



Universitat Politècnica de Catalunya
Departament d'Enginyeria Elèctrica

A large, light blue circular graphic with a fine grid pattern, centered on the page. The text is overlaid on this graphic.

TESIS DOCTORAL

**APORTACIONES AL ESTUDIO DE LAS
MAQUINAS ELÉCTRICAS DE FLUJO
AXIAL MEDIANTE LA APLICACION DEL
METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS**

Eduardo Frías Valero

Ingeniero Industrial

Año 2.004

APORTACIONES AL ESTUDIO DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS DE FLUJO AXIAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.

Tesis Doctoral realizada por Eduardo Frías Valero, Ingeniero Industrial, para optar al Grado de Doctor en Ingeniería Industrial.

Dirigida por el profesor Dr. Ricard Bosch Tous.

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. Departament d'Enginyeria Eléctrica.

Barcelona, septiembre de 2.004.

INDICE.

1. SUMARIO.	9
2. INTRODUCCION.	11
2.1. EVOLUCIÓN TOPOLOGICA DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN RADIAL A LA AXIAL.	16
2.2. MÁQUINAS LINEALES Y MÁQUINAS DE FLUJO AXIAL.	18
2.2.1. PRIMERAS DIFERENCIAS MÁQUINA ROTATIVA - MÁQUINA LINEAL Y AXIAL.	18
2.2.2. EFECTOS ESPECIALES EN MÁQUINAS LINEALES Y AXIALES.	19
2.2.2.1. EFECTO DE LONGITUD FINITA.	19
2.2.2.2. EFECTO DE ANCHURA FINITA.	19
2.2.2.3. EFECTO DE PENETRACIÓN.	21
2.2.2.4. EFECTO LEVITACIÓN.	21
2.3. ELEVACIÓN DE LAS F DE TRABAJO Y CAMBIO DE MATERIALES CONSTRUCTIVOS.	22
2.4. CLASIFICACIÓN DE LAS MÁQUINAS DE FLUJO AXIAL.	24
3. LA MAQUINA DE FLUJO AXIAL. PARAMETROS DE DISEÑO	30
3.1. SOLUCIÓN ANALÍTICA DE LAS ECUACIONES DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN.	30
3.2. JUSTIFICACIÓN DE LA MÁQUINA DE FLUJO AXIAL.	34
3.2.1. DENSIDAD DE POTENCIA DE LA MÁQUINA AXIAL.	34
3.2.2. EL PAR DE LA MÁQUINA AXIAL Y SU RELACIÓN CON EL DIÁMETRO EXTERIOR.	35
3.2.3. INFLUENCIA DEL NÚMERO DE POLOS EN EL PAR Y EL RENDIMIENTO.	39
3.2.4. ECUACIÓN DIMENSIONAL DE LA MÁQUINA GENERAL.	42
3.2.5. ECUACIÓN DIMENSIONAL DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN.	45
3.2.6. ECUACIÓN DIMENSIONAL PARA LA MÁQUINA DE FLUJO AXIAL.	46
3.3. CRITERIOS DE DISEÑO DE MÁQUINAS AXIALES.	47
3.3.1. EL BOBINADO. MÁQUINAS CON Y SIN HIERRO.	48
3.3.2. CIRCUITO MAGNÉTICO.	57
3.3.3. ESTIMACIÓN DE PÉRDIDAS DE LA MÁQUINA.	60
3.4. CRITERIOS DE DISEÑO EMPLEADOS EN LAS MÁQUINAS DEL DEE.	62
3.4.1. PARÁMETROS DE DISEÑO DE LOS MOTORES RB.	62
3.4.2. PARÁMETROS DE ESTUDIO.	64
3.4.3. MOTOR SIN HIERRO, DASER.	65
3.5. COMPARACIÓN DE MÁQUINAS AXIALES Y RADIALES.	68
3.6. ARMÓNICOS DE PAR EN LA MÁQUINA AXIAL.	72
3.6.1. FORMAS CONSTRUCTIVAS DE REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS.	74
3.6.2. REDUCCIÓN DE ARMÓNICOS DE PAR EN MÁQUINAS AXIALES DE IMANES PERMANENTES.	77
3.7. NUEVOS MATERIALES.	83
3.7.1. POLVO METÁLICO AISLADO.	83
3.7.2. MATERIALES PLÁSTICOS.	84
3.7.3. NUEVOS MATERIALES MAGNÉTICOS.	85
4. APLICACIONES DE LA MÁQUINA DE FLUJO AXIAL. ESTADO DEL ARTE	86
4.1. EL COCHE ELÉCTRICO	87
4.1.1. CARACTERÍSTICAS DE LA TRACCIÓN EN AUTOMÓVILES	87
4.1.2. TIPOLOGÍA DE MÁQUINA AXIAL PARA TRACCIÓN EN AUTOMÓVILES.	89
4.1.3. CIRCUITO EQUIVALENTE PARA LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN	92
4.1.4. CASO DE MÁQUINA DE IMANES PERMANENTES	94
4.1.5. VOLANTES DE INERCIA	97
4.2. ASCENSORES	99

