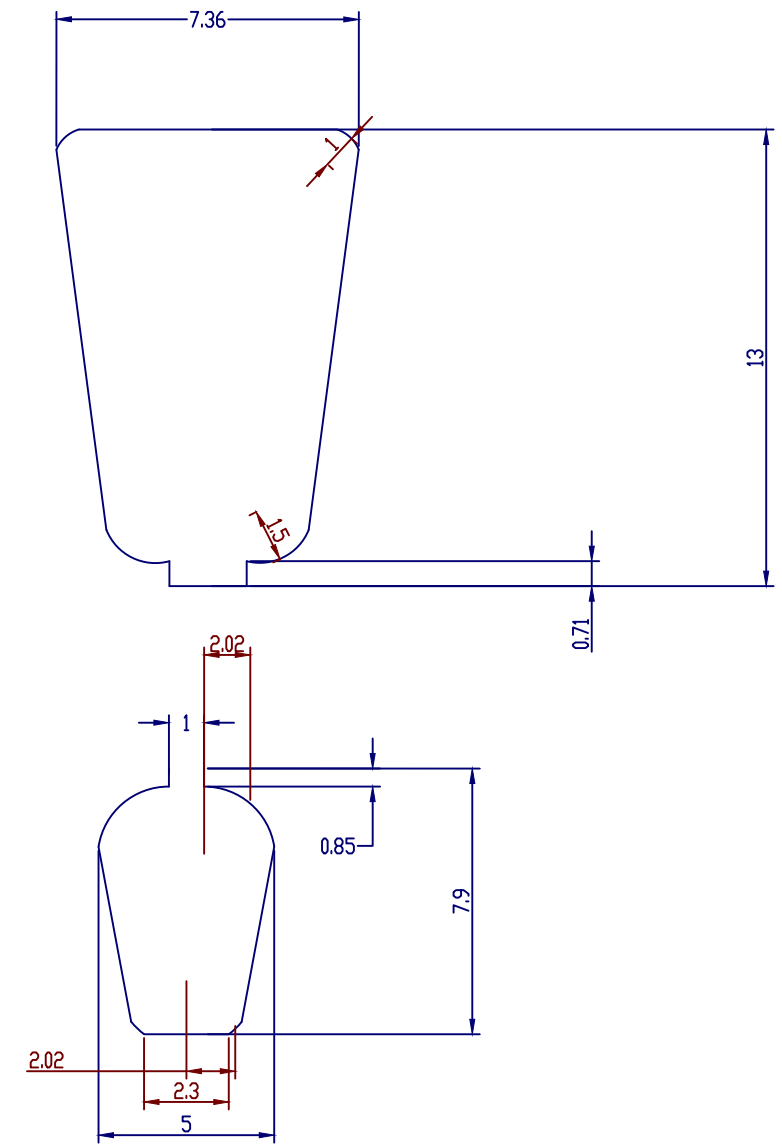
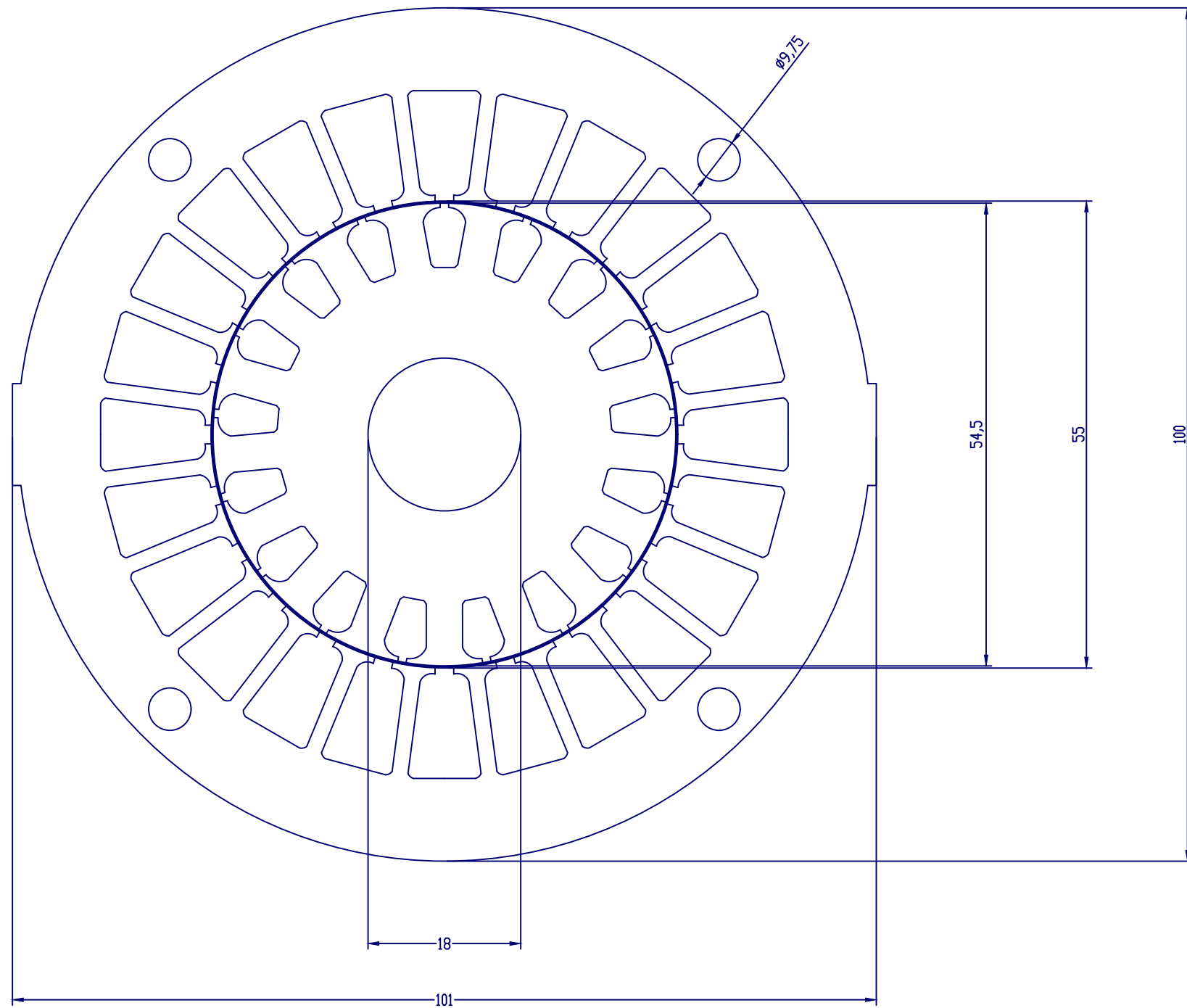
A més a més, degut a la situació de pandèmia mundial, no s'ha pogut mantenir una relació de contacte directe entre alumne i professor en una gran part del temps de duració del projecte. Tot i així, agrair a en Marcel la predisposició per ajudar-me per via telemàtica.

