

Universitat Politècnica de Catalunya
Departament d'Enginyeria Elèctrica
Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona

Tesi Doctoral

**NOVES APORTACIONS AL DESENVOLUPAMENT
DE
MOTORS ELÈCTRICS SENSE COIXINETS**

JOSEP PRAT i AYATS

Enginyer Industrial
Universitat de Vic

1997

TÍTOL TESI	Noves aportacions al desenvolupament de motors elèctrics sense coixinets
AUTOR	Josep Prat i Ayats Enginyer Industrial
DIRECTOR	Ricard Bosch i Tous Dr. Enginyer Industrial
DEPARTAMENT	d'Enginyeria Elèctrica Universitat Politècnica de Catalunya
CONTINGUT	Màquines elèctriques d'inducció alimentades amb font de corrent
PARAULES-CLAU	Màquina elèctrica Inducció electromagnètica Font de corrent Autolevitada Prototipus experimental Simulació per elements finits Assaig en laboratori de grans corrents

AGRAÏMENTS

Un treball com el que presentem, de cap manera pot néixer amb l' esforç d'un sol home. Tots els esdeveniments que al llarg dels temps ens ha conduït on som, àdhuc com a tripulants del planeta Terra, tenen la seva arrel i la seva història en la mútua col.laboració. Una tesi doctoral tampoc s'escapa d'aquesta dinàmica d'equip, dinàmica que justifica unes paraules de reconeixement a totes aquelles persones -homes i dones- que m'he anat trobant pel camí.

El meu agraïment més sincer al Dr. Lluís Humet que va obrir-me les portes dels estudis de doctorat tot brindant-se a ser el meu tutor; al Dr. Ricard Bosch i Tous que m'ha fet costat dia rera dia com a director de tesi i que va acceptar-me des del primer moment en una de les seves línies de treball; al Dr. Xavier Alabern que va fer possible compaginar les meves obligacions laborals amb les noves tasques de doctorat tot just encetades; al Dr. Joaquim Pedra per la seva il.lusió a l'impartir els ensenyaments tant directament relacionats amb l'estudi teòric de les màquines elèctriques; al Dr. Pere Andrada per les seves excel.lents exposicions en l'àmbit de les màquines no-convencionals; al Dr. Àngel L. Orille que va fer-me descobrir què volia dir la paraula recerca, i a tants i tants companys d'estudis de doctorat amb qui hem intercanviat impressions i experiències; d'una manera especial, un reconeixement per el meu company d'equip En José López, que primerament va fer-me descobrir la línia electrotècnica on ell ja treballava, i que després ha estat un dels millors companys d'equip que m'he trobat per la vida.

Una línia de treball com la que estem seguint vol dir recollir la torxa encesa d'algú que l'ha encetada de fa temps, i vol dir també nodrir-se de les doctrines dels tècnics que ens han precedit. En aquest sentit, i per més que es repeteixi, sempre hom queda curt en el reconeixement degut a doctors, doctorands i becaris que durant els últims anys han dirigit els seus esforços vers temes relacionats amb màquines sense coixinets o alimentades per font de corrent. Gràcies per la bona acollida que m'ha donat el Dr. Juan Corrales, que m'ha obert les portes de casa seva sempre que li he demanat. Gràcies per el suport rebut per persones d'altres departaments, en especial els departaments i laboratoris d' Hidràulica i de Metalurgia, de Plàstics i de Termodinàmica de l'ETSEIB. Gràcies per el suport i intercanvis deguts als tècnics i directius del ICEMAB-CSIC de Bellaterra. Gràcies a tots aquells que m'han facilitat bibliografia sobre el tema, d'una manera especial el Sr. Francesc Castellana que a més de la bibliografia m'ha ajudat a posar apunt l'eina informàtica necessària per tal de reeixir en la confecció d'aquest document.

El lector que s'endinsi en l'anàlisi i en la lectura d'aquestes pàgines que té a la mà, hi descobrirà d'immediat un treball experimental de força envergadura, impossible de dur a terme sense el suport d'uns tallers mecànics ben dotats i amb gent experta. El meu reconeixement al Sr. Antoni Llach del taller mecànic de l'Escola, al Sr. Juan del Centre CIM, al Sr. Emili Fornis del laboratori del nostre departament. Si de totes aquestes persones que s'han nomenat fins aquí, n'hi ha un que mereix que el seu nom es vegi escrit amb lletres d'or a la primera pàgina de la tesi, aquest és el Sr. Santiago Pardos. Cal aclarir que sense les seves mans difícilment hauria arribat a bon termini cap dels prototipus que formen part d'aquest estudi.

INDEX DE CAPÍTOLS**NOVES APORTACIONS AL DESENVOLUPAMENT DE MOTORS ELECTRICS SENSE COIXINETS (MEDISC)****Introducció, Motivació, Objecte, Objectius, Alcanç**

	Pàg.
1-Anàlisi tècnica previa	1
1.1- Antecedents	1
1.2- Materials	4
1.3- Tecnologies constructives	8
1.4- Mètode de treball	9
1.5- Prototipus construïts	11
2-Màquines elèctriques d'inducció sense coixinets (MEDISC)	14
2.1- Esquema evolutiu de la màquina d'inducció	14
2.2- Els prototipus Prat en l'esquema evolutiu de la màquina d'inducció	15
3-Levitació en els prototipus PRAT	18
3.1- La levitació en els prototipus Prat	18
3.2- Taula comparativa: Levitació en cada un dels prototipus	19
4-Criteris de disseny per ròtor i estàtor	20
4.1- Criteris de disseny	20
4.2- Camp electromagnètic en ròtor i estàtor	20
4.3- Circuit magnètic	30
4.4- Circuit elèctric en ròtor. Circuit elèctric en estàtor.	32
4.5- Relació entre paràmetres elèctrics, magnètics i de disseny	34
4.6- Circuits magnètics amb imants permanents	37
5-Prototipus o experiments previs (Prat-1 al Prat-4)	40
5.1- Introducció	40
5.2- La Màquina de Canyeria. Prototipus Prat-1	40
5.3- La Màquina de Sector d'Estàtor. Prototipus Prat-2.0	45
Prototipus Prat-2.1	46
5.4- La Màquina d'Arrencada per Reluctància. Prototipus Prat-3	51
5.5- La Màquina d'Estany Colat. Prototipus Prat-4	69
6-Altres aspectes de funcionament dels prototipus	76
6.1- Introducció	76
6.2- La levitació pneumàtica. Influència del efecte Magnus	76
6.3- Coixí d'aire. Aplicació experimental levitació pneumàtica	78
6.4- Increment de diàmetre per rotació. Explosió centrífuga	82
6.5- Generació de grans corrents a freqüències superiors a 50 Hz.	85
6.6- Bifàsic versus monofàsic. Sentit de gir i arrencada	85

	Pàg.
7-Disseny del prototipus Prat-5 (Màquina de doble inductor)	88
7.1 - Introducció al prototipus Prat-5	88
7.2 - Definim el prototipus	88
7.3 - Mides del estàtor	89
7.4 - Llargada de la màquina	92
7.5 - Juntes de separació	97
7.6 - Circuit elèctric. Circuit magnètic	97
7.7 - Circuit hidràulic	98
7.8 - Circuit dielèctric. Consideracions de muntatge	99
7.9 -Especificacions constructives de la màquina	99
7.10-Components mecànics. Llista de peces per a mecanitzar	101
7.11-Components mecànics. Peces a construir per l'ajustador-montador	104
8-Construcció de la Màquina de doble inductor (Prat-5)	105
8.1 - Mecanitzat	105
8.2 - Procediment de muntatge: Circuit elèctric i Circuit dielèctric	106
8.3 - Muntatge: Circuit tèrmic i Circuit hidràulic	108
8.4 - Muntatge: Circuit mecànic. Ajustatge	109
9-Estudi de la Màquina de doble inductor per simulació	110
9.1 - Geometria elegida. Simulació en 2-D	110
9.2 - Simulació del camp magnètic. Valor instantani	110
9.3 - Simulació del camp magnètic. Al llarg d'un període	111
9.4 - Estudis previs a la simulació del circuit tèrmic	116
9.5 - Resultats de la simulació del circuit tèrmic	121
9.6- Circuit tèrmic: condicions de contorn i resultats	124
10-Assaig del prototipus Prat-5 (Màquina de doble inductor)	127
10.1- Connexió prototipus Prat-5 a la font de corrent T.S.	127
10.2- Implementació de l'alimentació hidràulica	129
10.3- Assaigs electromecànics amb Prat-5	131
10.4- Comprobacions posteriors a l'assaig	132
10.5- Taula comparativa de prestacions de cada prototipus	134
11-Aportacions	135
11.1 - Aportacions	135
11.2 - Algunes utilitzacions	136
11.3 - Futures línies de recerca	137
12- Bibliografia	139

INDEX DE DIBUIXOS

pàg	lloc	Nom del Dibuix	capítol
10		Diagrama de fases de treball	1.4
14		Esquema evolutiu de la màquina d'inducció	2.1
15		Els prototipus Prat en l'esquema evolutiu de les MEDISC	2.2
23		Rotor i estàtor. Cotes per a càlcul analític	4.2

25	mig	Mètode de les imatges o de Lord Kelvin	4.2
25	baix	Aplicació del mètode de les imatges a una màquina elèctrica	4.2
26		Modèl teòric de 15 conductors de Cu sobre nucli de Fe amb rotor extern d'Alumini	4.2
27	dalt	Geometria utilitzada per a simular el camp magnètic del modèl teòric anterior per mitjà d'un Software d'elements finits	4.2
27	baix	Resultat de la simulació sobre nucli d'aire	4.2
28	dalt	Resultat de la simulació sobre nucli de Fe	4.2
31		Modelització de circuit magnètic	4.3
32		Modelització del circuit magnètic d'una màquina elèctrica	4.3
40		Secció prototipus Prat-1	5.2
41	baix	Simulació camp magnètic prototipus Prat-1	5.2
42	dalt	Simulació camp magnètic prototipus Prat-1	5.2
44		Secció longitudinal prototipus Prat-1	5.2
45		Esquema de principi prototipus Prat-2.0	5.3
47	dalt	Secció prototipus Prat-2.1	5.3
47	baix	Simulació camp magnètic prototipus Prat-2.1 (sense ferro)	5.3
48	dalt	Simulació camp magnètic prototipus Prat-2.1 (cas real)	5.3
48	baix	Valor teòric de la inducció prototipus Prat-2.1	5.3
52	baix	Esquema de principi prototipus Prat-3. Cal observar la forma de la ranura per tal d'aconseguir l'arrencada per reluctància	5.4
53	dalt	Diferents criteris de construcció de la ranura en una màquina monofàsica d'arrencada per variació de reluctància	5.4
54		Prototipus Prat-3.2 Esquema de com s'ha de construir el connexionat d'aquesta màquina si es vol alimentar mitjançant un sistema bifàsic (connexió bifàsica tradicional)	5.4
55	dalt	Prototipus Prat-3.0 Esquema de com s'ha de construir el connexionat d'aquesta màquina per treballar en monofàsic	5.4
55	mig	Prototipus Prat-3.2 .Connexió bifàsica paral.lel	5.4
56		Circuit hidràulic del prototipus Prat-3	5.4
58		Plànol del rotor del prototipus Prat-3	5.4
59	dalt	Simulació camp magnètic prototipus Prat-3.1 (nucli d'aire)	5.4
59	baix	Valors teòrics de la inducció prototipus Prat-3.1 (nucli d'aire)	5.4
60	dalt	Simulació camp magnètic prototipus Prat-3.1. Cas real (nucli de ferro)	5.4
60	baix	Valors teòrics de la inducció prototipus Prat-3.1. Cas real (nucli de ferro)	5.4
61	dalt	Simulació camp magnètic prototipus Prat-3.2 Nucli en Fe	5.4
61	baix	Valors teòrics de la inducció prototipus Prat-3.2. Nucli en Fe	5.4
70		Disseny circuit hidràulic prototipus Prat-4	5.5
71	baix	Connexionat elèctric prototipus Prat-4	5.5
72	dalt	Utilatge. S'ha fet servir per a tirar la colada d'estany en el prototipus Prat-4	5.5
72	baix	Secció del prototipus Prat-4. Es distingeix el dielèctric i els dos circuits elèctrics construïts en estany colat	5.5
77	dalt	Distribució de pressions en el pas d'un fluïd per un conducte amb diferents diàmetres	6.2
77	baix	Efecte Magnum	6.2
78		Prototipus Prat-2.1 Aspectes del seu funcionament pneumàtic	6.3

79		Prototipus Prat-2.1 Esquema de principi per el seu funcionament pneumàtic	6.3
81		Prototipus Prat-2.0. Esquema de principi per el seu funcionament pneumàtic	6.3
90		Prototipus Prat-5 Diferents configuracions en funció del nombre de ranures	7.3
94		Prototipus Prat-5 Diferents configuracions en funció del tamany dels conductors de línia. Cas d'un sol conductor per fase	7.4
95		Prototipus Prat-5 Diferents configuracions en funció del tamany dels conductors de línia. Cas de dos conductors per fase	7.4
96		Prototipus Prat-5. Croquis de l'anell del distribuïdor	7.4
97		Prototipus Prat-5. Dibuix del circuit elèctric	7.6
98	dalt	Prat-5. Circuit Hidràulic. Secció longitudinal distribuïdor	7.7
98	baix	Prat-5. Circuit Hidràulic. Secció longitudinal estrella del neutre	7.7
100		Esquema de conjunt del prototipus Prat-5	7.9
101		Plànol constructiu tub de Cu de l'estrella del neutre Prat-5	7.10
102	dalt	Plànol constructiu d'un anell distribuïdor del prototipus Prat-5	7.10
102	baix	Plànol constructiu de les juntes de separació (juntes de teflón) del prototipus Prat-5	7.10
103		Plànol constructiu del nucli de l'inductor del prototipus Prat-5	7.10
108	baix	Detall de muntatge del circuit hidràulic del prototipus Prat-5 en la zona del distribuïdor. S'hi pot apreciar la junta d'estanquitat	8.3
110		Geometria utilitzada en la simulació del camp magnètic del prototipus Prat-5	9.2
111		Simulació del camp magnètic del prototipus Prat-5. Valor instantani	9.2
113		Visualització de la simulació del camp magnètic al llarg d'un període. Distància entre dues observacions consecutives: 30°	9.3
114		Visualització de la simulació del camp magnètic al llarg d'un període. Distància entre dues observacions consecutives: 40°	9.3
-			
115			
117		Efecte pelicular en un nucli de ferro massís	9.3
121		Simulació del circuit tèrmic. Estudi amb dos conductors. Representació de la geometria elegida i de les conductivitats dels materials.	9.5
122	dalt	Simulació del circuit tèrmic. Estudi amb dos conductors. Representació del fluxe de calor en sentit radial	9.5
122	baix	Simulació del circuit tèrmic. Estudi amb dos conductors. Representació de les isoterms	9.5
123		Simulació del circuit tèrmic. Estudi amb dos conductors. Representació del fluxe de calor en sentit axial	9.5
125	dalt	Simulació del circuit tèrmic. Estudi amb tres conductors. Representació de la geometria utilitzada i de les conductivitats dels materials	9.6
125	baix	Simulació del circuit tèrmic. Estudi amb tres conductors. Distribució de temperatures	9.6
126	dalt	Simulació del circuit tèrmic. Estudi amb tres conductors. Fluxe de calor en sentit radial	9.6
126	baix	Simulació del circuit tèrmic. Estudi amb tres conductors. Fluxe de calor en sentit axial	9.6

INDEX DE TAULES I GRÀFIQUES

pag	lloc	Contingut del gràfic o taula	capítol
.			
4	dalt	Densitats de corrent admissibles en conductors elèctrics	1.2
4	baix	Mides normalitzades dels conductors elèctrics utilitzats	1.2
6		Escalfament d'un conductor de Cu en funció del corrent	1.2
7		Materials per el circuit magnètic	1.2
11		Prototipus construïts	1.5
19		La levitació en els prototipus Prat	3.2
43		Condicions imposades en els assajos realitzats en el prototipus Prat-1	5.2
44	dalt	Resultats dels assajos realitzats en el prototipus Prat-1	5.2
49	dalt	Condicions imposades en els assajos realitzats en el prototipus Prat-2.1	5.3
63	baix	Prototipus Prat-3. Primera prova	5.4
64	dalt	Prototipus Prat-3. Segona prova	5.4
64	mig	Prototipus Prat-3. Tercera prova	5.4
64	baix	Prototipus Prat-3. Quarta prova	5.4
66	dalt	Prototipus Prat-3. Cinquena prova	5.4
66	baix	Prototipus Prat-3. Prova a alta freqüència	5.4
74		Prototipus Prat-4. Assaig en bifàsic	5.5
75		Prototipus Prat-4. Assaig en monofàsic	5.5
78/		Assajos pneumàtics en el prototipus Prat-2.1	6.3
80			
81		Assajos pneumàtics en el prototipus Prat-2.0	6.3
84	baix	Increment de diàmetre per rotació	6.4
90	dalt	Alçada del jou en funció del nombre de pols. Diàmetre en funció del nombre de pols (Prat-5)	7.3
91	dalt	Mides de dent i ranures en funció del nombre de conductors	7.3
94		Densitat de corrent per diferents mides dels conductors de línia	7.4
104		Mides dels conductors de l'induït (Prat-5)	7.11
110		Corba B-H utilitzada en les simulacions	9.2
112	baix	Valors elèctrics per portar a terme la simulació del camp magnètic del prototipus Prat-5 tot al llarg d'un període (valors instantanis separats 30°)	9.3
114	dalt	Valors elèctrics per portar a terme la simulació del camp magnètic del prototipus Prat-5 tot al llarg d'un període (valors instantanis separats 40°)	9.3
130		Prat-5: Increment de temperatura per circulació de corrent	10.2
131		Prat-5: Vel.locitat	10.3
133		Prat-5: Resultats de mesures amb el pont de Thomson	10.4
134		Taula comparativa de prestacions de cada prototipus	10.5

INDEX D'IMATGES I DE FOTOGRAFIES

pag	lloc	Nom de la fotografia	capítol
.			
xvi		Estàtor prototipus Prat-5. S'hi poden observar els canals del distribuïdor, perquè encara no s'hi havien muntat les tanques hidràuliques	0.2
1		Motor lineal	1.1
2		Motor lineal tubular	1.1
3		Motor levitat i de flux axial (Bosch-3)	1.1
6		Assaig tèrmic del tub de Cu que fa de conductor elèctric de l'inductor. Determinació de la intensitat màxima admissible	1.2
11	mig	Màquina de canyeria o Prat-1	1.5
11	baix	Màquina de sector d'estàtor o Prat-2.1	1.5
12	dalt	Màquina d'arrencada per reluctància o Prat-3	1.5
12	baix	Màquina d'estany colat o Prat-4	1.5
13		Màquina de doble inductor o Prat-5	1.5
41	dalt	Prototipus Prat-1	5.2
42	baix	Prototipus Prat-1. Vista frontal	5.2
43		Assaig del prototipus Prat-1	5.2
46		Construcció del prototipus Prat-2.1. S'hi aprecia el " <i>sector d'estàtor</i> " que serveix de suport pneumàtic al rotor. Dintre d'aquest suport hi ha els conductors de l'inductor	5.3
49		El prototipus Prat-2.1 amb el seu rotor d'alumini	5.3
52	dalt	Ferro de l'inductor comú als prototipus Prat-3 i Prat-4. Es pot observar que la forma de les ranures és asimètrica per tal d'aconseguir l'arrencada en monofàsic per variació de reluctància	5.4
57		Prototipus Prat-3, acabat	5.4
62	baix	Transformador de corrent portàtil (de laboratori)	5.4
63		Assaig del prototipus Prat-3. En primer terme la bomba del circuit hidràulic	5.4
65		Assaig del prototipus Prat-3. Es veu el connexionat elèctric del prototipus a les barres del trafo T.S.	5.4
66		Assaig del prototipus Prat-3, fent servir una alimentació en bifàsic	5.4
67	dalt	Forn d'inducció. Son dues bobines en sèrie, que l'una fa de filtre de l'altre. Serveix per treballar (assaijar) a freqüències mitges	5.4
67	baix	Prototipus Prat-3. S'hi pot observar una asimetria no desitjada en els caps de bobina	5.4
71	dalt	Prototipus Prat-4	5.5
73		Assaig del circuit hidràulic del prototipus Prat-4	5.5
75		Assaig de funcionament del prototipus Prat-4	5.5
82		Peces construïdes del prototipus Prat-2.0	6.3
105		Dues vistes del mecanitzat del tub de Cu que fa d'estrella del neutre en el prototipus Prat-5	8.1
106		Alguns components del prototipus Prat-5. S'hi poden veure els dos inductors (un dret, l'altre tombat, els dos són idèntics), el tub que fa d'estrella del neutre (més prim), i el tub d'alumini que fa de rotor.	8.1

107	baix	Comença el muntatge del prototipus Prat-5. En primer terme un dels inductors; més enllà el tub de Cu estrella del neutre amb els tres anells del distribuïdor presentats, i les juntes de teflón	8.2
108		Muntatge del prototipus Prat-5. A més dels components esmentats en la fotografia anterior, també poden veure-hi els tubs de Cu que fan de conductor en l'inductor, i el dielèctric entre l'estrella del neutre i els anells del distribuïdor	8.2
109		Muntatge del prototipus Prat-5. Presenta tots els components. També inclou la tanca hidràulica dels anells del distribuïdor	8.3
127	dalt	Prototipus Prat-5	10.1
127	mig	Pletines de connexió de Prat-5 a la font de corrent T.S.	10.1
127	baix	Muntatge de les pletines de connexió en el prototipus Prat-5	10.1
128	dalt	Prototipus Prat-5 amb les pletines de connexió muntades	10.1
128	baix	Muntatge del prototipus Prat-5 a la font T.S.	10.1
129		Assaig del prototipus Prat-5	10.2
133		Identificació de les fases R-S-T del Prat-5 en funció de la posició de cada una de les pletines de connexió a la font	10.4

GLOSSARI DE SIGLES, SÍMBOLS I ABREVIATURES

A	Secció recta
A_{Cu}	Secció total transversal de Cu
B	Inducció
$B_{\delta o}$	Inducció màxima real a l'entreferro
B_{dMo}	Inducció màxima real a les dents
B_g	Inducció en l'entreferro
B_m	Valor màxim de la inducció
B_r	Magnetisme residual (imants permanents)
B_y	Inducció en el jou
$B_R(t)$	Fasor representatiu de l'ona d'inducció en la fase R.
$B_S(t)$	Fasor representatiu de l'ona d'inducció en la fase S.
$B_T(t)$	Fasor representatiu de l'ona d'inducció en la fase T
c	Capacitat calorífica
D	Diàmetre de l'induït
D	Cabal d'un fluid
D	Desplaçament elèctric
E	Mòdul d'elasticitat
E	Intensitat de camp elèctric
E_f	Força electromotriu per fase
e	Força electromotriu en funció del temps
F	Força mecànica
f	Freqüència
g	Acceleració de la gravetat
g	Gruix de les juntes de separació
G	Factor de qualitat
H	Intensitat de camp magnètic

h	Entalpia
h_y	Alçada del jou
i	Intensitat de corrent en funció del temps
I	Valor eficaç del corrent per cada conductor
J	Densitat de corrent
K	Constant
K	Coefficient d'acoblament entre dues bobines
K_{Fe}	Factor d'espai axial en un induït de xapa magnètica
K_h	Constant de proporcionalitat per evaluar les pèrdues per histèrissi
k_f	Constant de proporcionalitat per evaluar les pèrdues per corrents de Foucauld
l	Llargada d'un conductor
L	Coefficient d'autoinducció
L	Llargada de l'induí
M_b	Parell fictici d'una màquina elèctrica
M_{ij}	Coefficient d'inducció mútua entre les bobines i-j
m	Massa
m	Nombre de fases
n	Número de voltes per minut
n_{pf}	Nombre de conductors per pol i fase
N	Nombre d'espises
N	Nombre de conductors
p	Nombre de parells de pols
p_0	Nombre de pols
p	Pressió. Alçada de la columna d'aigua
p_h	Pèrdues per histèrissi
p_f	Pèrdues per corrents de Foucauld
P_b	Potència en bornes d'una màquina elèctrica
q	Càrrega mecànica uniforme per unitat de llargada
Q	Quantitat de càrrega elèctrica
Q_{12}	Calor total transmès del sistema tèrmic-1 al sistema tèrmic-2
r	Radi
R	Resistència òhmica
R_L	Resistència del conductor que constitueix una bobina
S	Secció del conductor elèctric
S1-S8	Tipus de servei de les màquines elèctriques
s	Secció equivalent del camí magnètic
s	Lliscament
S_g	Secció recta del entreferro
t	Temps
t_0	Gruix de la dent
u	Caiguda de tensió en un element de circuit elèctric en funció el temps
v	Velocitat lineal
W	Treball mecànic
z	Alçada de la columna d'aigua
Z	Nombre total de conductors de la màquina
Z_n	Nombre total de conductors per ranura
α_b	Coefficient de convecció
γ	Densitat
δ	Llargada del camí magnètic en l'entreferro

δ	Allargament d'una barra segons la llei de Hooke
Δ	Densitat de corrent per els conductors de l'inductor
\varnothing	Diàmetre
ϕ	Flux abraçat per una sola espira
ϕ_{δ}	Flux en l'entreferro
φ	Angle de fase
ϑ	Temperatura
Λ_g	Permeància de l'entreferro
μ_0	Permeabilitat del buit
μ_r	Permeabilitat relativa
v_0	Velocitat de l'aire
Ψ	Flux total concatenat per tot el conjunt d'espires
\mathcal{F}	Força magnetomotriu
\mathcal{R}	Reluctància d'un camí magnètic
ρ	Conductivitat elèctrica
ξ	Factor de bobinat
σ	Esforç de fatiga
σ	Conductivitat elèctrica
τ	Pas polar
τ_0	Pas polar en la dent
τ_{δ}	Pas polar en l'entreferro
τ	Constant de temps
τ	Gruix equivalent del camí magnètic comptant l'efecte pelicular
ω	Pulsació
ω	Velocitat angular
Ω	ohm

GLOSSARI DE TERMES

Flux axial- El camí magnètic en els entreferros es paral·lel a l'eix de rotació de la màquina

Flux radial- El camí magnètic en els entreferros té sentit radial

Font de corrent ideal- El corrent subministrat no depèn de la càrrega. Quan en aquest treball es parla de font de corrent, ens referim sempre a la font ideal

Coixinet- Enllaç mecànic entre dues peces que permet un moviment relatiu de rotació d'una de les peces respecte de l'altre

Levitat, Levitada- Es diu d'aquell component d'un sistema mecànic que aparentment apareix com a suspès en vil de forma estable, perquè les forces que en contraresten l'atracció gravitatòria no son evidents a primera vista

Factor de qualitat- Aquest concepte introduït per E.R. Laithwaite [03] en el seu llibre “Màquines de inducció especials”, es una de les bases del nostre treball

“El factor de qualitat ens mostra la bondat de la màquina per a transformar energia¹, i s’expressa com a producte de la velocitat de rotació de la màquina per la constant de temps del circuit elèctric de l’induit”

S’expressa així:

$$G = \frac{L \cdot \omega}{R} = \tau \cdot \omega$$

G = Factor de qualitat

L= Coeficient d’autoinducció en H.

R = Resistència en ohm

ω = Velocitat angular en rad/s

τ = Constant de temps de circuit elèctric inductiu

Màquina alimentada per font de corrent- Es diu d’aquella màquina elèctrica que per aconseguir la intensitat de camp magnètic requerida treballa amb pocs conductors per ranura (moltes vegades només un), refrigerat per aigua, i que soporta un amperatge considerable, essent les caigudes de tensió d’un ordre de magnitud petit.

Aquesta màquina fa servir el sistema elèctric basat en fonts ideals de corrent, que resulta ser el dual del sistema en us, que es basa en fonts ideals de tensió.

Se li preveuen aplicacions basades en nous materials constructius com ho poden ser les ferrites o els superconductors. Les geometries constructives poden ser molt diferents de les actuals.

Màquina de Canyeria- Es tracta del prototipus Prat-1

Màquina de doble inductor- Es el prototipus Prat-5.

Màquina d’estany colat- Es tracta del prototipus Prat-4

Màquina Elèctrica- Serveix per convertir energia mecànica en energia elèctrica, energia elèctrica en energia mecànica, o energia elèctrica en energia elèctrica sota una forma de presentació (corrent, tensió, freqüència) diferent a l’inicial.

Màquina de Sector d’estàtor- Es tracta del prototipus Prat-2.1

Màquina de vuitanta conductors- Es tracta del prototipus Prat-2.0

¹ El factor de qualitat expressa la capacitat de la màquina per a transformar potència elèctrica en mecànica. {Laihwaite, pag. 31, [03]}

Per això és proporcional :

1- A la freqüència de treball perquè com més petit sigui el dt (el període), més es magnifiquen els fenòmens inductius.

2- Al coeficient d’autoinducció (perquè el coeficient d’autoinducció és la relació entre flux i corrent -i un circuit magnètic com a tal sempre necessita d’un corrent que li faci circular flux-). El corolari és que com més gran sigui la L, més flux ens produirà un determinat corrent.

3- A la admitància (conductància). Perquè a igualtat de tensió en bornes, un circuit elèctric té més corrent en circulació per una més gran admitància. Laithwaite pren aquesta darrera dada com una simple proporcionalitat a l’invers de la resistència.

Prototipus Prat-x.y Cada una de les màquines elèctriques experimentals que componen aquest treball. N'hi ha cinc que eventualment poden haver tingut dues construccions lleugerament diferents, en quin cas s'indica per mitjà d'un segon dígit.

Rodament- Es diu quan es parla d'un coixinet mecànic. Sovint el rodament es amb boles.

Sense coixinets- Es diu d'aquella màquina que no necessita rodaments perquè la peça o peces mòbils queden levitades electromagnèticament respecte la part fixa.

Simulació- Sistema informàtic que consta d'un software basat en programes d'elements finits i que permet avaluar el camp magnètic dels nostres prototipus abans de construir-los, i que s'ha fet servir per a poder filar més prim en el disseny. El terme simulació, de fet, es pot referir a qualsevol software (que vulgui emular qualsevulla sistema físic). En el paràgraf anterior se li dóna el sentit que el lector trobarà en el present treball.

T.S.- Nom que se li dóna a un transformador d'assaigs que tot alimentant-se d'una xarxa trifàsica usual (font de tensió) a 380 V, permet generar corrents fins a 20 kA a tensions d'ordre de magnitud petit ,màxim 15 V, (actua com a font de corrent). Aquest transformador situat a l'escola d'enginyers de Barcelona ha permès assajar els prototipus de que consta aquest treball.

La seva denominació ve de què originàriament eren tres transformadors que es feien servir en la tècnica de soldadura per punts, essent aquesta una aplicació que requereix d'una font d'intensitat.

INTRODUCCIÓ

El lector descobrirà, tot al llarg d'aquestes pàgines, un estudi experimental sobre màquines elèctriques **alimentades per font de corrent**.

L'estructura del treball té tres blocs ben diferenciats:

Primers Capítols

En els quatre primers capítols hi ha els plantejaments previs teòrics i de l'estat de la qüestió. Hom es planteja:

- 1- Qui ha treballat en temes afins i a quines conclusions ha arribat
- 2- Quins materials es poden usar amb garanties d'èxit
- 3- Les tecnologies constructives adients per els prototipus, pensant en com podran encaixar més endavant cara a possibles fabricacions en sèrie.
- 4- On queden situades les màquines d'aquest treball, en l'esquema general de les màquines d'inducció.
- 5- Una justificació teòrica dels mètodes analítics utilitzats en els successius dissenys.

Els apartats 1-2-3 es tracten en el primer capítol. Els altres apartats tenen capítol propi.

Introducció Experimental

Són els capítols cinquè al desè. En el capítol cinquè es fa el disseny, construcció i assaig de quatre prototipus experimentals (el cinquè es contempla en els capítols setè al desè), que son *petites màquines elèctriques* alimentades per font de corrent, i que ens han servit per comprovar:

- 1-El comportament d'un rotor tubular conductor abraçat per una capa de corrent
- 2-Com podria ser un model de la màquina elèctrica més senzilla que pot existir
- 3-El comportament d'un rotor de material conductor sense ferro en el seu interior.
- 4-Un pas polar curt
- 5-Una aplicació de levitació pneumàtica.
- 6-Diferents possibilitats d'alimentació elèctrica (monofàsic, bifàsic, trifàsic)
- 7-Solucions als problemes d'arrencada en màquines monofàsiques fent servir un camí magnètic de reluctància variable.
- 8-Les tecnologies constructives de què es disposa, i algunes de noves (màquina d'estany colat)
- 9-Les diferències de comportament entre les màquines alimentades per font de tensió (a les que tots estem acostumats), i les màquines alimentades per font de corrent (objecte d'aquest estudi)
- 10-El comportament d'una màquina amb dos inductors

El capítol sisè serveix per acabar d'arrodonir alguns punts d'anàlisi teòric que s'han cregut convenients vist el comportament dels prototipus previs.

Els capítols setè al desè es dediquen al darrer prototipus, per tractar-se d'un model amb una mica més de complexitat.

Aportacions

Les consideracions teòriques exposades i el comportament dels diferents prototipus, fan entrellucar quins son els punts claus en el disseny d'una màquina alimentada per corrent, i eventualment levitada. Aquest **know how** s'exposa en les conclusions i en les aportacions inèdites, que es troben en els darrers capítols



MOTIVACIÓ

Motivacions Personals

Unes quantes circumstàncies de la vida m'han portat a ficar-me en el món de les màquines elèctriques, i un altra grup de circumstàncies paral.leles i complementàries a les anteriors han fet que, paradoxalment, m'agrades de veritat. Dic paradoxalment perquè en el meu cas l'investigador no es pot pas dir que hagi nascut, més aviat cal afirmar que s'ha fet. Vaig començar els estudis de tercer cicle (no ens enganyem) per poder optar al grau de doctor enginyer. Ja he comentat que vaig trobar-me amb persones que varen obrir-me la porta, i amb altres que, pot ser sense ni adonar-se'n, em varen mostrar el camí. El meu primer objectiu va ser aconseguir que se'm reconegués la meva capacitat personal i professional. Es el que en l'argot dels doctorands rep el nom de "*Suficiència Investigadora*". El que no sospitava era que en la materialització d'aquest primer objectiu quedés agafat per el tema amb una mena de sana addició: em vaig trobar de plè dintre del món de les màquines elèctriques alimentades per font de corrent. La persona que va acabar per ser el meu director de tesi, en un primerencontre, em va ensenyar el treball experimental que ell mateix havia dut a terme; a banda dels imprescindibles fonaments teòrics, aquest treball es materialitzava en tres prototipus de màquina elèctrica

sense rodaments i levitada, que funcionaven tots tres. Veure'ls era com contemplar un llibre obert on s'hi llegia com s'havia esdevingut aquella recerca.

L'autor em va comentar a quins resultats havia arribat, fent especial esment a tot allò que feia referència a la levitació i a l'estabilitat de les peces levitades, així com el fonament físic i tècnic d'aquells models. Em va comentar quines eren les utilitats que se li preveïen en el món de l'indústria, i cap on es podria apuntar més endavant per tal de seguir desenvolupant. Dintre meu, i encara que no ho vaig manifestar, es va encendre un foc que em va portar a interessar-me (i d'una manera molt seriosa) per les màquines elèctriques primer, i a ficar-me (costés el que costés) en aquella línia de treball tot seguit.

Motivacions Tècniques

No tenim cultura tècnica de màquines alimentades en font de corrent, perquè la font de tensió és molt còmode. Permet anar connectant en paral·lel diferents càrregues. Si una no va bé, la desconnectem i llestos.

En els sistemes en font de corrent, generadors i consums son connectats en sèrie i una disfunció en un d'ells afecta a tot el sistema. La protecció ha de ser el curtcircuit de l'element amb problemes, i això no és tant fàcil de fer.

Des del punt de vista tècnic treballar en màquines alimentades en font de corrent és una bona motivació.

Si alimentem el rotor amb un sistema en font de corrent, la levitació rotòrica s'obté de forma natural: Al acostar-se el rotor a una ranura inductora, millora el seu acoblament electromagnètic, el corrent induït al rotor creix igual que el de l'inductor i la força de repulsió amb el rotor també augmenta, tornant-lo cap al centre.

La levitació estable de rotor conductor, exigeix que l'estàtor tingui les diferents ranures inductores connectades en paral·lel; sols així poden reconduir la posició rotòrica de forma estable.

El rotor NO POT TENIR CAP ELEMENT FERROMAGNÈTIC per tal de fer possible la levitació estable sense coixinets, com postula el principi de Earnshaw.

Això obliga a fer dissenys amb entreferros elevats i per tant de baixa qualitat electromagnètica, segons els criteris clàssics.

Però la qualitat electromagnètica d'una màquina no depèn solsament del seu circuit magnètic. El factor de qualitat de la màquina, ve donat per:

$$G = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{\mathfrak{R}} \cdot f$$

Es a dir, es pot compensar una elevada \mathfrak{R} (Reluctància), fent circular més corrent com si haguéssim disminuït la R , o augmentant la freqüència f , de forma que es compensi l'increment de \mathfrak{R} .

En les màquines clàssiques, ens trobem que per una banda el Cu limita la R i la densitat de corrent admissibles. Per altra banda, la xapa magnètica limita la freqüència de treball i la inducció. Per això les màquines actuals són com són.

Els superconductors permetran disminuir ordres de magnitud de la R.

Les ferrites permetran augmentar ordres de magnitud la freqüència de treball.

Les màquines elèctriques del futur poden tenir entreferros molt superiors a les actuals, ésser més eficients energèticament parlant i tenir menys volum actiu. El que és segur, és que tindran formes diferents.

OBJECTE

Es centra l'estudi en mètodes i/o maneres de fer girar tubs conductors de Cu ó Al de diferents formes i geometries.

Aquest treball estudia les formes possibles des de la vessant dels conductors i de la seva densitat de corrent admissible. Treballant amb Cu refrigerat amb aigua per simplicitat constructiva, hom pot assolir les densitats de corrent nominals a què arriben els superconductors d'alta temperatura (ebullició del N₂).

Fins ara les màquines elèctriques han funcionat basades en la hipòtesi de sistemes a tensió constant.

Les gàbies d'esquirol dels nostres motors d'inducció clàssics, són el que més s'assembla a un sistema en font de corrent. En el circuit rotòric les barres que actuen com a generadors de la I₂ es troben solidàriament unides en paral·lel entre sí, i en sèrie amb les que actuen de càrrega.

Un dels objectius és assolir una solidesa del sistema tant bona com la de les barres de les gàbies d'esquirol. Solidesa imprescindible per tal de fer-ho rutllar correctament.

Una altra limitació de les màquines actuals, és el ventall de freqüències de treball al ús, imposades per la planxa magnètica. En efecte, no ens hem pogut gaire dels 50 Hz d'Europa o els 60 Hz d'Amèrica, amb l'única excepció de poques aplicacions ferroviàries a 50/3 Hz o aeronàutiques a 500 Hz

Sembla com si la memòria col·lectiva de tots els tècnics hagués oblidat que els fonaments físics de les màquines elèctriques son quelcom molt més ampli, que no porta associat cap tipus de normalització ni de tensió ni de freqüència. *En realitat allò que ens pot limitar son **només** els materials emprats.* Caldria sortir dels plantejaments clàssics i des d'una perspectiva més àmplia, tornar a començar els estudis de disseny de màquines elèctriques. Es possible que estiguem en front d'una revolució bastant insòlita en aquest camp degut als nous materials.

L'objecte ampli d'aquesta tesi és endinsar-nos en tot un procés de recerca de noves màquines, fent servir un ventall de possibilitats tant gran com es pugui. Hi tenen cabuda els grans corrents i (si s'escau) les altes freqüències, els nous materials magnètics,

els nous materials elèctrics conductors i superconductors, aplicacions pneumàtiques, i qui sap si noves tècniques de refrigeració.

Un sistema (el de font de corrent), que pren més caiguda de tensió quan li cal més potència, és ideal per aplicacions electromagnètiques.

OBJECTIUS

L'objectiu o objectius d'aquest treball, no es altre que demostrar pràcticament algunes de les afirmacions que s'han fet en l'apartat de motivacions tècniques. Val a dir que voler demostrar totes aquelles afirmacions, ultrapassa l'alcanc d'una tesi.

Es pretén construir un nou tipus de motor, amb prestacions diferents a les dels motors tradicionals, i especialment útil en aquelles aplicacions on es necessiten bàsicament utilitzacions inercials; en aquest casos, el parell és irrellevant. Altrament el parell depèn dels fregaments i tota vegada que el que es pretén és portar aquesta recerca vers les màquines levitades, està clar que en una màquina levitada, no es necessita gaire parell.

Encara que de moment el parell sigui petit, recordem que les primeres gàbies d'esquirol tot just rodaven, i ara són qui arrossega l'indústria.

Per aprofitar els efectes inercials, o d'altres, ja s'augmentaran els parells interns tant com es pugui i es determinarà quina de les aplicacions reals és la més adient entre totes les possibles (en altres treballs s'estudiarà l'efecte de l'augment del parell, que pot donar resultats útils comercialment, si es combina bé amb tota la resta).

En les primeres fases d'aquest treball, es va pensar en unes especificacions per aquesta màquina, que s'havia definit com **un motor elèctric sense coixinets, levitat pneumàticament, de pas polar curt i sense ferro en el nucli, amb ròtor cilíndric de material conductor, possiblement alumini, i flux radial**. Interessava indagar sobre nous materials, treballar amb el principi de pocs conductors per bobina, però amb fortes corrents i també amb fortes densitats de corrent, pas polar curt i refrigeració per aigua en circulació forçada per el primari.

Els objectius es podrien resumir en aconseguir un disseny el més elaborat (i conjuminat) possible en els cinc aspectes que formen el conjunt d'una màquina elèctrica, tenint en compte tots els recursos i estat de l'art a l'abast per l'equip de treball esmentat i en el temps disponible. Recordem que els cinc aspectes a tenir en compte en totes les màquines elèctriques rotatives, son: circuit elèctric, circuit dielèctric, circuit magnètic, circuit tèrmic, circuit mecànic. A més a més, cal tenir en compte que:

- 1- Es fa un disseny amb més d'un parell de pols connectats en paral·lel
- 2- Cal indagar si amb una combinació adient de rotació i esforços axials es poden intentar compensar els sis graus de llibertat del rotor (tres coordenades del centre de gravetat i tres angles d'Euler), de forma totalment electromagnètica. En treballs anteriors (prototipus Bosch-3) s'han compensat cinc graus. Si posem dues màquines (en el nostre prototipus més elaborat dos inductors), treballant en tàndem, ¿Podrem compensar tots sis graus?

ALCANÇ

La complexitat dels objectius i la manca de referències prèvies o treballs similars, han definit l'alcanc, que es centra:

1- En la construcció d'un prototipus el més elaborat possible, que serveixi de referència per a treballs posteriors i a prototipus preindustrials.

2-Definir els avantatges i inconvenients de l'inductor extern o intern a partir del mateix cilindre rotòric.

3-Construir alguns prototipus previs per assolir l'expertesa constructiva necessària.

Hom treballa sempre a 50 Hz, doncs les fonts necessàries sols treballen així, i no es objectiu d'aquest treball el control de freqüències.

Vistes les dificultats constructives d'altres persones en treballs anteriors (Bosch, Grau, López), es decideix mecanitzar el nucli en ferro massís. Ademés les pèrdues en el ferro s'estimen dissipables degut a les baixes induccions de treball del disseny i la forta capacitat d'evacuació de calor que permet la refrigeració per aigua. Eventualment es poden fer assaigs adiabàtics. Recordem que l'estudi de corrents de curtcircuit admissibles en conductors elèctrics aïllats es fa en règim adiabàtic. Igualment en els assaigs que no permeten refrigeració, hom allarga un xic més la tortura del curtcircuit.

Es construeixen alguns prototipus previs de magnetització externa al rotor, per experimentar diversos aspectes entre els cinc esmentats i preparar el disseny definitiu. El prototipus final serà d'inductor doble i interior al rotor.

L'alcanc es podria resumir en dissenyar al límit del que es pot construir sota els criteris esmentats i veure les prestacions assolides. Aquesta primera iteració amb els mitjans limitats disponibles es vital per a dissenys posteriors. I es considera alcanc suficient per una tesi.

La complexitat constructiva considerada al límit de lo construïble avui a la universitat, justifica el disseny matusser en alguns aspectes, que es podien haver desenvolupat d'una manera més brillant, acadèmicament parlant.

Volíem visió de conjunt en els cinc aspectes, i això exigeix no encantar-se en cap d'ells. No n'hi ha cap de prou important que justifiqui un retard. Altres treballs esperen aquests resultats (López, Mujal, Muñoz, Pallarès, Masegués,.....).

La vida es curta quan es viu intensament. Cal aprofitat bé el temps i no malbaratar-lo. Sols així podrem dir "atura't" a molts moments i fer-los eterns dins del cor.

1- ANÀLISI TÈCNICA PRÈVIA

1.1 - ANTECEDENTS

Bibliografia d'autors que han tractat temes afins a aquest treball

E.R. Laithwaite: *Màquinas de inducción especiales*. Recull en forma de llibre. Barcelona, 1976

Francisco Javier Vivas Morte: *Los motores lineales como aplicación especial de las máquinas de inducción*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya (U.P.C.) E.T.S.E.I.B. Departament de Màquines Elèctriques. Barcelona, 1977

Emilio Gimenez Tofe: *Contribución al estudio de las máquinas elèctricas de acción lineal*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya (U.P.C.) E.T.S.E.I.B. Departament de Màquines Elèctriques. Barcelona, 1976

Ricard Bosch Tous: *Desenvolupament del motor elèctric sense coixinets*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya (U.P.C.) E.T.S.E.I.B. Departament d'Enginyeria Elèctrica. Barcelona, 1987

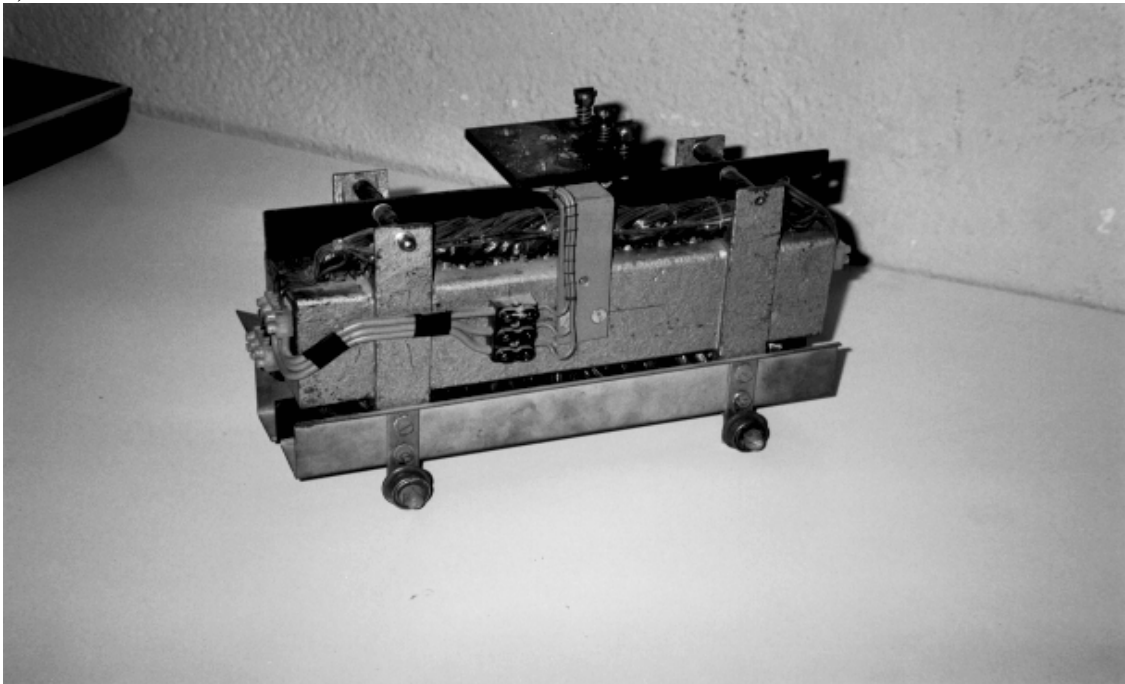
Ramón Grau Mur: *Estudio sobre el motor de inducción magnetohidrodinámico*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya (U.P.C.) E.T.S.E.I.B. Departament d'Enginyeria Elèctrica. Barcelona, 1994

Treballs paral·lels en el temps

José López López. Tesis doctoral en curs .UPC- Departament d'Enginyeria Elèctrica-ETSEIB Barcelona

Breu descripció d'algun dels prototipus dels autors citats

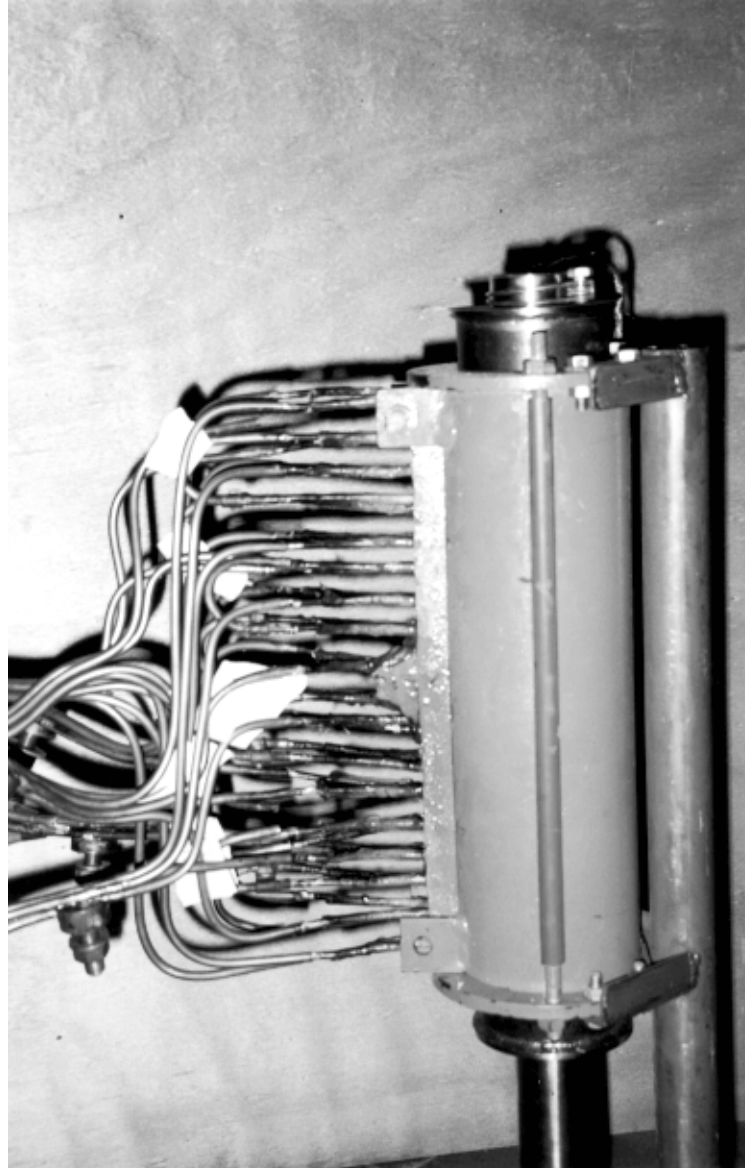
a) Motor lineal



La figura de la pàgina anterior ens presenta un motor lineal bilateral. El prototipus està construït i es troba al laboratori de màquines elèctriques de l'ETSEIB. El prototipus es suficientment curt com per a poder-hi observar l'efecte de vores.

