



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

**Grau en Enginyeria Elèctrica**

**DISSENY D'UN MOTOR PER A MOTOCICLETA ELÈCTRICA**



**Memòria i Annexos**

**Autor:** Gabriel Perelló Burguera

**Director:** Ramon Bargalló

**Convocatòria:** Maig 2018

## **Resum**

El present document tracta el tema del disseny d'un motor amb una aplicació definida, la de complir la funció de moure un vehicle elèctric, en aquest cas una motocicleta.

Per tal de dur a terme el projecte en qüestió s'ha intentat crear un motor de baixa potència i alta eficiència per una motocicleta elèctrica. El disseny d'aquest motor s'ha dut a terme a partir d'uns càlculs inicials els quals han fet possible el seu posterior disseny i estudi. S'han fet simulacions amb un programa d'elements finits per tal de comprovar que el comportament de la màquina dissenyada és l'idoni. Al resultat final d'aquesta màquina s'hi ha arribat creat diferents dissenys, que a partir d'ells s'ha aconseguit arribar un motor definitiu el qual s'ha considerat adequat per l'aplicació que se li vol donar.

Tota la feina realitzada damunt aquesta màquina es veu resumida en les conclusions on s'ha aconseguit el comportament que es buscava des de l'inici i que presenta les característiques adequades.

## **Agraïments**

Es vol agrair al total de la Universitat Politècnica de Catalunya, per els mitjans i recursos facilitats a la comunitat estudiantil a l'hora de tirar endavant els estudis d'Enginyeria.

A més, donar les gràcies en especial a tot el departament d'enginyeria elèctrica per els ajuts donats durant els anys cursats a l'escola i per tenir sempre les portes obertes a atendre com ho han fet.

Gràcies a això, s'ha aconseguit tirar endavant aquest projecte que m'ha despertat una gran motivació a l'hora de realitzar-lo. La temàtica triada ha estat recolzada fortament per el director del projecte i per aquest motiu l'hi faig menció per tal d'agrair l'esforç fet amb tots els dubtes que han sorgit per poder treure aquesta feina.

## Glossari

<u>Símbol</u>	<u>Concepte</u>	<u>Unitats</u>
$A$	Densitat de corrent	A/m <sup>2</sup>
$A_f$	Àrea frontal del vehicle	m <sup>2</sup>
AC	Corrent Altern	-
$A_{cu}$	Àrea del coure per ranura, direcció axial	mm <sup>2</sup>
$A_{ran}$	Àrea de la ranura, direcció axial	mm <sup>2</sup>
$A_{ranura}$	Àrea de la ranura, direcció axial	mm <sup>2</sup>
$B$	Càrrega magnètica	T
CPSR	Constant Power Speed Range	-
$C_d$	Coefficient de fregament	-
$C_{fr}$	Coefficient de fregament	-
$\cos\varphi$	Factor de potència	-
DC	Corrent continu	-
$D_{cond}$	Diàmetre del conductor de coure	mm
$D_o$	Diàmetre interior de l'estator	m
$D_i$	Diàmetre interior del rotor	m
$D_s$	Diàmetre exterior de l'estator	m
$D_t$	Diàmetre total del motor	m
$E$	Força electromagnètica	V
EV	Vehicle electric	-
$f$	Freqüència específica	Hz
$F_{AD}$	Pèrdues aerodinàmiques	W
$F_d$	Força necessària sense pèrdues	W
$F_f$	Pèrdues per fregament	W
FMM	Força magnetomotriu	A
$F_{tot}$	Potència necessària per moure el vehicle	W
FP	Factor de potència	-
$g$	Entreferro	m
$g$	Gravetat	N
$g_{eq}$	Entreferro equivalent	mm
$H_c$	Força del camp magnètic	A/m
$h_s$	Llargària de la ranura	mm
$I_l$	Intensitat de funcionament de la màquina	A
$I_a$	Intensitat de fase A	A
$I_b$	Intensitat de fase B	A
$I_c$	Intensitat de fase C	A
$I_{màx}$	Intensitat màxima	A
JMAG	Software de disseny	-
$K_a$	Constant de Bertotti	-
$K_{apila}$	Factor d'apilament	-
$K_b$	Factor de bobinat	-

$K_c$	Factor de Carter	-
$K_f$	Constant de càlcul de Foucault	-
$K_h$	Constant de càlcul de pèrdues d'histerèsis	-
$K_s$	Relació àrea total/àrea imants	-
$K_w$	Factor de bobinat	-
$L$	Longitud del motor	mm
$L_{cap}$	Inductància al cap de bobina	H
$L_{cond}$	Longitud del fil conductor	m
$L_{imant}$	Longitud de l'imant	mm
$L_m$	Inductància principal de la màquina	H
$L_r$	Longitud de la roda (perímetre)	m
$L_{ran}$	Amplada de la ranura	mm
$L_{tot}$	Inductància total de la màquina	H
$m$	Nombre de fases de la màquina	-
$MCD$	Màxim comú divisor	-
$mcm$	Mínim comú múltiple	-
$M_{cog}$	Parell de cogging	N
$M_{rot}$	Massa del rotor	kg
$M_{sta}$	Massa de l'estator	kg
$M_{tot}$	Massa total del vehicle	kg
$nh$	Constant lligada a la inducció, expressió de Bertotti	-
$N_n$	Velocitat nominal	rpm
$N_f$	Nombre d'espines per fase	Uds.
$N_{pcog}$	Cicles de cogging per pol	Uds.
$N_r$	Nombre d'espines per ranura	Uds.
$N_{rcog}$	Cicles de cogging per ranura	Uds.
$N_{rps}$	Velocitat de la màquina	rps
$P$	Nombre de parell de pols	Uds.
$P_{cal_{feR}}$	Pèrdues calorífiques al rotor	W/m <sup>3</sup>
$P_{cal_{fes}}$	Pèrdues calorífiques a l'estator	W/m <sup>3</sup>
$P_{cu}$	Pèrdues calorífiques al coure	W/m <sup>3</sup>
$P_{cu}$	Pèrdues del coure	W
$P_{fe}$	Pèrdues totals del ferro	W
<b>PMSM</b>	Màquina Síncrona d'Imants Permanents	-
$P_n$	Potència nominal	W
$P$	Nombre de pols de la màquina	Uds.
$Q$	Nombre de ranures	H/m
$q$	Ranures per pol i fase	Uds.
$R_{cu}$	Resistència del coure	$\Omega$
$R_r$	Radi de la roda	m
$S_{cond}$	Secció del conductor	mm <sup>2</sup>
$S_{kk}$	Factor de càlcul de Carter	mm
$T_o$	Temperatura concreta	K
<b>TRV</b>	Parell per volum de rotor	Nm/3

$T.màx$	Temperatura màxima	°C
$U_d$	Component de voltatge directe	V
$U_q$	Component de voltatge de quadratura	V
$V$	Voltatge DC	V
$v_c$	Velocitat del ciclomotor	m/s
$V_{cu}$	Volum del coure	m <sup>3</sup>
$V_{fer}$	Volum del ferro del rotor	m <sup>3</sup>
$V_{fes}$	Volum del ferro de l'estator	m <sup>3</sup>
$vm$	Velocitat màxima	m/s
$V_r$	Velocitat relativa	m/s
$V_{rad}$	Velocitat relativa	rad/s
$V_v$	Velocitat del vent	m/s
$wd$	Amplada de la dent	m
$w_r$	Separació entre ranures, rotor	m
$w_{rr}$	Amplada de la ranura	m
$ws$	Separació entre ranures	m
$Z_r$	Fils conductors per ranura	Uds.
$Z_t$	Nombre total de fils conductors	Uds.
$\alpha_{elèc}$	Pas polar , graus elèctric	°
$\alpha_{mec}$	Pas polar, graus mecànics	°
$\beta_d$	Inducció al dalt del dent	T
$\beta_{ent}$	Inducció a l'entreferro	T
$\beta_{màx}$	Inducció màxima a l'entreferro	T
$\beta_{mig}$	Inducció mitjana al ferro	T
$\beta_r$	Inducció a l'ample del dent	T
$\beta_s$	Inducció al baix del dent	T
$\delta$	Entreferro	mm
$\delta_{òpt}$	Desplaçament òptim de l'imant, cogging	°
$\eta$	Rendiment	%
$\eta$	Rendiment	tant per u
$\mu_o$	Permeabilitat al buit	H/m
$\mu_r$	Permeabilitat relativa	H/m
$\lambda_{maq}$	Flux màxim de la màquina	Wb
$\rho$	Densitat de l'aire	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_o$	Resistivitat específica	Ω·m
$\rho_{20}$	Resistivitat a 20°C	Ω·m
$\rho_{100}$	Resistivitat a 100°C	Ω·m
$\rho_{imant}$	Densitat de l'imant	Kg/m <sup>3</sup>
$\tau_p$	Pas polar	m
$\gamma$	Relació altura/distància	-
$\Phi$	Flux magnètic	Wb
$\Phi_{màx}$	Flux màxim a l'entreferro	Wb



## TAULA DE CONTINGUTS

1.PREFACI .....	12
1.1. Origen del treball.....	12
1.2. Motivació.....	12
2. Introducció .....	14
2.1.OBJETIU DEL PROJECTE .....	14
2.1.1. Tria d'un motor ideal segons la seva aplicació.....	14
2.1.2. Disseny del motor .....	15
2.2.Abast del treball .....	16
2.3. Tipus de motors elèctrics .....	16
2.3.1. Motors de corrent continua.....	16
2.3.2. Motors de corrent alterna.....	17
2.3.3. Valoració d'opcions dels motors.....	18
3.MOTOR SÍNCRON D'IMANTS PERMANENTS .....	21
3.1. Selecció del motor i origen.....	21
3.2. Imants.....	22
3.2. Tipus de configuració dels motors.....	25
3.2.1.Bobinats .....	26
3.3.Ferro del motor .....	27
3.4. Justificació de la potència del motor .....	29
4.DISSENY ANALÍTIC DEL MOTOR.....	32
4.1. Introducció.....	32
4.2. Definició de la màquina.....	34
4.2.1. Definició geomètrica .....	34
4.2.2. Definició de pols i ranures.....	36
4.2.3. Estudi magnètic i elèctric. Pèrdues.....	40
4.2.4. Flux i inductàncies.....	43
4.3. Resum de les característiques principals calculades.....	44
5.DISSENY NUMÈRIC DEL MOTOR.....	46
5.1. Introducció .....	46
5.2. Disseny geomètric de la màquina .....	47
5.2.1. Bobinat de la màquina .....	48
5.3. Estudi magnètic del motor .....	51



5.3.1. Imants.....	53
5.3.2. Bobinats.....	54
5.3.3. Estudi magnètic del motor. Induccions i flux. ....	55
5.4. Parell de cogging .....	61
5.4.1. Descripció del parell de cogging.....	61
5.4.2. Càlcul del parell .....	61
5.5. Parell girant. Pèrdues de la màquina .....	65
5.5.1. Parell delta. Posició de parell màxim. ....	65
5.5.2. Parell girant de la màquina. ....	66
5.5.3. Pèrdues de la màquina.....	67
5.6. Càlcul d'inductàncies i flux. Característiques.....	70
5.6.1. Flux i inductància principal.....	70
5.6.2. Característiques.....	71
5.7. Estudi tèrmic .....	73
6.ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL.....	76
7.CONCLUSIONS .....	78
8. PRESSUPOST .....	80
9.BIBLIOGRAFIA.....	83
9.1.Referències bibliogràfiques.....	83
9.2. Bibliografia de consulta.....	84
<b>ANNEXOS.....</b>	<b>86</b>
<b>PLÀNOLS.....</b>	<b>146</b>



# 1. PREFACI

## 1.1. Origen del treball

Aquest treball neix dels coneixements adquirits durant tota la formació acadèmica de l'Escola Enginyeria de Barcelona Est, on s'han adquirit els coneixements necessaris per tal de poder desenvolupar el disseny d'una màquina elèctrica.

S'han avaluat tots els punts de l'estudi aplicant el saber adquirit durant els anys cursats a l'escola per tal de desenvolupar una feina completa i satisfactòria. Els vehicles elèctrics són part d'un futur imminent on la rellevància d'aquests anirà creixent any rere any i per tant s'ha volgut desenvolupar una feina completa sobre el disseny d'una màquina elèctrica, on la seva aplicació serà per una motocicleta, un transport còmode, útil i de baix cost.

## 1.2. Motivació

Actualment estem vivint en un món on la sostenibilitat està en boca de molta gent, es un tema que es sent parlar amb força i el qual ja fa molt de temps que pareix que està a l'ordre del dia, aspecte molt allunyat de la realitat que es viu. Aquest tema va lligat amb l'eficiència energètica que s'està buscant des de fa anys i que suposa acceptar una transició energètica en tots els àmbits de la nostra vida quotidiana, des de el més petit detall, com pot ser l'encesa d'un llum a casa fins a poder aconseguir un avió comercial que sigui capaç de viatjar amb una font energètica verda i eficient.

Des de fa més d'un segle, començant per la Segona Revolució Industrial, també es va viure una revolució del transport. Durant aquest període el cost dels transports va baixar, el que va permetre la integració dels mercats. En aquell temps es podia parlar de revolució per la capacitat de crear una xarxa de transport i poder comunicar els diferents països i els seus mercats, aquest fet va ser un dels principis del que avui en dia anomenem globalització.

A dia d'avui, el transport ha evolucionat encara més i ho segueix fent, cada vegada amb un tendència de creixement cada vegada més gran. Uns dels majors reptes que es presenten és el de poder aconseguir que aquest transport també formi part de la transició energètica, i a més, que sigui un pilar base dintre d'aquest procés.

En la nostra societat, s'ha estès l'ús del vehicle propi ja que proporciona més independència a l'usuari, aquest fet pot parèixer contradictori al terme de transició energètica, degut al consum que suposa que cada persona es mogui amb el seu vehicle propi, però assumint que això es una realitat viva, la solució pot aparèixer dissenyant vehicles demandants per la societat i fent que aquests vehicles a part de satisfer les necessitats siguin vehicles nets, energèticament parlant. Per tal d'aconseguir-ho s'ha de motivar a l'estudi del sector i una solució viable per un futur pròxim pot ser la implantació dels vehicles elèctrics i en aquest cas, el disseny d'una motocicleta elèctrica.

A continuació, es pot explicar que la creació d'una motocicleta elèctrica neix de la necessitat de donar a la població un vehicle "ecològic" i còmode adaptat a les futures necessitats.

En l'època que s'està vivint el pensament ecològic es de gran rellevància, i a més, tenint en compte la obsolescència de els denominats motors de combustió interna degut al seu baix rendiment, la dificultat que presenten per minimitzar les emissions de CO<sub>2</sub> y els problemes que presenten aquestes emissions en grans concentracions (grans ciutats). És fa lògic pensar en l'evolució del transport cap a maneres més eficients i respectuoses amb el medi ambient, sumant-li també la millora en el rendiment i la versatilitat que ens proporciona amb la seva construcció i aplicació.

En la actualitat, la aplicació de noves tecnologies (zones de càrrega, bateries més eficients, etc.) i l'esforç per part d'alguns sectors empresarials i per part de l'administració per a normalitzar i capacitar a la societat de l'ús d'aquests vehicles.

## 2. Introducció

Els vehicles elèctrics entren amb molta força a dintre del mercat automobilístic, en els últims anys s'han anat destinant cada vegada més recursos per a la investigació sobre nous vehicles elèctrics cada cop més eficients. La principal raó del viratge del mercat cap a nous objectius dintre del comerç del transport es la motivació cap a la sostenibilitat, ja que, any rere any s'estan implantant noves mesures per tal de potenciar els transport sense emissions de gasos d'efecte hivernacle.

Des de la segona revolució industrial, s'han fet grans avanços en tots els àmbits tecnològics, i per suposat, també dintre del món de la mobilitat i transport. Actualment s'està vivint una altre revolució dintre de tota la indústria, els grans avanços en el món de la informàtica i les telecomunicacions han creat una nova manera per la qual es guiarà la indústria del futur. Aquestes noves tecnologies que van apareixent també s'implanten dins el món de la mobilitat i s'apliquen tan per dur a terme el disseny del producte com per introduir-lo dintre del mateix.

Gràcies a totes aquestes noves tecnologies s'han pogut crear motors molt més eficients i s'ha donat la oportunitat de estudiar els existents amb molta més profunditat.

### 2.1.OBJETIU DEL PROJECTE

#### 2.1.1. Tria d'un motor ideal segons la seva aplicació.

A dia d'avui l'evolució dels motors elèctrics al llarg dels anys ha donat com a resultat una gran varietat de tecnologies amb distintes característiques i aplicacions, de les quals donen un ampli ventall de possibilitats i major flexibilitat a l'hora de crear noves màquines.

El primer objectiu del projecte es basa en l'estudi de les diferents possibilitats a les que es pot optar a l'hora de crear un motor el qual la seva aplicació es basi en la construcció d'un ciclomotor elèctric; bastant-se amb un primer moment amb les diferents característiques intrínseques envers de la seva rendibilitat.

Per aquest motiu es farà un primer estudi de les diferents possibilitats que sorgeixen, classificant les màquines de corrent CONTINU/ALTERN i posteriorment amb la diferenciació de màquines ASÍNCRONES/SÍNCRONES.



*Imatge2.1.- Ciclomotor elèctric monoplaça Xkuty 1500W, 48 V. Autonomia de 50 km i un pes de 45kg*

## 2.1.2. Disseny del motor

Una vegada s'hagi seleccionat el tipus de motor a dissenyar es pretén dissenyar la màquina i dur endavant l'estudi d'aquesta per comprovar que les característiques obtingudes són les adequades per l'aplicació triada.

El disseny del motor es desenvoluparà valorant diverses opcions i escollint la que més s'adapti a les funcionalitats que es busquen. D'aquesta manera es dissenyarà la màquina partint d'uns càlculs numèrics que ens permetran obtenir uns primers resultats que posteriorment serviran per el disseny de la xapa del motor i el seu estudi dintre del programa d'elements finis FEMM.

## 2.2. Abast del treball

- 1.-Estudiar les diferents propostes de motors elèctrics que estan al nostre abast per tal de valorar les diferents opcions i decidir quin serà el tipus de motor a dissenyar.
- 2.-Explicació de la elecció del motor i les seves aplicacions possibles d'aquest per tal de crear una visió del producte a dissenyar.
- 3.-Estudi dels materials que s'utilitzen per el disseny i construcció de la màquina i característiques d'aquests.
- 4.-Disseny analític de la màquina per tal d'obtenir uns primers resultats per poder iniciar el seu disseny dintre del programa d'elements finits
- 5.-Disseny numèric de la màquina per realitzar totes les simulacions pertinents i estudiar el comportament de la màquina.
- 6.-Anàlisi dels resultats de les simulacions i obtenció de les característiques de la màquina.
- 7.-Viabilitat i pressupost del projecte per tal de desenvolupar un prototip del motor dissenyat.

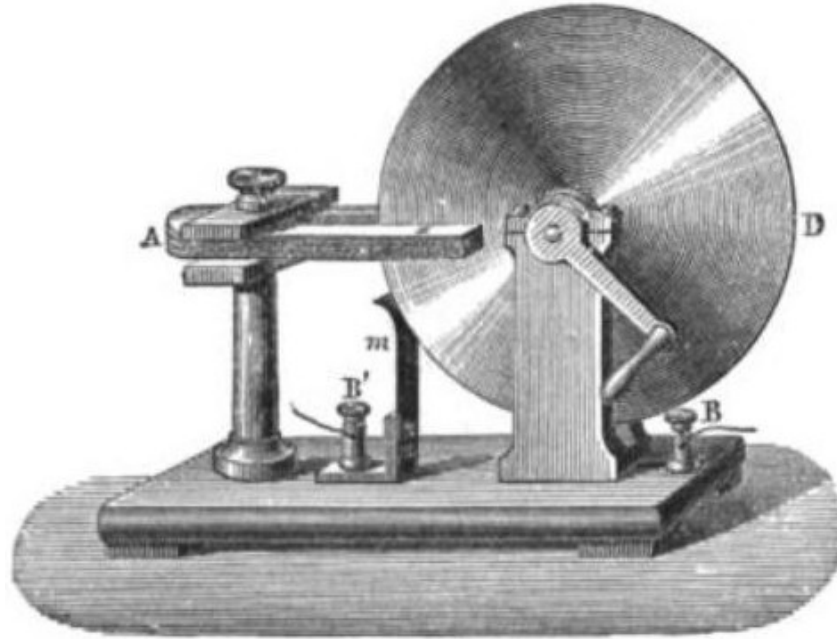
## 2.3. Tipus de motors elèctrics

Podem trobar molts de tipus diferents de motors elèctrics al mercat, i per tal de decidir quin tipus de motor es convenient dissenyar per el ciclomotor elèctric, cal conèixer i valorar-los, amb cada un dels avantatges i desavantatges que presenten

Els motors elèctrics els podem classificar segons el tipus de corrent elèctric amb el qual siguin alimentats, per tant podem dividir-los en DC (corrent continu) i AC (Corrent Altern)

### 2.3.1. Motors de corrent continua

Dintre d'aquesta categoria els podem classificar segons el tipus d'excitació de cada un: sèrie, independent, derivació i de imants permanents.



*Imatge 2.2.- Disc generador electromagnètic inventat per Michael Faraday l'any 1831. [The electric light, Emile Alglave]*

Amb el descobriment de la llei d'inducció electromagnètica feta per Faraday es comença la història de les màquines elèctriques; no serà fins uns quants anys més tard, a finals del segle XIX quan es comencen a desenvolupar els estudis pel desenvolupament de la màquina de corrent continu.

El primer període de desenvolupament de la màquina de corrent continu comença als anys 30 amb els estudis duts a terme per parts dels científics russos Lenz i Jacobi, eren màquines de excitació independent. No serà fins 20 anys més tard quan es dones pas a les màquines electromagnètiques de autoexcitació, les bipolars i les multipolars.

Una vegada arribats a la dècada dels 80 del segle XIX la màquina de corrent continu adquireix les característiques bàsiques de la construcció moderna.

### 2.3.2. Motors de corrent alterna

Els motors de corrent alterna, els quals es poden classificar, a part de per la manera d'excitació, per: velocitat de gir (síncrons, asíncrons), tipus de rotor i per el número de fases.

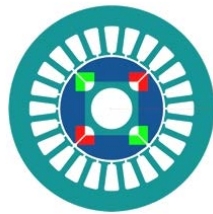
Degut a la gran varietat de motors elèctrics que podem trobar al mercat, basant-se amb els principals tipus de motors utilitzats en el disseny de vehicles elèctrics, s'ha fet una selecció d'aquests i s'ha fet una valoració de cada un.



### 2.3.3. Valoració d'opcions dels motors.

#### A) Motor DC d'excitació sèrie.

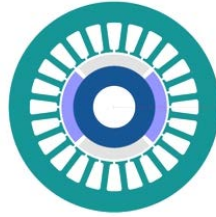
Els motors de CC per norma general es solen caracteritzar per presentar un molt bon rendiment, aquest tipus de motors tenen l'excitació del rotor en sèrie amb l'excitació dels bobinats de l'estator, per això, la intensitat que circula per l'inductor és la mateixa que consumeix l'induït. Aquest tipus de motor necessita molt poc corrent per fer girar el rotor, és un motor que no s'ha de fer treballar en buit ja que pot ser perillós. Amb aquest tipus de motor es pot variar fàcilment la càrrega variant l'alimentació que es subministra. És un motor que s'utilitza en aplicacions de transport com poden ser el metro o el tramvia, els quals sempre tindran càrrega. Aquests motors, tenen escombretes de carboni per tal de garantir la conversió mecànica de l'energia i això fa que la seva eficiència baixi i que tingui unes necessitats de manteniment periòdiques a causa de la fricció.



Imatge2.3.- Xapa d'una màquina de rotor interior amb alimentació sèrie [speed-emachines-design]

#### B) Motor DC *brushless* (sense escombretes)

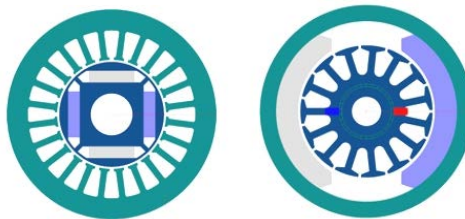
El motor de DC sense escombretes, es una màquina semblant a l'anterior, però la qual té el camp magnètic creat per imants permanents. D'aquesta manera, al eliminar un dels bobinats, elimines també pèrdues al fil de coure. És un motor amb una eficiència alta, en el qual també aconseguixes eliminar el problema de les escombretes i per tant també el seu manteniment. La part que rep el corrent es només el bobinat del rotor, que necessiten la intensitat per generar el moviment. Aquest motor es usat en aplicacions de baixa potència i volum petit. També, un dels problemes que presenta es que al no poder controlar l'excitació que rep el rotor dificulta el control de parell i velocitat de la màquina. És necessiten sensors per tal de poder controlar la posició i electrònica per modificar les condicions d'operació.



*Imatge2.4.- Xapa d'una màquina de rotor interior amb imants permanents, pols llisos [speed-emachines-design]*

### C) Motor síncron d'imants permanents(PMSM)

Aquest tipus de motor es molt semblant al motor de CC sense escombretes. Segueix la mateixa estructura, on els imants són els encarregats de crear el camp magnètic en l'estator. El motor PMSM és una mescla entre un motor d'inducció i el motor de DC sense escombretes, tal i com s'ha dit té els imants, però per altre banda, l'estructura de l'estator amb els bobinats construïts per produir una densitat de flux sinusoidal a l'espai d'aire de la màquina s'assembla a la d'un motor d'inducció. Aquests motors, avui en dia, estan dissenyats per ser més potents i a l'hora tenen menys massa i un menor moment d'inèrcia.



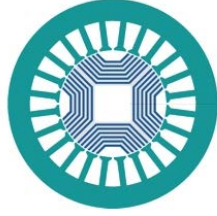
*Imatge2.5.-Imatge de l'esquerra: Xapa d'una màquina de rotor interior amb imants permanents, pols llisos. Imatge de la dreta: Xapa d'una màquina de rotor exterior amb imants permanents [speed-emachines-design]*

### D) Motor de reluctància

Existeixen molts de tipus de motors de reluctància, el que més s'utilitza per l'aplicació de vehicles elèctrics és el motor de reluctància commutada. En aquest tipus de motor el rotor consisteix en un element de ferro amb una forma amb que s'aconsegueix que el camp magnètic variï. Aquest motor es de més baix cost, ja que no necessita la introducció d'imants i es capaç de operar a altes velocitats i es capaç d'operar en altes temperatures ja que no hi ha perill de desmagnetització.

## *Disseny d'un motor per a motocicleta elèctrica*

Per altra banda, es un motor que presenta moltes vibracions mecàniques el que genera molt de soroll, i a més, necessita un sistema d'engegada.



*Imatge2.6.- Xapa d'una màquina de rotor interior de relucència, pols llisos [speed-emachines-design]*

# 3. MOTOR SÍNCRON D'IMANTS PERMANENTS

## 3.1. Selecció del motor i origen

El tipus de motor seleccionat per dissenyar serà el motor d'imants permanents (PMSM), és un motor sense escombretes, que les diferents fases dels bobinats de l'estator estan alimentats amb corrent sinusoidal. El corrent que circula per els bobinats es l'encarregat de crear el camp magnètic variable. Per altre banda, s'introdueixen els imants al rotor que creen un camp magnètic permanent; els imants introduïts són capaços de crear un parell en la màquina (parell de cogging), el qual s'estudiarà més endavant, i que es produeix a velocitat 0.

Els imants en aquest tipus motor es poden introduir de diferent manera i amb diferents formes, en el pròxim apartat s'expliquen els diferents tipus d'imants que podem trobar, estudiant-ne també la rendibilitat dels materials que trobem al mercat.

Quan la màquina es troba connectada a la xarxa, la velocitat del seu eix depèn directament de la freqüència d'aquesta i del nombre de pols. Aquest factor es part de l'origen del seu nom, ja que es diu que una màquina opera en sincronisme amb la xarxa.

Aquest tipus de màquines elèctriques tenen l'origen en els anys 1980s. L'interès en la recerca de noves aplicacions i característiques va aconseguir que sortissin a la llum nous materials magnètics com va ser l'imant creat pde NeFeBr (Neodimi, Ferro, Bor), aquest material presentava unes característiques magnètiques que fins al moment no s'havien trobat i que es van anar introduint dintre del mercat a poc a poc, degut al seu elevat preu inicial.

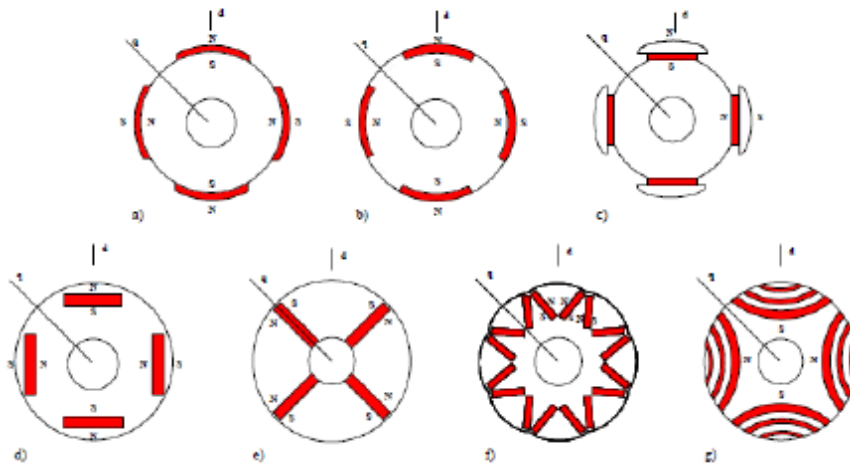
En un principi la inducció presentada per aquest tipus de material no superava els 1,2T i es van anar millorant les condicions del material fins a aconseguir uns valors de flux de 1,5 T. Un factor important el qual s'ha anat millorant en els darrers anys i que suposava una problemàtica important en els seus inicis va ser la temperatura, un factor a tenir molt en compte ja que la temperatura a la qual poden arribar els imants està limitada.

## 3.2. Imants

Les màquines PMSM poden presentar diferents distribucions dels imants en funció del tipus de màquina que es vulgui crear i les seves aplicacions. Una primera divisió dels tipus de màquina que es pot fer a l'hora de classificar-les segons la posició dels imants és la de rotor exterior o interior.

Per a cada tipus d'aplicació que es pugui imaginar, s'hi poden trobar diferents opcions amb les quals satisfer les necessitats demandades. El rotor de la màquina és l'element encarregat de realitzar la transferència mecànica, ja que de ell depèn la conversió d'energia elèctrica a mecànica.

Tal i com s'ha explicat anteriorment, es poden tenir màquines d'imants permanents de rotor interior i exterior, i dintre de les diferents opcions de distribució dels imants se'n mostren unes quantes a continuació:

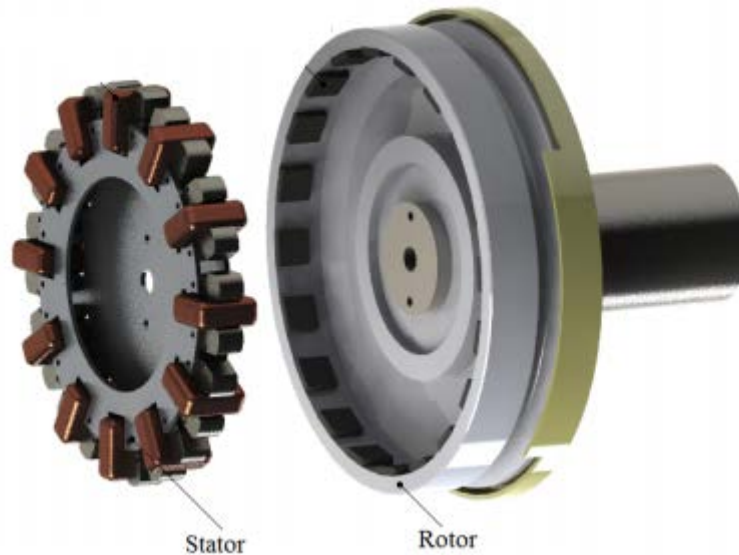


Imatge 3.1.-Diferents tipus de distribució per als imants (Part en vermell) [Heiklä 2002]

En la imatge anterior es pot veure que depenent de la distribució que es pugui tenir dels imants, la superfície coberta per aquest material magnètic serà superior, i per tant es fa possible l'augmentar o disminuir la concentració de flux magnètic en una zona. No obstant, el fet de que la màquina sigui de rotor exterior fa que la distribució dels imants sigui molt més uniforme.

La quantitat de pols que presentarà la màquina serà igual a la quantitat d'imants que es decideixi introduir per el seu disseny. La densitat de flux de l'imant permanent està limitada per la seva densitat de flux romanent, encara que al augmentar l'alçada de l'imant es pot reduir la influència del flux presentat per el bobinat a sobre de l'imant.

Teòricament, com més superfície d'imant es tingui en el rotor de la màquina es tindrà una major quantitat de flux, per tant al realitzar l'estudi teòric de màquina a dissenyar s'haurà de tenir en compte per tal d'aconseguir que el camp magnètic a les dents i a l'entreferro sigui l'adequat.



*Imatge3.2.- Motor de rotor de 12 parells de pols de rotor exterior.*

Tal i com s'ha parlat anteriorment aquest tipus de motor funciona gràcies al camp magnètic que creen els imants, que en aquest cas són els pols de màquina; per tant la selecció d'uns imants de qualitat i amb unes propietats el més semblants possibles al que busquem es una tasca important.

El tipus d'imant seleccionat és el de Neodimi (NeFeB), és un imant permanent, que fins a dia d'avui és la composició més potent que s'ha creat, i s'utilitza les aplicacions del món modern tal com la fabricació de discs durs o la fabricació de motors elèctrics.

Aquest tipus d'imant va néixer l'any 1982, quan General Motors i altres empreses del sector van descobrir el compost del Neodimi-Ferro-Bor, la investigació sobre els imants creats per aquest tipus de composició va ser motivada per l'alt cost dels imants que s'utilitzaven en la indústria fins a aquell moment (SmCo, ferrita,..).

Algunes de les propietats i característiques rellevants que es poden tenir en compte a l'hora de seleccionar el tipus de imant a emprar, depenent de l'aplicació per a la qual estigui destinat, es poden trobar a la següent taula:

Tipus d'imant	Romanència[T]	Hc [kA/m]	BH[kJ/m <sup>3</sup> ]	Tc(°C)
NdFeB(sinterizat)	1 – 1,4	750 - 2000	220	310 - 400
SmCo	0,6 – 0,7	600 - 1200	60 - 100	310 - 400
Alnico	0,6 – 1,4	275	10 – 80	700 - 860
Ferrita	0,2 – 0,4	100-300	10 - 40	450

Figura3.1.- Taula de propietats de diferents materials magnètics

L'evolució de la tecnologia ha fet que la producció d'aquest tipus d'imant permanent cada cop sigui més senzilla, per tant s'ha aconseguit abaratir el preu del material. A conseqüència de tots aquests avanços tecnològics, està clar que també s'han pogut fer noves configuracions de màquines i millorar amb l'eficiència d'aquestes.

Del mateix imant permanent de NdFeB, n'han nascut diversos tipus que varien les característiques de l'imant i amb aquestes característiques també en varia el preu.

Características magnéticas del imán sinterizado de NdFeB									
Grado	Remanence		Fuerza del Coercivity		Fuerza coactiva intrínseca		Producto máximo de la energía ( BH ) máximo		temperatura de funcionamiento máximo.
	Br	kilo Gauss	Hcb	kA/m	kA/m	kOe	kJ/m <sup>3</sup>	MGOe	
N27	1030-1080	10.3-10.8	≥796	≥10.0	≥955	≥12	199-231	25-29	80 °C
N30	1080-1130	10.8-11.3	≥796	≥10.0	≥955	≥12	223-247	28-31	80 °C
N33	1130-1170	11.3-11.7	≥836	≥10.5	≥955	≥12	247-271	31-34	80 °C
N35	1170-1220	11.7-12.2	≥868	≥10.9	≥955	≥12	263-287	33-36	80 °C
N38	1220-1250	12.2-12.5	≥899	≥11.3	≥955	≥12	287-310	36-39	80 °C
N40	1250-1280	12.5-12.8	≥907	≥11.4	≥955	≥12	302-326	38-41	80 °C
N42	1280-1320	12.8-13.2	≥915	≥11.5	≥955	≥12	318-342	40-43	80 °C
N45	1320-1380	13.2-13.8	≥923	≥11.6	≥955	≥12	342-366	43-46	80 °C
N48	1380-1420	13.8-14.2	≥923	≥11.6	≥876	≥12	366-390	46-49	80 °C
N50	1400-1450	14.0-14.5	≥796	≥10.0	≥876	≥11	382-406	48-51	80 °C
N52	1430-1480	14.3-14.8	≥796	≥10.0	≥876	≥11	398-422	50-53	80 °C
30M	1080-1130	10.8-11.3	≥796	≥10.0	≥1114	≥14	223-247	28-31	100 °C
33M	1130-1170	11.3-11.7	≥836	≥10.5	≥1114	≥14	247-263	31-33	100 °C
35M	1170-1220	11.7-12.2	≥868	≥10.9	≥1114	≥14	263-287	33-36	100 °C
38M	1220-1250	12.2-12.5	≥899	≥11.3	≥1114	≥14	287-310	36-39	100 °C
40M	1250-1280	12.5-12.8	≥923	≥11.6	≥1114	≥14	302-326	38-41	100 °C
42M	1280-1320	12.8-13.2	≥955	≥12.0	≥1114	≥14	318-342	40-43	100 °C
45M	1320-1380	13.2-13.8	≥995	≥12.5	≥1114	≥14	342-366	43-46	100 °C
48M	1360-1430	13.6-14.3	≥1027	≥12.9	≥1114	≥14	366-390	46-49	100 °C
50M	1400-1450	14.0-14.5	≥1033	≥13.0	≥1114	≥14	382-406	48-51	100 °C
30H	1080-1130	10.8-11.3	≥796	≥10.0	≥1353	≥17	223-247	28-31	120 °C
33H	1130-1170	11.3-11.7	≥836	≥10.5	≥1353	≥17	247-271	31-34	120 °C
35H	1170-1220	11.7-12.2	≥868	≥10.9	≥1353	≥17	263-287	33-36	120 °C
38H	1220-1250	12.2-12.5	≥899	≥11.3	≥1353	≥17	287-310	36-39	120 °C
40H	1250-1280	12.5-12.8	≥923	≥11.6	≥1353	≥17	302-326	38-41	120 °C
42H	1280-1320	12.8-13.2	≥955	≥12.0	≥1353	≥17	318-342	40-43	120 °C
45H	1300-1360	13-13.6	≥963	≥12.1	≥1353	≥17	326-358	43-46	120 °C

48H	1370-1430	13.7-14.3	≥995	≥12.5	≥1353	≥17	366-390	46-49	120 °C
30SH	1080-1130	10.8-11.3	≥804	≥10.1	≥1592	≥20	223-247	28-31	150 °C
33SH	1130-1170	11.3-11.7	≥844	≥10.6	≥1592	≥20	247-271	31-34	150 °C
35SH	1170-1220	11.7-12.2	≥876	≥11.0	≥1592	≥20	263-287	33-36	150 °C
38SH	1220-1250	12.2-12.5	≥907	≥11.4	≥1592	≥20	287-310	36-39	150 °C
40SH	1240-1280	12.5-12.8	≥939	≥11.8	≥1592	≥20	302-326	38-41	150 °C
42SH	1280-1320	12.8-13.2	≥987	≥12.4	≥1592	≥20	318-342	40-43	150 °C
45SH	1320-1380	13.2-13.8	≥1003	≥12.6	≥1592	≥20	342-366	43-46	150 °C
28UH	1020-1080	10.2-10.8	≥764	≥9.6	≥1990	≥25	207-231	26-29	180 °C
30UH	1080-1130	10.8-11.3	≥812	≥10.2	≥1990	≥25	223-247	28-31	180 °C
33UH	1130-1170	11.3-11.7	≥852	≥10.7	≥1990	≥25	247-271	31-34	180 °C
35UH	1180-1220	11.8-12.2	≥860	≥10.8	≥1990	≥25	263-287	33-36	180 °C
38UH	1220-1250	12.2-12.5	≥876	≥11.0	≥1990	≥25	287-310	36-39	180 °C
40UH	1240-1280	12.5-12.8	≥899	≥11.3	≥1990	≥25	302-326	38-41	180 °C
28EH	1040-1090	10.4-10.9	≥780	≥9.8	≥2388	≥30	207-231	26-29	200 °C
30EH	1080-1130	10.8-11.3	≥812	≥10.2	≥2388	≥30	223-247	28-31	200 °C
33EH	1130-1170	11.3-11.7	≥836	≥10.5	≥2388	≥30	247-271	31-34	200 °C
35EH	1170-1220	11.7-12.2	≥876	≥11.0	≥2388	≥30	263-287	33-36	200 °C
38EH	1220-1250	12.2-12.5	≥899	≥11.3	≥2388	≥30	287-310	36-39	200 °C

**Características físicas de los imanes sinterizados de NdFeB**

Imatge3.3- Taula de propietats de diferents tipus de NeFeB sinteritzats [Shangai Jingmagnets Industrial].

