

APORTACIONES AL ESTUDIO DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN MAGNETOHIDRODINÁMICA

Tesis Doctoral realizada por LLUIS MASSAGUÉS VIDAL
para optar al Grado de Doctor en Ingeniería Industrial,
dirigida por el Dr. RICARD BOSCH TOUS.

Departament d'Enginyeria Elèctrica
Universitat Politècnica de Catalunya

Barcelona, 2001.

A la meva dona, Lídia.

TÍTULO TESIS	Aportaciones al estudio de los motores de inducción magnetohidrodinámica
AUTOR	Lluís Massagués i Vidal Enginyer Industrial
DIRECTOR	Ricard Bosch i Tous Dr. Enginyer Industrial
DEPARTAMENT	d'Enginyeria Elèctrica Universitat Politècnica de Catalunya
CONTENIDO	Máquinas eléctricas lineales aplicadas a la impulsión de fluidos
PALABRAS CLAVE	Máquina eléctrica Inducción electromagnética Motor lineal Motor plano Motor tubular Magnetohidrodinámica Magnetohidrodinámica inducida Prototipo experimental

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis está desarrollada dentro de una línea de trabajo de el Dr. Ricard Bosch, iniciada por el Dr. Ramón Mur (Ingeniero Náutico), continuada por el autor de esta tesis, y que en estos momentos ya hay personas que continúan con este trabajo. Paralelamente con esta línea de trabajo existen otras dirigidas también por el Dr. Ricard Bosch que coinciden en temas puntuales, y que ha existido la necesidad del trabajo en equipo para reducir esfuerzos y conseguir objetivos comunes. Como comprenderá el lector, por pura lógica, agradecimientos a todos los que de una manera u otra han intervenido directamente o indirectamente en el desarrollo de esta tesis.

Como agradecimiento particular, agradecer al Dr. Lluís Humet que fue el primero en abrirme las puertas de los estudios de doctorado; al Dr. Ricard Bosch i Tous por aceptar ser mi director de tesis y darme el apoyo necesario para poder desarrollar esta tesis y al Dr. Angel Orille por sus observaciones y consejos para este trabajo.

A mis compañeros de doctorado José López y Josep Prat i Ayats con los cuales he compartido muchas horas de trabajo.

Al equipo humano de la Biblioteca de la ETSE de la Universitat Rovira i Virgili, por la ayuda en la búsqueda bibliográfica.

A mis compañeros del Departament d'Enginyeria Electrònica, Elèctrica i Automàtica, de la URV, por el apoyo recibido, y la ayuda inestimable de algunos de ellos.

Al Sr Ángel Luis Benítez López, por su participación directa en la construcción del prototipo M-1.

I - INDICE DE CAPÍTULOS

APORTACIONES AL ESTUDIO DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN MAGNETOHIDRODINÁMICA

	Pag.
1-	1
Introducción.....	
1.1 - Topologías de máquinas eléctricas lineales.....	1
1.1.1 - Transformación topológica de un motor rotativo en un motor lineal.....	1
1.2 - Principio de funcionamiento del motor lineal plano.....	8
1.3 - Diferencias principales entre los motores lineales y los rotativos.....	10
1.4 - Efectos especiales.....	10
1.4.1 - Efecto de longitud finita.....	11
1.4.2 - Efecto de la anchura finita.....	12
1.4.3 - Efectos de penetración.....	14
1.5- Propuestas de construcción.....	16
2 - Cálculo paramétrico de máquinas lineales.....	17
2.1 - F.e.m. de las máquinas de c.a. lineales planas.....	17
2.1.1- Inducción máxima en el entrehierro.....	21
2.2 - Potencia de una máquina de c.a. lineal plana.....	25
2.3 - Fuerza ficticia en las máquinas lineales de inducción planas.....	27
2.4 - Fuerza de atracción entre semiinductores.....	28
2.5 - F.e.m. de las máquinas de c.a. lineales tubulares.....	28
2.6 - Potencia de una máquina de c.a. lineal tubular.....	30
2.7 - Fuerza ficticia en las máquinas lineales de inducción tubular.....	32
2.8 - Eficacia relativa de los diferentes tipos de máquinas.....	33
2.9 - Tiempo y fuerza aplicada a un motor lineal de traslación horizontal.....	35
2.10 - Tiempo y fuerza aplicada a un motor lineal de movimiento vertical.....	35
3 - Desarrollo de un motor lineal bilateral (M-	37