Connectat a la xarxa de 220 V 50 Hz proporciona una força estàtica de 8 Kp

b) Motor lineal tubular amb nucli ferromagnètic



Prototipus FENIX construït per Ramon Grau, i que es troba a l'ETSEIB. Si hom posa un tub conductor dins del motor (convenientment alimentat amb energia elèctrica), el tub surt catapultat. Cada ranura té cinc espires de conductor de Cu refrigerat amb aigua en el seu interior.

Si hom reté el tub rotòric d'alumini s'obté una força estàtica de 30 Kp amb l'estàtor alimentat a 800 A/fase.

Amb rotor de mercuri s'assoleixen pressions estàtiques de 0,2 atmosferes.

Els conductors de tub de Cu de l'inductor varen ser una bona solució a les dificultats constructives nascudes de la necessitat de poder aconseguir un inductor refrigerat internament amb aigua i capaç d'admetre intensitats de l'ordre dels 800 A

En el càlcul del circuit magnètic va haver-hi una errada en l'estimació dels nivells de permeabilitat del material constitutiu del camí magnètic, sobre el que no es tenia experiència. El material és una barreja de poliester i pols de ferro. Es va suposar que la permeabilitat seria proporcional al contingut de ferro. En aquell cas hauria estat un valor de $\mu_r = 5000$. Proves posteriors varen evidenciar que enlloc de $\mu_r = 5000$ resultava ser $\mu_r = 2,2$ (quan l'aire té $\mu_r = 1$). Es per això que el prototipus Fènix feia una força inapreciable sobre aigua salada.

Aquesta experiència i el seu mateix procés constructiu (que en aquell moment no podia ser cap altre), han tingut una importància cabal en els treballs posteriors. En aquests moments Lluís Masegués està preparant la construcció d'un prototipus de motor d' IMHD per aigua de mar. Amb les experiències acumulades de tot el grup.

El nom de prototipus FÈNIX li ve perquè va renèixer de les seves pròpies cendres després de cremar-se molt aparatósament al posar-lo dins del forn molt (massa) calent per tal d'accelerar la polimerització.

c) Motor levitat i de flux axial



Prototipus construït per Ricard Bosch. Es una màquina de flux axial de doble inductor i amb ròtor levitat. Aquest prototipus consegueix ficsar per mitjans electromagnètics cinc dels sis graus de llibertat cinemàtics (3 angles, 3 coordenades). El grau de llibertat que resta es ficsa mecànicament per mitjà d'una punta de centratge segons l'eix z.

1.2 - MATERIALS

Materials per el circuit elèctric

Els millors conductors elèctrics són l'or, la plata i el platí, que no es fan servir per raons econòmiques. En aquest treball s'han utilitzat el Cu i l'Alumini. Les soldadures entre conductors s'han fet amb estany i eventualment amb plata.

Densitats de corrent industrialment admissibles per alguns conductors:

Conductor	Coure	Alumini	Aleació d'Alumini
Secció nominal mm ²	Densitat de corrent A/mm ²	Densitat de corrent A/mm ²	Densitat de corrent A/mm ²
10	8,75		
16	7,60	6	5,60
25	6,35	5	4,65
35	5,75	4,55	4,25

Mides normalitzades dels conductors elèctrics utilitzats en aquest treball:

Conductor	Mides	Secció en mm ²	Densitat de corrent A/mm ²	Utilització	Proto- tipus
Coure	Ø2,5 xØ1,5	3,14	160	Conductors inductor	Prat-2.1
Coure	Ø7 xØ10	40		Rotor màquina de Canyeria	Prat-1
Coure	Ø12 xØ14	40,8	88	Estàtor	Prat-1
Coure	Ø23 xØ25	75,4		Tub del Rotor	Prat-3 Prat-4
Coure	Ø3 xØ5	12,56	24	Conductors inductor	Prat-3 Prat-4 Prat-5
Coure	Ø10 xØ12	34,56	43,4	Conductors de línia	Prat-5
Coure	Ø42 xØ44	135,1		Conductor Neutre	Prat-5
Alumini	Ø80 xØ75	608,7		Tub del Rotor (induit)	Prat-2.0 Prat-2.1 Prat-5
Estany	Colada d'Estany	471,2	6,8	Inductor	Prat-4

Materials per el circuit hidràulic

Llista de materials: Tubs de Cu (interior dels propis conductors elèctrics)

Accessoris de valvuleria: Brides, colzes, bifurcacions,
reduccions, casquillos, taps,.....

Tubs de connexionat: PVC
Goma EPR
Goma silicona

Bomba
Refrigerant

Escalfament de l'induït:

Els corrents induïts en aquestes primeres màquines seran poc importants, perquè el factor de qualitat i el rendiment que hom preveu a aquests prototipus és dolent. No caldrà patir per escalfament i no s'hi posa cap tipus de refrigeració forçada, doncs hom considera suficient la convecció natural de l'aire

Si aquests corrents arribaven a ser grans, tindrem més parell i un millor rendiment i estarem molt contents. Si en aquest cas la màquina s'escalfa, farem el tub del rotor més gruixut. Res ens ho impedeix en prototipus com Prat-2 i/o Prat-5, que el rotor és exterior.

A més a més, en el cas del prototipus Prat-5, les inevitables fuites d'aigua han esquitxat (inundat) el rotor de tal manera, que la refrigeració (en aquest cas forçada) ha estat més que garantida.

Escalfament de l'inductor:

Els conductors de l'inductor s'escalfen com a conseqüència de les pèrdues per efecte Joule. El circuit de refrigeració ha de poder evacuar l'escalfor dels conductors i també l'escalfor del ferro del camí magnètic. S'arriba a una situació d'equilibri que limita el corrent i per tant l'utilització de la màquina. S'ha fet un assaig que s'exposa tot seguit.

Intensitat màxima admissible en conductors (experimental)²

Assaig d'escalfament d'un tub conductor de Cu amb aigua en circulació forçada.
Cabal d'aigua: 0,375 l/min:

² Durant els assaigs de la màquina hom comprèn que està en els límits del corrent admissible quan per el conducte de retorn enlloc de sortir-hi aigua, hi surt vapor (que té una capacitat d'evacuació de l'escalfor superior -calor latent d'evaporació-, i suposa una assegurança per al disseny del prototipus). En el disseny del circuit hidràulic, s'ha de preveure la formació local de vapor. Les sortides han de ser prou franques per evitar que en el desenvolupament de qualsevol prova pugues acumular-se vapor en un punt concret del circuit, i acabar per rebentar el prototipus. Només si el vapor malmet una sola soldadura, pot interrompre el pas del corrent per aquell punt i inutilitzar tot el prototipus

Característiques del conductor: diàmetre interior: 1,5 mm
 diàmetre exterior: 2,5 mm
 espessor paret: 0,5 mm

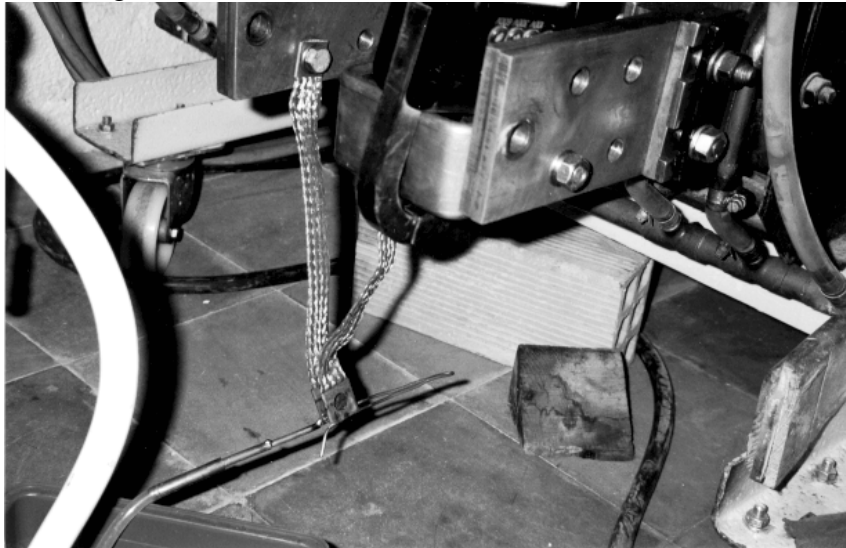
Temperatura ambient: 25 °C

Circulació de aigua: per l'interior del tub conductor

Circulació del corrent elèctric: per el propi metall del tub. No hi ha cap risc de curtcircuit a través de aigua perquè es treballa a corrents elevades i a tensions reduïdes (2 V)

Font d'alimentació: T.S. (trafo del laboratori -veure índex de termes-)

Durada de cada assaig: 15 s



Taula de resultats:

Intensitat a través dels conductors durant l'assaig [A]	Temperatura del conductor al final de l'assaig [°C]	Increment de temperatures durant l'assaig [°C]
50	26,5	1,5
100	27	2
150	29	4
200	30,5	5,5
250	31,7	6,7
300	33,5	8,5
350	35	10
400	37	12
450	39,5	14,5
500	43	18
550	46	21
600	50	25

Materials per el Circuit Dielèctric

Especificacions per els dielèctrics

Aquests materials es veuran sotmesos a tensions elèctriques baixes (de l'ordre dels 2 V)

Hauran de resistir les temperatures de soldadura, sobreescalfaments, assatjos en totes condicions. Al assajar els prototipus en règim adiabàtic, un retard en la desconexió pot originar rescalfaments notables.

No ésser higroscòpics

Permetre l'estanquitat

Capaços d'absorbir petites dilatacions tèrmiques dels components mecànics que els envolten

Llista de materials utilitzats

Pintura plàstica

Pintura de silicats

Fibra de vidre

Poliester

Resines Epoxi

Materials per el circuit Magnètic

Material	Aspectes a favor	Extrems que el desaconsellen
Aire	Bon acoblament a altes freqüències i passos polars petits Es el camí magnètic de tots els entreferros	Reluctància elevada
Materials no-ferromagnètics	Capaços de donar forma constructiva al conjunt	Reluctància elevada
Xapes de Ferro	Pèrdues més petites Comportament ben conegut i estandaritzat	Mecanitzat presenta un grau de dificultat mitjà. ANISOTROPIA Poden perdre propietats magnètiques al mecanitzar. Dificultats de disseny i constructives en peces de tres dimensions, ja que s'han de respectar els plans de les planxes
Ferro massís F-111	Molt fàcil de mecanitzar	Pèrdues per corrents de Foucauld elevades
Poliferro (pols de ferro impregnat amb resines)	Gran facilitat constructiva Permet construir primerament el circuit elèctric	Resultat magnètic és molt mediocre. Presenta una permeabilitat relativa $\mu_r = 2$
Ferrites	Pèrdues petites Comportament magnètic acceptable	Molt difícils de mecanitzar degut sobretot a la seva duresa Difícils d'aconseguir en quantitats petites per construir prototipus Poden perdre propietats magnètiques al mecanitzar.

1.3 - TECNOLOGIES CONSTRUCTIVES

Disseny

Deixant apart tots els fonaments físics, tècnics i teòrics, dels que es parla més endavant, cal tenir en compta:

- 1- Operacions de mecanitzat de cada component i el seu procediment
- 2- Sol.licitacions tèrmiques de muntatge i d'assaig.
- 3- Ha de ser possible el muntatge. No n'hi ha prou en fer el disseny d'un prototipus perfecte un cop acabat; aquell prototipus, prèviament s'ha de muntar.
- 4- Els conductors que cal utilitzar per forts corrents, son intrinsecament rígids, i poden transmetre esforços molt importants.

Mecanitzat

Les operacions de mecanitzat són les mateixes que en qualsevol altre cas:

Serra
Torn
Fresa
Traçat
Trepants
Mandrinadora
Ajustatge

Muntatge: Tecnologies magnètic-elèctric

Donem aquest nom a aquelles tècniques de muntatge que primerament munten el circuit magnètic (mecanitzat, presentat, ajustatge). El circuit elèctric (amb els seus corresponents dielèctrics) es munta fent servir com a suport el propi circuit magnètic.

Son les tècniques més exteses actualment a l'indústria. Aplicables a qualsevol tipus de màquina. No importa si els conductors elèctrics són fils, tubs o filàstiques.

El treball de mecanitzat del circuit magnètic és important, i el muntatge del circuit elèctric, entretingut. Veure els prototipus Prat-3 i Prat-5

Les fases de muntatge del circuit elèctric, poden ser: Connexions de bobines, Impregnació, Preparació de bornes, Suports, Elements de mesura i protecció.

Admet com a variant aquells casos que tot el circuit elèctric o una part del mateix es construeix amb metall fos, que solidifica quan es troba en la seva ubicació. Una part del prototipus Prat-4 es fet amb estany colat.

Muntatge: Tecnologies elèctric-magnètic

En aquestes tècniques primer es munta el circuit elèctric. El circuit magnètic pot ser:

- Aire
- Resines Epoxi
- Poliferro

En tots tres casos el comportament magnètic és molt pobre. Aquest extrem els fa vàlids per màquines treballant a freqüències elevades i passos polars curts (veure cap.4: Criteris teòrics de disseny).

La part mecànica i de muntatge és constructivament molt més ràpida que en els prototipus mecanitzats: Hom munta el circuit elèctric i es construeix un utillatge en forma de motlle on s'hi tiren les resines o bé el poliferro. La versió *resines*, s'ha fet servir en el prototipus Prat-2

El circuit elèctric ha de tenir una certa rigidesa constructiva. Això fa que aquesta tècnica sigui especialment vàlida en màquines alimentades en font de corrent, en les que els conductors son tubs de Cu.

Ajustatge

Extrems a tenir en compta:

- 1- Els conductors han de tenir bona continuïtat elèctrica, fins i tot en circumstàncies adverses (altes densitats de corrent, escalfaments,.....)
- 2- Els dielèctics han de complir sempre la seva missió: l'aïllament elèctric entre dues fases diferents de la mateixa màquina, cal que sigui garantit
- 3- No hi poden haver fregaments mecànics un cop acabat el prototipus
- 4- L'estanquitat hidràulica ha de ser total. Aquest prototipus es refrigeren per l'interior dels conductors, mitjançant aigua a pressió.

Utillatges

Utillatges constructius

Bàsicament en prototipus que pertanyen a la tecnologia elèctric-magnètic, on cal preparar prèviament els conductors que formen el bobinat (s'ha de construir una graella de conductors), sovint fa falta construir tubs de Cu amb formes complicades.

En aquest casos el que es fa es:

- 1- Definir la forma del conductor
- 2- Dissenyar un utillatge
- 3- Construir l'utillatge per mitjà de tècniques de control numèric
- 4- Fer servir l'utillatge per preparar els conductors
- 5- Soldar els conductors que formen la graella

Utillatges de muntatge

La seva funció pot ser purament de mecànica de muntatges (per fer entrar una claveta o un torrió). També es necessiten utillatges quan es fan servir tecnologies que impliquen fer colades de material (estany, resines,.....)

1.4 - MÈTODE DE TREBALL

-Es parteix d'uns estudis teòrics el més breu possible en el camp de les màquines elèctriques especials. Es construeixen varis prototipus per palesar les diferències constructives i/o tecnològiques amb les màquines clàssiques. Això ens permet definir els paràmetres desconeguts de cada prototipus amb possibilitat d'èxit.

-Disseny del prototipus

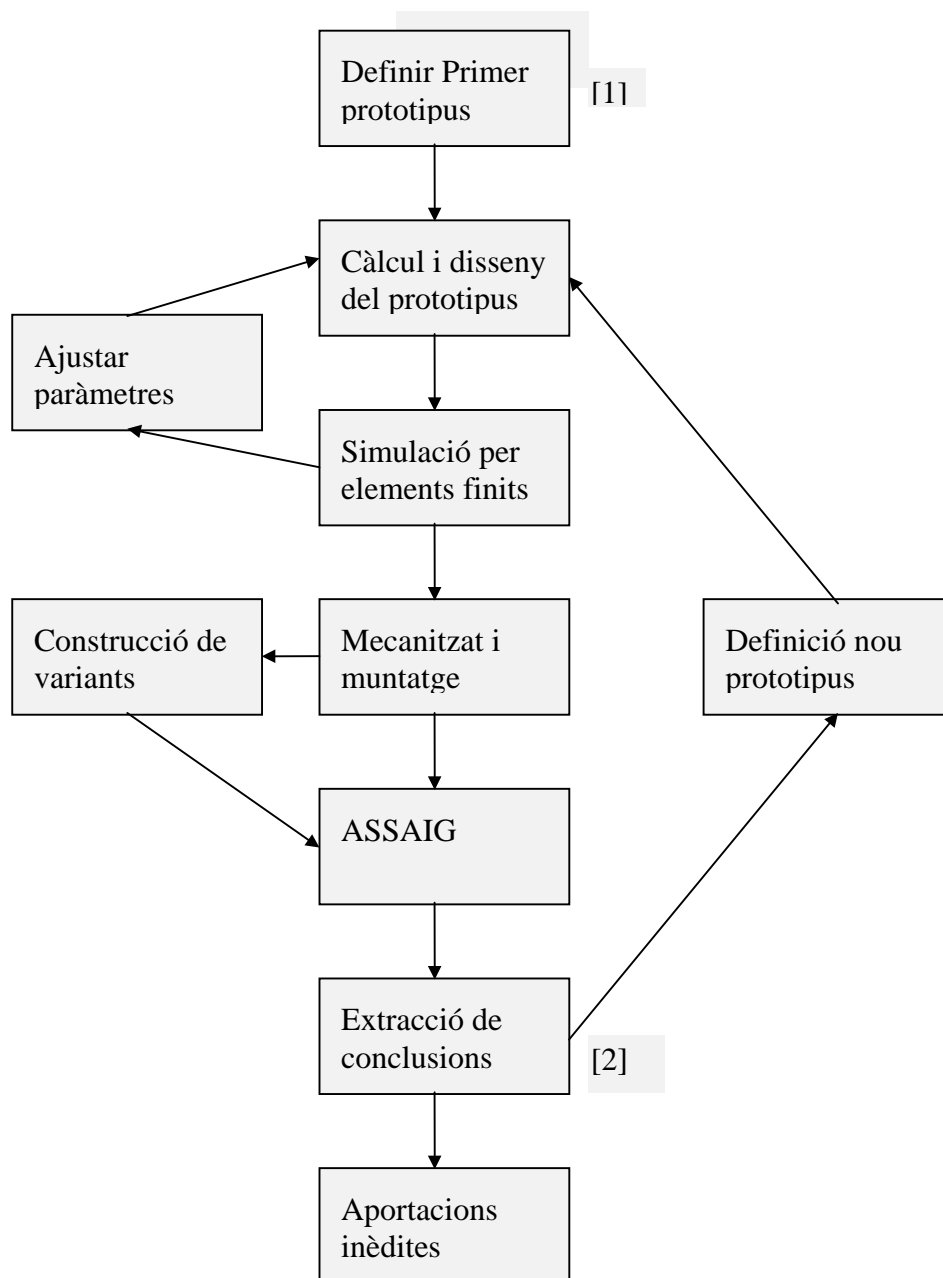
-Simulació estàtica i en dues dimensions, del camp magnètic del prototipus en estudi abans de construir-lo experimentalment. Es fa servir el Soft informàtic *Students' QuickField 3.2 /3.4*

-Construcció del prototipus i anàlisi de les seves dificultats constructives i tecnològiques.

-Assaig del prototipus. Es fa servir un transformador trifàsic que pot arribar a subministrar 20 kA a 15 V en trifàsic.

-Conclusions orientades a dissenyar el següent prototipus.

Diagrama de fases de treball





[1] Els criteris de definició del primer prototipus, son:


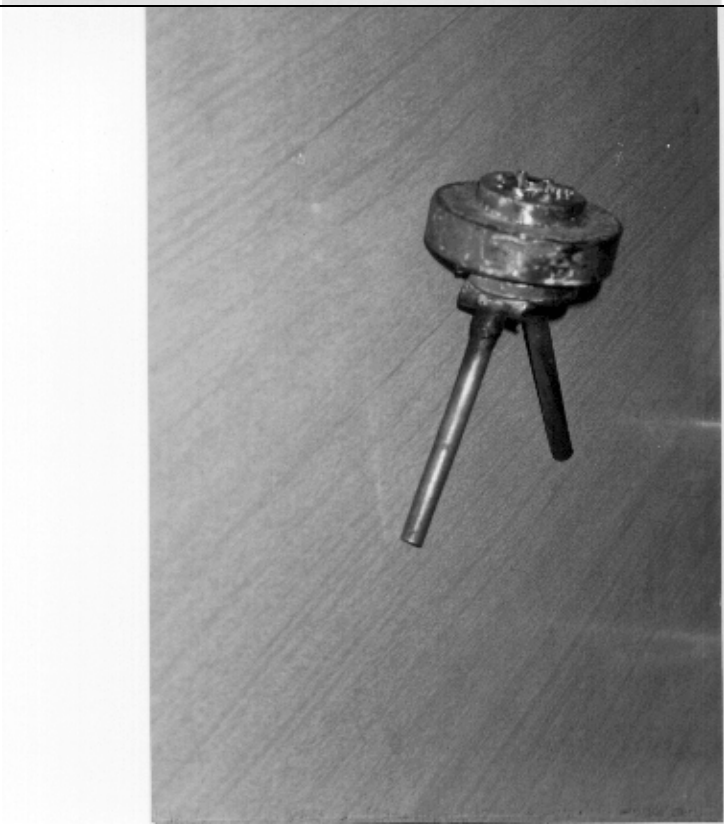
- 1- Màxima simplicitat
- 2- Alimentació en font de corrent

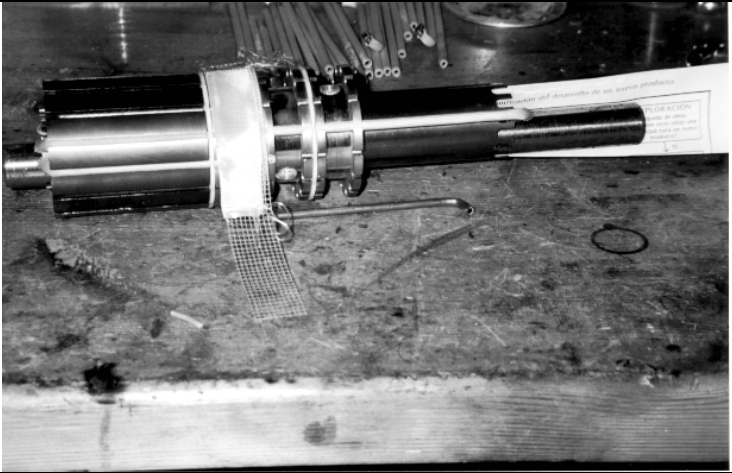
[2] Al extreure conclusions cal discernir també si seguim construint prototipus previs o si ja podem passar a definir el prototipus de treball

1.5 - PROTOTIPUS CONSTRUÏTS

Prototipus Bàsics

Nom	Alimentació Observacions	Fotografia
Prat-1 Màquina de Canyeria	Sistema trifàsic	
Prat-2.1 Màquina de Sector d'estàtor	Aire a pressió Aigua pressió Sistema bifàsic	

<p>Prat-3.0</p> <p>Màquina d'arrancada per variació de reluctància</p>	<p>Aigua Pressió</p> <p>Sistema monofàsic</p>	
<p>Prat-4</p> <p>Màquina d'Estany colat</p>	<p>Aigua pressió</p> <p>Sistema monofàsic</p> <p>o també</p> <p>Sistema bifàsic</p>	

Prat-5	Aigua pressió	
Màquina de doble inductor	Sistema trifàsic	

Variacions als prototipus bàsics

Prat-2.0 Només s'ha construït la part pneumàtica

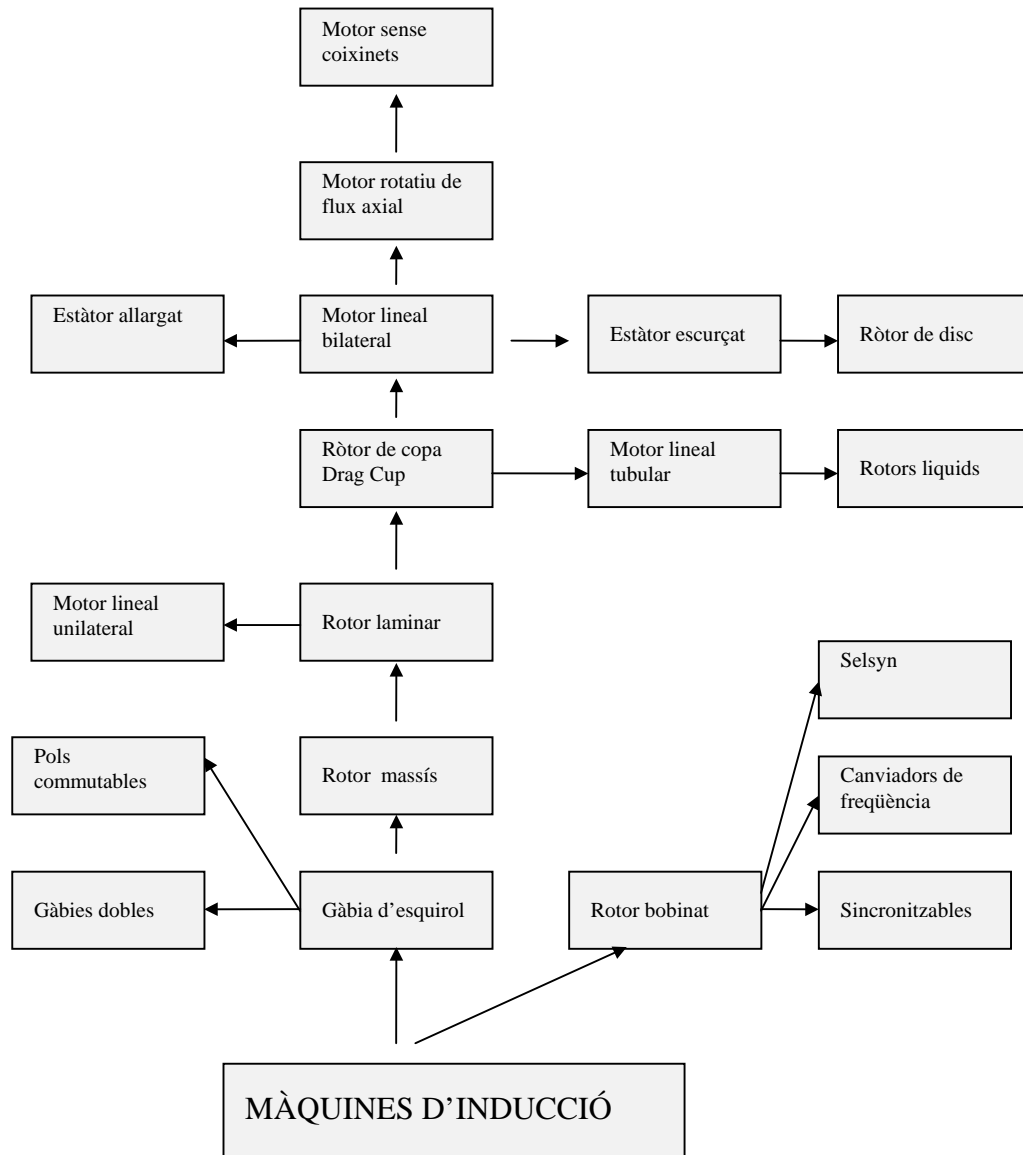
Prat-3.1 Només s'ha fet simulació del camp magnètic

Prat-3.2 Idem

Prat-4.1 Igual a 4.0 però alimentat en bifàsic

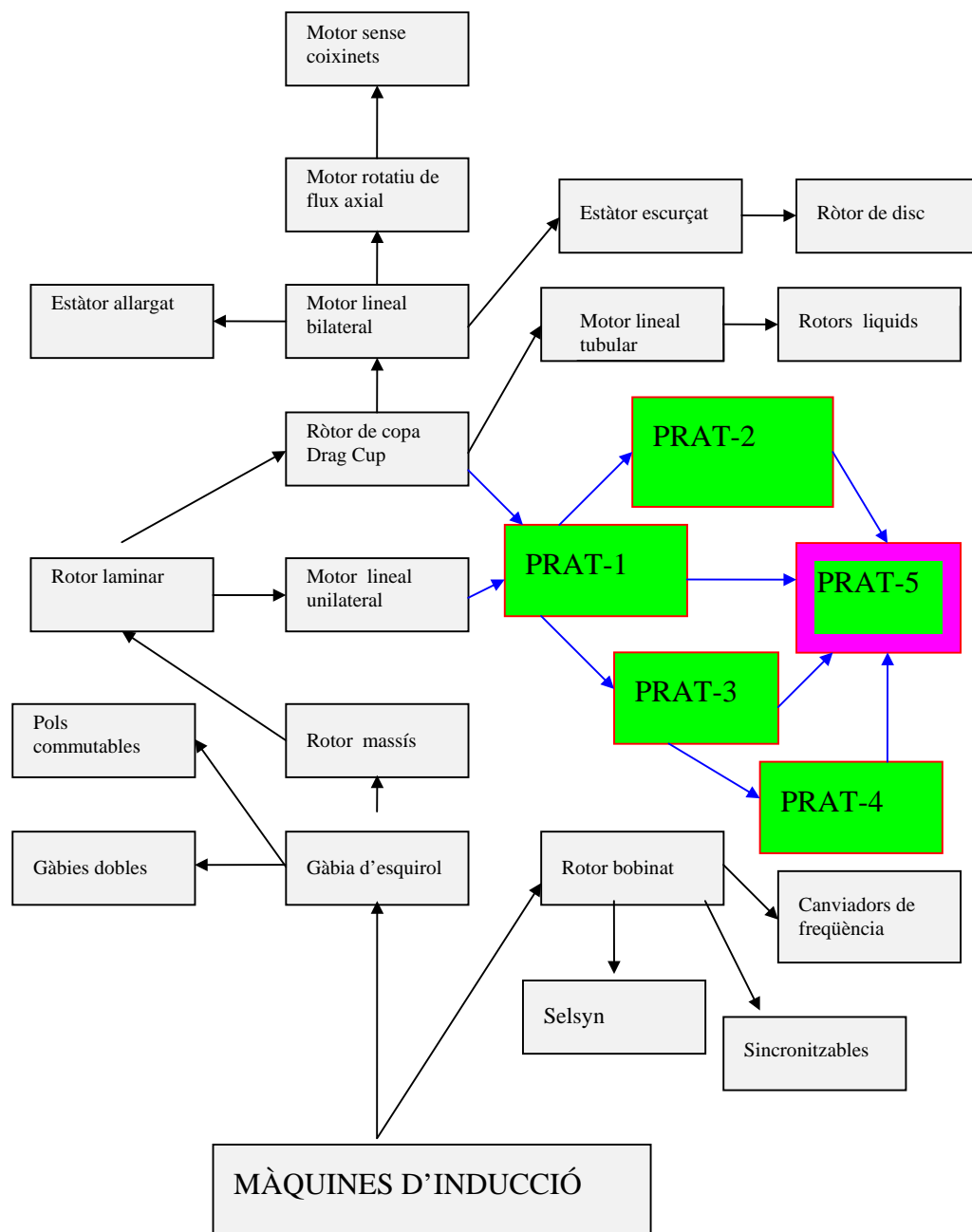
2 - MÀQUINES ELÈCTRIQUES D'INDUCCIÓ SENSE COIXINETS (MEDISC)

2.1 - ESQUEMA EVOLUTIU DE LA MÀQUINA D'INDUCCIÓ



Interessa en primer lloc tenir un panorama complet de com han anat evolucionant les màquines d'inducció fins el moment actual. El segon pas es situar les noves màquines tractades en aquest treball, enquadrant-les en aquest panorama.

2.2 - ELS PROTOTIPUS PRAT EN L'ESQUEMA EVOLUTIU DE LA MÀQUINA D'INDUCCIÓ



Ja s'ha comentat en el capítol 1 que els prototipus Prat son fruit d'un treball que es va realimentant a sí mateix seguint un mètode de treball preestablert [veure 1.4]. El primer prototipus de la sèrie responia a la màxima simplicitat tot volent fer voltar una màquina elèctrica tant senzilla com sigui possible. Es tracta del prototipus PRAT-1, conegut també (familiarment) amb el nom de màquina de canyeria.

El Prat-1 és l'evolució topològica d'un motor amb ròtor de copa, a n'el que se li ha anul.lat el ferro del ròtor.

Anular el ferro del rotor no es cap trivialitat. Es justament una de les qüestions importants d'aquest treball. Els prototipus Prat-1 Prat-2.1 Prat-5 funcionen sense ferro en el rotor, i es una de les aportacions d'aquesta tesi demostrar **pràcticament** que es poden fer girar màquines d'inducció sense ferro en el rotor i alimentades per font de corrent.

Qüestions sobre el ferro del rotor

El motor lineal conegut com l'*Electropult* que feien servir dos vaixells de la marina americana³ dels anys quaranta no va proliferar perquè les forces d'atracció rotor-estàtor eren 10 vegades més grans que les forces tangencials. El manteniment de les rodes de la plataforma era carregós i car.

Els motors lineals comencen a tenir èxit quan el ferro del rotor es fa solidari a l'estàtor i és únicament la làmina conductora qui es desplaça.

En un dels *assaigs del Prat-3*, que no es res més que un rotor de copa, se'm va ocórrer (per anar més depressa) connectar l'alimentació elèctrica quan encara no s'havia soldat el ferro que tanca el circuit magnètic per l'interior del rotor (cal aclarir que Prat-3 i Prat-4 porten ferro dins del rotor malgrat no giri solidari amb ell). El que passava era que el rotor, *és a dir el ferro*, era atret i escopit per les forces primàries d'atracció magnètica. Com que el camp és rotatiu això es tradueix en un donar cops i batzegades per totes bandes. El problema es va resoldre quan vàrem haver soldat el ferro de tancament de flux per l'interior a l'estàtor exterior.

El principi de Earnshaw [31] afirma que l'esforç primari de reducció de reluctància prima sobre tots els esforços electromagnètics, que son algun ordre de magnitud més petita.

Les màquines elèctriques tradicionals tenen ferro en el rotor per aconseguir entreferros petits. L'efecte pernicios d'atracció primària el contraresten els propis anclatges mecànics de la màquina -els coixinets-. El desgast d'aquests sol ésser degut principalment a aquesta força primària de disminució de reluctància.

Si volem fer màquines sense coixinets (amb levitació electromagnètica i bona estabilitat) no podem tenir ferro en el rotor. En el pitjor dels casos el ferro aniria solidari a l'estàtor, però mai solidari al rotor. Es a dir: l'efecte de disminució de la reluctància és un efecte primari, i la rotació o inclús la levitació son efectes secundaris que solsament s'evidencien si es contraresten (o si s'eviten) els efectes primaris.

Treure el ferro augmenta la reluctància dels circuits magnètics i en conseqüència empitjora el factor de qualitat de la màquina. Per contrarestar farem passos polars curts (disminueixen la llargada del camí magnètic), i incrementarem en lo possible la freqüència de treball (millora l'acoblament magnètic i el factor de qualitat)

³ La marina dels USA va construir al voltant del 1945 dos prototipus de *motor linial unilateral* a escala real que servien per accelerar avions. Aquests prototipus militars se'ls coneix amb el nom d'Electropult. Els avions anàven col.locats al damunt de l'inductor, que era qui es desplaçava.

Seguim amb els prototipus Prat

Prat-1 ademés d'haver anul·lat el ferro del rotor, té un estàtor que de fet és una pura capa de corrent. Tot el voltant de l'estàtor queda ocupat per tres únics conductors aplanats que s'ajunten a l'altre extrem de la màquina en el punt estrella del sistema trifàsic d'alimentació. Aquest estàtor tant peculiar fa que el Prat-1 es pugui considerar com l'evolució d'un motor lineal unilateral a n'el que li hem tret el ferro del rotor i que s'ha doblat sobre un eix en el pla del entreferro i perpendicular al sentit d'avanç del camp

Una vegada hem conprovat que Prat-1 funciona ja no renunciem al model de rotor que s'ha aconseguit. En tots els prototipus Prat el rotor segueix essent un tub conductor sense ferro en el seu interior. Les successives evolucions tenen com a protagonista l'estàtor.

L'evolució natural ens porta paral·lelament a dos prototipus. Son el Prat-2.0 i el Prat-3.

Prat-2.0 es la substitució de la capa de corrent de la màquina de canyeria (Prat-1), per un seguit de ranures (vuitanta) amb un únic conductor per ranura i pas curt. Prat-2.0 conegut també amb el nom de màquina de vuitanta conductors, no s'ha construït elèctricament, i s'ha assajat únicament la part pneumàtica. La part electromecànica s'ha assajat fent servir només quatre conductors enlloc dels vuitanta. El prototipus es el Prat-2.1 o màquina de sector d'estàtor. També ha funcionat correctament.

Prat-3 ha volgut construir un estàtor amb pocs conductors (vuit), i també poc diàmetre. Els prototipus Prat-3.x s'alimenten en bifàsic o en monofàsic. Si ho fan en monofàsic el sistema d'arrencada és per variació de reluctància. Prat-3 ens ha fet adonar de la importància de les simetries i dels caps de bobina en les màquines alimentades per corrent, i es una altra de les aportacions.

Prat-4 no es res més que un Prat-3 amb les simetries millorades i fent servir un sistema de construcció diferent.

Passos evolutius cap a Prat-5

Per arribar a Prat-5 hi ha dos passos evolutius importants:

1- *El rotor* que en tots els prototipus es interior a l'estàtor *passa a ser exterior*. Des del punt de vista dels principis físics això no implica cap novetat, però tècnicament és una diferència prou significativa. Quan funciona Prat-5 hom veu un tub que volta, sense ni tant sols saber què hi ha dins. El ventall d'aplicacions d'aquest rotor exterior és essencialment diferent de les que se li puguin preveure a un rotor interior.

2- *Prat-5 té dos inductors*. Tots els prototipus anteriors tenen un únic inductor. Prat-5 en té dos. Hom espera poder-hi aconseguir millores en tot el tema de l'estabilitat, però això supera en aquest moment l'abast d'aquest treball segons el director.

3 - LEVITACIÓ EN ELS PROTOTIPUS PRAT

3.1- LA LEVITACIÓ EN ELS PROTOTIPUS PRAT

La levitació en els prototipus Prat es deixa com a efecte secundari, ja que interessa més resoldre l'entorn constructiu, respectant els condicionants observats en els altres treballs.

Si deixem apart el prototipus Prat-2 que fa servir levitació pneumàtica, la resta de prototipus Prat (**PRAT-1/ PRAT-3/ PRAT-4/ PRAT-5**), tenen en comú:

- 1-Absència de ferro en el rotor (discutible en Prat-3/4)
- 2-Rotor conductor (Cu o Al)
- 3-Rotor cilíndric (intern o extern)
- 4-Inductor cilíndric i coaxial amb el rotor (simple o doble)
- 5-Giren amb moviment de rotació estable (no donen cops)
- 6-Giren sense rodaments mecànics (son màquines sense coixinets)
- 7-Conductors de les ranures inductores (estàtor) connectats en paral·lel.
- 8-Són màquines alimentades en font de corrent.

L'alimentació de l'estàtor en sistema de font de corrent (amb els conductors de pols homòlegs en paral·lel) assegura la levitació rotòrica de forma natural:

Al acostar-se el rotor a una ranura inductora, millora el seu acoblament electromagnètic, el corrent induït en el rotor creix igual que el de l'inductor i la força de repulsió amb el rotor també augmenta, tornant-lo cap al centre.

En tot aquest fenòmen s'hi descobreix, encara que sigui una mica de rebot, la mateixa feina de l'estabilitzador⁴ i caldrà estudiar-lo amb detall en treballs posteriors

⁴ En la levitació de plaques planes o discs hom s'adona que la placa levitada és inestable perquè rep, a la vegada, una força de sustentació i una força lateral d'expulsió. Per tal de mantenir-la estable cal afegir-hi una segona bobina, concèntrica a la primera, i que farà d'estabilitzador.

A les dues bobines (excitació i estabilització), se les ha d'alimentar elèctricament segons un desfasament calculat per cada cas, i que acostuma a ser de l'ordre de 90°.

L'estabilitzador és important en tots els sistemes físics levitats electromagnèticament.

3.2 - TAULA COMPARATIVA: LEVITACIÓ EN CADA UN DELS PROTOTIPUS

Nom prototi.	Característiques	Comentaris al grau de levitació assolit
Prat-1	<p>Rotor intern de Cu Rotor buit</p> <p>Inductor en capa de corrent</p> <p>Gira estable</p>	<p>El valor alt de la relació llargada-diàmetre i l'alimentació en capa de corrent trifàsica ens acosten al cas teòric ideal de levitació de cilindres.</p> <p>Altrament la màquina gira sense coixinets, i sense que hom pugui apreciar fregaments.</p> <p>No s'ha pogut estudiar en detall l'estabilitat</p> <p>El rotor es desplaça axialment cap a fora al augmentar el corrent d'excitació.</p>
Prat-3 Prat-4	<p>Rotor intern de Cu Nucli de Fe</p> <p>Inductor de vuit conductors</p> <p>Per girar estable exigeix anclatge en el Fe del nucli</p>	<p>El tret més característic és la comprovació experimental del teorema de Earnshaw: Amb el nucli de ferro sense estacar primàven les forces primàries de reluctància i no hi havia estabilitat possible.</p> <p>Una vegada ficsat el ferro del nucli l'estabilitat és bona, en tots dos prototipus.</p> <p>Valgui dir que aquestes dues màquines giren també sense coixinets. Els fregaments son poc importants, però apreciables.</p> <p>La relació llarg-diàmetre s'ha pres igual a la unitat, per tant allunyats del cas teòric òptim de levitació de cilindres.</p>
Prat-5	<p>Rotor extern de Al Doble inductor</p>	<p>El rotor confirma les hipòtesi de càlcul i gira vencent un parell de fricció important.</p> <p>No s'aprecien inestabilitats en la rotació.</p> <p>Les friccions dels patins de teflón han enmascarat l'estudi de l'estabilitat en la levitació.</p> <p>Hom creu que el doble inductor fa la feina de l'estabilitzador.</p> <p>Els conductors de cap de bobina frontals ajuden a la levitació.</p>

4- CRITERIS DE DISSENY PER ROTOR I ESTATOR

4.1- CRITERIS DE DISSENY

Seguint el diagrama de fases de treball que es mostra al final del capítol primer, ens adonem que fan falta criteris de disseny, basats en la teoria general de les màquines elèctriques, almenys en els dos casos següents:

- 1- Per definir correctament els paràmetres de base de cada prototipus
- 2- Per optimitzar les relacions entre aquells paràmetres aparentment contradictoris

4.2- CAMP ELECTROMAGNÈTIC EN ROTOR I ESTÀTOR

Les màquines objecte d'aquesta tesi son màquines de flux radial.

Son màquines sense ferro en el nucli, segons es desprèn del principi de Earnshaw

Per avaluar la distribució de camp magnètic, des d'un punt de vista purament teòric, ens basem en les equacions de Maxwell, que per aquest cas, podem escriure: (al escriure la llei d'Ampèr no cal tenir en compte el terme de corrent de desplaçament elèctric, per les freqüències de treball en les que ens movem)

$$\text{La llei de Gauss } \nabla \cdot D = \rho_c$$

$$\text{L'equació de continuïtat del flux } \nabla \cdot B = 0$$

$$\text{La llei de Faraday } \nabla \times E = \delta B / \delta t$$

$$\text{La llei d'Amper } \nabla \times H = J$$

Per tal de fer-les servir com a orientació en el disseny, podem seguir diversos camins:

- 1- Mètodes analítics
- 2- El mètode de les imatges de Lord Kelvin
- 3- Tècniques de càlcul numèric
- 4- Mètodes experimentals

Vegem unes breus reflexions sobre la conveniència o no de cadascun d'aquests.

Mètodes Analítics

Els mètodes analítics és basen en la resolució de les equacions en derivades parcials. Caldrà parlar de règims estàtics (independents del temps), quàsi-estàtics (variables amb el temps, però a baixes freqüències), i camps on cal considerar corrents de desplaçament (variables amb el temps a freqüències altes o molt altes). Nosaltres ens movem en el segon cas (quasi estàtic), on es generen corrents de remolí o de Foucauld, d'una gran importància.

En tots aquests mètodes d'anàlisi cal introduir funcions potencials, condicions de contorn, i utilitzar la teoria de camps estàtics (electrostàtic, magnetostàtic).

La conveniència o no de fer servir mètodes analítics per el càlcul, s'analitza a través d'un exemple:

Hom vol calcular les forces entre el ròtor i l'estàtor conductors d'una màquina elèctrica cilíndrica.[33].

Es busca la component radial de la densitat de flux deguda al corrent del estàtor, i vista per un conductor del rotor. Aquesta component radial resulta ser:

$$B_r = -\mu (\delta\psi_R/\delta r)_{r=g}$$

essent g la coordenada radial del conductor del rotor. Si aquest conductor transporta un corrent i_R , llavors la força tangencial F_t que fa girar el rotor, vindrà donada per:

$$F_t = i_R \cdot B_r$$

per tal de calcular el valor de la funció ψ_R , cal resoldre l'equació de Laplace, que aquí es planteja en coordenades cilíndriques:

$$r^2 \cdot \frac{\delta^2 \psi}{\delta r^2} + r \cdot \frac{\delta \psi}{\delta r} + \frac{\delta^2 \psi}{\delta \theta^2} = 0$$

i hom assumeix com a solució, la funció potencial $\psi(r,\theta) = R(r) \cdot S(\theta)$. Es busquen les derivades parcials d'aquesta funció potencial, i es substitueixen en l'equació de Laplace esmentada més amunt, i en resulta la igualtat:

$$\frac{1}{R} \left(r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} \right) = - \frac{1}{S} \frac{d^2 S}{d\theta^2}$$

que com es veu el primer terme només es funció de r mentre que el segon només és funció de θ , i s'ha aconseguit una expressió de variables separades. En realitat caldria dir de constants separades, perquè cada un dels cantons de la igualtat és igual a una constant, que es pren com enter positiu i igual a m^2 . Llavors l'equació anterior es desdobra en dues:

$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} - m^2 R = 0 \quad \text{que té per solució:} \quad R = cr^m + dr^{-m}$$

$$\frac{d^2 S}{d\theta^2} = -m^2 S \quad \text{que té per solució:} \quad S = g \cos m\theta + h \sin m\theta$$

essent c,d g,h constants. Si substituïm aquestes solucions en l'expressió de $\psi(r,\theta)$ resulta que la solució particular de l'equació és:

$$\psi(r,\theta) = (cr^m + dr^{-m})(g \cos m\theta + h \sin m\theta)$$

com que no s'imposa cap condició a la constant, hi hauran infinites solucions; la solució general serà una combinació lineal de totes les solucions particulars, i vindrà donada per:

$$\psi(r,\theta) = \sum_{m=1}^{\infty} (c_m r^m + d_m r^{-m})(g_m \cos m\theta + h_m \sin m\theta)$$

en cas d'haver de considerar corrents elèctrics o pols magnètics, caldrà afegir alguns termes addicionals a l'equació de la funció potencial, que tinguin en compte aquests corrents o aquests pols, i que de fet seran solucions de l'equació en derivades parcials per el cas de $m=0$. Amb aquests darrers afegits la solució més general, ve donada per:

$$\psi(r,\theta) = \sum_{m=1}^{\infty} (c_m r^m + d_m r^{-m})(g_m \cos m\theta + h_m \sin m\theta) + \sum_q \frac{i_q}{2\pi} \alpha_q + \sum_s \frac{p_s}{2\pi} \log R_s$$

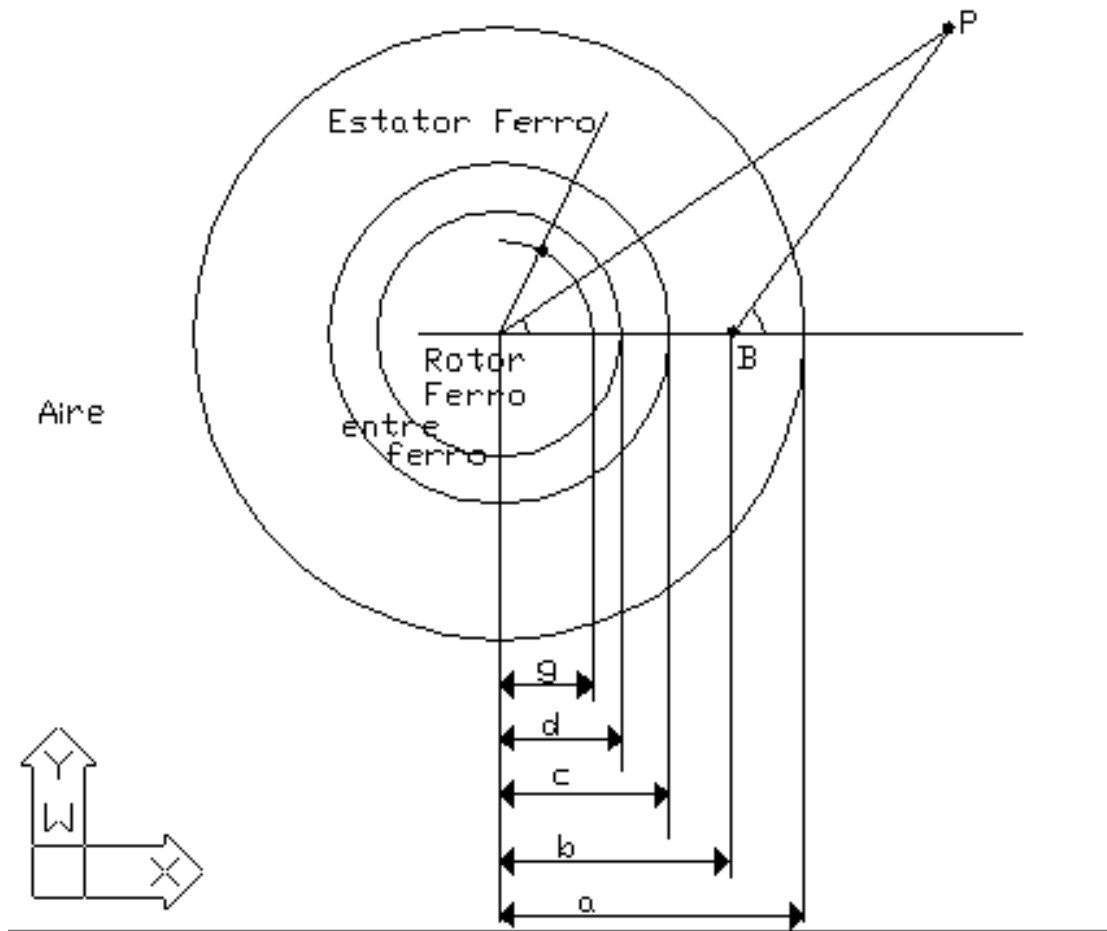
els paràmetres α_q es poden desenvolupar en sèrie, i poden quedar inclosos amb la primera part de l'equació (en la que les constants es determinen aplicant condicions de contorn), en tots els casos excepte si ens movem justament per damunt de la zona on hi ha els conductors elèctrics, que el valor d'aquesta constant, serà: $\alpha = 0.5(\theta + \pi)$.