4.2.1.	CARACTERÍSTICAS DE LOS ASCENSORES	99
4.2.2.	CARACTERÍSTICAS DE LA MÁQUINA Y DRIVERS	100
4.3.	AEROGENERADORES	103
4.3.1.	APLICACIÓN DE MÁQUINAS AXIALES A LOS GENERADORES	103
4.3.2.	CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO	104
4.4.	APLICACIONES NAVALES	106
4.5.	APLICACIONES AERONÁUTICAS	108
4.6.	GRUPOS ELECTRÓGENOS	109
5.	EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF ó FEM).	111
5.1.	EL MÉTODO GENERAL.	111
5.1.1.	DEFINICIÓN DEL MÉTODO.	111
5.1.2.	APLICACIÓN DEL MÉTODO.	111
5.1.3.	FUNCIONES DE FORMA.	114
5.1.3.1.	<i>PROPIEDADES DE LAS FUNCIONES DE FORMA.</i>	114
5.1.3.2.	<i>CRITERIO DE LA PARCELA.</i>	115
5.1.3.3.	<i>TIPOS DE FUNCIONES DE FORMA.</i>	115
5.1.4.	INTEGRACIÓN NUMÉRICA.	117
5.1.5.	ESTIMACIÓN DEL ERROR Y MALLADO ADAPTATIVO.	120
5.1.5.1.	<i>ESTIMACIÓN DEL ERROR.</i>	121
5.1.5.2.	<i>MALLADO ADAPTATIVO.</i>	122
5.1.6.	PASOS A SEGUIR EN EL CÁLCULO MEF. FUNCIONAMIENTO DE UN PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.	123
5.2.	EL MEF APLICADO AL ELECTROMAGNETISMO.	124
5.2.1.	ECUACIONES DE PARTIDA.	124
5.2.2.	MÉTODOS DE RESOLUCIÓN POR EL MEF.	126
5.2.3.	SOLUCIÓN EMPLEANDO EL POTENCIAL ESCALAR MAGNÉTICO.	127
5.2.3.1.	<i>ESTRATEGIA RSP.</i>	128
5.2.3.2.	<i>ESTRATEGIA DSP.</i>	128
5.2.3.3.	<i>ESTRATEGIA GSP.</i>	129
5.2.4.	SOLUCIÓN EMPLEANDO EL POTENCIAL VECTOR MAGNÉTICO.	130
5.2.5.	MÉTODO DE RESOLUCIÓN DE CAMPOS ELECTROSTÁTICOS. POTENCIAL ESCALAR ELÉCTRICO.	131
5.2.6.	MATRICES DE PARÁMETROS ELECTROMAGNÉTICOS.	131
5.2.6.1.	<i>EMPLEANDO EL POTENCIAL ESCALAR MAGNÉTICO.</i>	131
5.2.6.2.	<i>EMPLEANDO EL POTENCIAL VECTOR MAGNÉTICO.</i>	132
5.2.6.3.	<i>EMPLEANDO EL POTENCIAL ESCALAR ELÉCTRICO.</i>	135
5.2.7.	MAGNITUDES RESULTANTES.	135
5.2.7.1.	<i>RESULTADO OBTENIDO POR EL MÉTODO DEL POTENCIAL ESCALAR MAGNÉTICO.</i>	135
5.2.7.2.	<i>RESULTADO OBTENIDO POR EL MÉTODO DEL POTENCIAL VECTOR MAGNÉTICO.</i>	136
5.2.7.3.	<i>CÁLCULO DE FUERZAS.</i>	137
5.2.7.4.	<i>CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR EFECTO JOULE.</i>	139
5.2.7.5.	<i>FUERZAS ELECTROSTÁTICAS.</i>	140
5.2.8.	FUNCIONES DE FORMA. EL ELEMENTO ANSYS SOLID 117.	140
5.2.8.1.	<i>ELEMENTO BIDIMENSIONAL DE 8 NODOS.</i>	140
5.2.8.2.	<i>ELEMENTO TRIDIMENSIONAL DE 20 NODOS.</i>	141
6.	MODELOS ANALIZADOS.	145
6.1.	PROTOTIPOS DESARROLLADOS EN EL DEE.	145
6.2.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO TRIDIMENSIONAL.	147
6.3.	RECURSOS EMPLEADOS.	154
6.3.1.	EQUIPO.	154