1).....			
3.1- Construcción de un prototipo de motor lineal para adquisición y posterior discusión de datos.....			37
3.2- Materiales a emplear.....			38
3.2.1 - Circuito eléctrico.....	-		38
3.2.1.1- Características eléctricas del inductor.....			38
3.2.1.2 - Características eléctricas del inducido.....			47
3.2.2 - Circuito dieléctrico.....	-		53
3.2.2.1- Características dieléctricas del inductor.....			53
3.2.2.2- Características dieléctricas del inducido.....			54
3.2.3 - Circuito magnético.....	-		54
3.2.3.1- Excitación necesaria para el prototipo M-1.....			54
3.2.3.2- Circuito magnético del inductor.....			55
3.2.3.3- Circuito magnético del inducido.....			60
3.2.4 - Construcción mecánica (guiado del motor).....			60
3.2.4.1 - Guiado del inductor.....	-		60
3.2.4.2 - Guiado del inducido.....	-		64
3.2.5 - Circuito refrigeración.....	-		67
3.2.5.1 - Refrigeración del inductor.....			67
3.2.5.2 - Refrigeración del Inducido.....			69
3.3 - Prototipo Motor lineal plano con inductor trifásico bilateral (M-1).....			70
3.4 - Mediciones y ensayos realizados del prototipo del motor lineal plano bilateral trifásico (M-1).....			72
3.4.1 - Mediciones de las impedancias de los devanados del inductor.....			72
3.4.2 - Pruebas de tracción con deslizamiento $s=1$			73
3.4.3 - Pruebas dinámicas.....	-		76
3.4.4 - Mediciones de parámetros eléctricos del motor lineal bilateral M-1.....			78
3.4.5 - Determinación de la inducción en el entrehierro, cuando el motor M1 está alimentado a 220V y a 50 Hz.....			86
3.5.....			89

Observaciones.....			
3.6		-	89
Conclusiones.....			
3.7 - Propuestas de mejora del prototipo M-1.....			90
3.8 - Hipótesis del prototipo M-1 con inducido líquido.....			91
3.9 - Fuerzas de atracción del motor lineal M-1.....			95
3.10 - Fuerza de tracción del motor lineal M-1.....			97
3.11 – Tiempo y fuerza de aceleración del prototipo M-1.....			100
4 - Desarrollo de un motor lineal tubular bifásico (M-2).....			101
4.1- Construcción de un prototipo de motor lineal para adquisición y posterior discusión de datos.....			101
4.2- Materiales		a	102
emplear.....			
4.2.1	-	Circuito	102
eléctrico.....			
4.2.1.1-			102
Inductor.....			
4.2.1.2		-	109
Inducido.....			
4.2.2	-	Circuito	112
dieléctrico.....			
4.2.2.1-			112
Inductor.....			
4.2.2.2		-	113
Inducido.....			
4.2.3	-	Circuito	113
magnético.....			
4.2.3.1- Excitación necesaria para el prototipo M-2.....			113
4.2.3.2-			115
Inductor.....			
4.2.3.3		-	117
Inducido.....			
4.2.4 - Construcción mecánica (guiado del motor).....			117
4.2.4.1		-	117
Inductor.....			
4.2.4.2		-	118
Inducido.....			
4.2.5	-	Circuito	118
refrigeración.....			

4.2.5.1	-	118
Inductor.....		
4.2.5.2	-	118
Inducido.....		
4.3 – Mediciones y ensayos realizados del prototipo M-2.....		119
4.3.1- Mediciones de las impedancias de los devanados del inductor.....		119
4.3.2 - Pruebas de tracción con deslizamiento $s=1$, del prototipo M-2.....		120
4.3.3 - Fuerza de tracción del motor lineal M-2.....		127
4.3.4 - Tiempo y fuerza de aceleración del prototipo M-2.....		128
4.3.5	-	129
Observaciones.....		
4.3.6	-	129
Conclusiones.....		
4.3.7 - Propuesta de mejora del prototipo M-2.....		130
5 – Desarrollo de un motor lineal tubular monofásico con espira de sombra (M-3).....		131
5.1- Construcción de un prototipo de motor lineal para adquisición y posterior discusión de datos.....		131
5.2- Materiales	a	133
emplear.....		
5.2.1	-	Circuito 133
eléctrico.....		
5.2.1.1-		133
Inductor.....		
5.2.1.2	-	140
Inducido.....		
5.2.2	-	Circuito 142
dieléctrico.....		
5.2.2.1-		142
Inductor.....		
5.2.2.2	-	142
Inducido.....		
5.2.3	-	Circuito 142
magnético.....		
5.2.3.1- Excitación necesaria para el prototipo M-3.....		142
5.2.3.2-		143
Inductor.....		
5.2.3.3	-	144
Inducido.....		
5.2.4 - Construcción mecánica (guiado del motor).....		145
5.2.4.1	-	145