Igualment els paràmetres $\log R_s$ poden quedar inclosos en la part d'equació que contempla les condicions de contorn, excepte si ens movem per la zona del damunt dels pols. En aquest darrer cas, seria: $\log R = \log b - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \cos m\theta$

Finalment la solució, queda:

$$\psi(r,\theta) = \sum_{m=1}^{\infty} (c_m r^m + d_m r^{-m})(g_m \cos m\theta + h_m \sin m\theta) + \frac{\theta + \pi}{2} + \log b - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m} \cos m\theta$$

Si tornem al problema del principi, hom vol calcular les forces entre el rotor i l'estàtor conductors d'una màquina elèctrica cilíndrica:



Després de buscar les constants, hom dona el valor de la funció potencial en quatre regions:

- ψ_0 per l'espai exterior
- ψ_S per l'estàtor
- ψ_G en l'entreferro
- ψ_R en el rotor

l'expressió analítica de cada una d'elles, resulta ser:

$$\psi_0 = \frac{i_s}{2\pi} \theta + \sum_{m=1}^{\infty} D_{Om} r^{-m} \sin(m\theta)$$

$$\psi_S = \frac{i_s}{2\pi} \beta + \sum_{m=1}^{\infty} (C_{Sm} r^m + D_{Sm} r^{-m}) \sin(m\theta)$$

$$\psi_G = \sum_{m=1}^{\infty} (C_{Gm} r^m + D_{Gm} r^{-m}) \sin(m\theta)$$

$$\psi_R = \sum_{m=1}^{\infty} C_{Rm} r^m \sin(m\theta)$$

el valor de cada una de les constants, és:

$$D_{Om} = \frac{i_s \mu}{\pi(1+\mu)} (b^{2m} ((1+\mu)^2 c^{2m} - (\mu-1)^2 d^{2m}) - c^{2m} ((\mu^2-1)(c^{2m} - d^{2m}))) \frac{1}{Q}$$

$$C_{Sm} = \frac{i_s}{2\pi} \left(\frac{\mu-1}{\mu+1} \right) \frac{1}{a^{2m}} ((b^{2m} ((\mu+1)^2 c^{2m} - (\mu-1)^2 d^{2m}) - c^{2m} ((\mu^2-1)(c^{2m} - d^{2m})))) \frac{1}{Q}$$

$$D_{Sm} = \frac{i_s}{2\pi} c^{2m} \left(\left(1 - \left(\frac{\mu-1}{\mu+1} \right) \left(\frac{b}{a} \right)^{2m} \right) ((\mu^2-1)(c^{2m} - d^{2m})) \right) \frac{1}{Q}$$

$$C_{Gm} = -\frac{i_s}{\pi} \mu(\mu+1) c^{2m} \left(1 - \left(\frac{\mu-1}{\mu+1} \right) \left(\frac{b}{a} \right)^{2m} \right) \frac{1}{Q}$$

$$D_{Gm} = \frac{i_s}{\pi} \mu(\mu-1) c^{2m} d^{2m} \left(1 - \left(\frac{\mu-1}{\mu+1} \right) \left(\frac{b}{a} \right)^{2m} \right) \frac{1}{Q}$$

$$C_{Rm} = -\frac{2i_s}{\pi} \mu c^{2m} \left(1 - \left(\frac{\mu-1}{\mu+1} \right) \left(\frac{b}{a} \right)^{2m} \right) \frac{1}{Q}$$

en totes elles $\mu = \mu_r \mu_o$

les dimensions a,b,c,d,g son les del dibuix que s'adjunta, i en quan a la constant Q que hi apareix, resulta ser:

$$Q = (((\mu+1)^2 c^{2m} - (\mu-1)^2 d^{2m}) - \left(\frac{\mu-1}{\mu+1} \right) \left(\frac{c}{a} \right)^{2m} ((\mu^2-1)(c^{2m} - d^{2m}))) m b^m$$

si fem una recopilació de tot el que s'ha dit (el mètode de càlcul de les constants no s'esmenta per raons òbvies), resulta que *per el cas particular de rotor i estàtor de xapes de ferro, i si hom no té en compta l'efecte de vores, la força que fa girar la màquina, resulta ser:*

$$F_t = -\frac{2i_s i_r}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\frac{g^{m-1}}{b^m} \mu^2 \left[1 - \frac{\mu-1}{\mu+1} \left(\frac{b}{a} \right)^{2m} \right] \sin(m\theta)}{\left[(\mu+1)^2 - (\mu-1)^2 \left(\frac{d}{c} \right)^{2m} \right] - (\mu-1)^2 \frac{1}{a^{2m}} [c^{2m} - d^{2m}]}$$

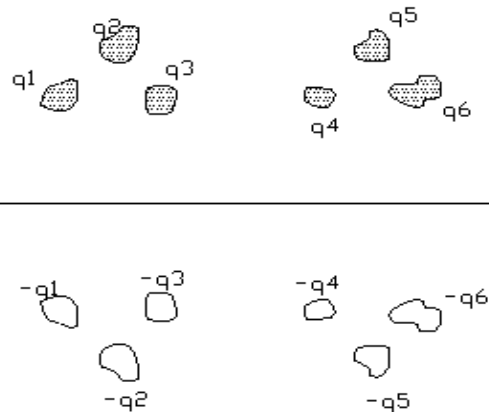
Serveixi aquest petit exemple per fer evident que en un treball experimental com ho és aquest, els mètodes analítics poden esdevenir excessivament llargs de càlcul. Els mètodes analítics s'allarguen encara més si hom vol tenir en compta absolutament totes les variables, mentre que un prototipus construït ja porta implícites totes les seves variables físiques, además de les constructives, imprescindibles si hom pensa en una aplicació industrial de l'estudi.

El mètode de les imatges de Lord Kelvin

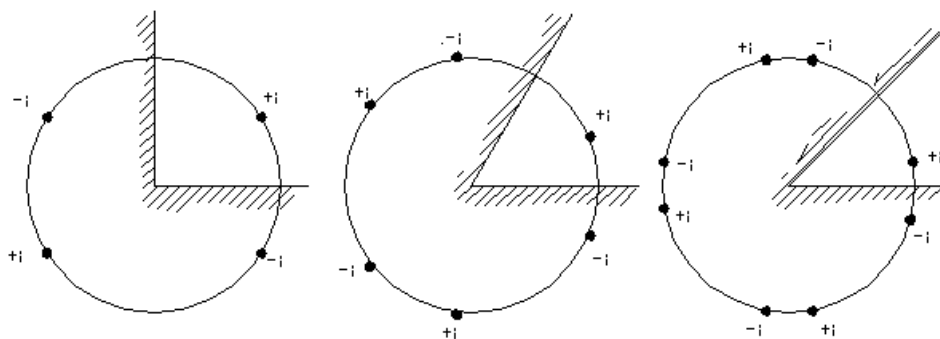
Passem a considerar el mètode de les imatges o de Lord Kelvin. El mètode consisteix en substituir els efectes que per la determinació del camp imposen les condicions de contorn, per una simple distribució de corrents o de càrregues situades al darrera de la línia de contorn; a aquesta distribució de corrents o de càrregues *afegida* hom l'anomena *imatges*. En la determinació del camp, ara, no caldrà tenir en compta les condicions de contorn, però a canvi el camp en qualsevol punt de l'espai vindrà donat per la superposició del camp degut a les càrregues reals i el degut a les imatges.

Aquest mètode és aplicable fàcilment en aquells casos on el contorn es pot idealitzar com una línia recta i infinita o com una superfície plana infinita: és útil en el càlcul de línies elèctriques.

En el càlcul de línies elèctriques s'afirma que el camp creat per uns quants conductors carregats, i situats enfront d'un pla, coincideix, allà on existeix, amb el camp constituït per aquests conductors amb les seves càrregues i uns altres de virtuals, que són imatge dels anteriors, amb càrregues de signe oposat als dels primers, així:



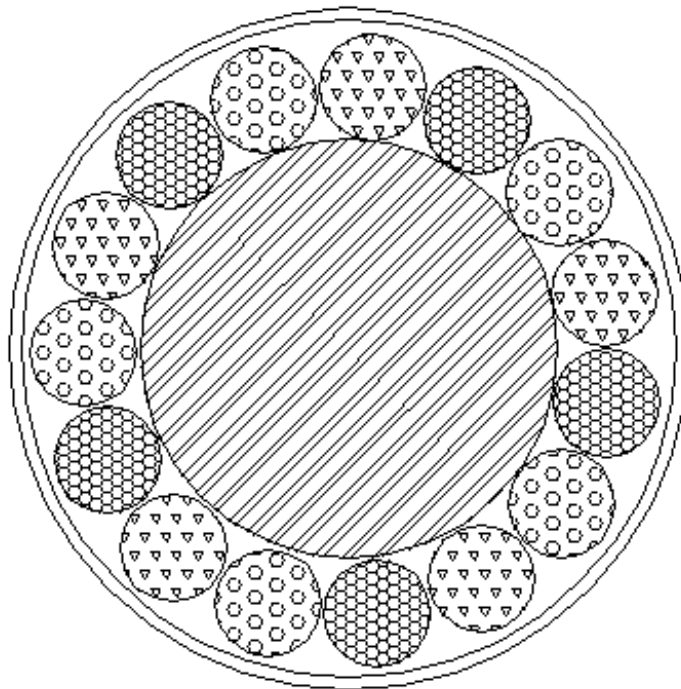
En altres casos, la seva aplicació no resulta tant immediata. En efecte, si tenim dos contorns que es tallen, i segons l'angle de tall, sortirà més d'una imatge, així:



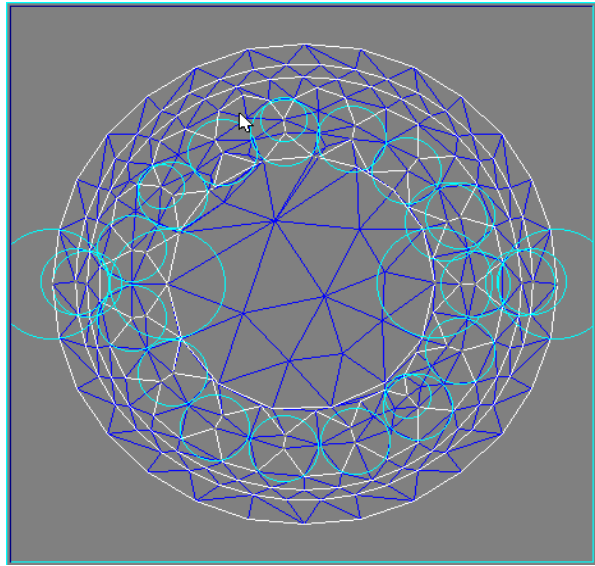
Si enlloc de tractar-se de contorns amb geometria plana, es parla de contorns amb altres geometries, com pot ser la geometria circular, el mètode de les imatges encara es complica més: citem el conegut exemple de la influència que en la deformació d'un camp uniforme provoca un cilindre circular conductor i de llargada infinita ficat dins d'aquest camp; si es vol resoldre el problema aplicant el mètode de les imatges, la influència del cilindre, haurà de ser modelitzada per la combinació de dues càrregues. *En el cas d'una màquina elèctrica*, on les condicions de contorn van variant en funció de la forma, el mètode de les imatges acabaria per ser força de mal aplicar.

Tècniques de Càlcul numèric per ordinador.

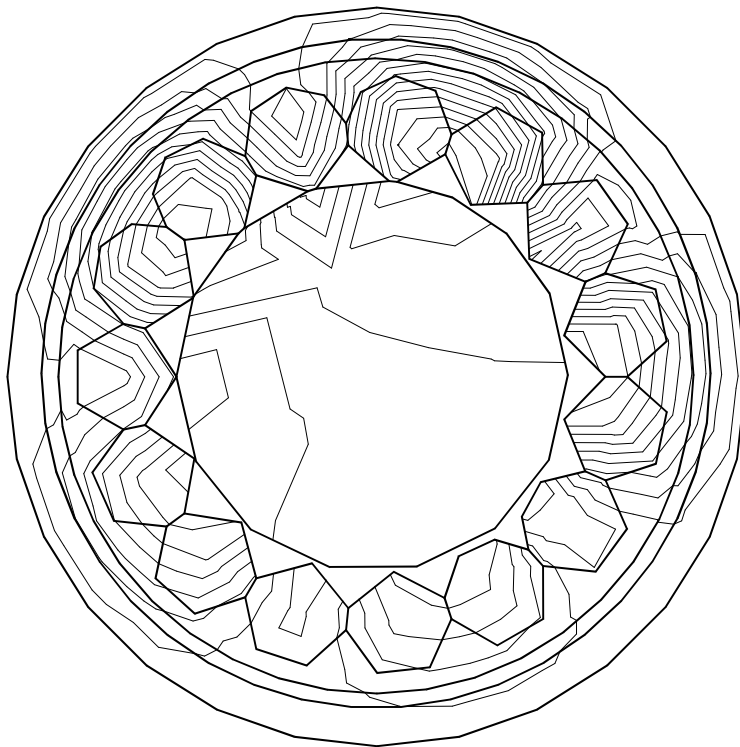
Basades en la utilització del programa Qfields (*Students' QuickFieldTM 3.2/ 3.40*)
)
 Seguint amb el nostre desig d'avaluar diferents mètodes, anem a resoldre per aquest mètode numèric d'elements finits el següent exercici: :



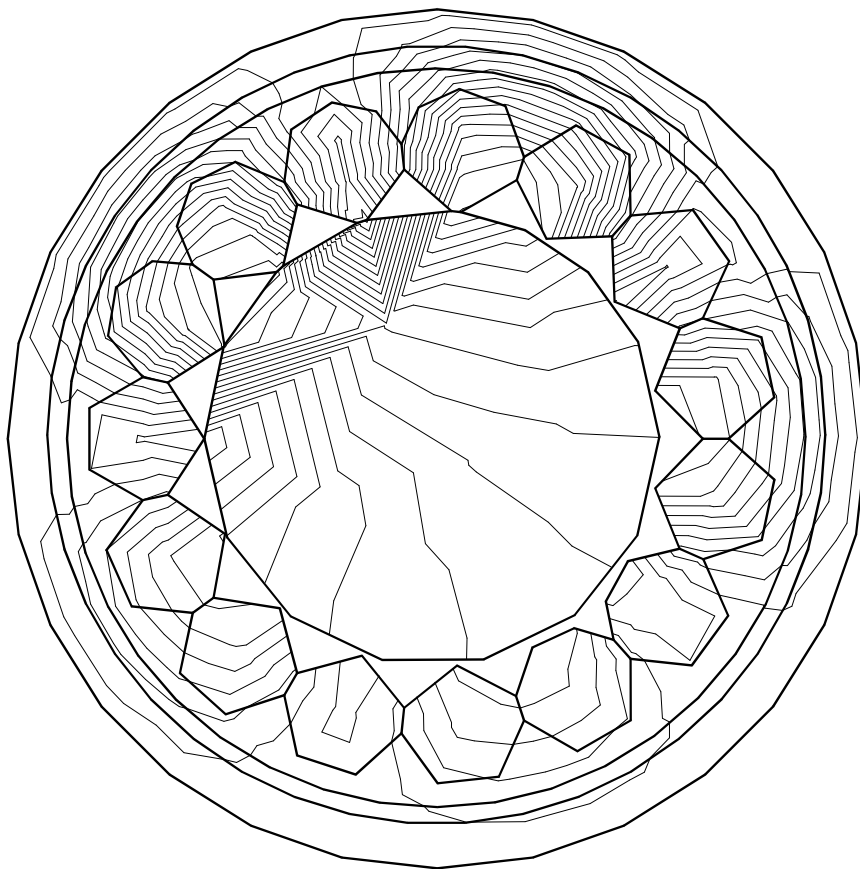
En aquest cas concret, la geometria que fa servir el programa per fer els càlculs, és la següent



Si es fa la resolució del problema per el cas particular de nucli de material no-ferromagnètic, surt el següent mapa de línies de camp:



I en el cas de nucli de material magnètic, resulta ser:



Es veu, per tant que la simulació per soft basant-nos en tècniques de càlcul numèric mitjançant elements finits, és la més adient per aquest tipus de problema. El criteri que s'anirà prenent abans de construir físicament qualsevol prototipus, serà fer la seva simulació i obrar en conseqüència.

Val a dir que per tractar-se de corrent altern, la simulació es fa per un instant determinat.

Mètodes Experimentals

Encara que els prototipus Prat ja siguin ells mateixos treballs experimentals, en les primeres fases de disseny també es serveixen de resultats anteriors: BOSCH, GRAU, TOFE,.....,dels que s'en assumeixen les experiències prèvies.

L'esperit d'aplicació industrial d'aquest estudi fa especialment adient aquest mètode de treball, ja que els mètodes constructius emprats son una recerca sobreposada al desenvolupament de futurs productes.

La raó de base que ens mena a fer servir el mètode experimental ha estat doble:

a) Per una banda la certesa de que el resultat experimental -ni que sigui matusser i sempre millorable- és real i palpable, fidel reflex de TOTS els fenòmens implicats en l'estudi que es realitza.

b) D'altra banda el fet de què en el nostre cas, hem trigat molt menys temps en construir i provar els prototipus, que en fer un estudi teòric exhaustiu d'uns temes molt poc tractats en estudis previs.

Hi ha una sinergia important amb resultats simultanis en el temps. Es tracta de la tesi doctoral d'En José López López (actualment en fase d'execució molt avançada), que porta per títol "*Levitación y estabilización de un motor eléctrico de flujo axial*" i que s'està duent a terme en el mateix departament i conjuntament.

4.3- CIRCUIT MAGNÈTIC

Criteris Clàssics

Per tal de dissenyar el circuit magnètic dels diferents prototipus els criteris emprats tradicionalment, són:

1- Modelitzar el circuit magnètic de cada prototipus mitjançant “*generadors*” de força magnetomotriu F (f.m.m.), i reluctàncies \mathfrak{R} , com si es tractés de la modelització d’un circuit elèctric, tenint en compte que la reluctància sols és constant quan ens movem per la zona lineal de la corba de saturació del material magnètic.

2- Minimitzar la reluctància equivalent del circuit (que és funció de la geometria i de la permeabilitat).

La justificació d’aquests dos criteris la trobem a partir de la quarta equació de Maxwell, coneguda amb el nom de Llei d’Ampèr. Hom sap que **circuit magnètic** és un volum de l’espai en el que hi ha un camp magnètic i que les línies d’inducció dins d’aquest volum estan tancades en elles mateixes com ho son les línies de corrent dins d’un circuit elèctric. La 4ta. equació de Maxwell, és:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint_A \vec{J} \cdot d\vec{A} + \frac{d}{dt} \oint_A \vec{D} \cdot d\vec{A}$$

i si com és el nostre cas, els corrents de desplaçament no ens afecten, queda:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint_A \vec{J} \cdot d\vec{A}$$

el terme $\oint_A \vec{J} \cdot d\vec{A}$ és la suma de tots els corrents elèctrics que abracen el camí magnètic, per tant en el cas dels prototipus que son objecte d’aquesta tesi (màquines alimentades per corrent, bobines amb 1 sola espira), serà $\oint_A \vec{J} \cdot d\vec{A} = I$, i per tant: $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I$

en quan al terme $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l}$ per tal de poder-lo evaluar, s’ha de considerar que en el circuit magnètic estudiat existeixen simetries que permetin considerar (en primera aproximació) que el camp és constant en tota secció recta de la trajectòria, i que els vectors \vec{H} i $d\vec{l}$ son paral.lels al llarg de tota la línia. Amb aquestes hipòtesis, resulta que $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = H \cdot l$

Cal recordar breument la definició d’inducció i de flux:

$$B = \mu_0 \mu_r \cdot H$$

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

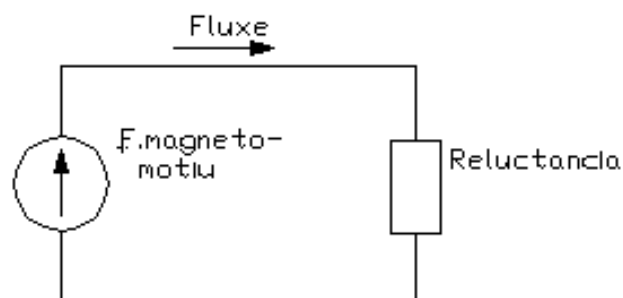
El flux magnètic és una quantitat escalar i es continu en un camí tancat (circuit magnètic tancat, que pot estar format per materials de diferents reluctàncies posats en sèrie). Amb les hipòtesis de simetria, de camps constants i de vectors paral·lels, hom pot escriure que:

$$\phi = B \cdot S$$

El que portem exposat ens permet introduir el concepte de reluctància: S'anomena **reluctància** del circuit magnètic a la constant de proporcionalitat entre el flux i la f.m.m., és a dir:

$$\mathfrak{R} = \frac{\mathcal{F}}{\phi} = \frac{\oint \vec{H} \cdot d\vec{l}}{\phi} = \frac{H \cdot l}{\phi} = \frac{\left(\frac{B}{\mu_0 \mu_r}\right) \cdot l}{\phi} = \frac{\left(\frac{\phi}{S}\right) \cdot l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \phi} = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S} = \frac{l}{\mu \cdot S}$$

Veiem que la reluctància només és funció de la geometria del circuit magnètic i de la permeabilitat, com ho mostra el darrer terme de la igualtat anterior. Amb totes aquestes consideracions, podem modelitzar el circuit magnètic, així:



Es veu que per aconseguir que el flux sigui màxim, cal que la reluctància sigui el més petit possible, per una determinada f.m.m. Seguint amb l'anàlisi, es pot parlar de lleis de Kirchhoff del circuit magnètic, que s'expressen:

$$\sum_i \phi_i = 0$$

$$\sum_i \mathcal{F}_i = \sum_j \mathfrak{R}_j \cdot \phi_j$$

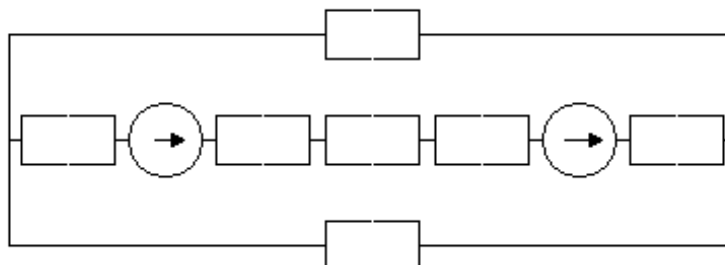
“En un nus la suma de fluxos entrants és igual a la suma de fluxos sortints”

“En una malla la suma de forces magnetomotrius, és igual a la suma de productes de fluxos per reluctàncies”

Caldria afegir la possibilitat de considerar acoblaments de reluctàncies en paral·lel i en sèrie

Aquesta analogia circuit elèctric-circuit magnètic, permet modelitzar el circuit magnètic de qualsevol màquina elèctrica. L'esquema que es mostra tot seguit és la

modelització del circuit magnètic d'una màquina de dos pols, amb bobines en el estàtor, però no en el rotor, i en la que es consideren les reluctàncies de pols, jou i nucli considerats de material ferromagnètic, i la de l'entreferro (que es troba dues vegades al seguir el camí magnètic), considerant que és aire:



Criteris per a màquines alimentades en font de corrent

Quan es tracta de màquines alimentades amb font de corrent, els criteris segueixen essent els de sempre. No obstant, cal afegir alguns comentaris sobre el comportament dels conductors elèctrics de l'inductor d'aquestes màquines:

- 1- Els conductors refrigerats directament amb aigua admeten densitats de corrents molt elevats, que vol dir camps magnètics associats gens menyspreables.
- 2- Els conductors sota camps alterns es comporten com a diamagnètics parcials.
- 3- Els superconductors apantallen els camps magnètics ($\mu=0$)

4.4- CIRCUIT ELECTRIC EN ESTATOR I EN ROTOR

Circuits elèctrics de la màquina

La principal dificultat que ens trobem en el disseny dels circuits elèctrics de la màquina prové dels nostres propis hàbits; en efecte: tenim per costum pensar en “font de tensió”, mentre que aquestes màquines estan alimentades, i per tant es *comporten com* sistemes alimentats per “font de corrent”.

Cal pensar en algun tipus d'adaptació d'impedàncies a la xarxa o al convertidor, a través d'un transformador auxiliar que tradueixi tensió en corrent conservant les potències. Ho pot fer el T.S. del laboratori -com s'ha fet en aquest treball- o fer dissenys amb nuclis toroidals integrats en els prototipus com estudia José López López.

En el circuit elèctric de l'estàtor, que es on es troben els conductors (espires) que proporcionen la f.m.m. al sistema, caldrà estudiar l'esquema equivalent d'aquests conductors. Els podem modelitzar per una resistència i una bobina en sèrie. En quan a la resistència es evident que es tracta de la pròpia resistència de l'espira, que pot semblar

menyspreable: $R = \rho \frac{l}{S}$ Hem de remarcar que de menyspreable no ho és, doncs els forts corrents fan que petites variacions de R representin grans pèrdues, o que la dèbil força electromotriu disponible sigui insuficient per a fer circular el corrent teòric.

En quan a la part inductiva, recordar que el coeficient d'autoinducció és la relació entre flux i corrent: $L = \frac{\Psi}{i}$, essent $\Psi = N \cdot \phi$, i en màquines de una sola espira per bobina $\Psi = \phi$. Si derivem, surt:

$$i \frac{dL}{dt} + L \frac{di}{dt} = N \cdot \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\phi}{dt}$$

i en el cas lineal (màquina sense saturar, coeficient d'autoinducció lineal), la força electromotriu induïda, serà:

$$e = -\frac{d\phi}{dt} = -L \cdot \frac{di}{dt}$$

si enlloc de fer-ho en versió forces electromotrius, ho fem versió caigudes de tensió, i afegim les pèrdues òhmiques, veiem que la c.d.t. en bornes de la bobina, i per tant la f.e.m. que ha de donar el generador, serà:

$$e_g = u_L = i_L \cdot R_L + L \cdot \frac{di_L}{dt}$$

Analitzant aquesta equació per el cas dels nostres prototipus, veiem que:

1- Al tenir només una espira per bobina R_L pot ser baixa. Hom pot ocupar tot l'espai amb conductor i no amb dielèctrics -que fan baixar el factor d'emplenat-. Per tant la c.d.t. òhmica, es poc important.

2- En el cas d'espines en paral·lel i tractant-se de corrents elevats, el terme inductiu (molt influït per la forma dels conductors) serà important.

Que la forma dels conductors és important a l'hora d'avaluar el terme inductiu, en tenim un exemple en l'ona de xoc (laboratori d'alta tensió). En efecte, en aquest aparell la unió elèctrica entre el divisor i la torre de condensadors, és en forma de làmina per evitar que la L (coeficient d'autoinducció) esdevingui excessiva. Cas de tenir una L massa gran provocaria sobretensions i ressonàncies d'instrumentació poc volgudes.

3- Petites variacions en la geometria dels diferents conductors (espines) del prototipus, provocaran que el flux abraçat sigui molt diferent quantitativament de les unes a les altres; les L (coeficients d'autoinducció) també seran diferents; el mateix passarà amb les c.d.t.

4- Caigudes de tensió força diferents en un sistema que treballa a tensions molt baixes pot arribar a provocar molta diferència en els corrents d'un i altre conductor (espira), en màquines mancades de simetria.

Críteris per el circuit elèctric del estàtor. Resum

- a) Secció suficient segons densitats de corrent permeses en els conductors
- b) Míxima llargada dels conductors
- c) Corrent màxim en funció de la quantitat d'escalfor que siguem capaços d'extreure
- d) Perfecta simetria.

Aquesta última és, en molt, la més important de les tres (ho dic per els resultats experimentals, vegeu capítol 5).

La no-simetria voldria dir llargades diferents en les diverses branques. Això donaria diferent R, diferent L, diferent M (inductància mútua), a les diferents fases. La màquina veuria un sistema elèctric desequilibrat, encara que la font el donés equilibrat.

A l'hora de definir les llargades de cada circuit, veiem que formen estructures ramificades en les que son importants tant la llargada com la simetria. Cada mil·límetre compta, de forma que s'han de coordinar i minimitzar no sols els conductors dins de les ranures o zones d'utilització del corrent, sinó també en les zones on es genera o on s'indueix el corrent; i el més difícil són les zones de transport o interconnexió.

La rigidesa mecànica garanteix la simetria de formes, però dificulta la construcció i les soldadures.

Críteris per el circuit elèctric del Rotor

En el rotor les consideracions son ben diferents, doncs és tracta d'un cos totalment conductor. El rotor queda "submergit" dins del camp elèctric del estàtor. Aquest camp elèctric es "canviant" en el temps, és una funció del temps que no és constant, i en conseqüència, les variacions de flux vistes des del rotor, induiran tensions en els seus punts interiors.

El disseny del rotor és a densitat de corrent constant. Per tant cal fer més amples (més secció), tots els llocs on es podrien concentrar corrents. La densitat de corrent dins del rotor és desconeguda i depèn de molts factors que sols l'experiència pot indicar.

4.5- RELACIÓ ENTRE PARÀMETRES ELECTRICS MAGNÈTICS I DE DISSENY

Els prototipus objecte d'aquest treball no tenen ferro en el nucli del rotor. L'acoblament magnètic té lloc a través de l'aire. Interessa minimitzar la reluctància. Cal construir fent servir un pas polar curt. Vegem les relacions d'alguns dels paràmetres de funcionament amb el pas polar.

F.e.m. en bornes

En les màquines de corrent altern, la f.e.m. en bornes, ve donada per: [01]

$$E_f = 2.22 \cdot f \cdot \phi_\delta \left(\frac{Z \cdot \xi}{m} \right)$$

f és la freqüència
 ϕ_δ és el flux en l'entreferro
 Z el nombre total de conductors de la màquina
 ξ el factor de bobinat
 m el nombre de fases

El pas polar, serà:

$$\tau_\delta = \frac{\pi \cdot D}{2p}$$

D és el diàmetre del induït
 p el nombre de parells de pols de la màquina

Tot plegat dona lloc a l'expressió [01]:

$$E_f = \frac{1}{22,5} \frac{f}{100} n_{pf} (\xi \cdot Z_n) (DL) B_\delta$$

f = freqüència
 n_{pf} = número de ranures per pol i per fase. En els prototipus Prat, normalment $n_{pf}=1$, llevat d'alguns casos particulars on $n_{pf}=0,5$
 ξ = factor de bobinat. Cal tenir en compte que en passos polars curts no arriba al rotor tot el camp magnètic. Sobretot quan el pas s'acosta a la mida del entreferro. L'alumini reflexa una part del camp magnètic, que no arriba a penetrar el rotor.
 D = diàmetre del induït en cm.
 Z_n = Número de conductors per ranura. $Z_n=1$ en tots els prototipus Prat (excepte Prat-1, que no té ranures)
 L = llargada del induït en cm
 B_δ = inducció màxima en l'entreferro en T
 ε = Factor d'emplenat (màquines alimentades per corrent)

Hom proposa que per el cas de màquines alimentades per corrent s'afegeixi un factor d'emplenat (ε), doncs les seccions de Cu no condueixen per igual -davant del corrent altern recordeu efectes de proximitat, pelicular, i de concentració del corrent-. En funció de la forma hi ha caigudes de tensió diferencials, sobretot en el cas de corrents fortes. En aquest cas l'expressió proposada per la f.e.m. queda:

$$E_f = \frac{1}{22,5} \frac{f}{100} n_{pf} (\xi \cdot Z_n) (DL) B_\delta \cdot \varepsilon$$

Una vegada definida la forma del prototipus, i fixats f, Z_n , n_{pf} , ξ resulta que la f.e.m. dels generadors (tensió en bornes dels motors), només es funció del diàmetre, llargada, inducció i freqüència.

El pas polar curt no ens afecta en el càlcul de la tensió en bornes, donades les hipòtesis dels nostres prototipus

Potència aparent en bornes

Un altre paràmetre important és la potència aparent en bornes en funció de les dimensions principals de la màquina:

$$P_b = m \cdot U_f \cdot I_f = \frac{f}{4.5} (\xi \cdot A_{Cu}) \left(\frac{D \cdot L}{p} \right) (B_{\delta o} \cdot J)$$

J = densitat de corrent
que també es pot escriure:

$$P_b = 0,07 \left(\frac{f}{100} \right) \left(\frac{D^2 L}{p} \right) (\xi \cdot q) B_{\delta o}$$

q és un paràmetre que s'anomena càrrega lineal específica, i ve donada per:

$$q = \frac{Z \cdot I}{\pi \cdot D}$$

Z = nombre total de conductors de la màquina

I = corrent per cada conductor

D = diàmetre del induït

Veiem que el nombre de parells de pols es troba en el denominador (disminueix la potència), però com que al augmentar els parells de pols augmenta el nombre de conductors, i per la construcció d'aquestes màquines augmenta també el diàmetre (de fet la inducció i la càrrega lineal específica es mantindran al augmentar els conductors, si sabem conservar el corrent per cada conductor), resultarà que a la pràctica *en aquest tipus de màquina la potència es veurà incrementada al augmentar el nombre de parells de pols*.

La potència s'incrementaria linealment amb el nombre de pols. En efecte: Al augmentar p i només per raons geomètriques s'incrementa el diàmetre (amb l'hipòtesi -és clar- de no tocar cap altra constant). El diàmetre que s'incrementa linealment és troba en el numerador elevat al quadrat, i p que també s'incrementa linealment és troba en el denominador.

Parell Fictici

El parell fictici M_b es defineix a partir de la potència aparent en bornes de la màquina, i de la velocitat de rotació del camp o velocitat sincrònica, serà:

$$M_b = \frac{1000 \cdot P_b}{\left(\frac{60 \cdot f}{p} \right)}$$

$$M_b = 1,165 \cdot \xi \cdot V_{mq} \left(\frac{q}{100} \cdot B_{\delta} \right)$$

Per tant el parell es veu afectat per les dimensions (volum) de la màquina

Interessa anar a un nombre de parells de pols elevat. Obtindrem una màquina magnèticament més ben acoblada

Això té un límit constructiu: és el límit mecànic; només podrem posar els conductors que geomètricament hi poguem encabir, refrigerar i muntar. L'únic límit per el pas polar en les màquines alimentades a grans corrents ve donat per les exigències del muntatge.

Relació entre freqüència i pas polar

Pas polar curt vol dir augmentar el nombre de pols (i el nombre de parells de pols). Vol dir que fa falta més freqüència si hom vol girar a una velocitat predeterminada. La relació entre pas polar i freqüència és coneguda:

$$f \cdot \tau_{\delta} = \frac{\pi \cdot D \cdot N}{120}$$

essent f = freqüència en Hz.
 τ_{δ} = pas polar, mesurat en mateixes unitats que el diàmetre
 D = diàmetre, pres en la mateixa corona que el pas polar
 N = velocitat de gir de la màquina en r.p.m.

A l'expressió anterior s'hi arriba a partir de la definició de pas polar $\tau_{\delta} = \frac{\pi \cdot D}{2p}$ i tenint

en compta el valor de la velocitat sincrònica $N = \frac{60 \cdot f}{p}$ Si per un prototipus determinat

introduïm una constant $K = \frac{\pi \cdot D}{120}$, es veu que la velocitat de rotació de la màquina és directament proporcional al producte de la freqüència per el pas polar:

$$f \cdot \tau_{\delta} = K \cdot N$$

4.6- CIRCUITS MAGNÈTICS AMB IMANTS PERMANENTS

Els prototipus Prat han acabat construint-se prescindint de la tecnologia dels imants. Val a dir que un imant permanent subministra força magnetomotriu igual que ho fa una bobina alimentada en corrent continu. Tot i no haver-los fet servir, sí que com a criteri de disseny es creu oportú parlar-ne.

Un imant permanent és un material que conserva un magnetisme residual o remanent. També se'ls coneix amb el nom de materials magnètics durs. Així hi tot es distingeix també entre imants permanents tous (que presenten un colze en l'anomenada corba de desmagnetització), i imants permanents durs (que presenten una característica de desmagnetització més aviat linealitzable). De fet un imant permanent s'assembla a un material que sotmès a histèrissi, el seu cicle té una superfície molt gran comparat amb un material ferromagnètic qualsevol.

Els materials més utilitzats són: *Alnicos*
Ferrites dures
Cobalt-Terres rares
Neodimi-ferro-boro

En els materials magnètics tous interessa la corba d'inducció. En els imants interessa la corba de desmagnetització. Un imant permanent treballa en el tercer quadrant. Quan la corba de desmagnetització és linealitzable, es pot modelitzar mitjançant equació:

$$B = B_r + \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$$

i el punt de treball del imant es pot trobar analíticament per intercepció de la corba de desmagnetització amb la recta de càrrega del circuit magnètic. En el cas ideal on no hi ha flux de dispersió, no hi ha entreferros paràsits, i la μ_{Fe} del ferro és molt gran (considerem $\Lambda_{Fe} = \infty$) si partim de la llei d'Ampèr, s'arriba a l'expressió de la recta de càrrega:

$$\frac{B_m}{H_m} = \Lambda_g \cdot \frac{l_m}{S_m}$$

si definim una nova permeància: $\Lambda'_g = \Lambda_g \cdot \frac{l_m}{S_m}$ que és la permeància del entreferro corregida per les

dimensions del imant, la recta de càrrega es pot escriure: $B_m = H_m \cdot \Lambda'_g$

En aquest cas, el punt de treball:

$$B_g = \frac{B_r}{\frac{S_g}{S_m} + \mu_r \cdot \frac{g}{l_m}}$$

essent B_g la inducció en l'entreferro
 B_r la inducció remanent de l'imant
 S_g la secció recta del entreferro
 S_m la secció recta del imant
 μ_r permeabilitat relativa del aire
 g llargada del entreferro
 l_m trajectòria magnètica en l'imant

En el cas en que la corba de desmagnetització presenti un colze, els càlculs no son tant senzills, i s'ha de construir la recta de càrrega al damunt del gràfic que conté la característica de desmagnetització del imant. Les gràfiques les proporcionen els fabricants dels imants.

Un detall molt a tenir en compte quan es dissenyen màquines que porten associada la tecnologia dels imants permanents, és l'anomenat *criteri d'Eversed*.

Per introduir aquest criteri es parteix de l'equació de continuïtat del flux:

$$\phi = B_m \cdot S_m = B_g \cdot S_g$$

on B és inducció i S secció recta; els subíndex volen dir imant (m de magnet) i entreferro (g de gap), respectivament. També partim de la llei d'Ampèr, que amb les hipòtesis introduïdes més amunt i en aquest cas, s'expressa com:

$$H_m \cdot l_m = - H_g \cdot g$$

si les dues últimes les multipliquem terme a terme, resulta que:

$$B_m \cdot S_m \cdot H_m \cdot l_m = - B_g \cdot S_g \cdot H_g \cdot g$$

introduint els volums del imant i del entreferro, queda:

$$B_m \cdot H_m \cdot (\text{vol})_{\text{magnet}} = - B_g \cdot H_g \cdot (\text{vol})_{\text{air gap}}$$

i, finalment:

$$(\text{volum})_{\text{magnet}} = - \frac{B_b^2}{\mu_0 \cdot (B_m \cdot H_m)} \cdot (\text{volum})_{\text{entreferro}}$$

Criteris de disseny amb imants permanents

El producte $(B_m \cdot H_m)$ s'anomena producte energètic i es defineix per valors de B i de H en el tercer quadrant. Si volem que el volum del imant sigui mínim, el producte energètic ha de ser màxim. Aquesta afirmació és un criteri de disseny conegut amb el nom de criteri d'Eversed, i que es dedueix de la darrera expressió. Tota la consideració de corba de desmagnetització ens fa palesa una actitud important a l'hora de treballar amb imants, i es que en el muntatge de la màquina, l'imant mai pot quedar en circuit obert (sempre ha de tenir un camí magnètic per el flux, que tingui una reluctància molt petita; caldrà tenir-li un embolcall de ferro), i si no ho féssim correm el risc d'una desmagnetització.

Quan es treballa amb imants, pot interessar una representació esquemàtica del circuit magnètic mitjançant reluctàncies i forces magnetomotrius. L'imant permanent vindrà modelitzat per una font de f.m.m. en sèrie amb una reluctància (esquema de Thèvenin del imant), o bé per una font de flux en paral·lel amb una permeància (esquema de Norton del imant)

5- PROTOTIPUS O EXPERIMENTS PREVIS

5.1- INTRODUCCIÓ

Els prototipus o experiments previs son quatre, a saber:

Prat-1 familiarment **Màquina de canyeria**

Prat-2 (màquina de sector d'estàtor o Prat-2.1). Aquest prototipus disposa d'una segona versió pneumàtica que és (el projecte de) la màquina de vuitanta conductors o Prat-2.0.

Prat-3. Màquina d'arrencada per reluctància

Prat-4. Màquina d'estany colat

Les conclusions que s'han tret en el disseny, construcció i assaig d'aquests prototipus previs, juntament amb els criteris teòrics exposats en el capítol 4 -*Criteris de disseny*-, han permès calcular, construir i assajar amb èxit la Màquina de doble inductor o prototipus Prat-5 (veure capítols 7 al 11). El lector pot comprovar com en el capítol 7 en el disseny de la màquina de doble inductor hom es serveix d'aquests primers resultats.

5.2- PROTOTIPUS PRAT-1. LA MÀQUINA DE CANYERIA

Disseny del prototipus Prat-1

És la màquina elèctrica alimentada en trifàsic més senzilla que hi pot haver. Aquesta és una màquina que ha estat possible alimentant en corrent forta i tensió petita, perquè ha permès aconseguir els ampers-volta de la intensitat de camp magnètic, amb una única espira.

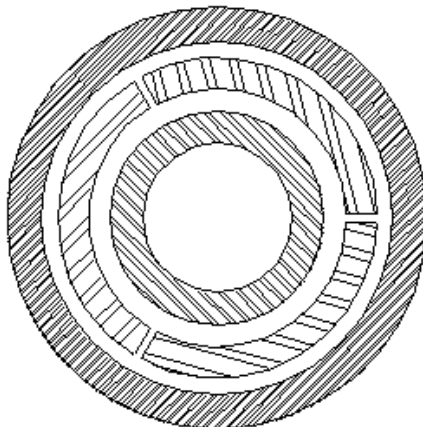
Constructivament consta de:

Tub de coure de $\varnothing 10 \times \varnothing 7 \times 215$ mm llarg; es el tub més interior

Tub de coure de $\varnothing 14 \times \varnothing 12 \times 155$ mm llarg; amb tres talls de llarg 100 mm i ampla 1 mm. Cada un d'aquests tres talls és una fase, i el punt on es tornen a ajuntar és l'estrella del neutre.

Cada un d'aquests talls disposa d'un terminal per on es connecta al transformador.

Tub de ferro de $\varnothing 20 \times \varnothing 17 \times 185$ mm de llarg. Aquest tub fa de suport i serveix per a disminuir a reluctància de la màquina.

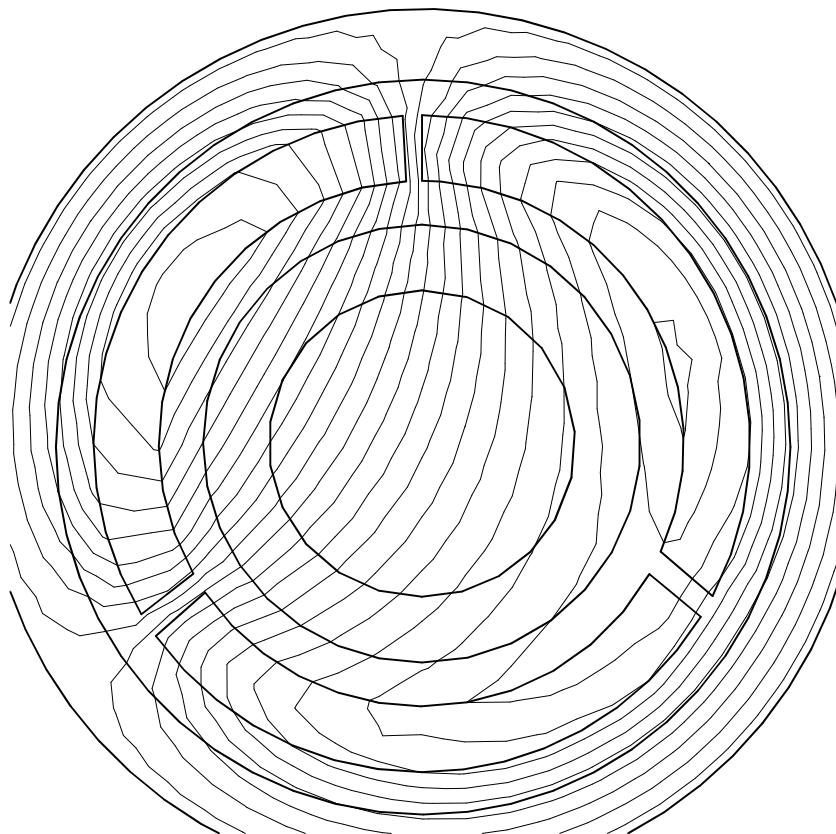


El motor de canyeria és, en certa manera, **una pura capa de corrent**. Es un dels prototipus que giren més bé. El motor de canyeria no té ranures. L'absència de ranures pot explicar aquest bon comportament.



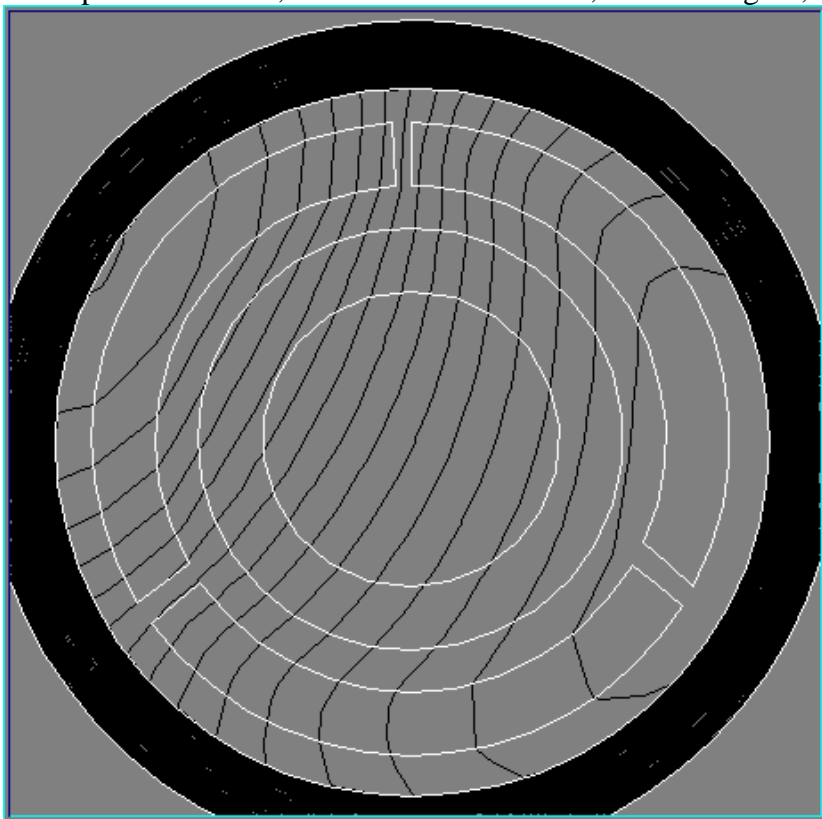
Simulació del camp magnètic del motor de canyeria

La simulació s'ha portat a terme fent servir el programa informàtic d'elements finits *Qfields*, tal i com s'indica en l'apartat 4.1. Primerament s'ha simulat el camp magnètic sense tenir en compta la presència de ferro a l'exterior, i ha resultat:



Es visualitzen les línies de camp magnètic repartides d'una manera uniforme; de fet també hi ha línies de camp més enllà dels límits de la figura, però el model d'elements finits que s'ha fet servir no ho contempla. La figura anterior ha estat modelada considerant que la capa externa que fa de suport és d'un material no-ferromagnètic, i per això no hi ha concentració de línies de camp en cap zona. **Tot el model és, en aquest cas, no-ferromagnètic.**

S'ha repetit la simulació tot posant en la capa més externa la permeabilitat corresponent al Ferro, com ho és en la realitat, i la nova figura, és la següent:



Encara que en la zona interior s'hi vegin menys línies de camp que en el cas anterior, això és perquè s'ha fet un canvi d'escala. El lector pot observar que la part corresponent al material ferromagnètic apareix totalment ple de línies de força com a conseqüència del canvi d'escala esmentat.

Tractant-se de corrent altern, el mapa de línies de força que s'ha imprès correspon a un instant determinat. En el disseny s'han visualitzat altres punts de la seqüència, que no s'ha cregut incloure, per reiteratiu.



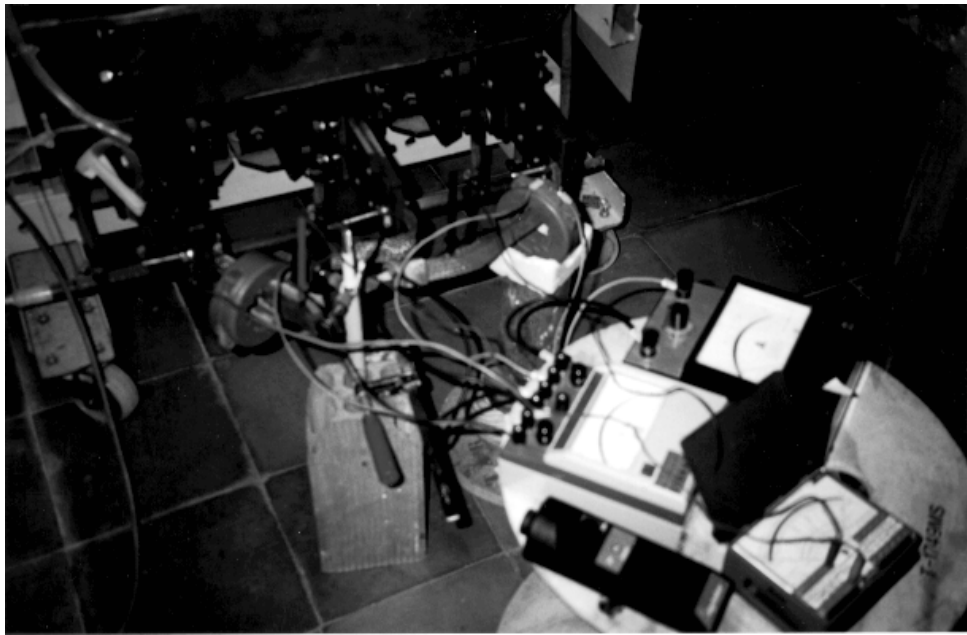
Assaig del motor de canyeria

Al començar qualsevol assaig en màquines alimentades per corrent, cal tenir ben present que:

1er.- Es de gran importància que inclús la línia d'alimentació, per curta que sigui, tingui una simetria total.

2on.- Donada la magnitud dels corrents (i dels seus camps magnètics associats), caldrà posar tots els aparells de mesura adequadament, per tal d'evitar distorsions en les lectures.

Hem alimentat la màquina directament amb el transformador de laboratori (T.S.), que subministra els ampers necessaris per fer girar la màquina.



