ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

DISEÑO Y ESTUDIO ELECTROMAGNÉTICO MEDIANTE SOLIDWORKS Y JMAG-DESIGNER DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA CON ESTATOR INNOVADOR

(Design and electromagnetic study with SolidWorks and JMAG-Designer of a squirrel cage induction motor with innovative stator)

Para acceder al Título de

GRADUADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

Autor: Nuria Fernández Jorrín

Julio - 2017

Índice General

DOCUMENTO Nº1: MEMORIA	2
DOCUMENTO Nº2: ANEXOS	73
DOCUMENTO Nº3: PLANOS	
DOCUMENTO Nº4: PLIEGO DE CONDICIONES	
DOCUMENTO Nº5: MEDICIONES Y PRESUPUESTO.	

DOCUMENTO Nº1: MEMORIA

Índice de Documento 1: Memoria

1		OB	JET	O	8
2		ALC	CAN	CE	8
3		AN	TEC	EDENTES DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	9
	3.	.1	EV	OLUCIÓN HISTÓRICA	9
	3.	.2	CO	MPONENTES	10
	3.	.3	FUI	NCIONAMIENTO	11
		3.3	.1	CAMPO ROTATORIO, NUMERO DE POLOS Y SINCRONISMO	12
		3.3	.2	DESLIZAMIENTO	13
		3.3	.3	ARRANQUE Y VARIACIÓN DE VELOCIDAD	14
		3.3	.4	CIRCUITO EQUIVALENTE	16
		3.3	.5	FLUJO DE POTENCIAS	18
		3.3	.6	CARACTERÍSTICAS Y CURVA PAR-VELOCIDAD	19
	3.	.4	APL	LICACIONES INDUSTRIALES Y ASPECTOS DE DISEÑO	22
		3.4	.1	CLASIFICACIÓN SEGÚN PROTECCIÓN Y LUGAR	22
		3.4. ELE	.2 ÉCTI	CLASIFICACIÓN SEGÚN CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS RICAS O CLASES DE DISEÑO	Y 24
		3.4	.3	CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR SEGÚN EL TIPO DE JAULA	DE
		AR	DILL	A	25
4		NO	RMA	AS Y REFERENCIAS	26
	4.	.1	DIS	POSICIONES LEGALES Y NORMATIVA APLICADA	26
	4.	.2	PR	OGRAMAS UTILIZADOS	26
		4.2	.1	SOLIDWORKS 2016	26
		4.2	.2	JMAG-DESIGNER 16.0.01q	27
	4.	.3	BIB	LIOGRAFÍA	27
		4.3	.1	WEBS	27

	4.	3.2	LIBROS2	28
	4.4	0	TRAS REFERENCIAS 2	29
5	D	EFIN	IICIONES Y ABREVIATURAS 3	0
6	R	EQU	ISITOS DE DISEÑO 3	2
	6.1	M	OTOR DE INDUCCIÓN BASE 3	2
	6.2	LII	MITACIONES TECNOLÓGICAS 3	3
	6.3	LII	MITACIONES DE LOS SOFTWARES UTILIZADOS	3
	6.4	M	ATERIAL MAGNÉTICO DE GRANO ORIENTADO	3
7	A	NÁLI	SIS DE SOLUCIONES	4
	7.1 DE (PF GRA	RIMER MODELO CUMPLIENDO LOS REQUISITOS GEOMÉTRICOS NO ORIENTADO3	Y 54
	7.2 DE (SE GRA	EGUNDO MODELO CUMPLIENDO LOS REQUISITOS GEOMÉTRICOS NO ORIENTADO3	Y 5
	7.3 DE (ÚL GRA	LTIMO MODELO CUMPLIENDO LOS REQUISITOS GEOMÉTRICOS NO ORIENTADO	Y 6
	7.4	DI	SEÑO GEOMÉTRICO PARA JMAG-DESIGNER	7
	7.5	DI	SEÑO DEL ANÁLISIS ELECTROMAGNÉTICO 3	9
8	RI	ESU	LTADOS FINALES 4	1
	8.1	RE	ESUMEN DATOS DE ENTRADA 4	.1
	8.2	M	ALLADO RESULTANTE 4	.3
	8.3	GI	RÁFICOS DE CONTORNO Y VECTORES4	4
	8.4	TA	ABLAS DE DATOS Y SUS GRÁFICAS5	3
	8.5	CO	OMPARATIVA CON MOTOR DE INDUCCIÓN COMÚN 5	6
	8.6	A١	NÁLISIS MAGNÉTICO TRANSITORIO6	5
	8.7	CO	ONCLUSIONES TECNOLÓGICAS Y ACADÉMICAS	'1
	8.	7.1	PROS Y CONTRAS DEL SOFTWARE JMAG-DESIGNER	'1
	8.	7.2	APORTACIONES ACADÉMICAS7	2

Índice de figuras de Documento 1: Memoria

Figura 1. Motor de inducción de Ferraris (izq.) y de Tesla (der.) (Fuente: [1])9
Figura 2. Motor de inducción de jaula de ardilla explotado (Fuente: [5]) 10
Figura 3. Flujo en motor de 4 polos en diferentes intervalos (Fuente: [3]) 12
Figura 4. Circuito equivalente transformador (Fuente: [2])
Figura 5. Circuito Rotor (Fuente: [2])
Figura 6. Circuito equivalente motor de inducción (Fuente: [2])
Figura 7. Flujo de potencias (Potencia eléctrica a mecánica)18
Figura 8. Gráfico par-velocidad (Fuente: [2])
Figura 9. Puntos característicos del régimen motor (Fuente: [4])21
Figura 10. Relación IK - Energía de impacto23
Figura 11. Curva par-velocidad para los distintos diseños (Fuente: [2])24
Figura 12. Circuito equivalente motor de inducción (Fuente: [2])
Figura 13. Sección Clase A (izq.) y sección Clase D (der.) (Fuente: [2])26
Figura 14. Medio ensamblaje del segundo modelo
Figura 15. Medio ensamblaje del último modelo
Figura 16. Ranuras del rotor para fragmentación de 180º (izq.) y 90º (der.)
Figura 17. Ensamblaje completo en la dirección axial (izq.) y medio en la dirección
axial (der.)
Figura 18. Ejes de coordenadas rectangulares del estudio de simulación (izq.) y
coordenadas cilíndricas (der.)
Figura 19. Casos generados para el análisis a distintas corrientes
Figura 20. Datos de la calidad de la malla43
Figura 21. Gráfico de vectores: Caso 1 (1A) para 50Hz (vista frontal – campo radial)
Figura 22. Gráfico de vectores: Caso 10 (10A) para 50Hz (vista frontal – campo radial)
Figura 23. Gráfico de vectores: Caso 10 (10A) para 50Hz (Máquina completa - vista
en perspectiva)46
Figura 24. Gráfico de vectores: Caso 10 (10A) para 50Hz (Máquina completa - vista
superior)

Figura 25. Gráfico de vectores: Caso 1 (1A) para 50Hz (vista en perspectiva – Campo
axial)
Figura 26. Gráfico de vectores: Caso 10 (10A) para 50Hz (vista en perspectiva -
Campo axial)
Figura 27. Gráfica de vectores: Caso 1 (1A) y 50Hz 48
Figura 28. Gráfica de vectores: Caso 10 (10A) y 50Hz 48
Figura 29. Gráfico de contorno: Caso 1 (1A) y 50Hz (Vista inferior - Bobinado del
estator)
Figura 30. Gráfico de contorno: Caso 1 (1A) y 50Hz (Vista posterior - Jaula) 50
Figura 31. Gráfico de vectores: Caso 1 (1A) y 50Hz (Vista frontal/lateral - Jaula) 50
Figura 32. Gráfico de vectores: Caso 1 (1A) y 50Hz (Vista de una porción - Jaula) 51
Figura 33. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (1A) y 50Hz Fase U (izq.) y Fase V
(der.)
Figura 34. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (1A) y 50Hz Fase W
Figura 35. Gráfico de contorno y vectores: Caso 1 (1A) y 50Hz (Estator)53
Figura 36. Gráfico Pérdidas de Joule-Frecuencia: Caso 1
Figura 37. Gráfico Inductancia bobinado-Frecuencia: Caso 1
Figura 38. Gráfico par vs. frecuencia Todos los casos (Bloque rotor)
Figura 39. Flujo magnético Caso 1 (Cara del Estator y cara del rotor)56
Figura 40. Gráfico contorno: Caso 10 (10A) y 50Hz (Estator - Motor alternativo) 57
Figura 41. Gráfico contorno: Caso 10 (10A) y 50Hz (Estator - Motor común) 57
Figura 42. Gráfico de vectores: Caso 10 (10A) y 50Hz (Estator - Motor alternativo) 57
Figura 43. Gráfico de vectores: Caso 10 (10A) y 50Hz (Estator - Motor común) 58
Figura 44. Gráfico de vectores: Caso 10 (10A) y 50Hz (Rotor - Motor común) 58
Figura 45. Gráfico de vectores: Caso 10 (10A) y 50Hz (Rotor - Motor alternativo) 59
Figura 46. Gráfico contorno: Densidad de pérdidas Caso 1 (1A) y 50Hz (Vista superior
jaula - Motor alternativo)59
Figura 47. Gráfico contorno: Densidad de pérdidas Caso 1 (1A) y 50Hz (Sección jaula
- Motor común)60
Figura 48. Gráfico contorno: Corrientes parásitas Caso 1 (1A) y 50Hz (Vista superior
jaula - Motor alternativo)61
Figura 49. Gráfico contorno: Corrientes parásitas Caso 1 (1A) y 50Hz (Sección jaula
- Motor común)61

Figura 50. Gráfico Pérdidas de Joule vs. Frecuencia: Caso 1 (Jaula - Motor alternativo) 62
Figura 51. Gráfico Pérdidas de Joule vs. Frecuencia: Caso 1 (Jaula - Motor común)
Figura 52. Gráfico Inductancia bobinado-Frecuencia: Caso 1 (Bobinado del estator – Motor común)
Figura 53. Gráfico Inductancia bobinado-Frecuencia: Caso 1 (Bobinado del estator – Motor alternativo)
Figura 54. Gráfico par vs. frecuencia Todos los casos (Bloque rotor - Motor alternativo)
Figura 55. Gráfico par vs. frecuencia Todos los casos (Bloque rotor - Motor común)
Figura 56. Gráfico de vectores: Caso 5 (Step 1) (Estator+Rotor – Vista frontal) 66
Figura 57. Gráfico de vectores: Caso 5 (Step 1) (Estator+Rotor – Vista en perspectiva)
Figura 58. Gráfico de vectores: Caso 5 (Step 1) (Estator+Rotor Completo – Vista frontal)
Figura 59. Gráfico de vectores: Caso 5 (Step 1) (Estator+Rotor Completo – Vista
superior)67
Figura 60. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 15) (Fase U) 68
Figura 61. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 15) (Fase V) 68
Figura 62. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 15) (Fase W) 69
Figura 63. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 15) (Jaula – vista en perspectiva)
Figura 64. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 22) (Jaula – vista en perspectiva)

1 OBJETO

El presente proyecto tiene por objeto el diseño geométrico básico de un estator alternativo para un motor de inducción trifásico convencional, y el análisis electromagnético de su funcionamiento mediante técnicas de simulación por computador. La alternativa de diseño es innovadora y está basada en el empleo de chapas diferentes a las de grano no orientado comúnmente empleadas.

En este estudio, se aplica el módulo de análisis magnético en frecuencia "*Magnetic Frequency Analysis*" y el módulo magnético transitorio "*Magnetic Transient Analisys*" del software JMAG-Designer. A través de estos módulos se desarrollan nuevas habilidades dentro del campo del electromagnetismo, como es la simulación mediante computador, junto con la aplicación de los conocimientos teóricos, previamente adquiridos. También se emplea el software de diseño geométrico SolidWorks, por lo que, a través de este proyecto, se conocen y desarrollan nuevas habilidades en el campo de diseño geométrico en 3D.

2 ALCANCE

En este estudio, se lleva a cabo un análisis electromagnético y de diseño geométrico. Se desarrolla la geometría, se estudia en el programa de análisis electromagnético y se compara con la versión convencional de esta misma máquina. Todo este proceso, se desarrolla en un ámbito computacional, no se lleva a la construcción física, ni se tienen en cuenta otros parámetros como pudieran ser ruidos, aerodinámica, esfuerzos materiales, etc.

Para el diseño geométrico, se emplea el software SolidWorks. En este se desarrollan las posibilidades geométricas para un estator alternativo. Después de diseñarlo, se consideran las posibilidades de estudio en JMAG-Designer, el software de análisis electromagnético utilizado, ya que en este programa se trabaja con un sector del modelo, es decir, no se trabaja con el motor completo. Ambos programas tienen la posibilidad de conectarse entre sí, enviándose cambios geométricos y actualizándolos, mediante JMAG-Communicator. Por último, se somete el modelo a casos distintos, diferente corriente en las bobinas del estator, y cada caso con diferentes frecuencias.

Se tienen en cuenta los datos iniciales y medidas geométricas de un motor trifásico de inducción de jaula de ardilla convencional, según los requisitos de este proyecto. Los resultados de este estudio se comparan con los que debería tener un motor de inducción convencional.

3 ANTECEDENTES DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

3.1 EVOLUCIÓN HISTÓRICA

La historia de los dispositivos electromagnéticos, comienza en el año 1800 con la invención de la pila eléctrica, generadora de corriente continua, por parte de Alessandro Volta. Pero no es hasta el año 1831, que Michael Faraday y Joseph Henry, de forma paralela pero independiente, descubren la ley de inducción electromagnética, punto de partida para el motor de inducción electromagnética trifásica.