Inductor.....				
5.2.4.2			-	145
Inducido.....				
5.2.5		-	Circuito	145
refrigeración.....				
5.2.5.1			-	145
Inductor.....				
5.2.5.2			-	145
Inducido.....				
5.3 - Mediciones y ensayos realizados del prototipo de motor lineal tubular con inductor monofásico con espira de sombra M-3.....				146
5.3.1- Mediciones de las impedancias de los devanados del inductor.....				146
5.3.2 - Pruebas de tracción con deslizamiento $s=1$, del prototipo M-3.....				147
5.3.3 - Prueba de tracción realizada con el prototipo M-3 alimentado con una fuente de Alta Tensión.....				150
5.3.4 - Fuerza de tracción del motor lineal M-3.....				153
5.3.5 - Tiempo y fuerza de aceleración del prototipo M-3.....				154
5.3.6			-	156
Observaciones.....				
5.3.7			-	157
Conclusiones.....				
6	-	Comprobación	del	cálculo
paramétrico.....				158
7	-	Balance de potencias en el prototipo M-1.....		160
7.1 - Pérdidas relativas por efecto Joule y caída óhmica.....				160
8	-		Posibles	164
aplicaciones.....				
8.1- Generalidades sobre las posibilidades de aplicación.....				164
8.2- naval.....			Propulsión	164
8.3- Propulsión de metales líquidos.....				164
8.4- Propulsión de líquidos para consumo humano.....				164
9-				165
Conclusiones.....				
10-		Futuras	líneas	de
				166

investigación.....				
10.1 - Propuesta de construcción de nuevos prototipos.....				166
10.2	-		Accionamientos	166
eléctricos.....				
11-				167
Aportaciones.....				
12-				168
Bibliografía.....				
13				- 173
Anexos.....				
13.1 – Introducción a la magnetohidrodinámica.....				173
13.1.1- Principio de funcionamiento de los motores magnetohidrodinámicos MHD.....				173
....				
13.1.2- Definición			y	174
presentación.....				
13.1.3- Fluidos transportables por la				175
MHD.....				
13.1.4	-		Ecuaciones	176
generales.....				
13.1.5			-	178
Aplicaciones.....				
13.1.5.1	-	Propulsión	MHD	179
naval.....				
13.1.5.2 - Propulsión por conducción (MHD).....				180
13.1.5.3 - Configuración de propulsores MHD.....				180
13.1.5.4 - Prototipo de buque con propulsores MHD -YAMATO-1.....				183
13.1.5.5	-	Ventajas	e	185
inconvenientes.....				
13.1.6 – Principio de funcionamiento de los motores de inducción magnetohidrodinámica IMHD.....				187
....				
13.1.7- Propulsión por inducción (IMHD).....				187
13.1.8 - Condiciones previas al diseño de un motor de inducción IMHD para impulsar fluidos.....				192
...				
13.1.9	-	Análisis	de	192
Bernoulli.....				

13.1.10	-	Limitaciones	193
actuales.....			
13.1.11-			194
Antecedentes.....			
13.2 – El circuito magnético principal de las máquinas lineales.....			203
13.2.1 - Líneas de fuerza principales de las máquinas lineales.....			203
13.2.2	-	Parámetros del circuito	208
magnético.....			
13.2.3 - Ley fundamental del circuito magnético.....			209
13.3- Distribución de la fmm en el entrehierro del prototipo M-3.....			212

II - INDICE DE FIGURAS

	Pag.
Fig. 1: Transformación topológica de un motor de inducción rotativo en un motor lineal plano.....	1
.....	
Fig. 2: Motor lineal de inducción plano, de simple inductor, y una lámina conductora sólida como inducido con material ferromagnético para disminuir la reluctancia magnética.....	2
.....	
Fig. 3: Motor lineal de inducción plano, de doble inductor, y una lámina conductora sólida como inducido.....	2
.....	
Fig. 4: Motor lineal de inducción plano, de doble inductor, y un fluido conductor como inducido.....	3
.....	
Fig. 5: Transformación topológica de un motor de inducción rotativo en un motor lineal tubular.....	3
.....	
Fig. 6: Motor lineal tubular trifásico.....	4
.....	
Fig. 7: Motor lineal tubular, de simple inductor, y un cilindro conductor sólido como inducido con un cilindro externo de material ferromagnético para disminuir la reluctancia magnética.....	4
.....	
Fig. 8: Motor lineal tubular, de simple inductor construido con chapas magnéticas, usando paquetes de chapas en paralelo para disminuir la reluctancia magnética...	5
.....	
Fig. 9: Motor lineal tubular, de construcción en cruz de planchas paralelas, inductor unilateral externo construido con chapas magnéticas, y un inducido en forma rectangular sólido, relleno de alambres de hierro, para disminuir la reluctancia magnética.....	5
.....	
Fig. 10: Motor lineal tubular, con un fluido conductor como inducido.....	6
.....	
Fig. 11: Motor lineal tubular de doble inductor, con un fluido conductor como inducido.....	6
.....	
Fig.12: Evolución de un motor de inducción monofásico rotativo en un motor lineal plano y en un motor lineal tubular.....	7
.....	
Fig. 13: Esquema de un motor lineal.....	8
.....	
Fig. 14: Esquema de un motor lineal (estator superior parcialmente cortado).....	9
.....	
Fig. 15: Corte longitudinal de un motor lineal.....	11
.....	
Fig. 16: Representación esquemática de las corrientes dentro del inducido de un motor lineal. (Inducido lineal equivalente a un rotor de jaula de ardilla).....	12