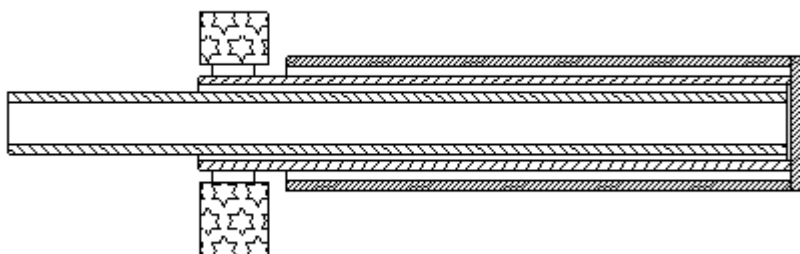
Primera prova : Sense refrigeració
 Corrent de Línia fase R: 800 A
 Corrent de Línia fase S: 1100 A
 Corrent de Línia fase T: 1000 A
 Velocitat : 0 min⁻¹ -la màquina no es mou-

Segona prova: Sense refrigeració
 S'han equilibrat les impedàncies
 S'ha treballat en règim adiabàtic (durant 10 segons)
 Les lectures han estat les següents:

Intensitat [A]	Tensió (entre fases) [V]	velocitat [min^{-1}]
800	0,6	0
1000	0,68	comença a moure's
1200	0,8	194,8
3600	3	686,8

Hem aturat l'assaig al cap de 10 segons de treballar a 3600 A 3 V perquè sortia fum. Havíem arribat a la temperatura a la que s'encén el paper (el paper que fa d'aïllament). Al voltant de 230 °C. Es la temperatura a la que els conductors havien arribat en aquest moment degut a les pèrdues per efecte Joule.

Hem de dir que en proves anteriors (de les que malauradament no en tenim constància escrita) aquest prototipus començava de girar a partir dels 300 A. Hom pensa que en el cas actual s'han incrementat els freqs mecànics com a conseqüència dels successius montatges i desmuntatges del prototipus a la font de corrent.



En la darrera prova s'observa una component de força axial, que supera el pes del rotor i el fa aixecar-se axialment.

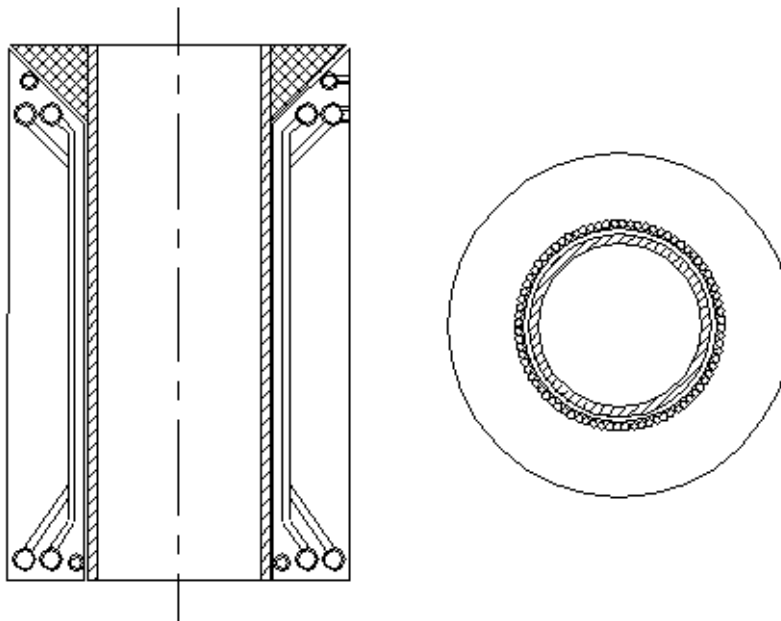
Conclusions

- 1- Per aconseguir la intensitat de camp magnètic adient a les necessitats de la màquina n'hi ha prou amb una sola espira si es disposa d'una font de corrent capaç de subministrar intensitats de l'ordre d'uns quants centenars d'ampers.
- 2- Un camp magnètic giratori sempre es capaç de posar en moviment un rotor conductor; l'única condició és que el rotor mecànicament es pugui moure i s'hi apliqui un parell motor superior al de fricció. Compta amb els rendiments.
- 3- El bon comportament del prototipus Prat-1, que es una màquina sense ranures porta a preveure la construcció de prototipus futurs amb aquesta tecnologia. Elèctricament s'eliminen els fluxos de dispersió de ranura i l'efecte de concentració d'intensitat que comporten
- 4- Apareix una força sustentant de tipus axial i en el sentit de rebutjar el rotor en direcció contrària al punt de centre d'estrella. És un fenòmen que s'ha d'estudiar més bé.

5.3- LA MÀQUINA DE SECTOR D'ESTÀTOR

Disseny de la màquina de sector d'estàtor. Vuitanta conductors

En un primer moment la màquina de sector d'estàtor, s'havia plantejat com una màquina d'estàtor complet. Seria una màquina de 80 conductors (Prat-2.0), i que les especificacions *calculades*, eren les següents:



ESPECIFICACIONS

- a) Alimentació: Sistema bifàsic. Dues tensions desfasades 90 °. Font de corrent
- b) Debanats: 80 Conductors.
8 grups en paral·lel de 10 conductors en sèrie cada grup.
- c) Geometria: Llargada 320 mm.
Diàmetres del estàtor: $\varnothing 155 \times \varnothing 82$
Diàmetres del rotor: $\varnothing 80 \times \varnothing 75$
- d) Rotor: Tub d'alumini (el mateix que s'ha fet servir per el prototipus de treball d'aquesta tesi)
- e) Estàtor: De material ferromagnètic, per tal de minimitzar la reluctància. Dintre seu hi portaria ubicats els conductes d'aire per fer el coixiní pneumàtic, i els conductors elèctrics que van refrigerats per aigua.
- f) Rodament: Coixinet pneumàtic (veure capítol-6 apartat-6.3)

Aquesta màquina que necessitava per a poder funcionar una font de corrent, una bomba d'aigua, i una instal·lació d'aire comprimit, es plantejava com una màquina bàsicament de coixinet pneumàtic, o, si voleu, com la contribució de la pneumàtica a les màquines sense coixinets. *D'aquest prototipus (Prat-2.0) com s'exposa en aquest apartat s'en va construir i assajar únicament la part pneumàtica.* Veure punt 6.3. Aquest prototipus tal com s'exposa en aquest apartat s'el coneix amb el nom de màquina de vuitanta conductors.

Disseny de la màquina de sector d'estàtor. Quatre conductors (Prat-2.1).

Previ a la construcció de la màquina de vuitanta conductors, i com un punt més d'aquest treball, es va fer un assaig considerant la porció més petita possible de la màquina. Com que es tracta d'un sistema bifàsic defassat 90° , es necessitaven un mínim de quatre conductors. El sistema pneumàtic seria diferent en aquest model o en el de vuitanta conductors (punt 5.3). Aquest prototipus s'ha muntat sobre un ferro L de 20x20, que a la vegada serveix de suport mecànic, i de camí magnètic per el flux.



El material utilitzat en la construcció d'aquest prototipus, és:

Àngul de ferro F-111 de 20x20x2 i llarg = 500 (llarg útil = 400)

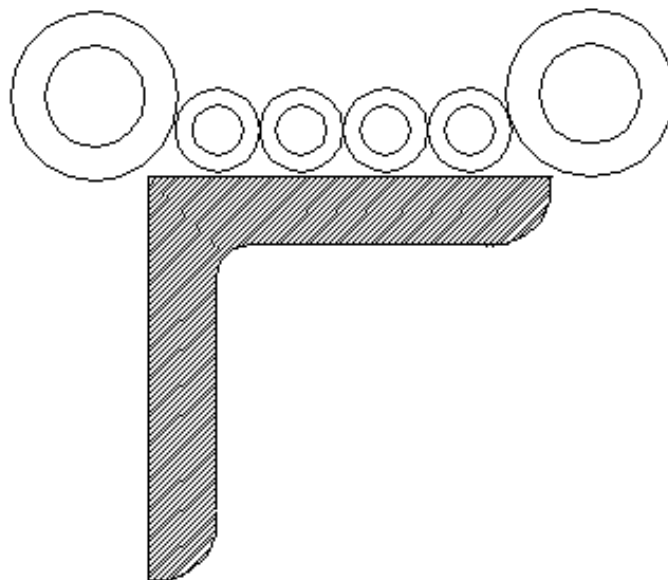
Tub de coure de $\varnothing 2,5 \times \varnothing 1,5$ Unitats = 4. Fa de conductor elèctric

Tub de coure de $\varnothing 6 \times \varnothing 4$. Unitats = 2. Fa de conducte pneumàtic

Suport de poliester armat amb fibra de vidre

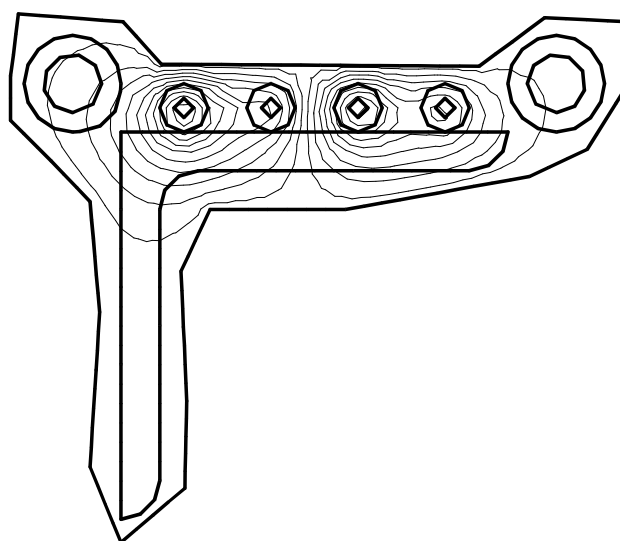
Trena de filàstica de Cu. (Secció 50 mm²) Unitats = 4. Fa de conductor elèctric màquina-trafo

Tub d'alumini de Ø80 x Ø75 x 400. Es el rotor giratori.

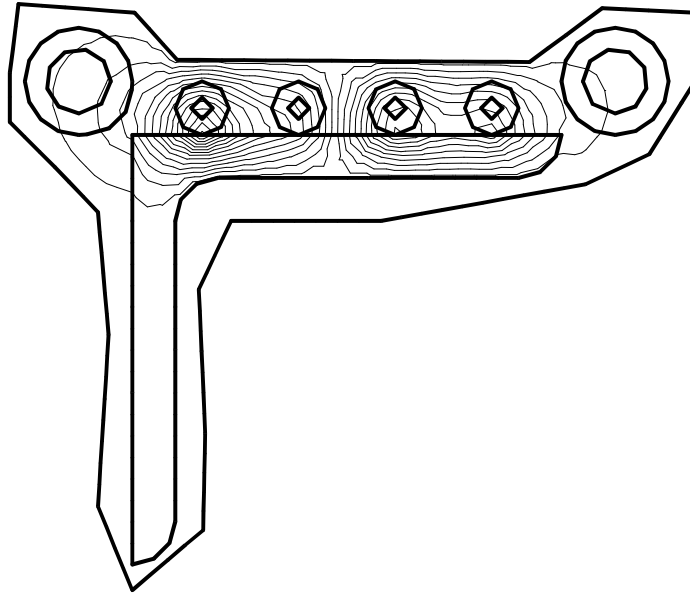


Per acabar d'ajustar el prototipus s'han fet diferents proves pneumàtiques. (veure capítol-6)

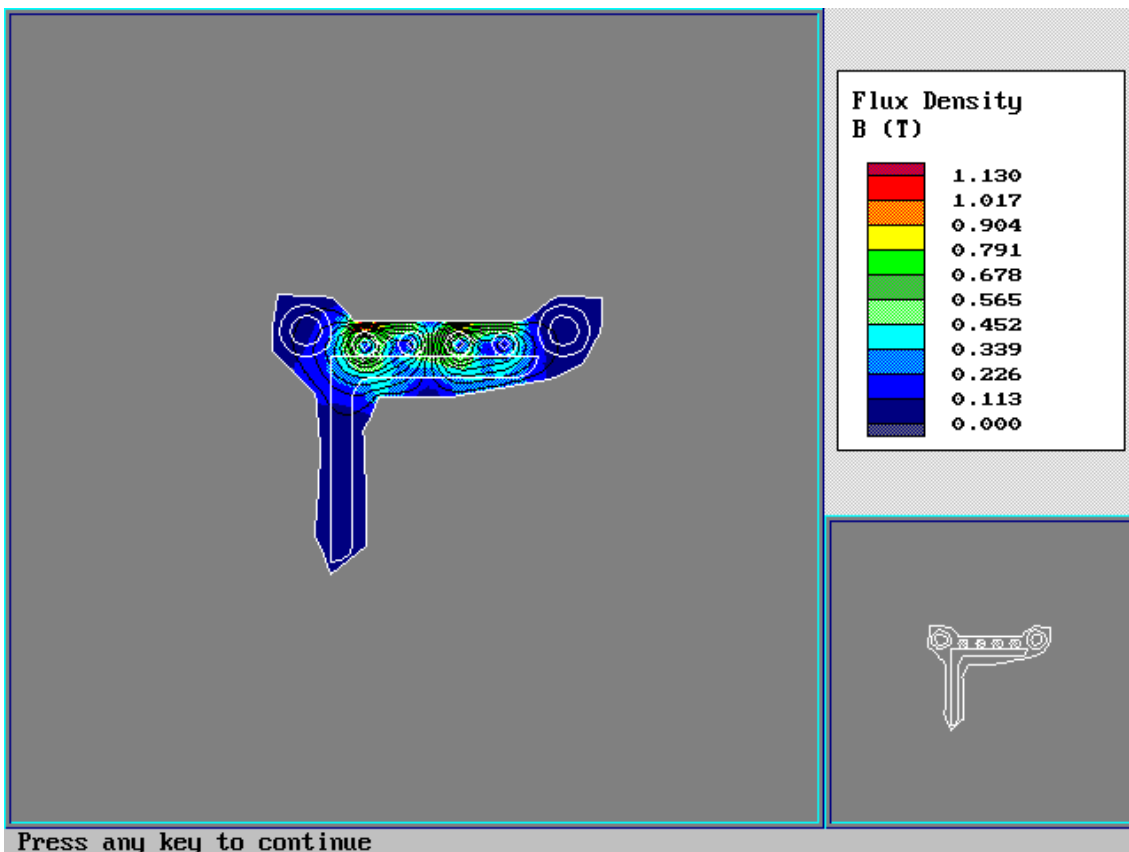
S'ha fet servir el programa d'elements finits Qfields. S'ha fet la simulació alimentant en corrent altern bifàsic (corrent de línia 500 A), i buscant el mapa de línies de camp per un valor instantani. S'ha fet una primera simulació considerant que el suport és d'un material **no-ferromagnètic**. L'aspecte de les línies de camp és el següent:



S'ha repetit la simulació considerant el suport de **material ferromagnètic**, i les línies de camp en aquest cas, tenen el següent aspecte:



També s'ha visualitzat el valor del camp en diferents punts:



Assaig elèctric en la màquina de sector d'estàtor.

Per portar-lo a terme s'ha muntat el prototipus al costat del transformador que fa de font de corrent. Teníem a mà una sortida d'aire a pressió i disposàvem d'una bomba d'aigua per alimentar el circuit hidràulic de refrigeració.

Condicions de l'assaig

Sistema d'alimentació elèctric: Bifàsic. Tensions desfasades 120°

Corrent de línia: 500 A

Tensió de línia: 2 V

Velocitat angular del tub: 91,8 min⁻¹ en règim permanent

Cabal d'aigua de refrigeració: 0,75 l/min

Temperatura de l'aigua a l'entrada del circuit de refrigeració: 24 ° C

Temperatura de l'aigua a la sortida: 42° C

Sistema d'alimentació pneumàtica: 4 entrades

Pressió de l'aire del circuit pneumàtic: 1 kg/cm²

Càlcul del lliscament

S'ha treballat a una freqüència de 50 Hz que representa una velocitat de sincronisme de 150 min⁻¹ donat el pas polar d'aquesta màquina. Experimentalment s'ha obtingut una velocitat de 91,8 min⁻¹, per tant el lliscament, resulta:

$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{150 - 91,8}{150} = 0,388 = 38,8\%$$



No s'han pogut assolir lliscaments més baixos degut al sistema de suspensió pneumàtica: L'aparició de l'efecte Magnus en l'aire al voltant del rotor, afegit a l'efecte

sustentant dels corrents elèctrics en joc, (cal distingir entre sustentació electromagnètica, i levitació. Levitació implica estabilitat) feia saltar el rotor del seu lloc, impedit tota mesura a partir del corrent citat.

Especificacions de la màquina de sector d'estàtor

- a) Alimentació: Sistema bifàsic
Font de corrent
- b) Debanats: 4 conductors
- c) Alimentació pneumàtic: Aire a 1 kg/cm^2
- d) Refrigeració: Aigua en circulació forçada
- e) Estàtor: Sector de 20° . Radi 41 mm
Construcció material no-ferromagnètic (poliester)
- f) Rotor: Tub d'alumini. $\varnothing 80 \times \varnothing 75 \times$ llarg 400
- g) Rodaments: Suspès per coixí d'aire
Coixinet pneumàtic
- h) Placa de Característiques: Tensió 2 V
Corrent: 500 A
velocitat: $91,5 \text{ min}^{-1}$
lliscament: 38,8 %
- i) Pas polar en l'entreferro: 3,16 mm

Conclusions

- 1- Els resultats obtinguts amb la màquina de 4 conductors, son extrapolables a la màquina de 80 conductors, que per tant, no es construeix.
- 2- El valor del lliscament no es acceptable per aplicacions industrials.
- 3- El funcionament del coixí pneumàtic ha estat correcte.
- 4- Hem aconseguit fer voltar per mitjans electromagnètics, un tub de material conductor suspès a l'aire.
- 5- Es una màquina sense ferro en el rotor.
- 6- Fer notar que necessita tres tipus d'alimentació:
 - a) Alimentació elèctrica per font de corrent
 - b) Alimentació pneumàtica (compressor, conduccions,.....)
 - c) Circuit hidràulic (bomba d'aigua)
- 7- En nous prototipus no hi poden haver-hi tantes alimentacions diferents, i es proposa:
 - a) Suprimir l'alimentació pneumàtica.
 - b) Alimentar directament en font de tensió, dintre lo possible. En aquest cas, tot i que la màquina seguirà funcionant per el sistema de font de corrent, l'etapa de transformació aniria integrada en el mateix prototipus.
 - c) Mantenir el circuit hidràulic; arribat el cas seria fàcil integrar-lo en el mateix prototipus, per lo que no preocupa. A més a més el circuit hidràulic esdevindria gairebé imprescindible si es volgués fer servir algun d'aquests prototipus per fer assaigs amb la tecnologia dels superconductors.

5.4- LA MÀQUINA D'ARRENCADA PER RELUCTÀNCIA (PRAT-3.0)

En aquest prototipus de màquina monofàsica s'ha fet el disseny de manera que la forma de les ranures tingui una asimetria des del punt de vista de circuit magnètic. Es per aconseguir l'arrencada de la màquina. La reluctància del circuit magnètic d'un dels dos camps giratoris que formen el camp polsant, és diferent respecte de l'altre. Amb un dels dos aconseguirem més força d'empenta que amb l'altre, i arrencarem.

S'ha fet una màquina d'estàtor complet, a diferència de la màquina de sector d'estàtor que solsament en considerava una part.

S'han posat pocs conductors per tal de poder-los alimentar tots en paral·lel si fes falta. Com que el pas polar ha de ser curt (a efectes d'un bon acoblament magnètic), el diàmetre de la màquina es petit i surt un prototipus molt manejable. Un prototipus petit, a més és un assaig a escala reduïda i permet estalviar material i temps.

Les dimensions finals es decideixen en funció del tamany de mostra superconductor que ens poden subministrar. Es possible que en etapes més avançades interressi substituir el rotor conductor per un rotor superconductor.

S'ha definit una alimentació en monofàsic per simplicitat a l'hora d'utilitzar les fonts i per provar el nou sistema d'arrencada. Es construeix la màquina de manera que permeti alimentar en bifàsic, si fes falta.

La refrigeració serà per aigua a pressió, i en aquest cas no s'ha previst circuit pneumàtic, ja que el rotor es suporta amb un pivot mecànic

Disseny de la màquina d'arrencada per reluctància

DADES DE PARTIDA

1- Rotor de $\varnothing 25$ mm

2- **Debanat Bifàsic:** Malgrat no disposar en aquest moment de fonts bifàsiques, fem un disseny en bifàsic en comptes de trifàsic per a simplificar el debanat i així poder treballar a més freqüència, ja que ocupen menys arc polar 4 conductors que 6. Aquest debanat també podrà treballar en monofàsic.

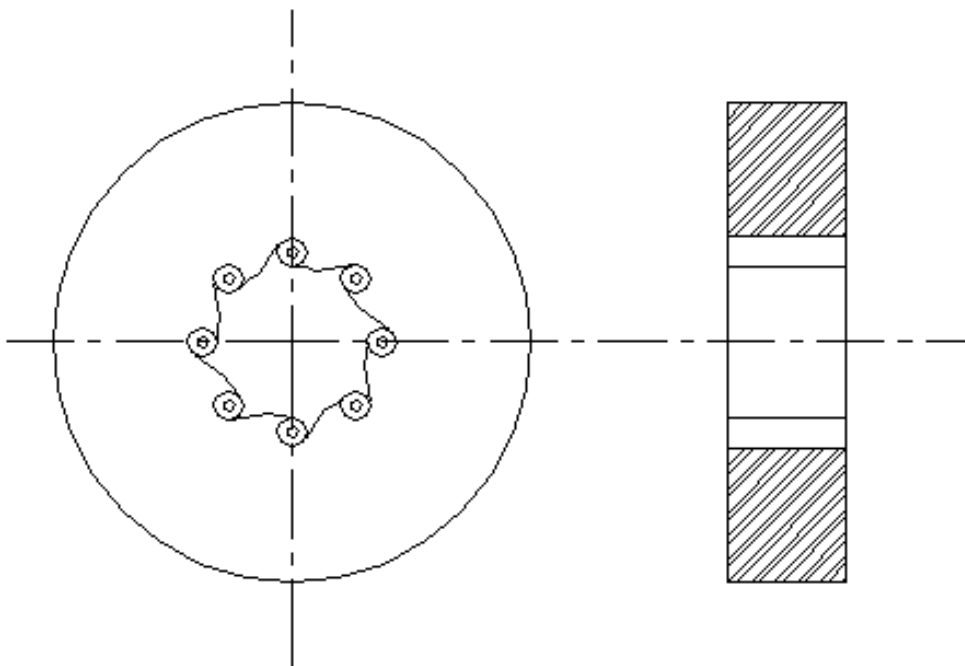
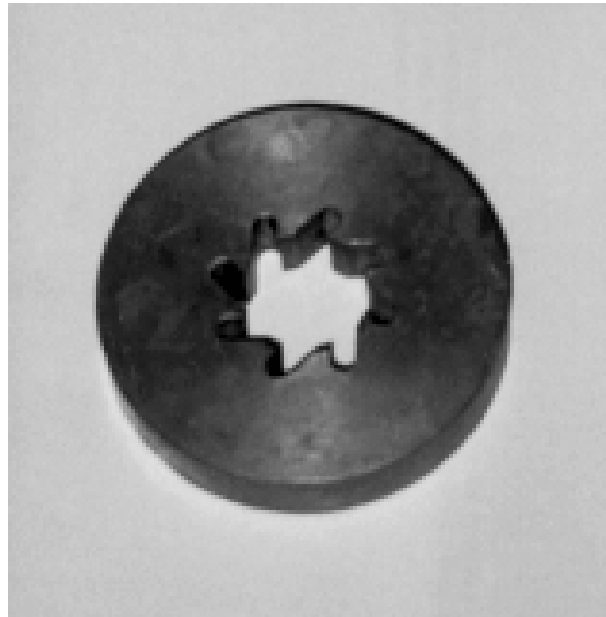
3- **Ranures asimètriques:** Per aconseguir una arrencada per reluctància (treball en monofàsic), es tracta de provocar una asimetria magnètica similar a la que s'aconsegueix instal·lant espines d'ombra, que desfasen el valor de la inducció en una part del pol on s'instal·len. En aquest cas el que es fa es variar l'entreferro al llarg de la peça polar. El flux s'inicia en la zona d'entreferro petit, i a mida que el corrent augmenta, el flux va ocupant tot el pol i es centra. Així s'aconsegueix un sentit de gir que es el que pot provocar l'arrencada del motor, perquè a velocitats de règim permanent els motors giren bé en monofàsic, sols hi ha la indeterminació de l'arrencada.

4- Estàtor de **ferro massís** (F-111): Encara que el ferro massís provoca pèrdues per histèrisi i per corrents de Foucauld en el nucli, i més si es treballa a altes freqüències, al

tractar-se d'un graó en la recerca, sempre es poden fer els assaigs en règim adiabàtic. El cost de mecanitzat en xapes es força més elevat que en ferro massís, i els resultats experimentals son extrapolables.

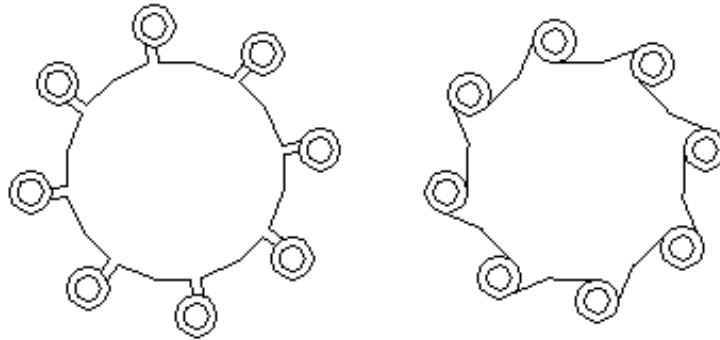
FORMA DE LA RANURA

L'asimetria que necessitem es en base a tancar la meitat de la ranura amb la mateixa peça polar; El conductor quedarà centrat en una ranura descoberta en un dels dos sentits, i tant tapada com constructivament es pugui per l'altre.



Hi havia varies possibilitats; gràficament n'hem analitzat dues:

- 1- Ubicar els conductors en una ranura profunda, deixant entre conductor i entreferro una separació de 1 mm. El conductor queda centrat entre la part oberta i al part tancada.
- 2- Ubicar el conductor prop de l'entreferro; la ranura està tancada per una de les bandes i oberta per l'altre.



La màquina ha estat construïda seguint aquest segon criteri

NOMBRE DE CONDUCTORS

Per la construcció d'aquesta família de prototipus, tenim dues mides de tub conductor normalitzat. En tots els casos es tracta d'un tub que permet unificar el circuit hidràulic i el circuit elèctric. Les mides son:

$$\begin{aligned} & \text{Ø}2,5 \times \text{Ø}1,5 \\ & \text{Ø}3 \times \text{Ø}5 \end{aligned}$$

En el cas d'aquesta màquina prenem la mida gran perquè permet més refrigeració. (recordar que el nucli s'ha dissenyat de ferro massís).

El diàmetre de la circumferència que conté els eixos dels conductors, és de:

$$25 + 2,5 + 1 \times 2 = 32 \text{ mm}$$

Si a efectes del circuit magnètic, deixem una distància mínima entre conductors igual a un diàmetre, el nombre màxim de conductors que hi podem encabir, resulta ser de:

$$N = \frac{32\pi}{5 \times 2} = 10,053$$

Volem que sigui múltiple de 4 per tal de facilitar les connexions en bifàsic, i per tant hauran de ser 8 conductors. Fer notar que encara que en el connexionat posterior s'hagués pogut acceptar que el nombre de conductors fóra múltiple de 2, aquí s'ha agafat un criteri molt més ampli, perquè el nombre de conductors d'aquesta màquina ha de coincidir amb el nombre de ranures, i aquesta dada es fa servir per el disseny del nucli del estàtor de la màquina.

El pas polar en l'entreferro, resulta ser:

$$\tau_{\delta} = \frac{26\pi}{8} = 10,21 \quad \text{mm}$$

AÏLLAMENT

Les tensions son petites i amb poc dielèctric n'hi ha prou:

- a) Aïllament en els conductors: Fibra de vidre. Gruix 0,5 mm.
 b) Aïllament en el nucli: Pintat amb cola de silicats.

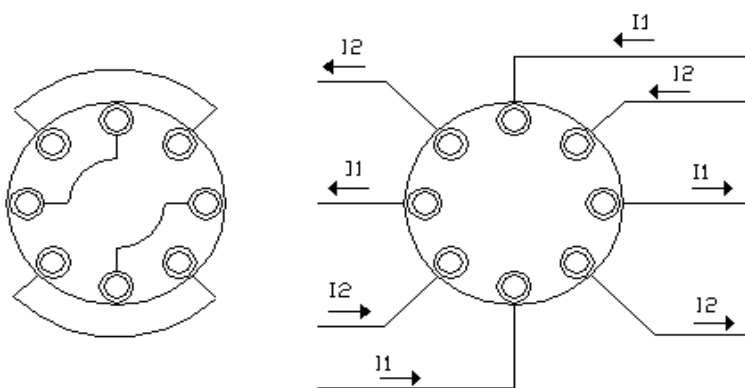
Hom sabia que l'aïllament de fibra de vidre en els conductors donava bons resultats, perquè s'havia fet servir en altres prototipus. En quan al nucli hem començat per fer proves: s'ha pintat amb **cola de silicats** tres tires de paper, dues tires de fibra de vidre, i una petita peça de ferro. Ho hem deixat reposar a l'aire durant una setmana; els silicats han quedat petrificats i la rigidesa dielèctrica ha estat satisfactòria. De totes maneres, en la peça metàl·lica quan hom connectava el téster, no s'apreciava continuïtat, llevat de si la pressió exercida amb les puntes de prova de l'aparell era considerable; en aquest darrer cas, es trencava la pel·lícula aïllant i el téster donava continuïtat (en aquell punt havia desaparegut el dielèctric).

Hem tornat a realitzar la prova de pintat amb cola de silicats per el nucli ferromagnètic: s'ha donat una primera capa; l'hem fet assecar al forn; s'ha donat una segona capa; l'hem tornat a fer assecar al forn. S'ha fet l'assaig de continuïtat, i ha donat satisfactori -no hi ha continuïtat-.

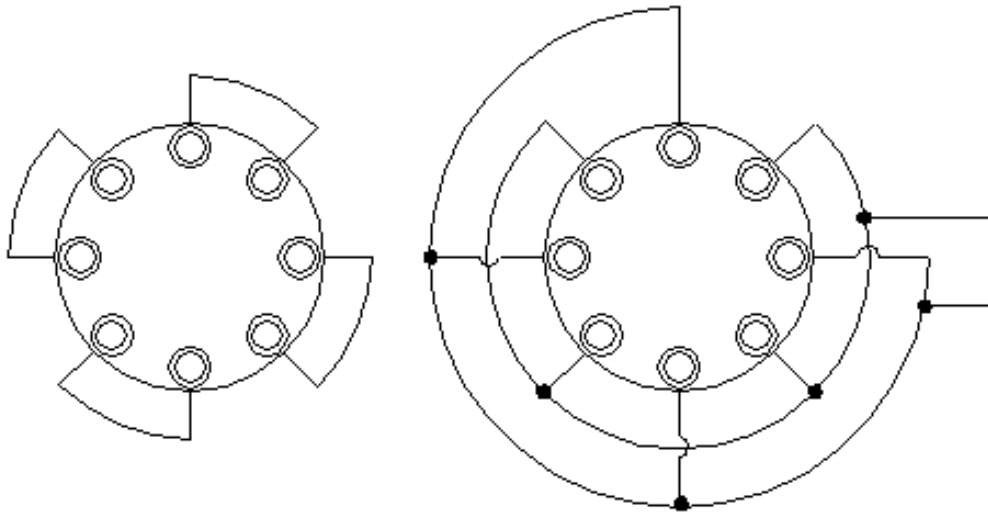
CONNEXIONS ELÈCTRIQUES

Primerament es fa un estudi d'algunes de les possibilitats de connexió que ofereix el prototipus, després es decideix quin ha de ser el connexionat fix en el model que s'ha construït, per tal de permetre una més gran versatilitat. Les connexions que s'han analitzat son: bifàsic tradicional, monofàsic, bifàsic experimental (aquesta última és un bifàsic que té absolutament tots els conductors en paral·lel, i que en aquest cas ens ha facilitat la construcció del prototipus, com també els assaigs, perquè permet adequarlo al tipus de fonts de que es disposa). Vegem l'esquema de cada una d'elles:

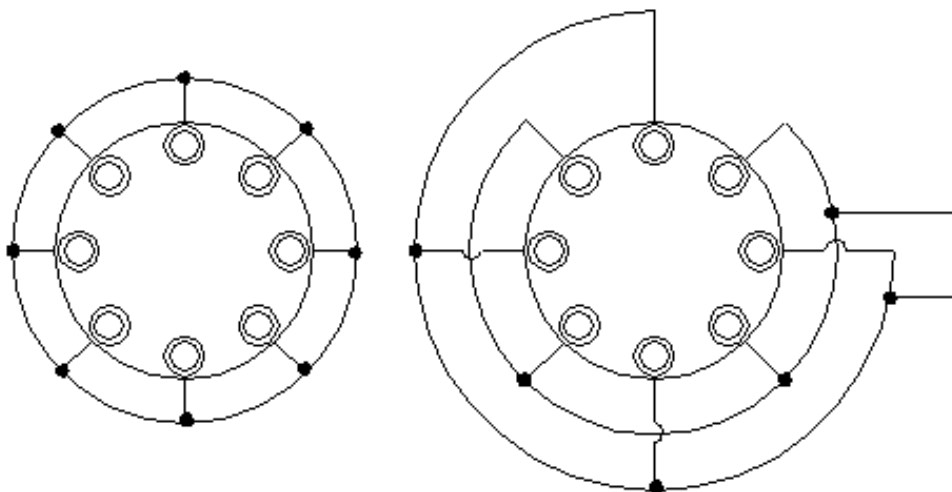
Connexió bifàsica tradicional: (Prat-3.2)



Connexió monofàsica: (Prat-3.0)



Connexió bifàsica paral·lel:(Prat-3.1)



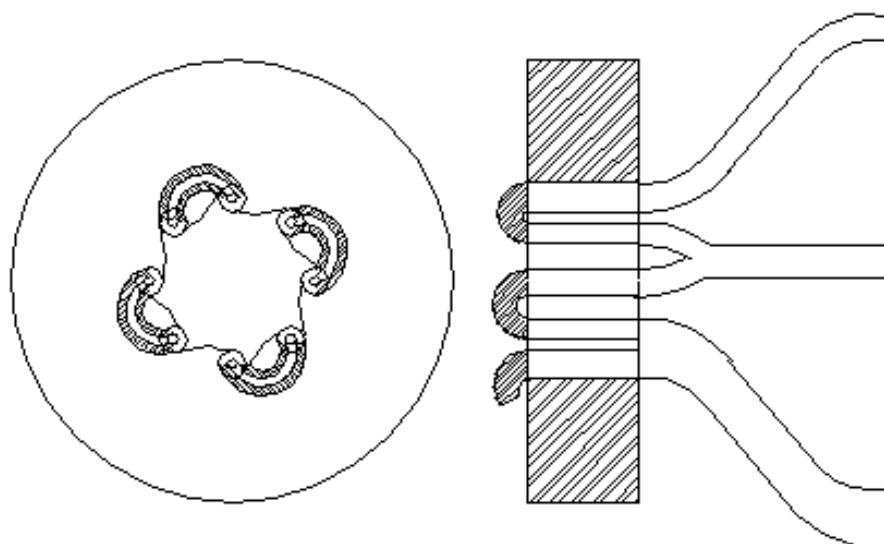
S'observa que en les connexions *monofàsica* i *bifàsica paral·lel*, una part del connexionat no varia, i per tant els conductors es connectaran segons aquesta topologia per ser la que fa el prototipus més versàtil i susceptible d'emprar-se per a levitació, ja que els conductors estan en paral·lel i poden reaccionar amb la distribució de corrents als canvis de posició del rotor.

La connexió monofàsica no necessita més aclariments. La connexió bifàsica paral·lel, disposa d'un punt neutre, on hi va connectat el retorn de cada fase, que d'aquesta manera té un potencial de referència comú. Els altres dos punts són l'entrada de cada fase. Finalment en la construcció física del prototipus hem vist que les

connexions seguint el darrer esquema li donaven més solidesa mecànica al conjunt. S'ha considerat que unir tots els conductors com mostra el darrer esquema equival a posar un punt estrella, i s'accepta com a vàlid. Encara que la connexió de la màquina sigui la que aquí s'anomena *bifàsic paral·lel*, permet treballar en monofàsic quan a les fases s'hi connecta entrada i sortida monofàsiques, i no es fa servir el punt neutre. Permet treballar en bifàsic quan el punt neutre es pren com a potencial comú a les dues fases sortints del bifàsic, i com a tal es connecta al generador.

CIRCUIT HIDRÀULIC DE REFRIGERACIÓ

Els mateixos conductors elèctrics condueixen aigua de refrigeració. Permet treure l'escalfor on realment es produeix, que es en les pèrdues per efecte Joule en els conductors. També permet extreure fàcilment l'escalfor que els corrents paràsits poden provocar en el nucli. Elèctricament no preocupa no poder disposar del centre del conductor. Recordeu que en corrent alterna té lloc l'efecte pel·licular, i més encara si les freqüències de treball començaven de ser importants. El circuit hidràulic va lligat al circuit elèctric i al tipus de debanat que s'ha elegit. L'esquema final per aquest circuit hidràulic, és el següent:



La vista en planta ens mostra les connexions hidràuliques en la part superior de la màquina; la vista en secció ens mostra justament la meitat de les connexions inferiors; d'aquest darrer les dues connexions dels cantons són la mateixa fase i aniran connectades al circuit de sortida de l'aigua. La connexió del mig, és elèctricament l'altre fase (o l'altre connexió si treballem en monofàsic), hidràulicament és l'entrada de l'aigua.

SOPORT MECÀNIC DEL CONJUNT

Per unir els conductors (circuit elèctric-circuit hidràulic), a la font d'alimentació elèctrica i a la bomba d'aigua, s'han soldat dos tubs de cobre de $\varnothing 12 \times \varnothing 10$, un per fase; al conjunt s'hi ha afegit un suport de polièster.



NUCLI DE L'ESTÀTOR

La peça que suporta els conductors de l'estàtor ja es coneguda perquè n'hem definit la forma de les ranures i la ubicació dels circuits elèctric i hidràulic. Es tracta d'una dolla de F-111 de $\varnothing 80 \times \varnothing 27 \times 20$.

El diàmetre interior resulta de considerar un rotor de 25 mm i 1 mm d'entreferro. La llargada resulta d'haver definit $L = 0,8 D$ essent D el diàmetre del rotor.

Per calcular el diàmetre exterior, hem començat per buscar l'alçada del jou: S'ha fet servir una de les expressions del càlcul de màquines elèctriques vistes en el capítol 4:

$$h_y = \frac{K_{Fe}}{2} \left(\frac{D}{p} \right) \frac{B_{\delta o}}{B_{y o}}$$

$K_{Fe} = L_{Fe} / L = 1$ per tractar-se de ferro massís.

D = Diàmetre del rotor (25 mm)

p = nombre de parells de pols.

En quan a les induccions es pren la del jou igual a la meitat de la del entreferro, per tractar-se de ferro massís, per tant:

$$h_y = \frac{1}{2} \left(\frac{25}{2} \right) \frac{2}{1} = 12,5$$

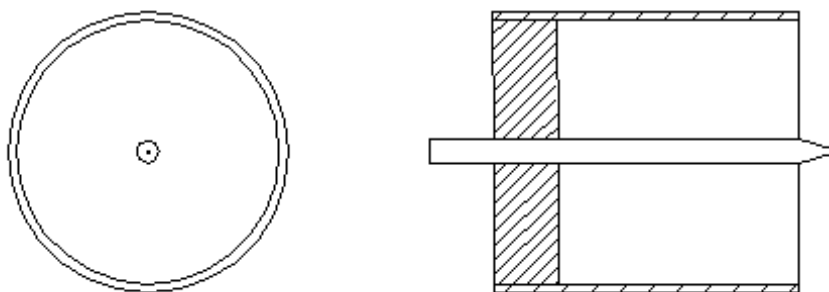
Per aquesta última mida s'agafa un coeficient de seguretat del 200%, per tractar-se de ferro massís. El nombre de parell de pols es pren igual a 2 i no a 4 perquè ens col.loquem

per el cantó de la seguretat si interessen connexionats diversos; el diàmetre exterior queda:

$$\varnothing_{\text{ext.}} = 2 (12,5 \times 2) + 2 \times 1 + 25 = 77 \text{ mm (rodonit a 80 mm)}$$

ROTOR

Primerament s'han fet proves amb un rotor de tub buit (sense ferro en el seu interior). Tal i com es veu en l'apartat de "proves" s'ha passat a tenir un nucli de ferro a l'interior del tub que fa de rotor, i s'afegeix a n'el rotor un torrió de metall que serveix de suport i de centratge. El rotor queda com segueix:



Llista de material màquina d'arrencada per reluctància (Prat-3.0)

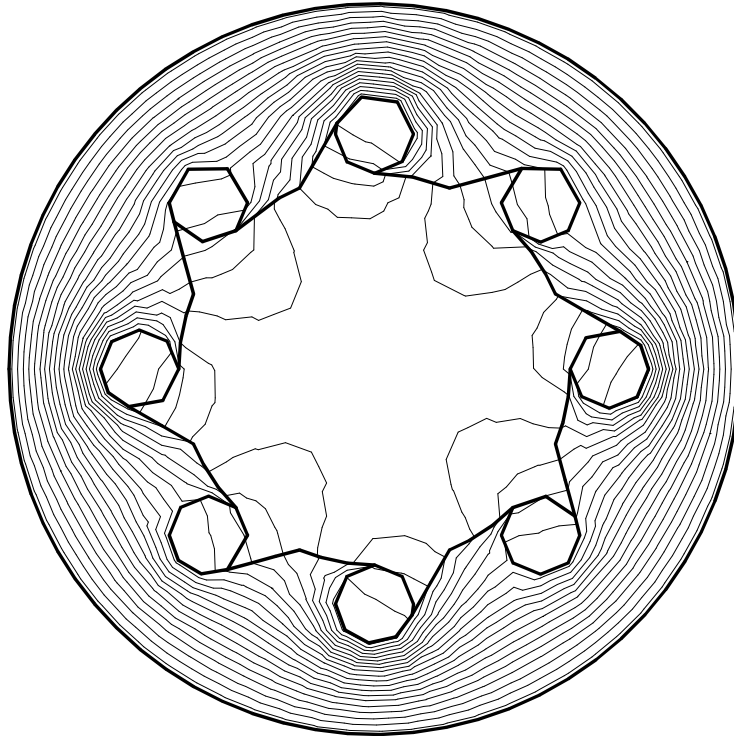
Nucli del Estàtor F-111 $\varnothing 80 \times \varnothing 27 \times 20$
 Rotor de tub de Cu $\varnothing 25 \times \varnothing 23 \times 38$
 Torrió del rotor $\varnothing 3 \times 51$
 Tub conductor $\varnothing 5 \times \varnothing 3$
 Tub conductor $\varnothing 12 \times \varnothing 10$
 Aïllament de fibra de vidre de 1mm
 Aïllament de cola de silicats; capa de 0,3 mm
 Nucli del rotor de F-111 $\varnothing 21 \times 30$
 Suport de polièster

Estudi del Camp Magnètic: S i m u l a c i ó

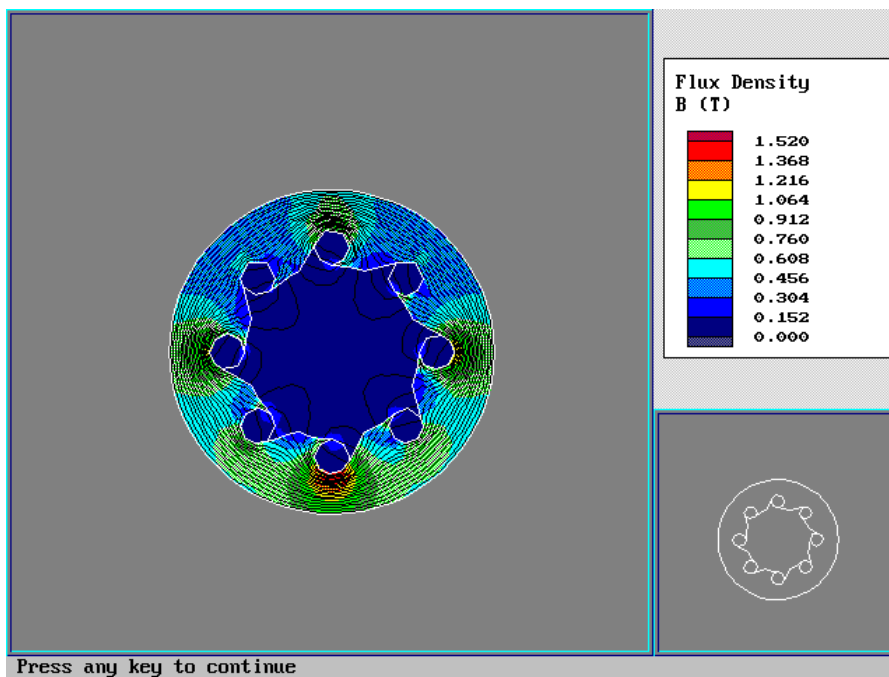
S'ha procedit a simular el mapa de línies de camp magnètic que presenta aquest prototipus, fent servir un programa informàtic (el Qfields de sempre) basat en les tècniques dels elements finits; es presenta el valor temporal per un instant determinat. S'han fet simulacions considerant la màquina sense nucli en el rotor i/o amb nucli en el

rotor. S'han fet simulacions considerant l'alimentació en bifàsic o en monofàsic. Els resultats es mostren tot seguit:

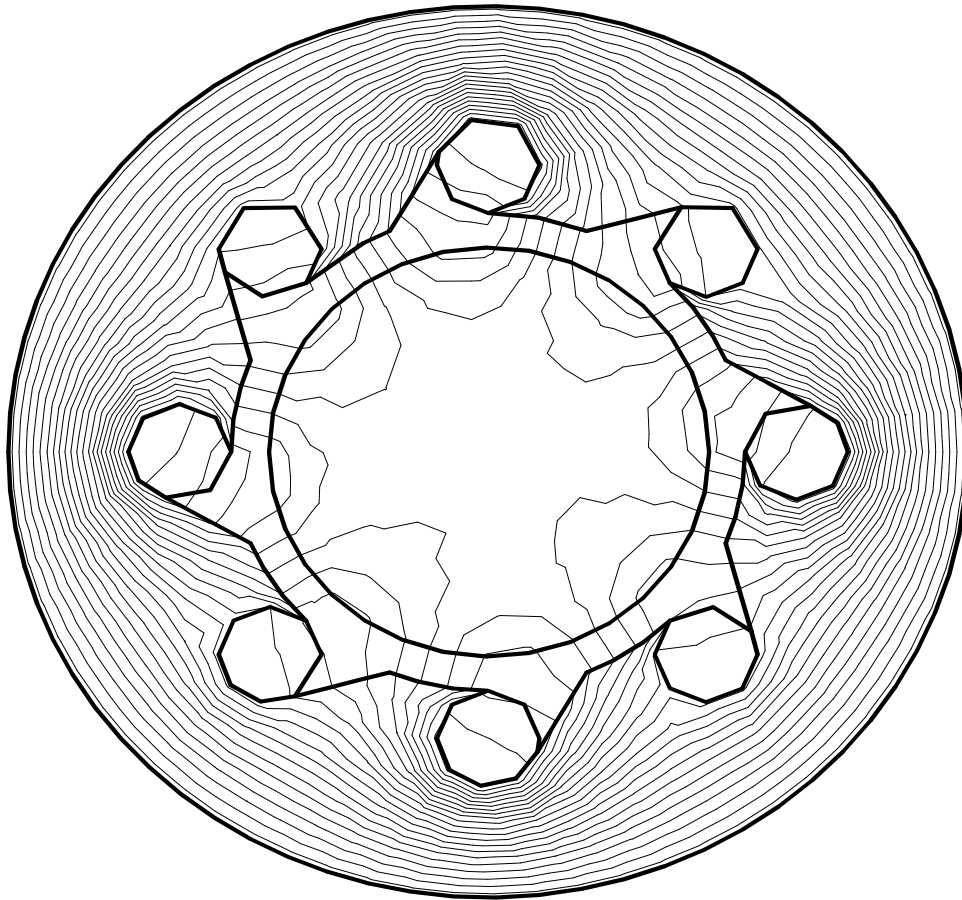
Alimentació monofàsica. Nucli del ròtor és aire



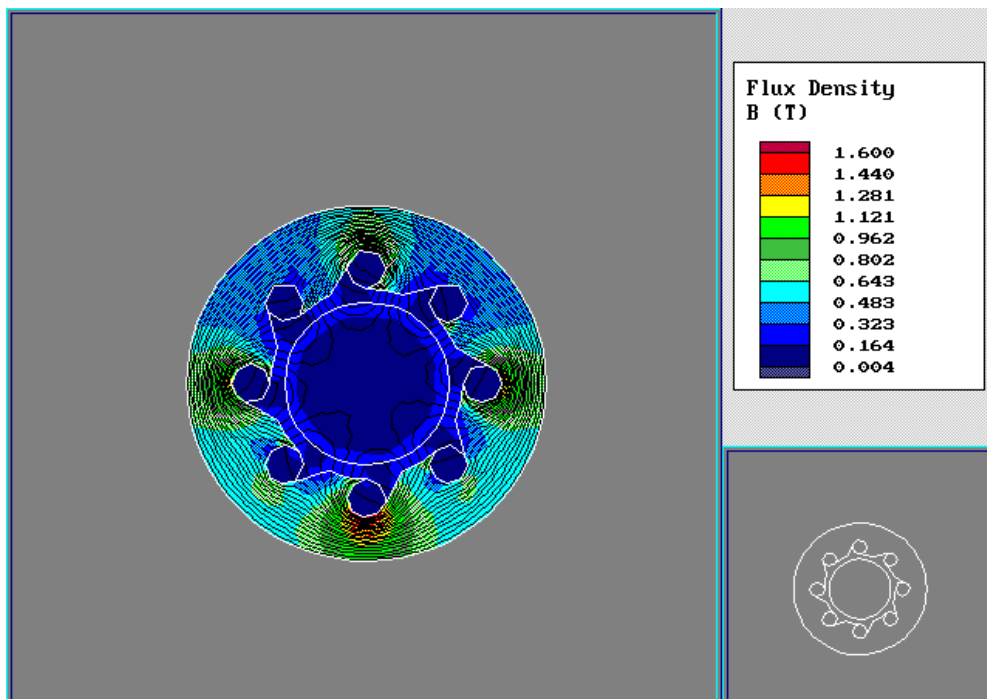
i el mapa de valors de la inducció, resulta ser:



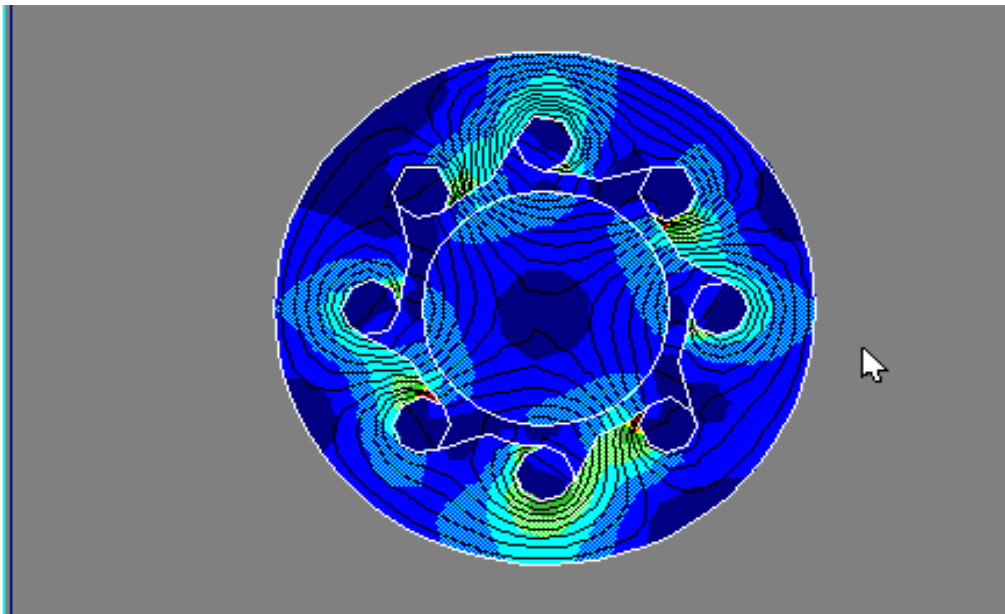
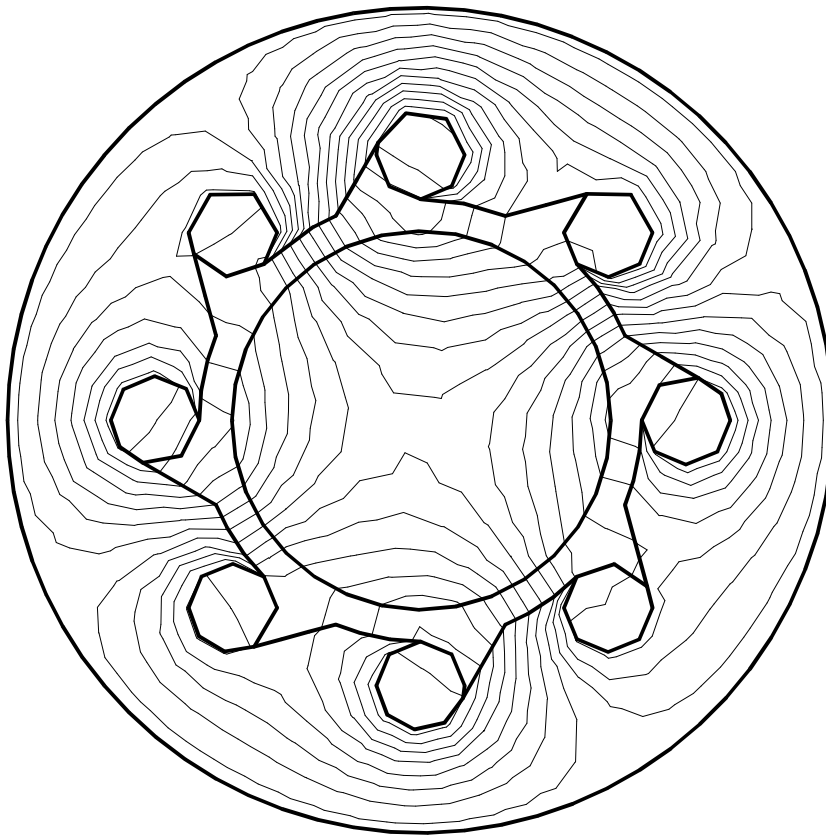
Alimentació monofàsica. Nucli del rotor és ferro



i el mapa de valors de la inducció, resulta ser:



Alimentació en bifàsica i connexió I (pag. 54). Nucli en ferro
Fer notar que aquesta connexió no s'ha assajat físicament.