En el cas del disseny del motor s'ha seleccionat el tipus 40 M ja que és un material que presenta les característiques que es busquen i que no té un preu excessivament alt, per tant s'ha considerat que serà idoni per a la configuració del motor dissenyat.

## 3.2. Tipus de configuració dels motors.

Cercant un tipus de motor per una aplicació concreta es poden trobar moltes variables per tal de dissenyar i configurar el motor, sigui en la geometria, en els bobinats o en la manera de transmetre i crear els camps magnètics corresponents.

En el cas del disseny del motor, tal i com s'ha explicat, s'ha seleccionat la configuració de motor de imants permanents, degut a les característiques que presenta i les necessitats que es busquen cobrir. En aquest cas podem trobar dos tipus de configuracions en el motor, podent ser un motor de rotor interior, el qual es tractaria d'un motor on es tenen els imants a la part de dins del motor i els bobinats a la part de fora; o el cas de motor de rotor exterior, el qual trobem els imants a la part externa de la maquina i els bobinats es troben a la part interior. Amb l'opció de crear el motor amb el rotor exterior s'aconsegueix estalviar pèrdues mecàniques ja que el sistema de transmissió mecànica del parell es realitza directament des del mateix rotor, sense necessitat d'introduir cap mecanisme de transmissió, com podria ser un eix en el cas del rotor interior.



L'elecció de la màquina amb rotor exterior és la utilitzada en els casos de vehicles elèctrics ja que la finalitat del disseny es la de introduir el motor dins de la roda i que aquest, realitzi la transmissió de parell directament, rotor-roda.

### 3.2.1. Bobinats

Primer de tot es centra l'estudi en la configuració dels bobinats del motors i el primer paràmetre a tenir en compte prové d'una expressió (3.1) la qual el seu resultat ha de ser un nombre enter perquè la configuració sigui viable, en cas contrari, la configuració triada seria errònia.

$$\frac{Q}{m \cdot MCD(Q, p)} = n^{\circ} \text{enter} \quad (3.1)$$

*On:*

*Q, nombre de ranures*

*m, nombre de fases, seran 3*

*p, nombre de pols*

Una vegada s'hagi comprovat que el nombre resultant de l'expressió es enter es pot continuar amb l'estudi per tal de trobar un bobinat idoni. Podem trobar dos tipus de bobinats que es classifiquen en concentrats o distribuït. A continuació es descriu cada tipus de bobinat:

**-Bobinat concentrat:** el bobinat concentrat és la configuració en la qual cada bobina està enrotllada a una sola ranura. Aquest tipus de configuració presenta l'avantatge de que l'aïllament a realitzar entres bobines es simplifica, a més, presenta un parell de cogging petit. També cal dir que al tenir els caps de les bobines més curtes (menys *coure*) es minimitzen les pèrdues de Cooper.

**-Bobinat distribuït:** Aquest tipus de bobinat a diferència del concentrat es distribueix per més d'una ranura del motor, aquests tipus de configuració dels bobinats es sol dur a terme en els casos en que la màquina presenta molts d'harmònics i d'aquesta manera s'aconsegueixen reduir.

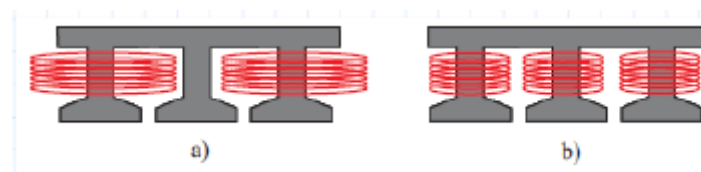
Per tal de poder saber si el bobinat a realitzar serà concentrat o distribuït es pot fer a partir de la següent expressió, on el resultat de **q** determinarà el tipus de configuració a seguir.

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} \quad (3.2)$$

Es poden donar dos casos que determinin el tipus de bobinat:

- 1er)  $q = n^{\circ}$  enter, el bobinat serà distribuït.
- 2n)  $q = n^{\circ}$  decimal, el bobinat serà concentrat.

Per tal de determinar el bobinat idoni de la màquina existeixen diferents mètodes possibles de càlcul. Però per tal de agilitzar i facilitar els càlculs també es poden utilitzar alguns softwares que realitzen la distribució dels bobinats, en aquest cas s'utilitza el software *Koil*.



Imatge3.4.- a) Bobinat distribuït. b) Bobinat concentrat.

Ranures (Q)	24
Pols (p)	28
q	0,285
Factor de bobinat	0,933
mcm (Q,p)	168
MCD (Q,p)	2

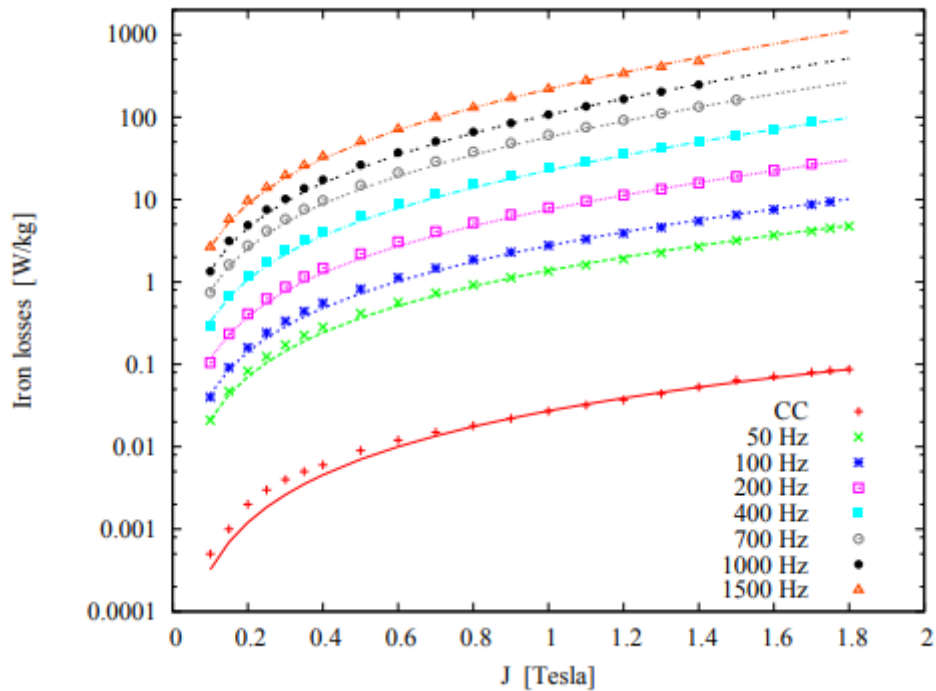
Figura3.2.- Taula de resultats de la combinació de pols i ranures

### 3.3.Ferro del motor

El ferro és un dels elements principals dels que formen el motor, ja que es troba tan en el rotor com en l'estator i suposa el material que es troba en més superfície i volum en la composició del motor. Aquest material presenta unes característiques magnètiques i elèctriques importantíssimes en benefici del funcionament del motor.

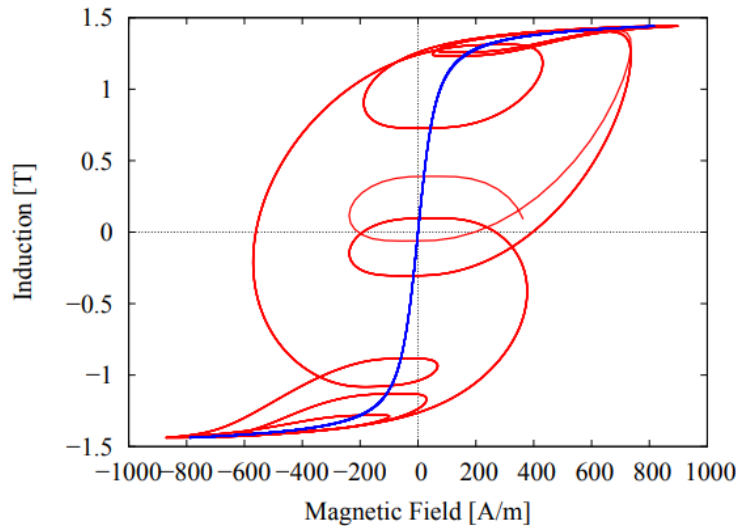
Aquest material anirà separat per xapes, per tant la seva formació es durà a terme ajuntant les xapes mitjançant silicona, d'aquesta manera s'aconseguirà tot el conjunt de ferro de la màquina.

El tipus de ferro seleccionat per aquest motor es el M250-50A, aquest ferro s'ha estudiat per tal de poder obtenir les pèrdues teòriques que presentarà a l'hora del funcionament normal de la màquina. I també, s'han hagut de fer servir les seves característiques per poder aplicar el model de Bertotti.



Imatge3.5.- Pèrdues per W/kg del ferro M250-50A a diferents freqüències de treball.  
[ArcelorMittal 2017]

Tal i com es pot observar en la Imatge3.5 les pèrdues del ferro van amb augment en funció de la freqüència de treball, per tant serà un factor a tenir en compte a l'hora de realitzar els càlculs.



Imatge3.6.- Cicle d'histèresis (B-H) en presència de grans harmònics al funcionament.

[ArcelorMittal 2017]

Les pèrdues per histèresis també seran estudiades als càlculs i es tindran en compte a l'hora de realitzar les simulacions. Els valors d'aquestes pèrdues també s'extrauran amb el mètode de Bertotti.

### 3.4. Justificació de la potència del motor

Per tal de poder definir i justificar la potència del motor dissenyat s'ha realitzat aquesta part, per trobar la potència que subministrarà el motor al vehicle de manera directa. En aquesta expressió es busca la força necessària sense tenir en compte cap tipus de pèrdua:

$$F_d = g \cdot M_{tot} \cdot v_c \cdot Y \quad [W] \quad (3.3)$$

On:

*M<sub>tot</sub>*: Massa total del vehicle

*V<sub>c</sub>*: Velocitat del ciclomotor

*g*: Gravetat

*Y: relació entre altura guanyada/metres recorreguts*

El vehicle presentarà dos tipus de pèrdues a l'hora d'entrar en moviment, que seran les pèrdues per fregament de les rodes amb el sòl i les pèrdues per el contacte amb el vent.

Les pèrdues aerodinàmiques presentades per l'actuació del vent sobre el vehicle es poden determinar amb la següent expressió:

$$F_{AD} = 0,5 \cdot \rho \cdot C_d \cdot A_f \cdot (v_c + v_v)^2 \quad [W] \quad (3.4)$$

*On:*

*$\rho$  : Densitat de l'aire (kg/m<sup>3</sup>)*

*C<sub>d</sub>: Coeficient de fregament (0,2<C<sub>d</sub><0,4)*

*A<sub>f</sub>: Àrea frontal del vehicle*

*V<sub>v</sub>: Velocitat del vent*

A continuació es definirà l'expressió amb la qual es poden definir les pèrdues per fregament del vehicle:

$$F_f = g \cdot M \cdot C_{fr} \quad [W] \quad (3.5)$$

*On, C<sub>fr</sub> es el coeficient de fricció amb el sòl i M és la massa total a moure*

Per tant, es pot definir la potència de càrrega de carretera del motor amb la següent expressió:

$$F_{tot} = F_d + F_{AD} + F_f \quad [W] \quad (3.6)$$

El resultat de l'expressió 3.6. serà la que definirà la força total necessària que s'ha de subministrat per tal de poder moure el vehicle dissenyat.

Massa del ciclomotor					
Conductor [kg]	Bateries[kg]	Motor [kg]	Chasis [kg]	Altres [kg]	Massa total [kg]
70	65,7	9,7	40,5	10	195,9

Figura3.3.- Taula resum dels pesos aproximats que formen la massa total a moure.

# 4. DISSENY ANALÍTIC DEL MOTOR.

## 4.1. Introducció.

Per tal de realitzar el disseny de la màquina, es parteix de la decisió de quin tipus de funció es vol complir. Les necessitats per aquest cas es que es tracta d'un motor per una motocicleta de baixa potència i que per tant es marquen els requisits a partir d'uns paràmetres inicials

Amb les adjudicacions dels materials de la màquina donades es pot començar a calcular el motor desitjat, tenint en compte els paràmetres predeterminats que presenten els materials a utilitzar:

MATERIAL	CONSTANT	VALOR
Coure	Densitat ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ) ( $\rho_c$ )	8900
	Resistivitat ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) ( $\rho_o$ )	0,01786
Ferro	Densitat [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ] ( $\rho_{fe}$ )	8000
	Cte. pèrdues d'histèresis ( $K_{hyst}$ )	0,0215
Imants	Densitat [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ] ( $\rho_{im}$ )	7500
	Densitat de flux [T] ( $\beta_r$ )	1,15

	Permeabilitat relativa ( $\mu_r$ )	1,31
--	------------------------------------	------

Figura4.1.- Taula resum dels paràmetres inicials dels materials utilitzats.

Una vegada s'han determinat les constants dels materials que s'utilitzaran per el disseny del motor també es fixen les característiques de funcionament nominals, que s'elegeixen en funció de l'ús de la màquina, com son la potència, el parell i la velocitat.

<b>Màquina</b>	Motor síncron d'imants permanents (CA)
<b>Tipus de màquina</b>	Rotor exterior, 3 fases.
<b>Potència nominal</b>	2200 W
<b>Velocitat nominal</b>	700 rpm
<b>Freqüència</b>	163 Hz
<b>Tensió de línia</b>	20 V
<b>Parell nominal</b>	30 N·m

Figura4.1.- Taula resum dels paràmetres inicials dels materials utilitzats

Sabent que les característiques de la màquina seran es especificades a les taules anteriors, es pot saber la eficiència que es pretén arribar a partir de la normativa de de motors IEC-60034, que especifica que el rendiment d'un motor de la potència de 2,2kW que compren la seva velocitat entre 600 i 900 rpm serà de 87,2%. D'aquesta manera es pot calcular la intensitat necessària per alimentar al motor.

$$I_n = \frac{P_n}{m \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos\varphi} \quad [A] \quad (4.1)$$

On:

$I_n$ : Corrent nominal [A]

$U_n$ : Tensió de fase [V]

$m$ : Nombre de fases

$\eta$ : Rendiment en tant per u

$\cos \varphi$ : Factor de potència



## 4.2. Definició de la màquina

### 4.2.1. Definició geomètrica

Per tal de començar a dissenyar la màquina es necessiten uns càlculs inicials per poder trobar els paràmetres geomètrics teòrics que la definiran.

En primer lloc s'ha establert el radi de la roda per la qual es dissenya la màquina, aquesta mesura serveix per tal d'establir un límit en la construcció d'aquest motor i la decisió d'alguns paràmetres geomètrics.

El perímetre de la roda inicial del qual s'ha partit ( $L_r$ ):

$$L_r = 2 \cdot R_r \cdot \pi \quad [m] \quad (4.2)$$

On  $R_r$  és el radi de la roda

A partir del perímetre de la roda i establint la velocitat màxima ( $v_m$ ) per la qual es dissenya la màquina es pot determinar les revolucions per segons ( $N_{rps}$ ).

$$N_{rps} = \frac{v_m}{L_r} \quad [rps] \quad (4.3)$$

Aquestes revolucions per segons es passen a revolucions per minut, i sabent que en les màquines síncrones la freqüència de treball ( $f$ ) és dependent del nombre de pols de la màquina i de les revolucions, s'obté:

$$f = \frac{p \cdot N_{rpm}}{60} \quad [Hz] \quad (4.4)$$

On  $p$  és el nombre de parell de pols i  $N_{rpm}$  la velocitat nominal en revolucions per minut

Una vegada s'ha obtingut la freqüència de treball es pot saber la velocitat angular de la màquina ( $w$ )

$$w = 2 \cdot \pi \cdot f \quad \left[ \frac{rad}{s} \right] \quad (4.5)$$

També, a partir de la potència ( $P_n$ ) establerta i la velocitat nominal calculada ( $N_{rpm}$ ) es pot fer un primer càlcul del parell nominal ( $M_n$ ) que s'obindrà de la màquina.

$$M_n = \frac{P_n}{2 \cdot \pi \cdot \frac{N_{rpm}}{60}} \quad [N] \quad (4.6)$$

Per tal de continuar amb el disseny de la màquina s'ha aplicat un mètode d'estudi anomenat TRV (*Torque per Rotor Volum*), que s'utilitza per tal de calcular el volum del rotor de la màquina. Aquest mètode es pot aplicar per qualsevol tipus de màquina la qual es vulgui fer un disseny.

Per el motors de imants permanents de ferrita com el que es dissenya l'interval de valors que s'han d'assignar està comprès entre 14-42 kN/m<sup>3</sup>.

Per poder dur el mètode endavant, s'han d'assignar uns valors de densitat de corrent (A) i del flux magnètic ( $\phi$ ) que es poden determinar a partir de les següents equacions:

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot N_f \cdot I}{\pi \cdot Di} \quad \left[ \frac{A}{m} \right] \quad (4.7)$$

On  $m$  és el nombre de fases,  $N_f$  es el nombre de conductors per ranura de la màquina, la  $I$  és el corrent eficaç i el  $Di$  és el diàmetre interior de l'entreferro.

El flux magnètic es pot descriure amb l'equació següent, que dependrà de la inducció a l'entreferro

$$\phi = B \cdot \frac{\pi \cdot Di \cdot L}{2 \cdot p} \quad [Wb] \quad (4.8)$$

On  $B$  és la inducció magnètica i la  $L$  es la longitud considerada de la màquina.

A continuació s'ha de descriure la equació per tal de definir la característica electromotriu del motor, que servirà per lligar amb les equacions anteriors i poder obtenir el TRV corresponent.

$$E = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot k_w \cdot N_f \cdot \phi \cdot f \quad [V] \quad (4.9)$$

On  $k_w$  és el factor de bobinat assignat,  $N_f$  es el nombre de espires per ranura que pertoca,  $\phi$  és el flux de la màquina a l'entreferro i  $Di$  es el valor del diàmetre d'aquest.

A partir de la combinació de les tres equacions anteriorment descrites, i introduint el valor que hi pertoca en cada una es pot resoldre l'equació del TRV i obtenir-ne el valor adequat per continuar amb l'estudi.

$$TRV = \frac{Mn}{V_r} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot k_w \cdot A \cdot B \quad \left[ \frac{N \cdot m}{m^3} \right] \quad (4.10)$$

On  $Mn$  és el valor del parell nominal i  $V_r$  és el volum del rotor

Amb el número del parell nominal calculat s'extreu el TRV que és necessari per tal de obtenir un valor teòric del volum del rotor. Aquest valor analític, clar està, que a l'hora de realitzar el disseny numèric pot sofrir canvis degut als estudis amb el programa d'elements finits.

Una vegada s'ha aconseguit treure un valor correcte de TRV es pot continuar amb l'estudi i començar a definir les mesures geomètriques que definiran la màquina. Per tal de poder treure el diàmetre interior de l'entreferro es pot aplicar la següent expressió:

$$D_i = \sqrt{\frac{V_r \cdot 4}{\pi \cdot L}} \quad [m] \quad (4.11)$$

I una vegada s'ha extret el valor d'aquest diàmetre es pot saber quin serà el diàmetre que definirà l'estator, ja que el valor de l'entreferro ( $\delta$ ) ja s'ha concretat anteriorment.

$$D_s = D_i - 2 \cdot \delta \quad [m] \quad (4.12)$$

On  $\delta$  és la mesura de l'entreferro.

Una vegada que es tenen les dues mesures del diàmetre del rotor i l'estator, es pot avançar establint els límits magnètics i tèrmics que li donarem a la màquina i d'aquesta manera poder continuar amb el càlcul geomètric de les altres parts.

## 4.2.2. Definició de pols i ranures

Per tal de definir el nombre de ranures i pols que formaran la màquina dissenyada, s'ha de tenir en compte que no totes les combinacions que es pugin presentar són possibles. Per tal de comprovar que la combinació sigui encertada es pot utilitzar la següent expressió:

$$\frac{Q}{m \cdot \text{MCD}(Q, p)} = n^{\text{enter}} \quad (4.13)$$

On  $Q$  és el nombre de ranures, i s'extreu el Màxim Comú Divisor (MCD) per poder aplicar-la

Una vegada s'ha aconseguit la combinació de ranures/pols adequada s'ha de saber quantes ranures per pol i fase es tindran. Aquest valor també es rellevant ja que serà fonamental a l'hora de dissenyar el bobinat.

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} \left[ \frac{\text{ranures}}{\text{pol} \cdot \text{fase}} \right] \quad (4.14)$$

Com que el bobinat serà de tipus concentrat, tal i com s'ha explicat anteriorment, aquest valor estarà per davall de la unitat.

A més, a partir de la combinació de ranures/pols que s'estableixi en la màquina, és podrà definir el nombre de cicles del parell de cogging que presentarà, ja que aquest valor dependrà totalment d'aquesta geometria del motor.

El nombre de cicles de cogging per pol de la màquina ve definit per la següent expressió:

$$np_{cog} = \frac{p}{MCD(Q,p)} \quad (4.15)$$

El nombre de cicles de cogging per ranura de la màquina es calcula de la següent manera:

$$nr_{cog} = \frac{mcm(Q,p)}{Q} \quad (4.16)$$

Cal destacar que es convenient el buscar una combinació de pols i ranures que presenti un  $mcm(Q,p)$  de valor numèric alt i que el valor de del  $MCD(Q,p)$  sigui de valor baix ja que durà com a conseqüència que el parell de cogging serà el més reduït possible.

A més cal saber el pas polar que presentarà la màquina, que serà el recorregut que té entre pol i pol.

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D_i}{2 \cdot p} [m] \quad (4.17)$$

*On  $D_i$  és diàmetre interior del rotor.*

El pas polar que presentarà la màquina també es pot expressar tan en graus mecànics com en graus elèctric per tal de facilitar la concepció de la ubicació de cada un dels pols.

$$\alpha_{mec} = \frac{360}{Q} [^\circ] \quad (4.18)$$

$$\alpha_{elèc} = \alpha_{mec} \cdot p [^\circ] \quad (4.19)$$

Una vegada definida la posició de pols i ranures en el total de la màquina, s'han de definir les mides geomètriques que tindran. Per tal de poder seguir amb l'estudi s'ha

de fer una tria de les característiques que presentaran els materials utilitzats. Per això, sabent que els imants que s'utilitzaran seran del tipus de NeFeB 40, s'agafarà la seva densitat i intensitat de camp magnètic particulars i a més es farà una suposició del flux magnètic que presentarà. A més, s'ha de partir d'una primera referència geomètrica que en aquest serà relacionada amb l'amplada de l'imant seleccionat, que s'ha calculat a partir del factor  $k_s$ , que és la relació entre l'àrea total del pas polar i l'àrea ocupada per l'imant.

Per tal de poder calcular l'amplada de l'imant es fan unes aproximacions inicials, en les quals es parteix del coneixement que el flux magnètic a l'entreferro serà d'un valor aproximat a la unitat. D'aquesta manera es pot treure a la permeabilitat relativa que presentarà l'imant

$$\mu_{imant} = \frac{\beta_{imant}}{\mu_o \cdot Hc} \left[ \frac{H}{m} \right] \quad (4.20)$$

On  $\beta_{imant}$  és el valor del flux magnètic de l'imant,  $\mu_o$  és la permeabilitat en el buit i  $Hc$  és la intensitat de camp magnètic

Amb el valor de la permeabilitat de l'imant es pot treure la primera mesura geomètrica que definirà aquesta peça, el seu gruix.

$$L_{imant} = \frac{\mu_{imant} \cdot \delta}{\frac{\beta_{imant}}{\beta_{ent}} - k_s} \quad [m] \quad (4.21)$$

On  $\beta_{imant}$  és el valor del flux magnètic de l'imant,  $k_s$  és la relació de l'àrea total de la màquina i l'àrea dels imants i  $\beta_{ent}$  és el valor del flux magnètic a l'entreferro.

A continuació es realitzen els càlculs per acabar de tenir la informació necessària sobre el bobinat. S'han d'extreure els valors del nombre d'espores per fase i espores per ranura, tenint en compte que el bobinat es realitzarà en paral·lel. Ara s'ha de calcular el valor de la inducció màxima a l'entreferro:

$$\beta_{màx} = \frac{4}{\pi} \cdot \beta_{ent} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot k_s\right) \quad [T] \quad (4.22)$$

I a més, també serà necessari conèixer quin serà el valor màxim del flux a l'entreferro:

$$\Phi_{màx} = \frac{2}{\pi} \cdot \beta_{màx} \cdot \frac{\pi \cdot D_i}{2 \cdot p} \cdot L \quad [Wb] \quad (4.23)$$

Amb el valor del factor de bobinat extret amb anterioritat  $k_w=0,933$ , sabent que el valor de la tensió d'alimentació serà de 20V i la freqüència de funcionament de la màquina serà a 163Hz, és pot trobar el valor del nombre d'espines per fase que tindrà la màquina:

$$N_f = \frac{U}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot k_w \cdot \Phi_{m\grave{a}x} \cdot f} \quad (4.24)$$

On  $U$  és el valor de la tensió d'alimentació,  $k_w$  és el factor de bobinat  $f$  és la freqüència de funcionament de la màquina

Una vegada es sap el valor de les espines per fase, també es pot calcular amb facilitat el nombre d'espines per ranura que tindrà el bobinat.

$$N_r = \frac{m \cdot N_f}{Q} \quad (4.25)$$

Amb els valors de totes les espines per fase que es tindran, es pot saber quin serà el nombre total dels fils conductors en el bobinat de la màquina

$$Z_t = m \cdot N_f \quad (4.26)$$

Després d'haver calculat el tipus de configuració que presenta el bobinat s'han de saber les mesures que definiran les dents i ranures de la màquina.

Per poder calcular les dimensions de les ranures i les dents del motor, es farà a partir d'uns valors màxims i mínims establerts d'inducció a cada una de les regions.

D'aquesta manera es pot identificar un rang de valors en els quals es pot trobar les dimensions idònies per cada cas. L'expressió usada per calcular l'ample del dent és la següent:

$$vd = \frac{2 \cdot p \cdot \Phi_{m\grave{a}x}}{Q \cdot \beta d \cdot L} \quad [m] \quad (4.27)$$

On  $\beta d$  és el valor de la inducció del dent en cada una de les iteracions.

L'expressió usada per calcular la separació entre ranures en l'estator és la següent:

$$v_s = \frac{\beta_{ent}}{2} \cdot \frac{\tau_p}{\beta_s} \quad [m] \quad (4.28)$$

On  $\beta_s$  és el valor de la inducció de la ranura en cada una de les iteracions i  $\beta_{ent}$  el valor de la inducció a l'entreferro.

Per acabar s'ha de calcular la separació entre ranures vist des del rotor, que serà equivalent a tota l'amplada superior del dent i es fa amb la següent expressió:

$$w_r = \frac{\beta_{ent}}{2} \cdot \frac{\tau_p}{\beta_r} \quad [m] \quad (4.29)$$

On  $\beta_r$  és el valor de la inducció del dent en cada una de les iteracions.

Amb tots aquests càlculs descrits anteriorment es tenen totes les mides geomètriques necessaris per tal de construir el motor, aquestes mesures són d'un valor aproximat al que finalment es tindran, ja que amb l'estudi posterior amb el programa FEMM es pot acotar molt millor cada una d'elles per obtenir els resultats de inducció i flux correctes en cada una de les regions.

Així doncs, el diàmetre total que presentarà la màquina dissenyada s'extraurà amb la següent expressió:

$$Dt = D_s + 2 \cdot \delta + 2 \cdot L_{imant} + 2 \quad [m] \quad (4.30)$$

Diàmetre interior del rotor ( $D_i$ ) [m]	0,294
Diàmetre de l'estator ( $D_s$ ) [m]	0,292
Gruix de l'imant ( $L_{imant}$ ) [m]	0,0029
Amplada de les dents ( $w_d$ ) [m]	0,013
Separació entre ranures, rotor ( $w_r$ ) [m]	0,015
Amplada de la ranura ( $w_{rr}$ ) [m]	0,025
Separació entre ranures, estator ( $w_s$ ) [m]	0,013
Diàmetre total de la màquina ( $D_t$ ) [m]	0,323

Figura4.2.- Taula resum de les mides de la màquina.

### 4.2.3. Estudi magnètic i elèctric. Pèrdues.

Fent referència a la normativa de motors IE5, on s'especifica que una màquina la quan compren la seva velocitat entre 600-900rpm ha de tenir un rendiment mínim de 87,2%, i sabent els valors de la tensió d'alimentació i la potència que entrega la màquina, es pot extreure el valor del corrent nominal.

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \eta \cdot \cos\varphi} \quad [A] \quad (4.31)$$

On s'ha suposat un FP aproximat.

Amb el valor del corrent nominal de la màquina i amb la densitat de corrent que s'ha suposat al principi del disseny analític podem treure un primer valor de la secció que presentarà el conductor de coure.

$$S_{cond} = \frac{I_n}{A} \quad [mm^2] \quad (4.32)$$

I a partir de la secció es pot extreure el diàmetre d'aquest conductor.

$$D_{cond} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot S_{cond}} \quad [mm] \quad (4.33)$$

A continuació, amb el valor d'aquest diàmetre es pot saber l'àrea del coure ( $A_{cu}$ ) en cada una de les ranures, que serà un valor d'especial importància a l'hora de calcular les pèrdues de la màquina

$$A_{cu} = Z_r \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{cond}^2 \quad [mm^2] \quad (4.34)$$

#### 4.2.3.1. Pèrdues al coure

Una vegada s'ha aconseguit l'àrea del coure a la màquina, es podran saber les pèrdues que aquesta presentarà aquesta a la regió especificada. Per tal de saber les pèrdues que es tindran als conductors s'han de suposar unes temperatures específiques de treball de la màquina, per tal de saber el valor de la resistivitat d'aquest material que depèn directament de la temperatura.

$$\rho_o = \rho_{20} \cdot \frac{235 + T_o}{235 + 293} \quad [\Omega \cdot m] \quad (4.35)$$

On  $\rho_o$  es la resistivitat a una temperatura donada,  $\rho_{20}$  és la resistivitat coneguda del coure a 20°C i  $T_o$  és una valor de temperatura específic

A més, cal saber la llargària del conductor ( $L_{cond}$ ), que amb els valors de l'amplada de la màquina i la separació de les ranures es pot treure fàcilment:



$$L_{cond} = 2 \cdot L + 2 \cdot w_{rr} \quad [m] \quad (4.36)$$

Amb la llargària del fil conductor i la seva resistivitat, es pot calcular la resistència ( $R_{cu}$ ) que tindrà per fase de cada bobina, tenint en compte els conductors que hi haurà a cada ranura.

$$R_{cu} = \rho_o \cdot \frac{Zr \cdot L_{cond}}{\frac{\pi}{4} \cdot D_{cond}^2} \quad [\Omega] \quad (4.37)$$

I una vegada es té aquest valor de la resistència, es podran calcular les pèrdues teòriques que té la màquina al coure ( $P_{cu}$ ).

$$P_{cu} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_{cu} \quad [W] \quad (4.38)$$

#### 4.2.3.2. Pèrdues al ferro

Les pèrdues al ferro es calculen a partir del mètode de Bertotti, on les pèrdues es poden descompondre en tres categories:

-Les pèrdues per histèresis, proporcionals a la freqüència ( $f$ ), que són la component més important de les pèrdues magnètiques a baixa freqüència.

-Les pèrdues de Foucault, proporcionals a  $f^2$

-Les pèrdues per excés, que són proporcionals a  $f^{2/3}$

L'expressió per tal de definir aquest tipus de pèrdues és la que es troba a continuació:

$$P_{fe} = [kh \cdot f \cdot B^2 + kc \cdot (f \cdot B)^2 + ka \cdot (f \cdot B)^{\frac{3}{2}}] \cdot V \quad [W] \quad (4.39)$$

On  $f$  és la freqüència,  $B$  la inducció de la màquina,  $V$  el volum de la màquina i  $kh$ ,  $kc$  i  $ka$ , són les constants de Bertotti que es calculen específicament per cada tipus d'acer i freqüència de treball.

#### 4.2.4. Flux i inductàncies.

La inductància principal de la màquina és un factor molt important a obtenir per tal de treure les característiques de funcionament d'aquesta. Per tal de obtenir el valor de la inductància total de la màquina serà necessari el càlcul de valor de la inductància principal i a el càlcul de valor de la inductància al caps de bobina.

S'ha de tenir en compte que la longitud del flux magnètic a l'entreferro serà major que la longitud mecànica d'aquest ja que les línies de flux viatjaran des de la ranura fins a les dents i formaran part d'aquest flux que es calcula.

Per tal de trobar el factor de Carter ( $k_c$ ), que és el factor que relaciona aquestes dues mesures, existeixen diferents mètodes, on els resultats que s'extreuen són molts semblants entre si, a continuació es realitzarà el càlcul a partir d'un d'ells. A continuació es determinarà l'efecte de franja ( $\gamma$ ) que es necessita per poder treure el valor  $K_c$ .

$$\gamma = \frac{\left(\frac{L_{ran}}{L_{imant} + g}\right)^2}{5 + \left(\frac{L_{ran}}{L_{imant} + g}\right)} \quad (4.40)$$

On  $L_{ran}$  és l'amplada de la ranura,  $L_{imant}$  és el gruix i de l'imant i  $g$  és la grandària de l'entreferro

A més, es necessita saber la distància de pas entre les ranures i per això es calcularà el factor  $S_{kk}$

$$S_{kk} = \frac{\pi \cdot D_i}{Q} \quad [m] \quad (4.41)$$

Amb els valors de l'efecte de franja i la distància de pas entre les ranures ja es pot aconseguir el factor de Carter.

$$K_c = \frac{S_{kk}}{S_{kk} - \gamma \cdot (g + L_{imant})} \quad (4.42)$$

#### **Càlcul de la inductància principal ( $L_m$ )**

Per poder treure el valor de la inductància primer de tot cal saber quin es el valor de flux principal que hi actua.

$$\lambda_{m\grave{a}q} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\tau_p}{p \cdot \left(g + \frac{L_{imant}}{\mu_{imant}}\right) \cdot cs \cdot K_c} \quad [Wb] \quad (4.43)$$

On  $\mu_r$  és la permeabilitat relativa i  $cs$  és el factor de saturació que tindrà valor unitari.

A partir d'aquest valor del flux es pot saber quina serà la inductància principal de la màquina.

$$L_m = \mu_o \cdot (N_r \cdot k_w)^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot \lambda_{m\grave{a}q} \cdot L \quad [H] \quad (4.44)$$

On  $\mu_o$  és la permeabilitat al buit.

A continuació i amb el valor de la inductància principal extret, es pot saber quina serà la inductància principal de la màquina realitzant la suma de la inductància principal i el resultat del càlcul de la inductància als caps de bobinat

$$L_{cap} = \mu_o \cdot (N_r \cdot k_w)^2 \cdot \frac{2}{p \cdot q} \cdot \lambda_{m\grave{a}q} \cdot L \quad [H] \quad (4.45)$$

$$L_{tot} = L_m + L_{cap} \quad [H] \quad (4.46)$$

### 4.3. Resum de les característiques principals calculades

A continuació es realitza un resum per tal de tenir els conceptes que es consideren importants per tal de dur endavant el disseny del motor.

Diàmetre interior del rotor ( $D_i$ ) [m]	0,294
Diàmetre de l'estator ( $D_s$ ) [m]	0,292
Gruix de l'imant ( $L_{imant}$ ) [m]	0,0029
Amplada de les dents ( $w_d$ ) [m]	0,013
Separació entre ranures, rotor ( $w_r$ ) [m]	0,015
Amplada de la ranura ( $w_{rr}$ ) [m]	0,025
Separació entre ranures, estator ( $w_s$ ) [m]	0,013

Diàmetre total de la màquina ( $D_t$ ) [m]	0,324
Diàmetre del conductor ( $D_{cond}$ ) [mm]	2,52
Resistència del coure ( $R_{cu}$ ) [ $\Omega$ ]	0,004
Flux principal ( $\lambda_{màq}$ ) [Wb]	0,466
Inductància principal ( $L_m$ ) [H]	$1,58 \cdot 10^{-6}$
Inductància total ( $L_{tot}$ ) [H]	$1,73 \cdot 10^{-6}$

Figura4.3.- Característiques calculades que defineixen la màquina.

# 5. DISSENY NUMÈRIC DEL MOTOR.

## 5.1. Introducció

En aquesta part es descriu tot el procés d'estudi que es duu a terme per tal de comprovar les característiques que presenta la màquina. L'estudi es basa amb l'aplicació de teoremes elèctrics i magnètics per tal de poder comprovar que els resultats que es consideren en un principi a partir d'uns valors donats es compleixen a l'hora de realitzar les simulacions pertinents en cada cas. Una vegada realitzats els estudis amb el programa d'elements finits es podrà dur a terme una comparació dels resultats obtinguts de manera teòrica per tal de poder valorar totes els aspectes que es considerin interessant i essencials per el disseny de la màquina.

En primer lloc, abans de realitzar els estudis d'elements finits, s'ha creat la xapa del motor a dissenyar amb el JMAG, s'han valorat i dut a terme diferents opcions i variacions en la geometria del motor, ja que abans d'exportar un disseny definitiu per estudiar amb el programa d'elements finits, es poden observar uns resultats anticipats aproximats amb JMAG, d'aquesta manera una vegada es realitza l'estudi es pot partir de la referència de característiques que el mateix programa facilita.