Fig. 17: Representación esquemática de las corrientes dentro del inducido de un motor lineal. (Inducido lineal macizo).....	13
Fig. 18: Inducido tipo IPN.....	13
.....	
Fig. 19: Distribución de las líneas de fuerza del campo magnético dentro del entrehierro de un motor lineal, en función del deslizamiento.....	14
Fig. 20: Esquema eléctrico equivalente de un motor lineal.....	15
.....	
Fig. 21: Factor relativo de forma $K_f = 1,11/k_f$ para un sistema polar con rotor y estator ranurado (motores de inducción).....	20
.....	
Fig. 22: Factor relativo de amplitud para motores de inducción.....	23
Fig. 23: Dimensiones físicas de un motor lineal plano.....	23
Fig. 24: Dimensiones físicas de un motor lineal tubular.....	29
Fig. 25: Máquina lineal tubular bilateral (de doble cara) desarrollada.....	34
Fig. 26: Esquema eléctrico del devanado patrón para los dos inductores (imbricado de doble capa).	42
Fig. 27: Devanado del estator del motor de inducción lineal trifásico, (imbricado de doble capa)	42
.....	
Fig. 28: Devanado de los dos estatores del motor de inducción lineal trifásico, (imbricado de doble capa).....	43
Fig. 29: Dimensión física de una bobina y longitud media de una espira.....	44
Fig. 30: Permeancia específica de las ranuras.	45
.....	
Fig. 31: Permeancia específica de las cabezas de diente.	46
Fig. 32: Raíl inducido.....	49
.....	
Fig. 33: Espira elemental supuesta a priori.....	52
.....	
Fig. 34: Espira elemental supuesta a posteriori.....	53
.....	
Fig. 35: Dimensiones físicas de una ranura.....	53
.....	
Fig. 36: Coeficiente de CARTER.....	56
.....	
Fig. 37: Cálculo gráfico del coeficiente de CARTER K_c	57
Fig. 38: Bloques magnéticos.	59
.....	
Fig. 39: Dimensiones físicas de los dos inductores.	59
.....	
Fig. 40: 2 Estructuras soporte de aluminio , (plancha de aluminio endurecido de 25 mm).....	61

Fig. 41: Perno de unión estructura soporte, 4 varillas de acero inoxidable roscadas.....	62
Fig. 42: Despiece rodamientos.....	63
.....	
Fig. 43: Detalle de perno de unión situado en parte central de cada plancha de aluminio de la lámina carril.....	65
Fig. 44: Vista general del prototipo de motor lineal bilateral.	70
Fig. 45: Relación de la fuerza de tracción en función de la tensión.....	75
Fig. 46: Efecto de la temperatura sobre la fuerza de tracción.	75
Fig. 47: Velocidad – deslizamiento del motor lineal M-1 en función de la tensión	77
Fig. 48: Señal de tensión y corriente en el arranque, en el primer ciclo.	79
Fig. 49: Señal de tensión y corriente durante los primeros ciclos del arranque.	79
Fig. 50: Señal de tensión y corriente a los dos segundos del arranque.	80
Fig. 51: Señal de tensión y corriente a los cuatro segundos del arranque.	80
Fig. 52: Señal de tensión y corriente en la parada, último ciclo.	81
Fig. 53: Señal de tensión y corriente en la parada, últimos tres ciclos.....	81
Fig. 54: Señal de tensión y corriente en el arranque.	82
Fig. 55: Señal de tensión, corriente y potencia en el arranque.	82
Fig. 56: Señal de tensión, corriente y potencia durante los primeros ciclos del arranque.....	83
Fig. 57: Señal de tensión, corriente y potencia, a los dos segundos del arranque.....	83
Fig. 58: Señal de tensión, corriente y potencia, a los cuatro segundos del arranque.....	84
Fig. 59: Señal de tensión, corriente y potencia en la parada, en el último ciclo.....	85
Fig. 60: Señal de tensión, corriente y potencia en la parada, en los cinco últimos ciclos.....	85
Fig. 61: Desfase de la señal de tensión y corriente.	86
Fig. 62: F.e.m. medida con la sonda, en el entrehierro del motor lineal M-1, entre las ranuras 10-12.....	87
Fig. 63: F.e.m. medida con la sonda, en el entrehierro del motor lineal M-1, entre las ranuras 4 -6	87
Fig. 64: F.e.m. medida con la sonda, en el entrehierro del motor lineal M-1,entre las ranuras 1-2.	88
Fig. 65: Espira elemental del agua.	93
Fig. 66: Relación entre la eficiencia eléctrica y el campo magnético aplicado en un motor MHD.....	94
.....	
Fig. 67: Estructura- soporte de aleación de aluminio.....	96
Fig. 68: a: Fuerza de tracción - velocidad, para varios espesores (d) de lámina conductora de aluminio, para un entrehierro de g= 10 mm b: Fuerza de tracción - velocidad, para varios espesores (g) de entrehierro, de lámina conductora de aluminio d= 6 mm.	99
Fig. 69: Fuerza de tracción - velocidad.	99
Fig. 70: Esquema eléctrico del devanado del motor de inducción lineal tubular bifásico, M-2,	