Después de varios años desarrollando generadores de corriente alterna y transformadores, en los años 80, Galileo Ferraris y Nikola Tesla, de forma separada, desarrollan la idea del motor polifásico, en el cual, dos corrientes sincronizadas pero desfasadas, pueden generar dos campos magnéticos que combinados producen un campo rotatorio. Esto fue un avance muy importante, ya que este motor no tenía partes móviles como ocurre con los conmutadores, haciendo que este tipo de motor fuera más competitivo. Ambos científicos, trabajaban en la idea de dos fases, por lo que no progresó la comercialización del motor.



Figura 1. Motor de inducción de Ferraris (izq.) y de Tesla (der.) (Fuente: [1])

Página 9 de 267

Tras abandonase las investigaciones, en 1889, Dolivo-Dobrowolsky inventa el motor de inducción trifásico con rotor de jaula de ardilla. A pesar de hacer que el motor de inducción fuera competitivo, en el campo de la regulación de velocidad el motor de corriente continua manifiesta ventajas hasta el año en el cual se inventa el inversor trifásico, capaz de controlar la velocidad del motor. Este hito, reflota al motor de inducción, el cual es el más utilizado en la actualidad.

3.2 COMPONENTES

El motor de jaula de ardilla trifásico, en el cual se basa este estudio, es un motor de inducción trifásica o asíncrono. A través de una corriente trifásica circulando por el bobinado del estator, se induce un campo magnético que viaja a través del entrehierro llegando al rotor. Este campo magnético genera unos voltajes en el bobinado del rotor (en este caso las jaulas), llevando al desarrollo de un par que produce el giro del rotor, y con ellos el eje, consiguiendo finalmente el objetivo, producir energía mecánica.



Figura 2. Motor de inducción de jaula de ardilla explotado (Fuente: [5])

Se pueden diferenciar dos grandes bloques, la parte móvil y la parte estática. Estos están separados por un espacio de aire, entrehierro. Los componentes son:

Estator, o núcleo del estator, componente del bloque estático de la máquina. Cuando funciona como motor, es la parte donde se desarrolla el campo magnético rotativo. Su estructura se compone de chapas apiladas de acero laminado de alta calidad, con ranuras para alojar el bobinado.

Bobinado del estator (primario del circuito), componente del bloque estático de la máquina. Este bobinado de cobre se alimenta de corriente alterna trifásica y se coloca en las ranuras del estator pudiéndose devanar de varias formas.

Rotor o armadura de jaula de ardilla, componente del bloque móvil. Se suele construir con chapas de acero laminado ferromagnético de alta calidad, al igual que el estator, con ranuras para alojar la jaula. Es la zona donde se desarrolla el par mecánico que produce el giro.

Jaula de ardilla (secundario del circuito), componente del bloque móvil. Se compone de barras de aluminio o cobre, las cuales están unidas y cortocircuitadas en ambos extremos por anillos del mismo material. Esta estructura tiene la forma de la jaula de una ardilla, de ahí el nombre. Esta es la zona o componente donde se inducen las corrientes.

Eje, componente del bloque móvil. Es un cilindro macizo de acero, el cual soporta todo el peso del motor. Es el encargado de transmitir físicamente el giro del motor al destinatario de la energía mecánica, es decir, es la parte de la máquina en contacto con el receptor de esta energía mecánica.

3.3 FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento del motor de inducción de jaula de ardilla trifásico, al igual que el resto de motores eléctricos, se reduce a una trasformación de energía eléctrica en mecánica.

El punto de partida para entender el funcionamiento de un motor de inducción, se centra en el desarrollo de dos campos magnéticos a la vez, uno en el rotor y otro en el estator. Este funcionamiento se basa en la Ley de Faraday y fuerza de Lorentz. Si se hace que un campo magnético se mueva a través de una jaula de ardilla (conductores cortocircuitados), se va a inducir un voltaje, y, por lo tanto, una corriente en los conductores (Ley de Faraday). Esta corriente se somete a la acción del campo magnético, por lo que además surge una fuerza (Fuerza de Lorentz). Esta fuerza va

a mover el bloque rotor buscando alinearse con el campo magnético que recibe. Para que esta fuerza se mantenga en el tiempo, necesitamos que el campo magnético que se induce en el rotor sea rotativo.

3.3.1 CAMPO ROTATORIO, NUMERO DE POLOS Y SINCRONISMO

Para entender porque se produce un campo rotatorio, se estudia el comportamiento del flujo magnético, para ello se toma el ejemplo de un motor de inducción de 4 polos alimentado por una fuente trifásica balanceada.



Figura 3. Flujo en motor de 4 polos en diferentes intervalos (Fuente: [3])

En la figura, se puede observar:

- Se ve claramente la influencia de 4 polos, 2 polos norte y dos polos sur. Norte, se aleja el flujo del centro, sur, el flujo de dirige al centro.
- La onda sinusoidal que se obtiene en el flujo es la misma, solamente se diferencian por estar desfasadas. Se desplaza dos polos por cada ciclo, para recorrer los 4 polos, son necesarios dos ciclos.

Sabiendo que el campo rotativo gira a 2 polos/ciclo, se obtiene su velocidad. Como la velocidad de este campo es igual a la de la fuente de alimentación, se denomina velocidad de sincronismo.

$$N_S = \frac{120 \cdot f}{p} \tag{(1)}$$

 N_S , velocidad de sincronismo o del campo magnético [rad/s]

p, número de polos

f, frecuencia de la fuente de alimentación [Hz]

3.3.2 DESLIZAMIENTO

Para que un motor de inducción se mueva, la velocidad de este debe ser distinta a la velocidad de sincronismo. Si ambos fueran a la misma velocidad no pasaría flujo a través de las barras del rotor y no se produciría la inducción. Por lo tanto, la velocidad del rotor relativa a la del campo magnético nos va a influenciar en el voltaje que se induce en la jaula del rotor.

Se define la velocidad de deslizamiento como la diferencia de entre el sincronismo y la velocidad de la máquina.

$$N_D = N_S - N_M \tag{2}$$

 N_D , velocidad de deslizamiento [rad/s] N_S , velocidad de sincronismo o del campo magnético [rad/s] N_M , velocidad del rotor [rad/s]

El deslizamiento, es la versión en porcentaje de la velocidad de deslizamiento relativa a la de sincronismo.

$$s = \frac{N_S - N_M}{N_S} \cdot 100 = \frac{N_D}{N_S} \cdot 100$$
 (3)

N_D, velocidad de deslizamiento [rad/s]
N_S, velocidad de sincronismo o del campo magnético [rad/s]
N_M, velocidad del rotor [rad/s]
s, deslizamiento [%]

Como se ha comentado, el deslizamiento influye en los valores de frecuencia inducidos.

$$f_2 = s \cdot f_1 \tag{4}$$

 f_2 , frecuencia en el rotor

 f_1 , frecuencia en la fuente de alimentación

s, deslizamiento

3.3.3 ARRANQUE Y VARIACIÓN DE VELOCIDAD

El motor de inducción se arranca sin necesidad de provocar el giro al rotor, es decir, tiene un arranque autónomo. A pesar de ello, hay varios métodos de arranque, esto se debe a la protección para la sobrecarga, y evitar alcanzar corrientes muy altas que sobrecalienten en motor. Los tipos de arranque son:

Arranque directo, este tipo de arranque tiene lugar cuando se conecta el motor directamente a la red, es el más sencillo y económico. En estos casos se produce una corriente de sobrecarga muy alta, entre 6 y 8 veces la normal. Esto produce caídas en la tensión de red. Sólo se usa para potencias inferiores a 5kW.

Arranque autotransformador, este método se centra en la reducción de la corriente de arranque. Para ello, se introduce un autotransformador entre la red y el motor. De esta manera, se pone en funcionamiento el motor a través de tres pasos. Primero lo se somete a una tensión inferior a la asignada para el arranque, después se aumenta la tensión mientras aumenta la velocidad, y por último se somete al total de tensión. Como el par varía con el cuadrado de la tensión, se puede observar que el defecto de este método es lo que se reduce el par en el arranque, por lo que sólo se podrá usar este método para cargas pequeñas.

Arranque estrella-triángulo, este caso es muy similar al anterior, se diferencian en que la reducción de tensión que se hace en este caso se limita a una posibilidad, $1/\sqrt{3}$. Esto se debe al cambio entre el circuito en estrella hacia triángulo. Su mayor

limitación, además de la de cargas pequeñas como el caso anterior, es que sólo se puede usar para conexiones en triángulo a la red. En este caso, reducimos la corriente de arranque y el par 1/3.

Una vez el motor está funcionando, se sabe que mantiene una velocidad prácticamente constante y un deslizamiento no superior a 5%, lo que da un margen de variación de la velocidad muy pequeño. Al fijarse en la ecuación (5) de la velocidad de sincronismo, se ve que esta sólo puede variar por el número de pares de polos, el deslizamiento o la frecuencia.

$$N_S = \frac{60 \cdot f}{P} \cdot (1 - s) \tag{5}$$

N_S, velocidad de sincronismo o del campo magnético [rad/s]

- P, número de pares de polos
- f, frecuencia de la fuente de alimentación [Hz]
- s, deslizamiento [rad/s]

Por lo tanto, los métodos de variación de velocidad son:

Regulación por variación del número de polos, en este método se modifica el número de polos, normalmente para conseguir dos velocidades. Este método sólo se utiliza en el rotor de jaula de ardilla, ya que este adapta su número de polos a los que tiene el estator.

Regulación por variación del deslizamiento, este método se puede desarrollar variando el voltaje aplicado al motor, aunque esto afecta al par que desarrolla y no es muy aconsejable. También se consigue añadiendo resistencia al rotor, pero las pérdidas de Joule hacen que no sea recomendable.

Regulación por variación de frecuencia, en este método se utiliza un control de frecuencia variable en el cual se puede conseguir una velocidad por encima o por

debajo de la síncrona. En este caso se mantiene un flujo contante para que el par no varíe y, por lo tanto, haya suficiente capacidad de sobrecarga.

3.3.4 CIRCUITO EQUIVALENTE

A la hora de estudiar el circuito equivalente de un motor de inducción, es necesario tener en cuenta el de un transformador, ya que el efecto de inducción de voltajes y corrientes en el rotor es muy similar en ambos.



Figura 4. Circuito equivalente transformador (Fuente: [2])

 R_1 , resistencia del devanado primario

x1, reactancia de dispersión del devanado primario

R_c, resistencia de pérdidas en el hierro

 x_M , reactancia de magnetización

 E_1 , voltaje primario transformador ideal

 E_R , voltaje secundario transformador ideal

 R_R , resistencia del rotor

x_R, reactancia de dispersión del rotor

 a_{ef} , relación efectiva de vueltas entre el primario y el secundario del transformador ideal

Si se estudia la tensión inducida en el rotor o secundario del transformador ideal (E_R) y la tensión del primario (E_1), cuando el rotor está bloqueado, es decir, s=1 y por lo tanto f₁=f₂, se tiene que las ecuaciones que lo definen son:

$$E_{R0} = 4.44 \cdot K_2 \cdot f_1 \cdot N_2 \cdot \phi_M \tag{6}$$

$$E_1 = 4.44 \cdot K_1 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot \phi_M \tag{7}$$

Si, en cambio, se estudia en movimiento, las frecuencias serán diferentes y se obtiene el siguiente voltaje inducido en el rotor:

$$E_R = 4.44 \cdot K_2 \cdot f_2 \cdot N_2 \cdot \phi_M = s \cdot E_2 \tag{8}$$

Si se comparan las características del motor de inducción con el transformador, se debe tener en cuenta que el motor necesita un entrehierro que aumente la reluctancia al paso del flujo magnético, pero que permita un paso de flujo mínimo sin una corriente de magnetización muy grande. Se busca reducir el acoplamiento entre devanado primario y secundario. En el circuito equivalente del motor de inducción, por lo tanto, se necesita que x_M sea de menor valor.

También se tienen variaciones entre ambos circuitos en la parte del rotor:



Figura 5. Circuito Rotor (Fuente: [2])

De este circuito, se obtiene el valor de la corriente en el rotor:

$$I_{R} = \frac{E_{R}}{R_{R} + jx_{R}} = \frac{E_{R0}}{R_{R}/s + jx_{R}}$$
(9)

Si se relacionan las características del rotor del motor de inducción y el estator que ya se tenía, se obtiene el circuito equivalente completo del motor de inducción:



Figura 6. Circuito equivalente motor de inducción (Fuente: [2])

Las relaciones actuales en el circuito son:

$$E_1 = E_{R0} \cdot a_{ef} \tag{10}$$

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{ef}} \tag{11}$$

$$Z_2 = a_{ef}^2 \cdot \left(\frac{R_R}{s} + jx_{R0}\right) \tag{12}$$

$$R_2 = a_{ef}^2 \cdot R_R \tag{13}$$

$$x_2 = a_{ef}^2 \cdot x_{R0} \tag{14}$$

3.3.5 FLUJO DE POTENCIAS

A través del diagrama del flujo de potencias, se observa el circuito que sigue la energía que comienza como eléctrica para terminar siendo mecánica. De este proceso se obtienen los valores de potencias de pérdidas, la eficiencia o la característica de par.



Figura 7. Flujo de potencias (Potencia eléctrica a mecánica)

Página 18 de 267

Si se tiene en cuenta la relación total de potencia, es decir, la entrada y la salida al circuito de flujo, se obtiene la eficiencia de la máquina. Es la potencia transmitida al eje, entre la potencia suministrada por la fuente trifásica (en el caso de este estudio):

$$\eta = \frac{P_L}{P_e} \tag{15}$$

En cuanto a potencia de pérdidas, hay pérdidas en el hierro del estator (P_f) y pérdidas de magnetización (P_{js}), pérdida eléctrica en el rotor (P_{jr}). Estas tres potencias son las denominadas RI². Por último, pérdidas por rozamiento con el aire y fricción (P_v).