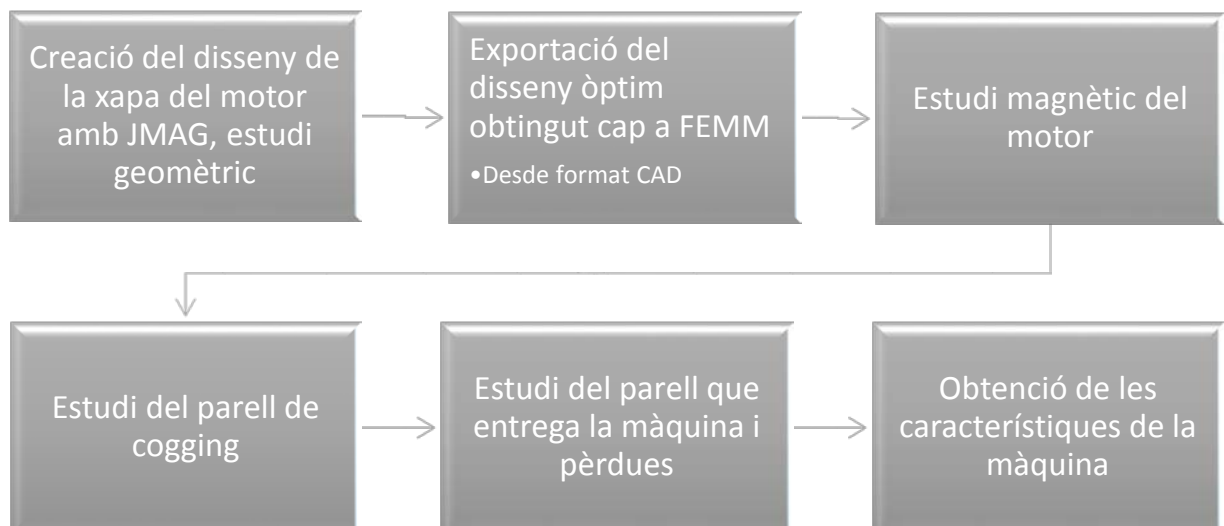


Figura5.1.- Organigrama dels passos a seguir per dissenyar el motor.

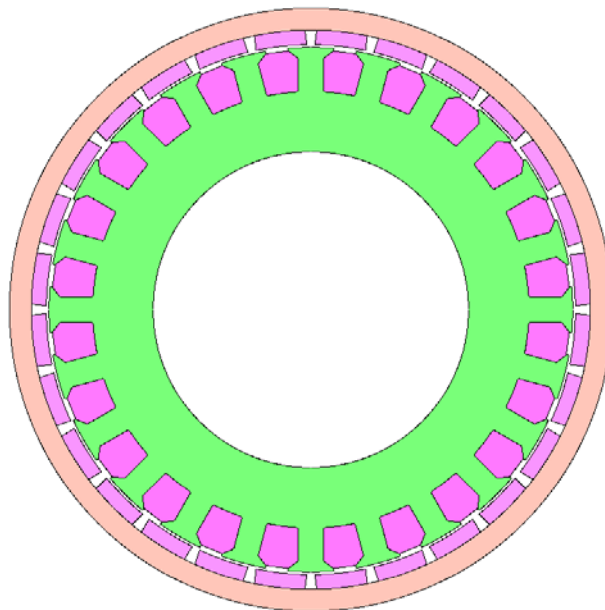
Amb el procés seguit, des de el programa d'elements finits (FEMM) es realitzen tots els estudis que s'esmenten en el gràfic de procediment anterior.

## 5.2. Disseny geomètric de la màquina

En aquesta part es defineix com es dibuixa la xapa del motor que posteriorment serà analitzada per el programa d'elements finits.

En primer lloc, amb els resultats numèrics obtinguts amb el JMAG, s'introdueixen totes les mides teòriques que presenta la màquina en qüestió. Es dibuixa la màquina amb els paràmetres establert, donant mesures a cada una de les parts: estator, rotor, ranures i imants.

Una vegada el JMAG presenta el disseny amb els paràmetres inserits, es defineixen els materials que formaran cada una de les parts de la màquina i se lis assignen les característiques magnètiques i elèctriques corresponents. D'aquesta manera s'obté una primera visualització de la xapa.



Imatge5.1.- Xapa creada a partir de JMAG

A la xapa obtinguda amb els paràmetres geomètrics se li ha d'assignar els valors de tensió i corrent que li pertocquen, i a més, el tipus de bobinat. D'aquesta manera ja

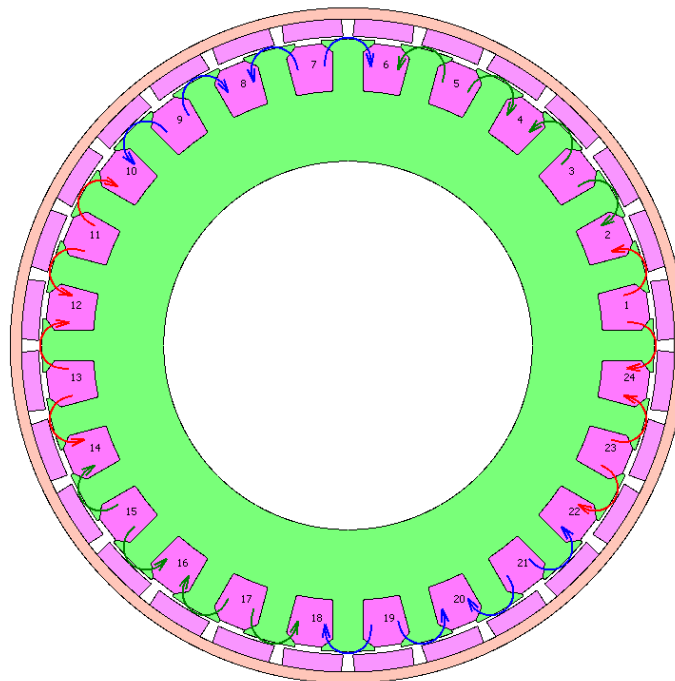
s'aconsegueixen tenir unes primeres corbes característiques que ens permeten veure si la màquina presenta les condicions que es busquen per tal de continuar amb l'estudi.

### 5.2.1. Bobinat de la màquina

Una vegada es té el dibuix de la màquina amb les mesures desitjades s'ha d'introduir els valors que defineixen el bobinat.

La restricció que es decideix seguir per tal de que el bobinat sigui l'adequat per la màquina és que el factor d'ompliment de la ranura (% de superfície ocupada per la bobina) no superi el 75%. En un primer estudi i introduint les 14 espires per fase calculades a l'anàlisi analític, es comprova que aquest factor es veu superat i es busca una alternativa per tal de reduir-lo i que compleixi la restricció establerta.

Per tant es decideix que el nombre d'espires serà de 12 i per tal de facilitar-ne el bobinat s'usaran dos fils conductors de 1,25mm de diàmetre envers de un sol fil de 2,5mm; d'aquesta manera s'aconsegueix facilitar i agilitzar el treball de bobinat.



*Imatge 5.2.- Bobinats assignats per fase. Cada color de les fletxes corbes (vermell, blau i verd) és correspon a cada una de les tres fases que han d'alimentar la màquina.*

La distribució que es visualitza a la imatge anterior és la distribució que posteriorment s'ha de definir en el programa d'elements finits. Caracteritzant cada una de les bobines amb la seva direcció correcte d'entrada i sortida de la ranura.

A continuació es mostra una taula resum dels paràmetres principals descrits per el disseny de la màquina a JMAG.

Ranures	24
Pols	28
Nombre d'espines	12
Freqüència(Hz)	163,3
Diàmetre exterior estator(mm)	344
Diàmetre exterior rotor(mm)	299

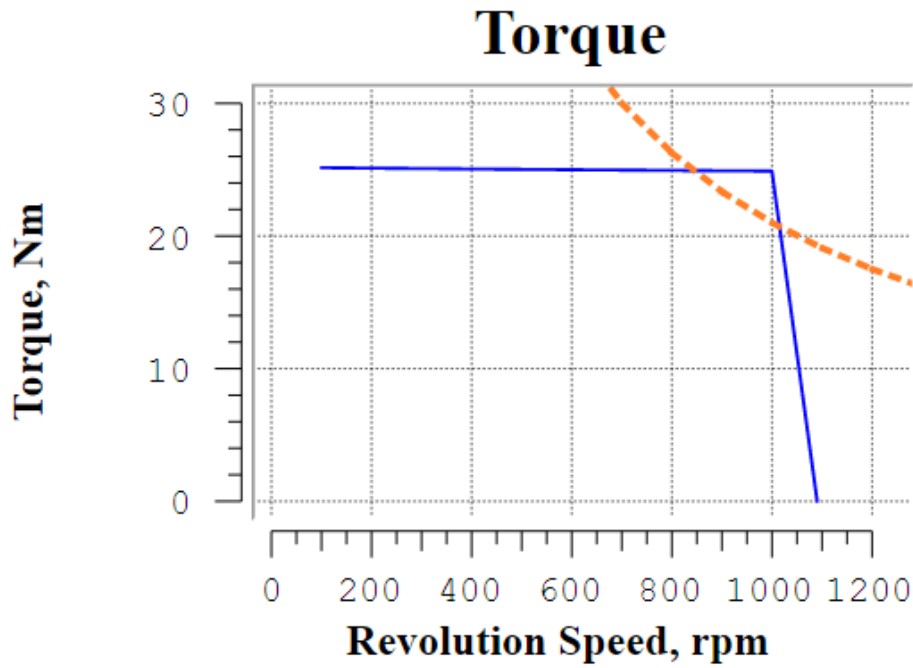
*Figura5.2.- Mesures introduïdes per el disseny amb JMAG*

Alguna de les mesures introduïdes ja varien mínimament de les teòriques calculades, ja que en el moment del disseny i gràcies a les corbes característiques que et proporciona el mateix programa de JMAG, és pot operar amb un marge de variació en les mesures teòriques per aconseguir que el resultat sigui el més semblant possible a la funció per la qual es dissenya la màquina.

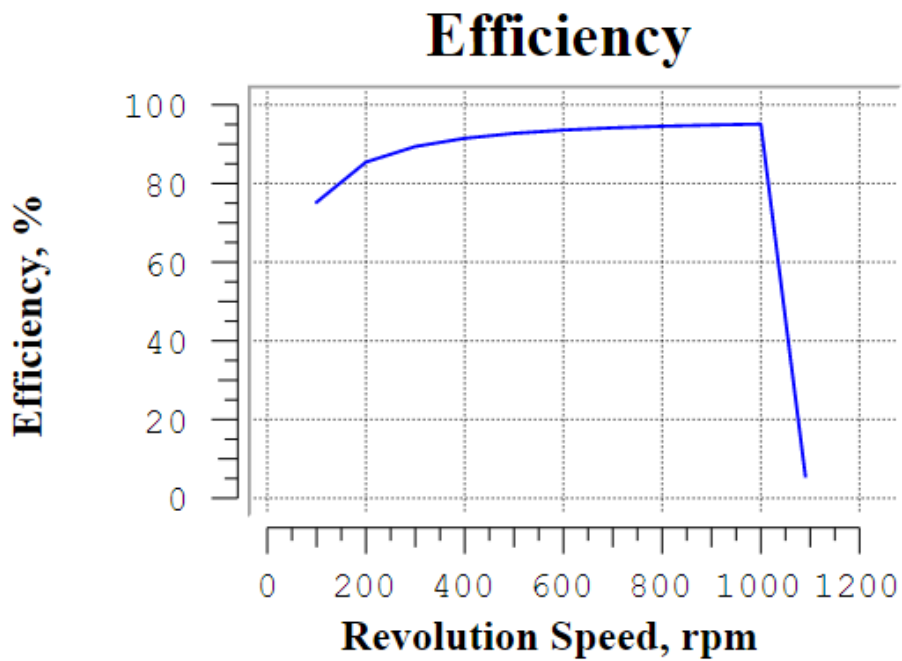
Un dels paràmetres variats que ha influït en el disseny és el ferro del rotor, que amb els resultats teòrics obtinguts el flux que presenta es massa alt i per tant s'ha ampliat la seva superfície per tal de disminuir aquesta concentració de flux en la zona. Aquest fet serà explicat de forma més específica en l'apartat de l'estudi magnètic de la màquina.

A continuació s'exposen les corbes característiques d'interès obtingudes amb JMAG.

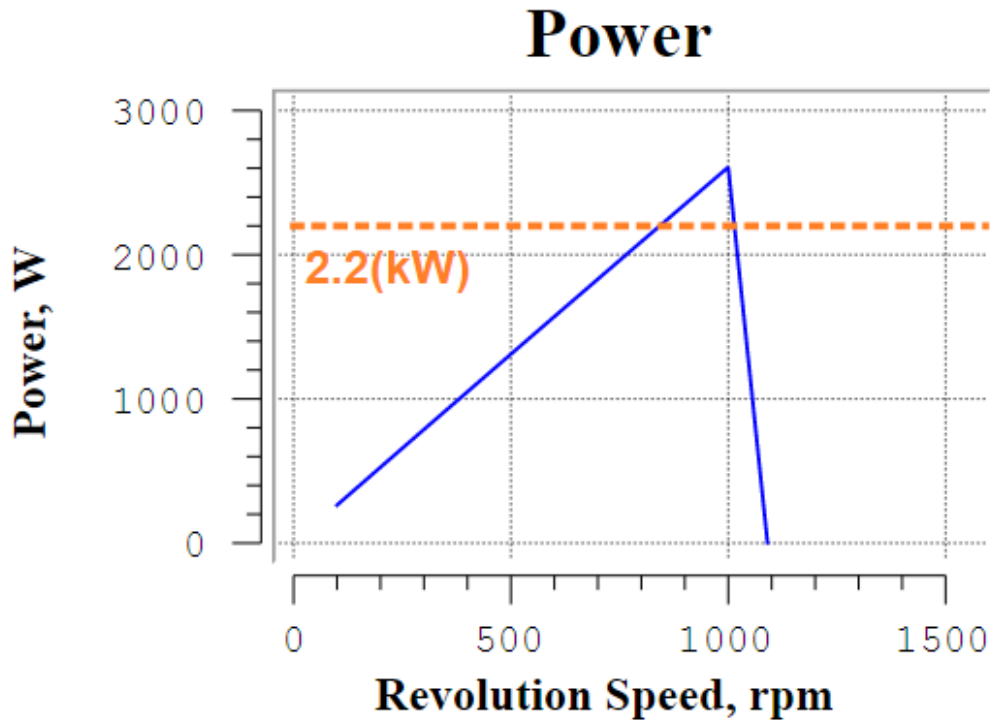




Imatge5.3.- Corba Parell-Velocitat obtinguda amb JMAG



Imatge5.4.- Corba Eficiència-Velocitat obtinguda amb JMAG

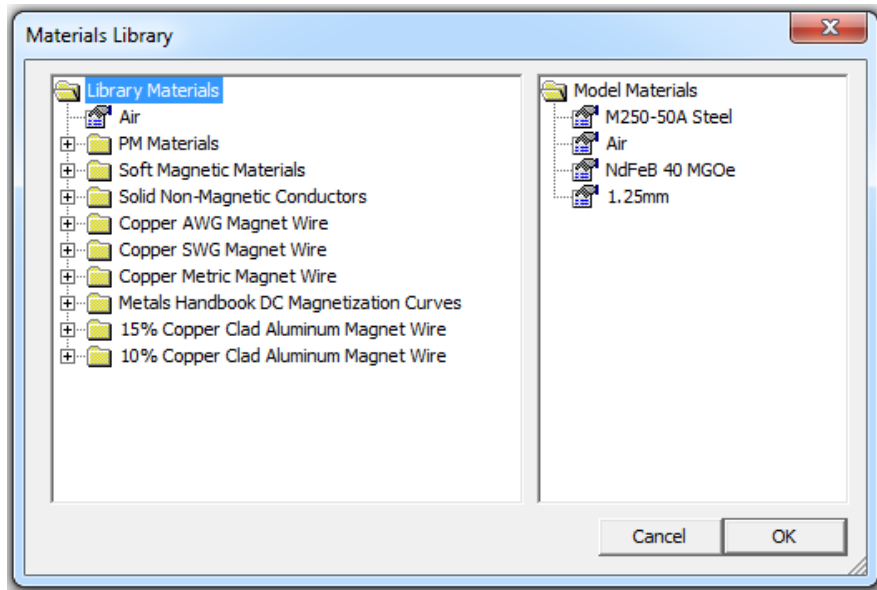


Imatge5.5.- Corba Potència-Velocitat obtinguda amb JMAG

### 5.3. Estudi magnètic del motor

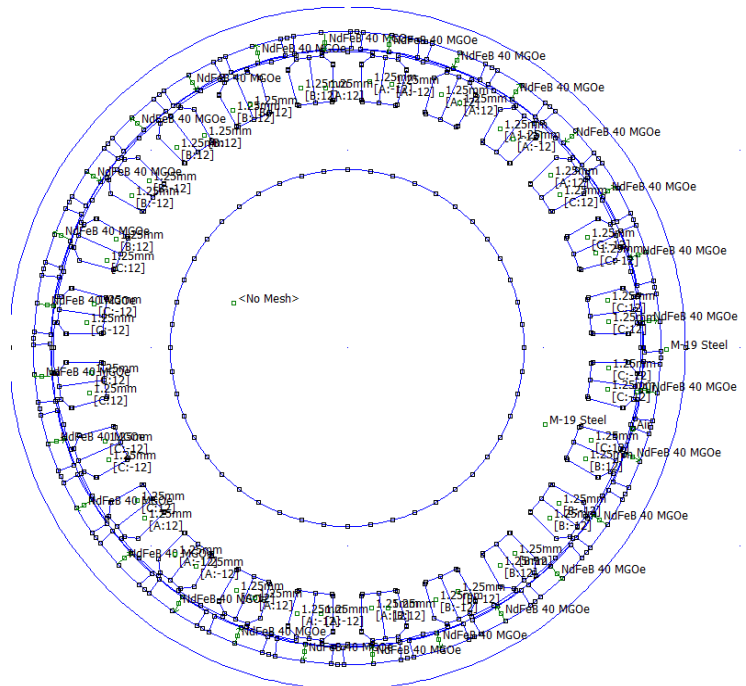
Tal i com s'ha explicat, una vegada s'hagi exportat la xapa del motor des del JMAG al format CAD, es podrà començar l'estudi del motor al FEMM. La xapa s'obrirà amb el programa i es tindrà un dibuix buit, en el qual s'hauran de definir cada una de les regions del motor, amb el material que correspongui i amb les característiques pertinents de cada un d'ells, siguin magnètiques, elèctriques o geomètriques.

Des de el programa FEMM, es proporciona una llibreria predeterminada dels materials que es poden assignar a cada una de les parts dels motors. En el cas de que el material que es vol assignar no estiguis inclòs es pot introduir manualment qualsevol altre material manualment, introduint les característiques pertinents.



Imatge5.6.- Llibreria de materials assignats FEMM

En el cas de la màquina dissenyada els materials que s'han escollit de la llibreria de materials són els que es poden veure a la imatge anterior. Cada un d'aquesta materials serà assignat una regió de la màquina.



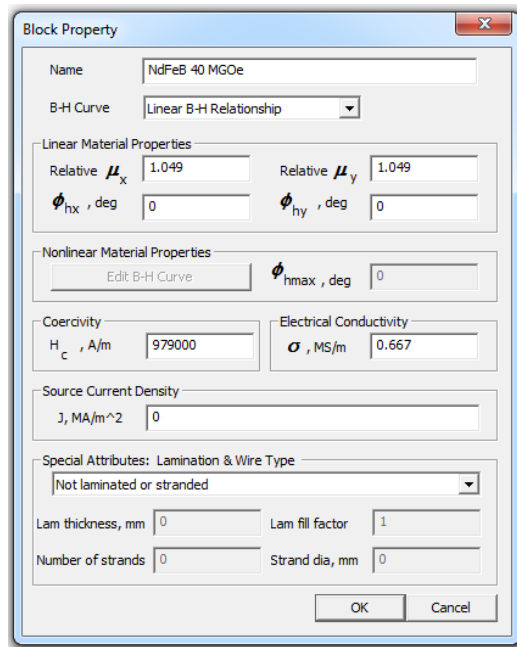
Imatge5.7.- Xapa dissenyada amb materials assignats FEMM

A cada una de les regions tancades que es tinguin en la xapa del motor, se l'hi ha assignat el seu material corresponent. I a més, dins de cada material se l'hi haurà

d'assignar les seves característiques. Com per exemple pugui ser introduir el nombre de fils conductors que tindrà el bobinat, la direcció i ordre d'aquest bobinat o la direcció de magnetització dels imants que s'introdueixen.

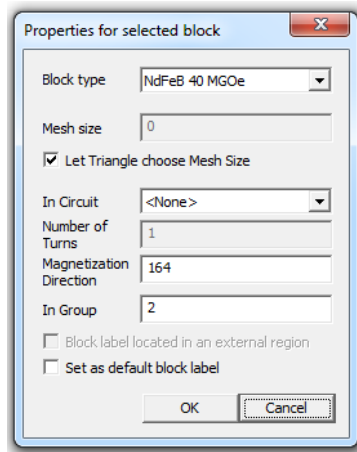
### 5.3.1. Imants

Els imants utilitzats per el disseny d'aquesta màquina són de NdFeB 40 tal i com s'ha explicat anteriorment. Per tal de realitzar aquesta part de l'estudi amb el programa d'elements finits s'ha tingut que definir aquest material amb les seves característiques, i a més, ja que la màquina esta composta per 28 pols, s'ha donat la direcció de magnetització que li pertoca a cada un d'ells per tal de que compleixi la funció desitjada.



Imatge5.8.- Propietats de l'imant NdFeB utilitzat

En la imatge anterior es pot observar les característiques magnètiques que presenta l'imant utilitzar. Aquestes característiques seran iguals per els 28 pols que presenta la màquina però variarà la seva direcció magnètica depenent de la seva posició dintre del motor.

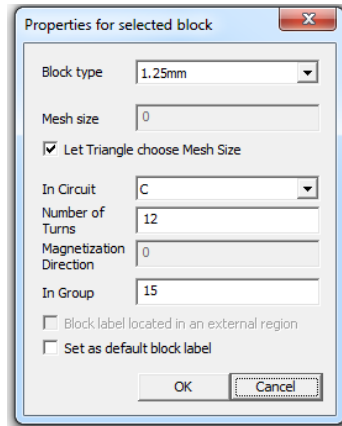


Imatge5.9.- Finestra de FEMM per tal de definir la direcció de magnetització de cada imant

Amb la imatge anterior es pot veure la informació que es pot proporcionar al programa d'elements finits per tal de definir cada un dels imants. Per tal de crear les direccions de magnetització correctes per a cada un d'ells, s'ha partit d'un imant de referència on el centre de la superfície d'aquest està alineat amb el punt (0,0) del document de FEMM. A partir d'aquest s'ha fet la divisió dels 360° per 28 pols, obtenint el resultat de les 28 possibles direccions de magnetització i sumant 180° al resultat obtingut s'aconsegueix la direcció perpendicular a la superfície que es busca. Creant 14 còpies d'aquestes dues primeres direccions s'aconsegueix que tots els imants estiguin amb una direcció de magnetització correcta.

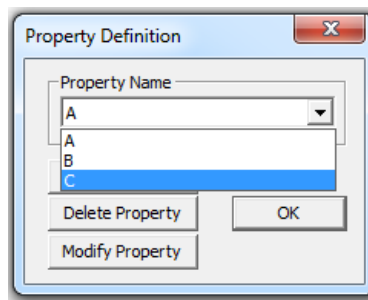
### 5.3.2. Bobinats

La distribució dels bobinats dintre del programa d'elements finits s'ha de definir de la mateixa manera en la qual s'ha assignat aquest bobinat amb el programa de disseny JMAG. Amb el programa FEMM s'ha de caracteritzar la bobina amb els seus valors aplicant el nombre de fases corresponent, la direcció del fil ( si entra o surt de la bobina), el nombre de fils conductors que es tindrà, amb el seu valor de gruix corresponent i els valors del corrent que circularà en cada un d'ells segons l'estudi que es realitzi en cada cas.



Imatge5.10.- Finestra de FEMM per tal de definir el nombre de espires per fase i el gruix del fil.

Amb els valors definits del fil conductor es pot assignar a cada una de les parts de material de coure el circuit al que pertany (A,B o C) i d'aquesta manera quedarà definida la fase.

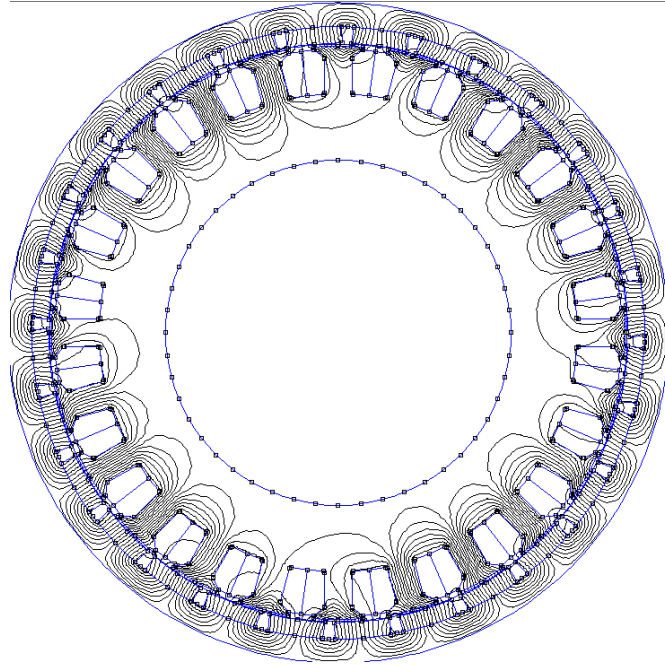


Imatge5.11.- Finestra de FEMM per tal de definir el circuit al que pertany cada grup de fils conductors.

### 5.3.3. Estudi magnètic del motor. Induccions i flux.

#### 5.3.3.1. Anàlisi magnètic estàtic

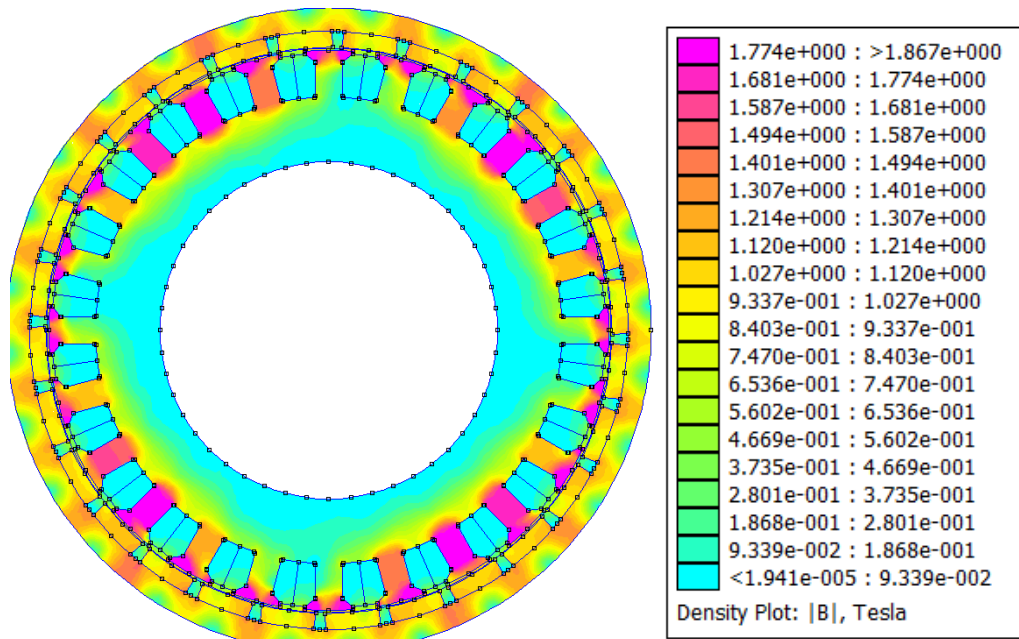
Una vegada s'hagin definit cada una de les regions que compren la màquina amb els seus materials i les propietats que pertoca en cada cas, es pot realitzar una primera simulació per comprovar que els valors de la inducció en la màquina són els adequats i que el comportament magnètic que presenta és el previst.



Imatge5.12.-Xapa del motor dissenyat amb les línies flux magnètic

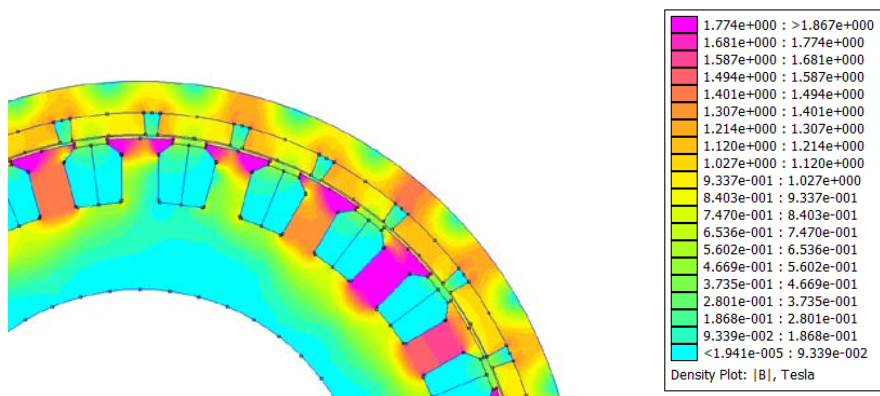
En la imatge anterior es pot comprovar com el flux es dispersa de manera circular tal i com era d'esperar en el comportament de la màquina. Aquestes línies es dispersen des de l'exterior de les ranures per on s'hi troben els fils conductors de coure, cap al ferro de l'estator, on les dents s'hi troba el major punt de concentració. Aquest flux també circula cap als imants i cap al ferro del rotor.

Apart de l'estudi del flux també es comprova que la inducció en cada un dels punts d'interès del motor sigui del valor esperat i que aquest compleixi amb els rangs de valors que correspon a cada una de les parts. Aquest estudi es realitza sense fer girar el motor, és un anàlisi estàtic que simplement serveix per comprovar que els valors de la inducció son correctes.



Imatge5.13.-Estudi magnètic del motor sense girar, valors de la inducció per zones.

Es pot comprovar com els valors de la inducció varien en cada una de les parts de la màquina, on trobem valors molt pròxims a 0 en la zona de les ranures i en l'espai que tenim entre els imants i els espais d'aire.



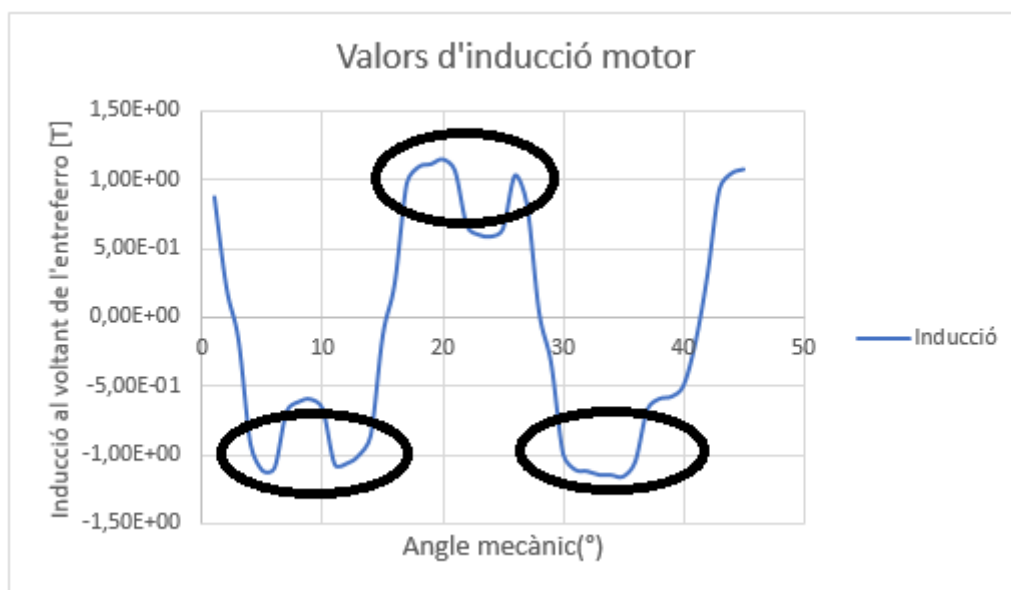
Imatge5.14.-Detall de la xapa on s'aprecia la variació de la inducció depenent de la regió.

Es pot observar que en el ferro de l'estator i rotor els valors varien entre 1 - 1,5 T, mentre que el valor de la inducció en les dents pot arribar fins a 1,7 T en les parts on aquestes dents coincideixen amb major part amb la superfície d'imant.

La importància d'aquest estudi es la de comprovar la saturació que presenta la màquina en cada una de les seves regions. Per tant, realitzant aquest estudi estàtic



s'ha comprovat que no es supera els valors d'inducció màxima que s'esperava i per tant aquesta xapa és vàlida per continuar amb els estudis pertinents.



Imatge5.15.-Valors d'inducció de la màquina a l'entreferro, les zones encerclades són les zones d'interacció dels IMANTS.

Per tal de poder comprovar que els valors de la inducció obtinguts són correctes s'ha traçat una línia a través de l'entreferro, entre els imants i les dents de la màquina i s'han extret els valors de la densitat de flux en aquella zona.

En els pics de la figura anterior es pot comprovar que en les 45° mecànics en que s'ha extret la inducció, es veu clarament l'efecte dels imants a sobre de la màquina creant aquest pics de flux, en aquesta zona trobem 3 dels imants de la màquina.

A més, s'ha utilitzat un codi de LUA per tal d'extreure els valors del flux de la màquina i comprovar que els valors de la intensitat assignats són correctes i que actuen de la forma esperada a sobre del motor.

Inducció al ferro l'estator [T]	Inducció al ferro del rotor [T]	Inducció a l'entreferro [T]	Inducció a les dents [T]
1,36	1,42	0,866	1,76

Figura5.3.Taula resum dels valors d'inducció de la màquina en cada una de les parts d'importància.

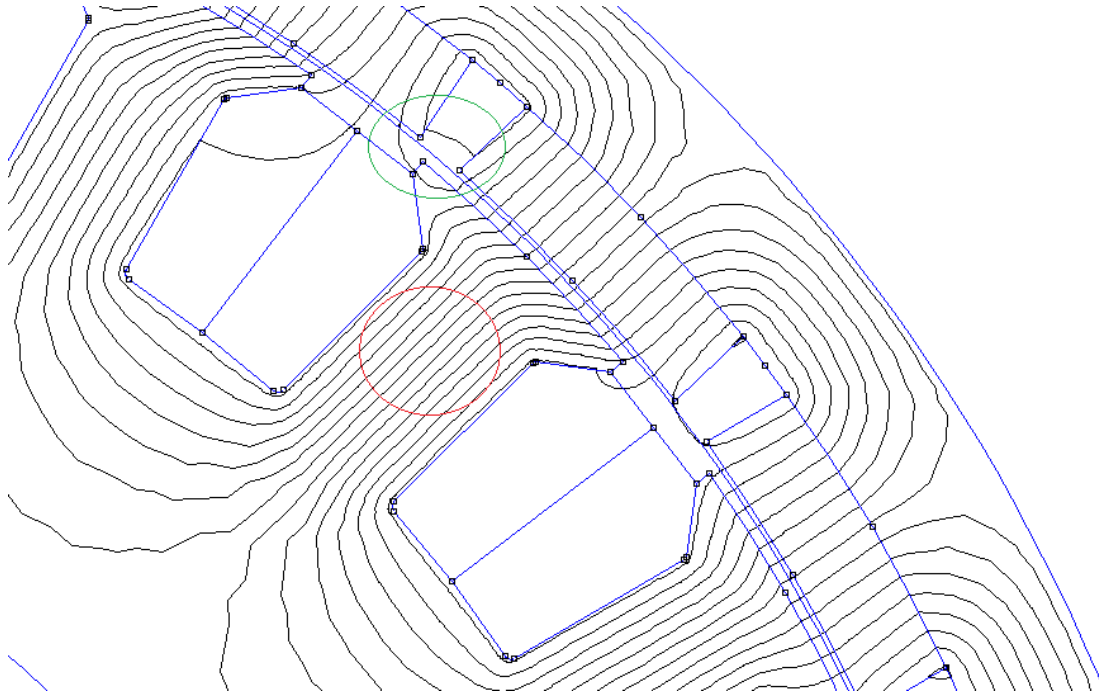
5.3.3.2. Anàlisi magnètic del flux.

Un cop realitzat l'estudi del flux i la inducció de la màquina de forma estàtica i comprovar que els resultats són els esperats, també cal comprovar el flux que crea aquest motor quan es fa girar, aplicant el corrents que pertocuen a cada una de les fases.

FASES	A	B	C
VALORS DEL CORRENT APLICAT [A]	70	-35	-35

Figura5.4.-Taula resum dels valors del corrent aplicat per a cada fase de la màquina.

S'ha realitzat l'estudi del flux de la màquina fent girar el rotor 360° mecànics, d'aquesta manera es pot observar si el comportament que presenta la màquina al aplicar-li el corrent i fent-la girar és el que toca. En la següent imatge es poden apreciar les línies de flux de les quals s'extreuen els seus valors numèrics amb el LUA corresponent.



Imatge5.16.-Flux encadellat (encerclat de color vermell), flux de dispersió (encerclat de color verd)

En el gràfic que trobem a continuació es pot veure el comportament del flux encadellat en la màquina.

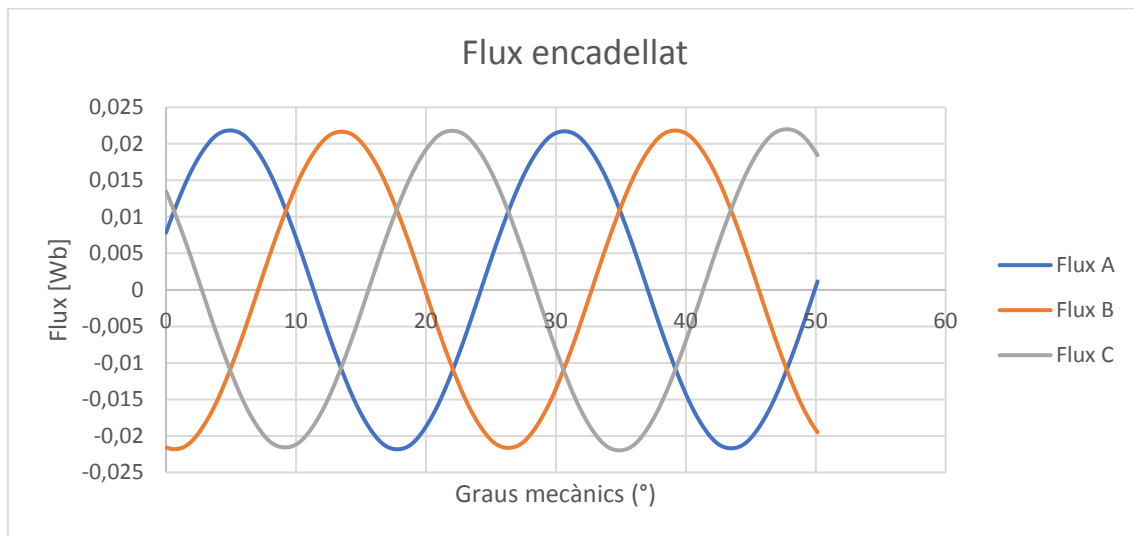


Figura5.5.-Gràfica del comportament del flux encadellat en la màquina

## 5.4. Parell de cogging

### 5.4.1. Descripció del parell de cogging

El parell de cogging és un parell que es produeix per la interacció entre l'imant permanent del rotor i les dents de l'estator. Bàsicament es produeix per la variació de la reluctància magnètica del sistema quan no hi ha corrents en els bobinats. L'expressió que descriu aquest parell teòric és la següent:

$$M_{cog} = \frac{1}{2} \cdot \Phi^2 \cdot \frac{dR}{d\theta} \quad [N \cdot m] \quad (5.1)$$

Aquest parell es pot mesurar fent girar la màquina sense alimentar-la, ja que no depèn del valor del corrent aplicat, sinó de la geometria del motor.