ondulado de simple capa.	104
Fig. 71: Devanado del inductor, del prototipo M-2.	106
Fig. 72: Propuesta de mejora del devanado del inductor, del M-2.	109
Fig. 73: Tubo - inducido del prototipo M-2.....	110
Fig. 74: Motor lineal tubular bifásico, M-2.	116
Fig. 75: Conexiones del prototipo M-2 con el TS.	122
Fig. 76: Relación de la fuerza de tracción en función de la intensidad, del prototipo M-2.....	123
Fig. 77: Relación de la intensidad en función de la tensión, con un inducido líquido (agua saturada de sal).	124
.....	
Fig. 78: Relación de la intensidad en función de la tensión, con un inducido líquido (agua corriente).	125
.....	
Fig. 79: Contraste del consumo de intensidad en función del tipo de inducido líquido,(agua saturada de sal y agua corriente).	126
.....	
Fig. 80: Esquema eléctrico del devanado del motor de inducción lineal tubular monofásico, M-3, ondulado de simple capa.	135
.....	
Fig. 81: Devanado del inductor M-3.....	135
Fig. 82: Motor lineal tubular monofásico con espira de sombra (bifásico virtual) (M-3).....	144
Fig. 83: Ondas de tensión aplicadas de 5kHz al motor lineal tubular monofásico, con un tubo de aluminio como inducido.....	150
Fig. 84: Onda aplicada de 6,9 kV y 13,4 kA, al prototipo M-3, y onda de potencia instantánea consumida.	153
Fig. 85: Balance de potencias.....	162
.....	
Fig. 86: Principio de funcionamiento de los motores magnetohidrodinámicos.....	173
Fig. 87: Generador M.H.D.....	176
.....	
Fig. 88: Dispositivo de levitación.....	178
.....	
Fig. 89: Generador MHD con metal líquido y paneles solares.....	179
Fig. 90: Esquema del principio de M.H.D.....	180
.....	
Fig. 91: Corte de un propulsor con una configuración toroidal.....	181
Fig. 92: Corte longitudinal de un propulsor con una configuración de doble solenoide.....	181
Fig. 93: Corte de un propulsor con una configuración dipolar.....	182
Fig. 94: Corte de un propulsor con una configuración "jaula de ardilla"	182
Fig. 95: Vista general del Yamato-1.....	183

Fig. 96: Esquema básico de un motor magnetohidrodinámico del Yamato-1.....	184
Fig. 97: Dibujo de perspectiva de un grupo propulsor M.H.D. del Yamato-1.....	184
Fig. 98: Esquema de principio de la IMHD.....	188
Fig. 99: Densidad de corriente lineal senoidal.....	189
Fig. 100: Alimentación trifásica multipolar.....	191
Fig. 101: Canal de propulsión.....	191
Fig. 102: Bomba para impulsar acero líquido.....	194
Fig. 103: Construcción básica de una bomba de inducción para transportar 6 m ³ /h de sodio fundido.....	196
....	
Fig. 104: Motor lineal tubular.....	198
.....	
Fig. 105: Prototipo de motor lineal tubular de la tesis doctoral de Ramón Grau.....	199
....	
Fig. 106: Esquema del prototipo de la tesis de Ramón Grau, conexión en triángulo, paso corto.....	200
.....	
Fig. 107: Relación Fuerza desarrollada-Corriente por fase.....	201
Fig. 108: Inductor plano unilateral (de simple cara), con inducido laminar (sólido) exclusivamente conductor (sin partes ferromagnéticas).....	203
Fig. 109: Inductor plano bilateral (de doble cara), con inducido laminar (sólido) exclusivamente conductor (sin partes ferromagnéticas).....	203
Fig. 110: Inductor plano bilateral con inducido conductor en estado líquido.....	204
Fig. 111: Inductor tubular de simple cara unilateral, con inducido sólido.	204
Fig. 112: Inductor tubular prismático unilateral externo.	205
.....	
Fig. 113: Inductor unilateral externo, con inducido tubular sólido.....	205
Fig. 114: Inductor prismático unilateral externo, construido con bloques planos separados, y con inducido sólido, también construido con bloques separados, combinando materiales conductores y ferromagnéticos.	206
.....	
Fig. 115: Inductor tubular bilateral (doble cara), con inducido tubular conductor sólido.....	206
Fig. 116: Inductor tubular unilateral externo, (simple cara), con un inducido líquido conductor.....	207
...	
Fig. 117: Inductor tubular bilateral (doble cara), con un inducido líquido conductor.....	207
Fig. 118: Trayectos característicos de las líneas de fuerza de las máquinas eléctricas lineales	