Las pérdidas en el rotor se pueden relacionar con el deslizamiento y con la potencia transmitida al rotor (Pr):

$$P_{jr} = s \cdot P_r \tag{16}$$

La potencia que se obtiene justo a la salida del rotor (P_m), no es la final, tal y como se ha comentado en el párrafo de pérdidas, hay que descontar las pérdidas de fricción y aire.

$$P_m = P_r - P_v \tag{17}$$

Por último, se define el par o momento de torsión del motor, relacionado tanto con la potencia transmitida al rotor (P_r), como la potencia a la salida del rotor (P_m).

$$T_m = \frac{9.55 \cdot P_m}{N_M} = \frac{9.55 \cdot P_r}{N_s}$$
(18)

3.3.6 CARACTERÍSTICAS Y CURVA PAR-VELOCIDAD

Para definir la relación entre el par y la velocidad se necesita una curva. En primer lugar, se muestra la curva completa, en la cual se indican todos los posibles funcionamientos del motor de inducción:



Figura 8. Gráfico par-velocidad (Fuente: [2])

Para comprender su funcionamiento, se toman las ecuaciones [17], [18] y la siguiente:

$$P_r = \frac{P_m}{1-s} \tag{19}$$

Dependiendo del valor del deslizamiento con el que trabaje la máquina, tendrá un funcionamiento de los siguientes:

Régimen de motor, este funcionamiento, corresponde a intervalos de deslizamiento entre 0 y 1. Este intervalo deja unas velocidades entre sincronismo N_s y la parada. A través de estos datos, se puede ver como P_m y P_r , son positivos, por lo que hay energía trasmitida al eje y par electromagnético positivo. La máquina está funcionando a partir de energía eléctrica que se transmite para convertirse en mecánica.

Dentro de este régimen de funcionamiento hay 4 puntos característicos:



Figura 9. Puntos característicos del régimen motor (Fuente: [4])

- Sincronismo(O), (s=0) la velocidad del rotor y la del campo rotativo son la misma. En este caso no habría deslizamiento, aunque esto no es posible. Su par sería nulo.
- Nominal(A), esto corresponde al funcionamiento a plena carga. Se desarrolla a velocidades similares a la de sincronismo.
- Par máximo(C), este funcionamiento se desarrolla en el par máximo o crítico, el punto más alto de la curva.
- Arranque(D), (s=1) la velocidad es cero porque se está desarrollando el par de arranque.

Régimen de generador, este funcionamiento es para velocidades mayores que la de sincronismo y, por lo tanto, deslizamientos negativos. A través de estos datos, se puede ver como P_m y P_r, son negativos, por lo que hay energía recibida del eje y par electromagnético que cambia. La máquina está funcionando a partir de energía mecánica que se transmite para convertirse en eléctrica.

Régimen de freno, (s>1) este funcionamiento es para velocidades de trabajo negativas. A través de estos datos, se puede ver como $P_m y P_r$, son negativo y positivo, por lo que hay energía recibida del eje y par electromagnético positivo. La máquina está funcionando a partir de energía mecánica que se transmite por el eje y a partir de energía de la red.

3.4 APLICACIONES INDUSTRIALES Y ASPECTOS DE DISEÑO

El motor de inducción es el más utilizado en corriente alterna, debido a que es simple y fácil de operar. No tiene un motor de campo separado, pero necesita de la acción transformadora. De los dos tipos de motores de inducción, el más utilizado es el de jaula de ardilla, ya que es más barato y necesita menos mantenimiento que el de rotor devanado.

En cuanto a una clasificación general, los motores de una sola fase se suelen utilizar para aplicaciones de 2.2-3kW, usos domésticos, es decir, lo llevan incluido los electrodomésticos. El motor trifásico, se utiliza para potencias de menos de 55kW.

Aunque no se trabaja en este proyecto, el generador de inducción también se utiliza, normalmente en potencias pequeñas y siempre juntos a una fuente de potencia reactiva, ya que tiene problemas en la regulación de voltaje funcionando solo. Se suele emplear en pequeños aerogeneradores de 750kW o recuperadores de energía.

3.4.1 CLASIFICACIÓN SEGÚN PROTECCIÓN Y LUGAR

El grado de protección IP, es un indicativo para la protección de personas, y así evitar el contacto de estar con la zona del motor. Su código corresponde IP más dos números.

Primer número: indica el grado de protección para personar e interior del motor.

0, sin protección frente a objetos externos que pudieran entrar en el motor.

1, protegido frente a objetos >50mm, como partes del cuerpo que se pudieran introducir.

2, protegidos frente a objetos sólidos >12mm, del tamaño de los dedos.

3, protegidos frente a objetos sólidos >2.5mm, del tamaño de cables gruesos.

4, mismo tipo para objetos >1mm, del tamaño de cables o tornillos.

5, motor protegido frente al polvo de manera suficiente para que no interfiera en la operación del motor.

6, motor estanco protegido frente al polvo completamente.

Segundo número: protección proporcionado por el cierre para la posible filtración de agua. Motor protegido frente a:

1, goteo de agua que cae verticalmente al motor.

2, goteo de agua que cae con una inclinación de hasta 15° frente a la vertical del motor.

3, vapor de agua tipo spray, en ángulos mayores a 60°.

- 4, salpicaduras de gotas de agua
- 5, chorros de agua
- 6, agua marina

Algunos de los más comunes son:

IP21, protegido frente a contacto de dedos, sólidos >12mm y contra gotas verticales de agua.

IP22, protegido frente a contacto de dedos, sólidos >12mm y contra gotas de agua inclinadas hasta 15°.

IP55, protegido contra cualquier contacto, frente a polvo en un grado intermedio y contra chorros de agua.

El código IK, es una clasificación de los motores totalmente cerrados frente a impacto externo.

Código	IK 00	IK 01	IK 02	IK 03	IK 04	IK 05	IK 06	IK 07	IK 08	IK 09	IK 10
Impacto Energía Julios	•	0.15	0.2	0.35	0.5	0.7	1	2	5 ABB Standard	10	20
*sin protección, de acuerdo con EN 50102											

Figura 10. Relación IK - Energía de impacto

La clasificación según productos o ambientes posiblemente dañinos:

Clase 1, localización junto a gases inflamables o vapores con riesgo de explosión *Clase 2*, polvo de algún material que pueda conducir la electricidad o con riesgo de explosión junto al aire.

Clase 3, fibras o virutas inflamables

3.4.2 CLASIFICACIÓN SEGÚN CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS Y ELÉCTRICAS O CLASES DE DISEÑO

Si se cambian las características del rotor de un motor de inducción, se pueden generar un motor de posibilidades en cuanto a curvas de par-velocidad, por lo que las comisiones, americana (NEMA) y europea (IEC), han definido unas máquinas genéricas con unas propiedades concretas, cada uno de estos motores son un diseño:



Figura 11. Curva par-velocidad para los distintos diseños (Fuente: [2])

Diseño Clase A, este tipo de diseño tiene unas características normales en cuanto a par y corriente de arranque, aunque un deslizamiento pequeño (<5%). En cuanto al par máximo se produce a deslizamientos <20%, de valores del 200-300% del par a plena carga. Este diseño se suele utilizar para ventiladores, sopladores, bombas, tornos, etc.

Diseño Clase B, este diseño tiene unas características muy similares la diseño Clase A, a diferencia de la corriente de arranque que en este caso es menor, un 25% menor, lo que ha hecho que sustituya al motor de Clase A en la mayoría de aplicaciones.

Diseño Clase C, este diseño tiene un par de arranque muy elevado, el 250% del par a plena carga, para una corriente pequeña y un deslizamiento pequeño (<5%). Estos motores se suelen diseñar con rotores de doble jaula, lo que los hace más caros que los casos anteriores. Se emplea para aplicaciones que requieren un arranque difícil como las bombas, compresores o bandas transportadoras.

Diseño Clase D, este diseño, también tiene un par de arranque elevado como el caso anterior, pero superior (>275% del par a plena carga), para corriente baja. Pero en este caso el deslizamiento es muy elevado, debido a una alta resistencia en el rotor, puede llegar a ser hasta del 100% con el par más elevado. Se utiliza para cargas con grandes inercias como volantes de troqueladoras o cortadoras, o secadoras centrífugas.

3.4.3 CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR SEGÚN EL TIPO DE JAULA DE ARDILLA

En la [figura 12], X₂ representa la reactancia de dispersión del rotor, es decir, las líneas de flujo que no se conectan con el bobinado del estator. Cuanto más cerca estén las barras de la jaula de la superficie del rotor, menos dispersión y mayor flujo que llega al estator.



Figura 12. Circuito equivalente motor de inducción (Fuente: [2])

En el caso [figura 13 izq.] de una baja resistencia, debido a una gran sección transversal, una baja reactancia y debido a que las barras están colocadas cerca del estator, tendremos un par máximo cercano a velocidad síncrona. Esto implica un motor más eficiente con diseño de Clase A. El caso [figura 13 der.] tiene unas ranuras

más pequeñas y barras más cercanas al estator, por lo tanto, la resistencia es mayor debido a la sección transversal de ranura pequeña, pero la reactancia es pequeña. Este es un diseño de Clase D.



Figura 13. Sección Clase A (izq.) y sección Clase D (der.) (Fuente: [2])

4 NORMAS Y REFERENCIAS

4.1 DISPOSICIONES LEGALES Y NORMATIVA APLICADA

Norma UNE-157001-2014, normativa que regula la estructura de los proyectos técnicos.

4.2 PROGRAMAS UTILIZADOS

4.2.1 SOLIDWORKS 2016

En este proyecto se utiliza como software de diseño geométrico CAD 3D, SolidWorks 2016. Se ha utilizado para el diseño de la geometría alternativa del motor que estudia este proyecto. Es un programa compatible con el software de simulación electromagnética, por lo que se pueden interconectar y conservar toda la información entre SW en JMAG-Designer.

4.2.2 JMAG-DESIGNER 16.0.01q

Programa de diseño de estudios electromagnéticos que aplica técnicas numéricas de resolución de problemas matemáticos complejos. Se ha trabajado en concreto en el módulo magnético en frecuencia y el módulo de régimen transitorio. En este software únicamente se ha desarrollado la simulación electromagnética, para el diseño geométrico se utiliza el programa comentado en el anterior apartado.

4.3 BIBLIOGRAFÍA

4.3.1 WEBS

- Edison Tech Center. 2014. Induction motors. [Consulta: 17 marzo 2017].
 Disponible en: <u>http://www.edisontechcenter.org/inductionMotors.html</u>
- Edison Tech Center. 2014. Galileo Ferraris. [Consulta: 17 marzo 2017].
 Disponible en: <u>http://www.edisontechcenter.org/GalileoFerraris.html</u>
- Karlsruhe Institute of Technology. 2014. The invention of the electric motor 1800-1854. [Consulta: 16 marzo 2017]. Disponible en: <u>https://www.eti.kit.edu/english/1376.php</u>
- Karlsruhe Institute of Technology. 2014. The invention of the electric motor 1856-1893. [Consulta: 16 marzo 2017]. Disponible en: <u>https://www.eti.kit.edu/english/1390.php</u>
- <u>http://www.aksteel.com/</u>
- <u>http://www.solidworks.es/</u>
- <u>http://jmag-international.com/</u>
- WU, T. 2014. Lesson 19: Induction motor fundamentals [Material docente del curso Advanced Electric Machinery]. En: UNIVERSIDAD DE FLORIDA.
 [Consulta: 4 abril 2017]. Disponible en: http://www.eecs.ucf.edu/~tomwu/course/eel6208/notes/19%20Induction%20M
 otor%20Fundamentals.pdf

- IBRAHIM, I. 2017. Starting methods for induction motors. [Material docente de la asignatura Communication]. En: UNIVERSITY OF TECHNOLOGY IRAQ.
 [Consulta: 8 abril 2017]. Disponible en: <u>http://uotechnology.edu.iq/depeee/lectures/3rd/Communication/machine/PART%202.pdf</u>
- Unidad 3. Estructura de los materiales [Material docente del curso de Fundamentos de la ciencia de los materiales]. En: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA. [Consulta: 8 mayo 2017]. Disponible en: https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm10/pfcm10_3_4.html
- Departamento de Física aplicada III Universidad de Sevilla. 2017. Materiales Magnéticos (GIE). [Consulta: 8 mayo 2017]. Disponible en: <u>http://laplace.us.es/wiki/index.php/Materiales_magn%C3%A9ticos (GIE)</u>
- RedUSERS Comunidad de tecnología. 2014. Materiales magnéticos y circuitos [Consulta: 10 mayo 2017]. Disponible en: http://www.redusers.com/noticias/materiales-magneticos-y-circuitos/
- Grand Hunt Asia Co. ltd. Acero Eléctrico /Acero al Silicio / Acero Magnético.
 [Consulta: 11 mayo 2017]. Disponible en: http://www.grandhunt.com/Product/Product.aspx?language=eses&cid=19&id=35
- Electrical4u. Classification of Squirrel Cage Induction Motor. [Consulta: 25 mayo 2017]. Disponible en: <u>https://www.electrical4u.com/classification-of-squirrel-cage--induction-motor/</u>
- March Pumps. 2014. How to Locate a Pump Motor IP Rating & Explosion Proof Rating. [Consulta: 25 mayo 2017]. Disponible en: <u>http://www.marchpump.com/blog/locate-pump-motor-explosion-rating/</u>

4.3.2 LIBROS

[1] BOLDEA, I.; NASAR, S.A. 2002. *The induction machine handbook.* United States: CRC Press.