6.3.2.	REFERENCIAS DE SIMULACIONES MEF.	155
6.4.	ELEMENTOS Y MALLADO DE LOS MODELOS.	156
6.4.1.	ELEMENTOS EMPLEADOS EN EL MALLADO.	156
6.4.2.	MALLADO DEL SEMIESTÁTOR.	157
6.4.3.	MALLADO DEL DEVANADO INDUCTOR.	159
6.4.4.	MALLADO DEL RÓTOR.	160
6.4.5.	MALLADO DEL AIRE.	161
6.5.	CONDICIONES DE CONTORNO.	163
7.	RESULTADOS.	165
7.1.	CONSIDERACIONES PREVIAS.	165
7.1.1.	ELEMENTOS EMPLEADOS EN LA DISCRETIZACIÓN Y CONDICIONES DE SIMETRÍA.	165
7.1.2.	MÉTODO DE RESOLUCIÓN EMPLEADO.	166
7.2.	RESULTADOS SIMULACIÓN MÁQUINA 20 PARES DE POLOS.	167
7.2.1.	VALORES PARA $s=0.05$ Y VARIACIÓN DE F	169
7.2.2.	VALORES PARA $f=50\text{Hz}$ Y VARIACIÓN DE S	175
7.2.3.	VALORES PARA $f=100\text{ Hz}$ Y VARIACIÓN DE S	179
7.2.4.	VALORES PARA $f=300\text{ Hz}$ Y VARIACIÓN DE S	184
7.2.5.	VALORES PARA $f=500\text{ Hz}$ Y VARIACIÓN DE S	189
7.2.6.	VALORES PARA $f=1000\text{ Hz}$ Y VARIACIÓN DE S	192
7.2.7.	VALORES PARA $f=3000\text{ Hz}$ Y VARIACIÓN DE S	197
7.3.	COMENTARIO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.	202
7.3.1.	VARIACIÓN DE F MANTENIENDO EL DESLIZAMIENTO DEL RÓTOR $s=0.05$.	202
7.3.2.	VARIACIÓN DE DESLIZAMIENTO A LA FRECUENCIA DE 50 Hz.	203
7.3.3.	VARIACIÓN DE DESLIZAMIENTO A LA FRECUENCIA DE 500 Y 3000 Hz.	204
7.3.4.	VARIACIÓN DE DESLIZAMIENTO A LA FRECUENCIA DE 1000 Hz.	205
7.3.5.	VARIACIÓN DE DESLIZAMIENTO PARA FRECUENCIAS DE 50 A 1000 Hz.	205
7.3.6.	ANÁLISIS DE CONJUNTO.	206
7.4.	RESULTADOS EXPERIMENTALES.	207
7.4.1.	MÁQUINA RB-3.	207
7.4.2.	MÁQUINA DASER.	209
8.	CONCLUSIONES Y FUTURAS LINEAS DE TRABAJO	210
8.1.	CONCLUSIONES	210
8.2.	FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.	212
A.	APENDICE. RESULTADOS GRÁFICOS DE LA MÁQUINA DE 20 PARES DE POLOS.	213
A.1.1.	BARRIDO DE FRECUENCIAS DE LAS CORRIENTES ESTATÓRICAS (FE) DE 50 Hz A 3.000Hz PARA UN DESLIZAMIENTO $s=0.05$.	213
A.1.1.1.	$f_e=50\text{Hz} - f_r=2.375\text{Hz}$.	213
A.1.1.2.	$f_e=100\text{Hz} - f_r=4.75\text{Hz}$.	216
A.1.1.3.	$f_e=200\text{Hz} - f_r=9.5\text{Hz}$.	220
A.1.1.4.	$f_e=300\text{Hz} - f_r=14.25\text{Hz}$.	224
A.1.1.5.	$f_e=500\text{Hz} - f_r=23.75\text{Hz}$.	228
A.1.1.6.	$f_e=1000\text{Hz} - f_r=47.5\text{Hz}$.	229
A.1.1.7.	$f_e=2000\text{Hz} - f_r=95\text{Hz}$.	233
A.1.1.8.	$f_e=3000\text{Hz} - f_r=142.5\text{Hz}$.	237
A.1.1.9.	$f_e=4000\text{Hz} - f_r=190\text{Hz}$.	241
A.1.1.10.	$f_e=5000\text{Hz} - f_r=237.5\text{Hz}$.	245
A.1.2.	COMPORTAMIENTO DEL MOTOR A UNA FE DE 50 Hz, AL VARIAR EL DESLIZAMIENTO DE $s=0.05$ HASTA $s=0.999$	249
A.1.2.1.	$s=0.05 - f_r=2.375\text{Hz}$.	249