planas.....	210
Fig. 119: Trayectos característicos de las líneas de fuerza de las máquinas eléctricas lineales tubulares o anulares.....	210

III - INDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 1: Medidas de temperatura, y parámetros eléctricos del inductor, del prototipo M-1....	68
Tabla 2: Medidas de temperatura, y parámetros eléctricos del inducido, del prototipo M-1....	69
Tabla 3: Impedancias del inductor del prototipo M-1, sin el inducido.....	72
Tabla 4: Impedancias del inductor del prototipo M-1, con el inducido.....	72
Tabla 5: Valores de la fuerza de tracción del prototipo M-1 en función de la tensión aplicada y corriente absorbida.....	74
Tabla 6: Velocidad del prototipo M-1, en función de la tensión aplicada y corriente absorbida.....	76
.....	
Tabla 7: Resumen de fuerzas del prototipo M-1.....	100
Tabla 8: Impedancias de los devanados del inductor del prototipo M-2	119
Tabla 9: Impedancias del inductor del prototipo M-2.....	119
Tabla 10: Valores de la fuerza de tracción del prototipo M-2, en función de la tensión aplicada y corriente absorbida.....	122
Tabla 11: Valores de la corriente absorbida del prototipo M-2, en función de la tensión aplicada, con agua saturada de sal como inducido.	124
Tabla 12: Valores de la corriente absorbida del prototipo M-2, en función de la tensión aplicada, con agua corriente como inducido.	125
.....	
Tabla 13: Resumen de fuerzas prototipo M-2.....	128
Tabla 14: Impedancias del inductor del prototipo M-3.....	146
Tabla 15: Valores de la fuerza de tracción del prototipo M-3, en función de la tensión aplicada y corriente absorbida.	147
Tabla 16: Resumen de fuerzas prototipo M-3.....	154
Tabla 17: Conductividades eléctricas típicas.....	175
Tabla 18: Relación corriente fase, tensión eficaz por fase y fuerza.....	201

IV - INDICE DE FOTOGRAFIAS

	Pag.
Foto. 1: Inductor del prototipo M-1 (dos semiestatores).....	44
Foto. 2: Prototipo M-1, con una rueda desmontada.	64
Foto. 3: Carril inducido, instalado en los laboratorios de Máquinas eléctricas de la E.T.S.E.- U.R.V.	66
.....	
Foto. 4: Detalle Carril inducido.	67
.....	
Foto. 5: Conjunto del Prototipo M-1, inductor-carril inducido, visto de frente.....	70
Foto. 6: Conjunto del Prototipo M-1, inductor-carril inducido, visto de perfil.....	71
Foto. 7: Perspectiva del prototipo M-1, sin la lámina carril.	71
Foto. 8: Equipo de medida Tektronix, y prototipo M-1.	78
Foto. 9: Recipiente de poliglas.....	92
Foto. 10: Prototipo M-1 con inducido líquido.....	92
Foto. 11: Devanados inductores a medio mecanizar del prototipo M-2.....	105
Foto. 12: Devanados inductores del prototipo M-2 mecanizados.	105
Foto. 13: Montaje de los devanados inductores del prototipo M-2 sobre el material ferromagnético y proceso de aislamiento.....	113
Foto. 14: Vista general del ensayo a tracción del prototipo M-2.....	120
Foto. 15: Vista del ensayo a tracción del prototipo M-2 conectado al TS.....	121
Foto. 16: Prototipo M-3.	136
.....	
Foto. 17: Ensayo del Prototipo M-3 alimentado con la fuente de alta frecuencia (5000 Hz)..	148
Foto. 18: Detalle del prototipo M-3, conectado a la fuente de alta frecuencia (5000 Hz).....	149
Foto. 19: Laboratorio de Alta Tensión de la UPC, donde se han realizado pruebas con el prototipo M-3.	151
.....	
Foto. 20: Detalle conexionado del prototipo M-3 a la fuente de Alta Tensión.....	152
Foto. 21: Fotografía del “poliferro”, realizada por la Sra. Montse Marsal, con el microscopio electrónico de la UPC.....	202