Proves realitzades en la màquina d'arrencada per reluctància (Prat-3.0)

ASSAIG DEL CIRCUIT HIDRÀULIC

Hi ha dos tipus d'assaigs en aquest circuit hidràulic:

- a) Assaig del connexionat i de pèrdues de càrrega
- b) Assaig d'estanqueïtat

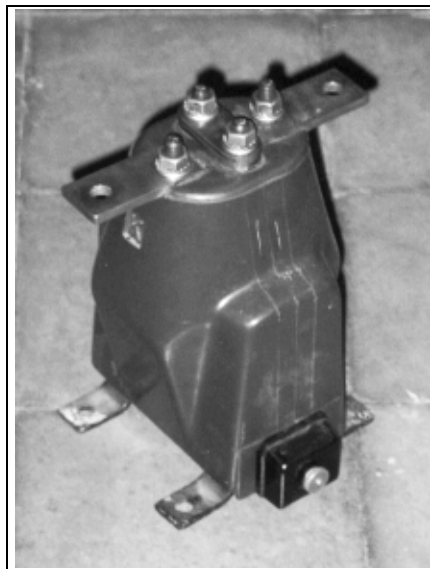
S'arriba a les següents conclusions:

- 1- Connexió bomba-màquina: es fa servir tub flexible de PVC
- 2- Desaïgua de sortida: és una sortida oberta sense canonades intermitges permet controlar temperatures durant els assaigs
- 3- Connexionat en la màquina: es fa servir tub flexible de silicona va ubicat en la part superior de la màquina
- 4- Estanqueïtat: *Òptima* en tots els assaigs
- 5- Esquema de les connexions: quatre vies en paral·lel dos conductors per via (anada i retorn)
- 6- Cabal total: 6 l/min
 per via: 1,5 l/min

En les proves elèctriques s'ha vist que aquest tipus de refrigeració permet un màxim de 20 kA per fase durant 10 s (5 kA/conductor). Si es posaven tots els conductors en paral·lel, es pot doblar aquest valor (40 kA per fase durant 10 s)

PROVA AMB TRANSFORMADOR DE CORRENT

S'ha fet un primer assaig elèctric fent servir un dels transformadors de corrent de 30 VA dels que disposa el laboratori, i de placa de característiques:



Característiques trafo: Alimentació: 220V 5A 50Hz (directament de xarxa)
Intensitat màxima de sortida: 900A

Aquest assaig s'emmarcava en la línia de màquines autònomes (vol dir que es poden connectar en font de tensió i elles mateixes fan el pas cap a font de corrent); les condicions del assaig han estat:

Alimentació: Monofàsic

Corrent màxim: 900 A

Tensió en bornes: 0,5 V

Condicions màquina: Rotor sense ferro en el seu interior

Velocitat: 0 min^{-1} (la màquina no arranca)

Circuit hidràulic: No hi ha fuites d'aigua per cap punt (comportament òptim)

Conclusions: Fa falta una font de corrent capaç d'injectar més ampers.



Proves amb font de corrent

Atès que el transformador de corrent no subministra intensitat suficient per alimentar la màquina, cal alimentar amb el transformador T.S. del laboratori. De fet la sortida del T.S. actua com a veritable font de corrent.

PRIMERA PROVA: COMPORTAMENT CAPS DE BOBINA

Aquesta prova és la més important de totes les que s'han fet en aquest prototipus, i posa de manifest que en màquines alimentades per corrent ha d'haver-hi **una simetria geomètrica total** com a pas previ per a poder gaudir de simetria elèctrica.

Val a dir que geomètricament aquest prototipus no és simètric; era impossible que els dos circuits (d'entrada i de sortida) anessin a unir-se en un mateix punt sobre l'eix de la màquina; per tant en un dels dos circuits ha resultat que la connexió és més llarga (40 cm i 20 cm, respectivament). Aquesta diferència inobservable en màquines alimentades per tensió, resulta *intolerable en màquines alimentades per corrent*, com es veurà tot seguit.

Lectures amb pinça amperimètrica:

Bobina 1 (cap de bobina curt): 700 A

Bobina 2 (cap de bobina llarg): 350 A

SEGONA PROVA: MONOFÀSIC-AIRE

Font de corrent: Transformador TS

Freqüència: 50 Hz

Alimentació: Monofàsic

Geometria prototipus: *Sense ferro* a l'interior del rotor

Tensió: 2,2 V

Intensitat: 3000 A

Velocitat: 30 min⁻¹ Fer notar que volta "a salts"

Sentit de gir: sentit horari (coincideix amb el sentit de la mínima reluctància)

Refrigeració: Aigua en circulació forçada

Conclusions: a) L'arrencada per reluctància, en aquest assaig, funciona

b) Fa falta un suport mecànic per evitar que vagi d'una banda a l'altra quan gira. Sense suport les forces primàries d'atracció-repulsió esdevenen importants.

c) El suport serà de ferro, així minimitzarem l'entreferro, i no farà falta tant corrent per a crear el camp magnètic.

TERCERA PROVA: NUCLI SENSE FICSAR

Hem afegit un suport de ferro a l'interior del rotor i, a mig muntatge, és a dir abans de ficar el suport a l'estructura de la màquina, tot i que sabíem que mecànicament no estava acabat, hem fet un petit assaig, per veure què passava. S'ha posat de manifest la importància de les forces primàries de reluctància.

Font de corrent: Transformador TS

Freqüència: 50 Hz

Alimentació: Monofàsic

Geometria prototipus: *Amb ferro* a l'interior del rotor. Sense soldar.

Tensió: 2 V

Intensitat: 1200 A

Refrigeració: Aigua en circulació forçada.

Velocitat: 0 min⁻¹ El rotor i el seu nucli de ferro queden literalment "clavats" a l'estàtor. Per tant és imprescindible que el suport mecànic que hi ha dins del rotor estigui soldat.

QUARTA PROVA: MONOFÀSIC-FERRO

En aquest cas s'ha assajat el prototipus acabat, és a dir amb el nucli de ferro que va dins del rotor encolat a l'estructura de la màquina; n'hi ha hagut prou encolant-ho amb una de les conegudes coles ràpides que es fan servir en tecnologia mecànica. Aquest nucli disposa d'un forat on s'hi ubica el torrió que fa de suport del rotor.

Font de corrent: Transformador TS

Freqüència: 50 Hz

Alimentació: Monofàsic

Geometria prototipus: *Amb ferro* a l'interior del rotor

Tensió: 1,9 V

Intensitat: 1200 A

Velocitat: 60 min^{-1}

Sentit de gir: sentit horari (coincideix amb el sentit de la mínima reluctància)

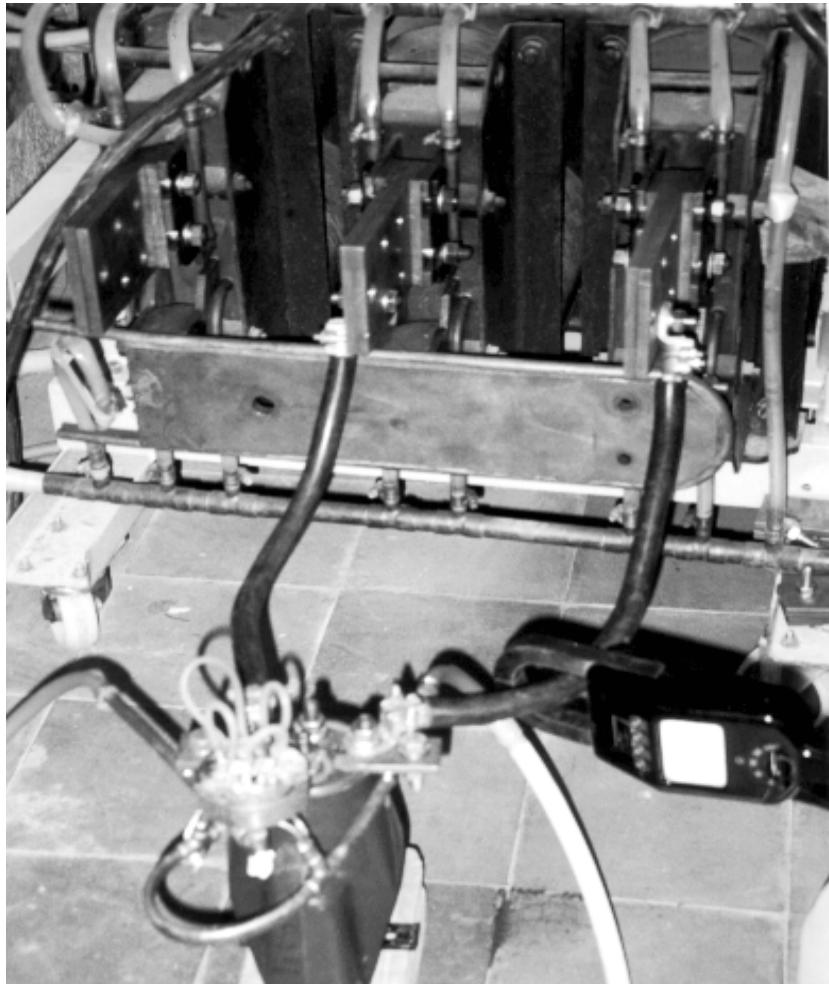
Refrigeració: Aigua en circulació forçada

Conclusions: Gira amb menys intensitat de corrent que en el cas anterior, però la velocitat segueix essent prou baixa. Vegem el lliscament:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750$$

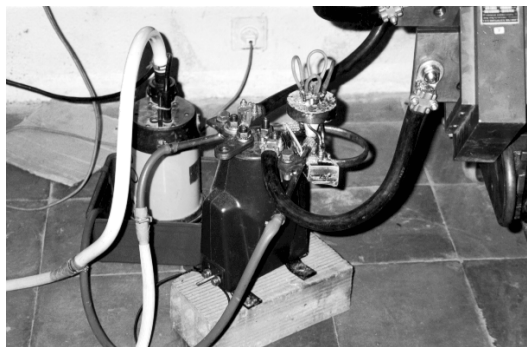
$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{750 - 60}{750} = 0,92 = 92\%$$

Aquest lliscament és intolerable, i cal pensar en un prototipus millorat tant mecànicament com elèctrica. Ha de ser simètric i s'han d'evitar els freds mecànics. Altrament les velocitats elevades s'hauran d'aconseguir amb freqüències també elevades.



CINQUENA PROVA: BIFÀSIC

Aquest assaig és realitza amb el prototipus “acabat”, és a dir: nucli de ferro i soldat a l’estructura de la màquina. Com que no disposem de fonts bifàsiques ho agafem directament d’un sistema trifàsic: dues de les fases les col.loquem a les dues entrades del bifàsic; la tercera fase la col.loquem a les dues sortides del bifàsic, que se les ha col.locat en punt comú. D’aquesta manera l’alimentació és fa mitjançant dues tensions desfasades 120° (recordar que el bifàsic tradicional té les tensions desfasades 90°).



Font de corrent: Transformador TS

Freqüència: 50 Hz

Alimentació: Bifàsic

Geometria prototipus: *Amb ferro* a l’interior del rotor

Tensió: 2 V

Intensitat: 800 A

Velocitat: 52 min^{-1}

Refrigeració: Aigua en circulació forçada

Sentit de gir: antihorari. Noteu que en aquest cas no gira en el sentit de la mínima reluctància, sinó que gira obligat per el camp bifàsic. També es va fer una prova amb la seqüència de fases canviada, llavors el camp girava en la mateixa direcció que en monofàsic, i no afegia res de nou.

Prova a alta freqüència

S’ha assajat fent servir el forn d’inducció de laboratori, que consta de dues bobines (l’una fa de filtre de l’altra), i que està governat per un convertidor de freqüència basat en tiristors. Pot treballar a 5000 Hz però amb corrents molt baixos si es comparen amb els que pot subministrar el TS. Ha estat un assaig que ha durat només 5 s i que s’ha fet en règim adiabàtic. No hem aconseguit fer girar la màquina, si bé que els ampers subministrats han estat molt per dessota dels que calia subministrar a 50 Hz . Nosaltres, abans de saber el resultat del assaig, pensàvem que la millora en l’acoblament magnètic (per treballar a altes freqüències) hauria estat quantitativament més important

Font de corrent: Forn d’inducció

Freqüència: 5000 Hz

Alimentació: Monofàsic

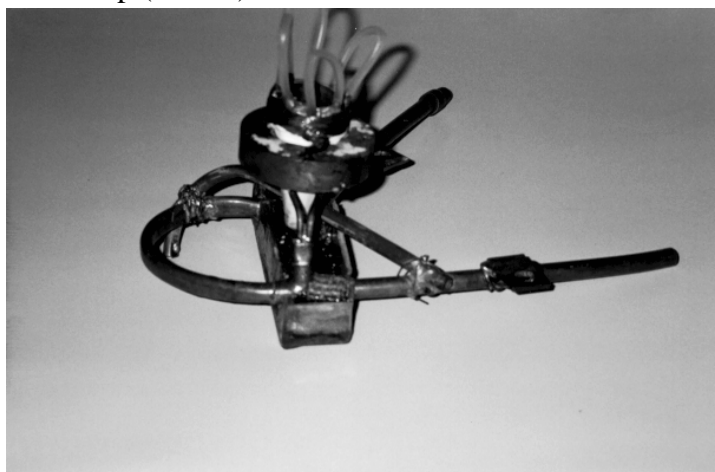
Geometria prototipus: *Amb ferro* a l’interior del rotor

Intensitat de corrent bobina-1: 100 A
Intensitat de corrent bobina-2: 40 A
Refrigeració: Règim adiabàtic. Sense refrigeració
Velocitat: 0 min^{-1} . La màquina no arranca
Durada de l'assaig: 5 s



Especificacions de la Màquina d'arrencada per reluctància

Nombre de conductors: 8
Pas polar en l'entreferro: 10,21 mm
Alimentació: Bifàsic/monofàsic
Refrigeració: Aigua en conducció forçada. 6 l/min
Rotor: Tub de Cu. *En estudi tub de superconductor*
Suport del rotor: F-111
Suport del estàtor: F-111
Forma ranura: Asimètrica: 50% rodona
 50% oberta per una tangent a 45°
Tensió de treball: 2 V
Corrent de treball: 1200 A (monofàsic)
 800 A (bifàsic)
Velocitat nominal: 60 min^{-1} (treball a 50Hz)
Sentit de gir: Horari (monofàsic-segons mínima reluctància)
 Segons sentit del camp (bifàsic)



CONCLUSIONS

- 1- Les màquines alimentades per corrent i amb debanats en paral·lel per poder levitar el rotor han d'estar construïdes en un disseny totalment simètric.
- 2- En les màquines esmentades anteriorment els caps de bobina i els conductors d'alimentació poden arribar a tenir tanta importància com els propis conductors.
- 3- El circuit hidràulic instal·lat fent servir tecnologies clàssiques funciona a la perfecció.
- 4- Important posar tots els conductors hidràulicament en paral·lel per tal de poder augmentar la màxima intensitat admissible en els conductors i evitar riscos de producció de vapor.
- 5- El sistema d'arrencada per reluctància tot i haver funcionat, no ha donat els resultats que s'en esperaven
- 6- Per aquest tipus de màquines es necessiten ordres de corrent molt importants, que altrament s'hi poden fer passar amb els sistemes de refrigeració de què es disposa, però fa falta una font per a generar-les.
- 7- S'han d'evitar els frecs mecànics per petits que siguin.
- 8- Els salts observats demostren que el sistema sense suport de rotació és intrínsecament inestable.

El lector interessat pot consultar una taula comparativa de les prestacions de tots els prototipus (també el Prat-5), al **final del capítol 10**.

5.5- PROTOTIPUS PRAT-4. LA MÀQUINA D'ESTANY COLAT

En aquest prototipus s'han pres les mateixes especificacions de base que en la màquina d'arrencada per reluctància, però amb tres modificacions importants:

- 1- Ha de ser un prototipus totalment simètric.
- 2- Es construirà fent servir la tecnologia de la colada d'estany
- 3- Hidràulicament tots els conductors estaran en paral·lel.

Es vol aconseguir un prototipus que tingui:

- a) mateixes dades de partida que la màquina d'arrencada per reluctància (mides del rotor i del estàtor, formes de les ranures i debanats, mateix nombre de conductors).
- b) mateix sistema mecànic que la màquina de reluctància (de moment)
- c) funcionament en bifàsic o en monofàsic. En aquest cas es vol que la construcció de la màquina contempli el bifàsic des d'un principi.
- d) sistema d'arrencada per reluctància quan funcioni en monofàsic.
- e) estigui construït fent servir les tecnologies de la injecció d'estany, i per tant obri la porta a la fabricació de màquines elèctriques en sèrie fent servir els mètodes d'injecció.
- f) simetria geomètrica total.
- g) un circuit hidràulic òptim (permetrà una intensitat admissible en els conductors refrigerats de l'ordre del 10 kA)

Disseny de la màquina d'estany colat

DADES DE PARTIDA

- 1- Rotor de $\varnothing 25$ mm
- 2- Debanat *bifàsic*. Es farà servir el tipus de debanat que hom anomena *Connexió bifàsica paral·lel*.
- 3- Ranures asimètriques (mateix disseny que en màquina d'arrencada per reluctància)
- 4- Estàtor de ferro massís F-111

DADES CALCULADES

- 1- Nombre de conductors: 8
- 2- Pas polar en l'entreferro: 10,21 mm
- 3- Nucli del estàtor: $\varnothing 80 \times \varnothing 27 \times 20$
- 4- Nucli del rotor: F-111 $\varnothing 21 \times 30$
- 5- Tub conductor de $\varnothing 5 \times \varnothing 3 \times 60$

AÏLLAMENTS

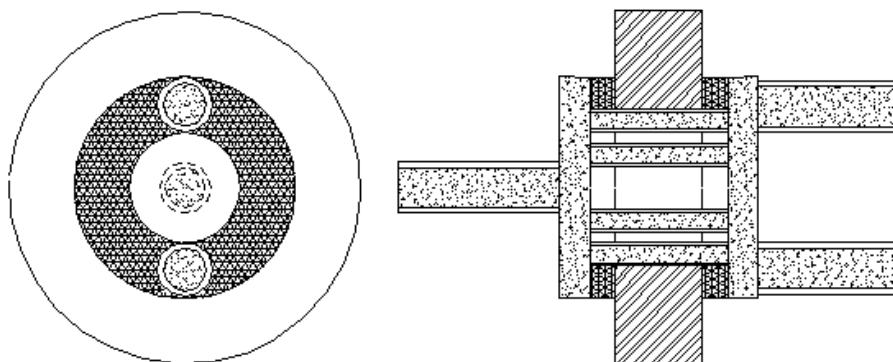
Pintades de cola de silicats
Fibra de vidre

DISTRIBUCIÓ DEL CAMP MAGNÈTIC

Encara que el connexionat entre conductors resulti diferent (sobretot en allò que a seccions de conductors es refereix), la distribució dels conductors és la mateixa que en la màquina d'arrencada per reluctància, i per tant no s'ha procedit a analitzar novament ni el camp magnètic ni la inducció d'aquest prototipus per cap mètode numèric ni d'elements finits; hom pensa que si orientativament es necessita, es poden fer servir els resultats del prototipus anterior.

Disseny del circuit hidràulic de la màquina d'estany colat

L'aigua de refrigeració ha d'entrar per la connexió hidràulica situada en la part superior de la màquina, i sortir per les dues connexions situades en la part inferior. Es preveu el mateix cabal que en la màquina d'arrencada per reluctància: 6 l/min



Llegenda: Ratllat (ratlles a 45°): Nucli del estàtor
 Doble ratllat: Estany. La vista en planta no ens mostra els conductors
 Zones de punts: Circuit hidràulic

El connexionat desde i cap a la bomba s'ha realitzat igual que en la màquina d'arrencada per reluctància.

Aquest prototipus ha donat molts problemes de fuites d'aigua del circuit de refrigeració en totes les proves hidràuliques que se li han fet. Ha obligat a fer molts retocs sense poder aconseguir una qualitat total. Fa pensar que amb els mitjans de que disposem es fa difícil treballar en aquest tipus de tecnologies.

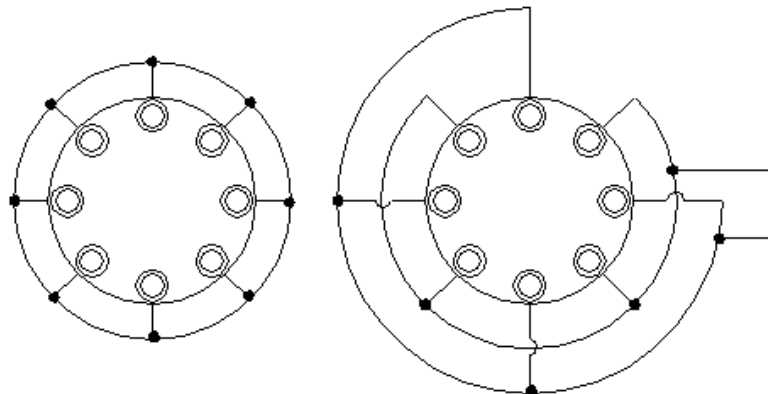
Passos previs al muntatge de la màquina

Abans d'abordar el muntatge final, que cal fer en una sola sessió degut a la tecnologia emprada, cal preveure:

- 1- Plànol del connexionat
- 2- Utillatges
- 3- Cal haver aïllat tots els conductors elèctrics.



PLÀNOL DEL CONNEXIONAT ELÈCTRIC



Per fer el connexionat de la part superior de la màquina fent servir la tecnologia del estany colat no hi ha cap mena de problema perquè resulta ser el punt de centre d'estrella de la màquina, i tots els conductors es troben en contacte.

Per fer el connexionat en la part inferior, els conductors queden formant dues fases, i aquests conductors pertanyen a una de les fases o a l'altra, alternativament, per tant cal trobar una manera de separar una fase de l'altra abans de fer la colada d'estany.

UTILLATGES

N'hi ha dos; son de fusta; han estat fabricats al torn. Serveixen de motlle per l'operació de tirar la colada d'estany. Son el motlle exterior i el motlle interior

Motlle exterior: és un anell de $\text{Ø}42 \times \text{Ø}40 \times 20$

Motlle interior: $\text{Ø}25 \times 18$ (part del rotor) $\text{Ø}20 \times 18$ (part del estany)

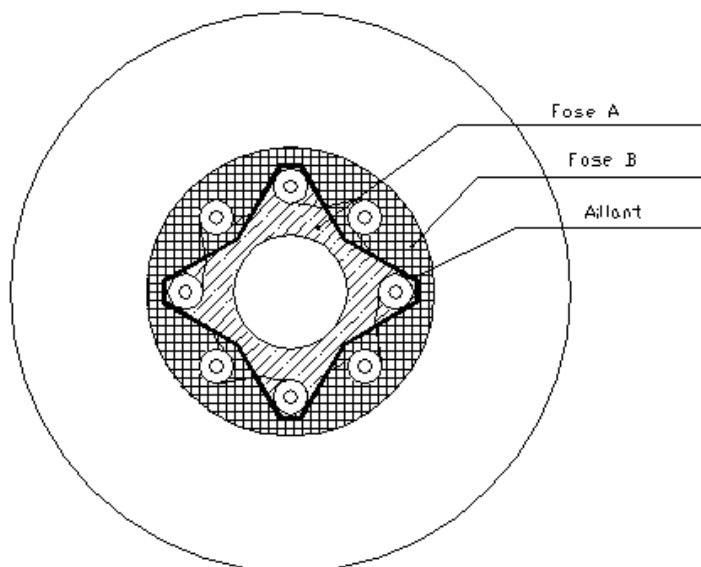


AÏLLAMENTS

Conductors elèctrics: Fibra de vidre impregnada amb cola de silicats (4 capes)

Nucli del estàtor: Pintat amb cola de silicats

Separador de les dues fases elèctriques en estany: Paper impregnat amb cola de silicats



Com es pot veure en la figura (vista en planta - part inferior de la màquina), l'aïllant que es de paper impregnat amb cola de silicats, fa de separador entre les dues capes d'estany que abracen els conductors d'una i altra fase; les connexions hidràuliques, que a la vegada son connexions elèctriques no es mostren en la figura, però queden embegudes una en la fase A i l'altra en la fase B.

Quan s'ha tirat la colada d'estany, ens hem adonat que aquesta cola de silicats no es massa adient, doncs allibera violentament l'aigua de cristallització al calor de l'estany. Això fa perillosa l'operació i discutible l'eficàcia de l'aïllament.

Muntatge de la màquina d'estany colat

Els passos a seguir, son:

CARA INFERIOR

- 1- Presentar el nucli del estàtor, els vuit conductors prèviament aïllats i els utillatges
- 2- Insertar entre conductors l'aïllant separador de les dues fases d'estany
- 3- Preparar la colada d'estany.
- 4- Presentar els dos tubs circuit elèctric-circuit hidràulic (sortida d'aigua)
- 5- Tirar la colada d'estany fase A
- 6- Esperar a que solidifiqui
- 7- Tirar la colada d'estany fase B
- 8- Esperar a que solidifiqui

CARA SUPERIOR

- 09- Donar-li la volta al prototipus
- 10- Presentar novament la màquina i els utillatges
- 11- Preparar la colada d'estany
- 12- Presentar el tub del circuit elèctric-circuit hidràulic (entrada d'aigua)
- 13- Tirar la colada d'estany punt estrella
- 14- Esperar

AJUSTATGE

- 15- Acabar construcció circuit hidràulic part superior
- 16- Acabar construcció circuit hidràulic part inferior

Proves amb la màquina d'estany colat



En aquestes proves s'ha vist que per posar en marxa la màquina d'estany colat, feia falta molta més intensitat de corrent que en la màquina d'arrencada per reluctància, i això ens confirma en la teoria de que el sistema d'arrencada per reluctància està encara lluny del seu òptim.

També s'ha vist que aconseguir estanqueïtat hidràulica en aquest prototipus era difícil des del punt de vista constructiu (Evidentment aquest problema es solucionable en fabricacions a gran escala). En el nostre cas, la manca d'estanqueïtat hidràulica, ens ha emmascarat els resultats.

Assaig en bifàsic, però tensions desfasades 120° elèctrics

Intensitat 1 fase bifàsic [A]	Intensitat punt comú bifàsic [A]	Tensió de línia bifàsic [V]	Velocitat [min^{-1}]	Sortida Refrigeració
560	580	0,44	0	aigua
1000	1600	0,92	0	aigua
1200	1600	1,08	0	aigua
1440	1680	1,54	0	aigua
2000	2000	2,00	intenta girar antihorari	aigua
2640	2640	2,7	30 antihorari	aigua
3200	3200	2,75	30 antihorari	vapor

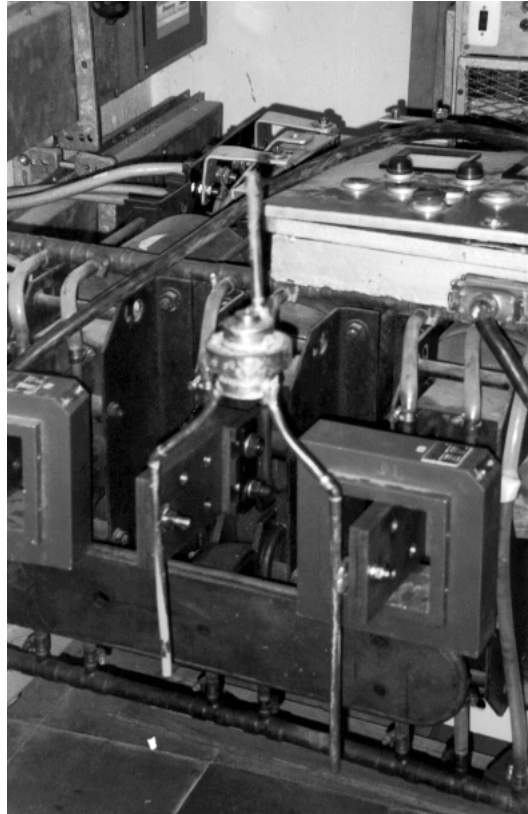
Seguint en la mateixa prova, quan la màquina volta, és desconnecta el punt comú del bifàsic, i la màquina segueix voltant (en el sentit que li havia donat el camp bifàsic, que no pas necessàriament el de la mínima reluctància), a la mateixa velocitat i mateix voltatge, i el corrent és de 2080 A

Es va canviar la seqüència de fases. Les dades d'amperatge necessari per arrancar son sensiblement iguals en un cas i en l'altre. Fa pensar que en aquesta màquina concreta l'efecte de variació de reluctància es algun ordre de magnitud més petit, que l'efecte de camp giratori bifàsic.

Ens confirma una de les conclusions del Prat-3 (la que diu que la variació de reluctància havia donat un resultat més pobre a l'esperat). En successius prototipus d'arrencada per reluctància, hom haurà de procurar que les diferències reals de reluctància per un dels dos camps giratoris i per l'altre, siguin més significatives.

Assaig en monofàsic:

- 1- La màquina comença de moure's per allà als 5000 A de fase
- 2- El sentit és el de la mínima reluctància
- 3- L'assaig no pot durar més de 5 s, perquè del circuit hidràulic, en surt vapor



6. ALTRES ASPECTES DE FUNCIONAMENT DELS PROTOTIPUS

6.1- INTRODUCCIÓ

Després calcular, construir i assajar quatre prototipus, hom s'adona que queden pendents algunes qüestions teòriques puntuals que sembla prou coherent posar-les juntes.

També es comenta tota la part d'assaigs pneumàtics.

6.2- LA LEVITACIÓ PNEUMÀTICA. INFLUÈNCIA DEL EFECTE MAGNUM

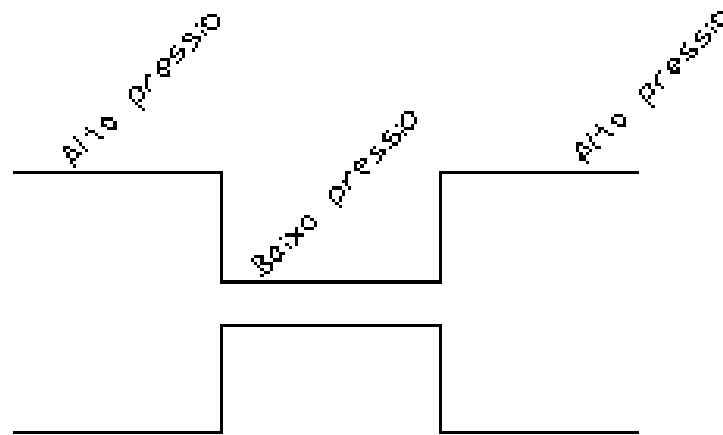
Principis físics

En els prototipus Prat-2.0 i Prat 2.1 s'ha assajat experimentalment els principis de la levitació pneumàtica. Aquest tipus de levitació en essència consisteix en crear una sobrepressió en la zona de suport del pes de l'objecte. Així l'objecte en qüestió no queda suportat a terra directament, sinó per mitjà d'un coixí d'aire. Desapareix el frec entre la superfície de l'objecte i la superfície de suport; qualsevol moviment del objecte pot ésser realitzat més fàcilment, és a dir fent servir una potència mecànica quantitativament inferior. Els principis que hom ha descobert que calia tenir en compte, son els següents:

1- Cal recordar que segons el **teorema de Bernoulli**, quan en una canonada que condueix un fluid hi ha un **estrangulament**, en la zona del estrangulament hi ha menys pressió. Intuitivament resulta del fet que en l'estrangulament la velocitat del fluid es més alta (ha de passar-hi el mateix cabal en una secció recta més petita). Abans de l'estrangulament cal una sobrepressió per tal d'accelerar el fluid. Després del estrangulament cal una sobrepressió per tal de frenar el fluid. Per tant la pressió més baixa en la zona del estrangulament està servida. La comprovació numèrica es immediata a partir de la formula de Bernoulli:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \text{perdues}_{1-2}$$

Hem de tenir en compte que segons com es dissenya la geometria del model, enlloc d'aconseguir una levitació, el que hom aconsegueix és una succió, un efecte de ventosa, que es justament el contrari d'allò que es buscava



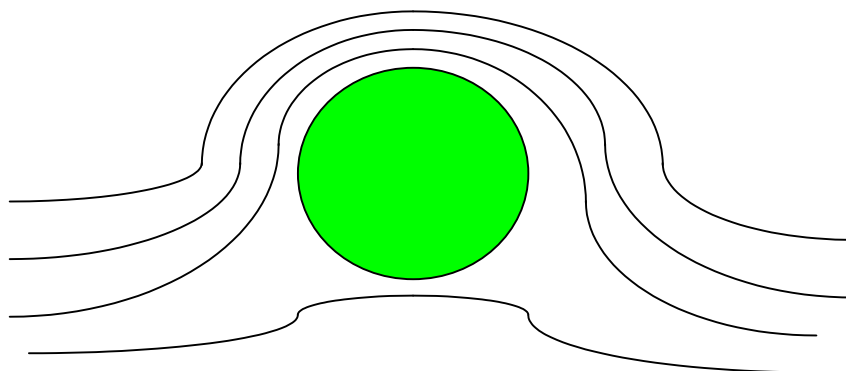
2-Quan un fluid incideix sobre una superfície, li caldrà canviar la seva trajectòria per tal de trobar un camí de sortida. Aquest canvi de trajectòria implica una acceleració (perquè hi ha un canvi en el sentit de la velocitat). Una acceleració sempre va lligada a una força.

Aquesta força (en el cas del fluid) prové d'una sobrepressió. Això explica que en una canonada de diferents diàmetres i cabal constant en tots ells, en els sectors de més diàmetre hi ha menys velocitat i més pressió. En els sectors de menys diàmetre -els estrangulaments- augmenta la velocitat i disminueix la pressió.

Si es fa una sustentació pneumàtica amb una sola fila de forats, el teorema de Bernulli crea les condicions físiques idònies perquè tingui lloc l'efecte ventosa.

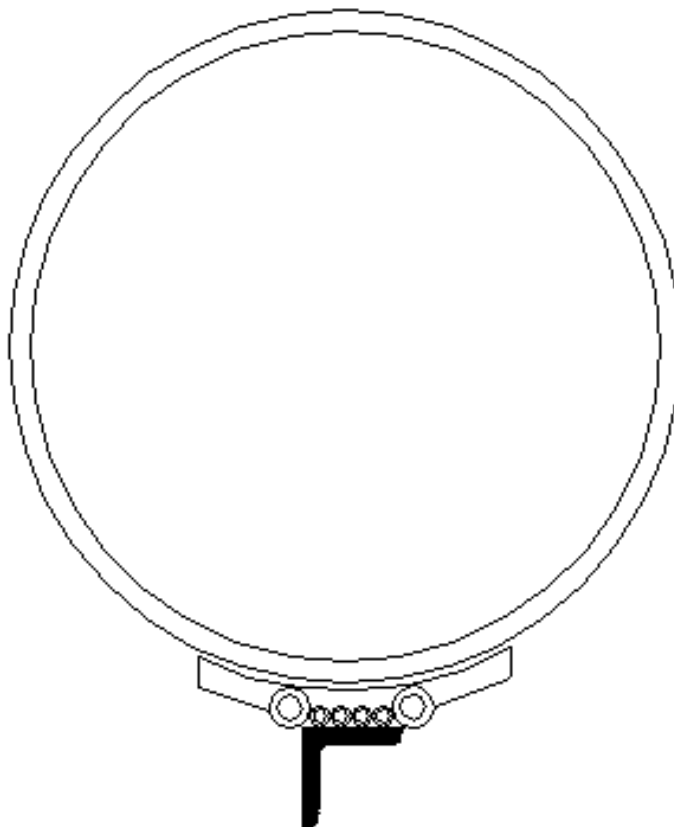
Si es fan dues files de forats entre una i altra fila es crea una sobrepressió. Aquesta sobrepressió es qui subministra la força de sustentació.

3- El fluid que aguanta el rotor objecte d'aquesta prova, localment es presenta com una massa d'aire en moviment. Si el rotor a aguantar és un cilindre, i el seu eix de rotació es perpendicular a la vena fluïda, té lloc -a velocitats elevades- l'efecte Magnus, que com a mínim farà que l'eix de rotació esdevingui descentrat, i que caldrà contrarestar fent servir les geometries adequades.



6.3- COIXÍ D'AIRE. APLICACIÓ EXPERIMENTAL LEVITACIÓ PNEUMÀTICA **ASSAIG AMB LA MÀQUINA SECTOR D'ESTÀTOR**

Els principis exposats de la levitació pneumàtica, els hem aplicat primerament al prototipus Prat-2.1, que és la *Màquina de sector d'estàtor*. El seu disseny elèctric i les proves realitzades s'exposen en el capítol 5. Vegem el seu funcionament pneumàtic:



El rotor de la màquina de sector d'estàtor és un tub d'alumini de diàmetre $\varnothing 80 \times \varnothing 75$ i 80 mm de llargada que levita per mitjà d'aire a pressió injectat en l'entreferro. El "sector d'estàtor" està fet de polièster i fibra de vidre, i té la mateixa forma que el rotor. En el seu interior hi té ubicades dues conduccions d'aire. La font d'aire a pressió és externa - un compressor-. L'alimentació d'aire es pot portar a terme per una, dues, tres, o quatre boques, segons convingui. El laboratori està preparat per alimentar aquesta màquina hidràulicament, mecànica i elèctrica en el mateix punt -s'ha aconseguit fent passar un tub d'aire a pressió des del compressor fins al costat mateix del transformador que fa de font de corrent-. L'aire surt del "sector d'estàtor" per dues files de forats orientats radialment cap al rotor, com es pot veure en la figura de la pàgina següent.

Primer assaig

Geometria de la màquina: Sector d'estàtor de diàmetre $\varnothing 82$ mm arc de 20°
LLargada del entreferro 80 mm
Pressió de Treball: 5 atm

Alimentació pneumàtica: Una boca. Els dos rengles de forats es troben connectats en sèrie

Comportament del rotor: Levita. Gira a 40 min^{-1} sense aplicar tensió elèctrica

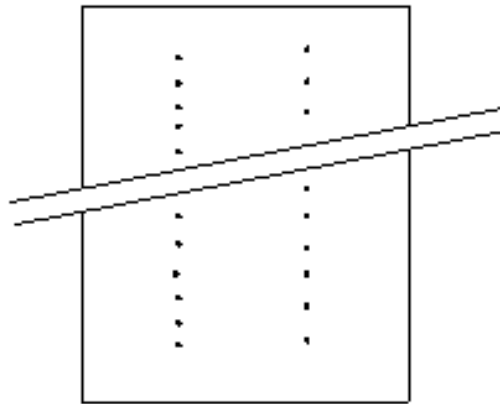
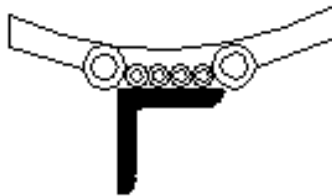
Conclusions: No podem acceptar que volti. Hem construït una màquina pneumàtica, i ha de ser una màquina elèctrica. Es proposen les següents modificacions en el prototipus:

1- Tots els forats cal que siguin rigurosament radials

2- Ha d'haver-hi la mateixa pressió a totes dues bandes, per tant:

a) Tots els forats han de presentar el mateix pas d'aire (mateix diàmetre i absència de taps)

b) Alimentació pneumàtica en paral·lel



Segon Assaig

Geometria de la màquina: Sector d'estàtor de diàmetre $\text{Ø}82 \text{ mm}$ arc de 20°
LLargada del entreferro 80 mm

Pressió de Treball: 5 atm

Alimentació pneumàtica: Dues boques. Els dos rengles de forats es troben connectats en paral·lel.

Comportament del rotor: Levita. Gira a 20 min^{-1} sense aplicar tensió elèctrica

Conclusions: Cal construir un sector d'estàtor que abraci un arc més gran. Pensem que així s'equilibraran les forces tangencials i deixarà de girar.

Tercer Assaig

Geometria de la màquina:	Sector d'estàtor de diàmetre $\varnothing 82$ mm arc de 150° LLargada del entreferro 80 mm
Pressió de Treball:	5 atm
Alimentació pneumàtica:	Dues boques. Els dos rengles de forats es troben connectats en paral·lel.
Comportament del rotor:	Queda literalment clavat a l'estàtor. No volta però tampoc levita.

Conclusions: S'observa un efecte ventosa, explicable segons Bernoulli però indesitjat. Es proposen les següents modificacions en el prototipus:

- 1- Tornar a la geometria d'arc de 20°
- 2- Alimentar per quatre boques
- 3- Regular la pressió d'alimentació fins arribar al règim estable

Quart Assaig

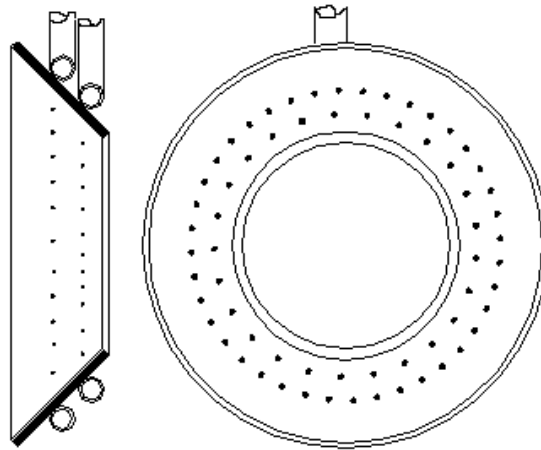
Geometria de la màquina:	Sector d'estàtor de diàmetre $\varnothing 82$ mm arc de 20° LLargada del entreferro 80 mm
Pressió de treball:	1 atm (pressió final després de varies proves)
Alimentació pneumàtica:	Quatre boques. Els dos rengles de forats es troben connectats en paral·lel i alimentats per cada banda.
Comportament del rotor:	Levita i no gira
Conclusions:	Funcionament satisfactori

ASSAIG AMB LA MÀQUINA VUITANTA CONDUCTORS

La màquina de vuitanta conductors és l'altra versió de la màquina de sector d'estàtor. Rep el nom de Prat-2.0. Cronològicament va néixer abans la màquina de vuitanta conductors, i per això s'en diu Prat-2.0 *No es va construir elèctricament perquè estem convençuts que no hi hauria cap aportació que no s'hagués vist en la màquina de sector d'estàtor (Prat-2.1)*. Des del punt de vista pneumàtic no es podia dir el mateix. Les diferències que hi ha son:

- 1- L'eix de rotació del tub és vertical
- 2- El coixí pneumàtic es troba ubicat en una superfície cònica que forma un angle de 42° respecte la vertical

D'aquesta màquina s'ha construït únicament el coixí pneumàtic, com es pot veure en la figura:



Primer Assaig

Geometria de la màquina:	Una única corona de forats de $\varnothing = 1 \text{ mm}$
Pressió de Treball:	2 atm
Comportament del rotor:	Efecte ventosa. Queda clavat al suport. Coixí pneumàtic inexistent

Conclusions: Al haver-hi només una corona de forats, el fluid -aire- s'escapa lliurement cap a l'exterior. La zona del coixí magnètic esdevé un estrangulament, i segons Bernoulli en aquesta zona hi ha menys pressió que a l'exterior. Millora proposada:

- 1- Construir una segona corona de forats de $\varnothing = 1 \text{ mm}$

Segon Assaig

Geometria de la màquina:	Dues corones de forats
Pressió de Treball:	2 atm
Comportament del rotor:	Levita. Es manté estàtic
Conclusions:	Funcionament satisfactori.



6.4- INCREMENT DE DIÀMETRE PER ROTACIÓ. EXPLOSIÓ CENTRÍFUGA

Per tal d'ajustar els entreferros i aconseguir un acoblament magnètic òptim, interessen dades fiables del comportament del ròtor tant en funció de la velocitat de rotació com en funció de la temperatura de treball.

Les altes velocitats de rotació, tenen associades forces centrífugues que no podem menystenir, i que actuen sobre el material com esforços de tracció. Aquest esforços provoquen increments del diàmetre mentre ens movem dins del límit elàstic.

L'allargament d'una barra ve donada per la llei de Hooke:

$$\delta = \frac{P \cdot l}{A \cdot E}$$

essent δ l'allargament

P la força total d'extensió

l la llargada de la barra

A la secció recta de la barra

E el mòdul d'elasticitat

Si s'introdueix el concepte d'esforç de fatiga $\sigma = \frac{P}{A}$ i la definició de

l'allargament de la barra per unitat de llargada $\epsilon = \frac{\delta}{l}$, és evident que $\epsilon = \frac{\sigma}{E}$

Ens podem situar en el cas d'un anell circular. Si aquest anell experimenta forces radials que es troben uniformement distribuïdes per tot el seu perímetre, (i en l'hipòtesi de paret suficientment prima,) per tal de determinar la força d'extensió de l'anell, el

considerarem tallat per una secció diametral, i mirarem la meitat de l'anell com si fos un cos lliure [17]

La força en un element de l'anell determinat per dues seccions rectes radials adjacents, serà:

$$q \cdot r \cdot d\phi$$

essent: q la càrrega uniforme per unitat de llargada de la circumferència de l'anell

r el radi de l'anell

L'angle ϕ és pren en el centre de la circumferència de l'anell. Interessa la component P vertical de totes les forces que actuen en mig anell, que compleix:

$$2P = 2 \int_0^{\pi/2} q r \sin\phi d\phi = 2qr$$

per tant $P = qr$

L'esforç de fatiga, serà:

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{qr}{A}$$

A és la secció recta del anell

Si ens situem en el cas d'un anell circular giratori, la càrrega q per unitat de llargada representarà la força centrífuga per unitat de llargada de l'anell, i ve donada per l'equació:

$$q = \frac{w}{g} \cdot \frac{v^2}{r} \quad \text{essent:} \quad w \text{ el pes de l'anell per unitat de longitud}$$

r el radi mig de l'anell

v la velocitat de l'anell en el radi r

g l'acceleració de la gravetat

γ la densitat del material.

$$\text{Per tant,} \quad P = q \cdot r = \frac{w}{g} \cdot \frac{v^2}{r} \cdot r = \frac{w \cdot v^2}{g}$$

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{w \cdot v^2}{A \cdot g} = \frac{\gamma \cdot v^2}{g}$$

$$\text{l'allargament unitari, serà:} \quad \epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\gamma \cdot v^2}{E \cdot g} = \frac{\gamma \cdot \omega^2 \cdot r^2}{E \cdot g}$$

Ho apliquem al cas concret del tub d'alumini de la màquina sector d'estàtor; Es tracta d'un tub d'alumini ($E= 7.10^5$) amb una densitat de 2.703 Kg/dm^3 , i un radi de $0,03875 \text{ m}$

L'allargament unitari en funció de la velocitat angular, és:

$$\varepsilon = 6,488.10^{-13} \cdot \omega^2$$

L'allargament real del radi en funció de la velocitat angular, serà:

$$\Delta r(\text{mm}) = 2,6.10^{-11} \cdot \omega^2 \quad (\omega \text{ en } \text{min}^{-1})$$

L'esforç de fatiga, en funció de la velocitat angular:

$$\sigma = 4,542.10^{-9} \cdot \omega^2 \quad (\omega \text{ en } \text{min}^{-1})$$

Aquestes dades es poden visualitzar en una taula:

INCREMENT DE RADI I ESFORÇ DE FATIGA EN FUNCIO DE LA VELOCITAT DE ROTACIO . Tub d'alumini $\varnothing = 80 \text{ mm}$

<i>Velocitat</i> (min^{-1})	<i>Increment de Radi</i> (mm)	<i>Esforç de Fatiga</i>
500	0,0000065	0,00113
1.000	0,000026	0,00454
3.000	0,000234	0,0408
5.000	0,00065	0,113
7.000	0,001274	0,222
9.000	0,002106	0,3678
10.000	0,0026	0,454
12.000	0,003744	0,654
14.000	0,005096	0,89
15.000	0,00585	1,02
17.500	0,0079625	1,39
20.000	0,0104	1,82
30.000	0,0234	4,08
50.000	0,065	11,35

6.5- GENERACIÓ DE GRANS CORRENTS A FREQUÈNCIES SUPERIORS A 50 Hz.