<i>A.1.2.2.</i>	<i>S=0.10 - FR=2.25HZ</i>	249
<i>A.1.2.3.</i>	<i>S=0.20 - FR=2HZ</i>	252
<i>A.1.2.4.</i>	<i>S=0.40 - FR=1.5HZ.</i>	256
<i>A.1.2.5.</i>	<i>S=0.50 - FR=1.25HZ.</i>	259
<i>A.1.2.6.</i>	<i>S=0.60 - FR=1HZ.</i>	262
<i>A.1.2.7.</i>	<i>S=0.999 - FR=0.0025HZ.</i>	265
A.1.3.	COMPORTAMIENTO DEL MOTOR A UNA FE DE 100 HZ, AL VARIAR EL DESLIZAMIENTO DE S=0.05 HASTA S=0.999.	268
<i>A.1.3.1.</i>	<i>S=0.05 - FR=4.75HZ.</i>	268
<i>A.1.3.2.</i>	<i>S=0.20 - FR=4HZ.</i>	268
<i>A.1.3.3.</i>	<i>S=0.50 - FR=2.5HZ.</i>	272
<i>A.1.3.4.</i>	<i>S=0.999 - FR=0.005HZ.</i>	276
A.1.4.	COMPORTAMIENTO DEL MOTOR A UNA FE DE 300 HZ, AL VARIAR EL DESLIZAMIENTO DE S=0.05 HASTA S=0.999.	280
<i>A.1.4.1.</i>	<i>S=0.05 - FR=14.25HZ.</i>	280
<i>A.1.4.2.</i>	<i>S=0.20 - FR=12HZ.</i>	280
<i>A.1.4.3.</i>	<i>S=0.50 - FR=7.5HZ.</i>	284
<i>A.1.4.4.</i>	<i>S=0.999 - FR=0.015HZ.</i>	288
A.1.5.	COMPORTAMIENTO DEL MOTOR A UNA FE DE 500 HZ, AL VARIAR EL DESLIZAMIENTO DE S=0.05 HASTA S=0.999.	291
<i>A.1.5.1.</i>	<i>S=0.05 - FR=14.25HZ.</i>	291
<i>A.1.5.2.</i>	<i>S=0.20 - FR=20HZ.</i>	291
<i>A.1.5.3.</i>	<i>S=0.50 - FR=12.5HZ.</i>	295
<i>A.1.5.4.</i>	<i>S=0.999 - FR=0.025HZ.</i>	299
A.1.6.	COMPORTAMIENTO DEL MOTOR A UNA FE DE 1000 HZ, AL VARIAR EL DESLIZAMIENTO DE S=0.05 HASTA S=0.999.	302
<i>A.1.6.1.</i>	<i>S=0.05 - FR=47.5HZ.</i>	302
<i>A.1.6.2.</i>	<i>S=0.20 - FR=40HZ.</i>	302
<i>A.1.6.3.</i>	<i>S=0.50 - FR=25HZ.</i>	306
<i>A.1.6.4.</i>	<i>S=0.999 - FR=0.05HZ.</i>	310
A.1.7.	COMPORTAMIENTO DEL MOTOR A UNA FE DE 3000 HZ, AL VARIAR EL DESLIZAMIENTO DE S=0.05 HASTA S=0.999.	314
<i>A.1.7.1.</i>	<i>S=0.05 - FR=95HZ.</i>	314
<i>A.1.7.2.</i>	<i>S=0.20 - FR=120HZ.</i>	314
<i>A.1.7.3.</i>	<i>S=0.50 - FR=75HZ.</i>	318
<i>A.1.7.4.</i>	<i>S=0.999 - FR=0.15HZ.</i>	321
BIBLIOGRAFIA.		322
INDICE DE FIGURAS.		338
INDICE DE SIMBOLOS.		347