[2] CHAPMAN, S.J. 2005. *Electric machinery fundamentals.* 4^a ed. New York: McGraw Hill.

[3] HUGHES, A. 2006. *Electric motors and drives: fundamentals, types and applications*. 3^a ed. Oxford: Elsevier.

[4] FRAILE MORA, J. 2003. *Máquinas eléctricas*. 5ª ed. Madrid: McGraw Hill.

[5] WILDI, T. 2007. *Máquinas eléctricas y sistemas de potencia*. 6^a ed. México: Pearson Educación.

MANTILLA PEÑALBA, L.F. 2015, *Fundamentos de Transformadores Eléctricos y Máquinas Eléctricas Rotativas*.

SENNER, A. 1994. Principio de electrotecnia. España: Reverté

4.4 OTRAS REFERENCIAS

Catálogo:

[6] AK STEEL. TRAN-COR H Grain oriented electrical steels. Disponible en: <u>http://www.aksteel.com/pdf/markets_products/electrical/AK%20TRAN-</u> <u>COR%C2%AE%20H%20PDB%2020130607.pdf</u>

[7] AK STEEL. AK Steel Oriented and TRAN-COR H Electrical Steels. Disponible en: http://www.aksteel.com/pdf/markets_products/electrical/oriented_bulletin.pdf

Simposio:

THORNTON, E.J.; ARMINTOR, J.K. *The fundamentals of ac electric induction motor design and application*. En: 20th International Pump User Symposium, Texas A&M University. Turbomachinery Laboratory, pp.95-106. Disponible en: <u>http://turbolab.tamu.edu/proc/pumpproc/P20/11.pdf</u>

Informe técnico:

MOLLER SERIES. 2011. Informe técnico: IT-EE09(11/11): Arranque y control demotorestrifásicosasíncronos.Disponibleen:www.moeller.es/descarga.php?file=soporte/12/IT-EE09.pdf

ABB Motores y generadores. 2014. *Los motores de baja tensión: La guía del motor.* Disponible en:

https://library.e.abb.com/public/60c66ea11b71473099ee019f266ddc77/GUIA%20MO TOR%20COLOR%20BAJA.pdf

WEG: Transformando energía en soluciones. *Selección y aplicación de motores eléctricos*. Disponible en: <u>http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-seleccion-y-aplicacion-de-motores-electricos-articulo-tecnico-espanol.pdf</u>

Boletín oficial del estado:

https://boc.cantabria.es/boces/verAnuncioAction.do?idAnuBlob=309173

<u>Archivos descargables de programa JMAG-Designer:</u> [8] <u>http://jmag-international.com/catalog/63_CageInductionMotor_Torque.html</u>

[9] http://jmag-international.com/catalog/39_ThreePhaseInductionMotor_Torque.html

[10] <u>http://jmag-international.com/catalog/195_ThreePhase-IM_Torque.html</u>

5 DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

A lo largo de todo el documento se ha empleado "." para los decimales, ya que los softwares utilizados en este proyecto emplean esa nomenclatura. En el "Documento Nº5: Mediciones y presupuesto", se ha empleado la nomenclatura española "," para los decimales, ya que son valores monetarios para un presupuesto desarrollado en España.

Nombre completo	Abreviatura
JMAG-Designer	JD
SolidWorks	SW
Velocidad de sincronismo	N _S
Número de polos	р

Número de pares de polos	Р
Frecuencia	f
Velocidad de deslizamiento	N _D
Velocidad de giro del rotor	N _M
Deslizamiento	S
Frecuencia fuente de alimentación	f_1
Frecuencia en el rotor	f_2
Resistencia del devanado primaria	<i>R</i> ₁
Resistencia del rotor	R_R
Resistencia de pérdidas en el hierro	R _C
Reactancia de dispersión del primario	<i>x</i> ₁
Reactancia de dispersión del rotor	x_R
Reactancia de dispersión del rotor bloqueado	x_{R0}
Reactancia de magnetización	<i>x_M</i>
Voltaje primario transformador ideal	E ₁
Voltaje inducido en el rotor bloqueado	E_{R0}
Voltaje secundario transformador ideal	E_R
Relación efectiva de vueltas primario/secundario del	a _{ef}
transformador ideal	
Corriente del devanado primario	I ₁
Corriente del primario del transformador ideal	I ₂
Corriente del secundario del transformador ideal	I _R
Factor de devanado del primario del transformador ideal	<i>K</i> ₁
Factor de devanado del secundario del transformador ideal	<i>K</i> ₂
Número de espiras por fase del primario del transformador	<i>N</i> ₁
ideal	
Número de espiras por fase del secundario del transformador ideal	<i>N</i> ₂
Flujo máximo pasa por el entrehierro	$\phi_{\scriptscriptstyle M}$
Impedancia equivalente del rotor	Z ₂
Rendimiento	η

Nuria Fernández Jorrín

Potencia transmitida al eje	P_L
Potencia suministrada por la fuente trifásica	Pe
Pérdidas de magnetización	P _{js}
Pérdidas eléctricas en el rotor	P _{jr}
Pérdidas en el hierro	P _f
Pérdidas por fricción de rodamientos y con el aire	Pv
Potencia transmitida al rotor	P_r
Potencia saliente del rotor	P _m
Par o momento de torsión del motor	T _m
Par o momento de torsión del rotor máximo	T _{max}
Par o momento de torsión del rotor de arranque	T _a
Ancho sección superior de la sección "Caso básico" estator	В
Ancho sección extremos de la sección "Caso básico" estator	С
Ángulo sección extremos con la horizontal de la sección	α
"Caso básico" estator	ů
Fragmento de la sección "Caso básico" estator	X
Arco de acero entre dos ranuras del estator	A
Arco de una ranura del estator	а

6 REQUISITOS DE DISEÑO

6.1 MOTOR DE INDUCCIÓN BASE

Uno de los requisitos que se ha impuesto en el proyecto, es buscar un motor de inducción común, que ya se haya estudiado en el programa de diseño JD. A partir de este modelo común, se hacen las modificaciones pertinentes hasta llegar al modelo base objetivo del estudio.

La web del programa JD, tiene un apartado con distintos tipos de estudios organizados de acuerdo a la máquina con la que se trabaja, el tipo de análisis, o por características más concretas. Del apartado de motores de inducción, se ha toma el estudio "*63 - Analysis of Torque Characterístics of a Cage Induction Motor*".

En el Anexo 1, se encuentran los datos, geométricos y eléctricos obtenidos del ejemplo anterior, empleados en la máquina de estudiada en este proyecto.

6.2 LIMITACIONES TECNOLÓGICAS

Este proyecto, se desarrolla en un ámbito de simulación electromagnética en computación, es decir, no se tienen en cuenta los efectos térmicos, mecánico o estructurales que pueda desarrollar la máquina estudiada durante su funcionamiento. Además, únicamente se analiza en el ámbito computacional, no se tienen en cuenta las cuestiones constructivas de la máquina si se llevara a la práctica.

6.3 LIMITACIONES DE LOS SOFTWARES UTILIZADOS

Tal y como se ha comentado, en el estudio del motor de inducción de este proyecto, se han empleado dos softwares, SolidWorks para el diseño geométrico, y JMAG-Designer para la simulación electromagnética. Por lo tanto, los análisis que vamos a llevar a cabo van a estar definidos y limitados por las opciones que nos presentan ambos programas.

En el Anexo 2, se encuentra información más detallada de las herramientas concretas utilizadas de cada software y las razones de estas elecciones.

6.4 MATERIAL MAGNÉTICO DE GRANO ORIENTADO

La principal diferencia o requisito más característico de este motor, es el uso de un material de grano orientado en las chapas magnéticas del estator.

La utilización de este tipo de material, limita o caracteriza varias partes de la máquina. Este proyecto parte de una geometría similar a un motor de inducción común, pero debido al uso de grano orientado, la máquina deberá diseñarse de acuerdo a las direcciones magnéticas que vaya a tener la máquina, de manera que se encauce el campo magnético. En concreto, en este proyecto la distribución del campo magnético es de tipo bidireccional radial-axial, configuración fuera de lo común, como pudiera ser la configuración del rotor, de tipo bidireccional radial-circular.

En el Anexo 3, se explica cuál es el material magnético de grano orientado, y se indican las adaptaciones de la geometría de la figura a este requisito de material. Principalmente, se ve involucrado el estator, el cual tiene que modelarse con forma de "C", y con cierta inclinación para mantener la coherencia con la realidad constructiva y práctica de una lámina de acero al doblarse.

7 ANÁLISIS DE SOLUCIONES

7.1 PRIMER MODELO CUMPLIENDO LOS REQUISITOS GEOMÉTRICOS Y DE GRANO ORIENTADO

En el primer diseño geométrico del motor, se tienen en cuenta, principalmente, los requisitos comentados en el apartado anterior de "*Requisitos de diseño*".

Geometría adaptada al grano orientado: se busca guiar mediante el grano orientado el campo magnético que se debería tener en esta máquina. Para ello, en el Anexo 3, se explica cómo se obtiene el estator mediante cálculos. En estos cálculos se tiene en cuenta la realidad física de apilar chapas de grano orientado, unas encima de otras, formando el estator desde el diámetro interior hasta el exterior. En este primer diseño, al tener una forma triangular, no es necesario calcular la relación de aire-metal para dibujar las ranuras, ya que el flujo es constante en todo el estator.

Geometría basada en el ejemplo de JMAG-Designer: tal y como se comenta en el Anexo 1, este proyecto busca desarrollar un motor de inducción, el cual se somete a modificaciones para cumplir los objetivos. La información de este ejemplo, es otra gran influencia en este primer modelo geométrico.

A partir de los dos condicionantes anteriores, se tiene definido prácticamente todo el motor, y las piezas no definidas, se supeditan a los requisitos de las ya definidas.

En este primer modelo, se van a mantener en gran medida los datos de la geometría base. Estas van a ser: el rotor y sus ranuras, el cual se va a dividir en dos mitades iguales pero unidas, el eje, el cual se diseña tal cual es el original, la jaula, la cual se dividirá en dos mitades, tal y como se ha hecho con el rotor y, por último, la medida que se va a mantener constante a lo largo del proyecto, el entrehierro.

Las piezas se han diseñado en SolidWorks mediante los procedimientos comentados en el Anexo 4, en el cual se puede observar que no se ha llevado a cabo el diseño de todas las piezas, simplemente se desarrollan las principales, ya que, esta geometría, se centra en un primer diseño bruto de la máquina, el que se debe ir matizando.

7.2 SEGUNDO MODELO CUMPLIENDO LOS REQUISITOS GEOMÉTRICOS Y DE GRANO ORIENTADO

En el primer diseño geométrico, se observan bastantes posibles mejoras. Este modelo inicial, realmente es una aproximación a la máquina objetivo muy teórica, ya que se ha diseñado un estator triangular, el cual está formado de chapas apiladas. Para conseguir este apilamiento, las chapas se deben doblar, algo que en la realidad práctica no resultaría en una sección perfectamente triangular, ya que esta tendría una tendencia a forma trapezoidal. Esto lleva al estudio, a dar el paso de modificación de diseño más decisivo para la máquina, modificar el estator.

Otro paso significativo en el desarrollo de este segundo modelo, es la definición por completo de todas las piezas de la máquina. El bobinado del estator, es una de las piezas que no se había diseñado, ya que su geometría depende de la forma del estator y del tamaño de ranuras que vaya a tener. El eje, es la otra pieza que se define por primera vez.

El procedimiento llevado a cabo en SolidWorks de todas las piezas de este segundo modelo, se desarrolla en el Anexo 5.


Figura 14. Medio ensamblaje del segundo modelo

7.3 ÚLTIMO MODELO CUMPLIENDO LOS REQUISITOS GEOMÉTRICOS Y DE GRANO ORIENTADO

Después de varias modificaciones en la geometría, tras realizar varios estudios en el programa electromagnético, se ha alcanzado la geometría final.

La principal modificación que se ha llevado a cabo, es variar el bobinado del estator para aumentar la sección de paso de corriente en las cabezas de bobina y la sección de las fases en el centro, duplicada, ya que corresponde a los bobinados de ambos lados del estator. La sección del bobinado a través de las ranuras del estator, se reduce lo máximo posible, ya que la densidad de corriente en este fragmento es menor.

Estas modificaciones en el bobinado del estator, hacen que el espacio en el interior del estator ya no sea suficiente para alojar el devanado, por lo que su geometría también va a variar.

Otra variación respecto al modelo anterior, es volver al diseño de jaula de una sola pieza.

El diseño de las piezas en SolidWorks que han sufrido alguna modificación, se desarrollan en el Anexo 6.



Figura 15. Medio ensamblaje del último modelo

7.4 DISEÑO GEOMÉTRICO PARA JMAG-DESIGNER

En el apartado anterior, se ha comentado la geometría utilizada para los resultados definitivos, pero, esta no corresponde completamente con la geometría con la que realmente se ha trabajado en el programa de estudio electromagnético.

La geometría que recibe JMAG-Designer de SolidWorks de los modelos anteriores, son bloques de piezas, es decir, el programa electromagnético detecta un bloque a la hora de indicar condiciones o aplicar materiales. Debido a necesidades del estudio electromagnético, algunas de las piezas se han tenido que fragmentar en SolidWorks, para poder tener independencia en cada uno de los fragmentos de algunas piezas. Las piezas que han sido fragmentadas y las razones por las que ha sido necesario fragmentarlas, se explican en el Anexo 7.