A grans trets, els principals mètodes a seguir per tal d'aconseguir grans corrents a freqüències elevades, son:

a) Una etapa de conversió de freqüència mitjançant tiristors en alta tensió (380 V), i posteriorment un transformador que ens porti cap a l'etapa de grans corrents. Una possible aplicació d'aquest sistema son els forns d'inducció.

b) Conversió mecànica. Faríem servir un motor de contínua de velocitat variable, connectat a un generador d'alterna. El generador d'alterna alimenta al transformador que fa de font de corrent. Aquest és un sistema que aniria bé a freqüències lleugerament superiors a la de la xarxa, però que no siguin exageradament altes. Nosaltres hem arribat a aconseguir per aquest sistema algun centenar d'ampers a 250 Hz

c) Alimentar a un generador d'alta corrent mitjançant un motor auxiliar o primer-motor -aquest primer-motor es pot accionar mitjançant qualsevol tipus d'energia-. Pot semblar que és la mateixa solució de l'apartat anterior. En realitat en aquest cas no hi ha transformador. En el cas de l'apartat anterior el generador era una font de tensió, mentre que en aquest cas el propi generador ja és una font de corrent.

d) Construir un prototipus totalment compacte, de manera que en la mateixa màquina experimental ja hi vagin incloses les etapes de transformació tensió-corrent com un element més del disseny. Aquesta és la solució cap on creiem que cal tendir en els futurs prototipus. Pensem que en aquest moment és la solució més elegant i viable de les esmentades.

6.6- BIFÀSIC VERSUS MONOFÀSIC. SENTIT DE GIR I ARRANCADA

Els sistemes polifàsics simètrics, dels quals el trifàsic n'és un exemple, i el sistema bifàsic asimètric (fasors desfasats 90°), aplicats a un debanat de màquina elèctrica (de nombre de fases coincident), donen camps giratoris; és a dir: l'ona d'inducció en l'entreferro està distribuïda sinoidalment en l'espai, i és giratòria en el temps a una velocitat angular que és la de sincronisme.

En **trifàsic**, per exemple, si els fasors representatius de les ones d'inducció en les fases R,S,T son respectivament:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_R(t) &= K \cdot e^{j0} \cdot i_R(t) \\ \mathbf{B}_S(t) &= K \cdot e^{j240} \cdot i_S(t) \\ \mathbf{B}_T(t) &= K \cdot e^{j120} \cdot i_T(t) \end{aligned}$$

i els corrents son:

$$\begin{aligned} i_R(t) &= I_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t) \\ i_S(t) &= I_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t + 120) \\ i_T(t) &= I_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t + 240) \end{aligned}$$

el fasor representatiu de la distribució en l'entreferro de l'ona d'inducció corresponent a la superposició de les tres fases, serà:

$$\mathbf{B}(t) = \mathbf{B}_R(t) + \mathbf{B}_S(t) + \mathbf{B}_T(t)$$

que fent operacions, resulta:

$$\mathbf{B}(t) = 0.5 K I_{\max} \cdot 3 \cdot e^{j\omega t}$$

Per tant en aquest cas el camp resultant és giratori i no hi haurà cap problema per arrancar la màquina. **El mateix resultat serveix per sistemes alimentats en font de tensió i per sistemes alimentats en font de corrent.** Al fer els càlculs, també s'observa que si canviem l'ordre de dues fases, el fasor resultant, serà:

$$\mathbf{B}(t) = 0.5 K I_{\max} \cdot 3 \cdot e^{-j\omega t}$$

i el sentit de gir ha canviat. En trifàsic sempre tenim resolt el sentit de gir i l'arrancada.

Si repetim els càlculs per un sistema **bifàsic de tensions desfasades 90°** i aplicades a una màquina bifàsica, resulta que:

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_A(t) &= K \cdot e^{j0} \cdot i_A(t) \\ \mathbf{B}_B(t) &= K \cdot e^{j90} \cdot i_B(t) \end{aligned}$$

i els corrents, son:

$$\begin{aligned} i_A(t) &= I_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t) \\ i_B(t) &= I_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t + 90) \end{aligned}$$

El fasor resultant de la superposició, serà:

$$\mathbf{B}(t) = \mathbf{B}_A(t) + \mathbf{B}_B(t) = K \cdot I_{\max} \cdot e^{-j\omega t}$$

i es veu clarament que el camp resultant és també giratori; igual que passava abans, un canvi en l'ordre dels corrents, vol dir un canvi en el sentit de gir de la màquina.

En el sistema monofàsic, els mateixos càlculs porten no pas a un camp giratori, sinó a un camp polsant, en efecte:

$$\mathbf{B}(t) = K \cdot e^{j0} \cdot i(t)$$

en aquest cas no cal fer superposició, perquè només hi ha un corrent:

$$i(t) = I_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t) = \frac{I_{\max}}{2} (e^{j\omega \cdot t} + e^{-j\omega \cdot t})$$

i en resulta que:

$$B(t) = K \cdot e^{j0} \cdot \frac{I_{\max}}{2} (e^{j\omega \cdot t} + e^{-j\omega \cdot t})$$

i fent operacions, s'arriba a que:

$$\mathbf{B}(t) = 0.5 K I_{\max} e^{j\omega t} + 0.5 K I_{\max} e^{-j\omega t}$$

En aquest cas resulten dos camps giratoris de la mateixa amplitud i freqüència, però de diferent sentit. Aquest és un resultat conegut amb el nom de teorema de Leblanc, i ens afecta el sentit de gir i l'arrancada. En règim dinàmic (màquina en marxa), el camp que gira en sentit directe és el que dona parell, mentres que el parell antagonista del camp que gira en sentit invers, és poc important. Una màquina d'aquest tipus que pogués arrancar sense cap més component afegit, tindria un sentit de gir aleatori: quan hauria començat a voltar seguiria en el mateix sentit, però en el moment de l'arrancada no sabríem a priori quin serà el sentit de gir.

El que cal fer és afegir a la màquina algun dispositiu que l'ajudi a arrencar, i al mateix temps quedarà definit el sentit de gir.

Tradicionalment s'han fet servir les tecnologies anomenades *motor de fase partida*, i *motor amb condensador d'arrencada*, que en el fons substitueixen durant l'arrencada el sistema monofàsic per un de bifàsic (amb 90° de desfasament). Hi ha encara altres tecnologies possibles:

- a) *Espira d'ombra*
- b) *Arrancada per reluctància*

Ambdues involucren directament el circuit magnètic. AIXÍ ES SIMPLIFIQUEN les actuacions als debanats inductors.

L'espira d'ombra és una espira (bobina) en curtcircuit i que es troba atravesada per una part del flux principal. Aquesta part del flux principal (que és variable en el temps) indueix tensions a l'espira d'ombra, que per ser conductora originen corrents. Aquests corrents, a la vegada originen un flux que s'oposa al principal, i el retrassa 90°.

L'arrancada per reluctància s'obté de la pròpia geometria de la màquina, si ha estat dissenyada com a tal. (veure punt 5.4). Es tracta d'afavorir un dels dos camps giratoris. El circuit magnètic d'un camp i de l'altre hauran de tenir diferent reluctància. Caldrà que en el seu camí un dels dos camps és trobi amb més trams de material ferromagnètic que l'altre. Una possibilitat aplicable en màquines reals, consisteix en variar la forma de les ranures.

7- DISSENY DE LA MÀQUINA DE DOBLE INDUCTOR

7.1- INTRODUCCIÓ

A partir dels criteris de disseny (capítol 4), i de les dades experimentals que han proporcionat els prototipus previs (capítol 5), posem les bases de disseny de la màquina de doble inductor. Cal destacar:

- 1- La perfecta simetria
- 2- La importància dels caps de bobina

A partir d'una de les utilitats previstes per la màquina de doble inductor, en definim el primer paràmetre:

Volem fer voltar un tub d'alumini de Ø80 x Ø75 x 253

Aquest tub forma part d'una aplicació tèxtil. En la versió definitiva al damunt de la part tractora hi ha una continuació del mateix tub on hi té lloc el propi procés de fabricació del tèxtil. La velocitat es preveu elevada en un futur (treball a freqüències superiors a la de la xarxa), però es començarà per construir aquest prototipus pensant en la freqüència normal de xarxa (50 Hz)

En els prototipus previs, el que millor gira és la màquina de canyeria; les seves principals característiques, son:

- a) Gairebé és una capa de corrent
- b) Alimentada en trifàsic

7.2- DEFINIM EL PROTOTIPUS

Dades de Partida:

Rotor: Tub d'alumini Ø80 x Ø75 x 253
Alimentació: Trifàsic 50 Hz

Dades basades en la simetria:

Doble inductor (simetria respecte d'un pla central)
Doble circuit d'alimentació des de la font fins a la part tractora (dos tubs conductors).
Mateixes mides en els dos inductors.
Alimentació dels conductors del estàtor des de la zona intermitja entre els dos inductors. *Conseqüència:* els conductors del estàtor es dirigiran des de l'entreferro central de la màquina, cap als extrems. Al arribar en aquests punts extrems la millor solució (des del punt de vista de la simetria) és unir tots els conductors formant l'estrella del neutre.

Dades basades en la utilitat que hom vol per la màquina:

Rotor exterior (la part tractora va per dins)
L'alimentació elèctrica arriba a la màquina axialment i per les corones més interiors, és a dir per el centre del tub (conseqüència de l'anterior).

L'estrella del neutre ha d'estar en contacte amb tots els conductors de la part tractora; per tant el conductor neutre caldrà que sigui un tub de material conductor (coure). Per el seu interior hi anirà la "línia elèctrica" que uneix la font d'alimentació amb la part tractora de la màquina.

Tot plegat, conductor neutre i conductors de fase -dos per fase- queden instal.lats axialment des de la font d'alimentació fins al punt d'alimentació dels conductors de fase.

Dades tècniques complementàries que dona el mateix disseny

En la part frontal de la màquina (cercles inferior i superior de estàtor), hi ha una zona on els conductors elèctrics deixen de ser axials, i passen a radials: Es el camí des de les ranures on van ubicats cap al tub neutre. En aquestes dues zones han de produir-se efectes de levitació que no han pogut evaluar-se experimentalment en aquest treball i resten com a futures línies de treball. Si és així la màquina pertany a la família de "sense coixinets".

7.3- MIDES DEL ESTÀTOR

Diàmetre exterior: El defineix el propi diàmetre del rotor i la mida d'entreferro:

$$\phi_{ext.} = \phi_{ROTOR} - 2s_p - 2\delta = 80 - 2 * 2,5 - 2 * 1 = 73 \quad \text{mm}$$

Diàmetre interior: Es parteix de l'alçada del jou: (Corrales, 2.07.08)

$$h_y = \frac{K_{Fe}}{2} \left(\frac{D}{p} \right) \frac{B_{\delta o}}{B_{y o}}$$

en el nostre cas:

$K_{Fe}=1$ per ser ferro massís

$D=73 - 2 * h_y$

p_0 = nombre de pols

p = nombre de parells de pols

p és funció del nombre de conductors

$$\left(\frac{B_{\delta o}}{B_{y o}} \right) = 2 \quad \text{per tractar-se d'un nucli de ferro massís}$$

l'equació anterior, queda:

$$h_y = \frac{\frac{K_{Fe}}{2} \frac{73}{p} \frac{B_{\delta o}}{B_{y o}}}{1 + 2 \left(\frac{K_{Fe}}{2} \frac{1}{p} \frac{B_{\delta o}}{B_{y o}} \right)}$$

i se'n poden buscar valors en funció del nombre de pols, així:

p_o	1	2	3	4	5	6	7	8	9
h_y [mm]	29,2	24,33	20,86	18,25	16,22	14,6	13,27	12,17	11,23
$\varnothing_{interior}$ [mm]	14,6	24,34	31,28	36,5	40,56	43,8	46,46	48,66	50,54

Nombre de Conductors: Coincideix amb el nombre de ranures, perquè en aquest tipus de màquines alimentades per corrent, hom col·loca un sol conductor en cada ranura.

Nombre de parells de pols: Al tractar-se d'una màquina alimentada en sistema trifàsic, serà la tercera part del nombre de conductors.

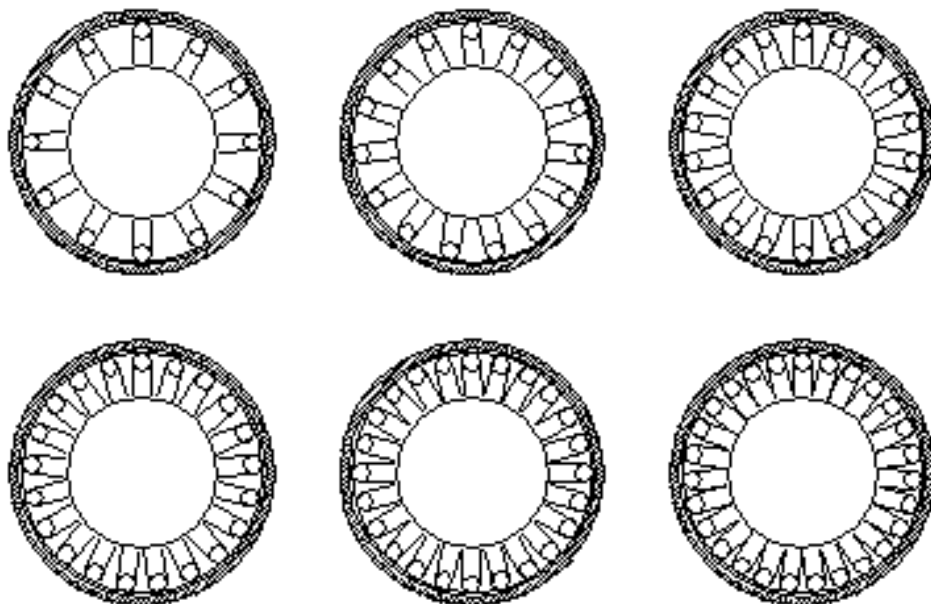
Gruix de les dents: El gruix de les dents és una funció del pas de ranura i de la relació entre la inducció en les dents i en l'entreferro, així:

$$t_o = K_{Fe} \cdot \tau_o \cdot \frac{B_{\delta o}}{B_{dMo}}$$

Resulta interessant obtenir el gruix de les dents en tant per ú del pas de ranura; és immediat que per ferro massís ($K_{Fe}=1$) la relació entre gruix de les dents i pas de ranura, serà la mateixa relació que hom vulgui per les induccions en les dents i en l'entreferro.

Elegim el nombre de ranures.

Arribats a aquest punt s'ha dibuixat una planta de l'estàtor per a diferent nombre de conductors:



Tot seguit s'ha estudiat el pas de ranura i el gruix de la dent per a diferent nombre de conductors:

Nombre de conductors	Pas mínim de ranura [mm]	Pas ranura en l'entreferro [mm]	Gruix mínim de la dent [mm]	Gruix màxim de la dent [mm]	Gruix mig de la dent [mm]
12	9,55	19,11	3,55	13,11	8,33
15	8,49	15,29	2,49	9,29	5,89
18	7,64	12,74	1,64	6,74	4,19
21	6,95	10,92	0,95	4,92	2,94
24	6,37	9,55	0,37	3,55	1,96
27	5,88	8,49	ranures es cavalquen	2,49	1,185

Quan hom ha calculat el pas mínim de ranura i el gruix mínim de la dent ha tingut en compta els resultats que s'havien trobat per el diàmetre interior en funció del nombre de pols -i per tant en funció també del nombre de conductors-

Els càlculs han estat els següents:

$$pas\ mínim\ de\ ranura = \varnothing_{interior} \times \pi / nombre\ de\ conductors$$

$$pas\ ranura\ en\ entreferro = \varnothing_{exterior} \times \pi / nombre\ de\ conductors$$

$$gruix\ de\ la\ dent = pas\ de\ ranura - ampla\ de\ ranura$$

i recordar que en aquest tipus de màquina només hi va un conductor en cada ranura

El gruix de la dent es determinant i ens defineix com a possibles les màquines de 12-15-18 conductors. **Hom es decideix per la màquina de 15 conductors.** Mecànicament en resulta una solució de compromís pensant sobretot en la quantitat de soldadures que caldrà fer a l'hora del muntatge. Elèctricament un múltiple de 5 pot ajudar a eliminar o minimitzar alguns harmònics indesitjables.

Comprovació de la inducció en les dents

En la màquina elegida (15 conductors), i fent servir l'expressió que relaciona pas de ranura, gruix de dents i induccions:

$$t_o = K_{Fe} \cdot \tau_o \cdot \frac{B_{\delta o}}{B_{dMo}}$$

resulta que:

$$B_{dMo} = \frac{K_{Fe} \cdot \tau_o}{t_o} B_{\delta o}$$

a) zona més interior: $B_{dMo} = 1 \times 8,49 / 2,49 B_{\delta o}$ és a dir $B_{dMo} = 3,41 B_{\delta o}$

b) zona intermitja: $B_{dMo} = 1 \times 11,89 / 5,89 B_{\delta o}$ és a dir $B_{dMo} = 2,01 B_{\delta o}$

c) zona més exterior: $B_{dMo} = 1 \times 11,29 / 9,29 B_{\delta o}$ és a dir $B_{dMo} = 1,65 B_{\delta o}$

Llargada del estàtor

Una vegada definits diàmetres, nombre de conductors (ranures), i disposició dels conductors, passem a considerar la llargada de la màquina:

a) S'ha definit com a màquina de doble inductor; vol dir que la llargada de la màquina haurà de contemplar la dels dos inductors.

- b) S'ha detectat com a molt important la simetria, i això pressuposa alimentar elèctricament per la zona compresa entre els dos inductors. Es un suplement de llargada que caldrà afegir.
- c) Definim la llargada d'un dels inductors tot seguint criteris clàssics de disseny de màquines elèctriques.

Primerament es fa servir l'expressió paramètrica de la f.e.m. com ja s'ha comentat en els capítols d'introduccions teòriques, que ve donada per:

$$E_f = \frac{1}{22.5} \cdot \frac{f}{100} \cdot n_{pf} \cdot (\xi \cdot Z_n) (D \cdot L) \cdot B_\delta$$

- n_{pf} és el nombre de ranures per pol i fase, que en la nostra màquina és igual a 1
- f és la freqüència; començarem per considerar la freqüència industrial, però comptant que temps a venir pot interessar fer assaigs a freqüències més elevades
- ξ és el factor de bobinat que per el nostre cas prenem igual a 1
- Z_n és el nombre de conductors per ranura (1 en aquest cas)
- D és el diàmetre calculat (7,3 cm)
- B_δ és la inducció en l'entreferro, que prenem de 0,8 T segons dades experimentals de màquines construïdes, i per valors tabulats, i també per experiència pròpia.
- E_f la f.e.m. la prendrem igual a 1 V quan treballa a freqüència industrial, i així ens quedem amb la possibilitat de treballar a freqüències molt més elevades, si fes falta. Òbviament quan treballéssim a aquestes freqüències més elevades, els valors de la inducció podrien ésser més petits.

Si en l'expressió de la f.e.m. el que es busca és la llargada, pot expressar-se com:

$$L = E_f \cdot 22,5 \cdot \frac{100}{f} \cdot \frac{1}{n_{pf}} \cdot \frac{1}{(\xi \cdot Z_n)} \cdot \frac{1}{D} \cdot \frac{1}{B_\delta}$$

amb les dades que s'han establert, queda:

$$L = 7,7 \text{ cm}$$

aquest valor s'arrodoneix a **L= 80 mm** per fer-lo coincidir amb el diàmetre del ròtor, que -recordem-ho-, en aquest cas és extern

7.4- LLARGADA DE LA MÀQUINA

A la llargada dels dos inductors cal afegir-hi l'alimentació elèctrica dels conductors del estàtor.

Circuit Elèctric

- a) Alimentació trifàsica. Font de corrent
- b) Tots els conductors en paral·lel
- c) Retorn per conductor neutre coincident amb el punt estrella de la màquina. Aquest conductor neutre anirà per l'interior de l'inductor. Serà un conductor de *Cu* elèctricament aïllat del *ferro* de la màquina.
- d) Els conductors que alimenten les fases (per entendre'ns la *línia elèctrica* d'alimentació) van per l'interior de la màquina, per tal de no interferir amb el moviment rotatori del rotor extern. A efectes de densitats de corrent, disposem de dos conductors per fase
- e) L'alimentació de *cada conductor* es porta a terme a partir de tres anells distribuïdors (un per fase), separats entre ells i dels inductors per mitjà de juntes de teflón -que a la vegada ajuden al centratge mecànic-
- f) Cal dimensionar els anells distribuïdors i els conductors de línia

Dimensionat del circuit elèctric

1-Dimensionat dels conductors de línia

a) Criteri de les c.d.t.: El criteri de les caigudes de tensió, en aquest cas vol dir que tots els conductors de línia tinguin la mateixa c.d.t. *Això és perquè en els prototipus previs s'ha fet molt evident -en aquest tipus de màquines- la importància dels caps de bobina.* La única limitació és una limitació de muntatge mecànic:

1- Hom podria aconseguir la mateixa llargada per les tres línies si alimentàvem per els dos extrems de la màquina. Aquest cas ideal, elèctricament parlant, comprometria molt seriosament les posteriors utilitzacions de la màquina.

2- Si alimentem per un sol extrem hi haurà un petit desequilibri (degut a les diferents llargades), en la línia de transport. Vol dir que el sistema trifàsic que arribarà a l'inductor no podrà gaudir d'una manera plena dels adjectius *equilibrat i simètric*. La decisió que hom ha pres, ha estat **alimentar per un sol extrem**.

b) Criteri de les densitats de corrent:

1-Prenem com a valor unitari de la densitat de corrent, la densitat del corrent que circula per els conductors del inductor:

$$I_{\text{inductor}} = N \cdot S \cdot A$$

N = núm. conductors. Prendrem N=10 conductors (5 per fase en cada inductor)

S = secció del conductor (mm²)

A = densitat de corrent. Aquesta és una dada desconeguda -a priori-, que prendrem igual a 1 A/mm². D'aquesta manera hom pot saber la densitat de corrent per els altres conductors, com una funció de la densitat de corrent a l'inductor; millor encara: en tant per ú de la densitat de corrent en l'inductor.

$$I_{\text{inductor}} = 10 \times (5^2 - 3^2) \times \pi / 4 = 125,7$$

2- Secció requerida en els conductors de línia.

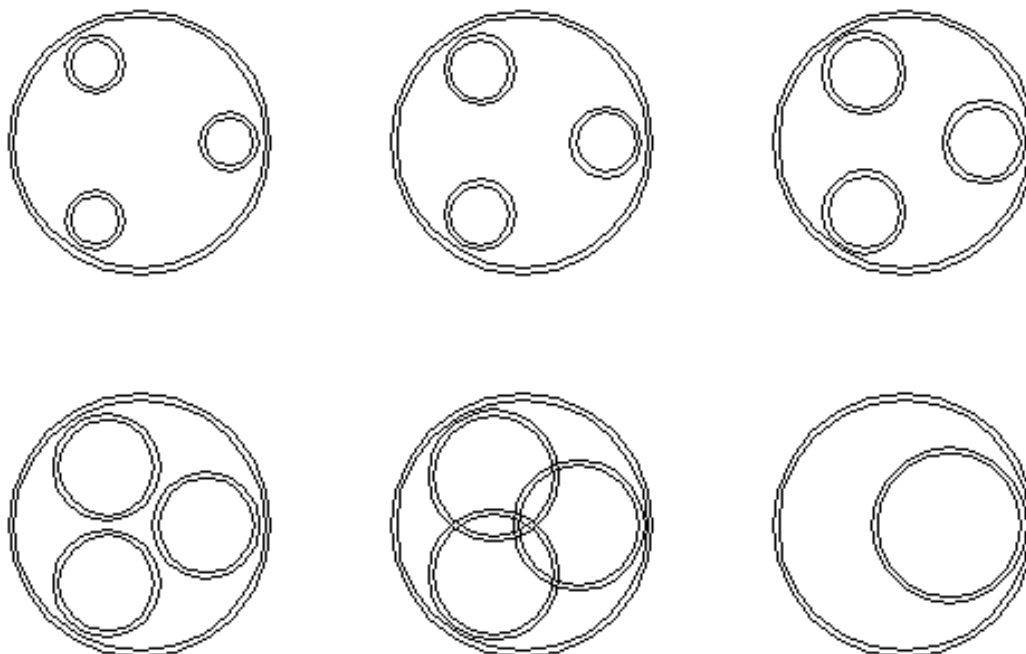
En tant per ú han de portar $125,7 \text{ A/mm}^2$. Prèviament s'ha fet una consulta al fabricant per tal de saber quines son les mides normalitzades que ens poden ofertar. Els càlculs son calcats que els de l'apartat anterior. Les dades del fabricant juntament amb els càlculs, es fan evidents en la taula següent:

Dimensions del conductor $\varnothing_{\text{interior}} \times \varnothing_{\text{exterior}}$ [mm]	Secció de 1 conductor de línia [mm ²]	Densitat de corrent línia per 1 A/mm ² en els conductors de l'inductor i 1 cond. de línia per fase [A/mm ²]	Densitat de corrent línia per 1 A/mm ² en els conductors de l'inductor i 2 cond. de línia per fase [A/mm ²]
Ø8xØ10	28,27	4,44	2,22
Ø10xØ12	34,56	3,60	1,80 ***
Ø12xØ14	40,84	3,08	1,54
Ø16xØ18	53,4	2,36	1,18
Ø20xØ22	65,97	1,90	0,95
Ø24xØ26	78,54	1,60	0,80

Salta a la vista que el cas més favorable des del punt de vista del circuit elèctric, es posar dos conductors de línia per cada fase i de $\varnothing 24 \times \varnothing 26 \text{ mm}^2$. Mecànicament no hi tenen suficient espai per a poder-los-hi ubicar. Altrament i des del punt de vista de la *simetria* val la pena pensar en una distribució basada en dos conductors de línia per cada fase

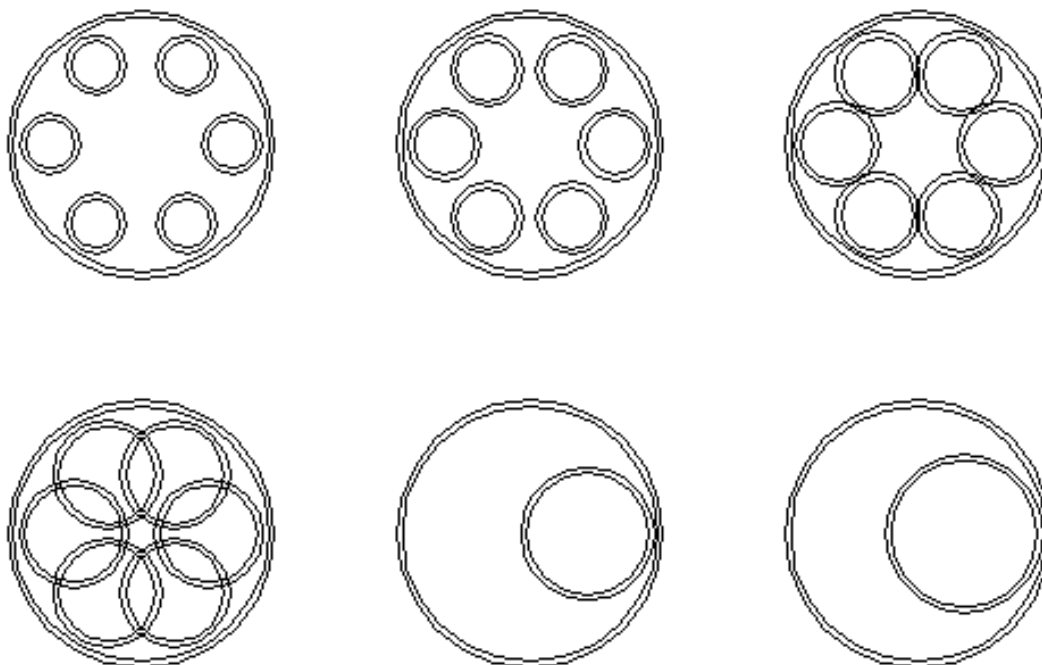
c) Distribució mecànica dels conductors de línia en l'interior de la màquina.

CAS DE UN SOL CONDUCTOR DE LÍNIA



En la figura anterior, d'esquerra a dreta, i de dalt a baix, es mostra en tots els casos un tub de Cu de $\varnothing 42 \times \varnothing 44$ que es el conductor de retorn (l'estrella del neutre). Els conductors interiors tenen respectivament les següents mides: $\varnothing 8 \times \varnothing 10$; $\varnothing 10 \times \varnothing 12$; $\varnothing 12 \times \varnothing 14$; $\varnothing 16 \times \varnothing 18$; $\varnothing 20 \times \varnothing 22$; $\varnothing 24 \times \varnothing 26$.

Els dos darrers no son practicables mecànicament a manca d'espai.
CAS DE DOS CONDUCTORS DE LÍNIA



En aquesta figura les mides dels conductors segueixen la mateixa seqüència que en la figura anterior. Aquí, però, s'han considerat dos conductors de línia per fase.

d) Dimensions elegides per el conductor de línia

Per raons d'ubicació física (veure figures), i per tal de respectar al màxim les simetries, s'elegeix: **dos conductors per fase de $\varnothing 10 \times \varnothing 12$** . En aquest cas, la densitat de corrent és de $1,80 \text{ A/mm}^2$ en la línia, quan es té 1 A/mm^2 en els conductors de l'inductor. Encara que sigui un 80% superior, hem de tenir en compta que la refrigeració dels conductors de línia serà òptima: més salt tèrmic i doble refrigeració (Veure apartat 7.10 *Circuit Tèrmic*)

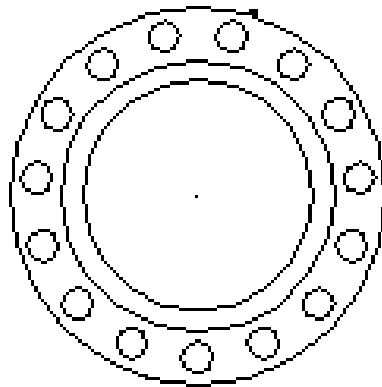
2- Dimensionat dels anells distribuïdors

Es fa servir el criteri de les densitats de corrent. Estudiarem la densitat de corrent en la secció recta de l'anell del distribuïdor.

a) FORMA DE L'ANEL·L DEL DISTRIBUÏDOR

- Mecànicament ha de tenir forma toroïdal, de secció recta quadrada.

- La cavitat interior cal que sigui buida, per tal de permetre la circulació del fluid refrigerant (que en principi ha de ser aigua)
- La secció recta útil per el circuit elèctric (secció de Cu), cal que sigui la més propera als conductors de línia de l'inductor



b) Dimensionat de l'anell del distribuïdor:

$$\left(\frac{73-44}{2}\right) \cdot 5.2 + \left(\frac{52-44}{2}\right) \cdot 15 = 205 \text{ mm}^2$$

En principi aquests 205 mm² de secció recta del torus, son superiors als 125,7 mm² que sumen les seccions rectes de tots els conductors de l'induït d'una fase, i l'acceptem com a vàlid des del punt de vista elèctric.

Càlcul de la llargada de la màquina

$$L_{\text{maqu.}} = 2L + 3l + 4g$$

L_{maq} = Llargada de la màquina

l = Llargada d'un dels anells del distribuïdor

g = Gruix d'una de les juntes de separació

$$L_{\text{maqu.}} = 2 \times 80 + 3 \times 25 + 4 \times 2 = 243 \text{ mm}$$

7.5- JUNTES DE SEPARACIÓ

a) Tasques encomanades a les juntes de separació:

- Separació elèctrica entre distribuïdors d'una i altra fase
- Separació elèctrica entre distribuïdors i ferro de l'inductor
- Aïllament tèrmic entre inductor i fases
- Centratge mecànic del tub rotòric

b) Especificacions de les juntes de Separació:

Material: Teflón

Mides: Ø75 x Ø44 x2

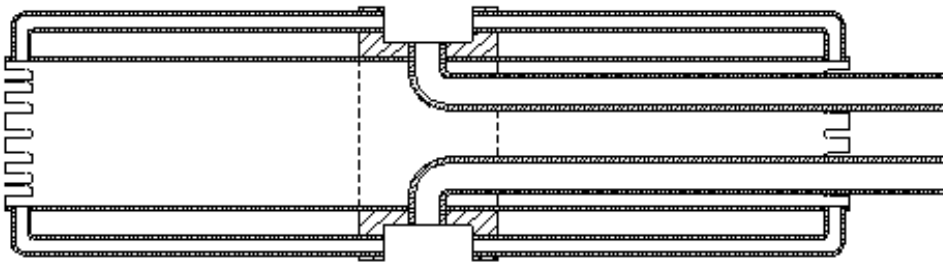
7.6-CIRCUIT ELÈCTRIC. CIRCUIT MAGNÈTIC

El circuit elèctric consta de:

- Font d'alimentació externa
- Conductors de línia (des de la font al distribuïdor)
- Distribuïdor (un per fase)
- Conductors de l'induït
- Punt estrella (neutre de retorn)

L'esquema físic per fase del circuit elèctric, és:

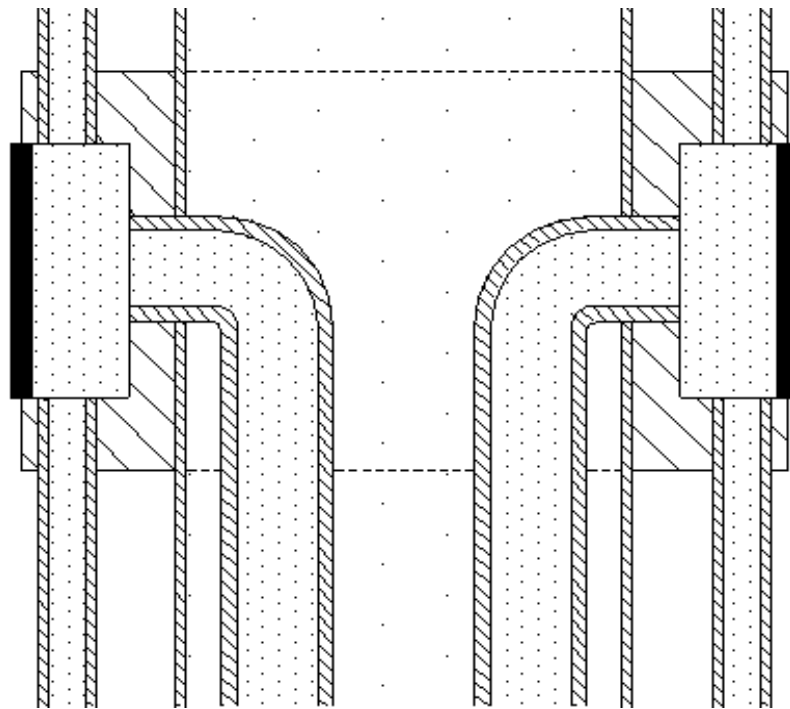
L'esquema complert repeteix tres vegades el de la figura, per tractar-se d'un sistema d'alimentació en trifàsic. Els dos conductors de línia son els que es veuen per la



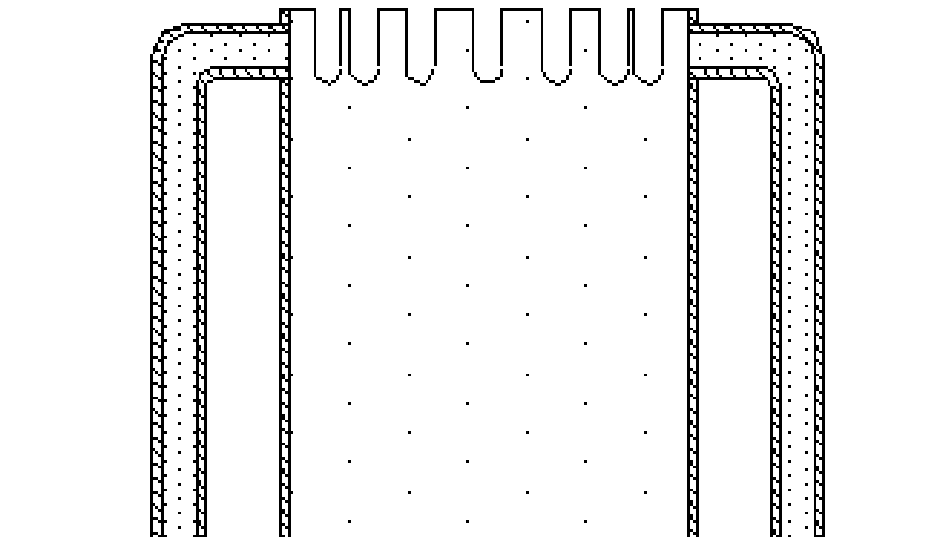
part interior del tub, fins al distribuïdor. A partir del distribuïdor, s'observa que hi ha dos jocs de conductors, un joc per cada inductor. Els conductors de l'inductor son cinc per fase, encara que el dibuix només en mostra dos.

El camp magnètic el creen els corrents que circulen per els conductors de l'inductor. El camí magnètic queda constituït per el ferro de l'estàtor, els dos entreferros, i el tub del rotor, que es de material no-ferromagnètic.

7.7- CIRCUIT HIDRÀULIC



La figura mostra un detall del circuit hidràulic en el distribuïdor. Els conductors elèctrics son tubs de Cu que permeten la circulació de l'aigua de refrigeració per el seu interior



Aquesta segona figura mostra un detall de la connexió entre els conductors de l'induït i el tub que fa de conductor neutre. La part interior del tub que fa de neutre,

serveix de retorn de l'aigua de refrigeració. Els conductors de línia queden refrigerats per dins i per fora.

7.8-CIRCUIT DIELÈCTRIC. CONSIDERACIONS DE MUNTATGE

Els aïllants o dielèctrics que hom fa servir en el muntatge d'aquest prototipus, son els següents:

-Aïllament de fibra de vidre:

- a) En els conductors de línia
- b) En els conductors de l'induït
- c) En el conductor neutre per el cantó del ferro del estàtor
- d) Per separar el conductor neutre i els distribuïdors

-Pintura (de silicats) aïllant:

- a) En la part exterior del conductor neutre
- b) En la part interior dels distribuïdors
- c) En els laterals dels distribuïdors
- d) En la part interior del ferro del estàtor
- e) En els laterals del ferro del estàtor

-Separadors de teflón:

- a) Per separar els distribuïdors de les diferents fases
- b) Per separar els distribuïdors i el ferro del estàtor

Per tractar-se de tensions molt petites (2 V), no cal pensar en gruixos de dielèctric. El gruix del dielèctric podrà ser menyspreable. En el muntatge cal assegurar per tots i cada un dels casos que no hi ha comunicació elèctrica entre aquells components del prototipus que necessàriament han de treballar a un potencial diferent.

7.9- ESPECIFICACIONS CONSTRUCTIVES DE LA MAQUINA

La màquina consta de:

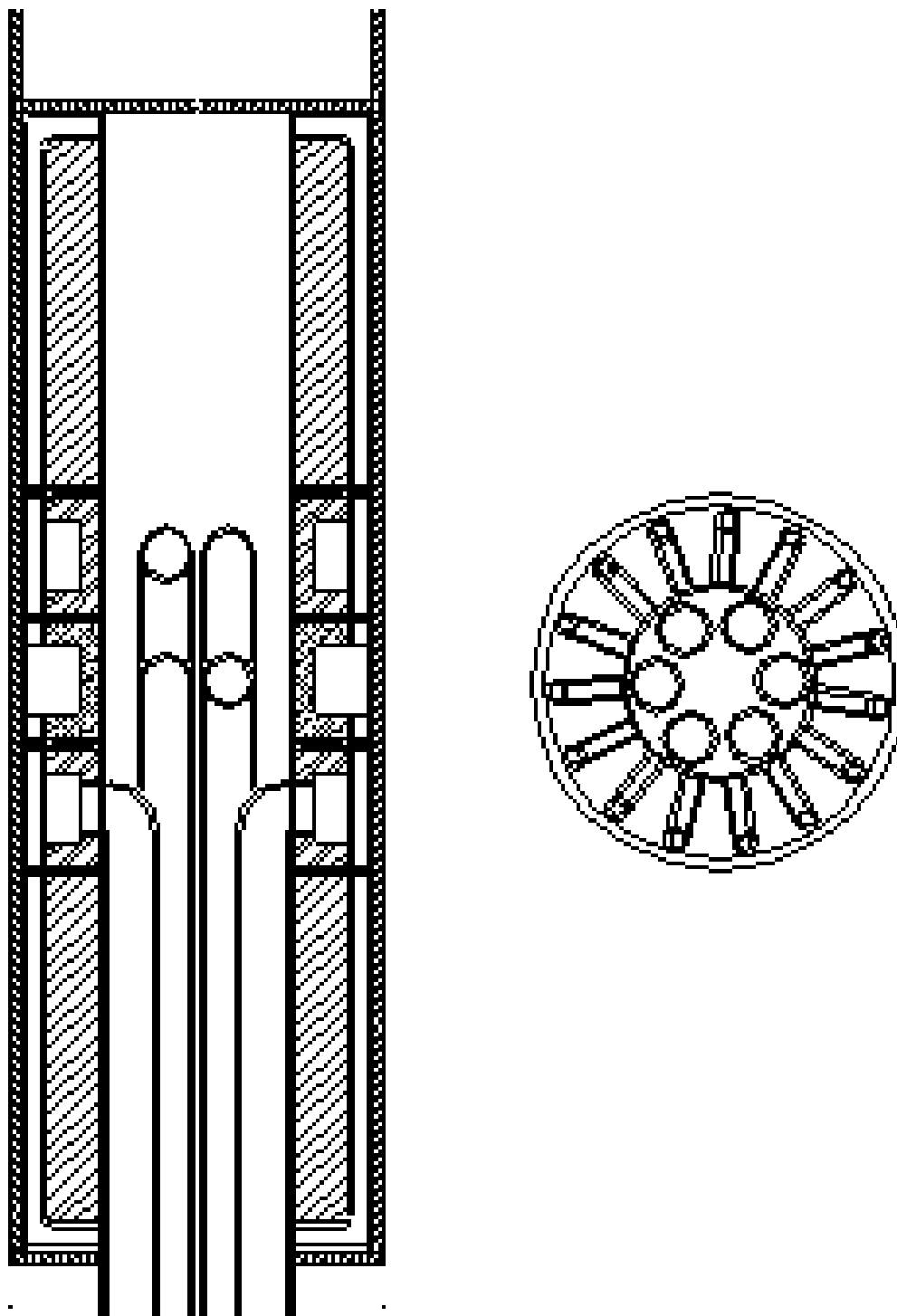
a) Estàtor:

- 1 Tub de retorn del neutre i suport del conjunt
- 3 Anells del distribuïdor
- 4 Juntes de Teflón
- 2 Estàtor-Inductor
- 6 Conductor de Línia
- 30 Conductor de induït
- Aïllants varis i dielèctrics

b) Rotor:

- 1 Tub Alumini Ø80 x Ø75

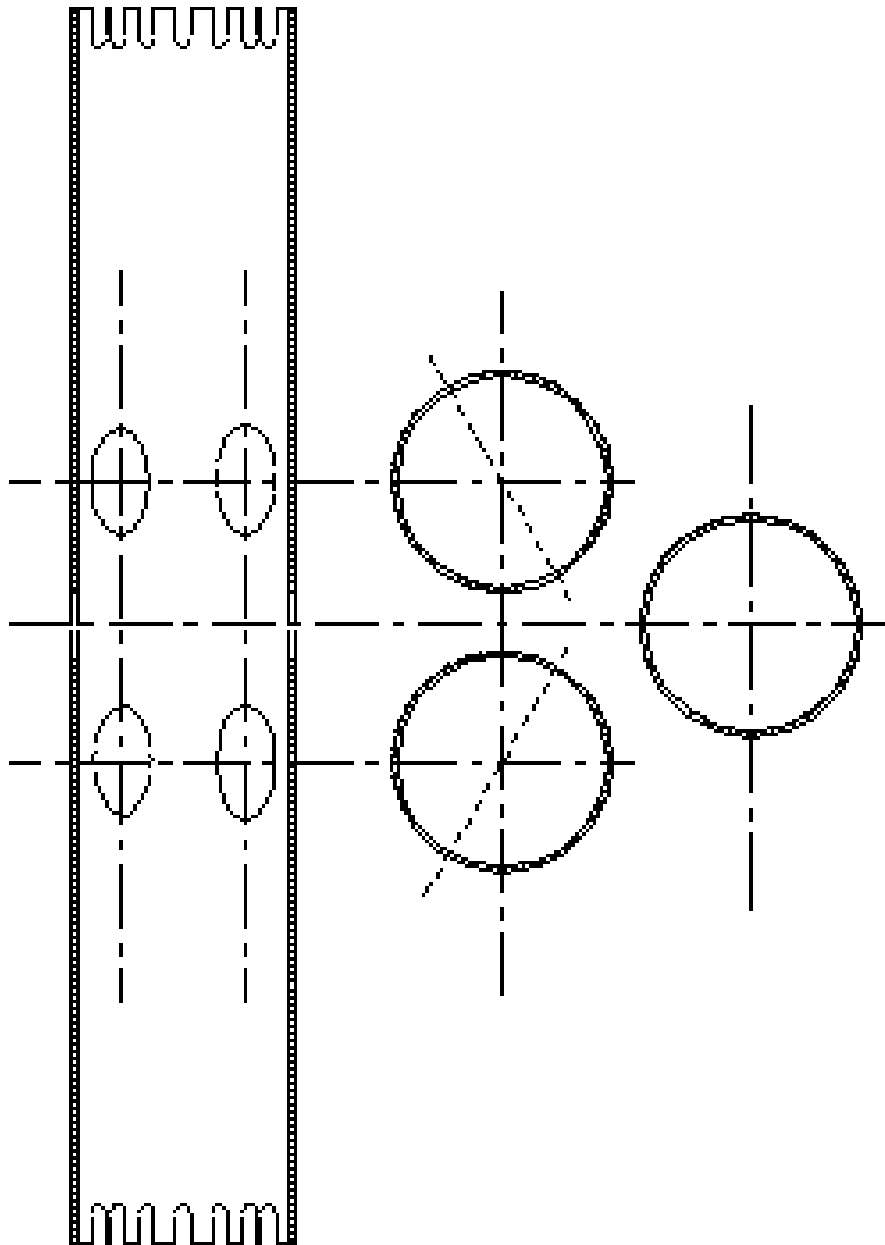
L'Esquema de Conjunt, és el de la figura adjunta:



7.10- COMPONENTS MECÀNICS. LLISTA DE PECES A MECANITZAR

S'exposa el procés de mecanitzat d'aquelles peces que haurà de fabricar el taller mecànic, com a pas previ al muntatge del prototipus:

Tub del Neutre

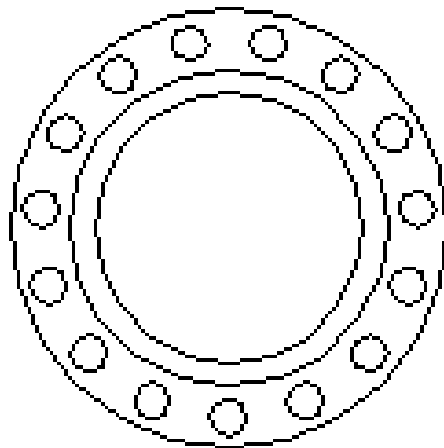
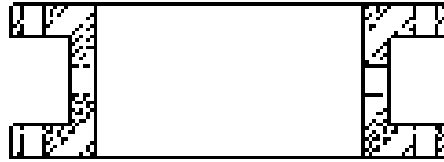


Material de Partida: Tub de Cu Ø44x Ø42

Número de Peces: 1

Operacions de Mecanitzat: Serra
Fresa
Traçat
Trepants
Ajustatge

Anells del Distribuïdor

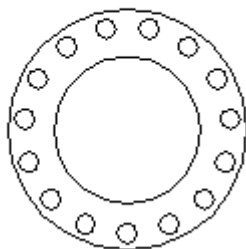
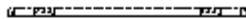


Material de Partida: Dolla de Cu Ø43 xØ74

Numero de Peces: 2

Operacions de Mecanitzat: Serra
Torn
Traçat
Trepants
Ajustatge

Juntes de Teflón

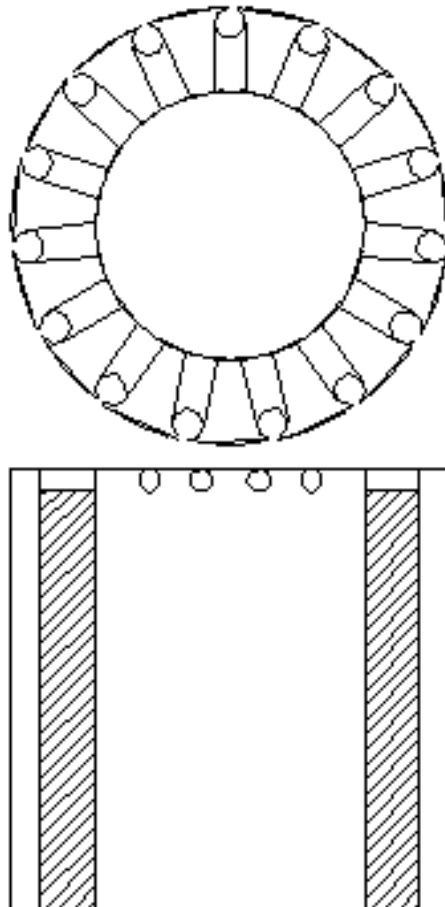


Material de partida: Làmina de teflón de 1 mm de gruix

Numero de peces: 4

Operacions de mecanitzat: Traçat
Ajustatge
Torn
Trepants
Ajustatge

Ferro de l'inductor



Material de partida: F-111

Número de peces: 2

Operacions de mecanitzat: Serra
Torn
Fresa
Traçat
Trepants
Mandrinadora
Ajustatge

7.11- COMPONENTS MECÀNICS. PECES A CONSTRUIR PER L'AJUSTADOR-MONTADOR

Es tracta d'un total de 36 peces en forma de conductor elèctric. En realitat totes aquestes peces son de Tub de Cu. Permet el pas del corrent elèctric i del refrigerant i acaba en colze de 90° tal i com es veu en els esquemes dels circuits elèctric i hidràulic. Hi ha diferents llargades i diàmetres, com es mostra en la taula adjunta:

Mides tub	Llargada útil conductor	Nombre de peces
Ø12 x Ø10	137	2
Ø12 x Ø10	163	2
Ø12 x Ø10	111	2
Ø5 x Ø3	119	10
Ø5 x Ø3	145	10
Ø5 x Ø3	93	10

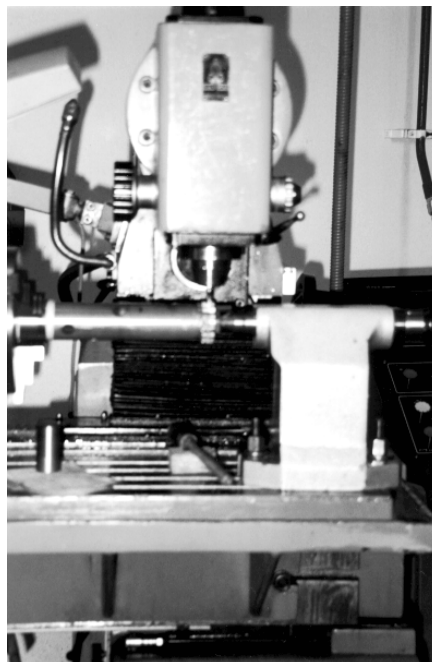
8- CONSTRUCCIÓ DE LA MÀQUINA DE DOBLE INDUCTOR

8.1-MECANITZAT

L'únic component amb especials dificultats de mecanitzat ha estat el tub del conductor neutre:



El treball de mecanitzat s'ha portat a terme íntegrament en el taller mecànic de l'ETSIIB



Quan s'han mecanitzat cada una de les peces, s'ha fet pensant en el muntatge. S'ha tingut especial cura de la situació relativa dels taladres i de les entalles. Les toleràncies han estat totes passants; en cap cas les diferents peces podrien quedar

mecànicament clavades, perquè en aquell cas no haurien estat possibles les capes d'aïllants.