13. BIBLIOGRAFIA

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. Rodríguez Pozueta, Miguel Angel. (2015). *Tablas, fórmulas y gráficas para el cálculo de máquinas asíncronas*. Universidad de Cantabria (España).
5. Luís Farina, Alberto. (2018) *Motores eléctricos trifásicos: usos, componentes y funcionamiento*.
6. IEC. IEC 60034 – 2 / 30 / 31. Clase de eficiencia y determinación de la misma. 2007.
7. IEC. IEC 60034 – 7. Formas constructivas. 2007.
8. IEC. IEC 60034 – 6. Métodos de refrigeración. 2007.
9. UNE. UNE-EN 50347 Motores trifásicos de inducción de aplicación general con dimensiones y potencias normalizadas. Designación de carcasas de 56 a 315 y de bridas de 65 a 740. 2003.
10. Torrent, Marcel. (2012) *Estimation of equivalent circuits for induction motors in steady state including mechanical and stray load losses*. Departament d'enginyeria elèctrica, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
11. A.Rassolkin, A. Kallaste, S. Orlova, L. Gevorkov, T. Vaimann, A. Belachen (2018) *Re-use and recycling of different electrical Machines*. Tallin University of Technology. Estònia.
12. Roldàn Vilora, José. (2005) *Motores eléctricos. Accionamiento de máquinas. 30 tipos de motores*.
13. Cogent Power Ltd. (2002) *Electrical Steel Non Oriented Fully Processed*. South Wales, United Kingdom.
14. Arcelor Mittal Flat Carbon Europe S.A. (2014). *Catàleg: Aceros eléctricos estándar en estado final de suministro*. Espanya.
15. De la Hoz Casas, Jordi. A. Blas del Hoyo. (2006). *Máquinas eléctricas y prácticas*. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.0