Además de fragmentar cada una de las piezas individualmente, se ha fragmentado el ensamblaje completo. Esta reducción se debe a que los fenómenos que ocurren en la máquina, se repiten o son iguales a lo largo de ella, lo que permite no trabajar en el programa de estudio electromagnético con la máquina entera, y reducir la consiguiente carga de computación que esto conllevaría.

A lo largo del proyecto, se ha trabajado con varias porciones, pero principalmente destacan dos opciones:

Media máquina (180°): esta es la opción que más se ha utilizado a lo largo de los estudios, ya que es la máxima fracción a la que se puede reducir la máquina y que se cumpla algún tipo de repetición de los fenómenos electromagnéticos. Esta máquina no permite fragmentarse más, debido a que su rotor tiene 34 ranuras, y una cuarta parte del motor implicaría quedarse con una media ranura.



Figura 16. Ranuras del rotor para fragmentación de 180º (izq.) y 90º (der.)

Mitad de la máquina: en este caso, se fragmenta la máquina en la dirección axial, ya que esta tiene una simetría en los fenómenos electromagnéticos en la mitad. Además, esta condición permite trabajar sin errores en los estudios electromagnéticos a la hora de asignar la dirección de corrientes del bobinado del estator, ya que por su diseño dificulta asignar la condición de corriente si la geometría está completa.

Asignar esta nueva condición o fragmentación, ha sido causante de algún cambio presente en la geometría final, comentado en el Anexo 6.



Figura 17. Ensamblaje completo en la dirección axial (izq.) y medio en la dirección axial (der.)

El último paso que se debe seguir en el diseño geométrico, antes de trasladar el modelo al programa de simulación electromagnética, consiste en ensamblar las piezas.

Inicialmente se han creado las piezas de forma individual, y porteriormente se añaden en un nuevo documento de SolidWorks denominado ensamblaje. En este nuevo apartado se fija una de las piezas, y el resto van definiendo su posición respecto a esa pieza con restricciones de paralelismo, coindidencia, coaxialidad, etc, entre caras, puntos o líneas.

Este apartado es en el que se suele definir que porción de máquina se toma para el estudio, mediante cortes del ensamblaje completo en las direcciones radiales y axiales.

7.5 DISEÑO DEL ANÁLISIS ELECTROMAGNÉTICO

Una vez se tiene definida por completo la geometría y ensamblada, mediante el software de interconexión incluido en JMAG-Designer, JMAG-Communicator, que puede conectar este mismo programa con SolidWorks, se traslada la geometría junto con sus parámetros.

En este apartado, no se van a comentar todos los proyectos estudiados tal y como se ha hecho en la geometría, ya que estos estudios intermedios, como se ha comentado en los apartados anteriores han sido únicamente planteados para definir la mejor geometría para este proyecto. Por lo tanto, en este apartado se va a definir exclusivamente lo que corresponde a la simulación electromagnética, y las variaciones que puedan haber surgido entre los estudios y que atañen a esta temática.

El segundo paso dentro del programa de simulación, una vez se ha creado un proyecto con una geometría, lo más importante, es definir unos ejes de coordenadas, ya que todas las condiciones que se impongan se van a referenciar en estos ejes. En

este estudio, se ha tomado la referencia de la [figura 18], basada en la geometría, por lo que el eje Z se ha establecido en la dirección axial.



Figura 18. Ejes de coordenadas rectangulares del estudio de simulación (izq.) y coordenadas cilíndricas (der.)

En el estudio, tras lo comentado en el apartado anterior, por lo cual sólo se trabaja con 180º de la máquina en la dirección radial, y la mitad en la dirección axial, resulta un modelo de estudio de 8 piezas, una de ellas el eje partido en dos mitades iguales.

Para poder comenzar a definir detalles del estudio, es necesario seleccionar el tipo de análisis que se quiere llevar a cabo, en el caso de este proyecto, se ha seleccionado un estudio electromagnético en frecuencia en 3D. Una vez se ha escogido el estudio, aparece un árbol con los grupos de especificaciones que necesita el estudio.

Los siguientes pasos que se llevan a cabo en la confección del estudio, es completar cada uno de esto grupos que se han generado mediante: la asociación de materiales con la pieza correspondiente, Anexo 8; la aplicación de condiciones de contorno y eléctricas y la generación de un circuito eléctrico, el cual posteriormente se asocia a la geometría mediante las condiciones, Anexo 9; el mallado que permita llevar a cabo el estudio por el método de elementos finitos (MEF), Anexo 10; definir las características de computación, los resultados que se quieren obtener y las condiciones iniciales que se imponen al estudio, Anexo 11.

Una vez el primer caso del proyecto está completado, se generan el resto de casos necesarios. Para ello, se necesita seleccionar el parámetro de la fuente de corriente de alimentación del circuito eléctrico correspondiente a la amplitud de la corriente. Tras dar nombre a este parámetro como "*Amplitud*", en el apartado de crear casos se crean los diez que se pretenden estudiar, de forma incremental, incremento de 1A, desde 1A hasta 10A.

✓Case	Label	Geometry	Groups	Amplitud
☑ 1				1
2				2
✓ 3				3
⊻ 4				4
✓ 5				5
☑ 6				6
7				7
8 🖄				8
9				9
✓ 10				10

Figura 19. Casos generados para el análisis a distintas corrientes

Después de generar los casos, ya se puede lanzar el estudio de computación de todos los casos en fila. El software resuelve los casos de forma individual, ya que trabajar con varios estudios a la vez requiere otro tipo de licencia del software.

8 RESULTADOS FINALES

8.1 **RESUMEN DATOS DE ENTRADA**

En los apartados anteriores se especifica de forma concreta todos los datos introducidos en la simulación y sus justificaciones. En este apartado se busca recoger los datos de entrada principales en el estudio.

Tabla 1. Datos de entrada de cada pieza y del estudio

PARTE/MATERIAL	MEDIDA	VALOR
	D _{ext} (mm)	122.6
	D _{int} (mm)	70
	Espesor partes laterales (mm)	21
	Espesor parte central (mm)	16.8
Núcleo del estator	Nº de Ranuras	24
(TRAN-COR H2)	Distribución del campo magnético	Radial-axial
	Tamaño elemento de malla	2 / 0.8 / 0.8
	genérico/cara en contacto con	
	entrehierro/cara entre las dos partes	
	del estator (mm)	
	Diámetro exterior (mm)	69.4
	Diámetro interior (mm)	12
	Espesor (mm)	21
Núcleo del rotor	Nº de Ranuras	34
(Material1)	Distribución del campo magnético	Radial-circular
	Tamaño elemento de malla	2 / 0.8
	genérico/cara en contacto con	
	entrehierro (mm)	
	Espesor anillos (mm)	2.5
Jaula	Diámetro exterior anillos (mm)	69.4
(Aluminio)	Longitud de barras (mm)	27.75
(*	Tamaño elemento de malla/cara en	4/08
	contacto con el entrehierro (mm)	.,
Entrehierro	Distancia entre rotor y estator (mm)	0.3
	Nº Fases	3
Bobinado del estator	Conexión	Estrella
(Cobre)	Resistencia/fase (Ω)	2.92
(00010)	Nº Vueltas/fase	66
	Tamaño elemento de malla (mm)	4
Eje (Material1)	D _{ext} (mm)	

Diseño de estator alternativo para motor asíncrono

	Tamaño elemento de malla (mm)	4	
	№ de polos	4	
	Amplitud fuente de alimentación (A)	1-10	
Motor completo	Frecuencias de estudio (Hz)	50, 45, 40, 35,	
		30-5, 0.5	
	Nº Steps/ Divisiones	31/ 30	

8.2 MALLADO RESULTANTE

A partir del mallado definido en el Anexo 10, las características de la malla obtenidas son:

Nº elementos finitos totales = 236675

Nº nodos = 42282

El software de simulación, tiene una opción en la configuración de la malla para saber la calidad del mallado que se ha generado. Esto se define mediante un valor entre 0 y 1. Para que el mallado se pueda considerar de buena calidad, la calidad de la malla tiene que estar entre 0.5 y 0.6. Lo que se mide con este indicador, es la deformación de los elementos respecto a un tetraedro perfecto, los cuales coloca en rangos de calidad. La media de estos datos es la calidad de la malla.

En el caso de esta malla, de acuerdo al programa, la calidad de este mallado es buena, 0.54576.

	Quality	Element Count	Display		
Flat	0.0 - 0.1:	6605		Elements:	236675
\uparrow	0.1-0.2:	4652		Nodes:	42282
	0.2 - 0.3:	13407			
	0.3-0.4:	22337		Minimum:	0.00326119
	0.4 - 0.5:	35208		Maximum:	0.981761
	0.5 - 0.6:	51690		Average:	0.54576
	0.6 - 0.7:	58949		Joint:	0.384447
	0.7 - 0.8:	30743			
\downarrow	0.8 - 0.9:	12096			
Regular	0.9 - 1.0:	988			



Página 43 de 267

Además del resultado que dé el programa en cuanto a calidad de malla, hay que observar donde se encuentran los elementos de mayor calidad, es decir, los que tiene una geometría más similar al tetraedro perfecto, y donde están los de peor calidad, geometría más alejada del tetraedro perfecto.

En este estudio interesa que los elementos de mayor calidad se sitúen en las caras de las piezas en contacto con el entrehierro, ya que es por donde va a trasladarse todo el flujo magnético, y en la cara que conecta las dos particiones del rotor, ya que es donde cambia la dirección del campo magnético.

8.3 GRÁFICOS DE CONTORNO Y VECTORES

En este apartado, se describe el resumen de los resultados y datos más importantes de los gráficos de contorno y vectoriales. Los resultados de todos los diferentes resultados para cada caso y step, se desarrollan en Anexo 12.

A la hora de analizar los diferentes estudios, durante el proceso llevado a cabo hasta el estudio de simulación final, los datos más importantes tenidos en cuenta han sido, los gráficos de contorno y de vectores de la densidad de flujo magnético y de corriente. A través de estos gráficos se puede ver si la distribución e intensidad del campo magnético es la esperada, de acuerdo a los datos introducidos y al funcionamiento de un motor de inducción, que es lo que se está simulando. Además, a través de la densidad de flujo magnético, se ve si la distribución, de las corrientes es la esperada en los bobinados del estator y en la jaula.

En el caso de este estudio los resultados obtenidos son:

Distribución de campo magnético, como se puede observar en [figura 21] y [figura 22], y más completo en [figura 23] y [figura 24], el campo sigue la distribución que se había planteado. El campo tiene una dirección radial predominante en la cara frontal, tal y como se ha impuesto mediante las chapas de grano orientado en esa dirección, y una dirección axial en la zona del espesor, tal y como se ha impuesto con las chapas de gran orientado en esa zona. En este caso, se están empelando imágenes de la

porción de máquina estudiada, y por lo tanto sólo se ve la distribución del campo en forma de aproximadamente "L".



Figura 21. Gráfico de vectores: Caso 1 (1A) para 50Hz (vista frontal – campo radial)



Figura 22. Gráfico de vectores: Caso 10 (10A) para 50Hz (vista frontal – campo radial)

En el caso en el que se observan los resultados en la máquina completa, se observa como forma la distribución de densidad de campo magnético una "C", ya que fluyen las líneas de una cara del estator, pasan por la parte superior y llegan a la otra cara, siguiendo la distribución radial-axial-radial. Esto se puede observar en las imágenes [figura 23] y [figura 24].



Figura 23. Gráfico de vectores: Caso 10 (10A) para 50Hz (Máquina completa - vista en perspectiva)



Figura 24. Gráfico de vectores: Caso 10 (10A) para 50Hz (Máquina completa - vista superior)

También se comprueba que realmente se ha diseñado un motor con 4 polos. Esto se observa en las imágenes de la mitad de la máquina, por las dos zonas de más densidad de líneas que se pueden diferenciar claramente, las cuales corresponden a dos de los polos, norte y sur. Se sabe que son dos polos, norte y sur, porque los vectores tienen líneas con direcciones contrarias [figura 25] y [figura 26].



Figura 25. Gráfico de vectores: Caso 1 (1A) para 50Hz (vista en perspectiva – Campo axial)



Figura 26. Gráfico de vectores: Caso 10 (10A) para 50Hz (vista en perspectiva – Campo axial)

Página **47** de **267**

En las imágenes, se observa como la concurrencia de las líneas de campo magnético en las esquinas es mayor en número e intensidad, ya que, las esquinas hacen más difícil que se mantenga la distribución impuesta por el material de grano orientado.

Además del estator, también se ha comprobado la distribución del campo magnético en el rotor. En las [figura 27] y [figura 28], se observa como el campo magnético concurre hacia dos direcciones radiales, claramente diferenciadas, que corresponden a los dos polos visibles en estas imágenes. Los otros dos polos, se encontrarían visibles en los 180° de la máquina que se han cortado en la dirección radial. El resto de la distribución, hasta que concurren o se disipan en un polo, sigue una dirección circular. Esta distribución total de campo radial-circular, corresponde con la que se pretendía que tuviera el rotor de esta máquina, el mismo que la máquina tomada como ejemplo en Anexo 1.



Figura 27. Gráfica de vectores: Caso 1 (1A) y 50Hz



Figura 28. Gráfica de vectores: Caso 10 (10A) y 50Hz

Página 48 de 267

Para las imágenes anteriores, se ha tomado sólo el rotor, porque en la imagen general aparecen dibujadas muy pocas líneas y no se diferencian las direcciones. Por lo tanto, la escala de valores máximos y mínimos se ha adaptado a esta pieza, y por ello se puede ver un mayor número de líneas de campo magnético.