V - INDICE DE SIMBOLOS

A_{cu}	sección transversal de cobre en las ranuras
A_D	(C L) = sección longitudinal del inducido en el entrehierro
a	½ ancho de la lámina del inducido
a_d	Ancho de diente
a_r	Ancho de ranura
a_{re}	Ancho de ranura útil
B	Nº de bobinas
B	Densidad de flujo magnético
B_a	Campo magnético aplicado
B_c	Campo magnético de la corona
B_m	Campo magnético medio
B_k	Campo magnético del tramo k
B_r	Reacción de campo magnético
B_y	Campo magnético según y-o
\overline{B}_{ye}	Inducción máxima en el yugo del tubo exterior
\overline{B}_{yi}	Inducción máxima en el yugo del inductor
$\overline{B}_?$	Inducción máxima efectiva en el entrehierro
$\overline{B}_?$	Inducción máxima en el entrehierro liso supuesta la onda de campo senoidal,
?	a igualdad de f.e.m. eficaz.
$\overline{B}_{?0}$	Inducción máxima en el entrehierro supuesta la curva de campo senoidal, en T,
?	en vacío (para la tensión en bornes U_f por fase)
$\overline{B}_?$	inducción media en el entrehierro
$\overline{B}_?$	Inducción media en el entrehierro liso supuesta la onda de campo senoidal, a
?	igualdad de f.e.m. eficaz.
C	Ancho total o geométrico del inducido en el entrehierro.
C_f	Coefficiente de fricción
D	Diámetro
d	Ancho cabeza de bobina
E	Intensidad de campo eléctrico
E	f.e.m. eficaz
E	Energía
E_f	F.e.m. inducida por fase
E_k	F.e.m. del tramo k
E_x	Componente de E según x-o
E_2	F.e.m. eficaz del inducido
E_1	F.e.m. del estator

E_2	F.e.m. del rotor
E'_2	F.e.m. por fase secundaria reducida al primario
e	F.e.m. eficaz de una espira
e	Grosor del manguito de ranura
F	Fuerza
F_{ac}	Fuerza de aceleración
F_b	Fuerza ficticia en bornes
F_y	Componente de F según y-o
f	Frecuencia
f_1	Frecuencia del estator
$f_?$	Fuerza normal por unidad de superficie en un campo magnético
G	Nº de grupos de bobinado
G	Peso
g	Aceleración de la gravedad
H	Intensidad de campo
H_{ye}	Intensidad de campo en el yugo del tubo externo
H_{yi}	Intensidad de campo en el inductor
\bar{H}	Intensidad de campo máxima
h	Altura
hc	Altura conductor en la ranura
h_d	Altura del diente
hp	Altura de la pared
h_r	Altura de la ranura
h_{re}	Altura de la ranura útil
ht	Altura total
h_y	Altura del yugo
h_{ye}	Altura del yugo del tubo externo
h_{yi}	Altura del yugo del inductor
h_{y1}	Altura del yugo 1
h_{y2}	Altura del yugo 2
I	Corriente
I_f	Corriente por fase
I_{Fe}	Corriente de pérdidas en el hierro
I_1	Corriente nominal por fase estática
I_2	Corriente nominal por fase rotórica
I'_2	Corriente por fase estática debida a la carga del secundario
$I_?$	Corriente magnetizante
$I_{?e}$	Corriente magnetizante del entrehierro
J	Densidad de corriente
J_x	Componente de J según x-o
J_z	Componente de J según z-o

K_c	Coeficiente de Carter
K_f	Factor relativo de forma de la onda de f.e.m.
K_{Fe}	Factor de espacio axial para el inducido de plancha
K_M	Factor relativo de amplitud
K_r	Coeficiente corrector de X_2
k	Constante del material
k_M	Factor relativo de amplitud
k_s	Factor de saturación
k_f	Factor de forma de la onda de f.e.m.
L	Longitud del inducido en el entrehierro
L	Inductancia
L_x	Inductancia de dispersión por fase
l	Longitud
l_m	Longitud media de una espira
l_y	Longitud del yugo
M	Inductancia mútua
$M_?$	Factor de Massagués
m	Nº de fases
m_1	Nº de fases del estator
m_2	Nº de fases del rotor
N	Nº de espiras
N_f	Nº de espiras por fase
N_1	Nº de espiras por fase del devanado del estator
N_2	Nº de espiras por fase del devanado del rotor
n	Nº de ranuras
n_{pf}	Nº de ranuras por polo y fase
n_1	Nº de ranuras del estator
n_2	Nº de ranuras del rotor
P	Potencia útil
P_b	Potencia aparente en bornes
P_{em}	Potencia electromagnética
P_m	Potencia mecánica desarrollada
P_{J1}	Pérdidas por efecto Joule en el devanado del estator
P_{J2}	Pérdidas por efecto Joule en el devanado del rotor
P'_{J2}	Pérdidas en el cobre rotórico referidas a la potencia primaria
\bar{P}_{J1}	Pérdidas relativas por efecto Joule de un inductor
\bar{P}_{J2}	Pérdidas relativas por efecto Joule del inducido
P_{1-2}	Potencia transmitida al rotor por el estator
p	Pares de polos
p	Presión estática
q	Carga lineal específica de un inducido