A part de causar molèsties en el comportament mecànic de la màquina també pot resultar un problema amb el tema del soroll, i reduint el parell s'aconsegueix reduir també el soroll de la màquina que pugui ser causat per aquest factor

La finalitat de l'estudi del valor d'aquest parell es reduir-lo al màxim possible ja que és un parell que pot provocar efectes no desitjats a la màquina. El valor resultant es pot reduir utilitzant diferents tècniques. Tal com poden ser la modificació de la forma de l'imant, realitzant asimetries a l'imant, augmentat les obertures en les ranures o xapant l'imant en diverses parts i desplaçar-les per obtenir una contraposició de parells(skew).

### 5.4.2. Càlcul del parell

Per tal de calcular el valor del parell el que s'ha fet ha estat crear un arxiu LUA per tal de fer girar la màquina sense aplicar cap tipus de corrent per excitar-la i veure el parell resultant. El resultat obtingut es el parell que creen aquest imants.

El parell de cogging s'estudia a partir del període de cogging que s'extreu dependent de la geometria del motor, depèn del nombre de ranures i del nombre de pols de la màquina en qüestió. El parell de cogging de la màquina és el següent:

$$T_{cog} = \frac{360^\circ}{N_p \cdot Q} = \frac{360^\circ}{7 \cdot 24} = \frac{360^\circ}{168} = 2,14^\circ \quad (5.2)$$

On:

$N_p$ : és el nombre resultant que depèn dels pols i ranures i de la màquina

$Q$ : nombre de ranures

Una vegada realitzada la simulació pertinent amb el programa d'elements finits, s'ha extret un resultat que suposa 3 vegades el període del parell de cogging, el valor màxim d'aquest parell es de 1,23 N·m.

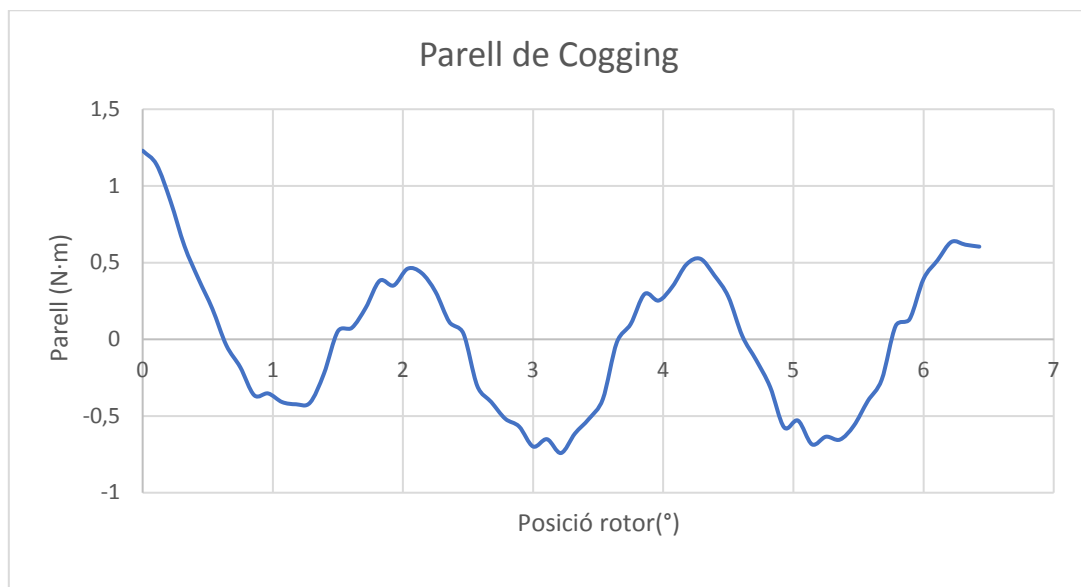
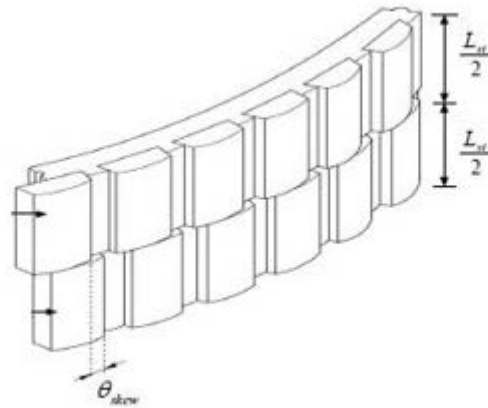


Figura5.6.-Parell de cogging en funció de la posició del rotor.

Tal i com es pot comprovar a la gràfica anterior aquest parell no presenta un valor mig molt elevat però per tal de poder reduir-lo s'ha buscat una solució

Per fer-ho s'ha aplicat un mètode que consisteix en dividir l'imatge en diferents parts i desplaçar-les els graus necessaris per contraposar el parell generat de cada una de les parts. Aquest tipus de mètode utilitzat es denomina *skew*.



Imatge 5.17.-Mètode skew aplicat partint l'imatge en dues parts [Ap.Disseny de màquines].

A part del mètode *skew* existeixen altres maneres per tal de reduir aquest parell, com podria ser la modificació de la forma de l'imatge, també es pot reduir creant asimetries en aquests o amb l'obertura de les ranures.

En el mètode *skew* s'ha decidit partir l'imatge en dues parts, ja que el parell resultant es redueix de forma considerable. Per tal de saber els graus òptims que s'ha de rotar la segona part de l'imatge partit s'utilitza la següent expressió:

$$\delta_{\text{òpt}} = \frac{360^\circ}{N_s \cdot N_p \cdot Q} = 1,07^\circ$$

On:

$N_s$ : Número de parts en que es divideix l'imatge.

Una vegada obtingut els graus òptims els quals s'ha de desplaçar la segona meitat de l'imatge, es pot comprovar que el parell que genera la primera part de l'imatge es de la

mitat de N·m que generava en un primer moment, com es de suposar. Per tant, al desplaçar la segona part de l'imant els graus establerts es contraposa al parell que, ara, genera aquesta segona mitat. En la següent gràfica es pot veure com actuen els dos parells en funció de la posició:

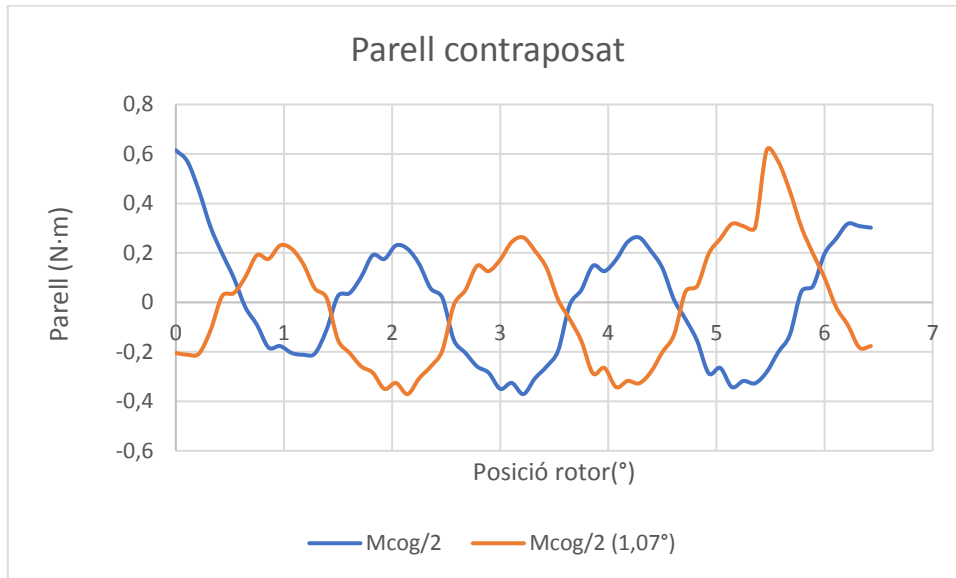


Figura5.7.-Parell de cogging generat per cada una de les parts de l'imant

Les forces oposades que generen aquests dos parells creats per cada una de les parts de l'imant, serà el parell resultant que s'obtindrà finalment, i com es pot comprovar a continuació s'aconsegueix reduir notablement:

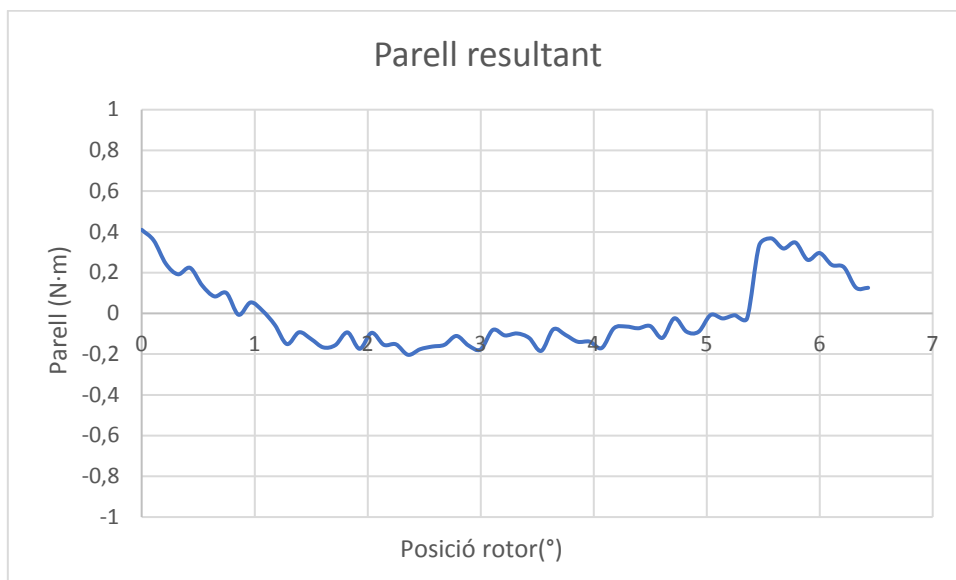


Figura5.8.-Parell de cogging resultant de la contraposició de parells generats pels imants.

Amb la disminució del parell de cogging amb el mètode explicat s'aconsegueix reduir aquesta força existent no desitjada creada per els imants.

## 5.5. Parell girant. Pèrdues de la màquina

### 5.5.1. Parell delta. Posició de parell màxim.

En aquest apartat del disseny del motor, i una vegada estudiat el parell de cogging sense alimentar les fases de la màquina, s'ha procedit a comprovar el valor del parell que dona la màquina quan hi apliquem corrent.

Així com en l'apartat anterior l'estudi es basava en la reducció del parell de cogging i s'aplicaven els mètodes explicats per aconseguir-ho, en aquest apartat s'estudiarà l'arissada que presenti el parell i també es valorarà que sigui la més baixa possible. L'estudi partirà amb el rotor des de la posició de parell màxim

Per tal de poder trobar la posició inicial del rotor i veure el parell que genera la màquina, primer de tot s'ha aplicat un corrent constant als bobinats de l'estator i s'ha fet girar la màquina aconseguint uns resultats on es veu el parell en funció de la posició.

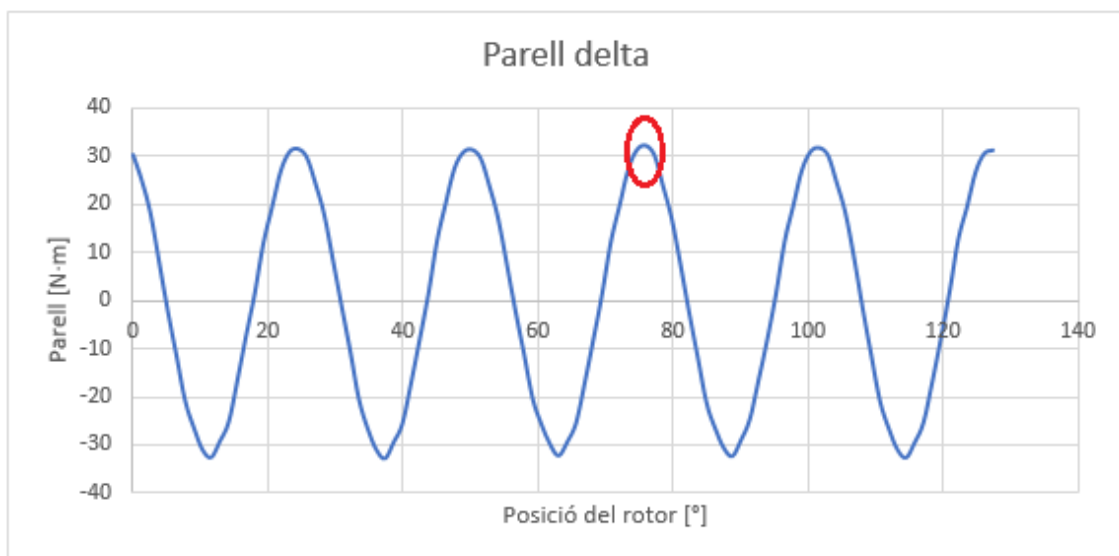


Figura 5.9.- Parell en funció de la posició del rotor, el parell màxim es troba a la posició de 75,36° respecte la posició inicial



## 5.5.2. Parell girant de la màquina.

Una vegada es té el rotor col·locat a la posició dita anteriorment, es realitza la simulació aplicant l'alimentació sinusoidal, on el corrent ha d'anar variant cada iteració per tal de que totes les fases conduïxin al moment que li pertoca. S'ha aplicat el corrent corresponent a cada una de les fases i a la freqüència calculada de 163 Hz

$$I_A = I_{m\grave{a}x} \cdot \cos\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad [A] \quad (5.3)$$

$$I_B = I_{m\grave{a}x} \cdot \cos\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180} - \frac{2\pi}{3}\right) \quad [A] \quad (5.4)$$

$$I_C = I_{m\grave{a}x} \cdot \cos\left(\alpha \cdot \frac{\pi}{180} + \frac{2\pi}{3}\right) \quad [A] \quad (5.5)$$

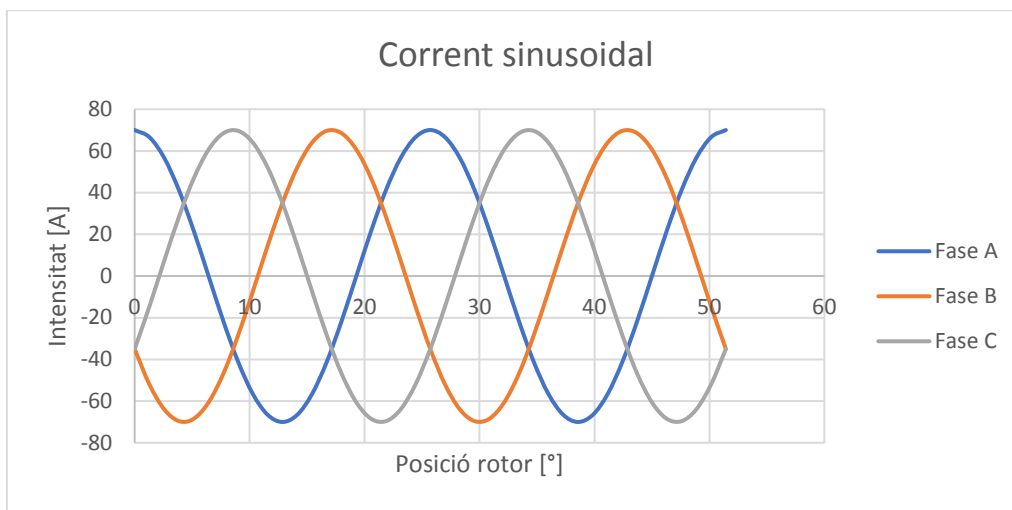


Figura5.10.-Corrent sinusoidal aplicat per cada una de les fases de la màquina.

Aplicant els valors de corrent sinusoidal que es poden veure en la gràfica anterior i partint des de la posició del rotor on el parell es màxim s'ha extret el valor del parell que es mostra a continuació:

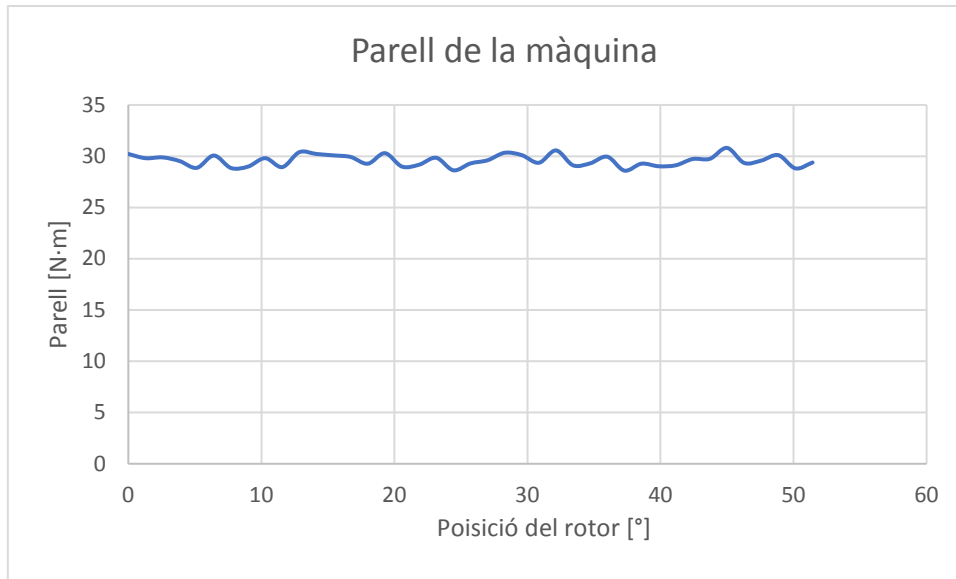


Figura5.11.-Parell de la màquina

L'arissada que presenta parell del motor és molt petita, la variació de que sofreix en funció de la posició no supera el 2%,. El valor mig del parell que s'obté al llarg de la simulació en funció de la posició es de **29,58 N·m**, per tant es pot concloure l'apartat observant que s'ha obtingut un resultat del parell molt favorable i quasi idèntic al calculat.

### 5.5.3. Pèrdues de la màquina.

En aquesta part es dur a terme l'estudi de les pèrdues magnètiques de la màquina, les quals depenen directament de la inducció, la freqüència i el volum del ferro i coure que es té. Les pèrdues s'han estudiat a la freqüència de treball de la màquina que es de 163 Hz.

Per poder saber les pèrdues que es tenen al ferro de la màquina tingut en comptes les pèrdues que es tenen per histèresis i les pèrdues del corrent de Foucault, els resultats que s'obtenen d'aquestes pèrdues són un factor molt important a tenir en compte ja que aquestes també influiran directament en l'aspecte tèrmic del motor.

Per tal de poder fer els càlculs d'aquests tipus de pèrdues s'ha aplicat el mètode de Bertotti, on les pèrdues es poden classificar en tres categories diferents:

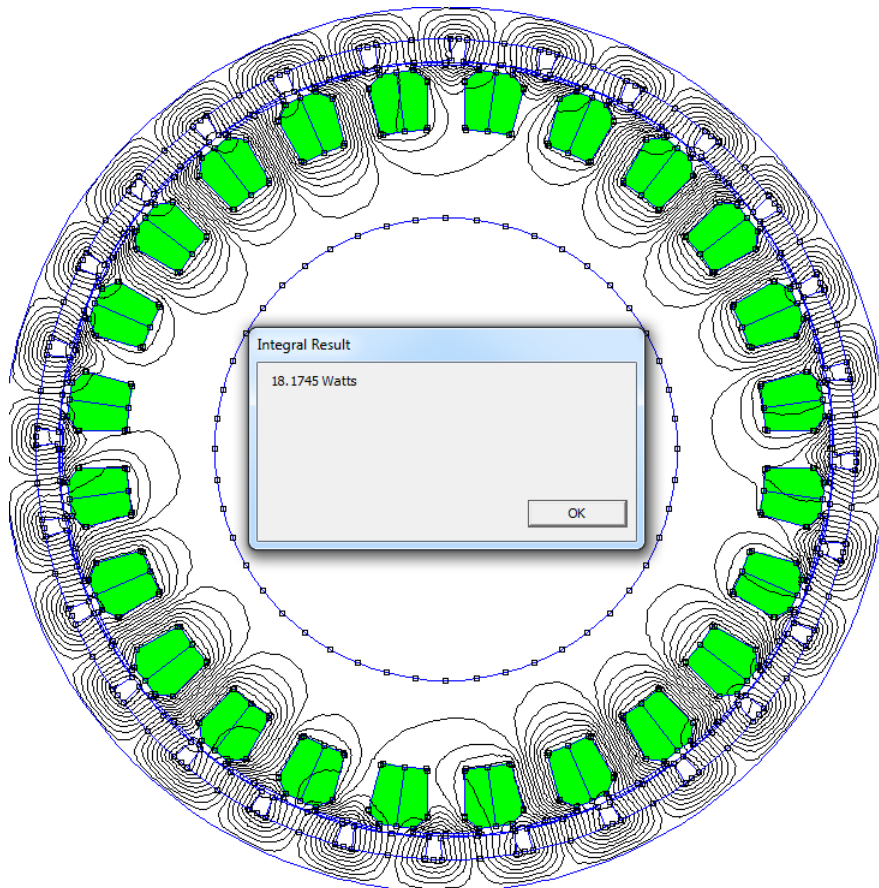
*-Les pèrdues per histèresis, proporcionals a la freqüència, que són les més importants i a tenir en compte en les pèrdues a freqüències baixes.*

-Les pèrdues per corrents de Foucault, proporcionals a  $f^2$

-Les pèrdues d'excés que són proporcionals a  $f^{3/2}$

L'expressió 4.39 que defineix aquestes pèrdues ha estat exposada anteriorment.

A més, també s'han calculat les pèrdues que es tenen al coure, que s'han pogut extreure des de l'arxiu FEMM. Es comprova les pèrdues totals que es presenten en les ranures per on hi ha els bobinats aplicant-hi el corrent de pic.



Imatge 5.18.-Valor de les pèrdues que presenta el coure de la màquina al circular-hi la el corrent màxim.

El valor obtingut de 18,17 W es un valor que no té en compte els caps de bobina que envolten cada una de les dents del motor, ja que es tracta d'un bobinat concentrat. Per tant aquestes pèrdues, tenint en compte que el volum de fil que sobresortirà serà d'una magnitud molt semblat a la que es troba dintre de les ranures es multipliquen per dos, el que significa que les pèrdues reals del coure seran de 36,35 W.

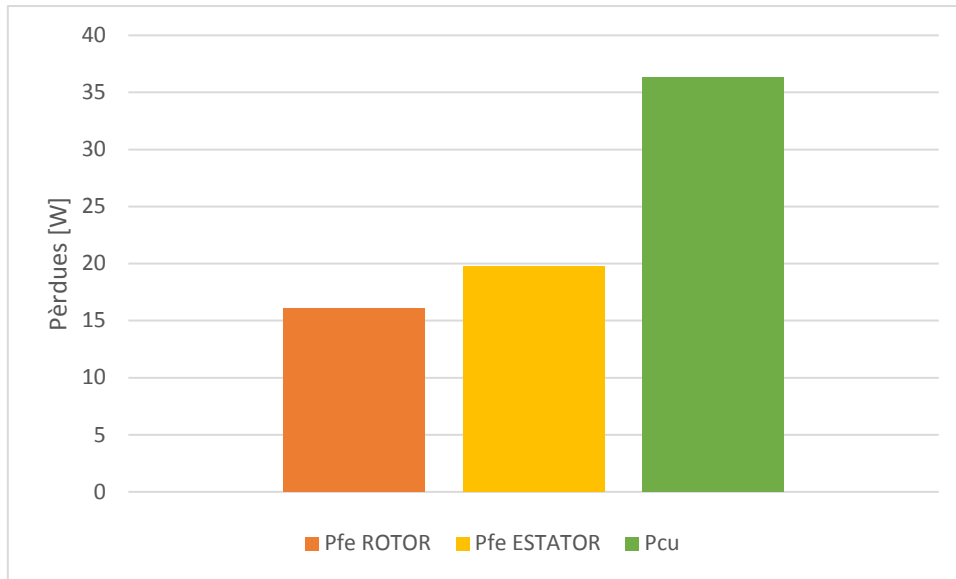


Figura5.12.-Valors obtinguts de les pèrdues a cada una de les parts d'interès de la màquina. Pèrdues al ferro del rotor (Pfe ROTOR), pèrdues al ferro de l'estator (Pfe ESTATOR) i les pèrdues al coure (Pcu).

Les pèrdues totals que es tindran a la màquina seran de 72,19W, que estan distribuïdes tal i com es mostra en el gràfic anterior. És pot apreciar que on es té el màxim valor de les pèrdues serà en el coure de la màquina.

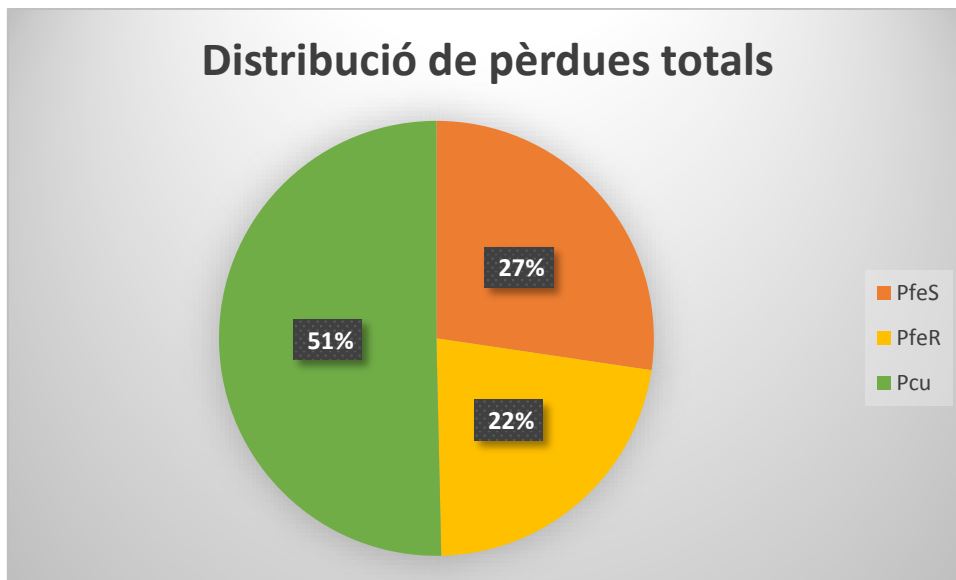


Figura5.13.-Distribució de les pèrdues totals que presenta la màquina presentades en tant per cent.

## 5.6. Càlcul d'inductàncies i flux. Característiques.

### 5.6.1. Flux i inductància principal.

Aquesta part de l'estudi es basa en el càlcul de les inductàncies principals de la màquina i el flux encadellat que hi actua. Ambdós valors són d'especial importància en qualsevol estudi de PMSM per tal de poder obtenir les característiques de funcionament d'aquesta. Per poder realitzar l'estudi d'aquests paràmetres es suposa que el flux que actua a l'entreferro es constant en tota la màquina.

El fet de considerar que el flux que actua a l'espai d'aire actua de manera homogènia, s'ha pogut realitzar amb el programa de FEMM; per tal de poder fer aquesta suposició s'han desactivat els imants, anul·lant les seves propietats tan magnètiques com elèctriques i s'ha estudiat la regió com una part més d'entreferro.

A continuació es pot observar el flux encadellat que es té a l'entreferro de la màquina.

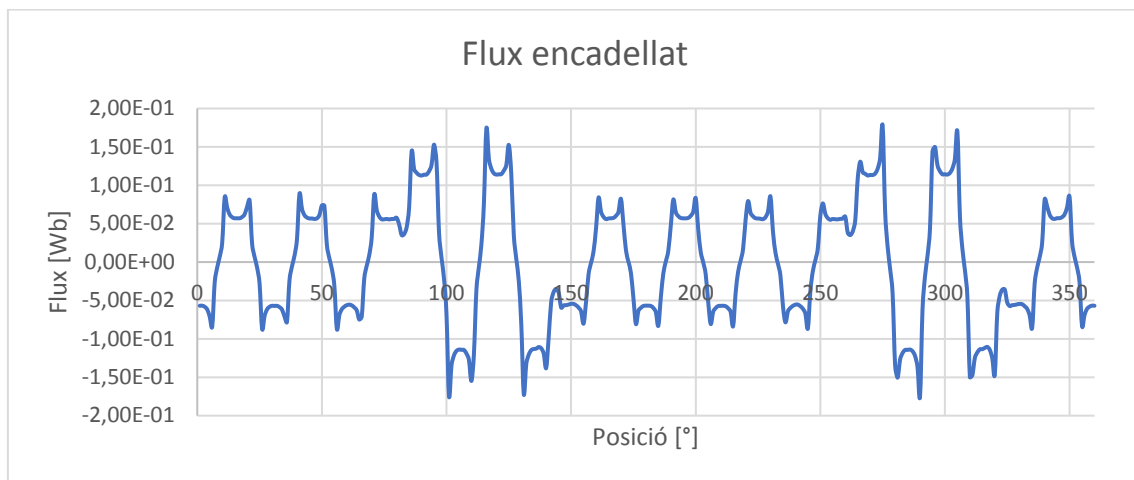


Figura5.14.-Flux encadellat a l'entreferro de la màquina.

A més, s'ha de dir, que per tal de poder extreure el valor de la inductància principal de la màquina, es pot fer a partir del flux encadellat de la figura5.14 o a partir del flux que actua per les 3 fases de la màquina. S'ha agafat el flux format per la fase A per tal de trobar el valor màxim d'aquest, que serà el vàlid per tal de trobar el valor de la inductància  $L_m$ .

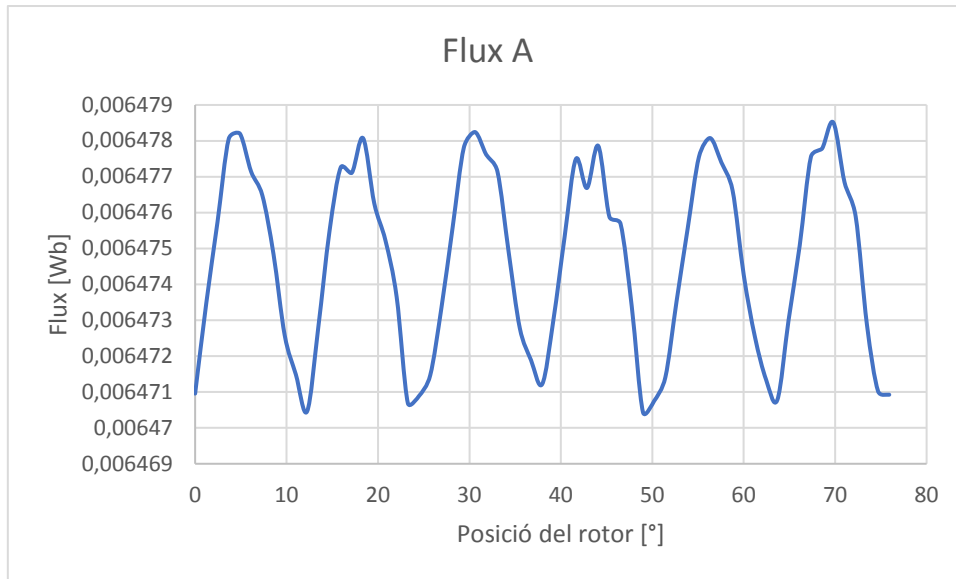


Figura 5.15.-Flux A de la màquina aplicant corrent sinusoidal

Per tal de trobar el valor de  $L_m$ , en aquest cas, s'ha aplicat la següent fórmula:

$$L_m = \frac{\mu_0}{\pi} \cdot m \cdot \frac{D \cdot L}{g_{eq}} \cdot \left( \frac{Nf \cdot \xi}{p} \right) \quad [H] \quad (5.6)$$

On  $\mu$  és la permeabilitat relativa,  $m$  és número de fases,  $D$  és el diàmetre total de la màquina,  $L$  es la longitud total de la màquina  $g_{eq}$  és l'entreferro equivalent,  $Nf$  és el nombre d'espores/fase,  $\xi$  és el factor de bobinat i  $p$  el nombre de parell de pols

## 5.6.2. Característiques

Una vegada aconseguits els valors del flux i la inductància de la màquina és pot veure el resultat de les corbes característiques de funcionament del motor i comprovar que els resultats teòrics calculats amb anterioritat es corresponen a la realitat de la simulació.

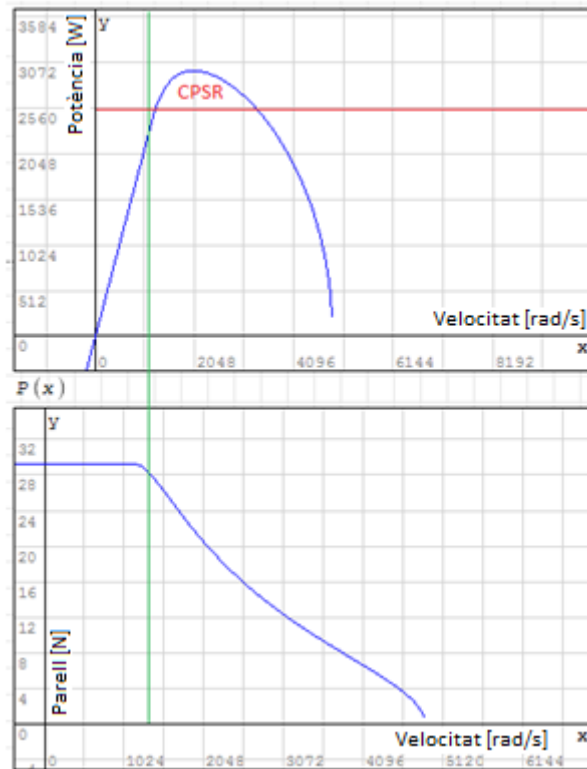


Figura 5.16.-**Primer corba:** Potència [W] en funció de velocitat [rad/s]. **Segona corba:** Parell [N·m] en funció de la velocitat [rad/s]

Tal i com es pot veure en les corbes característiques de funcionament de la màquina, el parell es manté constant fins arribar a la velocitat base calculada, que serà de 700 rpm; a partir d'aquest punt el parell disminueix fins arribar al punt de velocitat màxima de la màquina on es tindrà un parell de 0 N·m.

En el corba de potència es pot apreciar que la potència entregada també augmentarà fins a arribar al punt de velocitat base, tota la zona de CPSR (Constant Power Speed Range) es considera que la potència entregada per la màquina serà constant.

Una altre característica a tenir en compte es l'evolució de la tensió d'alimentació del motor. En aquesta corba s'aprecia com el valor de la tensió va creixent fins arribar als 20V on la màquina entregarà la potència màxima. A partir d'aquest punt la tensió es manté constant.

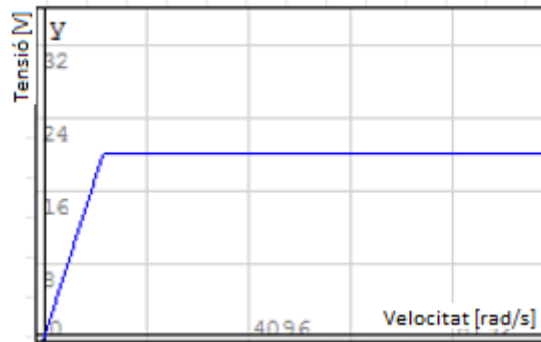


Figura 5.17.-Tensió d'alimentació de la màquina en funció de la velocitat, aquesta tensió arriba als 20V una vegada s'aconsegueix arribar a la velocitat base de 700 rpm.

## 5.7. Estudi tèrmic

Per tal de finalitzar tot el disseny de la màquina s'ha realitzat un estudi tèrmic per saber si les temperatures a les que treballarà son adequades i permeten que els materials puguin estar en les condicions òptimes perquè les seves propietats magnètiques, elèctriques i geomètriques no és vegin alterades per temperatures massa altes.

Per tal de realitzar l'estudi tèrmic s'ha partit des de les dades de pèrdues obtingudes en l'apartat 5.5, on aplicant el corrent sinusoidal s'han extret els valors de pèrdues al ferro del rotor i estator, i les pèrdues del coure.

Per tal de saber la quantitat de calor evacuat per cada una de les regions de la màquina s'han agafat les pèrdues que s'han extret en watts i s'han dividit per el volum que forma cada una d'aquestes parts (rotor, estator i coure). Els resultats obtinguts són els següents:

$$P_{cu} = \frac{P_{cu}}{V_{cu}} = \frac{36,35}{1,24 \cdot 10^{-4}} = 293145,16 \quad \left[ \frac{W}{m^3} \right] \quad (5.7)$$

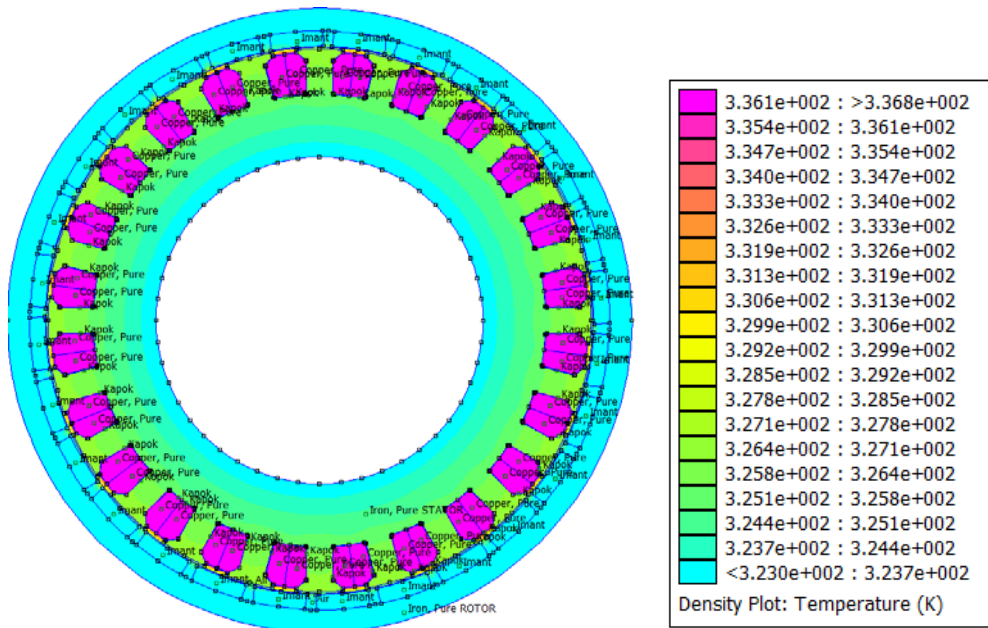
$$P_{cal_{fes}} = \frac{P_{fes}}{V_{fes}} = \frac{19,736}{6,43 \cdot 10^{-4}} = 30693,62 \quad \left[ \frac{W}{m^3} \right] \quad (5.8)$$

$$P_{cal_{feR}} = \frac{P_{feR}}{V_{feR}} = \frac{16,101}{1,433 \cdot 10^{-4}} = 112358,68 \quad \left[ \frac{W}{m^3} \right] \quad (5.9)$$



Una vegada s'ha aconseguit la conversió dels watts a calor evacuat per zona, s'han d'aplicar les condicions de contorn adequades dintre del programa FEMM, utilitzant la versió del programa com a estudi tèrmic, amb el format FEH.

Aquestes condicions de contorn seran descrites per les temperatures de treball del mateix motor, introduït una temperatura estimada a l'exterior del rotor i a l'eix de 60°C, d'aquesta manera s'ha visualitzat la distribució de temperatures a en tota la màquina.