A pesar de ser estos los materiales por lo que se busca que circule el campo magnético, también sufren la acción de este los materiales de la máquina con una finalidad eléctrica. Esto se debe a que el material no es perfectamente inmune a la acción magnética. Este defecto se observa en la [figura 29], donde la parte inferior del bobinado que se encuentra alojado en las ranuras del estator, tiene una mayor intensidad de campo magnético en colores verde y azul claro, lo cual corresponde a la zona en contacto con el entrehierro. Además, se puede ver como disminuye el efecto del campo de forma gradual hasta la parte superior de las bobinas, en morado, que corresponde a un campo magnético nulo o prácticamente nulo.



Figura 29. Gráfico de contorno: Caso 1 (1A) y 50Hz (Vista inferior - Bobinado del estator)

Densidad de corriente, en primer lugar, a través del gráfico de contorno [figura 28] se comprueba la simetría en la Jaula, con dos zonas diferenciadas en color verde en las cuales hay mayor densidad de corriente, correspondiente a los dos polos visibles de la máquina. En la [figura 30], se puede volver a ver los dos polos a través de la concurrencia y dispersión de las flechas en dos puntos de la geometría. La distribución de la corriente es la misma en ambas caras, frontal y posterior.



Figura 30. Gráfico de contorno: Caso 1 (1A) y 50Hz (Vista posterior - Jaula)

Mediante la vista lateral que proporciona la [figura 31] de la jaula, se comprueba como la corriente circula de forma paralela al plano frontal en los anillos, y de forma perpendicular, a lo largo de cada uno de los conductores. Parte de los conductores llevan corriente al anillo central, y la otra parte al anillo posterior, de esta manera fluye la corriente a través de toda la jaula. Estos fenómenos se repiten de forma simétrica en la otra mitad de la jaula que no se ha empleado en la simulación.



Figura 31. Gráfico de vectores: Caso 1 (1A) y 50Hz (Vista frontal/lateral - Jaula)



Figura 32. Gráfico de vectores: Caso 1 (1A) y 50Hz (Vista de una porción - Jaula)

En cuanto a las corrientes en el bobinado del estator, se ha obtenido una densidad de corriente similar en las tres fases, pero que varía en intensidad, ya que estas están desfasadas entre sí, y con valores instantáneos diferentes.



Figura 33. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (1A) y 50Hz Fase U (izq.) y Fase V (der.)



Figura 34. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (1A) y 50Hz Fase W

Debido a la diferencia de sección que se produce en los diferentes tramos del bobinado, varía la densidad de corriente. Esto en la realidad no sería así, ya que se emplearía el mismo número de conductores para todo el recorrido de cada fase, es decir, se mantendría una fase constante. En el dibujo no ha sido necesario representar la sección constante, porque los cálculos no se realizan a partir de los datos geométrico como ocurre con el tipo de condición "*FEM Conductor*", sino que se ha empleado una condición, "*FEM Coil*", por la cual se definen todos los datos de resistencia y número de vueltas de las fases, en el circuito simbólico.

En ambas partes del modelo, el sentido de las corrientes varía si se modifica la fase de las corrientes sinusoidales. Los casos empleados en las imágenes son para $\Phi = 0$.

En cuanto al estator, ocurre igual que el campo magnético con el devanado de este, al definir las propiedades eléctricas en el material del estator, correspondientes a un material real, y, por lo tanto, no perfectos e ideales, se observa como hay una distribución de corriente a lo largo de la geometría. La intensidad de esta densidad de corriente es bastante menor que la correspondiente a la jaula y el bobinado del estator.



Figura 35. Gráfico de contorno y vectores: Caso 1 (1A) y 50Hz (Estator)

8.4 TABLAS DE DATOS Y SUS GRÁFICAS

En este apartado, se describe, al igual que el anterior, un resumen de los datos más importantes de las tablas de datos y sus gráficos, obtenidos en el estudio. Los resultados más desarrollados se encuentran en el Anexo 13.

Los datos de este apartado se obtienen para los 3 primeros casos del estudio, ya que han sido los obtenidos con más estabilidad de computación y, por tanto, los más precisos. Estos casos son suficientes para obtener las relaciones de los parámetros estudiados con las diferentes frecuencias y corrientes de alimentación.

A pesar de no mostrar todos los resultados numéricos, se van a tener en cuenta todos los casos para las conclusiones de cada parámetro.

La información obtenida a partir de las tablas y gráficos del Anexo 13 son:

Pérdidas de Joule: conocida la fórmula de las pérdidas de Joule, se ha comprobado que los resultados la cumplían, y que, por lo tanto, las pérdidas aumentan con la corriente y con la frecuencia. Se ha estudiado para los tres casos iniciales, como se ve en la [figura 36].



Figura 36. Gráfico Pérdidas de Joule-Frecuencia: Caso 1

Inductancia en las bobinas: a partir de los resultados se ha obtenido que apenas varía para los distintos casos de amplitud de corriente, pero sí aumenta con la disminución de la frecuencia.



Figura 37. Gráfico Inductancia bobinado-Frecuencia: Caso 1

Página 54 de 267

Par: a través de la tabla y del gráfico, se ha obtenido que el par aumenta al aumentar la corriente de alimentación. Además, se observa que la máquina de este estudio no proporciona un par muy elevado, lo que implicaría que sus aplicaciones serían de poca potencia.



Figura 38. Gráfico par vs. frecuencia Todos los casos (Bloque rotor)

Corriente y densidad de corriente: mediante cálculos, conocida la densidad de corriente y el área de paso de los conductores de la jaula, se obtiene el valor de la corriente que circula. Este valor aumenta al aumentar la corriente de alimentación, y disminuye al disminuir la frecuencia.

Flujo en una cara del estator y otra del rotor: la zona por la que pasa todo el flujo del estator es la cara que separa la parte superior y lateral de este, y la zona por la que pasa todo el flujo al rotor, es el entrehierro, en este caso se va a medir la superficie de contacto del rotor con el entrehierro. En los resultados obtenidos, se observa que el flujo apenas varía con la frecuencia, pero sí que aumenta al aumentar la frecuencia.



Figura 39. Flujo magnético Caso 1 (Cara del Estator y cara del rotor)

8.5 COMPARATIVA CON MOTOR DE INDUCCIÓN COMÚN

Los datos obtenidos en el análisis de este proyecto, se pretenden comparar con los de un motor de inducción común, el cual se ha sometido al mismo análisis en frecuencia, como es el ejemplo de JMAG-Designer del Anexo 1.

Antes de analizar los resultados, hay que tener en cuenta que las propiedades de ambas máquinas no son completamente iguales, además de que un estudio se ha hecho en 2D y el otro en 3D lo que varía en algunas cuestiones de la simulación del programa. La mayor diferencia entre ellos, es constructiva, lo que conlleva que no todas las partes de la máquina se puedan comparar como iguales.

Por lo que se ha comentado en el párrafo anterior, la comparativa se va hacer sólo en la cara frontal, ya que el estudio con el que se hace la comparativa es en 2D.

Densidad de flujo magnético:



Figura 40. Gráfico contorno: Caso 10 (10A) y 50Hz (Estator - Motor alternativo)



Figura 41. Gráfico contorno: Caso 10 (10A) y 50Hz (Estator - Motor común)



Figura 42. Gráfico de vectores: Caso 10 (10A) y 50Hz (Estator - Motor alternativo)

Página 57 de 267



Figura 43. Gráfico de vectores: Caso 10 (10A) y 50Hz (Estator - Motor común)

Comparando la distribución de ambas máquinas, tanto con gráfico de contorno como con gráfico de vectores, se observa claramente la diferencia entre la dsitribución de estator radial-circular del motor común y radial-axial del estator novedoso. En el caso del motor alternativo, no todas las líneas siguen la dirección que les impone el material de grano orientado, pero tienen a adquirir esa dirección. Esto se debe a que por limitaciones del programa, la dirección impuesta no es exactamente la que debiera tener.

En cuanto al rotor, si que su geometría es la misma a diferencia del espesor, que en el caso de la máquina de este estudio se divide en dos mitades y la sección de la ranura. La ranura del caso común es el doble que el caso alternativo. La distribución es la misma, radial-circular para ambos casos. Además la densidad de flujo magnético es muy similar.



Figura 44. Gráfico de vectores: Caso 10 (10A) y 50Hz (Rotor - Motor común)

Página 58 de 267



Figura 45. Gráfico de vectores: Caso 10 (10A) y 50Hz (Rotor - Motor alternativo)

Densidad de pérdidas de Joule/Corrientes parásitas: la jaula es el único conductor de la máquina al que se le ha permitido presentar el fenómeno de corrientes parásitas, ya que el bobinado del estator se busca que tenga una distribución uniforme. El estudio tomado como ejemplo, como se ha comentado, se ha estudiado en 2D y, por lo tanto, sólo se ve la sección de los conductores, el resto de propiedades de la tabla como son los anillos se desarrollan en el circuito eléctrico. Esta es la mayor diferencia en cuanto a diseño de simulación entre los dos estudios.



Figura 46. Gráfico contorno: Densidad de pérdidas Caso 1 (1A) y 50Hz (Vista superior jaula - Motor alternativo)

Se ha modificado a propósito la escala de la imagen anterior, ya que la mayor densidad de pérdidas está en el anillo, y nos interesan las pérdidas en los conductores para comparar con el ejemplo de motor común.



Figura 47. Gráfico contorno: Densidad de pérdidas Caso 1 (1A) y 50Hz (Sección jaula - Motor común)

Los resultados de las barras del motor alternativo, están dentro de un rango de valores aproximados de [15-25W/cm³] y el caso común [50-200W/cm³]. La variación es bastante grande entre ambos casos, ya que el caso común puede alcanzar pérdidas de más del doble del caso de este proyecto. Hay que tener en cuenta que la resistividad definida en ambos casos es la misma, pero ambos casos no tienen la misma sección. El caso del motor común tiene el doble de sección. Aún con esta diferencia, las pérdidas en el caso alternativo son menores.

Puede haber cierto margen de variación en los resultados, debido a que como se ha comentado antes, no se emplea la misma metodologia para definiar las jaulas de cada estudio.

En cuanto a las corrientes parásitas, se selecciona el valor absoluto de la densidad de corriente para ambos casos.



Figura 48. Gráfico contorno: Corrientes parásitas Caso 1 (1A) y 50Hz (Vista superior jaula - Motor alternativo)



Figura 49. Gráfico contorno: Corrientes parásitas Caso 1 (1A) y 50Hz (Sección jaula - Motor común)

Los resultados de las barras del motor alternativo, están dentro de un rango de valores aproximados de [0.2-3.5A/mm²] y el caso común [0.18-3A/mm²]. Los resultados de corrientes parásitas y su distribución, son bastante similares entre ambos casos. A la hora de conocer el valor de corriente a partir de la densidad, hay que tener en cuenta que el caso común tiene el doble de sección, y por lo tanto se obtendría mayor valor de corrientes parásitas.

También se quieren comparar los resultados del apartado anterior, en el cual se han analizado tablas y gráficos de distintos parámetros, con los resultados que ha proporcionado el estudio del motor común tomado como ejemplo.

Pérdidas de Joule: este caso ya se ha comparado mediante gráficos de contorno, pero en el caso de densidad de pérdidas de Joule. En este caso se van a obtener los datos de pérdidas de Joule. Al igual que la comparación anterior, se va a emplear el primer caso para todas las frecuencias estudiadas. La jaula y el estator, son las zonas más interesantes para este parámetro. A pesar de ello, sólo se va a mostrar la jaula ya que el estator en el caso común no tiene definida la resistividad en su material, y, por lo tanto, no hay resultado.



Figura 50. Gráfico Pérdidas de Joule vs. Frecuencia: Caso 1 (Jaula - Motor alternativo)



Figura 51. Gráfico Pérdidas de Joule vs. Frecuencia: Caso 1 (Jaula - Motor común)

A partir de los resultados de las gráficas, se observa que en la jaula del motor común a partir de 15Hz tiene unas pérdidas con una variación menos que para el intervalo 0-15Hz. En cambio, el caso de jaula del motor alternativo tiene una pendiente constante, por lo que una pequeña variación en la frecuencia afecta bastante a las pérdidas. Además, el valor de pérdidas medio para todas las frecuencias es mayor en el caso común. Esto se puede deber a la diferencia de sección entre las barras de las dos jaulas.

Inductancia en las bobinas: al igual que el parámetro anterior, se compara para el primer caso estudiado.

De los resultados se observa que el caso común tiene una inductancia igual en las tres fases. En cambio, el motor alternativo tiene una inductancia para cada fase. Además, los valores medios con los valores medios con los que trabaja el caso alternativo son menores, un poco menos de la mitad que el caso común.

El hecho de que el bobinado del estator sea más desequilibrado y de menor valor, se puede deber a la geometría con la que se trabaja, ya que es bastante más compleja que el caso tomado de ejemplo.



Figura 52. Gráfico Inductancia bobinado-Frecuencia: Caso 1 (Bobinado del estator – Motor común)



Figura 53. Gráfico Inductancia bobinado-Frecuencia: Caso 1 (Bobinado del estator – Motor alternativo)

Par: en el caso del par, la diferencia entre las características de los estudios es mayor, ya que es el resultado final de la corriente de entrada a través de la fuente de alimentación, influyendo las diferentes secciones de los bobinados y jaula, la diferente geometría del estator y su material, y el uso de dos rotores y doble jaula frente a una sola jaula y un solo rotor. Esto, junto con la complejidad de computación del estudio alternativo, ha resultado en dos gráficos de par con resultados bastante diferentes.