8.2- PROCEDIMENT DE MUNTATGE: CIRCUIT ELÈCTRIC I CIRCUIT DIELÈCTRIC

a) Muntatge conductors de línia:

- 1- Pintar la cara lateral exterior del tub neutre-estrella amb barnís aïllant.
- 2- Començar seqüència de muntatge de l'anell distribuïdor fase S (anell central)
- 3- Pintar cara lateral interior anell distribuïdor amb barnís aïllant.
- 4- Encintar amb fibra de vidre la superfície de contacte anell/tub-del-neutre
- 5- Ubicació de l'anell distribuïdor en el seu lloc a la màquina
- 6- Soldadura del primer tub-conductor de línia de fase actual
- 7- Comprovar continuïtat elèctrica i aïllament dielèctric
- 8- Comprovar estanquitat hidràulica de la soldadura
- 9- Repetir passos 6 a 8 per segon tub de línia de fase actual
- 10- Ubicar la junta (o juntes) d'aïllament de teflón.
- 11- Comença seqüència de muntatge anell distribuïdor fase R (lateral)
- 12- Repetir passos 3 al 10 per distribuïdor i línia fase R
- 13- Comença seqüència de muntatge anell distribuïdor fase T (lateral)
- 14- Repetir passos 3 al 10 per distribuïdor i línia fase T

b) Preparació conductors de l'induït (Ajustatge)

- 1- Es parteix de tub de Cu de $\varnothing 5 \times \varnothing 3$
- 2- Tallar 6 jocs de 5 peces (mides presentar sobre la màquina)

3- Ajustatge. Seqüència per cada una de les 30 peces:

3.1- Doblar corba de 90°

3.2- Tallar pestanya

3.3- Doblar pestanya

4- Treure rebabes, ajustar, polir (cada una de les 30 peces)

5- Aïllar amb capa de fibra de vidre (tub de fibra de vidre sobre tub de Cu)

c) Muntatge conductors de l'induït

1- Pintar cara lateral interior d'un dels inductors amb barnís aïllant

2- Encintar amb fibra de vidre la zona de contacte inductor/tub-del-neutre

3- Donar capa de polièster de 0,4 mm sobre l'encintat anterior

4- Assecar al forn (10 minuts a 90°)

5- Presentar l'inductor en el seu lloc a la màquina (Cantó contrari a tubs línia)

6- Comprovar aïllament dielèctric

7- Muntar els 15 conductors de l'induït:

7.1- Presentar un conductor en el seu lloc a màquina

7.2- Aplicar desoxidant en les zones de soldadura

7.3- Soldar

7.4- Comprovar continuïtat elèctrica conductor

7.5- Comprovar aïllament dielèctric

7.6- Comprovar estanquitat hidràulica

7.7- Ajustatge

7.8- Repetir els passos en conductor següent fins acabar.

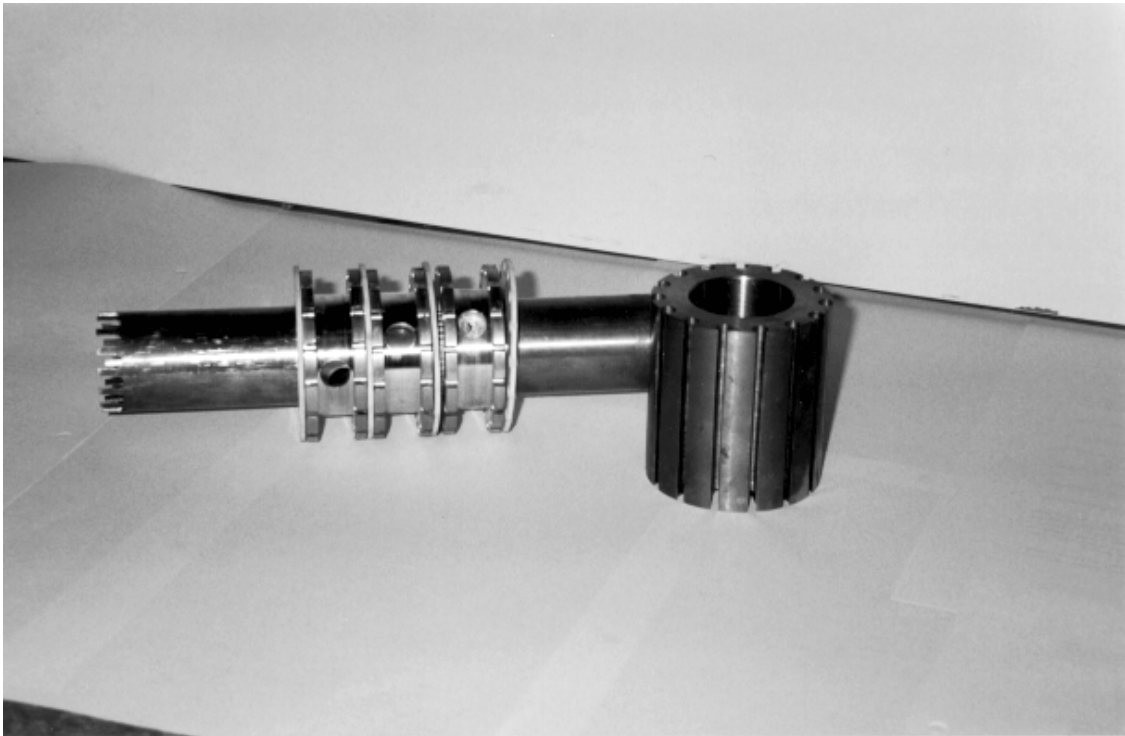
7.9- Seqüència de muntatge de conductors: a) mides curtes

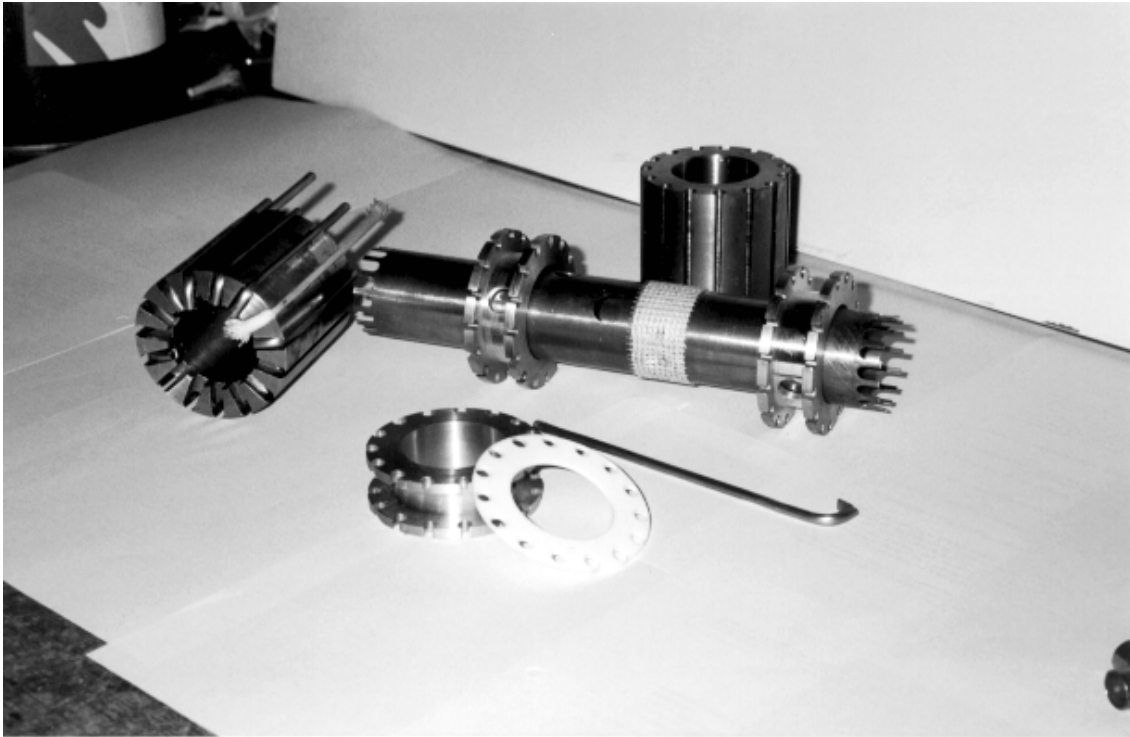
b) mides mitjanes

c) mides llargues

8- Comprovar aïllament dielèctric de tot el conjunt

9- Comprovar estanquitat hidràulica de totes les soldadures.





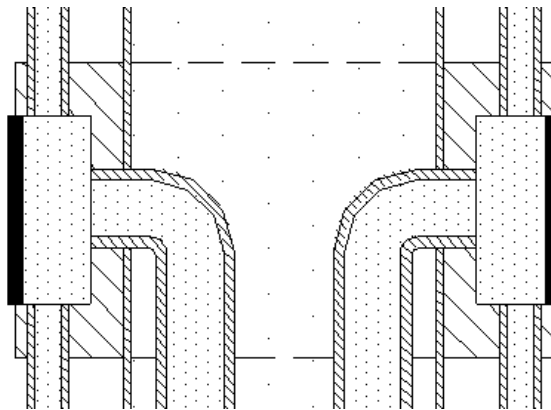
8.3- MUNTATGE: CIRCUIT TÈRMIC I CIRCUIT HIDRÀULIC

El circuit **tèrmic** està format per el propi conductor elèctric, on es genera l'escalfor (efecte Joule) directament en contacte amb el fluid refrigerant. No escau cap més comentari.

El circuit **hidràulic** ha de permetre la circulació del refrigerant -aigua-. Ha d'assegurar l'estanquitat.

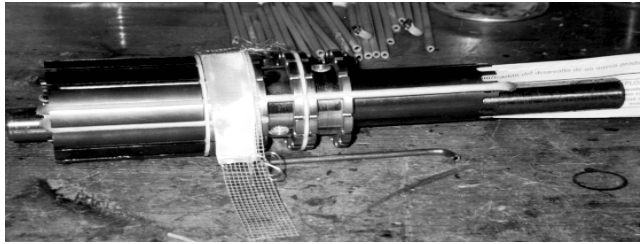
1- Hom comença per impregnar totes les juntes amb poliester. Es fa especial esment en les zones interiors als distribuïdors. Assecatge al forn.

2- Capa de silicona líquida de sellat de totes les juntes. Comprovar el bon vulcanitzat a l'aire de la silicona



3- Presentar xapa de Cu per a construir un cilindre de tancament en cada un dels distribuïdors.

- 4- Soldadura de la xapa de Cu tot tancant hidràulicament cada un dels tres distribuïdors.
- 5- Sellat de totes les soldadures amb silicona.
- 6- Comprovació estanquitat hidràulica.



8.4- MUNTATGE: CIRCUIT MECÀNIC. AJUSTATGE

L'estàtor queda íntegrament muntat quan hom ha acabat de muntar el circuit elèctric i el circuit hidràulic. Les juntes de teflón de separació dielèctrica, també faran un centratge mecànic del rotor quan la màquina funciona. Cal ajustar aquestes juntes amb el tub del rotor:

- 1-Presentar tub del ròtor conjuntament amb l'estàtor
- 2-Prova de centratge
- 3-Torneijat de les juntes de teflón (al torn, conjuntament amb resta del estàtor)
- 4-Prova de centratge definitiva
- 5-Soldar tap d'alumini a la part superior del tub rotòric
- 6-Ajustatge

9- ESTUDI DE LA MÀQUINA DE DOBLE INDUCTOR PER SIMULACIÓ

9.1- GEOMETRIA ELEGIDA. SIMULACIÓ EN 2-D

Es fa mitjançant una versió per estudiants del programa informàtic Qfields de càlcul per elements finits -com en capítols anteriors-. Aquest programa només permet treballar en un espai de dues dimensions.

a)Es fa una simulació del camp en la secció recta de l'induït, -amb els seus conductors i el ròtor-, en un instant determinat.

b)Es repeteix la simulació per a diversos valors instantanis tot al llarg d'un període.

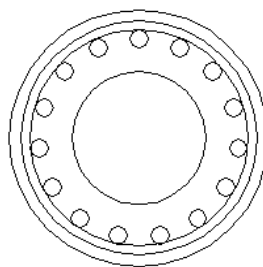
9.2- SIMULACIÓ DEL CAMP MAGNÈTIC. VALOR INSTANTANI

Programa Utilitzat: Qfields. Versió reduïda. Permet 500 nodes màxim.

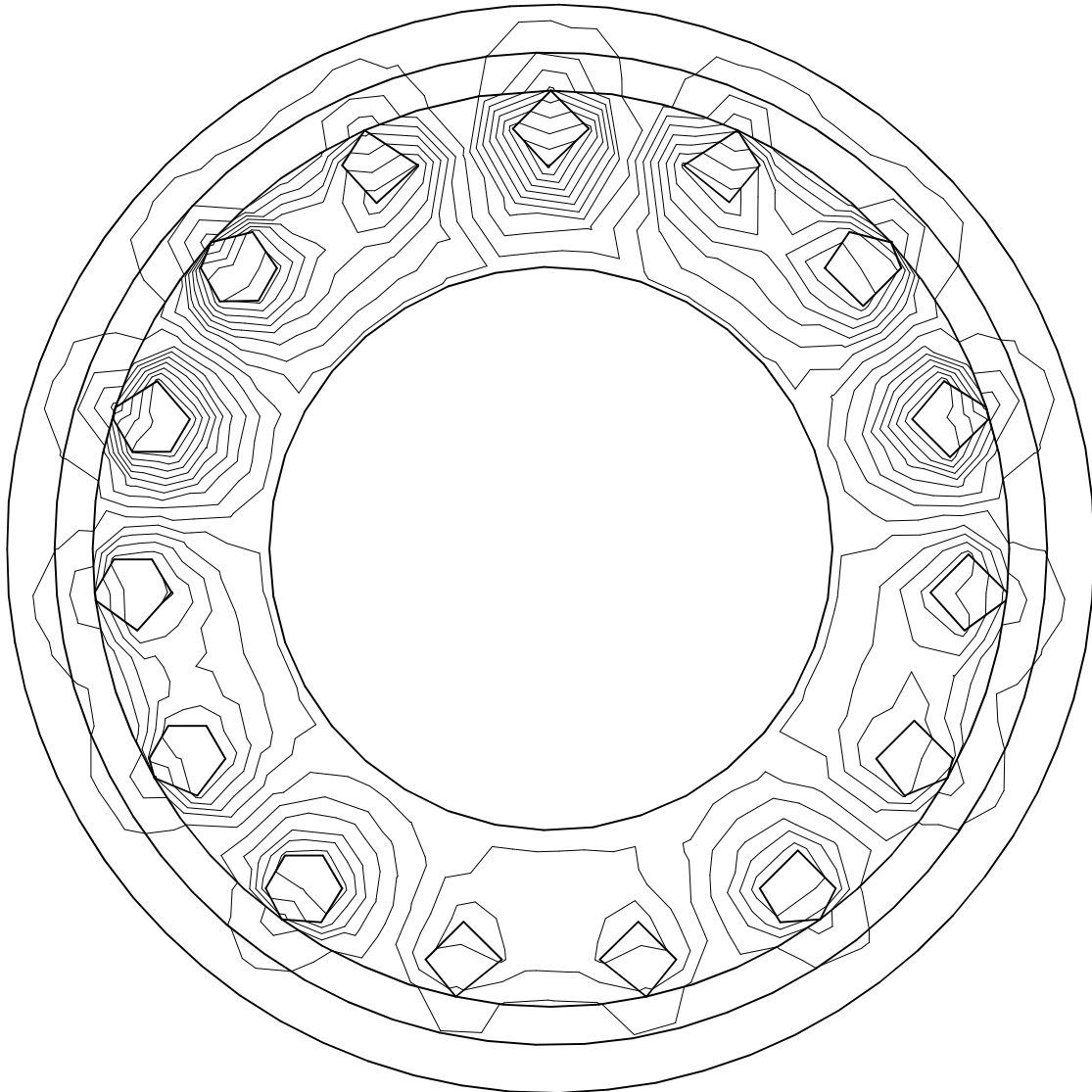
Corba B-H utilitzada en la simulació:

B (T)	H(A/cm)
0	0
1	4
1,1	4,4
1,2	5
1,3	7
1,4	10,5
1,6	27
1,7	48
1,8	80

Geometria utilitzada:



Visualització de les **línies de camp**:



9.3- SIMULACIÓ DEL CAMP MAGNÈTIC. AL LLARG D'UN PERÍODE

Programa Utilitzat: Qfields. Versió reduïda. Permet 500 nodes màxim.

Corba B-H utilitzada en la simulació:

(veure apartat anterior)

Geometria utilitzada: *(mateixa apartat anterior)*

Valors que s'han considerat per els **corrents instantanis** en cada fase:

A) HIPÒTESIS DE CÀLCUL:

1-Aquesta simulació es fa en la fase de disseny del prototipus

2-Es pren una densitat de corrent igual a la que s'ha aplicat al prototipus d'arrencada per reluctància (Prat-3) just quan comença a girar: 24 A/mm^2 (eficaç) en cada conductor. Representa $33,76 \text{ A/mm}^2 = 33760000 \text{ A/m}^2$ (en valor màxim)

Recordar que en les especificacions de la màquina d'arrencada per reluctància, el corrent de règim treballant en monofàsic i 8 conductors de $\text{Ø}5 \times \text{Ø}3$, era de 1200 A, és a dir:

$$\frac{1200A}{4\text{cond}} = 300A / \text{cond} = \frac{300}{(5^2 - 3^2) \cdot \pi} = \frac{300}{4 \cdot \pi} = \frac{75}{\pi} = 23,87 \text{ A/mm}^2$$

i en valors màxims $33,76 \text{ A/mm}^2$

3-La forma d'ona a considerar per el corrent en cada una de les fases, és:

$$\begin{aligned} i_R(t) &= 33,76 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t + \varphi) \\ i_S(t) &= 33,76 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3} + \varphi) \\ i_T(t) &= 33,76 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot t + \frac{4 \cdot \pi}{3} + \varphi) \end{aligned}$$

4-Per comoditat ho buscarem per un instant de $t=0$, i el que es fa és variar el valor de l'angle φ ; ($0 \leq \varphi \leq 360$). Els valors instantanis, son:

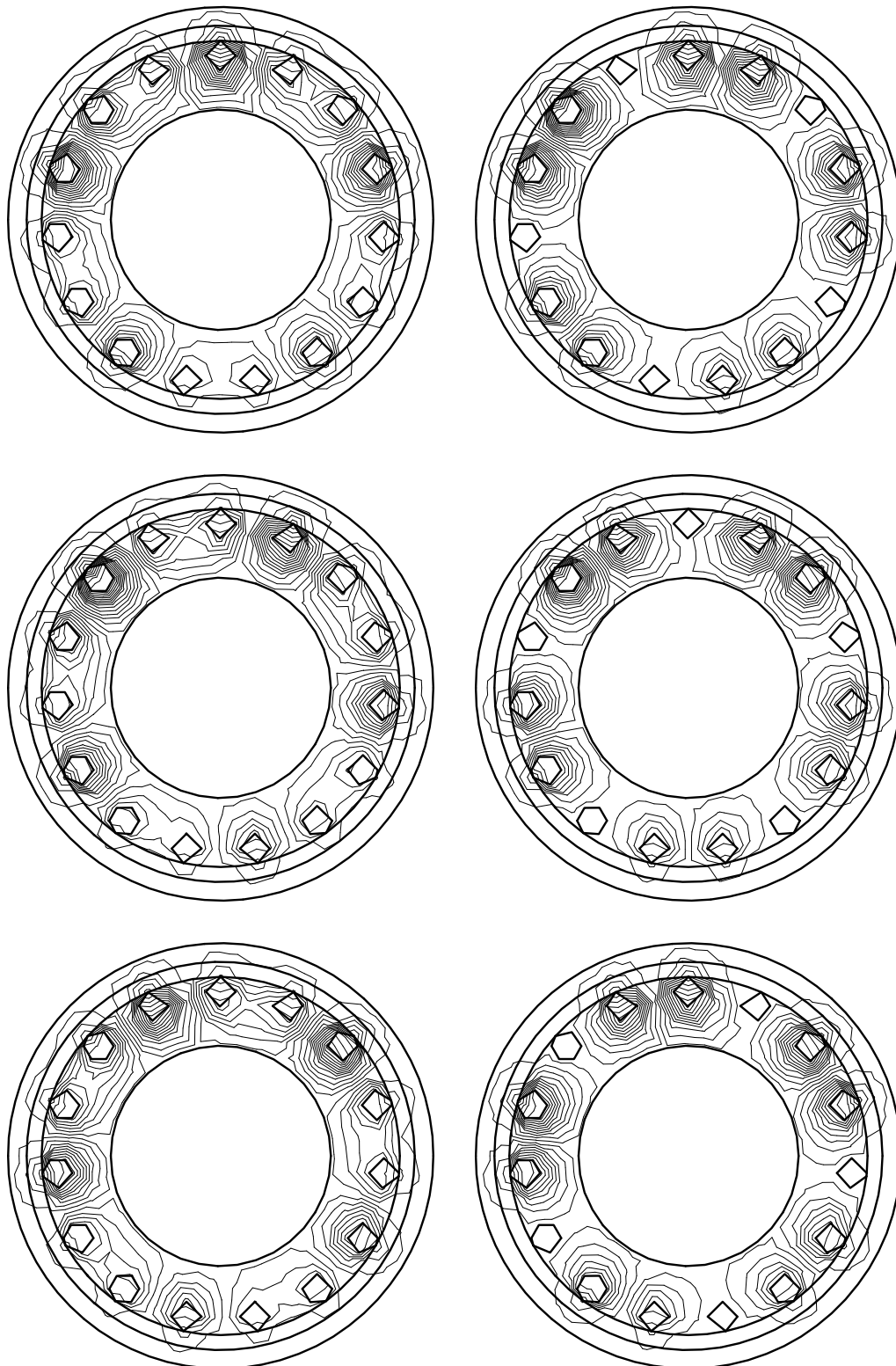
$$\begin{aligned} i_R(\varphi) &= 33,76 \cdot \cos(\varphi) \\ i_S(\varphi) &= 33,76 \cdot \cos(120 + \varphi) \\ i_T(\varphi) &= 33,76 \cdot \cos(240 + \varphi) \end{aligned}$$

5-Construim una taula amb 12 valors de φ , corresponents als 12 valors instantanis per els quals es fa la simulació:

Nro. d'Ordre	φ (en graus)	$i_R(\varphi)$ [A/mm ²]	$i_S(\varphi)$ [A/mm ²]	$i_T(\varphi)$ [A/mm ²]
1	0-360	33,76	-16,88	-16,88
2	30	29,237	-29,237	0
3	60	16,88	-33,76	16,88
4	90	0	-29,237	29,237
5	120	-16,88	-16,88	33,76
6	150	-29,237	0	29,237
7	180	-33,76	16,88	16,88
8	210	-29,237	29,237	0
9	240	-16,88	33,76	-16,88
10	270	0	29,237	-29,237
11	300	16,88	16,88	-33,76
12	330	29,237	0	-29,237

B) VISUALITZACIÓ DE LA SIMULACIÓ AL LLARG D'UN PERÍODE:

Les diferents figures que s'exposen tot seguit, d'esquerra a dreta, i de dalt a baix, corresponen als números d'ordre correlativament amb la taula.

**C) NOVA TAULA DE VALORS**

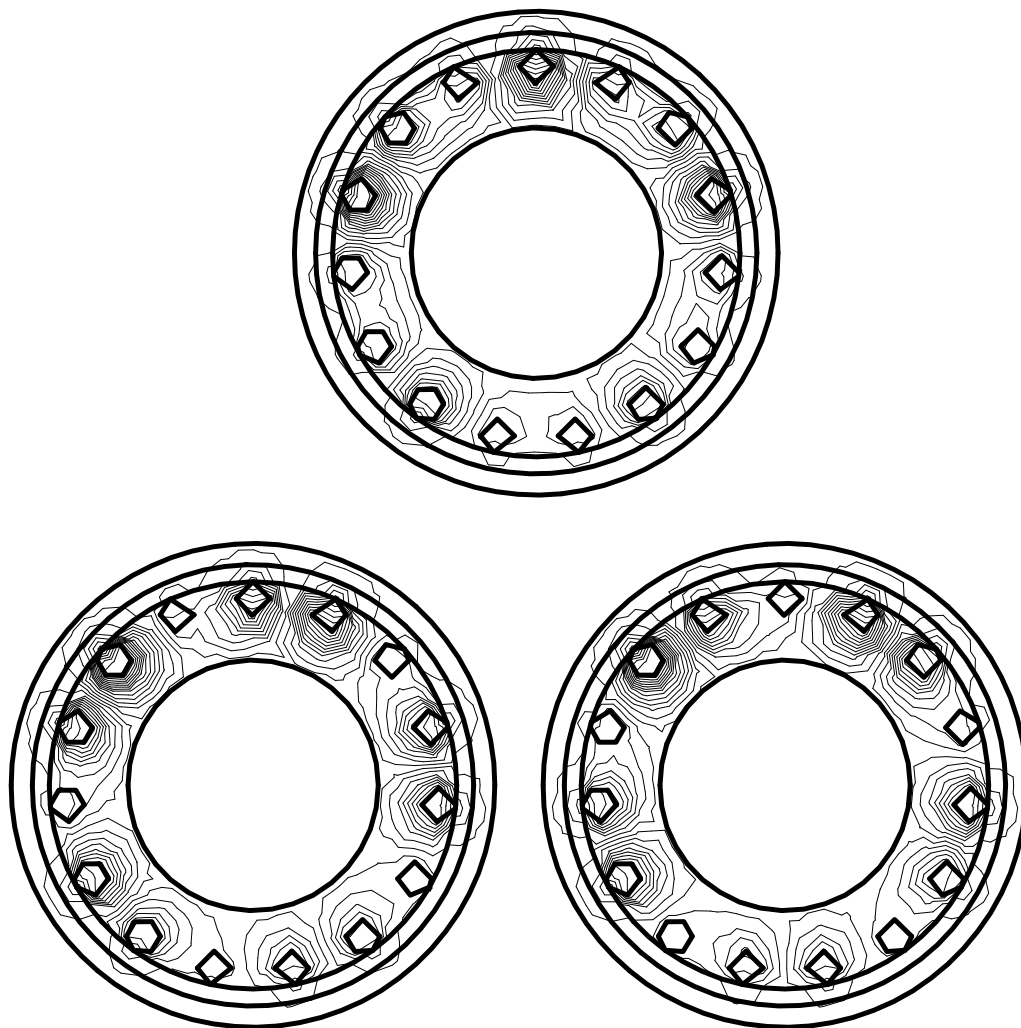
En l'apartat anterior només s'han posat la meitat de les simulacions, perquè la resta no afegia cap informació nova. Queda clar que al haver inclòs en la taula alguns

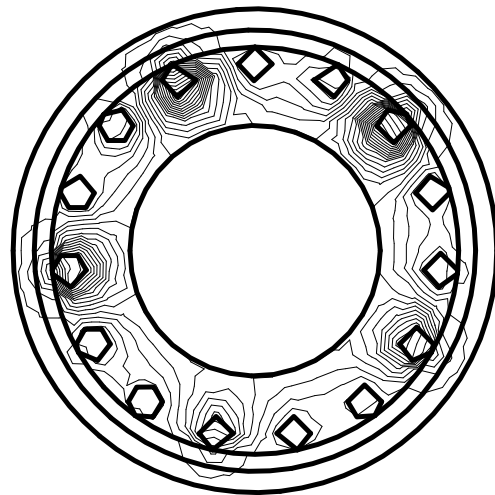
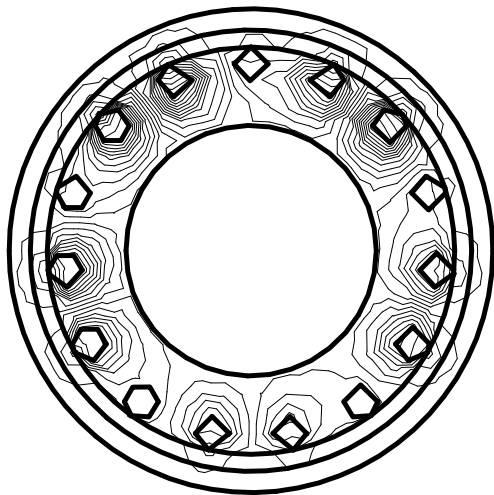
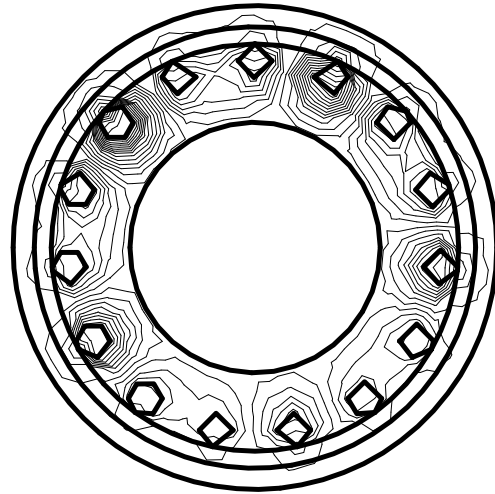
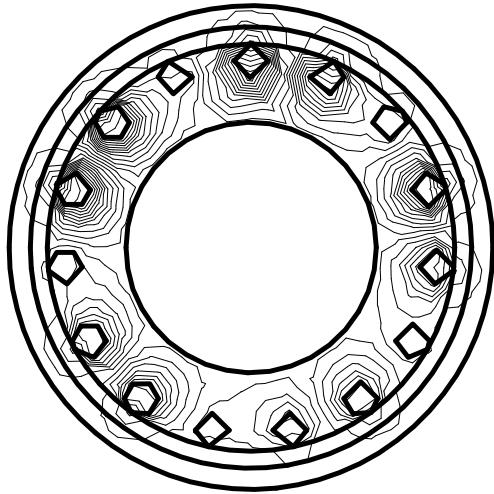
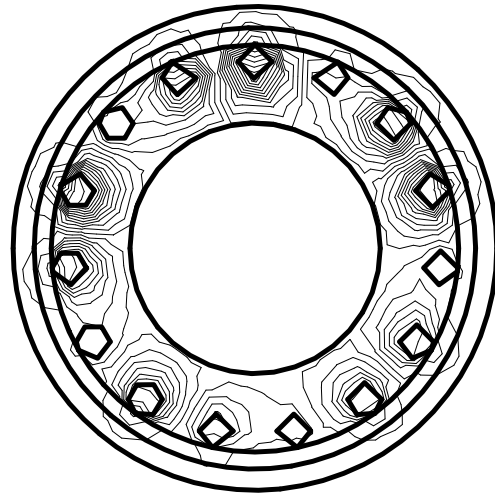
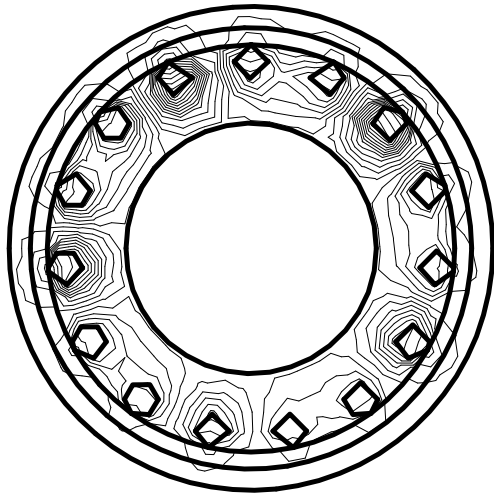
zeros en el corrent instantani d'una de les fases predisposa a tenir una seqüència de simulacions massa homogènia. Es tornen a repetir els càlculs amb una novetat: només donarem 9 valors instantanis al llarg d'un cicle de la ona de corrent. La nova taula, resulta:

Nro. d'Ordre	φ (en graus)	$i_R(\varphi)$ [A/mm ²]	$i_S(\varphi)$ [A/mm ²]	$i_T(\varphi)$ [A/mm ²]
1	0-360	33,76	-16,88	-16,88
2	40	25,86	-31,72	5,86
3	80	5,86	-31,72	25,86
4	120	-16,88	-16,88	33,76
5	160	-31,72	5,86	25,86
6	200	-31,72	25,86	5,86
7	240	-16,88	33,76	-16,88
8	280	5,86	25,86	-31,72
9	320	25,86	5,86	-31,72

D) SEGONA VISUALITZACIÓ DE VALORS INSTANTANIS DURANT UN PERÍODE

D'esquerra a dreta i de dalt a baix correlativament amb els números d'ordre de la taula de l'apartat C.





9.4- ESTUDIS PREVIS A LA SIMULACIÓ DEL CIRCUIT TÈRMIC

Les fonts d'escalfor són les pèrdues Joule en els conductors, i les pèrdues en el ferro. L'extracció d'aquest escalfor la porta a terme l'aigua de refrigeració.

Pèrdues Joule en els conductors

- 1) *Resistència elèctrica* d'un conductor de tub de Cu Ø5x Ø3 mm
Resistivitat: 0,0175 Ω.mm²/m

$$R = \rho \frac{l}{S} = 0,0175x \frac{1}{(5^2 - 3^2) \frac{\pi}{4}} = 0,00139 \frac{\Omega}{m}$$

- 2) *Valor eficaç de l'intensitat* del corrent que circula per el tub. Recordar que com a conseqüència dels assaigs realitzats, s'ha pres un valor de 23,87 A/mm², i l'intensitat per el tub, és:

$$I = 23,87 \frac{A}{mm^2} \cdot \left(\frac{5^2 - 3^2}{4} \right) \pi = 300A$$

- 3) *Pèrdues Joule* en un tub de 1 m. de llargada:

$$P = R \cdot I^2 = 0,00139x 300^2 = 125,1 \text{ W/m}$$

- 4) Volum de 1 tub de 1 m. de llargada: $(5^2 - 3^2) \frac{\pi}{4} \cdot 10^{-6} = 12,56 x 10^{-6} \text{ m}^3$

- 5) *La potència calorífica* per unitat de volum de conductor elèctric, és de:

$$\frac{125,1}{12,56x10^{-6}} = 10^7 \frac{W}{m^3}$$

Pèrdues en el Ferro

Les pèrdues per histèrissi les dóna l'expressió:

$$p_h = K_h \cdot f \cdot \hat{B}^2 \frac{W}{kg}$$

Les pèrdues per corrents de Foucauld, per ones sinusoidals, les dóna l'expressió:

$$p_f = k_f (f \cdot \hat{B} \cdot \tau)^2 \frac{W}{kg}$$

Les constants K_h k_f són pròpies de cada qualitat de material. f és la freqüència. \hat{B} és la inducció màxima. τ és l'espessor de la xapes.

En el nostre cas hom treballa amb ferro massís, i així, a primera vista, les pèrdues esdevenen enormement grans. No obstant cal tenir en compte **l'efecte pelicular**.

Les forces electromotrius d'autoinducció degudes a la variació temporal del flux, creen uns corrents circulatoris en la massa ferromagnètica. Aquests corrents provoquen les *pèrdues Foucauld*, i al mateix temps s'oposen a la variació del flux.

Aquesta oposició es màxima en els filaments centrals del circuit magnètic, perquè son els que es troben voltats per un més gran nombre de línies de corrent. Això provoca una disminució de la inducció en les zones properes a l'eix de la secció, i un increment local de la inducció en la perifèria.

Altrament en resulta un *increment de la resistència* elèctrica efectiva del material, perquè els corrents circulatoris es concentren en la zona exterior.

Des del punt de vista de les pèrdues, el circuit magnètic massís, ve a resultar equivalent a un altre de la mateixa configuració, però **buidat** per dintre. L'espessor ens el dóna la formula de Boucherot: {aplicaciones industriales de la electricidad pag.10/[34]}

$$\tau = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r \cdot f}} \cdot 1000 \text{ mm}$$

ρ és la resistivitat del conductor en $\Omega \cdot m$

μ_r és la permeabilitat relativa del conductor

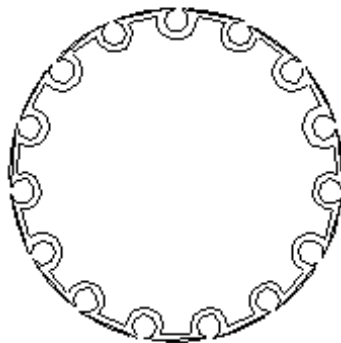
f és la freqüència en Hz.

En el cas del ferro F-111, prenem: $\rho = 9,6 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
 $\mu_r = 1350$
 $f = 50 \text{ Hz}$

Resulta:

$$\tau = 503 \sqrt{\frac{9,6 \times 10^{-8}}{1350 \times 50}} \times 1000 = 0,6 \text{ mm}$$

Caldrà avaluar les pèrdues en el ferro no pas tractant-lo com a ferro massís. S'han de fer els càlculs pensant que el nucli efectiu de ferro, té un gruix de 0,6 mm, i tenint en compta que al ser la perifèria, la inducció es veu incrementada.



Hom sap el volum del nucli. Caldrà avaluar les pèrdues totals en aquest volum. La potència activa dissipada, és de

$$P = V \cdot I = \frac{V^2}{R}$$

$$\text{essent } I = \frac{V}{R} \text{ on } R = \rho \frac{l}{S} = 9,6 \times 10^{-8} \frac{10^6 \times 0,080}{(6 \times \pi \times 15) + (80 \times \pi)} = 1,44 \times 10^{-5} \Omega$$

per trobar la V induïda en el ferro es parteix d'una inducció de treball màxima en la perifèria de 1,3 T llavors la inducció ve donada per:

$$B = B_{max} \times \sin(\omega \cdot t) = 1,3 \times \sin(2\pi 50t)$$

$$\varphi = B \cdot A = (B_{max} \sin(\omega t)) \cdot 0,536 = 0,7 \sin(2\pi 50t)$$

Com que s'ha de tenir en compta el volum concret on es produeixen les pèrdues del nucli, es parteix de les equacions de Maxwell, així:

$$e_{in} = \oint \bar{E}_{in} \cdot d\bar{l}$$

que per aplicació del Teorema de Stokes, resulta ser:

$$\int r \bar{\omega} \cdot \bar{E}_{in} \cdot d\bar{S} = \int -\frac{\delta \cdot \bar{B}}{\delta \cdot t} \cdot d\bar{S}$$

que es pot escriure:

$$e_{in} \cong \frac{\delta \cdot B}{\delta \cdot t} \cdot S$$

$$e_{in} = \frac{dB}{dt} \cdot S = \frac{d}{dt} (0,7 \sin(2\pi 50t)) \cdot 0,6 \times 80 \times 10^{-6} = 219,9 \cdot \cos(2\pi 50t) 48 \times 10^{-6}$$

per avaluar la superfície, s'ha pres un rectangle de 0,6 mm d'amplà i llargada igual a la llargada del nucli de ferro

$$e_{in} = 105,6 \times 10^{-4} \cdot \cos(100\pi \cdot t)$$

$$|V_{eficac}| = \frac{105,6 \times 10^{-4}}{\sqrt{2}} = 0,007467 \text{ V}$$

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{0,007467^2}{1,44 \times 10^{-5}} = 3,872 \text{ W}$$

en un volum considerat de $80 \times \pi \cdot 0,6 = 150,8 \text{ mm}^3$

resulten unes pèrdues de $\frac{3,872}{150,8 \times 10^{-9}} = 25,7 \times 10^6 \text{ W/m}^3$

(si es considera reduït a la zona on es produeixen les pèrdues)

i si es té en compta tot el nucli, el seu volum resulta ser de:

$$80 \times \frac{(80^2 - 40^2) \cdot \pi}{4} = 0,3 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

i per tant les pèrdues per unitat de volum:

$$\frac{3,872}{0,3 \times 10^{-3}} = 12906 \frac{\text{W}}{\text{m}^3}$$

Per tant *la potència calorífica* per unitat de volum de circuit magnètic, és de:

$$1,29 \times 10^4 \text{ W/m}^3$$

Escalfor absorbida per l'aigua de refrigeració

La quantitat d'escalfor absorbida per l'aigua de refrigeració, és:

$$q = c \cdot \Delta\vartheta \cdot m$$

q = quantitat d'escalfor (W/m²)

c = calor específica de l'aigua (4180 Joul/K/kg)

$\Delta\vartheta$ = increment de temperatura de l'aigua (K)

m = massa del refrigerant (aigua). La posem en funció del cabal. El cabal, a la vegada, el posem en funció de la velocitat que porta l'aigua en un conducte de secció recta coneguda.

En el nostre cas, i per una velocitat de l'aigua de 1,5 m/s, resulta:

$$q \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right) = 4180 \left(\frac{\text{Joul}}{\text{K} \cdot \text{kg}} \right) \cdot \Delta\vartheta \cdot (\text{K}) \cdot 1,5 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \cdot 1000 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

és a dir: $q = 4180 \times 1,5 \times 1000 \times \Delta\vartheta$
 $q = 6,27 \times 10^6 \times \Delta\vartheta$

essent $\Delta\vartheta$ el salt tèrmic: $\Delta\vartheta = T - T_0$

T = temperatura del conductor tèrmic en contacte amb l'aigua

T₀ = temperatura de l'aigua; s'ha pres T₀ = 20 °C = 293 K

Conductivitat Tèrmica dels materials

Es pren directament de les taules de característiques:

Aire:	0,026	W/K.m
Alumini:	237	W/K.m
Cu:	401	W/K.m
Ferro:	80,4	W/K.m
Aigua	0,609	W/K.m

Coefficient d'emissivitat

Fa referència a la transmissió de calor per Radiació. Es un coeficient que varia de 0 a 1 en funció de la emissivitat de la superfície considerada, i que prenem igual a 0,5

Coefficient de Convecció

Es un coeficient empíric, que es pren directament d'un manual de Termodinàmica [calor i fred pag.82]. Ve donat per:

$$\alpha_b = \frac{v_0^{0,56}}{d^{0,44}} \left(3,6 + 2,7 \frac{l}{1000} \right)$$

essent: v_0 la velocitat de l'aire (m/s)
 d diàmetre interior del tub (m)
 l llargada del tub (m)

$$\alpha_b = \frac{1^{0,56}}{0,075^{0,44}} \left(3,6 + 2,7 \frac{0,08}{1000} \right) = 11,25$$

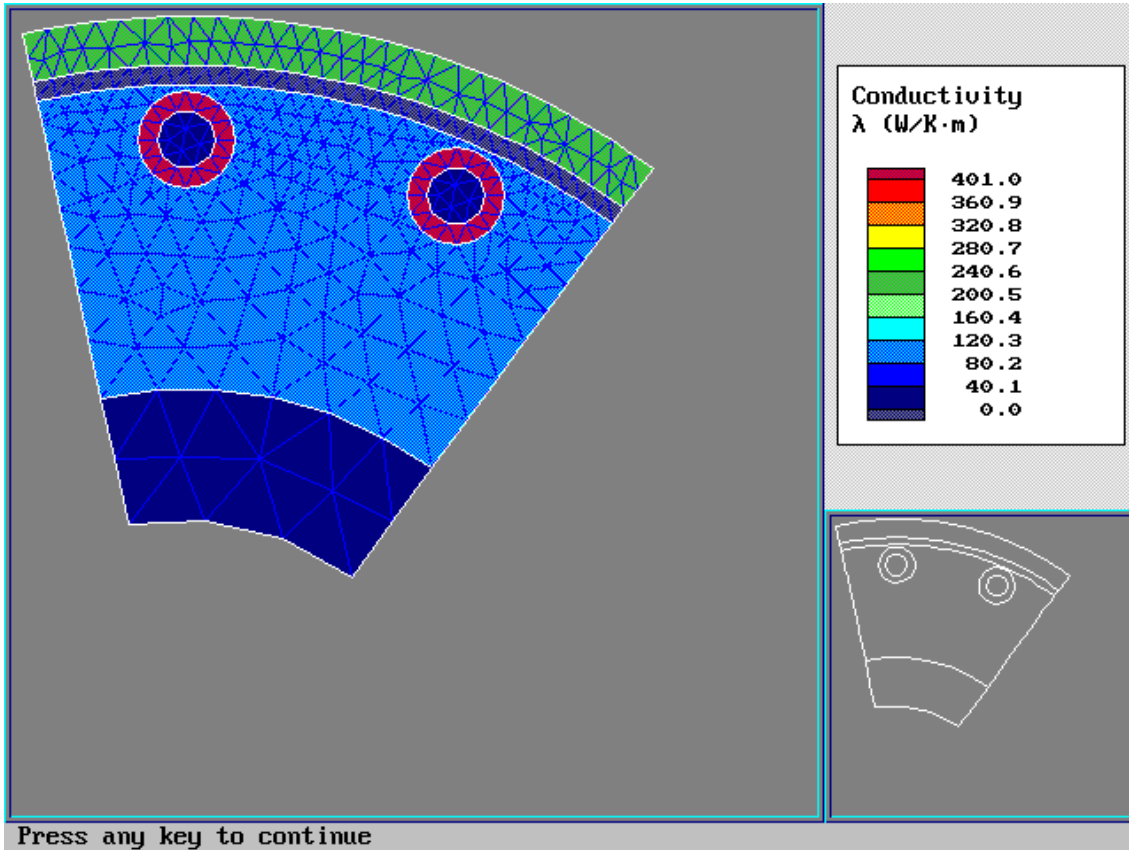
Geometria Utilitzada

Per fer la simulació s'utilitza la versió *Termodinàmica* del programa *Qfields*. Seguim tenint la limitació a 500 nodes. En el cas del circuit tèrmic s'ha pres només una part de la secció recta de prototipus, amb les pertinents condicions de contorn.

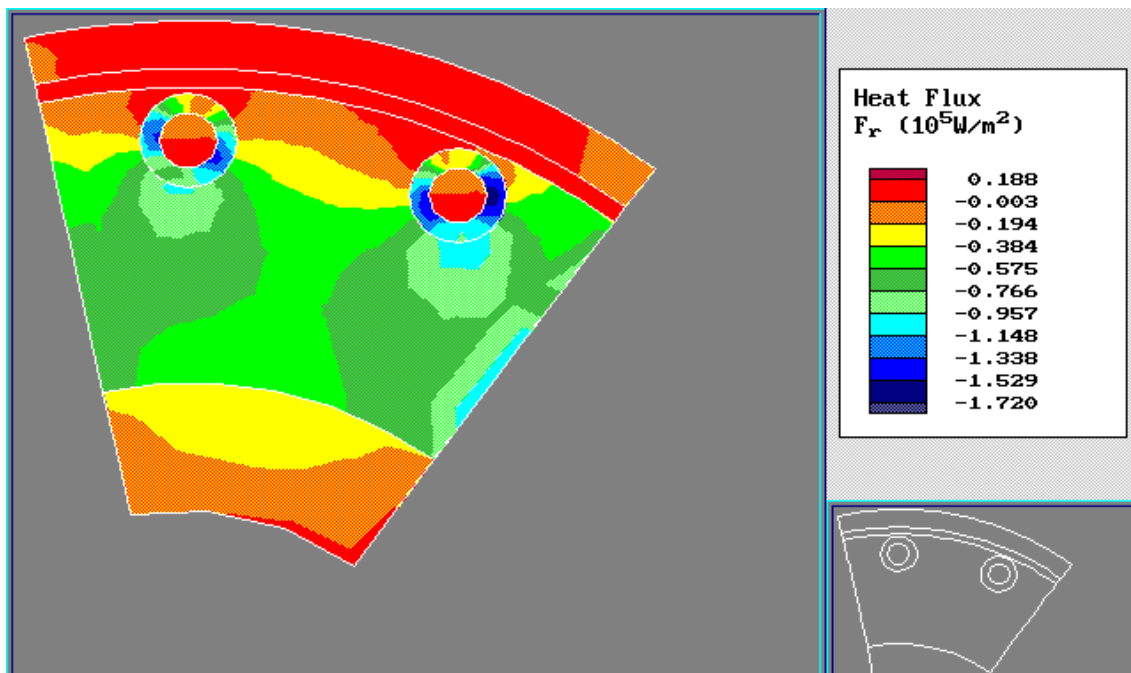
Les condicions de contorn vénen donades per els coeficients de transmissió de calor per conducció, per convecció i per radiació. Així i tot els resultats tocant a les vores interiors (les vores que resulten de "tallar" la peça) s'han d'interpretar pensant que no ens ha estat possible de simular tota la geometria.

9.5- RESULTATS DE LA SIMULACIÓ DEL CIRCUIT TÈRMIC

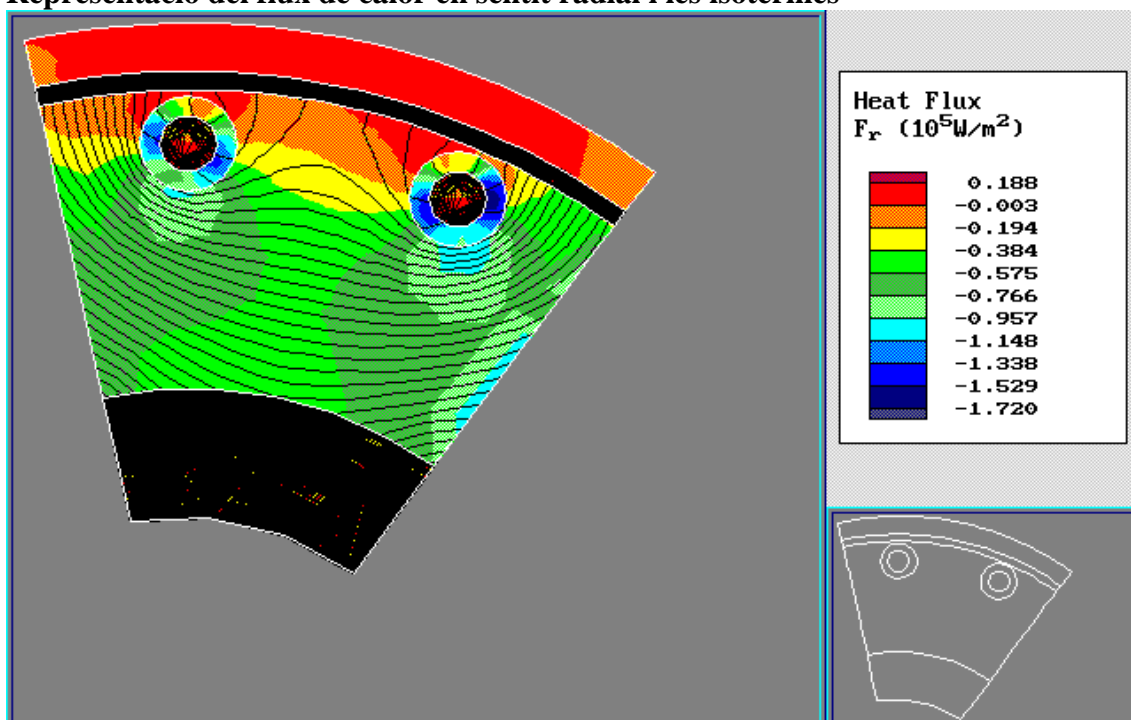
Representació de la geometria utilitzada i de les conductivitats tèrmiques dels materials



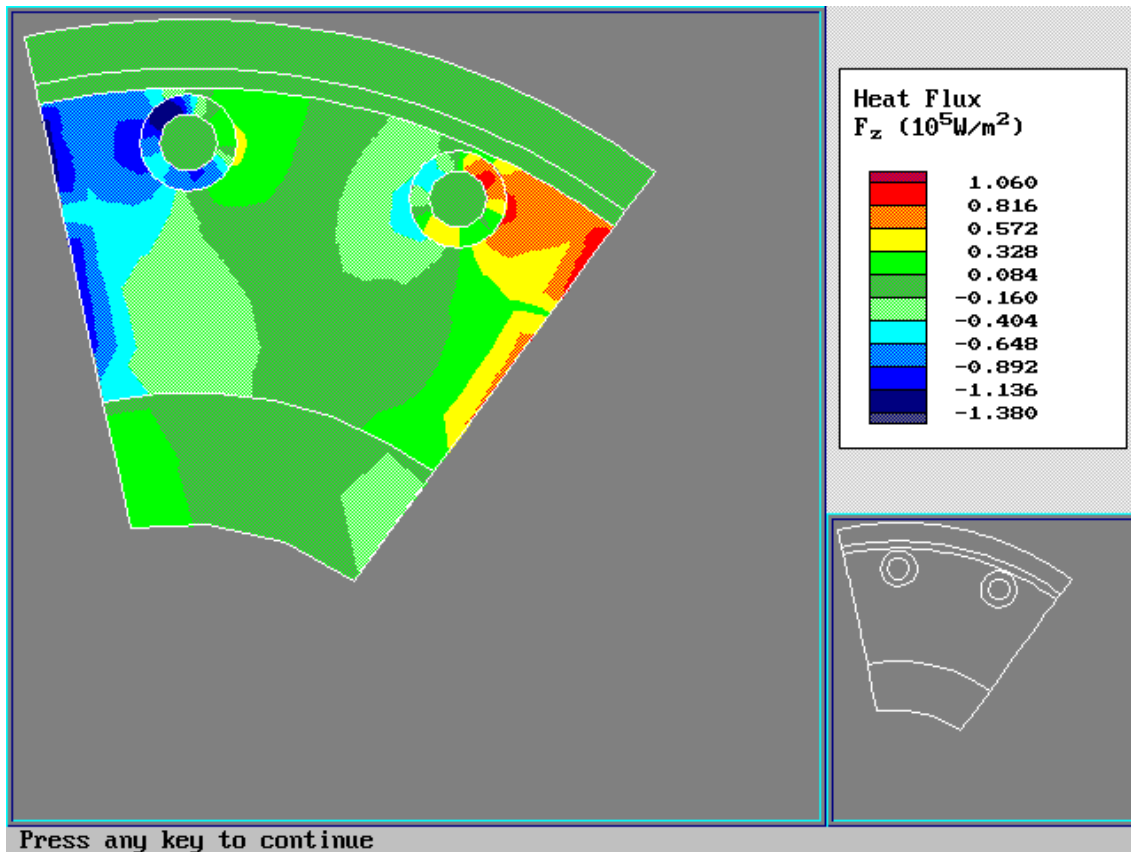
Representació del flux de calor en sentit radial



Representació del flux de calor en sentit radial i les isoterms



Representació del flux de calor en sentit axial



Comentaris a la simulació del circuit tèrmic

- 1- La simulació ens exposa el transvasament d'energia calorífica de les parts més calentes, cap a l'exterior i cap als circuits de refrigeració.
- 2- Noteu que una part important d'aquest transvasament energètic, té lloc en la zona dels conductors de l'induït.