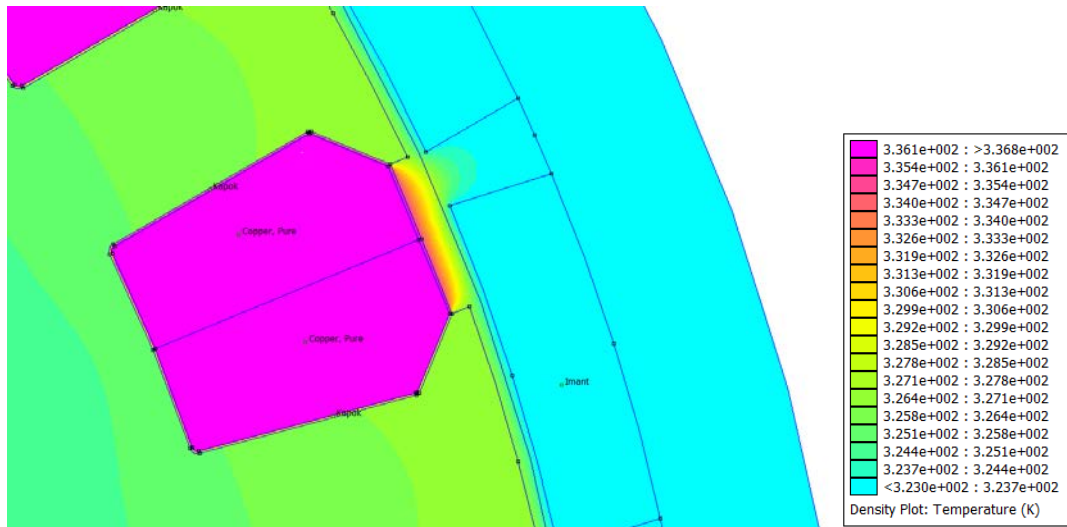
Imatge5.19.-Distribució de temperatures a tota la màquina

A més s'ha aplicat a la simulació una convecció natural, simulant l'aire que circularà per l'entreferro amb un coeficient amb un coeficient de  $5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  i els resultats de temperatura màxima obtinguts a cada una de les zones d'interès es pot veure en la següent figura 5.18.

	<i>T.màx [°C]</i>
Rotor	50
Estator (dents)	63
Ranures	88

Figura5.18.-Temperatura màxima per zona de la màquina

També cal tenir en compte que s'ha utilitzat un material aïllant a cada ranura per evitar que el calor es dispersi pel ferro de la màquina i s'arribi a temperatures no desitjades. El tipus de aïllant usat es de fibra sintètica i s'ha aplicat a totes les ranures.



Imatge5.20.-Distribució de la temperatura al voltant de la ranura, l'aïllant tèrmic compleix la seva funció.

# 6. ANÀLISI DE L'IMPACTE AMBIENTAL

En aquest apartat es farà un anàlisi de l'impacte ambiental del projecte en qüestió. Aquest estudi es fa des de el punt de vista del disseny i construcció del prototip del motor i no de la seva possible producció industrial.

Per tal de realitzar el disseny d'aquest motor, no s'han consumit bens materials directament, ja que s'ha realitzat tot el disseny des de un ordinador. Ara que, per altre banda, s'ha consumit paper per tal d'imprimir el projecte i si que s'ha produït un consum d'electricitat degut a les hores dedicades a la realització del treball. Aquestes hores, sobretot, es poden focalitzar en el consum en les hores de simulació amb el programa FEMM, ja que han estat la part del disseny on l'ordinador ha consumit més hores de treball.

Per altre, tenint en compte la fabricació del prototip, es pot fer un resum del recursos que es consumiran, encara que no es pugui quantificar, es podrà estimar l'impacte ambiental que crearà cada una de les activitats a realitzar.

Avui en dia la societat demanda a les organitzacions que s'impliquin en el benestar del medi ambient i en resposta a les exigències les organitzacions han vist una oportunitat per millorar el seu comportament ambiental.

En aquest cas, l'impacte ambiental produït per el disseny i posterior fabricació del prototip no es de gran rellevància però es pot crear una visió global dels aspectes ambientals que s'hi poden tenir en compte i el seu impacte.

<b>ACTIVITAT</b>	<b>RECURS CONSUMIT</b>	<b>IMPACTE AMBIENTAL</b>
Disseny del projecte	-Electricitat	-Contaminació atmosfèrica degut a la producció de l'energia.  -Consum de recursos naturals no renovables
Imprimir projecte	-Consum de paper (fusta)  -Consum d'electricitat  -Consum de tinta	-Esgotament dels recursos naturals  -Consum d'energia.  -Consum d'aigua.
Fabricació del prototip (Xapes rotor/estator)	-Consum de ferro  -Consum d'altres materials (resina, silicona, cola, etc.)	-Esgotament dels recursos naturals  -Consum d'energia  -Generació de renous/olors/fum  -Consum d'aigua
Fabricació del prototip (Bobinat i imants)	-Consum de coure  -Consum de imant sinteritzat (NeFeB)	-Esgotament dels recursos naturals  -Consum d'energia  -Generació de renous/olors/fum

Figura 6.1.-Resum de les activitats, recursos consumits i impacte ambiental generat per la realització del projecte.

La taula anterior és una visió global del que suposa la creació d'un prototip de motor elèctric, aquest estudi mediambiental es pot veure ampliat en el cas en que el motor dissenyat es produeixi en cadena.

Per acabar cal dir, que per tal de crear el mínim impacte ambiental, tots els materials que s'utilitzin per el disseny seran reciclats d'acord amb la legislació aplicada a cada un d'ells.

## 7. CONCLUSIONS

Després de tots els estudis realitzats per dur a terme el disseny de la màquina, és pot dir que tots els objectius inicials del projecte s'han complit amb èxit. S'ha aconseguit tota la informació necessària per tal de dissenyar el motor, amb la definició de cada un dels materials que formen la màquina, estudiant el comportament que tindran en cada una de les fases d'interès.

S'ha aconseguit un motor PMSM amb el requisits complets on, l'elecció del motor es considera adequada per complir la funció de realitzar la tracció d'una motocicleta elèctrica, ja que es tracta d'un motor de dimensions reduïdes, el que facilita la incorporació a la roda i dona flexibilitat perquè es pugui incorporar a diferents models de roda, on la restricció del gruix majoritàriament no generaria problemes. També cal destacar que el motor obtingut és un motor que presenta un pes baix i on els costos de materials i mà d'obra no són elevats.

Cal afegir, que per arribar al resultat final del motor, s'han estudiat i simulat comportaments elèctrics i magnètics de diverses possibilitats de motor, per tal d'arribar i aconseguir els paràmetres desitjats per el cas particular de la màquina. On s'han aconseguit els valors d'inducció i flux idonis per el un bon funcionament.

S'han aconseguit minimitzar els sorolls de la màquina estudiant el parell que genera en funcionament, triant una bona configuració ranures/pols i fent un estudi del parell de cogging el qual també influeix en aquest aspecte i el qual s'ha aconseguit reduir aplicant el mètode pertinent

A més, s'ha realitzat un estudi tèrmic per tal de validar les mides triades i assegurar-se que el motor era apte per ser posat en funcionament sense que s'alterin les propietats de cap dels materials utilitzats.

Per altre banda, aquest estudi realitzat per el disseny de la màquina s'ha dut a terme a partir del programa FEMM on totes les condicions són ideals i no reals. Per poder dur el projecte endavant cap a l'aplicació de la motocicleta elèctrica, s'hauria de crear el prototip i fer els assajos corresponents per estudiar el funcionament real de la màquina amb les condicions que li pertoca. D'aquesta manera, seria convenient fer una validació experimental dels resultats, per tal de contrastar els resultats de la simulació amb els experimentals.



## 8. PRESSUPOST

<b>MATERIALS</b>					
Element	Descripció	U. mesura	Preu unitari	Unitats	Import (€)
Làmina M250-50A(Rotor)	Làmina de ferro M250-50A de Cogent. Envernissada amb un revestiment orgànic a la superfície	u.	0,43	22	9,46
Làmina M250-50A(Estator)	Làmina de ferro M250-50A de Cogent. Envernissada amb un revestiment orgànic a la superfície	u.	0,08	22	1,76
Imants NeFeB 40	Imants sinteritzats de forma corba. YUXIANG TECH	u.	1,60	56	89,6
Coure	Bobina de fil de coure. Ø 1,25. Classe F	metres	0,60	42	25,2
Revestiment de bobina	Revestiment dels caps de bobina	metres	0,32	0,2	0,06
Connectors	Connector per a cada fase d'alimentació	u.	0,20	3	0,6
Protectors	Protecció pel cablejat fora del motor	metres	0,10	2	0,2
Aïllant tèrmic	Aïllant tèrmic de les ranures. Krempel. PHASOLEX de 0,2mm de gruix	u.	0,08	24	1,92
Altres	Silicona, resina i cola	u.	1,00	1	1
<b>TOTAL</b>					<b>120,34</b>

<b>MÀ D'OBRA</b>					
Element	Descripció	U. mesura	Preu unitari	Unitats	Import (€)
Acoblament	Acoblament de les làmines de ferro del rotor i estator	hores	50,00	0,25	12,5
Bobinat	Bobinar el motor amb màquina especialitzada. Cobrir els caps de bobina. Posar els connectors de les tres fases	hores	50,00	3	150
Acabats	Acabar el muntatge total de la màquina.	hores	50,00	1	50
Assaig	Realitzar els assajos pertinents per comprovar el correcte funcionament	hores	50,00	4	200
<b>TOTAL</b>					<b>403,78</b>

<b>DISSENY</b>					
Element	Descripció	U. mesura	Preu unitari	Unitats	Import (€)
Recerca de dades	Estudi de les diferents possibilitats de motor. Estudi dels fonaments de funcionament del EV. Estudi de la tipologia del motor escollit. Estudi dels materials usats per la construcció. Escripció de totes les dades seleccionades i processades.	hores	30,00	90	2700
Disseny analític del motor	Càlculs realitzats per el disseny analític del motor	hores	30,00	50	1500
Disseny numèric del motor	Obtenció del disseny encertat. Creació de codis de simulació. Estudis realitzats amb FEMM. Anàlisi de cada un dels resultats obtinguts i comparativa. Extracció de resultats i valoració dels mateixos. Selecció de motor en base als resultats FEMM	hores	30,00	500	15000
Disseny gràfic del motor	Plànols i dibuixos	hores	30,00	7	210
Redacció del projecte	Escriure el document del projecte, annexos, pressupost i plànols	hores	30,00	50	1500
<b>TOTAL</b>					<b>20.910</b>

	<i>Euros</i>
<i>Materials</i>	120,34
<i>Mà d'obra</i>	403,78
<i>Disseny</i>	20.910
<b>TOTAL</b>	<b>21.434,12</b>





# 9. BIBLIOGRAFIA

## 9.1. Referències bibliogràfiques

- [1] A. Mitchman y J. Cullen, "Permanent magnet generator options for the more electric aircraft.," *de Power electronics, Machines and Drives. International conference*
- [2] ArcelorMittal. *ArcelorMittal Steel Catalog*. 2017.
- [3] A. Jack, B. Mecrow, J. Haylock, "A comparative study of permanent magnet and switched reluctance motors for high-performance fault-tolerant applications.," *Industry Applicationa, IEEE Transactions*, 1996.
- [4] Bargalló, R. Llaverias, J. De Blas, A. Martín, H. Piqué «Inductance determination in rotating machines. Analytical and Numerical calculation. A didactical approach .,» Science, Barcelona.
- [5] David Pujols i Jutglà, "Permanent Magnet Synchronous motor design for an e-motorbike.," PFG, 2014.
- [6] Emile Alglave, J. Boulard, "The electric light: Its History, Production and Applications.," D. Appleton, 1884.
- [7] Heikkilä, Tanja, «Permanent Magnet synchronous motor for industrial inverter applications- Analysis and Design.», Lappeenranta, November, 2002.
- [8] Juha Pyrhönen, Tapani Jokinen, Valéria Hrabocová. "Design of rotating electrical Machines.," 2008.
- [9] María Isabel Ibañez, "Estudio de una máquina de alta velocidad para su aplicación en transporte. Cálculo de las pérdidas en el hierro.," Junio, 2016
- [10] Martínez, Daniel, «Design of a permanent-magnet synchronous machine with non-overlapping concentrated windings.», *Master Thesis*. Stockholm, 2012.
- [11] M. Elbuluk, M. Kankam, "Potential starter/generator technologies for future aerospace applications.," *Aerospace and Electronics Conference*, 1996.
- [12] Shanghai Jinmagnets. *Shanghai Jinmagnets magnets Catalog*. 2018.
- [13] Speed-emachine-design software. *Materials library*.

[14] T. Sebastian, "Temperatura effects on torque production and efficiency of pm motors using ndfed magnets.," *Industry Applications, IEEE transactions*, 1995.

## 9.2. Bibliografia de consulta

[1] A. Mitchman y J. Cullen, "Permanent magnet generator options for the more electric aircraft.," *de Power electronics, Machines and Drives. International conference*

[2] ArcelorMittal. *ArcelorMittal Steel Catalog*. 2017.

[3] A. Jack, B. Mecrow, J. Haylock, "A comparative study of permanent magnet and switched reluctance motors for high-performance fault-tolerant applications.," *Industry Applicationa, IEEE Transactions*, 1996.

[4] Bargalló, R. Llaverias, J. De Blas, A. Martín, H. Piqué «Inductance determination in rotating machines. Analytical and Numerical calculation. Adidactical approach .,» *Science, Barcelona*.

[5] David Pujols I Jutglà, "Permanent Magnet Synchronous motor design for an e-motorbike.," *PFG*, 2014.

[6] Emile Alglave, J. Boulard, "The electric light: Its History, Production and Applications.," *D. appleton*, 1884.

[7] Heikkilä, Tanja, «Permanent Magnet synchronous motor for industrial inverter applications- Analysis and Design.,» *Lappeenranta*, November, 2002.

[8] Juha Pyrhönen, Tapani Jokinen, Valéria Hrabocová. "Design of rotating electrical Machines.," 2008.

[9] María Isabel Ibañez, "Estudio de una máquina de alta velocidad para su aplicación en transporte. Cálculo de las pérdidas en el hierro.," *Junio*, 2016

[10] Martínez, Daniel, «Design of a permanent-magnet synchronous machine with non-overlapping concentrated windings.,» *Master Thesis*. Stockholm, 2012.

[11] M. Elbuluk, M. Kankam, "Potential starter/generator technologies for future aerospace applications.," *Aerospace and Electronics Conference*, 1996.

[12] ShanghaiJinmagnets. *ShanghaiJinmagnets magnets Catalog*. 2018.

[13] Speed-emachine-design software. *Materials library*.

[14] T. Sebastian, "Temperatura effects on torque production and efficiency of pm motors using ndfed magnets.," *Industry Applications, IEEE transactions*, 1995.



# ANNEXOS

## TAULA DE CONTINGUT

ANNEX A: <i>CATÀLEGS DELS MATERIALS</i> .....	87
Catàleg ferro.....	88
Catàleg imants.....	105
Catàleg coure .....	109
Datasheet Aïllant.....	113
ANNEX B: <i>CÀLCULS SMATH</i> .....	115
ANNEX C: <i>LUAS i RESULTATS FEMM</i> .....	131
C.1.Estudi magnètic del motor .....	132
C.2.Parell de cogging .....	137
C.3.Parell girant i pèrdues .....	139
C.4.Flux i inductàncies.....	144
C.5. Tèrmic.....	145

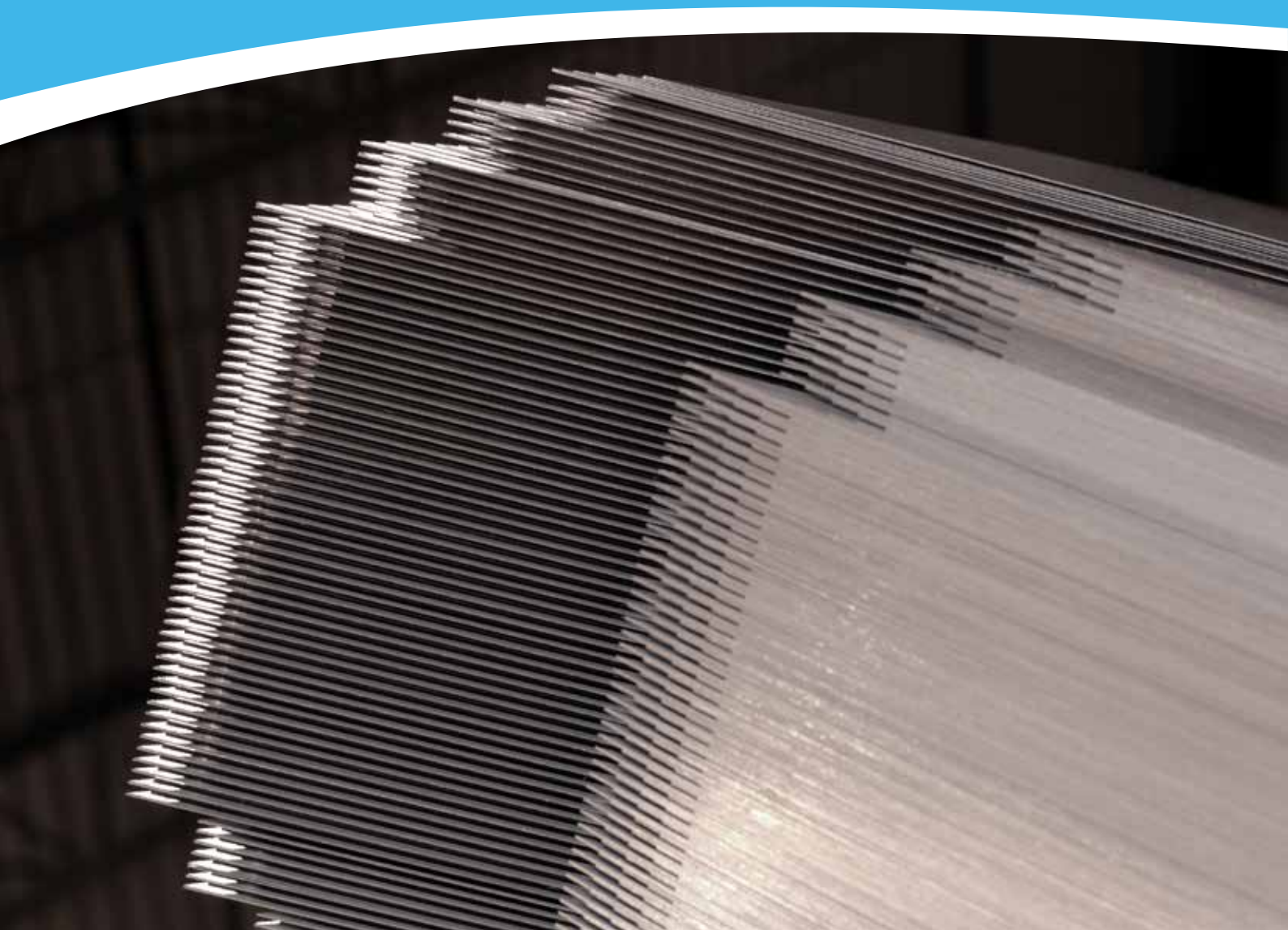
# ANNEX A: CATÀLEGS DELS *MATERIALS*

**Altogether more powerful**  
Non-oriented electrical steel



# ALTOGETHER MORE POWERFUL

Cogent Power provides a broad range of high quality products manufactured to customers' most demanding requirements, and has a responsive approach to the market.





# Our business

Cogent Power is a Tata Steel Enterprise. The specialist product range from Cogent Electrical Steels ranges from high permeability grain oriented steels for power transformers to fully processed silicon steels for all sizes of rotating machines, including thin gauge materials for high speed machines operating at medium to high frequencies.

Electrical steels are manufactured on two sites: Surahammar Bruks, in Sweden produces non-oriented fully processed electrical steels. These steels are iron-silicon alloys with varying silicon content and have similar magnetic properties in all directions in the plane of the sheet.

These non oriented electrical steels are principally used for motors, generators, alternators, small transformers and a variety of other electromagnetic applications. Thin gauge materials are also available which offer the superior performance required for high frequency applications, such as hybrid car motors, flywheels and harmonic filters. The full product range is marketed worldwide direct or through the Tata Steel International global sales offices.

Orb Electrical Steels, in the UK is responsible for the production and global sales of specialised grain oriented steels.

Cogent Power Inc., in Burlington, Ontario, is a world leader in the design and manufacture of transformer cores and components, including distributed gap cores, toroidal cores and flat-stacked cores. Cogent Power Inc. also makes amorphous cores. Cogent Power Inc. has a high quality slitting operation for electrical steels, used to support its own business and also to supply a range of grades across North America.

# Contents

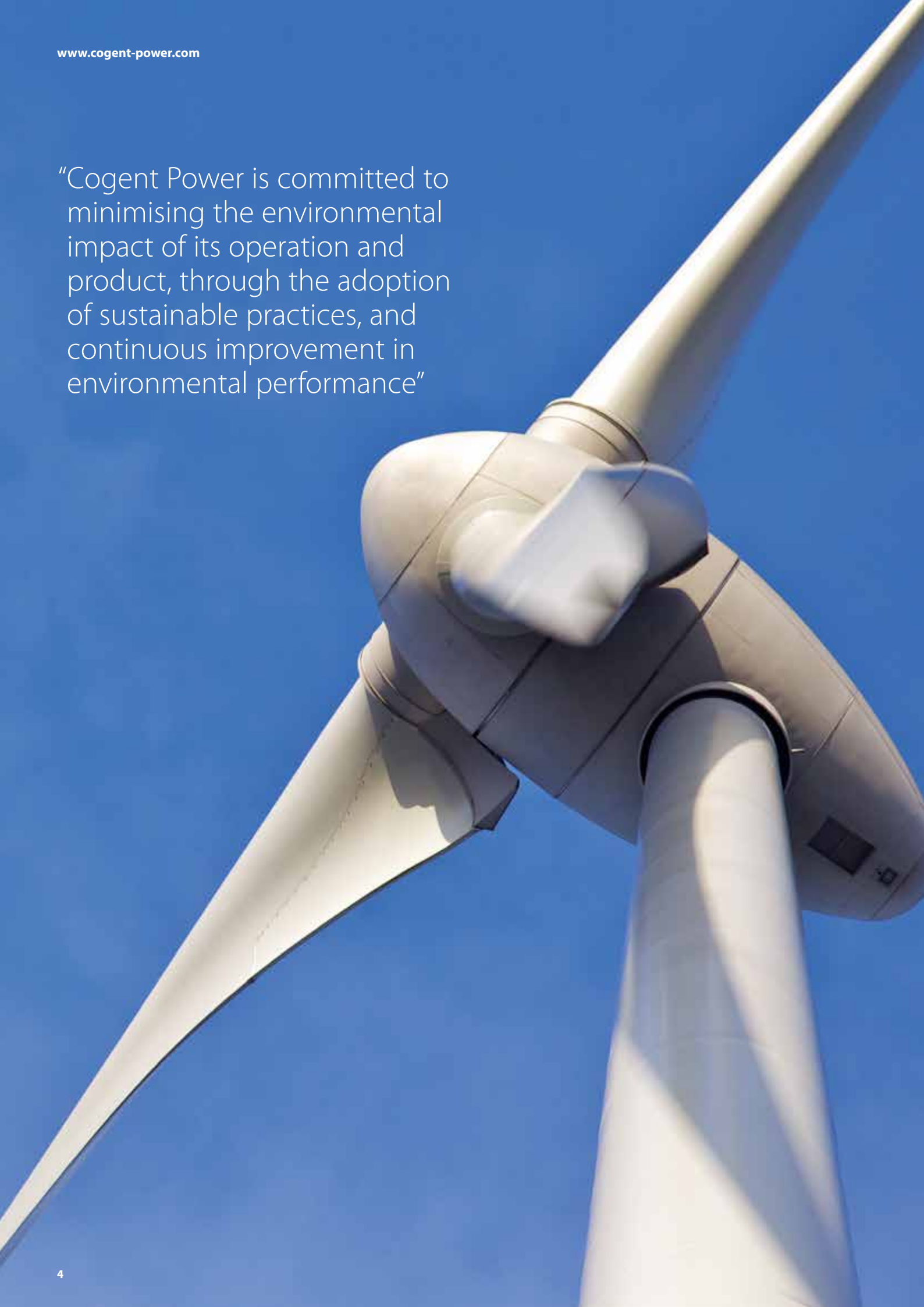
Our Business	03
– Cogent Power	03
– Downstream Integration	03
– Health and Safety	05
– Environmental Management	05
– Quality Assurance	05
– Research and Development	05
– Lean	05
Products	06
Applications	07
NO Magnetic Qualities	08
Hi Lite – Ultra Thin Gauge	09
High Strength	09
Global Standards	10
American Standards	11
Dimensions and Tolerances	12
Insulation Coatings	14



### Designation and registered trademarks

Non-oriented fully processed electrical steel from Cogent Power is supplied under the trademark of SURA®. The designations of the grades align to EN 10106. SURALAC® is a trademark used to describe the insulation coatings. The information and data in this brochure are accurate to the best of Cogent’s knowledge, but are intended for general information only. Applications suggested for the materials are described only to help the reader make his or her own evaluation and decision, and are neither guarantees nor to be construed as expressed or implied warranties of suitability for these and other applications. Cogent and its businesses accept no liability for errors or information which is found to be misleading.

“Cogent Power is committed to minimising the environmental impact of its operation and product, through the adoption of sustainable practices, and continuous improvement in environmental performance”



## Health and safety

Cogent Power believes that all activities can be undertaken safely and will never compromise safety within the business. In both manufacturing and service processes, business is conducted in a way that ensures the health and well-being of all employees, contractors and anyone affected by our business activities.

Cogent Power employees are highly valued and work together in a culture of continuous improvement to develop health and safety performance within the Company and recognise throughout the business that this is essential for the business to maintain its success. Cogent Power's aim is to encourage a positive and progressive health and safety culture and produce high quality electrical steels, where safety comes first.

## Environmental management

Cogent Power is committed to minimising the environmental impact of its operation and product, through the adoption of sustainable practices, and continuous improvement in environmental performance.

Cogent Power products influence energy efficiency worldwide. The need for low loss,

high efficiency electrical steels has never been greater.

By continually working to optimise the properties of our electrical steel grades for specific applications, our products can significantly improve the total losses in the motor or transformer, and thereby offer more effective use of energy. By developing and producing steels to support the electrification of road transport vehicles Cogent Power contributes to the reduction in emissions. Surahammer Bruks is certified to ISO 14001:2004, and we continue to demonstrate our commitment to energy saving.

Cogent Power strives to produce energy efficient steel, in an energy efficient manner.

## Quality assurance

The products described in this brochure are subject to rigorous quality control procedures throughout their manufacture.

The quality management system of Surahammer Bruks is approved by DNV Certification AB to the standard EN ISO 9001:2008.

## Research and development

R&D has played a major role in Cogent Power for over 50 years. Although the basic types of electrical steels are based on established technologies, products and processes continue to be improved to meet increasing demands from users for enhanced properties and more cost effective solutions.

Today a major part of the R&D of Cogent Power is carried out in cooperation with experts in different fields outside the company. Important R&D partners are Tata Research Development and Technology and well renowned universities and research institutes. The company sponsors extensive research work into electrical materials through a number of Universities and works in close partnership with the Wolfson Centre of Magnetics at Cardiff University, which is globally recognised as a centre of excellence for magnetics.

## Lean

Cogent Power has been specifically utilising the Lean Thinking business philosophy and models since 2003. It strives to maintain the principles of lean thinking and continuous improvement throughout the organisation to be able to deliver added value products and services, robustly and efficiently.

Cogent Power strives to develop its Lean Enterprise by creating vision, strategy, effective leadership and engaging people throughout the organisation and supply chain. Improving and developing people and conditions, and processes and products through continuous investment whilst eliminating wastes, are key to improving value for the electrical steels market today, and the future.



## Non-grain oriented electrical steel products

Cogent Power's non-oriented fully processed electrical steels enable our customers to use electrical steels with the best magnetic properties and coatings, confident in the knowledge that the materials are supported by reliable delivery and strong technical support.

Non-oriented electrical steels between 0.10 mm and 1.00 mm thick are critical in the manufacturing of rotating machines of all sizes, as well as in small transformers and a variety of other electromagnetic applications. Their magnetic properties are combined with

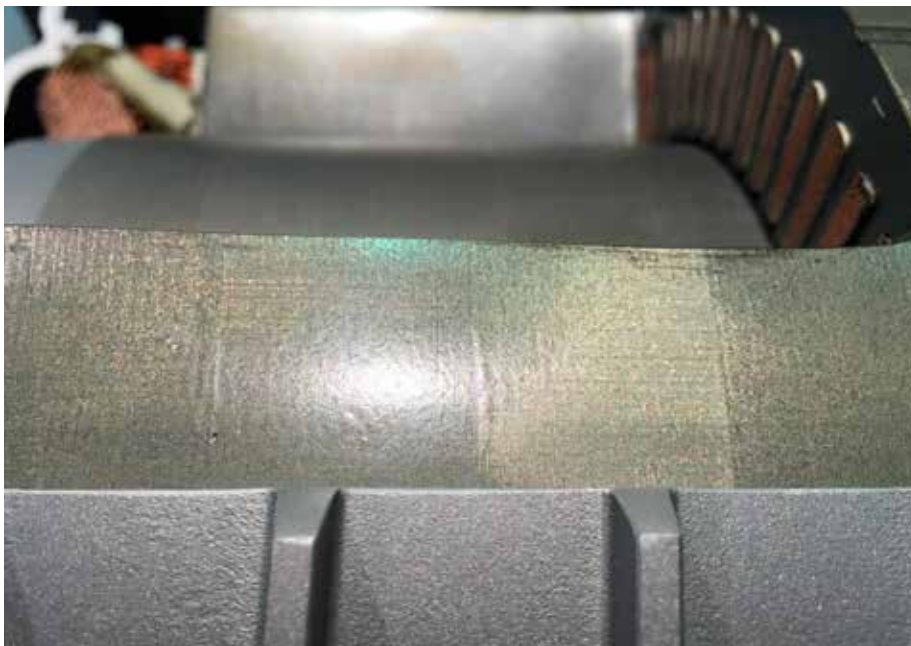
tailored insulation coatings which offer the best performance required for the manufacturing process and final application.

Surahammer Bruks has superior cold rolling which enables them to produce the thinnest cold reduced electricals steels with outstanding thickness control and exceptional magnetic properties.

The final annealing refines the final magnetic properties after which the bespoke insulation coating is applied.

Our in-house slitting and cutting lines make it possible to supply our materials in bespoke widths and lengths.

We have partnerships with several local companies within the Nordic Power Components network which allow us to serve our customers with laser cut laminations and stamped laminations.



## Applications

The product range also includes the thin gauge grades, which offer the superior performance required for high frequency applications. Another recent addition to our product portfolio are our grades with guaranteed mechanical strength.

Cogent Hi-Lite products significantly reduce losses at higher frequencies compared to normal gauge electrical steels, opening a whole new array of design and application possibilities for your business.

## Applications include

- Automotive (H) EV vehicles
- Ultra high speed motors e.g Flywheel Applications
- Aviation
- Power tools
- Household appliances (Vacuum cleaners)
- Transformers
- Filters
- Generators
- Magnetic bearings
- High speed pumps and compressors



# Non-grain oriented electrical steel magnetic properties

Our extensive range of industry standard electrical steel grades all conform to EN10106 and IEC 60404-8-4 and are used in rotating machines of all sizes, as well as small transformers and a variety of other electromagnetic applications.

We have a comprehensive range of data on the magnetic, mechanical and physical properties of electrical steels which can be provided on request.

**Table 1: Magnetic Properties**

SURA Grade	Thickness (mm)	Maximum specific total loss at 50 Hz		Minimum magnetic polarization at 50 Hz			Conventional Density
		$\hat{J}=1.5T$	1.0T*	$\hat{H}=2500$	5000	10000 A/m	
		W/kg	W/kg	T	T	T	kg/dm <sup>3</sup>
M210-35A	0.35	2.10	0.90	1.49	1.60	1.70	7.60
M230-35A	0.35	2.30	0.95	1.49	1.60	1.70	7.60
M235-35A	0.35	2.35	0.95	1.49	1.60	1.70	7.60
M250-35A	0.35	2.50	1.00	1.49	1.60	1.70	7.60
M270-35A	0.35	2.70	1.10	1.49	1.60	1.70	7.65
M300-35A	0.35	3.00	1.20	1.49	1.60	1.70	7.65
M330-35A	0.35	3.30	1.30	1.49	1.60	1.70	7.65
M230-50A	0.50	2.30	1.00	1.49	1.60	1.70	7.60
M250-50A	0.50	2.50	1.05	1.49	1.60	1.70	7.60
M270-50A	0.50	2.70	1.10	1.49	1.60	1.70	7.60
M290-50A	0.50	2.90	1.15	1.49	1.60	1.70	7.60
M310-50A	0.50	3.10	1.25	1.49	1.60	1.70	7.65
M330-50A	0.50	3.30	1.35	1.49	1.60	1.70	7.65
M350-50A	0.50	3.50	1.50	1.50	1.60	1.70	7.65
M400-50A	0.50	4.00	1.70	1.53	1.63	1.73	7.70
M470-50A	0.50	4.70	2.00	1.54	1.64	1.74	7.70
M470-50HP	0.50	4.70	2.20	1.63	1.71	1.81	7.70
M530-50A	0.50	5.30	2.30	1.56	1.65	1.75	7.70
M530-50HP	0.50	5.30	2.30	1.63	1.71	1.81	7.80
M600-50A	0.50	6.00	2.60	1.57	1.66	1.76	7.75
M700-50A	0.50	7.00	3.00	1.60	1.69	1.77	7.80
M800-50A	0.50	8.00	3.60	1.60	1.70	1.78	7.80
M310-65A	0.65	3.10	1.25	1.49	1.60	1.70	7.60
M330-65A	0.65	3.30	1.35	1.49	1.60	1.70	7.60
M350-65A	0.65	3.50	1.50	1.49	1.60	1.70	7.60
M400-65A	0.65	4.00	1.70	1.52	1.62	1.72	7.65
M470-65A	0.65	4.70	2.00	1.53	1.63	1.73	7.65
M530-65A	0.65	5.30	2.30	1.54	1.64	1.74	7.70
M600-65A	0.65	6.00	2.60	1.56	1.66	1.76	7.75
M600-65HP	0.65	6.00	2.60	1.63	1.72	1.82	7.80
M700-65A	0.65	7.00	3.00	1.57	1.67	1.76	7.75
M800-65A	0.65	8.00	3.60	1.60	1.70	1.78	7.80
M600-100A	1.00	6.00	2.60	1.53	1.63	1.72	7.60
M700-100A	1.00	7.00	3.00	1.54	1.64	1.73	7.65
M800-100A	1.00	8.00	3.60	1.56	1.66	1.75	7.70
M1000-100A	1.00	10.00	4.40	1.58	1.68	1.76	7.80

1.  $\hat{J}$  represents the peak magnetic polarisation in Tesla.  $\hat{H}$  represents the peak magnetic field strength in A/m.

## Hi-Lite Thin Gauge Grades

The Hi-Lite range of advanced thin gauge electrical steels are specifically designed to improve the performance of energy efficient applications. Hi-Lite products reduce iron losses to a minimum at high magnetisation frequencies. This results in smaller, lighter and highly efficient solutions for applications such as high speed rotational motors; generators for hybrid and full electric vehicles; flywheels, aerospace and filters for high frequency harmonics.

For these applications, critical aspects such as yield strength and high frequency losses are given in below table. The typical losses at P10/400 indicate Hi-Lite grades outperform maximum guarantees given by industry standards.

Hi-Lite products can be supplied in small quantities supporting prototype build through to full series supplies and come with Suralac 7000 or Suralac 9000 (bonding coating).

**Table 2: Hi-Lite Magnetic and Mechanical Properties**

Grade	Gauge	Max P <sub>10/400</sub>	Max P <sub>10/700</sub>	Max <sup>1</sup> P <sub>10/2500</sub>	Typ P <sub>10/400</sub>	Typ R <sub>p0.2</sub>	Conventional density <sup>2</sup>	EN 10303:2015
	mm	W/kg		W/kg	W/kg	Mpa	kg/dm <sup>3</sup>	
NO10	0.10	13.0	—	135	12.1	370	7.65	NO 10
NO12	0.127	13.5	—	152	11.8	370	7.65	—
NO15	0.15	14.0	—	171	12.1	370	7.65	NO 15
NO18	0.178	14.3	—	186	12.2	370	7.65	—
NO20-1200	0.20	12.0	28.0	195	11.4	440	7.60	—
NO20	0.20	13.5	30.5	215	12.3	370	7.65	—
NO25-1400	0.25	14.0	34.0	—	12.9	440	7.60	NO 25-14
NO25	0.25	17.0	40.0	—	14.8	370	7.65	NO 25-17
NO27-1500	0.27	15.0	37.0	280	13.7	440	7.60	NO 27-15
NO27	0.27	18.0	41.0	-	15.9	370	7.65	NO 27-18
NO30-1600	0.30	16.0	41.0	320	15.1	440	7.60	NO 30-16
NO30	0.30	19.0	45.0	—	17.0	370	7.65	NO 30-19

1. The losses at 2500 Hz are not defined in EN 10303:2015

2. The conventional density may differ from EN 10303:2015

## High Strength Electrical Steels

The magnetic characteristics of the electrical steel originate from silicon hot rolled coil feedstock which can then heat treated and cold rolled to give outstanding thickness control.

Cogent recognises that new motor designs continue to ask for improved performance parameters from materials and for fast rotating machines, and in particular for rotors with “very narrow” load bearing parts (e.g. internal permanent magnet rotors), the strength of the material is an important factor.

Cogent offer a number of grades with guaranteed mechanical strength levels. In addition to our service offerings we can offer guaranteed mechanical properties combined with detailed fatigue and durability analyses.