R	Resistencia eléctrica
R_c	Resistencia de la carga
R'_c	Resistencia representativa de la carga mecánica
R_{es}	Resistencia eléctrica de la espira de sombra
R_1	Resistencia eléctrica del estator
R_2	Resistencia eléctrica del rotor
R_γ	Resistencia de una fase a la tª ?
$R_{\gamma'}$	Resistencia de una fase a la tª ?'
r_E	Relación de transformación de f.e.m.
r_i	Relación de transformación de corriente
r_γ	Relación de transformación de resistencias
?	Reluctancia magnética
$?_m$	Nº de Reynolds magnético
S	Sección
s	Deslizamiento
T	Duración de un período
T	Tiempo
T_0	Temperatura “eléctrica” absoluta del conductor correspondiente a los cero °C
U	Nº de bobinas por grupo
U	Tensión
U_f	Tensión por fase
U_{R2}	Caída de tensión debido a la R_2
u_1	Caída óhmica de un semiinductor
\bar{u}_{R1}	Pérdidas relativas por efecto Joule del inductor
\bar{u}_{R2}	Pérdidas relativas por efecto Joule del inducido
V	Velocidad
V_s	Velocidad sincrónica
V_k	Velocidad del tramo k
X	Reactancia de dispersión por fase
X_m	Reactancia de acoplamiento magnético entre el inductor y el inducido;
X_1	Reactancia del estator
X_2	Reactancia del rotor
Y_B	Paso de bobina
Y_k	Paso de ranuras
Z	Impedancia
Z	Nº total de conductores del inducido
Z_n	Nº medio de conductores en serie por ranura
Z_{mp}	Componente de la impedancia de magnetización propia del motor lineal.
Z_1	Nº de conductores del estator.
Z_2	Nº de conductores del rotor.
?	Densidad de corriente

?	Entrehierro
?	Viscosidad dinámica del fluido
η_m	Rendimiento mecánico
?	Temperatura ambiente
θ'	Temperatura de un devanado
?	F.m.m.
θ_{ye}	Excitación por polo para el yugo del tubo externo
θ_{yi}	Excitación por polo para el inductor
θ_1	F.m.m. del inductor
θ_2	F.m.m. del inducido
θ_γ	F.m.m. de excitación para vencer la reluctancia del circuito magnético
?	Permeancia magnética
θ_{es}	Permeancia magnética de la espira de sombra
?	Longitud de onda
θ_d	Permeancia específica de las cabezas de diente
θ_{es}	Permeancia específica de la espira de sombra
θ_r	Permeancia específica de las ranuras
θ_x	Permeancia específica del circuito de dispersión
?	Factor de bobinado
θ_B	Coefficiente de efecto Bosch
θ_{b1}	Factor de devanado del estator
θ_{b2}	factor de devanado del rotor
θ_d	Factor de distribución
θ_{ds}	Coefficiente de devanados asimétricos
θ_{es}	Coefficiente de espiras de sombra
θ_{Js}	Coefficiente de jaulas de sombra
θ_p	Coefficiente de posición rotórica
θ_s	Coefficiente de sombra
θ_y	Factor de distribución acortamiento del paso
?	Masa volumétrica del fluido
?	Resistividad eléctrica
θ_{20}	Resistividad eléctrica a 20°C
?	Conductividad eléctrica
θ_p	Conductividad eléctrica de la pared
θ_0	Coefficiente de permeabilidad de vacío, o del aire ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m)
θ_r	Coefficiente de permeabilidad relativa
?	Viscosidad cinemática del fluido
θ_p	Paso polar
?	Flujo por polo
θ_k	Flujo del tramo k
θ_γ	Flujo efectivo en el entrehierro

- $\frac{?}{?}$ Flujo ficticio del entrehierro por polo
- ? Desfase entre corriente y tensión
- ? Pulsación del campo, en radianes eléctricos por segundo
- ?₁ Pulsación del campo, del inductor
- ?₂ Pulsación del campo, del inducido