Figura 54. Gráfico par vs. frecuencia Todos los casos (Bloque rotor - Motor alternativo)



Figura 55. Gráfico par vs. frecuencia Todos los casos (Bloque rotor - Motor común)

Los resultados obtenidos de los casos van por orden del caso 1 con el menor par, hasta el caso 10 con el par máximo.

Teniendo en cuenta las diferencias entre los casos, los resultados muestran que el par en el caso común es mucho mayor que el caso empleado en el estudio alternativo. Esto implica que a pesar se obtener mejor magnetización en el estator, el bloque rotor no está induciendo suficiente corriente para obtener un par comparable al caso de motor común. Esto implica que el motor alternativo tiene unas aplicaciones de potencias muy pequeñas.

8.6 ANÁLISIS MAGNÉTICO TRANSITORIO

A pesar de que este análisis se pretende hacer dentro del estudio en frecuencias, se ha llevado a cabo el estudio de la máquina de este proyecto mediante un análisis transitorio a 50Hz.

Con este estudio, se completa el defecto que tiene el estudio en frecuencias respecto al movimiento de la máquina. El estudio en frecuencias muestra las variaciones de la función sinusoidal en la misma fracción de máquina, cuando en la realidad el bloque del rotor está girando y no está en todo momento enfrentado a la misma zona del estator. Por lo tanto, una de las diferencias más importantes es que se ha añadido la condición de movimiento en el bloque rotor. En el Anexo 14 se especifica el diseño de la nueva simulación y resultados. Además, mediante este estudio se complementan los resultados obtenidos en cuanto a densidad de flujo magnético, su distribución en la máquina y otros parámetros.

Mediante los gráficos de vectores obtenidos de densidad de flujo magnético, se confirma al igual que con los gráficos del análisis en frecuencias, la distribución radialaxial del estator y radial-circular en el rotor y la presencia de 4 polos magnéticos.



Figura 56. Gráfico de vectores: Caso 5 (Step 1) (Estator+Rotor – Vista frontal)



Figura 57. Gráfico de vectores: Caso 5 (Step 1) (Estator+Rotor – Vista en perspectiva)

En el motor completo se observa mejor la distribución de densidad de flujo magnético comentada:



Figura 58. Gráfico de vectores: Caso 5 (Step 1) (Estator+Rotor Completo – Vista frontal)



Figura 59. Gráfico de vectores: Caso 5 (Step 1) (Estator+Rotor Completo – Vista superior)

En cuanto a la densidad de corriente en los bobinados y la jaula, se han estudiado para los instantes 15 y 22, los casos 1, 5 y 10. Algunas imágenes resultantes de este análisis son:



Figura 60. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 15) (Fase U)



Figura 61. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 15) (Fase V)



Figura 62. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 15) (Fase W)

A través de los resultados, se observa que la distribución visual es la misma para todos los instantes, excepto que varía el sentido de la corriente. Se han mostrado dos instantes diferentes, ya que los valores numéricos sí que varían.

Si se tiene en cuenta que el valor de densidad de corriente es la corriente que circula por una sección, en este caso de un rango de mm², se puede deducir que el caso 5 con unos resultados de [1-3 A/mm²], y los más próximos a este, están dentro de un rango de corrientes de trabajo aceptables para este tipo de motor.

En cuanto a la jaula, se ha obtenido una distribución muy similar para los diferentes casos, y unas densidades de corriente dentro de cada caso con una variación entre instantes pequeña, menos de 1A. En cuanto a valores numérico, como se esperaba la densidad e corriente aumenta con el aumento de corriente de la fuente de alimentación. El caso 5 y los próximos a este son los que trabajan en un rango de corriente intermedio, y serían la mejor opción.

A continuación, se muestra como ejemplo los dos instantes del caso 1.



Figura 63. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 15) (Jaula – vista en perspectiva)



Figura 64. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 22) (Jaula – vista en perspectiva)

Página 70 de 267

8.7 CONCLUSIONES TECNOLÓGICAS Y ACADÉMICAS

8.7.1 PROS Y CONTRAS DEL SOFTWARE JMAG-DESIGNER

El software de simulación electromagnético empleado ha demostrado ser muy completo en cuanto a la posibilidad de estudios distintos y resultados diferentes que ofrece. Este ha sido el ámbito explotado del software ya que está especializado en gran medida en los estudios electromagnéticos.

Es un software muy complejo a nivel de computación, lo que permite desarrollar estudios en los que se detalla en gran medida el mallado de forma manual. Esta posibilidad permite adquirir una gran precisión si se conoce el funcionamiento de la máquina y las partes más importantes de ella que impliquen un mallado muy fino. Estas posibilidades también implican una carga de computación muy grande. Esto hace que sus capacidades no se puedan aprovechar totalmente sin un computador con suficiente potencia para desarrollar sus estudios. Los estudios llevados a cabo para este proyecto, han implicado un tiempo de computación de media de 1 día por caso, y se han desarrollado en un ordenador portátil con características comunes a nivel doméstico. Esto ha llevado a que no se haya podido llegar más lejos en cuanto a definición y precisión en el mallado u otras cuestiones de configuración del método de resolución.

A lo largo del desarrollo del estudio, se han encontrado dificultades en el programa, ya que la máquina que se pretende estudiar en este proyecto está fuera de lo común en cuanto a motores de inducción. La mayor dificultad ha sido definir las direcciones predominantes en el material de grano orientado, ya que la dirección de los laterales tenía cierta inclinación, pero por limitaciones del programa ha sido necesario colocarla recta.

A pesar de que en este estudio no se ha explotado la posibilidad de la parametrización, es la mejor cualidad de este software, ya que permite conectarse directamente con el programa de diseño que se ha empleado, SolidWorks, y transferir las medidas acotadas en las piezas como parámetros. En el estudio de este proyecto
no se ha empleado la parametrización de la geometría, pero se ha utilizado un parámetro del circuito eléctrico. Este parámetro es el que ha permitido realizar los 10 casos con diferentes amplitudes de corriente para la fuente de alimentación, sin que sea necesario crear un proyecto de estudio diferente para cada opción.

8.7.2 APORTACIONES ACADÉMICAS

A nivel de los softwares empleados en este proyecto, se ha adquirido un conocimiento bastante profundo de sus funcionalidades.

En SolidWorks, el diseño de las piezas en general no ha sido complejo, la mayor dificultad ha sido el diseño del bobinado del estator que ha implicado utilizar herramientas más complejas del software. La generación de todos los diferentes modelos y sus modificaciones, ha sido el camino para conocer y utilizar de forma fluida el programa.

En JMAG-Designer, se ha conocido las posibilidades del programa y sus limitaciones dentro del análisis electromagnético, ya que se ha empleado en el proyecto análisis en frecuencia principalmente, y un pequeño estudio transitorio.

En cuanto a la máquina en sí, es decir, el motor de inducción de jaula de ardilla, ha sido necesario un conocimiento bastante profundo de las piezas que lo forman y de sus características de funcionamiento. Esto se debe a que el motor desarrollado en este estudio, no tiene un diseño ni materiales habituales, en este caso se han empleado chapas de grano orientado para el estator y esto ha llevado a un diseño geométrico diferente de la máquina. Después de conocer el campo magnético que se busca que tenga la máquina, todo el diseño ha tenido que adaptarse a ello, siempre dentro de la configuración de un motor de inducción de jaula de ardilla.

DOCUMENTO Nº2: ANEXOS

Índice de Documento 2: Anexos

ANEXO 1: Datos de partida obtenidos del ejemplo de JMAG-Designer

		Página 74 de 267	
2	DE	VANADO DEL ESTATOR11	4
	EST	ATOR DE FORMA PRÁCTICA 113	3
	1.6	CUESTIONES A TENER EN CUENTA EN LA CONSTRUCCIÓN DE	L
	1.5	CÁLCULO DE LA PERMEABILIDAD REALTIVA DEL EJE DIFÍCIL 112	2
	ACU	ERDO A LA COLOCACIÓN DE CHAPAS	9
	1.4	RESTRICCIONES EN EL CÁLCULO DE LA FORMA DEL ESTATOR DI	E
	1.3	CAMPO BIDIRECCIONAL RADIAL-AXIAL Y COLOCACIÓN DE CHAPAS	S
	1.2	CHAPAS DE GRANO ORIENTADO	7
	1.1	MATERIALES MAGNÉTICOS 10	6
1	DIS	SEÑO DEL ESTATOR 10	6
A	NEX	D 3: Adaptaciones de la geometría al grano orientado	
	2.7	RESULTADOS104	4
	2.6	MALLA	2
	2.5	CONDICIONES	1
	2.4	AÑADIR CIRCUITO ELÉCTRICO10	0
	2.3	DEFINICIÓN Y ASIGNACIÓN DE MATERIALES	8
	2.2	PROPIEDADES DEL ESTUDIO	6
	2.1	TIPO DE ESTUDIO	5
2	CA	ARACTERÍSTICAS JMAG-DESIGNER	5
1	CA	RACTERÍSTICAS SOLIDWORKS9	3
A	NEX	D 2: Características de los softwares utilizados	
3	PR	OCEDIMIENTOS TOMADOS DE OTROS EJEMPLOS	1
2	DA	TOS UTILIZADOS DEL EJEMPLO9	0
1	EJ	EMPLO ORIGINAL	7

Nu	ria Fernández Jorrín	Diseño de estator alternativo para motor asíncrono
3	RESTO DE PIEZAS AFEC	TADAS 115
AN	IEXO 4: Generación de las p	piezas del primer modelo en SolidWorks
1	ESTATOR	
2	ROTOR	
3	JAULA	
AN	IEXO 5: Generación de las p	piezas del segundo modelo en SolidWorks
1	ESTATOR	
2	ROTOR	
3	EJE	
4	BOBINADO ESTATOR	
5	JAULA	
AN	IEXO 6: Generación de las p	piezas del último modelo en SolidWorks
1	BOBINADO DEL ESTATO	R130
2	ESTATOR	
3	JAULA	
AN De	IEXO 7: Fragmentación de signer	las piezas en SolidWorks para el estudio en JMAG-
1	ESTATOR	
2	BOBINADO DEL ESTATO	R133
3	EJE	
AN	IEXO 8: Asignación de mate	riales a cada pieza en JMAG-Designer
1	ESTATOR	
2	EJE Y ROTORES	
3	JAULA	
4	BOBINADO DEL ESTATO	R139
AN De	IEXO 9: Asignación de cor signer	ndiciones y creación del circuito eléctrico en JMAG-

1	CONDICIONES DE CONTORNO14	41
2	CIRCUITO	42
3	CONDICIONES DE CIRCUITO	43
4	CONDICIONES DE RESULTADOS	43
AN	EXO 10: Generación de la malla en JMAG-Designer	
1	PROPIEDADES GENERALES	46
2	DEFINICIÓN DEL TAMAÑO DE ELEMENTO EXTRA 14	47
AN	EXO 11: Definición de las propiedades del estudio de JMAG-Designer	
1	CONTROL DE FRECUENCIA1	50
2	CONVERSIÓN DEL MODELO COMPLETO1	51
3	OPCIONES DEL CIRCUITO1	51
4	ICCG1	51
5	CONTROL DE RESULTADOS	51
6	GENERACIÓN DE LOS DIFERENTES CASOS1	52
AN	EXO 12: Resultados mediante gráficos de contorno y de vectores	
1	INTRODUCCIÓN1	54
2 MA	GRÁFICAS DE CONTORNO Y VECTORES DENSIDAD DE CAMF AGNÉTICO	י0 55
3	GRÁFICAS DE CONTORNO Y VECTORES DENSIDAD DE CORRIENTE 1	69
4	GRÁFICAS DE CONTORNO FUERZA NODAL1	76
5	GRÁFICAS DE CONTORNO DENSIDAD DE PÉRDIDAS DE JOULE	78
AN	EXO 13: Resultados mediante tablas de datos y sus correspondientes gráficos	
1	TABLAS Y GRÁFICOS DENSIDAD DE PÉRDIDAS DE JOULE	85
2	TABLAS Y GRÁFICOS INDUCTANCIA EN LAS BOBINAS	91
3	TABLAS Y GRÁFICOS PAR1	94
4	TABLAS Y GRÁFICOS DENSIDAD DE CORRIENTE Y CORRIENTE	97
5	TABLAS Y GRÁFICOS FLUJO MAGNÉTICO	02

Diseño de estator alternativo para motor asíncrono

Nuria Fernández Jorrín

ANEXO 14: Análisis magnético transitorio

1	MODIFICACIONES RESPECTO AL ESTUDIO EN FRECUENCIA	10
2	GRÁFICAS DE CONTORNO Y VECTORES DE DENSIDAD DE FLUJ	JO
MA	GNÉTICO VARIANDO EN EL TIEMPO27	10
3	GRÁFICAS DE CONTORNO Y VECTORES DE DENSIDAD DE CORRIENT	ΓЕ
VA	RIANDO EN EL TIEMPO22	24