**Table 3: Mechanical Properties**

Grade	Thickness	Min R <sub>p0.2</sub>	Typ R <sub>p0.2</sub>	Typ P <sub>15/50</sub>	Typ P <sub>10/400</sub>
	mm	MPa	MPa	W/kg	W/kg
M330-35HT	0.35	320	340	2.94	23.5
M330-35HS	0.35	330	380	2.94	18.8
M250-35HS	0.35	400	455	2.35	17.1
NO50	0.50	400	450	2.48	24.0

# Global Standards

Electrical steel grades are designated according to guaranteed maximum specific total loss at a peak magnetic polarisation of 1.5 T and 50Hz

Table 4: Non-Orientated Electrical Steel

Core loss 1.5T 50 Hz W/kg	SURA Grade EN 10106	IEC 60404-8-4	JIS C2552	GOST 21427.2	Old AISI Grade	ASTM A667	Core Loss 1.5T	
							60 Hz (W/lb)	50 Hz (W/kg)
2.35	M235-35A	M235-35A5	(35A230)					
2.50	M250-35A	M250-35A5	35A250	2413	(M-15)	(36F145)	1.45	2.58
2.70	M270-35A	M270-35A5	35A270	2412	(M-19)	(36F155)	1.55	2.76
3.00	M300-35A	M300-35A5	35A300	2411	(M-22)	(36F175)	1.75	3.10
3.30	M330-35A	M330-35A5	—	—	M-36	(36F185)	1.85	3.26
2.50	M250-50A	M250-50A5	50A250					
2.70	M270-50A	M270-50A5	50A270	2414				
2.90	M290-50A	M290-50A5	50A290	2413	M-15	47F165	1.65	2.86
3.10	M310-50A	M310-50A5	50A310	2412	(M-19)	47F180	1.80	3.12
3.30	M330-50A	M330-50A5			M-27	47F190	1.90	3.30
3.50	M350-50A	M350-50A5	50A350	(2411)	(M-36)	47F200	2.00	3.47
4.00	M400-50A	M400-50A5	50A400	2216	M-43	(47F240)	2.40	4.17
4.70	M470-50A	M470-50A5	50A470	(2214)	(M-45)	(47F280)	2.75	4.65
5.30	M530-50A	M530-50A5		(2211)	M-47			
6.00	M600-50A	M600-50A5	50A600	2112				
7.00	M700-50A	M700-50A5	50A700	2111		47F400	4.00	7.04
8.00	M800-50A	M800-50A5	50A800	2011		(47F450)	4.50	7.92
3.10	M310-65A	M310-65A5						
3.30	M330-65A	M330-65A5				(64F200)	2.00	3.38
3.50	M350-65A	M350-65A5			M-19	64F210	2.10	3.55
4.00	M400-65A	M400-65A5			(M-27)	(64F235)	2.35	3.98
4.70	M470-65A	M470-65A5			(M-43)	64F235	2.75	4.65
5.30	M530-65A	M530-65A5			(M-45)	(64f320)	3.20	5.46
6.00	M600-65A	M600-65A5						
7.00	M700-65A	M700-65A5						
8.00	M800-65A	M800-65A5				(64F500)	5.00	8.60
6.00	M600-100A	M600-100A5						
7.00	M700-100A	M700-100A5						
8.00	M800-100A	M800-100A5						
10.00	M1000-100A	M1000-100A5						



## American standards

American standards are based on US units and a test frequency of 60 Hz. There is no exact conversion of loss data from 50 Hz to 60 Hz, but these approximate relationships may be used for losses at 1.5 T:

$(W/kg \text{ at } 50 \text{ Hz}) = (W/lb \text{ at } 60 \text{ Hz})$

1.77 (for 0.35 mm grades)

1.74 (for 0.50 mm grades)

1.70 (for 0.65 mm grades)

1.64 (for 1.00 mm grades)

American standard thicknesses differ from metric standards, particularly at 0.50 mm:

EN/IEC ASTM

0.35mm 0.36mm (0.0140inch)

0.50mm 0.47mm(0.0185inch)

0.65mm 0.64mm (0.0250inch)

## Conversion factors

1 Tesla (T) = 1 Weber/m<sup>2</sup> (Wb/m<sup>2</sup>) = 10000

Gauss = 64.5 kilolines/sq.in.

1 A/m = 0.01 A/cm = 0.0254 A/in = 0.01257

Oersted

1 W/kg = 0.4536 W/lb (at the same frequency)

1 VA/kg = 0.4536 VA/lb (at the same

frequency)

1 N/mm<sup>2</sup> (MPa) = 145.0 psi (lbs/sq.in.)



## Dimensions and tolerances

Our in house slitting and cutting lines make it possible to supply our materials in bespoke widths and lengths.

We have partnerships with several local companies within the Nordic Power Components network which allow us to serve our customers with laser cut laminations and stamped laminations.

Thickness tolerance and other geometric characteristics  
Cogent Power non-oriented fully processed electrical steels meet all the requirements on thickness tolerance and other characteristics such as edge camber and flatness as specified in the standards EN 10106 and IEC 60404-8-4.

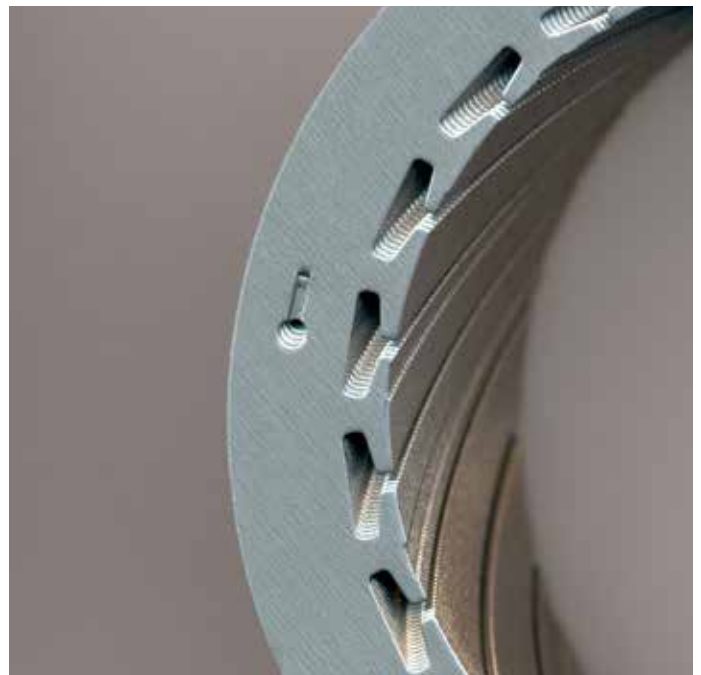
**Table 5: Dimensions and Tolerances**

Coil width standard tolerances			Coil width special tolerances		
Over	Up to and including	Width tolerance	Over	Up to and including	Width tolerance
mm	mm	mm	mm	mm	mm
10	150	0/+0.2	10	300	±0.08
150	300	0/+0.3			
300	600	0/+0.5	300	600	±0.20
600	1000	0/+1.0	600	1250	±0.30
1000	1250	0/+1.5			

Strip thickness	Loss Range	Width range* for slit coils and sheets	Sheet length range
mm	W/kg	mm	mm
0.10 - 0.30	All	12 - 1190	12 - 3500
0.35	> 3.00	12 - 1250	12 - 3500
0.35	≤ 3.00	12 - 1215**	12 - 3500
0.50	> 3.10	12 - 1250	12 - 3500
0.50	≤ 3.10	12 - 1215**	12 - 3500
0.65	> 3.50	12 - 1250	12 - 3500
0.65	≤ 3.50	12 - 1215	12 - 3500
1.00	> 6.00	12 - 1250	12 - 3500
1.00	≤ 6.00	12 - 1215	12 - 3500

\*Widths outside this standard range are available on request for some products

\*\* For grades M210-35A and M230-50A the maximum width is 1190 mm



“Electrical steels play a vital role in the generation, transmission, distribution and use of electrical power.”



## Insulation coatings

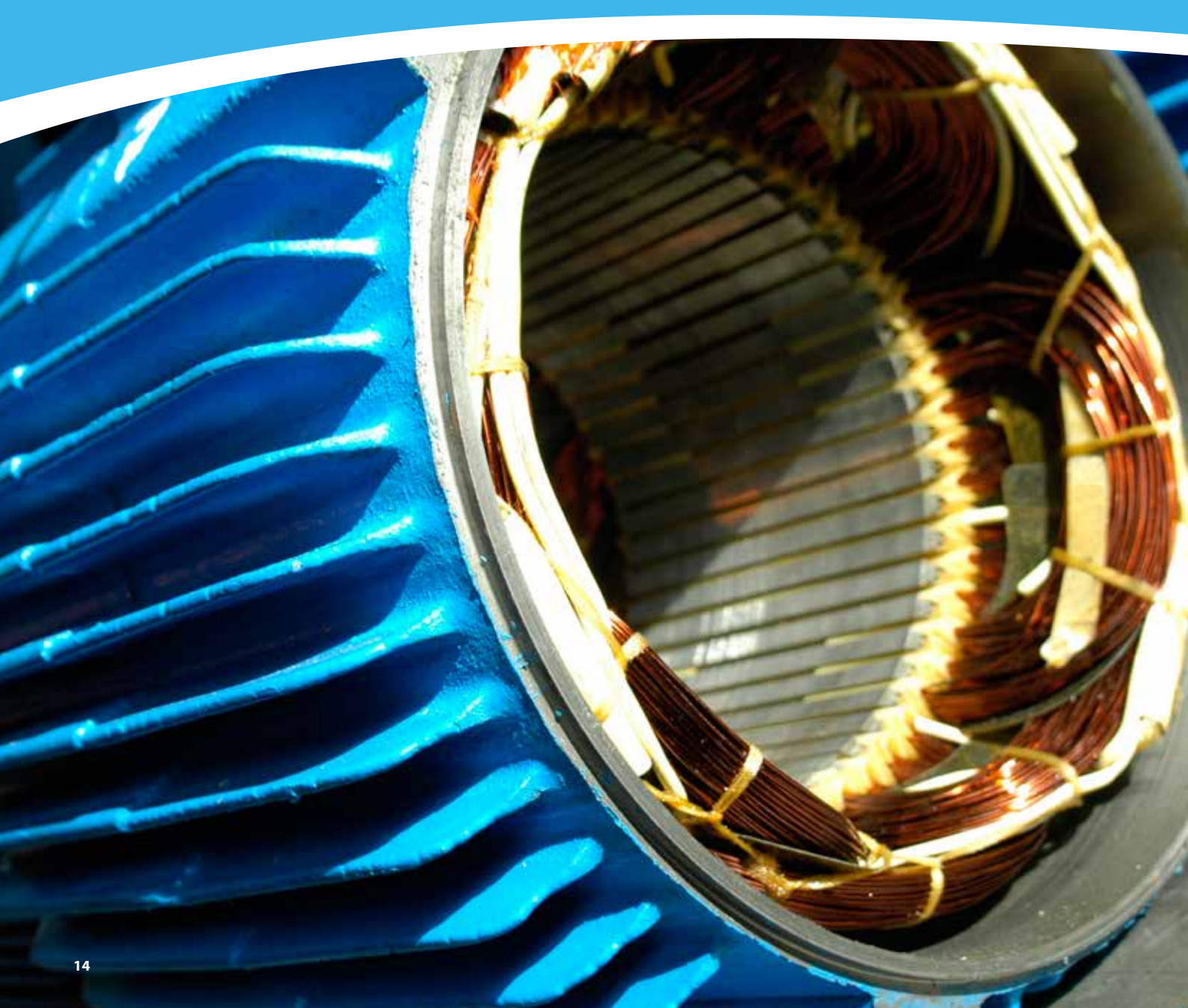
Cogent Power's electrical steels are supplied with customer specified coating to improve surface insulation resistance and precisely tailor the electrical steel to the customer's processing requirements.

Coatings have differing properties and the thickness can be tailored according to requirements.  
New coatings combine performance with the environment.

We ensure that our materials are produced under safe and environmentally friendly conditions and this duty of care is carried forward into application.

Our formaldehyde free and organic coating, Suralac 7000FF ensures a clean working environment in application, free from potentially hazardous fumes.

Our new bonded coating, Suralac 9000, is now available for our thin gauge products. This coating may be heated to enable lamination stacks to bond together. This type of bonding delivers improved noise performance for large volume production of thin materials and is compatible with other traditional insulation coatings.



**Table 6: Technical properties coatings**

Designation	Suralac® 1000			Suralac® 3000 Suralac® 3000FF <sup>1</sup>		Suralac® 5000		Suralac® 7000			Suralac® 9000	
Type	Organic			Organic with fillers		Semi-organic		Inorganic			Organic	
Description	Organic synthetic resin			Organic synthetic resin with inorganic fillers FF = Formaldehyde free		Organic resin with phosphates and sulphates		Phosphate based with inorganic fillers and some organic resin			Epoxy based coating for bonding of stamped parts <sup>2</sup>	
Class acc. IEC 60404-1-1	EC-3			EC-6		EC-5-P		EC-5-N / EC-5-AS			—	
Class acc. ASTM A976-97	C-3			C-6		—		C-4 / C-5 <sup>3</sup>			—	
Thickness range, per side	0.7 - 6 µm			3.5 - 6 µm		0.7 - 1.2 µm		0.7 - 3.5 µm			3.5 - 5.5µm	
Standard thickness	2.5 µm			6 µm		1.2 µm		1.5 µm			4.5 µm	
Colour	Clear to brown			Grey		Brown to grey		Grey			Clear	
<b>Temperature capability:</b>												
in air (continuous)	180°C			180°C		200°C		270°C			<sup>2</sup>	
in inert gas (intermittent)	450°C			500°C		500°C		850°C			—	
<b>Withstands:</b>												
Stress relief annealing <sup>4</sup>	—			—		—		YES			—	
Burn-out repair	—			YES		—		YES			—	
Aluminium casting	YES			YES		YES		YES			—	
<b>Chemical resistance:</b>												
Stamping lubricants <sup>5</sup>	YES			YES		YES		YES			— <sup>6</sup>	
Transformer oils	YES			YES		YES		YES			YES	
Freon	YES			YES		YES		YES			YES	
Typical pencil hardness	8 - 9 H			8 - 9 H		8 - 9 H		9 H			5 - 7 H	
<b>Typical thickness:</b>												
µm per side	0.7	2.5	6	3.5	6	0.7	1.2	0.7	1.5	3.5	—	
Typical welding <sup>7</sup>	good	spec	spec	spec	spec	exc	exc	exc	good	mod	—	
Typical punching <sup>7</sup>	exc	exc	good	good	mod	good	exc	good	good	mod	good	
<b>Surface insulation resistance:</b>												
(Franklin ASTM A717):												
Typical value, Ω·cm <sup>2</sup> per lamination	10	50	>200	>200	>200	3	7	20	40	>200	>200	
Typical value, Amperes per side	0.45	0.1	<0.03	<0.03	<0.03	0.7	0.4	0.25	0.15	<0.03	<0.03	

**Notes:**

1. Suralac® 3000FF is a formaldehyde free version of Suralac® 3000 with the same properties as this coating.
2. For properties related to bonded laminations please refer to the separate data sheet for Suralac® 9000.
3. Suralac® 7000 is classified as a C-5 coating however it can be used as a C4 coating.
4. Stress relief annealing in inert or preferably in slightly oxidizing atmosphere.
5. Testing involves all lubricants used by our present customers. New lubricants may need special consideration.
6. Lubricants used at stamping may impact on the bonding strength and are not recommended.
7. exc = excellent, good = good, mod = moderate, spec = special precautions/techniques needed.



[www.cogent-power.com](http://www.cogent-power.com)

**Surahammars Bruks AB**

Box 201

SE-735 23 Surahammar

Sweden

T: +46 (0)220 34500

F: +44 (0)220 30372

E: [salesno@cogent-power.com](mailto:salesno@cogent-power.com)

## Typical data for SURA® M250-50A

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	W/kg at 100 Hz	W/kg at 200 Hz	W/kg at 400 Hz	W/kg at 1000 Hz	W/kg at 2500 Hz
0,1	0,02	0,06	30,6	0,04	0,10	0,28	1,38	5,71
0,2	0,07	0,17	40,7	0,16	0,42	1,15	4,91	19,8
0,3	0,13	0,31	47,9	0,34	0,88	2,41	10,0	41,4
0,4	0,22	0,46	54,5	0,57	1,47	4,03	16,8	71,8
0,5	0,31	0,65	61,3	0,83	2,17	6,03	25,6	113
0,6	0,43	0,86	69,0	1,13	3,00	8,47	36,6	169
0,7	0,55	1,12	77,8	1,47	3,95	11,3	50,3	243
0,8	0,70	1,41	88,6	1,85	5,05	14,7	67,2	338
0,9	0,86	1,77	102	2,28	6,30	18,7	87,8	461
1,0	1,02	2,21	120	2,75	7,73	23,4	113	617
1,1	1,21	2,79	145	3,28	9,36	28,8	143	
1,2	1,42	3,63	186	3,89	11,2	35,2		
1,3	1,67	5,16	278	4,61	13,4	42,4		
1,4	2,02	9,69	584	5,51	15,9	50,9		
1,5	2,38	26,7	1600	6,51	18,9	60,7		
1,6	2,71	68,6	3680					
1,7	2,96	143	6890					
1,8	3,18	263	11600					

Loss at 1.5 T , 50 Hz, W/kg 2,38

Loss at 1.0 T , 50 Hz, W/kg 1,02

Anisotropy of loss, % 10

Magnetic polarization at 50 Hz

H = 2500 A/m, T 1,55

H = 5000 A/m, T 1,64

H = 10000 A/m, T 1,77

Coercivity (DC), A/m 30

Relative permeability at 1.5 T 740

Resistivity,  $\mu\Omega\text{cm}$  59

Yield strength, N/mm<sup>2</sup> 475

Tensile strength, N/mm<sup>2</sup> 590

Young's modulus, RD, N/mm<sup>2</sup> 175 000

Young's modulus, TD, N/mm<sup>2</sup> 190 000

Hardness HV5 (VPN) 220



RD represents the rolling direction

TD represents the transverse direction

Values for yield strength (0.2 % proof strength)

and tensile strength are given for the rolling direction

Values for the transverse direction are approximately 5% higher





N30	10.8-11.2	1.08-1.12	9.8-10.5	780-836	$\geq 12$	$\geq 955$	28-30	223-239	$\leq 80$
N33	11.4-11.7	1.14-1.17	10.5-11.0	836-876	$\geq 12$	$\geq 955$	31-33	247-263	$\leq 80$
N35	11.7-12.1	1.17-1.21	10.8-11.5	860-915	$\geq 12$	$\geq 955$	33-35	263-279	$\leq 80$
N36	11.9-12.2	1.19-1.22	10.8-11.5	860-915	$\geq 12$	$\geq 955$	34-36	271-287	$\leq 80$
N38	12.2-12.6	1.22-1.26	10.8-11.5	860-915	$\geq 12$	$\geq 955$	36-38	287-303	$\leq 80$
N40	12.6-12.9	1.26-1.29	10.5-11.0	836-876	$\geq 12$	$\geq 955$	38-40	303-318	$\leq 80$
N42	12.9-13.2	1.29-1.32	10.5-11.0	836-876	$\geq 12$	$\geq 955$	40-42	318-334	$\leq 80$
N43	13.0-13.3	1.30-1.33	10.5-11.0	836-876	$\geq 12$	$\geq 955$	41-43	326-342	$\leq 80$
N45	13.3-13.7	1.33-1.37	10.5-11.0	836-876	$\geq 12$	$\geq 965$	43-45	342-358	$\leq 80$
N48	13.8~14.2	1.38~1.42	$\geq 10.5$	$\geq 835$	$\geq 12$	$\geq 955$	46~49	366~390	$\leq 80$
N50	13.8~14.5	1.38~1.45	$\geq 10.5$	$\geq 835$	$\geq 11$	$\geq 955$	47~51	374~406	$\leq 80$
N52	14.3~14.8	1.43~1.48	$\geq 10.8$	$\geq 860$	$\geq 11$	$\geq 876$	50~53	398~422	$\leq 80$
N27M	10.2-10.6	1.02-1.06	9.6-10.1	764-804	$\geq 15$	$\geq 1194$	25-27	199-215	$\leq 100$
N30M	10.8-11.2	1.08-1.12	10.1-10.6	804-844	$\geq 15$	$\geq 1194$	28-30	223-239	$\leq 100$
N33M	11.4-11.7	1.14-1.17	10.5-11.0	844-884	$\geq 15$	$\geq 1194$	31-33	247-263	$\leq 100$
N35M	11.7-12.1	1.17-1.21	10.8-11.5	860-915	$\geq 15$	$\geq 1114$	33-35	263-279	$\leq 100$
N36M	11.9-12.2	1.19-1.22	11.1-11.6	884-923	$\geq 15$	$\geq 1194$	34-36	271-287	$\leq 100$
N38M	12.2-12.6	1.22-1.26	10.8-11.5	860-915	$\geq 14$	$\geq 1114$	36-38	287-303	$\leq 100$
N40M	12.6-12.9	1.26-1.29	10.8-11.5	860-915	$\geq 14$	$\geq 1114$	38-40	303-318	$\leq 100$
N42M	12.9-13.2	1.29-1.32	10.8-11.4	860-907	$\geq 14$	$\geq 1114$	40-42	318-334	$\leq 100$
N45M	13.3-13.7	1.33-1.37	10.8-11.4	860-907	$\geq 17$	$\geq 1114$	43-45	334-358	$\leq 100$
N48M	13.6~14.0	1.36~1.40	$\geq 11.8$	$\geq 939$	$\geq 14$	$\geq 1114$	46~49	366~390	$\leq 100$
N50M	14.0~14.5	1.39~1.43	$\geq 13.0$	$\geq 1033$	$\geq 14$	$\geq 1114$	48~51	382~406	$\leq 100$
N27H	10.2-10.6	1.02-1.06	9.6-10.1	764-804	$\geq 17$	$\geq 1353$	25-27	199-215	$\leq 120$
N30H	10.8-11.2	1.08-1.12	10.1-10.6	804-844	$\geq 17$	$\geq 1353$	28-30	223-239	$\leq 120$
N33H	11.4-11.7	1.14-1.17	10.6-11.1	844-884	$\geq 17$	$\geq 1353$	31-33	247-263	$\leq 120$

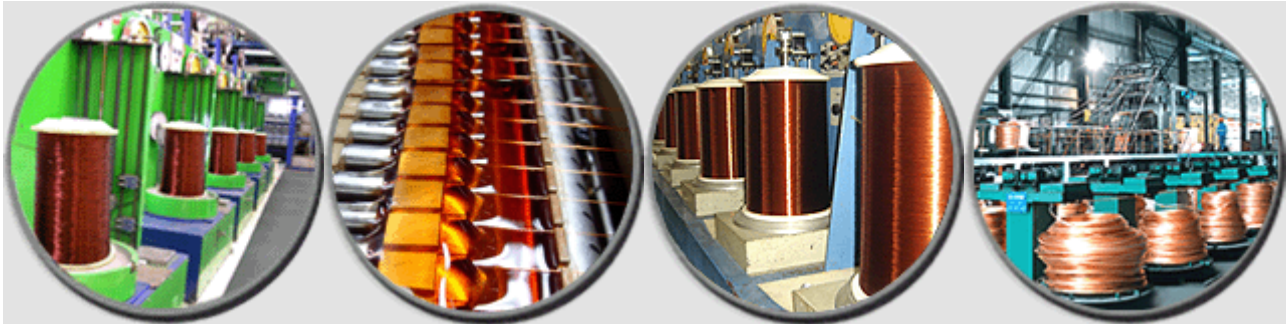
N35H	11.7-12.1	1.17-1.21	10.8-11.5	860-915	≥17	≥1353	33-35	263-279	≤120
N36H	11.9-12.2	1.19-1.22	11.1-11.6	884-923	≥17	≥1353	34-36	271-287	≤120
N38H	12.2-12.6	1.22-1.26	11.5-12.0	915-955	≥17	≥1353	36-38	287-303	≤120
N40H	12.6-12.9	1.26-1.29	11.5-12.0	915-955	≥17	≥1353	38-40	303-318	≤120
N42H	12.9-13.2	1.29-1.32	11.5-12.0	915-955	≥17	≥1353	40-42	318-334	≤120
N45H	13.2~13.8	1.26~1.32	≥12.4	≥987	≥17	≥1353	42~46	335~366	≤120
N46H	13.4~13.8	1.34~1.38	≥12.8	≥1019	≥17	≥1353	44~47	350~374	≤120
N48H	13.6~14.2	1.36~1.42	≥12.8	≥1019	≥16	≥1274	45~48	358~382	≤120
N27SH	10.2-10.6	1.02-1.06	9.6-10.1	764-804	≥20	≥1592	25-27	199-215	≤150
N30SH	10.8-11.2	1.08-1.12	10.1-10.6	804-844	≥20	≥1592	28-30	223-239	≤150
N33SH	11.4-11.7	1.14-1.17	10.6-11.1	844-884	≥20	≥1592	31-33	247-263	≤150
N35SH	11.7-12.1	1.17-1.21	10.8-11.5	860-915	≥20	≥1595	33-35	263-279	≤150
N38SH	12.1-12.5	1.21-1.25	10.8-11.5	860-915	≥20	≥1592	36-38	287-302	≤150
N40SH	12.6-12.9	1.26-1.29	10.8-11.5	860-915	≥20	≥1592	38-40	303-318	≤150
N42SH	12.8~13.2	1.28~1.32	≥11.8	≥939	≥20	≥1672	40~43	320~343	≤150
N45SH	13.2~13.8	1.32~1.38	≥12.6	≥1003	≥20	≥1592	43~46	342~366	≤150
N25UH	9.8-10.2	0.98-1.02	9.2-9.6	732-764	≥25	≥1990	23-25	183-199	≤180
N28UH	10.4-10.8	1.04-1.08	9.8-10.2	780-812	≥25	≥1990	26-28	207-223	≤180
N30UH	10.8-11.2	1.08-1.12	10.1-10.6	804-844	≥25	≥1990	28-30	223-239	≤180
N35UH	11.7-12.1	1.17-1.21	10.5-11.2	836-890	≥25	≥1989	33-35	263-278	≤180
N38UH	12.1-12.5	1.21-1.25	≥11.4	≥907	≥25	≥1990	36-39	287-310	≤180
N40UH	12.5-12.8	1.25-1.28	≥11.4	≥907	≥25	≥1990	38-41	302-326	≤180
N25EH	9.8-10.2	0.98-1.02	9.2-9.6	732-764	≥30	≥2387	23-25	183-199	≤200
N28EH	10.4-10.8	1.04-1.08	9.8-10.2	780-812	≥30	≥2387	26-28	207-223	≤200
N30EH	10.8-11.2	1.08-1.12	10.1-10.6	804-844	≥30	≥2387	28-30	223-239	≤200
N35EH	11.7-12.1	1.17-1.21	≥10.2	≥812	≥30	≥2388	33-36	263-287	≤200
N38EH	12.1-12.5	1.21-1.25	≥11.4	≥907	≥30	≥2388	36-39	287-310	≤200
N30AH	10.8~11.3	1.08~1.13	≥10.2	≥812	≥35	≥2785	28~32	223~255	≤220
N33AH	11.2~11.7	1.12~1.17	≥10.2	≥812	≥35	≥2785	31~34	247~271	≤220

<b>Tensile Strength</b>	8.0kg/mm <sup>2</sup>	<b>Coeff.of Thermal Expansion</b>	4×10 <sup>-6</sup> %/°C
<b>Specific Heat</b>	0.12kCal/(kg.°C)	<b>Thermal Conductivity</b>	7.7w/(m°C)
<b>Yound's Modulus</b>	1.6×10 <sup>11</sup> N/m <sup>2</sup>	<b>Rigidity</b>	0.64N/m <sup>2</sup>
<b>Poisson's Ratio</b>	0.24	<b>Compressibility</b>	9.8×10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /N
<b>Curie Temperature</b>	310~340°C		



*CUTES Enameled Copper Wire*

*Enameled Copper Wire*





***CUTES Enameled Copper Wire***

**ENAMEL TYPES**

We produce a range of types enameled copper wires, from class B 130°C to class C 200°C, as follow:

Abbr.	Coating		Temperature Index	Executive Standards	Diameters Available
	Base Coating	Over coating	Thermal Class		
<b>UEW/130</b> <b>PUR/130</b>	Polyurethane		130°C (B class)	IEC60317-4 MW 75-C JIS C 3202.6	0.03mm-1.40mm
<b>UEW/155</b> <b>PUR/155</b>			155°C (F class)	IEC60317-20 MW 79-C JIS C 3202.7	0.03mm-1.40mm
<b>UEW/130</b> <b>PUR/130</b>			180°C (H class)	IEC60317-51 MW 82-C JIS C 3202.6	0.03mm-1.40mm
<b>EIW/180</b> <b>PEI/180</b>	Polyester-imide		180°C (H class)	IEC60317-8 MW 30-C 65 JIS C 3202.8	0.08mm-3.20mm
<b>EI/AIW/200</b> <b>PEI/AI/200</b>	Polyesterimide	Polyimide- amide	200°C (C class)	IEC60317-13 MW 35-C MW 73-C	0.30mm-3.20mm
<b>PEW/130</b>	Polyester		130°C (B class)	IEC60317-34 JIS C 3202.5	0.08mm-3.20mm
<b>PEW/155</b>	Modified Polyester		155°C (F class)	IEC60317-3 MW 5-C JIS C 3202.5	0.08mm-3.20mm
<b>UEW/N/130</b>	Polyurethane	polyamide	130°C (B class)	IEC60317-19 MW 28-C	0.03mm-1.40mm
<b>UEW/N/155</b>			155°C (F class)	IEC60317-21 MW 80-C	0.03mm-1.40mm
<b>UEW/N/180</b>			180°C (H class)	IEC60317-51 MW 83-C	0.03mm-1.40mm
<b>EIW/N/180</b>	Polyester-imide	polyamide	180°C (H class)	IEC60317-22 MW 76-C	0.08mm-3.20mm
<b>PEW/N/155</b>	Modified Polyester	polyamide	155°C (F class)	MW 24-C	0.08mm-3.20mm
<b>PEW/N/130</b>	Polyester	polyamide	130°C (B class)		0.08mm-3.20mm



**CUTES Enameled Copper Wire**

**PROPERTIES AND APPLICATION**

Abbr.	Properties	Application
UEW/130 PUR/130	Very good solder ability and thermal properties.	Used in transformers, linear motors, relays, solenoids, small motors, clock coils, watch coils, fly-back transformers, magnetic heads, instruments
UEW/155 PUR/155	Very good solder ability and higher thermal properties than 130 °C .	Used in transformers, linear motors, relays, solenoids, small motors, clock coils, watch coils, fly-back transformers, magnetic heads, instruments
UEW/130 PUR/132	Good solder ability at 370 o C and elevated thermal values	Used for automotive coils as relays and ignition coils, in transformers and in solenoids
EIW/180 PEI/180	High thermal properties and good chemical resistance.	Used in motors, transformers.
EI/AIW/200 PEI/AI/200	Very high thermal properties and high mechanical resistance	Used in motors, compressors
PEW/130	Good mechanic and chemical properties	Used in Motors for Fans, washing machines
PEW/155	Improved mechanic, chemical and thermal performance in comparison to Polyester enameled copper wires	Used in various motors
UEW/N/130	The polyamide over coated wires demonstrate the same properties as the above wires without polyamide coating. What's more, because of the polyamide coating, these wires' mechanic properties are improved greatly.	Used in such cases where fast winding is needed.
UEW/N/155		
UEW/N/180		
EIW/N/180		
PEW/N/155		
PEW/N/130		



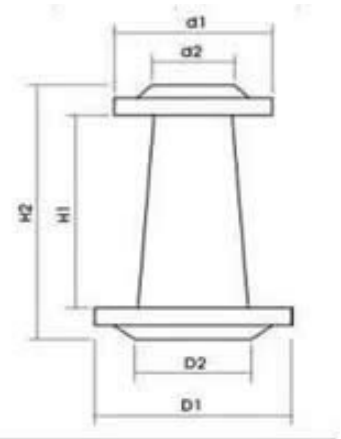
***CUTES Enameled Copper Wire***

**PACKING INFO**

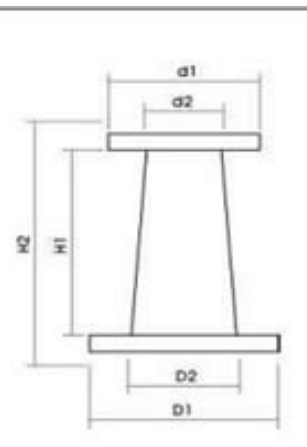
Spool Type	Sizes Applicable	Net Weight of Spool	Approximate Weight of Wires Applicable	Spools per Carton
	(mm)	(Kg)	(Kg)	
PL-2S	Ø0.020-0.050	0.13	1.2	16
PT-2	Ø0.020-0.050	0.17	2	12
PT-4	Ø0.050-0.30	0.3	4.5	4
PT-10	Ø0.10 - 0.30	0.62	12	2
PT-15	Ø0.30 - 0.56	0.74	18	1
PT-25	Ø0.50 - 2.36	1	28	1
PT-45	Ø0.36 - 3.20	2.15	45	—
PT-60	Ø0.36 - 3.20	2.25	60	—
PT-90	Ø0.50 - 3.20	3.9	90	—
PT-200	Ø0.50 - 3.20	7.3	200	—
PC220*110	Ø0.50 - 2.36	1	28	—
PC355*180	Ø2.00 - 3.20	60	60	—

**SPOOL INFO**

TYPE	REEL WEIGHT (GRAM)	STANDARD WEIGHT WITH WIRE (KG)	MEASUREMENT					
			d1	d2	D1	D2	H1	H2
PT-45 PCZ-250	2150	45	236	140	250	160	335	400
PT-90 PCZ-315	3900	90	300	180	315	200	425	500
PT-200 PCZ-400	7300	200	375	225	400	250	530	630
PT-270	10500	270	435	225	460	280	528	628



TYPE	REEL WEIGHT (GRAM)	STANDARD WEIGHT WITH WIRE (KG)	MEASUREMENT					
			d1	d2	D1	D2	H1	H2
PT-4	240	4	124	74	140	86	170	200
PT-10	620	10	160	96	180	110	200	230
PT-15	740	15	180	96	200	110	200	230
PT-25	1000	25	215	110	230	130	250	280
PT-60	2250	60	269	150	296	178	350	400





***CUTES Enameled Copper Wire***

**GAUGE REFERENCE**

Gauge No.	SWG		AWG	
	mm	inch	mm	inch
50	0.0254	0.001	0.0252	0.00099
49	0.0305	0.0012	0.0282	0.00111
48	0.0406	0.0016	0.0315	0.00124
47	0.0508	0.002	0.0356	0.0014
46	0.061	0.0024	0.0399	0.00157
45	0.0711	0.0028	0.0447	0.00176
44	0.0813	0.0032	0.0508	0.00198
43	0.0914	0.0036	0.0559	0.00222
42	0.102	0.004	0.0635	0.00249
41	0.112	0.0044	0.0711	0.0028
40	0.122	0.0048	0.0787	0.00314
39	0.132	0.0052	0.0889	0.00353
38	0.152	0.006	0.102	0.00396
37	0.173	0.0068	0.114	0.00445
36	0.193	0.0076	0.127	0.005
35	0.213	0.0084	0.142	0.00561
34	0.234	0.0092	0.16	0.0063
33	0.254	0.01	0.18	0.00708
32	0.274	0.0108	0.203	0.00795
31	0.295	0.0116	0.226	0.00893
30	0.315	0.0124	0.254	0.01
29	0.345	0.0136	0.287	0.0112
28	0.376	0.0148	0.32	0.0126
27	0.417	0.0164	0.361	0.0142
26	0.457	0.018	0.404	0.0159
25	0.508	0.02	0.455	0.0179
24	0.559	0.022	0.511	0.0201
23	0.61	0.024	0.574	0.0226
22	0.711	0.028	0.643	0.0253
21	0.813	0.032	0.724	0.0285
20	0.914	0.036	0.813	0.032
19	1.016	0.04	0.912	0.0359
18	1.219	0.048	1.024	0.04
17	1.422	0.056	1.151	0.045
16	1.626	0.064	1.29	0.051
15	1.829	0.072	1.45	0.057
14	2.032	0.08	1.629	0.064
13	2.337	0.092	1.829	0.072
12	2.642	0.104	2.052	0.081
11	2.946	0.116	2.304	0.091
10	3.251	0.128	2.588	0.102
9	3.658	0.144	2.906	0.114
8	4.064	0.16	3.264	0.128
7	4.45	0.176	3.665	0.144
6	4.877	0.192	4.115	0.162



## PHASOFLEX & PHASOFLEX-2

For thermal class 130 (B)

- **PHASOFLEX** is a grained KREMPEL three-layer insulation with the same structure as TRIVOLTON® H; **PHASOFLEX-2** is a grained KREMPEL two-layer insulation with the same structure as TRIVOLTON® HP. Used primarily as phase insulation in insulation systems of thermal class 130 (B).
- After the production of the TRIVOLTON® starting material **PHASOFLEX** is grained in an embossing calendar. In this way we give this KREMPEL multi-layer insulation material its good pliancy and stretch, while a certain minimum rigidity is preserved at the same time. These properties are a precondition for use as phase insulation. The minimum rigidity is necessary so the phase insulation can be pushed between the windings, and the pliancy is necessary so the material is not damaged during winding head deformation by the mechanical stresses that arise.
- Areas of application: Phase insulation.



Adhesive layer

Technical data for PHASOFLEX / Measured according to IEC 60626-2			
Properties	Unit	2515	2525
Nominal thickness before graining	mm	0.15	0.25
Nominal thickness after graining	mm	0.41	0.54
Film thickness	µm	23	23
Grammage	g/m <sup>2</sup>	180	330
Tolerance	± %	12	12
Area yield approx.	m <sup>2</sup> /kg	5.6	3.0
Tensile strength, MD	N/10 mm	≥ 90	≥ 190
Tensile strength, CMD	N/10 mm	≥ 70	≥ 140
Elongation, MD	%	≥ 3	≥ 4
Elongation, CMD	%	≥ 12	≥ 12
Breakdown voltage	kV	≥ 5	≥ 5

Technical data for PHASOFLEX-2 / Measured according to IEC 60626-2			
Properties	Unit	2515	2525
Nominal thickness before graining	mm	0.15	0.25
Nominal thickness after graining	mm	0.38	0.48
Film thickness	µm	23	23
Grammage	g/m <sup>2</sup>	190	300
Tolerance	± %	12	12
Area yield approx.	m <sup>2</sup> /kg	5.3	3.3
Tensile strength, MD	N/10 mm	≥ 90	≥ 175
Tensile strength, CMD	N/10 mm	≥ 70	≥ 110
Elongation, MD	%	≥ 3	≥ 3
Elongation, CMD	%	≥ 10	≥ 10
Breakdown voltage	kV	≥ 4	≥ 4

# ANNEX B: CÀLCULS *SMATH*

# FULL DE CÀLCUL DE LA MÀQUINA

## PARÀMETRES INICIALS

### MIDES DE LA MÀQUINA INICIALS

Radi de la roda,  $R_r := 0,19 \text{ m}$

Ample del motor,  $L := 0,011 \text{ m}$

Entreferro,  $\delta := 0,001 \text{ m}$

### VALORS BASICS DE LA MÀQUINA

Potència,  $P_n := 2200 \text{ W}$

Nombre de fases,  $m := 3 \text{ fases}$

Factor de potència,  $\cos\varphi := 0,85$

Rendiment  $\eta := 0,87 \%$

Nombre ranures  $Q := 24$

Velocitat màxima de la màquina  $v_m := 12,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

## CÀLCULS PRINCIPALS DEL MOTOR

Perímetre de la roda (Lr):  $Lr := Rr \cdot 2 \cdot \pi$   $Lr = 1,1938$  m

Revolucions de la roda (Nrps):  $Nrps := \frac{vm}{Lr}$   $Nrps = 10,4707$  rps

Velocitat nominal (Nn):  $Nn := 700$  rpm

Parell a velocitat nominal (Mnr):  $Mnr := \frac{Pn}{2 \cdot \pi \cdot \frac{Nn}{60}}$   $Mnr = 30,0121$

---

## DIMENSIONS PRINCIPALS DEL MOTOR

S'ha suposat un parell per volum de rotor (TRV) inicial:

$TRV := 40000$   $\frac{Nm}{m^3}$  +

Volum del rotor (Vrot):  $Vrot := \frac{Mnr}{TRV}$   $Vrot = 0,0008$  m<sup>3</sup>

Diàmetre interior del rotor (Di):  $Di := \sqrt{\frac{Vrot \cdot 4}{\pi \cdot L}}$   $Di = 0,2947$  m

Diàmetre de l'estator (Ds):  $Ds := Di - 2 \cdot g$   $Ds = 0,2927$  m

## Bobinat del motor

Els valors obtinguts compleixen els requisits per tal de poder tenir un factor de bobinat correcte i a l'hora aconseguir que el motor no fagui soroll

$$Q := 24 \quad p := 14$$

$$q := \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} \quad q = 0,2857 \frac{\text{ranures}}{\text{fase} \cdot \text{pol}}$$

A continuació trobam els paràmetres de bobinat aconseguits amb Koil i els càlculats per tal de trobar el bobinat idòni.

$$\text{Pas polar [m]}: \quad \tau_p := \frac{\pi \cdot D_i}{2 \cdot p} \quad \tau_p = 0,0331$$

Per tal de comprovar si el bobinat proposat es possible es multiplica el nombre de pols per el nombre de ranures/fase\*pol i el resultat ha de ser un nombre enter

$$s := p \cdot q \quad s = 4 \quad \text{Bobinat de simple capa}$$

$$S := 2 \cdot p \cdot q \quad S = 8 \quad \text{Bobinat de doble capa}$$

El pas polar en graus es calcula en graus mecànics i graus elèctrics

$$\alpha_{\text{mec}} := \frac{360}{Q} \quad \alpha_{\text{mec}} = 15^\circ$$

$$\alpha_{\text{eléc}} := \alpha_{\text{mec}} \cdot p \quad \alpha_{\text{eléc}} = 210^\circ$$

El tipus d'imatant escollit per el seu ús en el montatge del motor és de NeFeB i a continuació es defineixen les seves principals característiques:

Flux magnètic [T]:  $\beta_{\text{imatant}} := 1,15$

Densitat [kg/m<sup>3</sup>]:  $\rho_{\text{imatant}} := 7500$

Intensitat de camp magnètic[A/m]:  $H_c := 700000$

L'amplada de l'iman seleccionat s'ha calculat a partir del factor  $k_s$ , que és la relació entra l'àrea total del pas polar i l'àrea ocupada per l'imatant (2/3)

Amplada relativa de l'imatant:  $k_s := 0,7$

Per tal de poder calcular l'amplada de l'imatant es fan unes aproximacions inicials, en les quals es parteix del coneixement que el flux magnètic a l'entreferro ( $\beta_{\text{ent}}$ ) serà d'un valor aproximat a la unitat depenent de l'altura de l'imatant.