Conclusions extretes de la simulació del circuit tèrmic

a) Per la construcció del prototipus

1- Els anclatges mecànics dels conductors de l'induït, hauran de preveure possibles sol.licitacions tèrmiques:

-Assegurar les soldadures

-Deixar toleràncies constructives (les dóna el propi dielèctric)

2- Minimitzar les pèrdues de càrrega del circuit hidràulic (interior dels conductors de l'induït). La secció recta a l'interior del conducte per on circula el refrigerant cal mantenir-la constant inclús en els colzes.

b)En els assaigs de funcionament del prototipus

3- Assegurar la refrigeració. Optimitzar el cabal d'aigua

4- Per intensitats de corrent superior als 300 A/conductor, ens trobem en els límits de l'extracció d'escalfor via refrigerant. Arribat el cas, aquests assaigs seran parcialment adiabàtics.

9.6- CIRCUIT TÈRMIC: CONDICIONS DE CONTORN I RESULTATS

Cal considerar dos jocs de condicions de contorn:

- a) Les imposades en la part externa de la peça en estudi, que no presenten dificultat.
- b) Les que cal imposar en els **talls interns**. Entenem per talls interns els plans per els que hom ha seccionat el model a estudiar per portar a terme la simulació. No es possible estudiar tot el model sencer amb el software que tenim disponible.

El programa de simulació permet imposar les condicions de contorn de tres maneres diferents:

1- Considerar que tot el contorn -o cada una de les parts que s'hagin pres en consideració-, té una temperatura constant, encara que *desconeguda* a priori i que evaluarà el mateix càlcul.

2- Idem que l'apartat anterior, però temperatura (o temperatures) *conegudes*.

3- Considerar en el contorn les lleis de transmissió de calor per convecció, per conducció i per radiació, i deixar que la resta la calculi el programa (incloses les temperatures).

Al principi s'ha seguit el primer criteri. Al tractar-se de temperatures "desconegudes a priori", i que la màquina calcula, resta una dada indeterminada; En efecte, el programa desconeix si més enllà dels límits hi ha fonts de calor o fonts de fred, i, en conseqüència, les isoterms que en resulten de la simulació, són poc realistes.

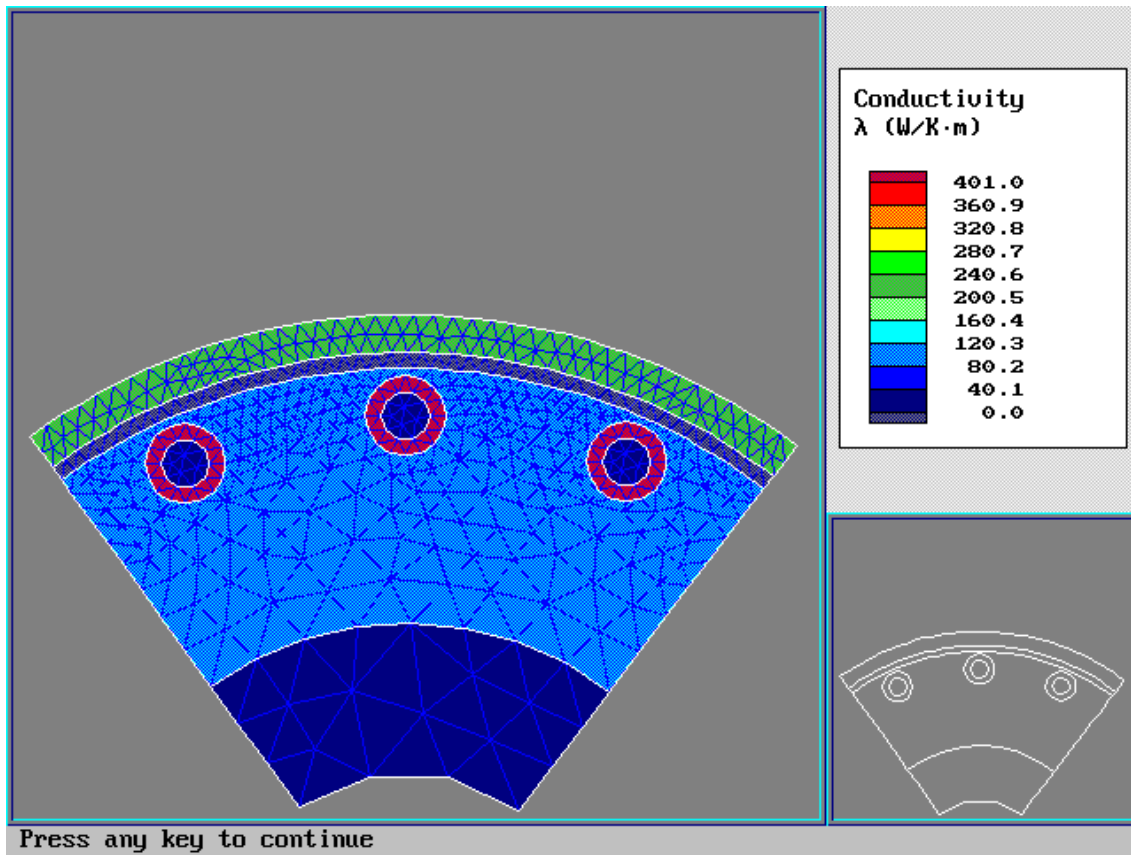
Seguir el segon criteri no es possible, perquè en aquest cas, i per el model que estem estudiant, *la condició de contorn* "temperatura coneguda en cada punt", *és el propi resultat del problema*. En cas de conèixer el resultat a priori, ja no ens faria cap falta la simulació.

Queda com a únic viable el tercer criteri, que és el que s'ha aplicat. Quan imposem en el contorn les lleis de transmissió de calor, també se li pot dir si la peça més enllà del contorn és una font de calor o una font de fred. L'únic que no es pot imposar son les coordenades exactes de les diferents fonts de fred o de calor. Per entendre'ns, com que el contorn és només una ratlla, el programa no permet dir en quin punt del pla més enllà dels límits es situen els conductors elèctrics, amb les seves pèrdues Joule en el coure, i la seva aigua de refrigeració en l'interior.

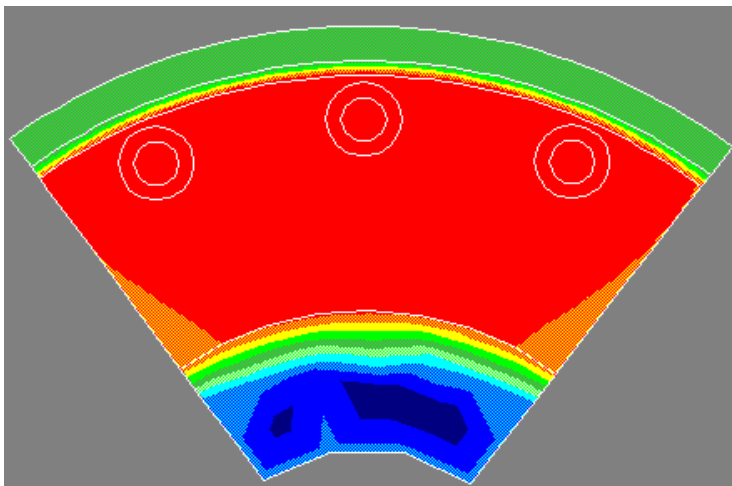
Aquesta indeterminació no es tant gran com la del criteri-1, ni exigeix conèixer els resultats abans d'hora. Així i tot les isoterms queden lleugerament desfigurades en les vores, com el lector ha pogut observar.

Per acabar d'arrodonir s'adjunta una simulació de fluxos d'escalfor en un model ampliat a tres conductors (recordeu que en el prototipus real n'hi ha 15)

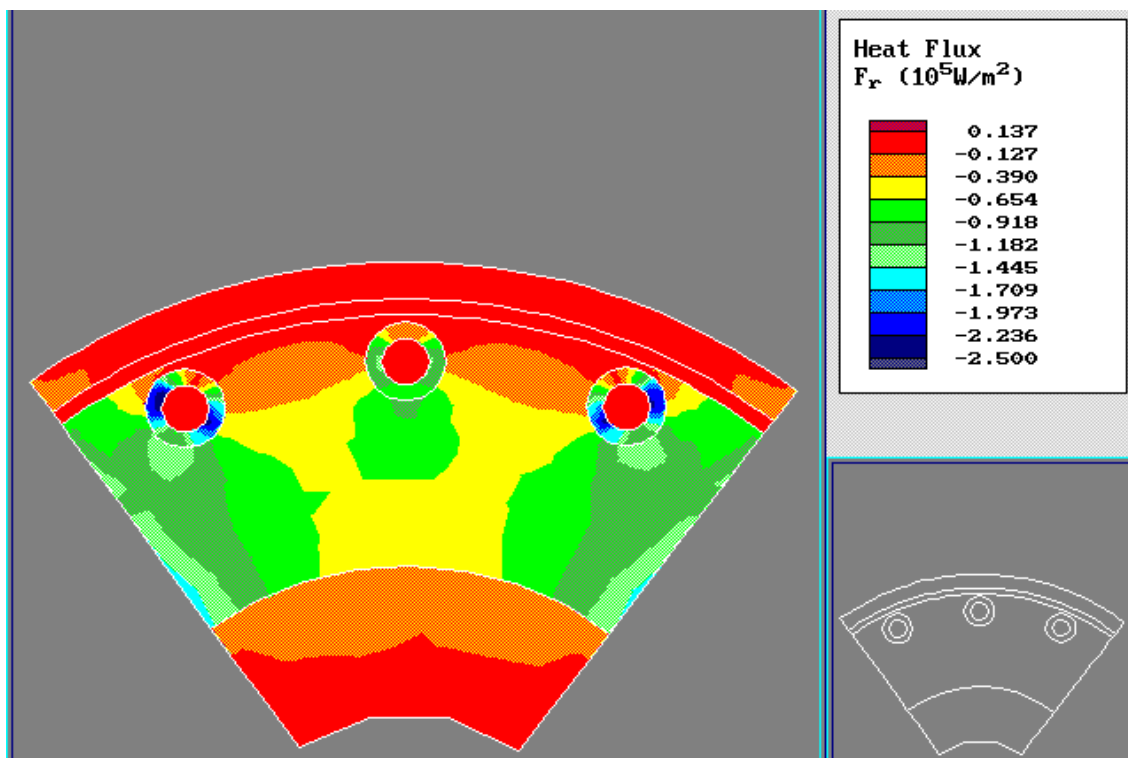
Representació de la geometria utilitzada



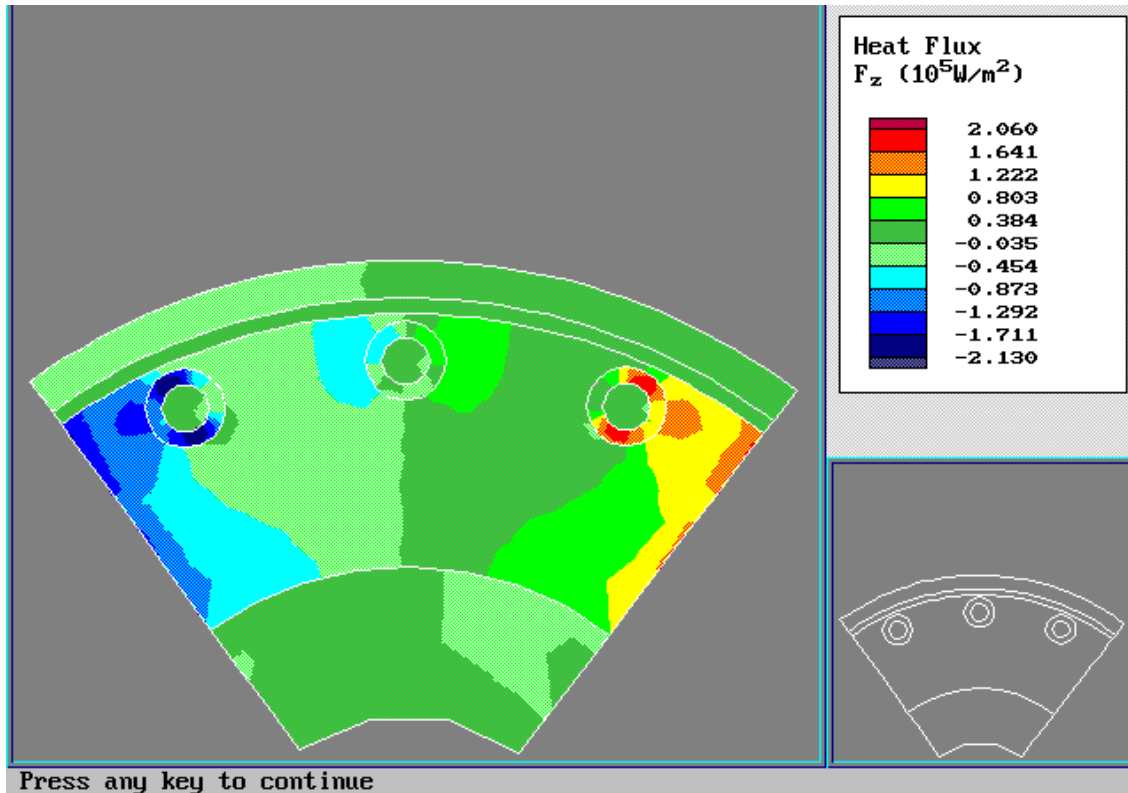
Distribució de temperatures



Flux de calor sentit radial



Flux de calor en sentit axial



10- ASSAIG DEL PROTOTIPUS PRAT-5 (Màquina de doble inductor)

10.1- CONNEXIÓ DEL PROTOTIPUS PRAT-5 A LA FONT DE CORRENT T.S.

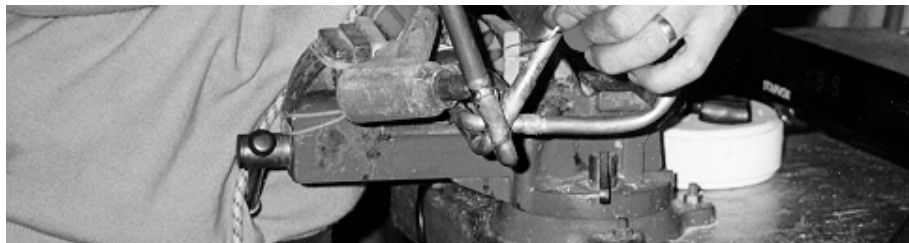
Una vegada acabat el muntatge de Prat-5, s'imposa una comprovació experimental de les seves prestacions.



Per tal de procedir a l'assaig hom comença amb la preparació de connexions elèctriques adients

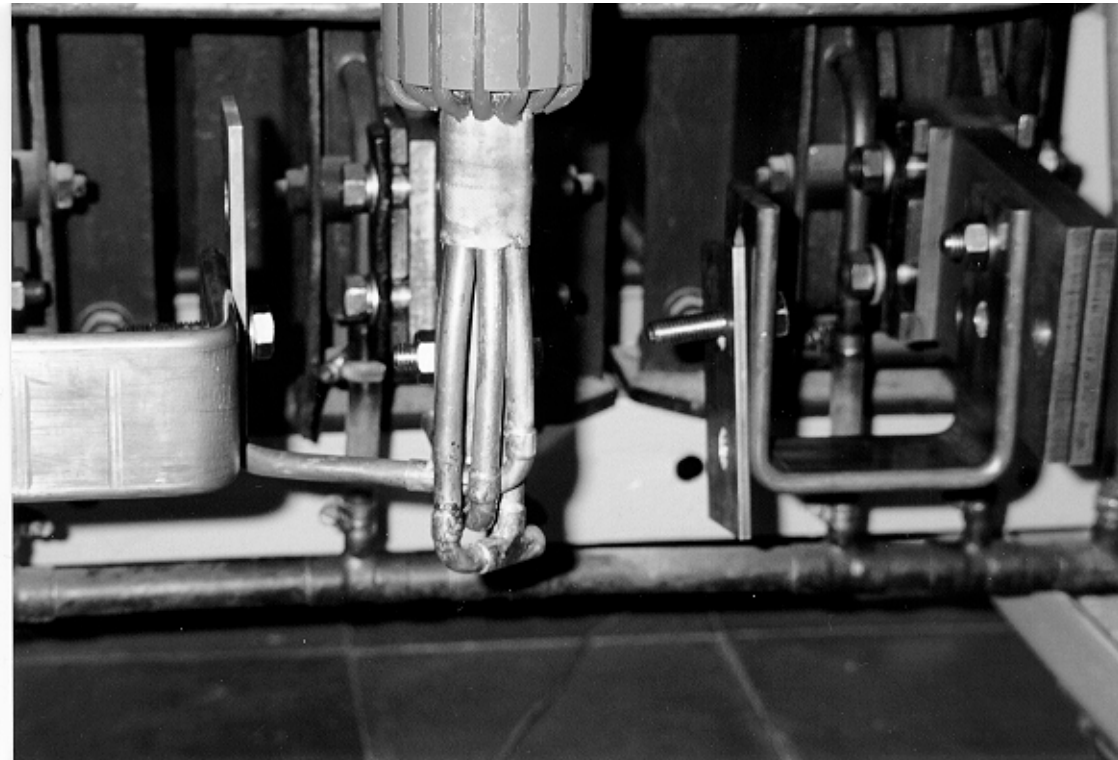


Que acte seguit es munten en el prototipus





Tot deixant-lo llest per portar a terme la seva connexió al T.S.



Les especificacions que s'han exigit a les pletines de connexionat, han estat:

1- **Simetria.** La pletina de la fase S queda lleugerament més curta degut a la disposició constructiva de la font (el T.S.) Les altres dues son perfectament simètriques.

2- **Baixa resistència de contacte.** S'aconsegueix incrementant la secció de la pletina d'unió màquina-trafo. Cal assegurar un contacte metàl.lic franc (eliminant tota mena de pols o de grassa fregant amb paper de vidre -col.locant vaselina, després de netejar bé, per tal d'eliminar les partícules abrasives-) i donar un parell d'apretada suficient als cargols. La densitat de corrent en la zona de contacte, resulta ser de:

$$J = \frac{3000A}{120 \times 60 \text{mm}^2} = 0,4167 \text{ A/mm}^2$$

3- **Conservació de la densitat de corrent.** Fa referència al tram de conductor de línia des de l'interior de la màquina fins a la pletina de contacte amb el transformador. Per aconseguir aquest efecte s'han posat dos tubs de Cu, l'un dintre de l'altre per tal d'incrementar-ne la secció. Els tubs son $\varnothing 14 \times \varnothing 12$ i $\varnothing 12 \times \varnothing 10$. La secció total resulta ser de $75,4 \text{ mm}^2$ en cada fase i la densitat de corrent en aquest tram de 100 mm de llargada, és de $39,8 \text{ A/mm}^2$

4- **Bona refrigeració.** S'aconsegueix involucrant el circuit hidràulic en tota la llargada de la línia. S'hauria complicat molt mecànicament si hom hagués volgut refrigerar també la pletina de contacte. Es per aquest motiu que s'ha procurat en una bona superfície de refrigeració per aquesta pletina. Queda clar que l'increment de la superfície de la pletina, és bo a la vegada per assolir densitats de corrent acceptables i refrigeracions correctes.

Recordem que els conductors de l'inductor recullen l'aigua en els mateixos distribuïdors que els alimenten elèctricament -un per fase- i la vessen a l'interior del tub estrella del neutre que actua, a la vegada, de colector de retorn.

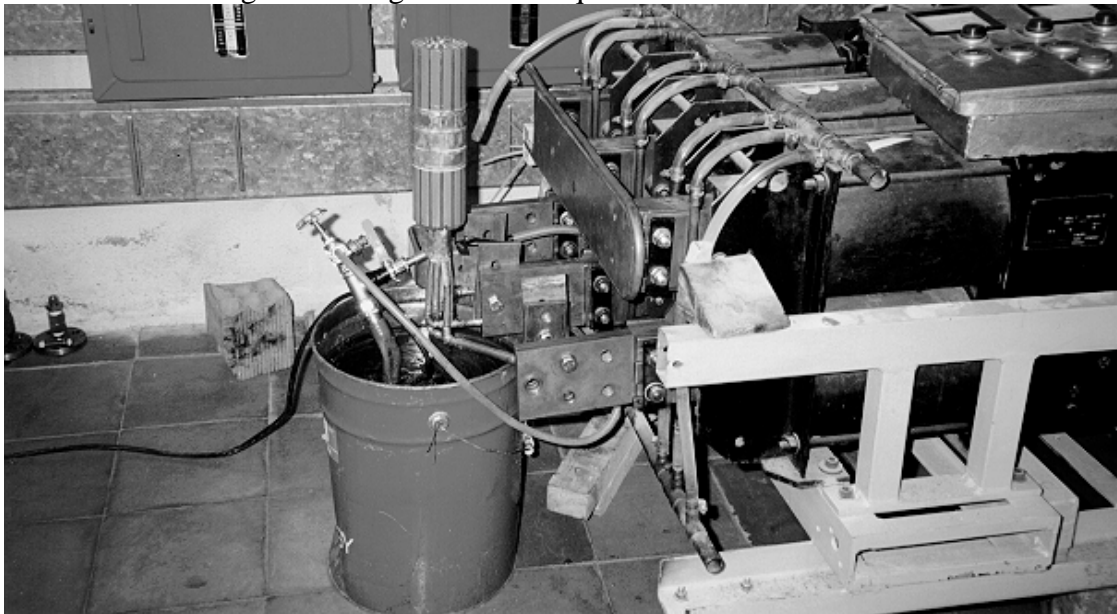
5- **Resistència mecànica.** Aquesta és l'especificació que més de mala gana ha acomplert el prototipus, i que ha acabat per comprometre'ns en els assaigs.

S'ha vist a posteriori que ens havíem descuidat un anclatge mecànic en la part de baix del prototipus.

Hem confiat massa en unes soldadures (les dels conductors de línia amb els distribuïdors), que ja anaven prou castigades per les altes intensitats de corrent -amb els escalfaments que això pressuposa-, i que de cap manera s'havia d'haver pretès fer-els-hi aguantar suposades sol.licitacions mecàniques per petites que fossin.

10.2- IMPLEMENTACIÓ DE L'ALIMENTACIÓ HIDRÀULICA

S'ha fet servir la petita bomba del laboratori com en els assaigs dels quatre prototipus anteriors. Aquesta bomba ja havia demostrat capacitat suficient de vehiculació de l'aigua de refrigeració en màquines de dimensions semblants.



Dades del circuit hidràulic:

Cabal: 8 l/min

Temperatura aigua a l'entrada: 20° C

Per calcular l'increment de temperatura de sortida degut a la circulació d'intensitats, s'ha pres una de les expressions, que lliguen corrents, cabals i increments de temperatura⁵:

$$l.i^2 = 3000.\Delta\vartheta.D$$

[l=llargada del conductor en m./ i=corrent que circula per el conductor en A./ $\Delta\theta$ =increment de temperatura sobre l'ambient en °C./ D=cabal en cm³ per segon]

Zona circuit hidràulic estudiada	Longitud [m]	Cabal [cm ³ /s]	Intensitat [A]	Increment de temperatura [°C]	Increment de temperatura (acumulat) [°C]
Conductors de línia	0,120	22,2	2500	11,26	11,26
Anells del distribuïdor	0,020	44,4	5000	3,75	15,01
Conductors induït	0,100	8,88	500	0,99	16
Neutre de retorn	0,240	133,3	0	0	

Aquest càlcul s'ha portat a terme en base a 500 A/conductor. S'ha fet per determinar possibles limitacions provinents de la refrigeració.

La taula anterior no té en compta l'evacuació de l'escalfor deguda a les pèrdues en el ferro, però hom creu que els resultats ens permeten poder incrementar les magnituds elèctriques (corrents) amb tota llibertat.

El lector es pot remetre al punt 9.5 per més detalls del circuit tèrmic.

⁵Si diem Q_{12} al calor evaquat per unitat de masa, el calor evaquat per unitat de temps és $Q_{12} = m Q_{12}$ és a dir: $Q_{12} = m c (\theta_2 - \theta_1) = m c \Delta\theta$. La masa m per unitat de temps es dona en funció de la densitat γ i del cabal D . Igualant aquest calor evaquat $Q_{12} = D.\gamma.c.\Delta\theta$, amb el calor produït (efecte Joule), resulta que:

$$R.i^2 = D\gamma.c.\Delta\theta \quad \text{però} \quad R = \rho \frac{l}{S} \quad \text{és a dir:} \quad \rho \frac{l}{S}.i^2 = D\gamma.c.\Delta\theta \quad \text{Les constants conegudes, son: } c=$$

4180 Joule/(Kg °C) $\gamma= 1 \text{ Kg/dm}^3 = 1000 \text{ kg/ m}^3$ $\rho= 0,0175 \text{ } \Omega.\text{mm}^2/\text{m}$ i si treballem normalment sempre amb conductor de tub de coure de $\varnothing 5 \times \varnothing 3$ (la seva R -per unitat de longitud- es de 1,393 mili Ω/m .)

l'anterior queda: $l.i^2 = 3000.\Delta\theta.D$

10.3- ASSAIGS ELECTROMECAÑICS AMB PRAT-5

Primer Assaig

-Hi ha una fuga d'aigua en una de les tanques dels anells del distribuïdor. Hom s'ho mira amb optimisme i pensa que servirà per a refrigerar i lubricar el rotor. No hi ha problemes de recollida d'aigua, ja que cau directament sobre el recipient d'on pren l'aigua la bomba.

-Es fan lectures elèctriques prèvies de les tres fases fent servir corrents de línia de l'ordre dels 400 A per tal de comprovar el sistema elèctric i ens adonem que elèctricament està desequilibrat (de l'ordre d'un 30%)

-S'augmenta el corrent de línia fins arribar a 1000 A per a cada fase, i la màquina no arranca.

- Cal recordar que a aquesta màquina se li calcula un corrent nominal teòric de 300 A en cada un dels conductors de l'inductor, que vol dir un corrent nominal de 3000 A/fase.

Segon Assaig

-Es prenen lectures elèctriques dels corrents per mitjà de tres transformadors d'intensitat, un per fase.

-Augmentem la potència d'alimentació i veiem que a 1600 A es detecta un parell al fre

-Seguim augmentant i a **3000 A/fase la màquina comença de voltar** en el sentit de les agulles del rellotge. Hom atura l'assaig.

Tercer Assaig

Es prenen lectures elèctriques dels corrents de cada fase en el punt on arranca:

fase R: 3095 A

fase S: 4100 A

fase T: 3600 A

Quart assaig

En aquest assaig només es prenen lectures elèctriques de corrents en la fase T. Aixímateix es prenen lectures de velocitats:

Intensitat [A]	Velocitat de rotació [min ⁻¹]
4000	30

La màquina gira en règim estable i no s'aprecien freqs mecànics. S'ha sentit un "**crec**". La fase S deixa de conduir. Pensem que hi ha algun problema elèctric i hom atura l'assaig.

La fase S ha deixat de conduir en un moment en que el corrent per la fase T era de 4000 A .Degut a l'asimetria elèctrica detectada al començar el primer assaig el corrent per S quan ha deixat de conduir hauria estat de l'ordre d'un 20% superior (4000 x 1,2 = 4800 A) Es possible que l'estany d'una de les soldadures de la fase S hagi sofert problemes. Caldrà comprovar.

En aquestes condicions no podem seguir amb cap més assaig. Mecànicament no hem muntat connexió de neutre -tot i que la màquina disposa de punt estrella-. S'imposa aturar i examinar.

10.4- COMPROVACIONS POSTERIORES A L'ASSAIG

Tensions de Línia

A posteriori es detecta que les tensions entre fases a la sortida del generador de corrent es troben desequilibrades, així:

Tensió entre fases R i S:	$V_{RS} = 3 \text{ V}$
Tensió entre fases S i T:	$V_{ST} = 4 \text{ V}$
Tensió entre fases T i R	$V_{TR} = 3 \text{ V}$

Aquest desequilibri ha estat com a conseqüència d'una connexió interna errònia en la font (T.S.), i pot explicar parcialment l'asimetria elèctrica registrada.

Parell d'arrencada

Amb el dinamòmetre hom li mesura a la màquina un parell de fricció de 600 g essent el diàmetre del rotor de 80 mm

Representa un parell d'arrencada de 0,24 N.m

Hem aprofitat l'avinentesa per a mesurar els parells d'arrencada de tots els prototipus Prat. El lector els pot trobar en un quadre resum al final d'aquest capítol.

Comprovacions amb el Pont de Thomson

Immediatament després de desconnectar la màquina de la font d'alimentació, es procedeix a fer-la assecar al forn. (per eliminar les restes de l'aigua de refrigeració)



Tal com es veu el prototipus en la fotografia adjunta, la pletina d'enmig és la connexió de la fase S. La pletina que (sobre el paper) queda més aprop d'aquest parraf és la connexió de la fase T. La pletina que en la fotografia apareix situada més amunt és la connexió de la fase R.

La comprovació amb el pont de Thomson dóna els següents resultats:

Tipus de Connexió	Resistència entre fase R/ fase S [mΩ]	Resistència entre fase S/ fase T [mΩ]	Resistència entre fase T/ fase R [mΩ]
Ohmetre (inclou la R del cable)	29	31	26
Pont de Thomson (no inclou la R del cable)	$6 \div 1,15$	0,69	0,71

En realitat petits moviments del contacte ens fan oscil·lar els valors de R al llarg de tota l'escala del pont de Thomson, que confirma l'hipòtesi de soldadura trencada.

La soldadura trencada és la del conductor de línia amb el distribuïdor de la fase S. En cada distribuïdor hi van a parar dos conductors de línia (la línia consta de dos conductors en paral·lel per cada fase). Les lectures del pont de Thomson ens posen de manifest que s'han trencat totes dues soldadures. Es possible que durant l'assaig primerament s'hagi trencat una sola de les soldadures com a conseqüència de

sol.licitacions mecàniques i tèrmiques. Acte seguit s'haurà trencat l'altre com a conseqüència única de les sol.licitacions tèrmiques per l'excés d'intensitat.

Queda clar que els contactes elèctrics han d'estar reservats per tasques només elèctriques, i no fer-els-hi complir missions d'anclatge mecànic com ha estat el cas.

Hom fa unes reflexions sobre la conveniència o no d'arreglar la soldadura, encara que no afegiríem cap informació addicional perquè s'ha pogut prou comprovar que la màquina gira amb la màxima suavitat.

Primeres conclusions

1-Mecànicament s'ha de posar anclatges: Hem produït una avaria elèctrica com a conseqüència d'una errada mecànica.

2-Es un prototipus excessivament complicat des del punt de vista constructiu

3-Aquestes màquines comencen de voltar quan el corrent per cada conductor és de l'ordre dels 300 A

4- S'ha de redissenyar tot l'esquema de connexionat màquina-font de corrent. Les pletines actuals de connexió i els mateixos conductors de línia resulten ser d'unes dimensions excessives (gran, pesat, feixuc). Amb el disseny actual el simple fet imprescindible d'apretar els cargols que l'uneixen elèctricament al T.S. pot ésser suficient per a trencar les soldadures crítiques.

5- Un projecte integral que contingui els transformadors d'intensitat sobre la mateixa màquina sembla la línia de disseny més coherent, com es podrà observar en el treball d'en José López.

10.5- TAULA COMPARATIVA DE PRESTACIONS DE CADA PROTOTIPUS

Nom proto-tipus	Aigua refrigerar [l/min]	Aire a pressió [atm]	Tipus sistema elèctric	Tensió de línia [V]	Corrent de línia [A]	Vel.lo-citat [min ⁻¹]	Parell de fricció [N.m]
Prat-1	no	no	trifàsic	3	3600	686,8	0,00125
Prat-2.0	-----	1 atm.	-----				inapreciable
Prat-2.1	0,75	1 atm.	bifàsic	2	500	91,8	inapreciable
Prat-3	6	no	mono-fàsic	2	1200	60	0,00125
Prat-4.0	6	no	mono-fàsic	3,1	5000	comença a moure's	0,00188
Prat-4.1	6	no	bifàsic	2,75	3200	30	0,00188
Prat-5	8	no	trifàsic	4	3000	30	0,24

11- APORTACIONS

11.1- APORTACIONS

1- Hem aconseguit construir prototipus de màquines alimentades amb font de corrent, i s'ha constatat:

1.1- La gran importància de les simetries en el disseny

1.2- Que cada cm de conductor (inductor, cap de bobina, línia d'alimentació), és d'una importància cabdal.

1.3- Que el rotor d'alumini que s'ha fet servir com a patró ($\varnothing_{\text{exterior}}=80$, $\varnothing_{\text{interior}}=75$, llarg=80), comença de voltar quan per el conductor de l'induït (cas de ranures d'un sol conductor), hi circula un corrent aproximat de 300 A. Curiosament això ha passat independentment del prototipus (volem dir independentment de la geometria exacta d'aquest prototipus)

2- Hem aconseguit fer voltar tubs de material conductor, sense ferro en el rotor:

2.1- De coure i d'alumini

2.2- Versió rotor exterior o versió estàtor exterior

3- S'ha posat en pràctica un mètode de disseny de nous prototipus que combina diferents tècniques, i amb resultats prou satisfactoris. Les tècniques son:

3.1- Ajustar paràmetres concrets fent servir la teoria general de les màquines elèctriques.

3.2- Introduir petites correccions que facin ressò dels punts a tenir més en compte des del punt de vista de l'alimentació per font de corrent.

3.3- Fer simulació per ordinador dels circuits magnètic i tèrmic

3.4- Construcció del prototipus

3.5- Assaig del prototipus. Taules de resultats. Conclusions

3.6- Aprofitar els resultats per el disseny del proper prototipus

4- Hem treballat amb un sol conductor per ranura. Això ha permès fer servir conductors de forma rígida (no pas filàstiques). Aquí hom ha preparat el terreny per anar substituint aquests conductors de coure per superconductors. Es compleixen dues condicions:

4.1- Els superconductors son materials ceràmics, que poden passar a ocupar fàcilment el lloc que ocupen els conductors elèctrics en els prototipus Prat.

4.2- Les densitats de corrent que hom pot fer circular amb la tecnologia dels tubs de coure refrigerat per aigua, son d'una magnitud important, que les fa comparables amb les densitats de corrent assumibles en superconductors.

5- S'ha assajat la tècnica d'arrancada de màquines monofàsiques per variació de reluctància, aplicada a màquines de més d'un parell de pols

5.1- Fent servir tècniques de construcció tradicionals (surt poc simètric)

5.2- Fent servir altres tècniques constructives (consisteix en fer el connexionat elèctric amb estany colat per tal de millorar la simetria i construir el prototipus més ràpidament).

Els resultats d'aquesta tècnica d'arrencada per reluctància han estat inferiors als esperats, tot i que la màquina arranca.

6- S'ha vist que alguns prototipus resultaven constructivament molt complicats. Per tant:

6.1- Es proposa alimentar les màquines en sistema bifàsic (com ho son Prat-2.1/ Prat-4.1) per facilitar constructiva. El sistema bifàsic no presenta problemes d'arrencada i es més simple, perquè fa servir menys conductors que el trifàsic.

6.2- S'imposa cuidar la part mecànica

6.3- Cal pensar en el conjunt trafo-màquina dins del mateix prototipus

7- Hem posat a punt un sistema de coixí pneumàtic (Prat-2.0/ 2.1)

8- S'ha fet un prototipus de doble inductor (Prat-5), i s'ha constatat que tot i ser una màquina sense coixinets, la suavitat en el funcionament, era màxima.

9- Els resultats ens diuen que la millor màquina des del punt de vista de prestacions, és l'anomenada màquina de Canyeria (Prat-1). Es tracta de la única màquina del conjunt que actua sense ranures.

10- A la vista de la marxa del disseny pensem que el factor de qualitat que es fa servir (proporcional al coeficient d'autoinducció, a la freqüència i a la conductància), dóna excessiva importància a la L -autoinducció-, perquè creiem que certs aspectes de la L no ajuden a fer voltar el rotor.

11.2- ALGUNES UTILITZACIONS

1- El tub d'alumini de $\varnothing_{\text{exterior}}=80$, $\varnothing_{\text{interior}}=75$, llarg=80 té aquestes mides pensant en una aplicació tèxtil. Tot el prototipus Prat-5 està pensat tenint com a rerafons una aplicació tèxtil que un cop acabada consta de:

1.1- El coixí pneumàtic del Prat-2.0

1.2- L'inductor (l'estàtor) del Prat-5

1.3- El rotor del Prat-2/ Prat-5 (és el mateix rotor), però allargat. La part superior del rotor (més amunt d'on acaba l'estàtor), té el seu interior buidat: és on té lloc l'aplicació tèxtil.

2- Les mides del rotor del Prat-3/ Prat-4 (és el mateix rotor) no s'han pres pas a l'atzar. Son les mides d'una mostra de rotor superconductor. Els superconductors serien susceptibles d'entrar a les màquines elèctriques no només en els conductors de l'induït, sinó també en el rotor conductor.

Caldria resoldre tots els problemes propis de la tecnologia dels superconductors, com la temperatura de treball. Tot plegat el tema d'una nova tesi, però el camí resta obert.

11.3- FUTURES LÍNIES DE RECERCA

Com a norma general les futures línies de recerca han de tendir cap a prototipus:

- 1- Que implementin el transformador d'alimentació en el mateix prototipus
- 2- Que es pugui prescindir de les ranures

Sense ranures

El comportament de la màquina de canyeria (Prat-1) ens confirma d'una manera experimental el bon comportament de les màquines sense ranures quan hom treballa en font de corrent.

En la màquina de canyeria (Prat-1) apareix una força de sustentació de tipus axial, i en el sentit de rebutjar el rotor en direcció contrària al punt de centre de l'estrella. Cal estudiar més detalladament aquest fenomen en treballs posteriors.

La ranura ha de ser tant plana com es pugui per a treballar amb superconductors. Si treballem amb ranura plana es pot arribar a aconseguir que la pròpia espira faci d'espira d'ombra.

Creiem que els nous prototipus han de tendir a ranures planes (ranures molt més amples que altes). En aquest sentit Prat-5 seria el darrer disseny amb tecnologies semblants a les clàssiques

Amb els paràmetres ben determinats

Es important poder determinar (mesurar) els paràmetres de cada un dels prototipus una vegada construïts. Cal mesurar els paràmetres elèctrics, magnètics, mecànics.

Mesurar els paràmetres R- L- C de cada prototipus té una importància tècnica que no es cap trivialitat. Es bo tenir mesures dels paràmetres amb rotor i sense.

El laboratori de grans corrents, en aquest moment no disposa de prou aparells, i això ha comportat fer algunes mesures amb aparells "de lloguer"

Amb la font d'alimentació incorporada

No podem treballar amb sistemes que tinguin el bucle de corrent obert o desmuntable. La integritat del bucle de corrent cal que sigui garantida des del moment de la fabricació (perquè si es pot desmuntar, aquesta possibilitat el fa vulnerable)

Incloure el transformador de intensitat o d'adaptació d'impedància a la xarxa que alimenta la màquina requereix una experiència i uns condicionants de disseny que no es troben en la literatura actual i que l'equip de treball encara no ha desenvolupat suficientment. Es per tant un dels objectius prioritaris per a futurs treballs.

La simplificació constructiva assolible unida a la flexibilitat que dóna el transformador d'adaptació d'impedàncies ens allibera de les geometries constructives tradicionals. Així, doncs, es podran construir molt fàcilment motors lineals, motors tubulars, passos polars progressius i altres configuracions que encara ens costa d'imaginar.

El transformador d'intensitat és un element traductor (canvia la forma de presentació de l'energia elèctrica), que encara no està estudiat, i que per tant ens cal trobar tota la poca literatura tècnica que hi ha al respecte, i generar-ne més si fa falta.

Màquines alimentades per corrent autolevitades

Cal dissenyar aquest transformador d'intensitat que anirà ubicat sobre la màquina. Permetrà tenir més d'un secundari, els uns independents dels altres, i que podran construir-se amb punt comú o sense.

Si aquests secundaris (més d'un), es situen físicament abarçant arcs diferents de l'entreferro poden respondre amb el seu corrent a les variacions d'inductància mútua amb el rotor. Aquestes variacions depenen bàsicament de la posició relativa de cada secundari respecte del rotor, i son la base de la levitació estable. Es a dir:

El disseny dels transformadors (font de corrent) sobre la màquina pot ser la base de les màquines autolevitades (o sense coixinets)

Futures Línies

- 1) Adaptació de les màquines alimentades per corrent a la xarxa:
 - 1.a- Disseny dels transformadors
 - 1.b- Disseny de les màquines autolevitades
- 2) Fent servir una nova eina: El bucle d'alimentació de corrent
- 3) Estudiar, si s'escau més a fons, tot el fenòmen de levitació electromagnètica. Recordem dues dades:
 - 3.a- S'ha observat un efecte de sustentació en la màquina de canyeria.
 - 3.b- Cal estudiar més a fons l'estabilitat deguda al doble inductor. Per aquest camí s'hi ha començat d'anar amb Prat-5. Aquest darrer fenòmen es imprescindible poder-lo estudiar en altres prototipus, més simples que Prat-5
- 4) Preparar la tecnologia dels superconductors:

Perquè n'hi ha prou en substituir trams de conductor rígid per superconductor

12-BIBLIOGRAFIA

- [01] Corrales Martín, Juan: *Càlculo Industrial de Màquines Elèctriques*
Ediciones Tècniques Danae. Barcelona, 1968
- [02] Bosch Tous, Ricard: *Desenvolupament del Motor Elèctric sense coixinets*
Tesi doctoral. UPC-ETSEIB-Departament d'Enginyeria Elèctrica
Barcelona, 1987
- [03] Laitwaite, Eric Robert: *Màquines de Inducció Especiales*
Edit. Labor. Barcelona, 1976
- [04] Cortés Cherta, Manuel: *Curso Moderno de Màquines Elèctriques*
Rotativas
Editores Tècniques Asociados. Barcelona, 1972
- [05] Ras Oliva, Enrique: *Transformadores*
Marcombo de Boixareu. Barcelona, 1991
- [06] Slemon, Gordon R.: *Electric Machines and Drives*
Addison Wesley. Toronto, 1992
- [07] Serrano Iribarnegaray, Luis: *Fundamentos màquines elèctriques rotativas*
Marcombo de Boixareu. Valencia, 1989
- [08] Sanjurjo Navarro, Rafael: *Màquines Elèctriques*
McGrawHill. Madrid, 1990
- [09] Cortés, Corrales, Enseñat: *Teoria General de màquines elèctriques*
UNED. Madrid, 1991
- [10] Ras Oliva, Enrique: *Teoria de Circuitos*
Marcombo de Boixareu. Barcelona, 1988
- [11] Lacroux, Gérard: *Les Aimants Permanents*
Lavoisier. Paris, 1989
- [12] Herranz Acero, Guillermo: *Convertidores Electromecànics de Energia*
Marcombo de Boixareu. Barcelona, 1980
- [13] Lobosco, Orlando Silvio y Pereira da Costa Dias, José Luís: *Selección y aplicación de motores elèctricos*
Marcombo de Boixareu. Barcelona, 1989
- [14] Moeller-Werr: *Construcción y cálculos de resistencia de Màquines Elèctriques*
Edit. Labor. Barcelona, 1960

- [15] Arnold - La Cour: *La màquina dinamoelèctrica: Càlculo, construcció y funcionamiento*
Edit. Labor. Madrid, 1930
- [16] Cortés Cherta, Manuel: *Centrales elèctricas*
CPDA-ETSIIB. Barcelona, 1967
- [17] Timoshenko, S.: *Resistencia de materiales*
Espasa-Calpé. Madrid, 1989
- [18] Ortiz Berrocal, Luis: *Elasticidad*
Politécnica de Madrid. Madrid, 1985
- [20] Edward Shigley, Joseph: *Teoria de màquinas y mecanismos*
McGrawHill. Mexico, 1980
- [21] Streeter, Victor L.: *Mecànica de fluidos*
McGrawHill. Mexico, 1987
- [22] Bendix, Friedrich: *Alrededor del trabajo de los metales*
Edit. Reverté. Barcelona, 1978
- [23] Schröck, Joseph: *Montaje, ajuste y verificación de elementos de màquinas*
Edit. Reverté. Zaragoza, 1965
- [24] Rueda Martinez, Margarita: *Nomenclador de aceros*
Gráficas Centro de España, S.A. Madrid, 1975
- [25] Meriam, J. L.: *Dinàmica*
Edit. Reverté. Barcelona, 1970
- [26] Rapp Ocariz, Jesús: *Teoria y Càlculo de los bobinados elèctricos*
J. Rapp editor. Bilbao, 1987
- [27] DIN Comité de Normas Alemán Berlín: *Normas fundamentales para la tècnica mecànica*
Editorial Balzola. Bilbao, 1977
- [28] Ministerio de Industria y Energia: *Reglamento electrotècnico para baja tensi3n e instrucciones tècnicas complementarias* (Decreto 2413/1973 de 20 de Septiembre.-B.O.E. n° 242 de fecha 9 de Octubre de 1973 y Real Decreto 2295/1985 de 9 de Octubre.- B.O.E. n° 297 de 12 de Diciembre de 1985). Centro publicaciones ministerio. Madrid, 1990

- [29] Ministerio de Industria y Energia: *Reglamento de aparatos a presión e instrucciones técnicas complementarias* (Real decreto 1244/1979 de 4 de Abril de 1979. B.O.E. de 29 de Mayo del 1979) Centro publicaciones ministerio. Madrid, 1990
- [30] Cherkasski, V. M.: *Bombas, Ventiladores, Compresores* Editorial Mir. Moscú, 1986
- [31] Earshaw, Samuel: *On the Nature of the Molecular Forces wich regulate the Constitution of the Luminiferous Ether* Cambridge Philosophical Society, Volum 7 part 1 pag. 97-112, St. John's College, Cambridge, 1839
- [32] Javier Martínez Román, Luís Serrano Iribarnegaray: *Representación gráfica e Interpretación física de los diferentes regímenes de funcionamiento de la máquina asíncrona mediante la teoria de los fasores espaciales.* 4tas. Jornadas Luso-Espanholas, Actas tomo I pag.215-218, Oporto 1995
- [33] Binns, Lawrenson, Trowbridge: *The Analitical and Numerical Solution of Electric and Magnetic Fields* John Wiley & Sons, Ltd. London, 1992
- [34] ADAE (Asociación de aplicaciones de la electricidad; sede social: Orense, 37 - 28020 Madrid): *Aplicaciones de la electricidad en la industria* . Depósito legal: M-13261-1988. Madrid, 1988
- [35] Bosch R, Prat J, López J: *Máquinas eléctricas alimentadas por fuente de corriente: constatación de algunas conclusiones experimentales útiles para el futuro empleo de superconductores.* 5tas Jornadas Hispanolusas de Ingenieria Eléctrica, Actas tomo I pag. 293-299, Salamanca, 1997
- [36] Bosch R, Grau R, Mariscano E: *Motor Lineal para exhibición* 3ras. Jornadas Hispanolusas, Actas tomo I pag. 291-296, Barcelona 1993
- [37] Bosch R, López J, Prat J: *Estudio comparativo Máquina flujo axial, Inducción, Imanes permanentes y reluctancia autocommutado* 4tas. Jornadas Luso-Espanholas, Actas tomo I pag. 30-34, Oporto 1995
- [38] Diego C, Marroyo L, Gil P, Gubia E: *Evolución y tendencias en los accionamientos eléctricos con máquinas de corriente alterna* Revista Dyna (Órgano Oficial de la Federación de Asociaciones de Ingenieros Industriales de España, Alameda de Mazarredo, 69-2º-48009 Bilbao), nº 4-Mayo 1995
- [39] Obradors, Xavier: *Materials per a l'electrotècnia i l'electrònica: Superconductors, Magnètics i Sensors* Departament de materials magnètics, electrònics i superconductors Institut de Ciència de materials de Barcelona, CSIC

- [40] Vivas Morte, Francisco Javier: *Los Motores Lineales como aplicación especial de las Máquinas de Inducción*
Tesis Doctoral. Departament Màquines Elèctriques
UPC-ETSEIB. Barcelona, 1977
- [41] Gutierrez Tofe, Emilio: *Contribución al estudio de las máquinas eléctricas de acción lineal* Tesis Doctoral. Departament Màquines Elèctriques UPC-ETSEIB. Barcelona, 1976
- [42] Coutinho Barbosa, António: *Um Estudo analítico e experimental da forma de onda da indução magnética no entreferro de motores de indução monofásicos*
3ras. Jornadas Hispanolusas, Actas tomo I pag.113-122, Barcelona, 1993
- [43] Garcia Cerrada, Zazo, Suárez Arroyo, Suárez Fdez.: *Estimación Recursiva de Parámetros y Estados en Motores de Inducción*
4tas. Jornadas Luso-Espanholas, Actas tomo I pag.153-162, Oporto 1995