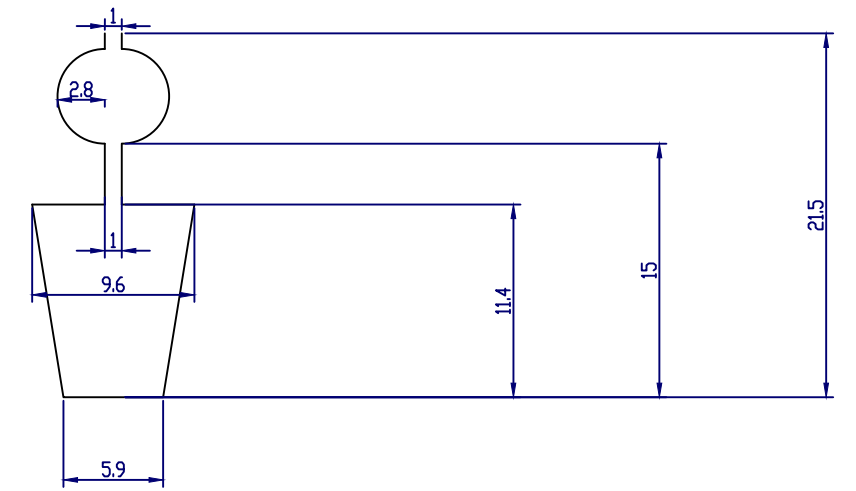
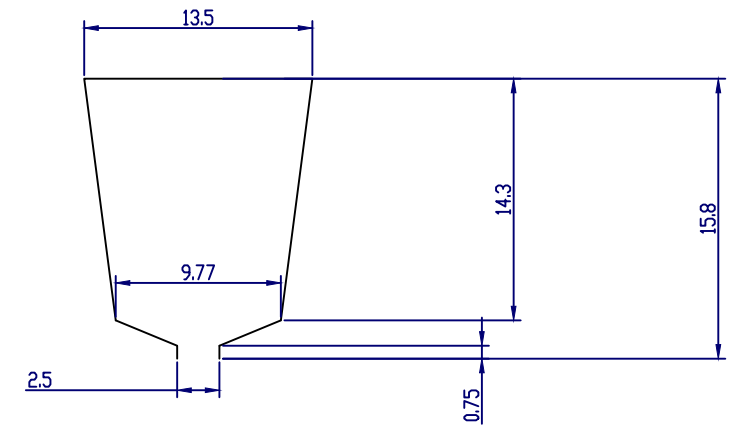
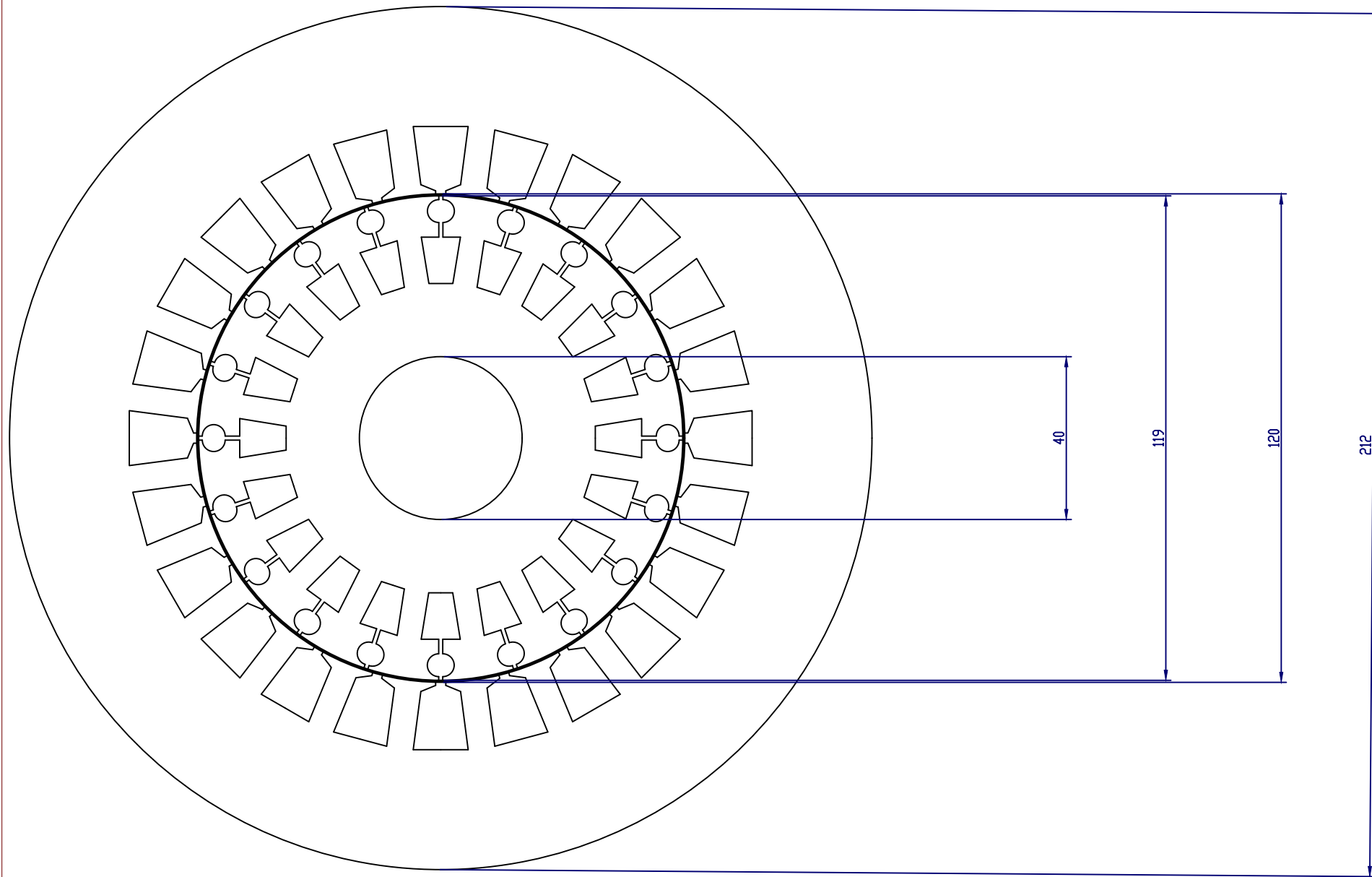
Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d' inducció trifàsic.
Marcel Martínez Arco