$\beta_{\text{ent}} := 1$        $\delta := 0,001$

Permeabilitat en el buit ( $\mu_0$ ):  $\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$

$\mu_{\text{imatant}} := \frac{\beta_{\text{imatant}}}{\mu_0 \cdot H_c}$        $\mu_{\text{imatant}} = 1,3073$

Gruix de l'imatant [m]:  $L_{\text{imatant}} := \frac{\mu_{\text{imatant}} \cdot \delta}{\frac{\beta_{\text{imatant}}}{\beta_{\text{ent}}} - k_s}$        $L_{\text{imatant}} = 0,0029$

A continuació es realitza els càlculs per acabar de tenir la informació necessària sobre el bobinat. El nombre d'espores per fase i espores per ranura, tenguent en compte que el bobinat es realitzarà en paral·lel:

Inducció màxima a l'entreferro [T]:  $\beta_{\max} := \frac{4}{\pi} \cdot \beta_{\text{ent}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot k_s\right)$   $\beta_{\max} = 1,1345$

Flux màxim a l'entreferro [Wb]:  $\phi_{\max} := \frac{2}{\pi} \cdot \beta_{\max} \cdot \frac{\pi \cdot D_i}{2 \cdot p} \cdot L$   $\phi_{\max} = 0,0003$

El factor de bobinat (kb) del motor per 24 ranures i 28 pols és el següent:

$k_b := 0,933$

El valor de la tensió d'alimentació per fase provinent de les 4 bateries seleccionades és el següent:

$U := 20V$

La freqüència de funcionament (f) de la màquina sabent la velocitat nominal d'aquesta és la següent:

$f := \frac{p \cdot N_n}{60}$   $f = 163,3333 \text{ Hz}$   $\omega_{\text{rad}} := 2 \cdot \pi \cdot f$   $\omega_{\text{rad}} = 1026,2536$

Espires per fase:  $N_f := \frac{U}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot k_b \cdot \phi_{\max} \cdot f}$   $N_f = 112,4544$

Espires per ranura:  $N_r := \frac{m \cdot N_f}{Q}$   $N_r = 14,0568$   $r >$  Per tant serà  $N_r = 14$

Nombre total de fils conductors:  $Z_t := 3 \cdot N_f$   $Z_t = 337,3631$

Fils conductors per ranura:  $Z_r := \frac{Z_t}{Q}$   $Z_r = 14,0568$  / Per tant  $\rightarrow Z_r = 14$

## Dimensions de les ranures i dents del motor

Per tal de poder calcular les dimensions de les ranures i les dents del motor, es fa a partir d'uns valors màxims i mínims establerts d'inducció en les dents, d'aquesta manera es pot identificar un rang de valors en els quals es pot trobar les dimensions idònies per cada cas. S'iterarà entre els següents valors d'inducció i es treura una mida aproximada

$$\beta_{d1} := 1,5 \text{ T}$$

$$\beta_{d2} := 2,1 \text{ T}$$

$$wd1 := \frac{\beta_{ent} \cdot n \cdot Ds}{Q \cdot \beta_{d1}} \quad wd1 = 0,0255$$

$$wd2 := \frac{\beta_{ent} \cdot n \cdot Ds}{Q \cdot \beta_{d2}} \quad wd2 = 0,0182$$

$$wd11 := \frac{2 \cdot p \cdot o_{\max}}{Q \cdot \beta_{d1} \cdot L} \quad wd11 = 0,0186$$

$$wd22 := \frac{2 \cdot p \cdot o_{\max}}{Q \cdot \beta_{d2} \cdot L} \quad wd22 = 0,0133$$

Una vegada calculat la dimensió de les dents, es pot calcular la dimensió de les ranures:

L'espai que ocuprà cada ranura, tenent en compte l'espai entre ranures:  $trs := \frac{n \cdot Ds}{Q} \quad trs = 0,0383$

Per tant l'amplada màxima superior de la ranura serà:

$$\bar{w}_{rr} := trs - wd22 \quad \bar{w}_{rr} = 0,025$$

Per tal de calcular les mides de la separació entre ranures de l'estator es torna a donar un rang de valors d'inducció:

$$\beta_{s1} := 1,1 \text{ T}$$

$$\beta_{s2} := 1,5 \text{ T}$$

$$ws1 := \frac{\beta_{ent}}{2} \cdot \frac{tp}{\beta_{s1}} \quad ws1 = 0,015$$

$$ws2 := \frac{\beta_{ent}}{2} \cdot \frac{tp}{\beta_{s2}} \quad ws2 = 0,011$$



Separació entre ranures de l'estator:

$$w_s := \frac{w_{s1} + w_{s2}}{2} \quad w_s = 0,013$$

Per tal de calcular les mides de la separació entre ranures del rotor es torna a donar un rang de valors d'inducció:

$$\beta_{r1} := 1,3$$

$$\beta_{r2} := 1,6$$

$$w_{r1} := \frac{\beta_{ent}}{2} \cdot \frac{TP}{\beta_{r1}} \quad w_{r1} = 0,0127$$

$$w_{r2} := \frac{\beta_{ent}}{2} \cdot \frac{TP}{\beta_{r2}} \quad w_{r2} = 0,0103$$

Separació entre ranures (ampla superior del dent):

$$w_r := \frac{w_{r1} + w_{r2}}{2} \quad w_r = 0,0115$$

Una vegada s'han calculat totes les mesures necessàries per poder establir les mides de totes les regions de la màquina (Diàmetres interiors i exterior de la xapa, rotor i estator. Amplada, llargària i separació de les ranures. Amplada de l'imant) És pot fer una estimació del diàmetre total del motor a l'hora de construir-lo

Diàmetre total del motor[m]:

$$D_t := D_s + 2 \cdot \delta + 2 \cdot L_{imant} + 2 \cdot w_r \quad D_t = 0,3236 \text{ m}$$

## Càlculs paràmetres elèctrics.

Sabent que un motor IE5 que compren les seves velocitats entre 600-900rpm ha de tenir un rendiment mínim de 87,2%

$$U = 20 \text{ V} \quad \eta = 0,87 \quad P_n = 2200 \text{ W} \quad \cos\varphi = 0,85$$

Amb els valors obtinguts en el disseny de la màquina, es realitzen els càlculs per tal de trobar els paràmetres elèctrics que determinaran el funcionament de la màquina.

La intensitat nominal de funcionament de la màquina serà  $I_1$  [A]:

$$I_1 = \frac{P_n}{m \cdot U \cdot \eta \cdot \cos\varphi} \quad I_1 = 49,5831$$

A partir de la intensitat es pot determinar la secció teòrica del conductor. el valor del factor de bobinat kw s'ha extret amb el programa KOIL

$$\text{Factor de bobinat (kw)} \quad kw = 0,91$$

Una vegada s'ha obtingut la intensitat es pot treure la FMM, i amb aquesta, la llargària de l'imant

$$FMM = \frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot I_1 \cdot N_f \cdot 2 \cdot kw}{2 \cdot p} \quad FMM = 978,9021$$

$$l_m = \frac{FMM}{H_c} \quad l_m = 0,0014 \text{ m}$$

## Resistència dels conductors i pèrdues

La resistència del coure que s'utilitzarà es calcula a partir de la seva resistivitat teòrica, sabent la llargària del conductor i la secció d'aquest.

La llargària dels conductors es calcula sabent la llargària de la màquina i l'amplada de la ranura, amb la següent expressió:

La llargària del conductor

$$L_{cond} := 2 \cdot L + 2 \cdot W_{rr}$$

$$L_{cond} = 0,0721 \text{ m}$$

Donant una densitat de corrent base, que s'inclou dins el rang per a màquines amb ventilació

Densitat de corrent

$$A := 10 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$$

$$S_{cond} := \frac{I_1}{A}$$

$$S_{cond} = 4,9583 \text{ mm}^2$$

El diàmetre del conductor serà

$$D_{cond} := \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot S_{cond}}$$

$$D_{cond} = 2,5126 \text{ mm}$$

L'obertura mínima de la ranura serà:

$$L_{ran} := 2 \cdot D_{cond} = 5,0252$$

Sabent el nombre de conductors per ranura que es tenen es pot calcular l'àrea de coure que es tindrà per cada una de les ranures de la màquina.

Àrea del coure per ranura:

$$A_{cu} := Z_r \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{cond}^2 \quad A_{cu} = 69,6979 \text{ mm}^2$$

Una vegada es sap el valor de l'àrea que ocupa el coure es pot calcular el valor de l'àrea mínim que tindrà la ranura

Es considerarà que el valor màxim del factor d'apilament serà de 0,4

$$K_{apila} := 0,4$$

Àrea mínima per ranura:

$$A_{ranura} := \frac{A_{cu}}{K_{apila}} \quad A_{ranura} = 174,2447 \text{ mm}^2$$

## Pèrdues de la màquina

### Pèrdues al ferro

Les pèrdues més importants que presenta la màquina en qüestió són al ferro, per tal de intentar calcular-les d'una forma analítica es tindran en compte les pèrdues que es presenten per histèresis i les pèrdues de Foucault.

Aquestes són les constants per calcular les pèrdues d'histèresis i de corrents de Foucault.

$$K_h := 2,15 \cdot 10^{-2} \quad K_f := 6 \cdot 10^{-4}$$

Per tal de treure les pèrdues teòriques al ferro també es suposa una inducció mitja i el valor de la  $n_h$  depèn d'aquesta inducció.

$$\beta_{mig} := 1,1 \quad n_h := 2$$

### Pèrdues totals al ferro

$$P_{fe} := (K_h \cdot \beta_{mig}^{n_h} \cdot f) + (K_f \cdot \beta_{mig}^2 \cdot f^2) = 23,6172 \text{ W}$$

Aquestes pèrdues obtingudes són les pèrdues totals que es tindran al ferro de la màquina. Es poden seguir algunes pautes per tal d'intentar reduir-les com per exemple augmentar la resistivitat de les xapes que formen la màquina, aconseguint reduir el flux.

## Pèrdues al coure

Les pèrdues al coure de la màquina es tindran als conductors d'aquesta. Per tal de poder calcular-les s'han de suposar les temperatures a les quals treballarà per tal de designar una resistivitat del material.

La resistivitat del coure a 20°C:

$$\rho_{20} := \frac{1}{58}$$

La resistivitat del coure a 100°C:

$$T_0 := 343 \text{ } ^\circ\text{K} \quad \rho_{100} := \rho_{20} \cdot \frac{235 + T_0}{235 + 293} \quad \rho_{100} = 0,0189 \frac{\Omega}{\text{m}}$$

Sabent la llargària del conductor per ranura i el nombre de conductors per fase que aquesta tindrà es pot calcular el valor de la resistència del coure per fase de cada bobina.

$$R_{cu} := \rho_{100} \cdot \frac{Z_r \cdot (L_{cond})}{\frac{\pi}{4} \cdot D_{cond}^2} \quad R_{cu} = 0,0039 \ \Omega$$

---

Les pèrdues totals al coure de la màquina seràn:

$$P_{cu} := 3 \cdot I_1^2 \cdot R_{cu} \quad P_{cu} = 28,4517 \ \text{W}$$

## Càlcul de les inductàncies

Per tal de calcular les inductàncies principals de la màquina, en primer lloc s'ha de saber el valor del factor de karter que li serà assignat.

**Càlcul del factor de carter(Kc):**

$$S_{kk} := \frac{n \cdot D_i}{Q} \cdot 1000 \quad S_{kk} = 38,5758 \text{ mm}$$

$$\gamma := \frac{\left( \frac{L_{ran}}{L_{imant} + g} \right)^2}{5 + \left( \frac{L_{ran}}{L_{imant} + g} \right)} \cdot \frac{1}{1000} \quad \gamma = 1,2818$$

$$K_c := \frac{S_{kk}}{S_{kk} - \gamma \cdot (g + L_{imant})} \quad K_c = 1,0001$$

A continuació, es podrà saber el valor de la inductància principal del motor, a partir del valor del flux que actua al motor, es podrà treure la inductància, que s'extreurà a partir de la separació del càlcul en la inductància principal i la inductància dels caps de les bobines.

**Flux de la màquina:**

$$\lambda_{maq} := \frac{4}{n} \cdot \frac{\tau_p}{P \cdot \left( g + \frac{L_{imant}}{\mu_{imant}} \right) \cdot K_c} \quad \lambda_{maq} = 0,4666$$

Inductància principal:

$$L_m := \mu_0 \cdot (N_r \cdot k_v)^2 \cdot \frac{3}{2} \cdot \lambda_{maq} \cdot L \quad L_m = 1,5829 \cdot 10^{-6}$$

Inductància caps de bobina:

$$L_{cap} := \mu_0 \cdot (N_r \cdot k_v)^2 \cdot \frac{2}{p \cdot q} \cdot \lambda_{maq} \cdot L \quad L_{cap} = 5,2764 \cdot 10^{-7}$$

Inductància total:

$$L_{tot} := L_m + L_{cap} \quad L_{tot} = 2,1106 \cdot 10^{-6}$$

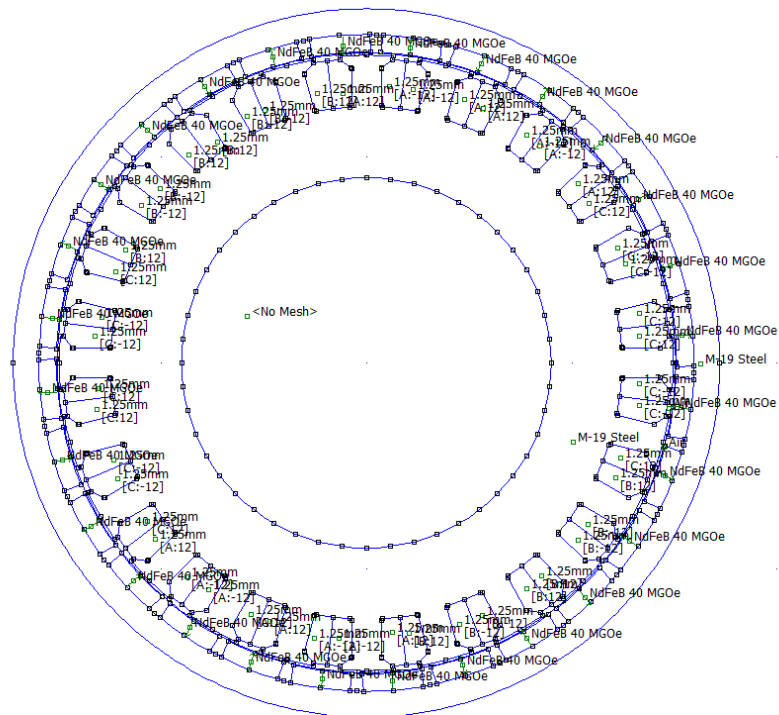


## Resultats finals

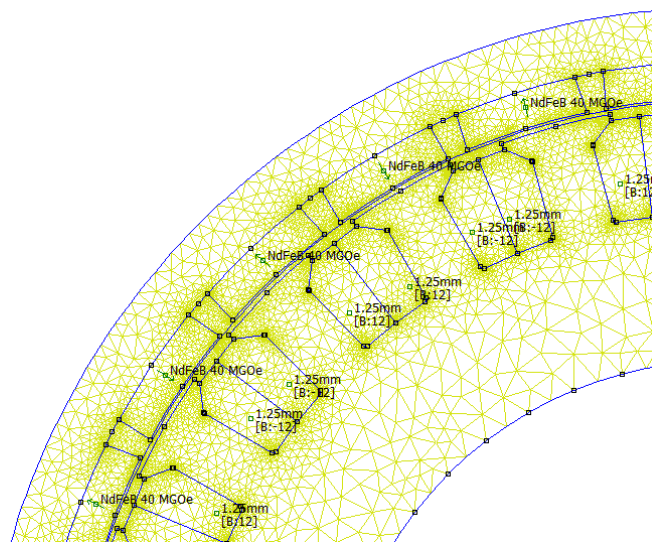
<i>Diàmetre interior del rotor (Di) [m]</i>	0,294
<i>Diàmetre de l'estator (Ds) [m]</i>	0,292
<i>Gruix de l'imant (L<sub>imant</sub>) [m]</i>	0,0029
<i>Amplada de les dents (wd) [m]</i>	0,013
<i>Separació entre ranures, rotor (wr) [m]</i>	0,015
<i>Amplada de la ranura (wrr) [m]</i>	0,025
<i>Separació entre ranures, estator (ws) [m]</i>	0,013
<i>Diàmetre total de la màquina (Dt) [m]</i>	0,324
<i>Diàmetre del conductor (Dcond) [mm]</i>	2,52
<i>Resistència del coure (Rcu) [Ω]</i>	0,004
<i>Flux principal (λ<sub>màq</sub>) [Wb]</i>	0,466
<i>Inductància principal (Lm) [H]</i>	1,58·10 <sup>-6</sup>
<i>Inductància total (L<sub>tot</sub>) [H]</i>	1,73·10 <sup>-6</sup>

ANNEX C:LUAS *i*  
*RESULTATS FEMM*

## C.1. Estudi magnètic del motor



FiguraC.1.-Xapa del motor dissenyat amb els materials assignats



FiguraC.2.-Mallat del motor per processar els materials assignats

```

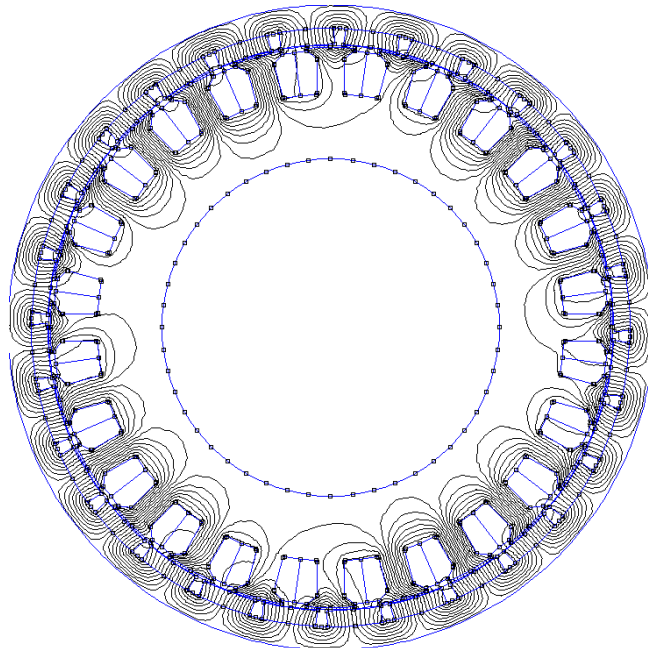
open("DentAmpliat11.fem")
mi_saveas("temp.fem")
mi_modifycircprop("A",1,0);
mi_modifycircprop("B",1,0);
mi_modifycircprop("C",1,0);

showconsole();
steps=40;
delta=(360/28)/steps;
p=28

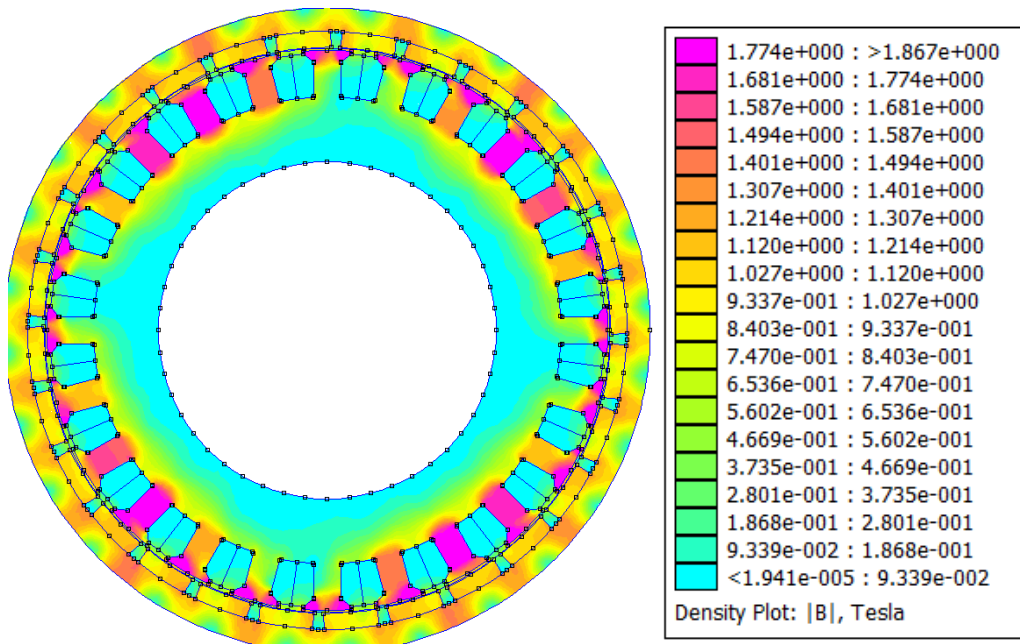
for k=1, 4*(steps+1),1 do
  mi_analyze(1);
  mi_loadsolution();
  --Determinar posició
  angle=(k-1)*delta;
  ca,va,fa=mo_getcircuitproperties("A");
  cb,vb,fb=mo_getcircuitproperties("B");
  cc,vc,fc=mo_getcircuitproperties("C");
  mo_close()
  mi_selectgroup(2);
  mi_moverotate(0,0,delta,4);
  mi_clearselected();
  handle=openfile('FluxBO.txt','a')
  write(handle,angle," ",fa," ",fb," ",fc,"\n")
  closefile(handle);
end

```

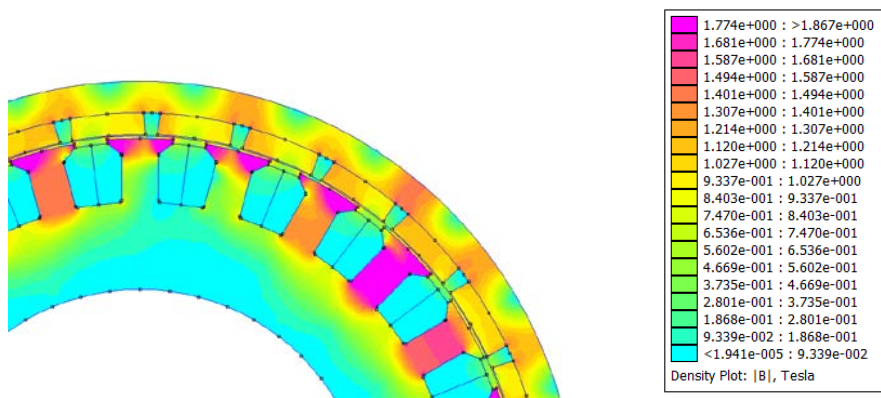
FiguraC.3.-Codi LUA utilitzat per treure el valor del flux al rotor de la màquina



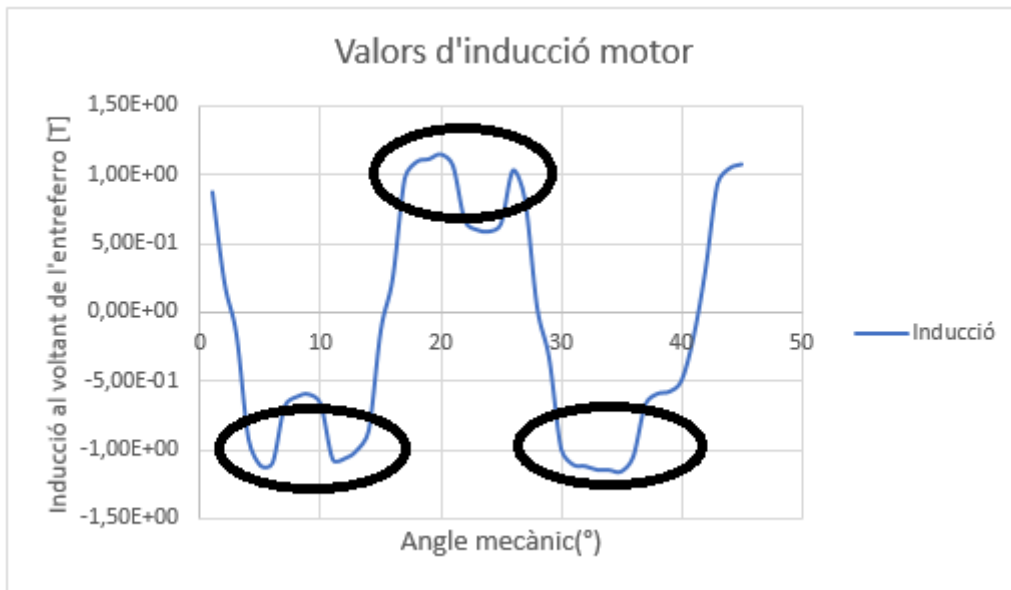
FiguraC.4.-Xapa del motor dissenyat amb les línies flux magnètic



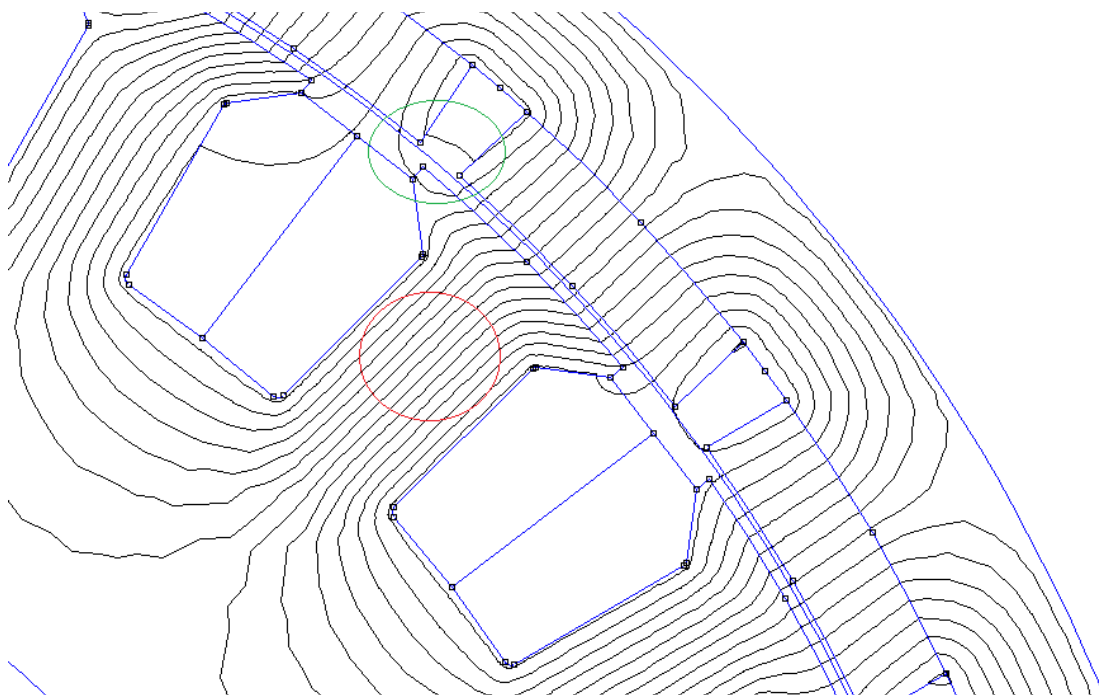
FiguraC.5.-Estudi magnètic del motor sense girar, valors de la inducció per zones.



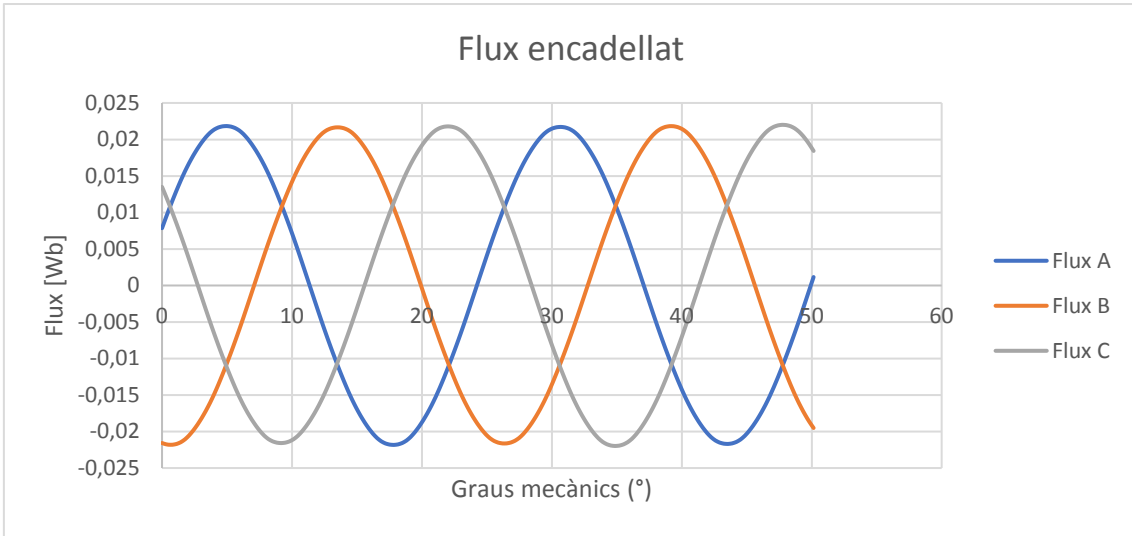
FiguraC.6-Detall de la xapa on s'aprecia la variació de la inducció dependent de la regió.



FiguraC.7.-Valors d'inducció de la màquina a l'entreferro, les zones encerclades són les zones d'interacció dels IMANTS.



FiguraC.8.-Flux encadellat (encerclat de color vermell), flux de dispersió (encerclat de color verd)

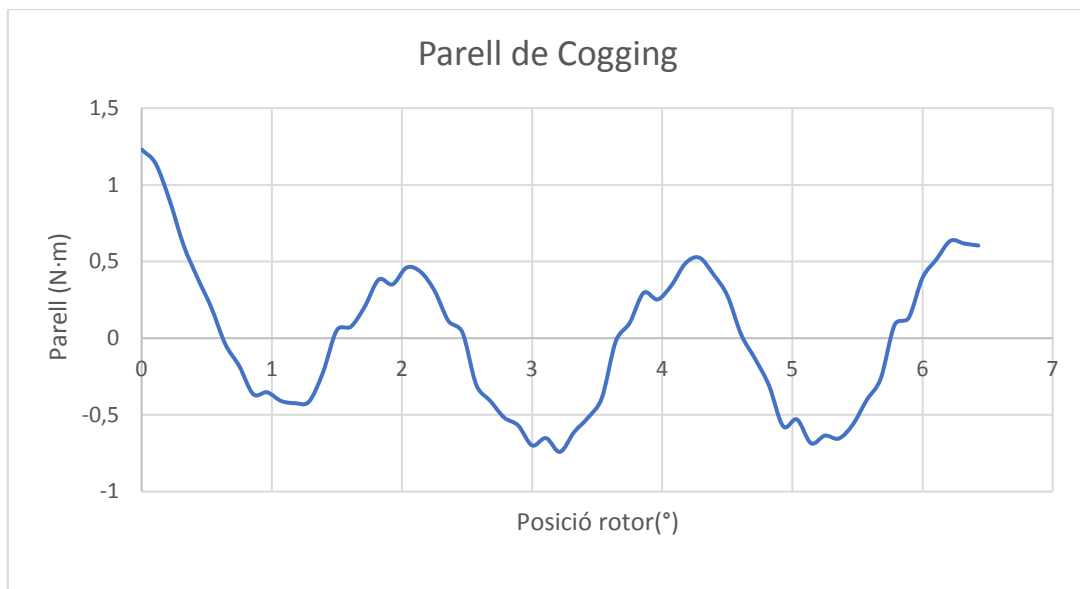


FiguraC.9.-Gràfica del comportament del flux encadellat en la màquina

## C.2.Parell de cogging

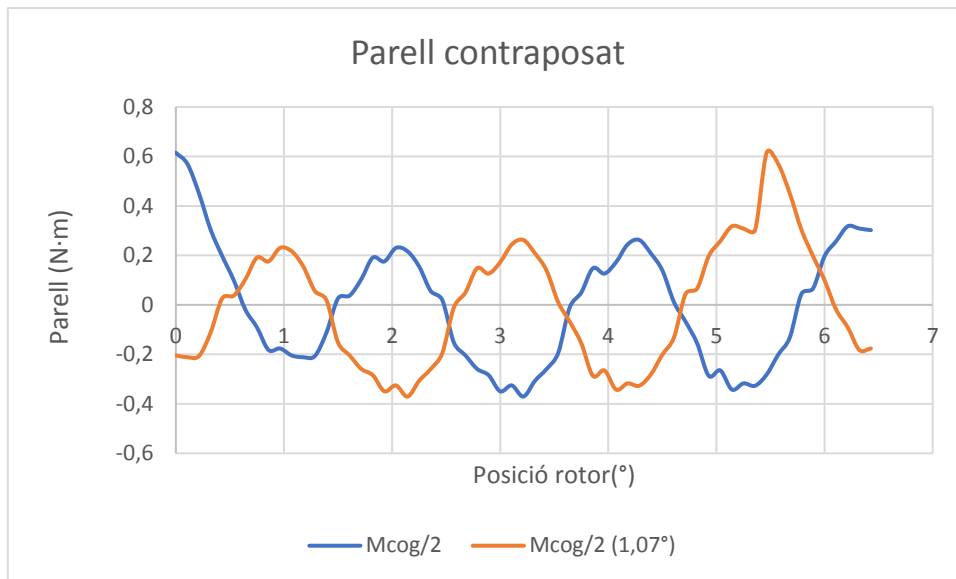
```
open('DentAmpliat11.FEM')
periode=360/168
step=periode/20
for deg=0, 3*periode, step do
  mi_analyze()
  mi_loadsolution()
  --rotam màquina
  mo_groupselectblock(2)
  fem=mo_blockintegral(22)
  mo_clearblock()
  mi_seteditmode('group')
  mi_selectgroup(2)
  mi_moverotate(0,0,step)
  --guardam s'arxiu
  handle=openfile('cogging11.txt','a')
  write(handle,deg,' ',fem,' ','\n')
  closefile(handle)
  mo_close()
end
```

FiguraC.9.-Codi utilitzat per treure el valor del parell de cogging.

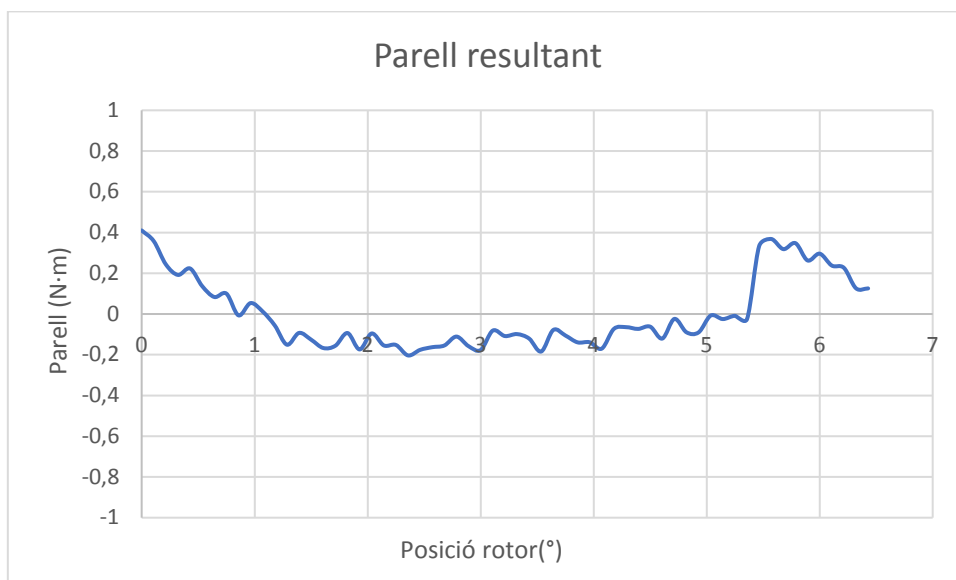


FiguraC.10.-Parell de cogging en funció de la posició del rotor.





*FiguraC.11.-Parell de cogging generat per cada una de les parts de l'imant*

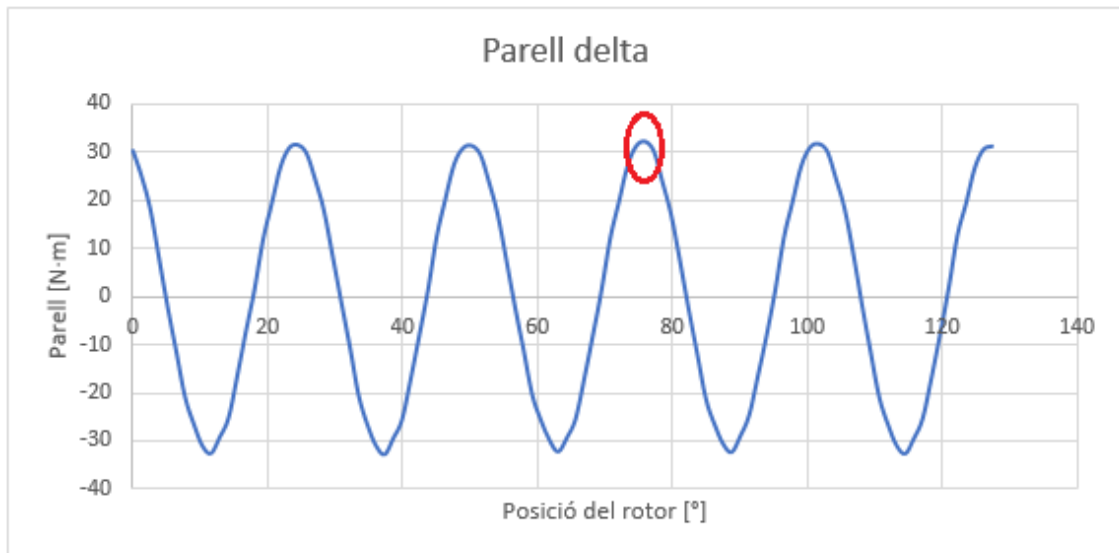


*FiguraC.12.-Parell de cogging resultant de la contraposició de parells generats pels imants.*

### C.3.Parell girant i pèrdues

```
open('DentAmpliat12.fem')
mi_saveas('temp.fem')
p=14
periode=360/p
step=periode/20
for deg=0, 2*periode, step do
    mi_analyze()
    mi_loadsolution()
    --coggin calculat
    mo_groupselectblock(2)
    Mi=mo_blockintegral(22)
    mo_clearblock()
    mi_seteditmode('group')
    mi_selectgroup(2)
    mi_moverotate(0,0,step)
    --guardam s'arxiu
    handle=openfile('parelldelta.txt','a')
    write(handle,deg,' ',Mi,' ','\n')
    closefile(handle)
    mo_close()
end
```

FiguraC.13-Lua per extreure la posició on el parell es màxim aplicant corrent constant



FiguraC.12.-Parell en funció de la posició del rotor, el parell màxim es troba a la posició de 75,36° respecte la posició inicial

```

open("DentAmpliat11.fem")
mi_saveas("Pfe.fem")
p=14
periode=360/p
step=periode/20
pi=3.1415926
Imax=70
alfa=0
---calcul de perdues en el ferro.
---mètode estàtic.
freq=163
--profunditat en m
depth=0.011
Pfes=0
Pfer=0
--coef del model de pèrdues. Bertotti. M600-50
Kc=2.673
Kh=3.275
Ka=0
for deg=0,2*periode,step do
  Ia=Imax*cos(alfa*pi/180)
  Ib=Imax*cos(alfa*pi/180+2*pi/3)
  Ic=Imax*cos(alfa*pi/180-2*pi/3)
  mi_modifycircprop("A",1,Ia)
  mi_modifycircprop("B",1,Ib)
  mi_modifycircprop("C",1,Ic)
  mi_analyze(1)
  mi_loadsolution()
  mo_groupselectblock(2)
  Mi=mo_blockintegral(22)
  mo_clearblock()
  ia,va,fa=mo_getcircuitproperties("A")
  ib,vb,fb=mo_getcircuitproperties("B")
  ic,vc,fc=mo_getcircuitproperties("C")
  Pfes=0
  Pfer=0
  ----calcul de perdues en el ferro
  mo_smooth("off")
  numelm=mo_numelements()
  for k=1,numelm do
    --propietats a cada element
    --p1, p2, p3: potencial magnètic a cada vertex del triangle
    --x,y: coordenades del centroide del triangle.
    --a:area de l'element
    --g:grup al que pertany l'element

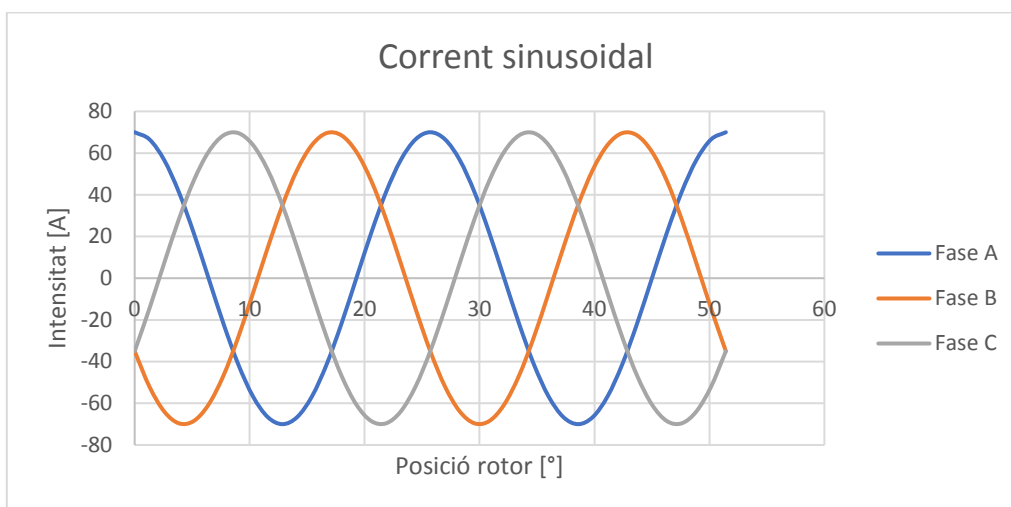
```

```

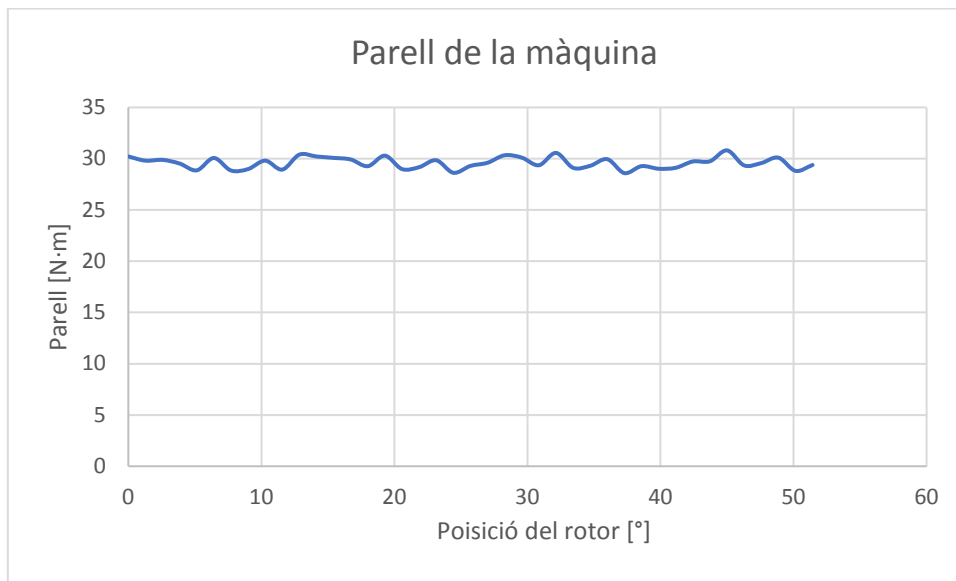
p1,p2,p3,x,y,a,g=mo_getelement(k)
if (g==100) then
  --volum de l'element
  dv=depth*a*mm^2
  --propietats del centroide
  a,bx,by,sig,e,hx,hy=mo_getpointvalues(x,y)
  Bx=abs(bx)
  By=abs(by)
  Bmod=sqrt(Bx^2+By^2)
  --perdues
  Pfes=Pfes+(Kh*freq*Bmod^2+Kc*(freq*Bmod)^2+Ka*(freq*Bmod)^1.5)*dv
end
-----Pfe Rotor
--propietats a cada element
--p1, p2, p3: potencial magnètic a cada vertex del triangle
--x,y: coordenades del centroide del triangle.
--a:area de l'element
--g:grup al que pertany l'element
p1,p2,p3,x,y,a,g=mo_getelement(k)
if (g==2) then
  --volum de l'element
  dv=depth*a*mm^2
  --propietats del centroide
  a,bx,by,sig,e,hx,hy=mo_getpointvalues(x,y)
  Bx=abs(bx)
  By=abs(by)
  Bmod=sqrt(Bx^2+By^2)
  --perdues
  Pfer=Pfer+(Kh*freq*Bmod^2+Kc*(freq*Bmod)^2+Ka*(freq*Bmod)^1.5)*dv
end
end
mi_seteditmode("group")
mi_selectgroup(2)--grup de ferro interior?
--mi_selectgroup(100)--grup de ferro exterior? linea de dins i de fora?
mi_moverotate(0,0,-step)
alfa=alfa+p*step
handle=openfile("parellgirantPfe-BO.txt","a")
write(handle,deg," ",Mi," ",ia," ",ib," ",ic," ",fa," ",fb," ",fc," ",Pfes," ",Pfer,"\n")
closefile(handle)
mo_close()
end

```

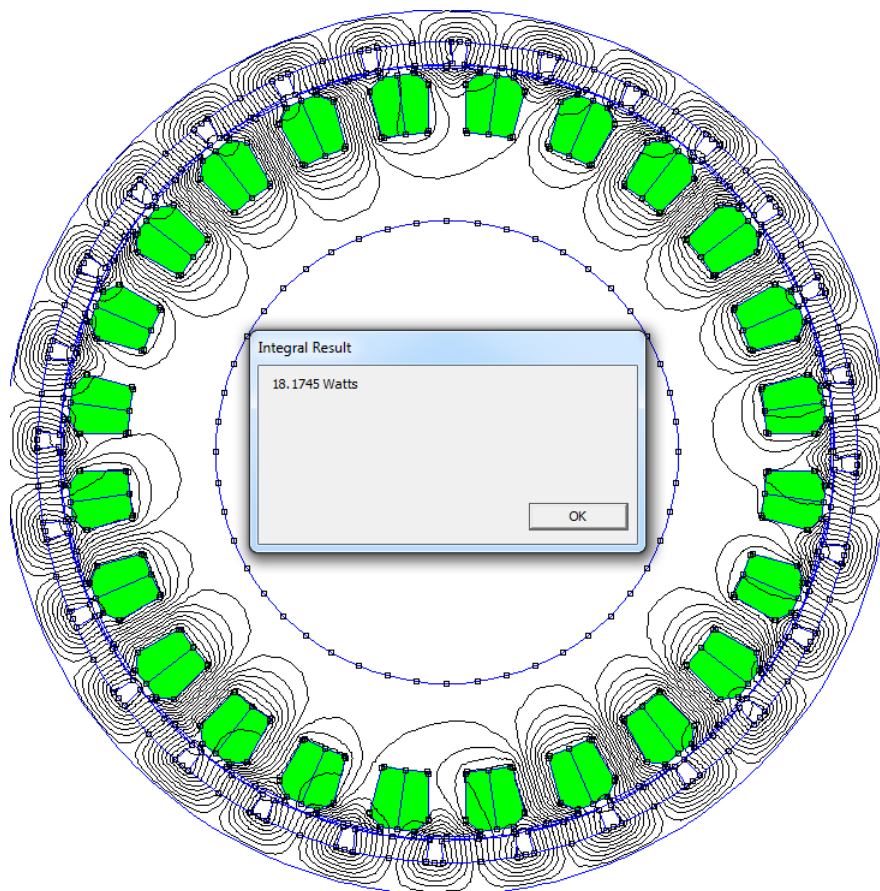
FiguraC.13.-Codi per extreure el valor del parell aplicant corrent sinusoidal i a més calcular el valor de les pèrdues del ferro de la màquina



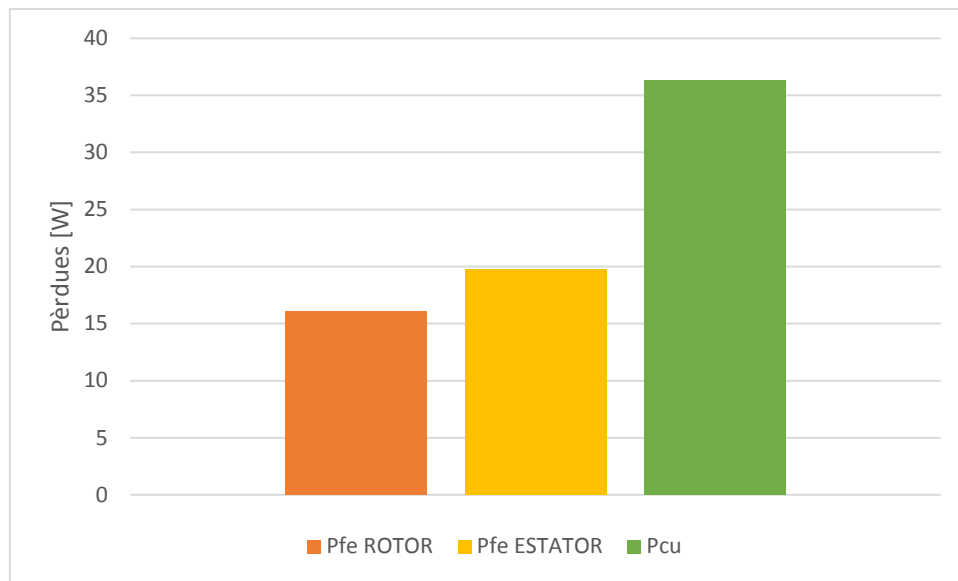
FiguraC.14.-Corrent sinusoidal aplicat per cada una de les fases de la màquina.



FiguraC.15.-Parell de la màquina

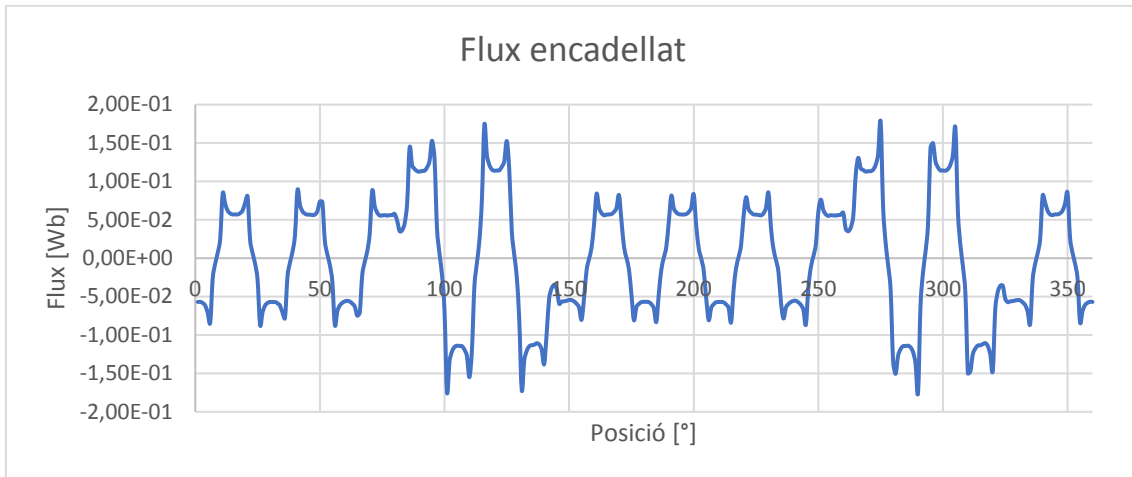


FiguraC.16.-Valor de les pèrdues que presenta el coure de la màquina al circular-hi la el corrent màxim.

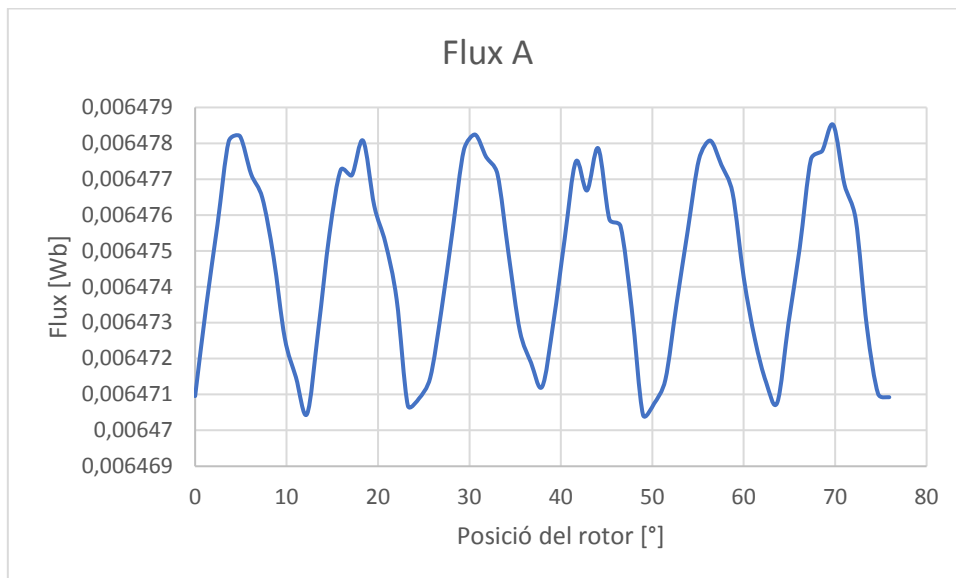


*FiguraC.17.-Valors obtinguts de les pèrdues a cada una de les parts d'interès de la màquina. Pèrdues al ferro del rotor (Pfe ROTOR), pèrdues al ferro de l'estator (Pfe ESTATOR) i les pèrdues al coure (Pcu).*

## C.4. Flux i inductàncies

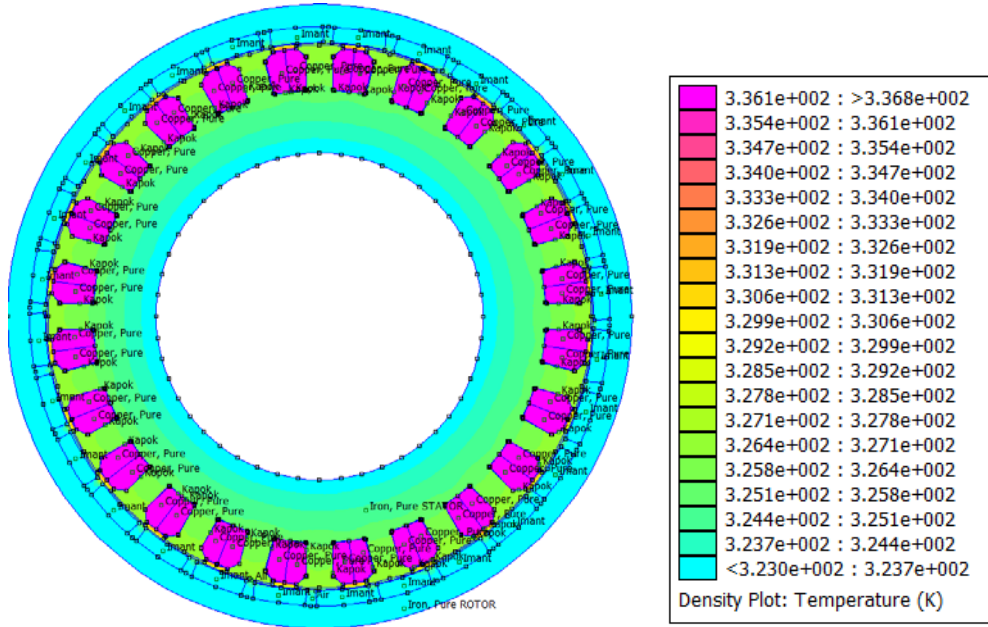


FiguraC.19.-Flux encadellat a l'entreferro de la màquina, s'ha fet un plot  $B \cdot n$  al voltant de l'entreferro

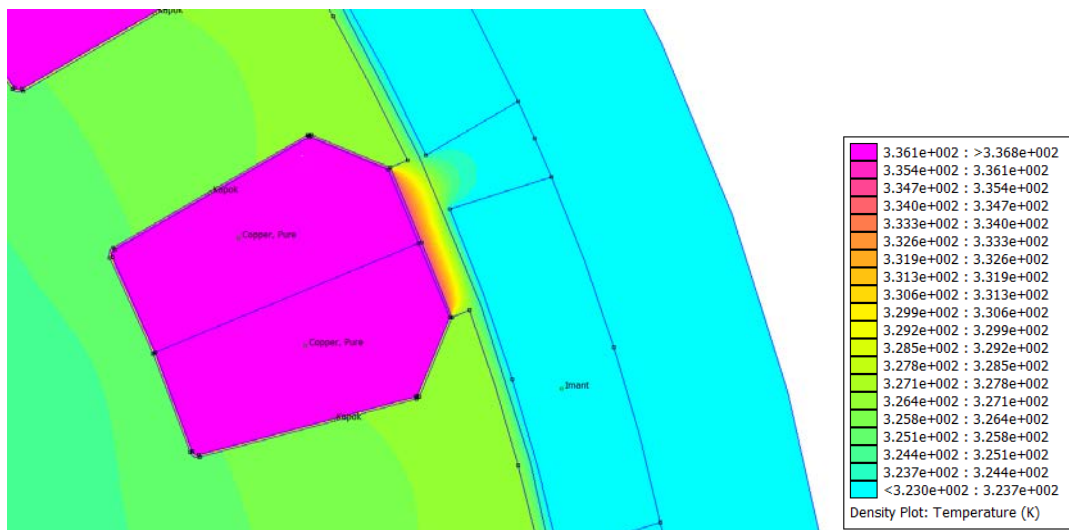


FiguraC.19.-Flux A de la màquina aplicant corrent sinusoidal

## C.5. Tèrmic



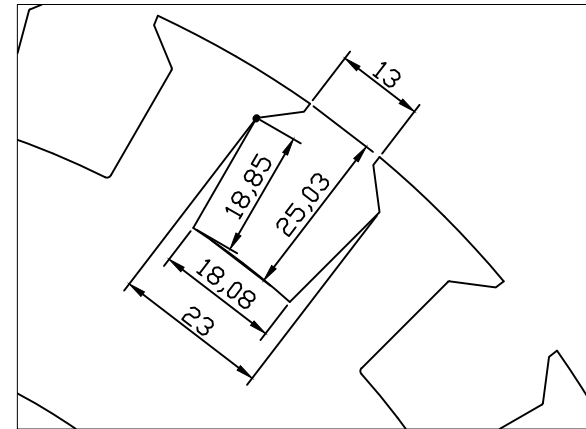
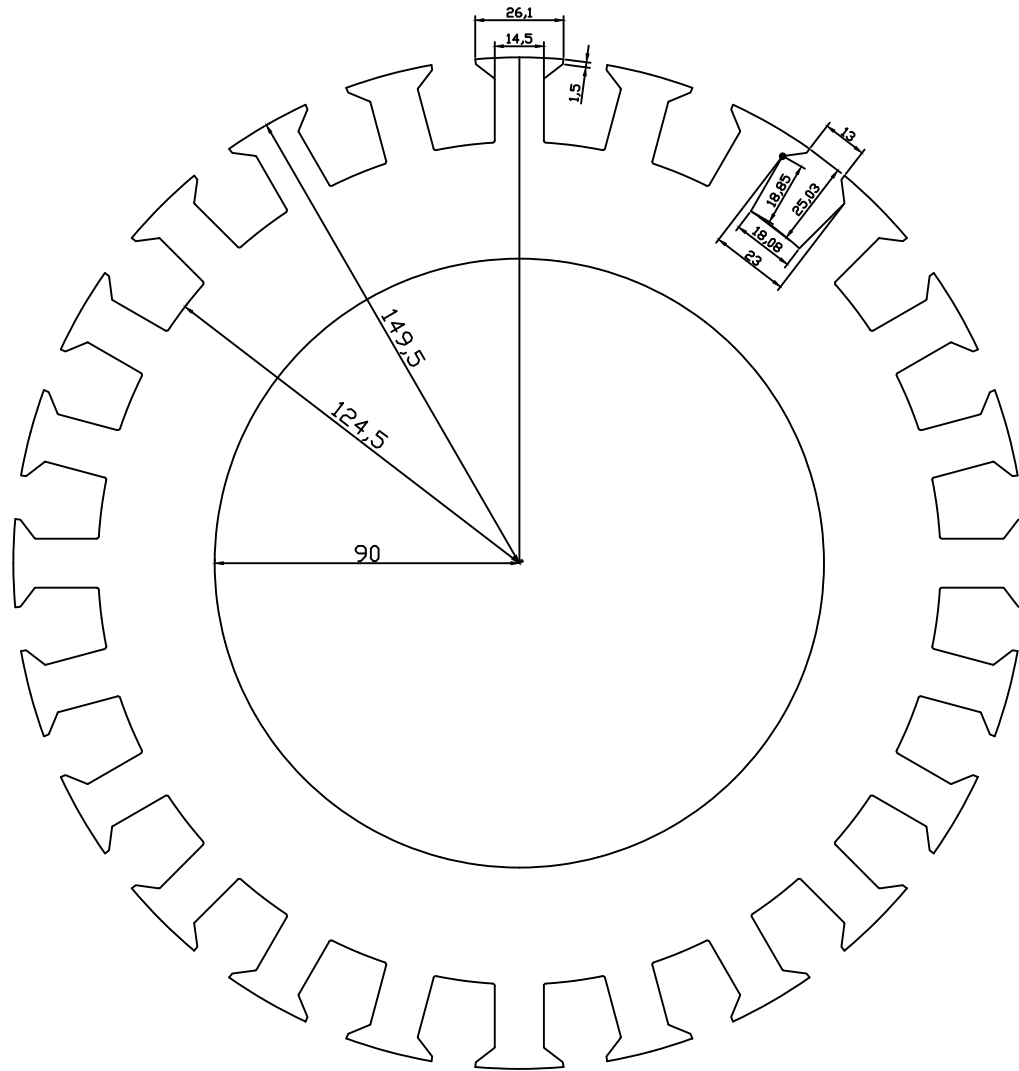
FiguraC.20.-Distribució de temperatures a tota la màquina



FiguraC.21.-Detall de la distribució de temperatures al voltant de la ranura.



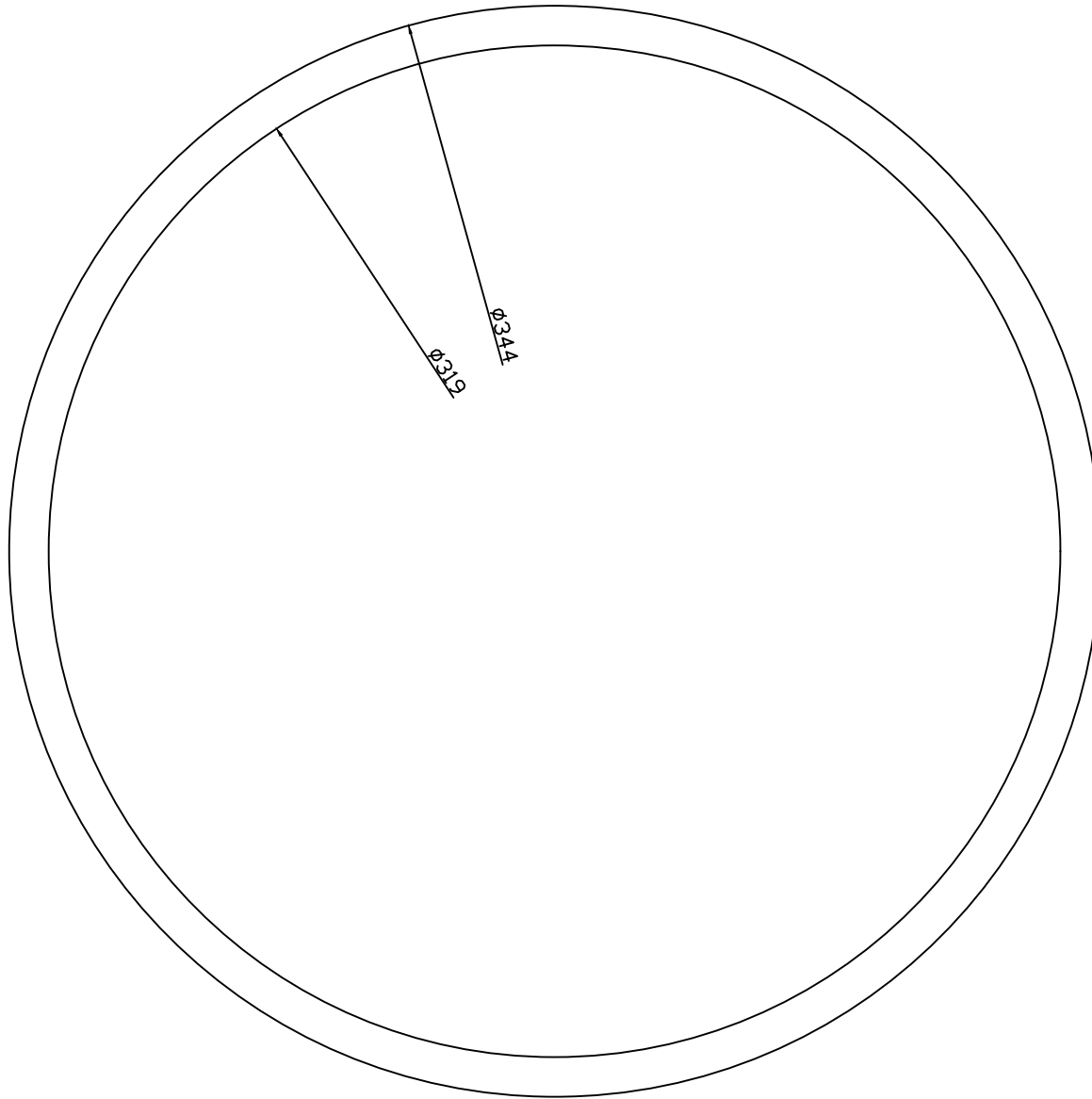
Vista frontal xapa estator



Detall de la ranura

PROJECTE: Disseny d'un motor per a motocicleta elèctrica		DIBUIXANT: Gabriel Perelló Burguera	
Unitats: mm	<b>Xapa de ferro estatòrica</b>		Nº PLÀNOL:1
			DATA: 05/2018
REVISAT PER: Ramon Bargalló		Observacions: Cada una de les xapes estatòriques tindrà un gruix de 0,5mm	
		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH <small>Campus Diagonal Besòs, Edifici A (EEBE) Av. Eduard Marçany 16, 08019, Barcelona</small>	

Vista frontal del ferro del rotor

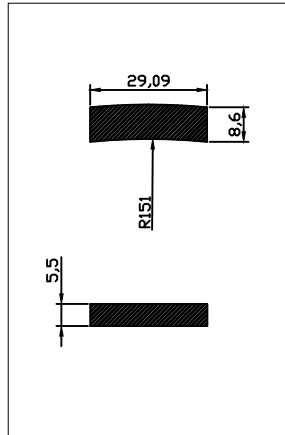


5  
Perfil de  
la xapa  
rotòrica

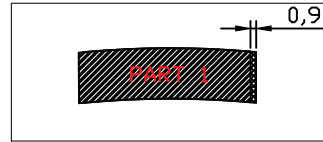


PROJECTE: Disseny d'un motor per a motocicleta elèctrica		DIBUIXANT: Gabriel Perelló Burguera	
Unitats: mm	Xapa de ferro rotòrica		Nº PLÀNOL:2 DATA: 05/2018
REF: 00-02	REVISAT PER: Ramon Bargalló	UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH <small>Campus Diagonal Besòs, Edifici A (EEBE) Av. Eduard Marçany 16, 08019, Barcelona</small>	Observacions:

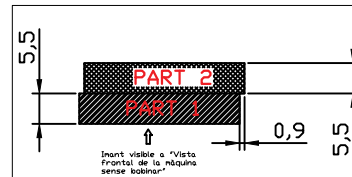
Alçat i planta d'una PART d'imant



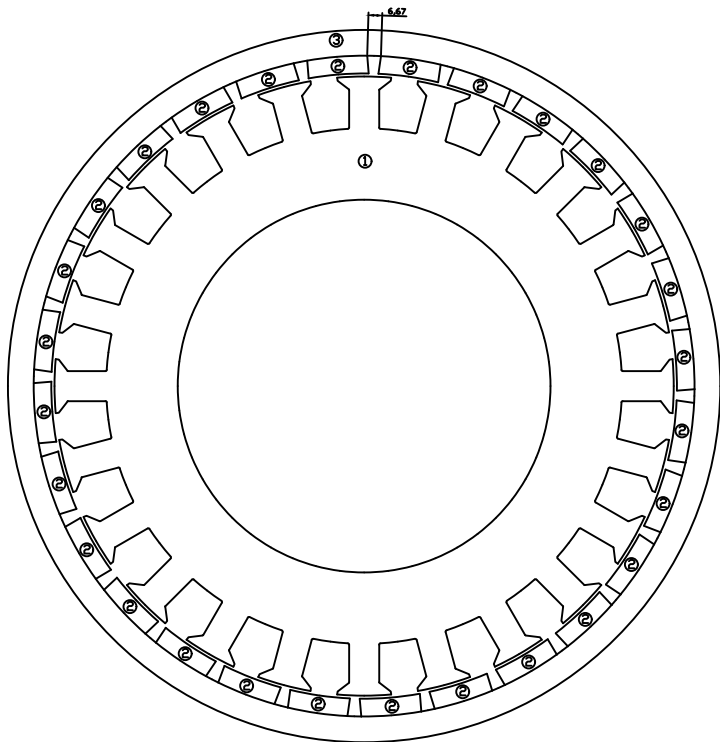
Alçat de dues peces d'imant montades



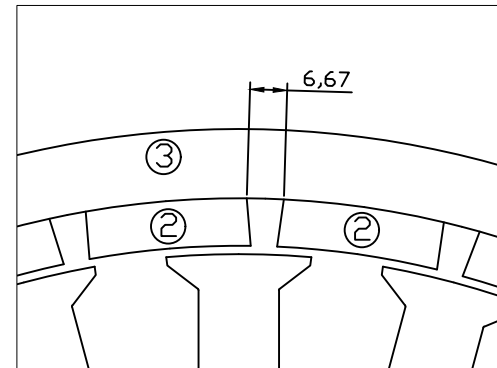
Planta de dues peces d'imant montades



Vista frontal del motor complet sense bobinar



Perfil del motor complet sense bobinar



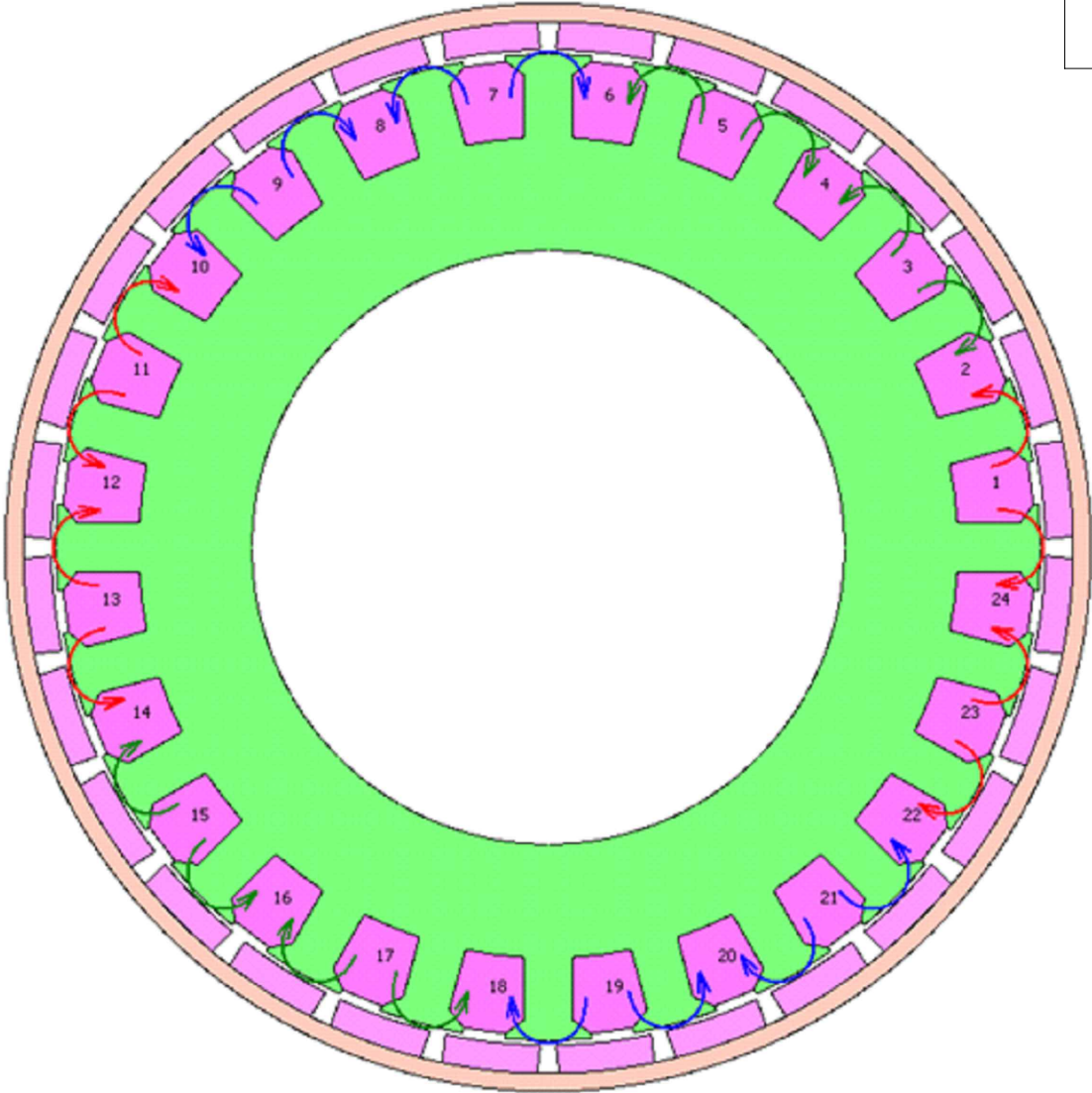
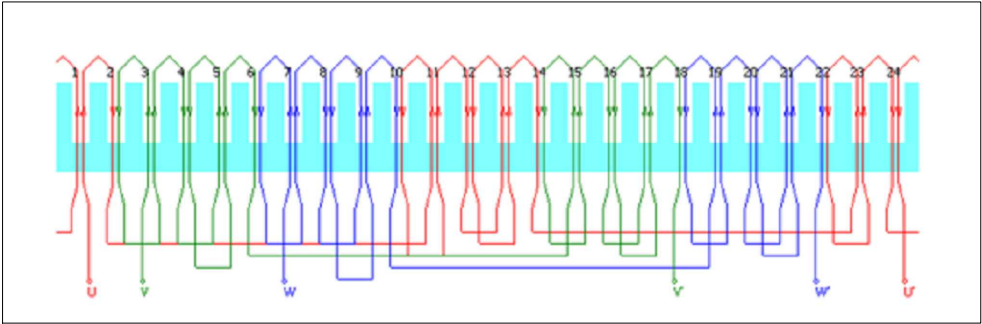
Detall de la separació entre imants

Llegenda

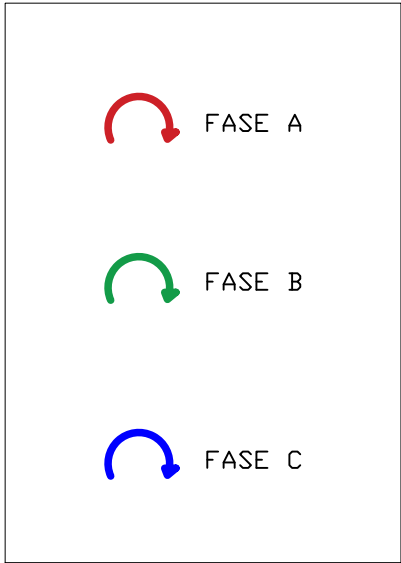
- ① Ferro estator
- ② Imants
- ③ Ferro rotor


PROJECTE: Disseny d'un motor per a motocicleta elèctrica		DIBUIXANT: Gabriel Perelló Burguera	
Unitats: mm	<b>Motor complet i imants</b>		Nº PLÀNOL:3
REVISAT PER:  Ramon Bargalló			DATA: 05/2018
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH <small>Campus Diagonal Besòs, Edifici A (EEBE) Av. Diagonal Marçany 16, 08019, Barcelona</small>		Observacions: A la "Vista frontal del motor complet sense bobinar", per tal de no crear confusions, només s'ha dibuixat la PART 1 dels imants. Tots els imants de la màquina estaran formats per PARTI+PARTE	

# Distribució del bobinat



## Llegenda



PROJECTE: Disseny d'un motor per a motocicleta elèctrica		DIBUIXANT: Gabriel Perelló Burguera	
Unitats: S/N	<b>Bobinat</b>		Nº PLÀNOL:4 DATA: 05/2018
REF: 00-04	REVISAT PER: Ramon Bargalló		Observacions:
		 <b>UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA BARCELONATECH</b> <small>Campus Diagonal Besòs, Edifici A (EEBE) Av. Eduard Marçany 16, 08019, Barcelona</small>	