14. ANNEX



Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic

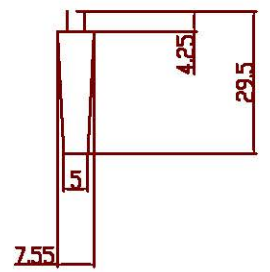
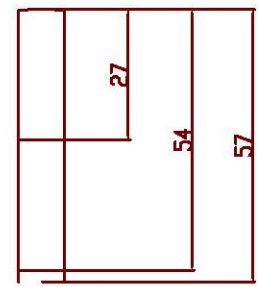
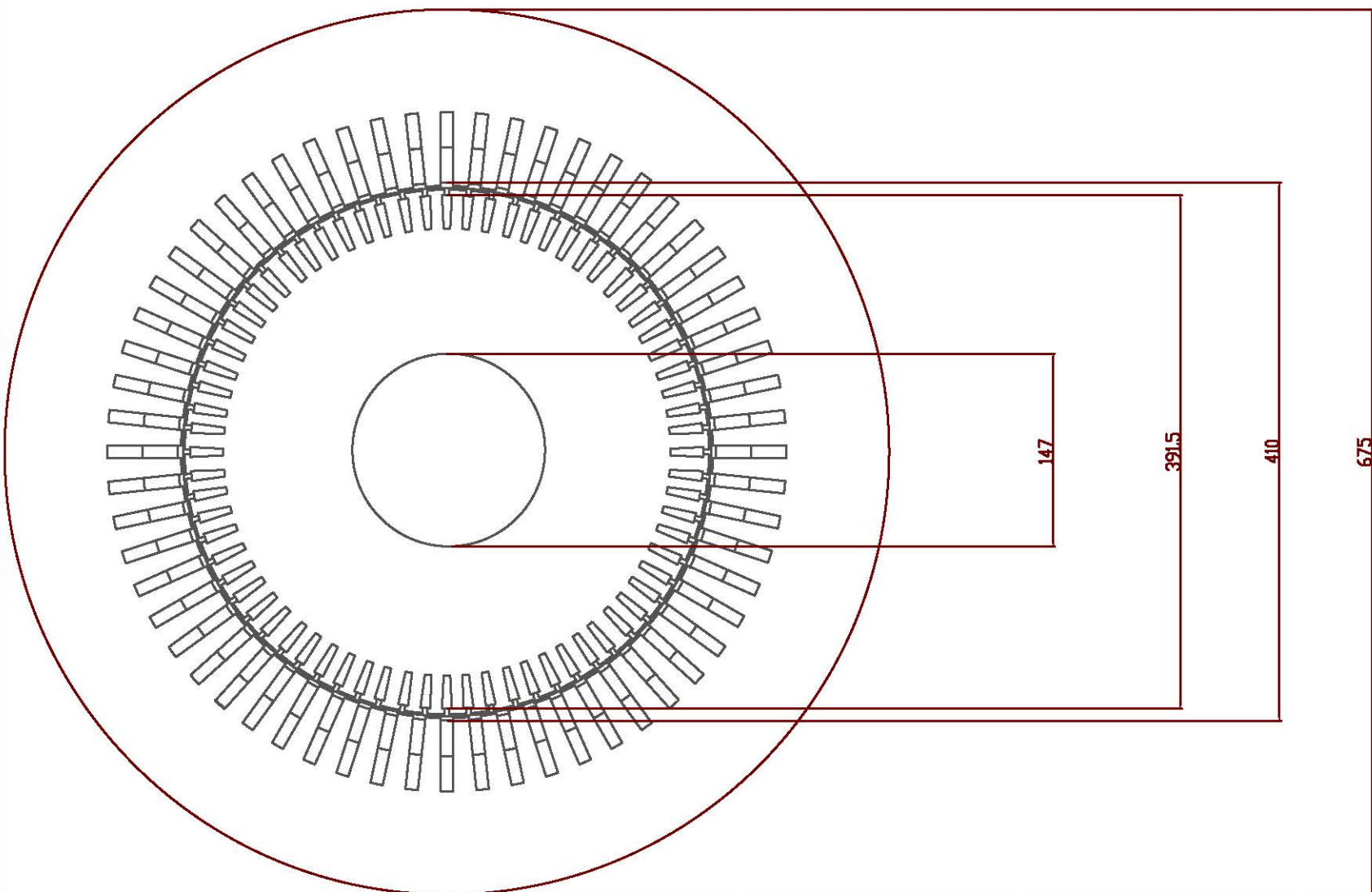
MOTOR 250 W	Marcel Martínez Arco
Secció total i ranures	Nº DE PLANO 1
ESCALA ORIGINAL 1/1 ESCALA REDUCIDA 2/1	



Estudi de la influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic

MOTOR 7,5 kW Marcel Martínez Arco

Secció total i ranures Nº DE PLANO
2



Estudi de la Influència dels paràmetres del circuit equivalent en les corbes característiques del motor d'inducció trifàsic

MOTOR 1020 kW	Marcel Martínez Arco
---------------	----------------------

Secció total i ranures	Nº DE PLANS 3
------------------------	------------------