Índice de figuras del Documento 2: Anexos

Figura 65. Motor de inducción ejemplo de JMAG-Designer (Fuente: [8])87
Figura 66. Curva B-H de "Material1" (Fuente: [6])88
Figura 67. Geometría final estudiada en JMAG-Designer (Fuente: [6]) 89
Figura 68. Circuito de la macro "Cage" (izq.) y circuito total del estudio (der.) (Fuente:
[6])
Figura 69. Herramientas para la generación de croquis (2D)93
Figura 70. Herramientas para la generación y edición de sólidos (3D)93
Figura 71. Ejemplo con croquis inicial (izq.), extrusión posterior (centro) y recorte (der.)
Figura 72. Ejemplo: Dos piezas construidas por separado
Figura 73. Ejemplo del proceso de restricción: concéntrica (izq.), paralela (centro),
coincidente (der.)
Figura 74. Ventana de definición del control de frecuencia97
Figura 75. Ventana de definición: conversión al modelo completo (izq.) y paralelismo
en la computación (der.)97
Figura 76. Configuración de propiedades magnéticas
Figura 77. Configuración de las propiedades eléctricas
Figura 78. Configuración de las pérdidas100
Figura 79. Elementos disponibles para diseñar el circuito eléctrico simbólico 100
Figura 80. Grupos de condiciones "Boundary" y "Current" 101
Figura 81. Representación de las líneas entrantes (polo norte) y salientes (polo sur)
Figura 82. Representación sobre el rotor y el estator de la distribución del campo
magnético108
Figura 83. Sección del estator para el caso más básico109
Figura 84. Sección del estator para el caso más avanzado110
Figura 85. Ranuras y acero del estator111
Figura 86. Profundidad estator - sección superior chapas
Figura 87. Profundidad estator - sección extremos chapas
Figura 88. Representación del Devanado 1 para una fase 114
Figura 89. Representación del Devanado 2 para una fase 115

Figura 90. Vista de sección del estator con los 2 rotores 115
Figura 91. Croquis del estator en SW (izq.) y croquis de ranuras (der.) 118
Figura 92. Estator final 118
Figura 93. Croquis inicial del rotor119
Figura 94. Bloque rotor del mismo ancho que el estator (izq.) y bloque separado en
dos por ranura central (der.)120
Figura 95. Barras y ranuras de media jaula (izq.) y jaula completa (der.) 121
Figura 96. Ranura-acero
Figura 97. Sección final de las chapas del estator 124
Figura 98. Medio estator 124
Figura 99. Rotores colocados en el ensamblaje total de la máquina (izq.) y sección
final de ranura del rotor (der.) 125
Figura 100. Medio eje 126
Figura 101. Bobinado que va por el interior de las ranuras y parte de las cabezas de
bobinas
Figura 102. Proceso de generación de las cabezas de bobina (izq.) y resultado final
(der.)
Figura 103. Proceso de generación de las conexiones internas entre fases (izq.) y
resultado final (der.) 127
Figura 104. Medio bobinado del estator 128
Figura 105. Posición de las dos jaulas en el ensamblaje 128
Figura 106. Salientes de las cabezas de bobinas en el modelo anterior (izq.) y en este
nuevo modelo (der.)
Figura 107. Cabezas de bobinas del modelo anterior (izq.) y del nuevo modelo (der.)
Figura 108. Sección de chapa del estator en el modelo anterior (izq.) y en el modelo
nuevo (der.)
Figura 109. Jaulas para el modelo anterior (izq.) y jaula para el modelo nuevo (der.)
Figura 110. Croquis de lámina del estator partida en 3 (izq.) y pieza lateral izquierdo
del estator (der.)
Figura 111. Las tres fases del bobinado del estator reconocidas en JMAG-Designer

Figura 112. Pieza correspondiente a medio eje 134
Figura 113. Opciones de material para estator superior (izq.) y estator lateral (der.)
Figura 114. Direcciones eje fácil, difícil y laminación de estator superior (izq.) y estator
lateral (der.)
Figura 115. Direcciones fáciles reales que deberían tener las chapas 138
Figura 116. Piezas asignadas con Material1139
Figura 117. Pieza asignada con Aluminio (izq.) y pieza asignada con Cobre (der.)
Figura 118. Condición de periodicidad (izq.) y condición de simetría natural (der.)141
Figura 119. Circuito completo (izq.) y elementos dentro de la macro "Star connection"
(der.)
Figura 120. Representación de los vectores de las corrientes de cada fase (izq.) y sus
ecuaciones (der.)
Figura 121. Mallado en la cara externa del rotor (izq.) y en la cara interna del estator
(der.)
Figura 122. Mallado cara en contacto con el entrehierro de la jaula (izq.) y cara entre
estator superior y lateral (der.) 147
Figura 123. Mallado en la parte del estator (izq.) y del rotor (der.) 148
Figura 124. Mallado completo del motor simulado 148
Figura 125. Valores de entrada de frecuencia para cada división 150
Figura 126. Parámetro seleccionado para el estudio 152
Figura 127. Deslizador de fase / Phase slider 154
Figura 128. Ecuación que representa la oscilación de una onda sinusoidal (Fuente:
Opción "Help" del programa JMAG-Designer) 154
Figura 129. Ejemplo de representación de escala de color para los resultados de
Densidad de corriente
Figura 130. Gráfico contorno: Caso 1 - 50Hz (Estator) 156
Figura 131. Gráfico contorno: Caso 1 - 50Hz (Rotor) 156
Figura 132. Gráfico contorno: Caso 1 - 30Hz (Estator) 156
Figura 133. Gráfico contorno: Caso 1 - 30Hz (Rotor) 157
Figura 134. Gráfico contorno: Caso 1 - 10Hz (Estator) 157
Figura 135. Gráfico contorno: Caso 1 - 10Hz (Rotor) 157

Figura 136. Gráfico de vectores: Caso 1 - 50Hz15	58
Figura 137. Gráfico de vectores: Caso 1 - 30Hz15	58
Figura 138. Gráfico de vectores: Caso 1 - 50Hz (izq.) y Caso 1 - 10Hz (der.) (Roto	or)
	58
Figura 139. Gráfico de vectores: Caso 1 - 50Hz (Distribución en la pieza) 15	59
Figura 140. Gráfico de vectores: Caso 1 - 50Hz (Estator) para $\Phi = 90^{\circ}$	59
Figura 141. Gráfico contorno: Caso 5 - 50Hz (Estator)	60
Figura 142. Gráfico contorno: Caso 5 - 25Hz (Estator) 16	60
Figura 143. Gráfico contorno: Caso 5 - 0.5Hz (Estator)	60
Figura 144. Gráfico contorno: Caso 5 - 50Hz (Rotor)16	61
Figura 145. Gráfico contorno: Caso 5 - 25Hz (Rotor)16	61
Figura 146. Gráfico contorno: Caso 5 - 0.5Hz (Rotor)16	61
Figura 147. Gráfico de vectores: Caso 5 - 50Hz (Estator)16	62
Figura 148. Gráfico de vectores: Caso 5 - 25Hz (Estator)	62
Figura 149. Gráfico de vectores: Caso 5 - 50Hz (izq.) y Caso 5 - 25Hz (der.) (Roto	or)
	62
Figura 150. Gráfico contorno: Caso 10 - 50Hz (Estator) 16	63
Figura 151. Gráfico contorno: Caso 10 - 30Hz (Estator)	63
Figura 152. Gráfico contorno: Caso 10 – 0.5Hz (Estator) 16	63
Figura 153. Gráfico contorno: Caso 10 - 50Hz (Rotor)16	64
Figura 154. Gráfico contorno: Caso 10 - 30Hz (Rotor)16	64
Figura 155. Gráfico contorno: Caso 10 - 0.5Hz (Rotor)	64
Figura 156. Gráfico de vectores: Caso 10 - 50Hz (Estator)	65
Figura 157. Gráfico de vectores: Caso 10 - 25Hz (Estator)	65
Figura 158. Gráfico de vectores: Caso 10 - 50Hz (izq.) y Caso 10 - 25Hz (der.) (Roto	or)
	65
Figura 159. Gráfico contorno: Caso 2 - 50Hz (Estator) 16	66
Figura 160. Gráfico contorno: Caso 3 - 50Hz (Estator)	66
Figura 161. Gráfico contorno: Caso 4 - 50Hz (Estator) 16	66
Figura 162. Gráfico contorno: Caso 6 - 50Hz (Estator) 16	67
Figura 163. Gráfico contorno: Caso 7 - 50Hz (Estator) 16	67
Figura 164. Gráfico contorno: Caso 2 - 50Hz (Rotor)16	67
Figura 165. Gráfico contorno: Caso 3 - 50Hz (Rotor)16	68

Figura 166. Gráfico contorno: Caso 4 - 50Hz (Rotor)168
Figura 167. Gráfico contorno: Caso 6 - 50Hz (Rotor)168
Figura 168. Gráfico contorno: Caso 7 - 50Hz (Rotor)169
Figura 169. Gráfico de contorno y vectores: Caso 1 - 50Hz (Fase U) 170
Figura 170. Gráfico de contorno y vectores: Caso 1 - 50Hz (Fase V) 170
Figura 171. Gráfico de contorno y vectores: Caso 1 - 50Hz (Fase W) 171
Figura 172. Gráfico de contorno y vectores: Caso 1 - 50Hz (Jaula - vista frontal). 171
Figura 173. Gráfico de contorno y vectores: Caso 1 - 50Hz (Jaula - vista en
perspectiva)171
Figura 174. Gráfico de contorno y vectores: Caso 5 - 50Hz (Jaula - vista frontal). 172
Figura 175. Gráfico de contorno y vectores: Caso 5 - 50Hz (Jaula - vista en
perspectiva)172
Figura 176. Gráfico de contorno y vectores: Caso 5 - 50Hz (Fase U) 172
Figura 177. Gráfico de contorno y vectores: Caso 5 - 50Hz (Fase V) 173
Figura 178. Gráfico de contorno y vectores: Caso 5 - 50Hz (Fase W) 173
Figura 179. Gráfico de contorno y vectores: Caso 5 - 50Hz (Jaula - vista en
perspectiva)173
Figura 180. Gráfico de contorno y vectores: Caso 10 - 50Hz (Jaula - vista frontal) 174
Figura 181. Gráfico de contorno y vectores: Caso 10 - 50Hz (Jaula - vista en
perspectiva)174
Figura 182. Gráfico de contorno y vectores: Caso 10 - 50Hz (Fase U) 174
Figura 183. Gráfico de contorno y vectores: Caso 10 - 50Hz (Fase V) 175
Figura 184. Gráfico de contorno y vectores: Caso 10 - 50Hz (Fase W) 175
Figura 185. Gráfico contorno: Caso 1 - 50Hz (Vista superior)176
Figura 186. Gráfico contorno: Caso 1 - 30Hz (Vista superior)177
Figura 187. Gráfico contorno: Caso 1 - 10Hz (Vista superior)177
Figura 188. Gráfico contorno: Caso 5 - 50Hz (Vista superior) 177
Figura 189. Gráfico contorno: Caso 10 - 50Hz (Vista superior) 178
Figura 190. Gráfico contorno: Caso 1 - 50Hz (Estator)
Figura 191. Gráfico contorno: Caso 1 - 30Hz (Estator)
Figura 192. Gráfico contorno: Caso 1 - 10Hz (Estator) 179
Figura 193. Gráfico contorno: Caso 1 - 50Hz (Jaula) 180
Figura 194. Gráfico contorno: Caso 1 - 30Hz (Jaula)180

Figura 195. Gráfico contorno: Caso 1 - 10Hz (Jaula) 180
Figura 196. Gráfico contorno: Caso 1 (Bobinado del estator) 181
Figura 197. Gráfico contorno: Caso 5 - 50Hz (Estator) 181
Figura 198. Gráfico contorno: Caso 5 - 50Hz (Jaula)181
Figura 199. Gráfico contorno: Caso 5 (Bobinado del estator) 182
Figura 200. Gráfico contorno: Caso 10 - 50Hz (Estator) 182
Figura 201. Gráfico contorno: Caso 10 - 50Hz (Jaula) 182
Figura 202. Gráfico contorno: Caso 10 (Bobinado del estator) 183
Figura 203. Gráfico Pérdidas Joule-Frecuencia: Caso 1
Figura 204. Gráfico Pérdidas Joule-Frecuencia: Caso 2
Figura 205. Gráfico Pérdidas Joule-Frecuencia: Caso 3
Figura 206. Gráfico Inductancia bobinado-Frecuencia: Caso 1
Figura 207. Gráfico Inductancia bobinado-Frecuencia: Caso 2
Figura 208. Gráfico Inductancia bobinado-Frecuencia: Caso 3
Figura 209. Gráfico par vs. frecuencia Todos los casos (Bloque rotor) 195
Figura 210. Gráfica de densidad de corriente: Caso 1 (Jaula) 198
Figura 211. Gráfica de densidad de corriente: Caso 2 (Jaula) 199
Figura 212. Gráfica de densidad de corriente: Caso 3 (Jaula) 201
Figura 213. Flujo magnético Caso 1 (Cara del Estator y cara del rotor) 203
Figura 214. Flujo magnético Caso 2 (Cara del Estator y cara del rotor) 205
Figura 215. Flujo magnético Caso 3 (Cara del Estator y cara del rotor) 207
Figura 216. Gráfica contorno: Caso 1 (Step 7) (Estator) 211
Figura 217. Gráfica contorno: Caso 1 (Step 11) (Estator) 211
Figura 218. Gráfica contorno: Caso 1 (Step 15) (Estator) 211
Figura 219. Gráfica contorno: Caso 1 (Step 19) (Estator) 212
Figura 220. Gráfica contorno: Caso 1 (Step 22) (Estator) 212
Figura 221. Gráfica contorno: Caso 2 (Step 7) (Estator)
Figura 222. Gráfica contorno: Caso 2 (Step 11) (Estator) 213
Figura 223. Gráfica contorno: Caso 2 (Step 15) (Estator) 213
Figura 224. Gráfica contorno: Caso 2 (Step 19) (Estator) 213
Figura 225. Gráfica contorno: Caso 2 (Step 22) (Estator) 214
Figura 226. Gráfica contorno: Caso 7 (Step 7) (Estator)
Figura 227. Gráfica contorno: Caso 7 (Step 11) (Estator)

Figura 228. Gráfica contorno: Caso 7 (Step 15) (Estator) 215
Figura 229. Gráfica contorno: Caso 7 (Step 19) (Estator) 215
Figura 230. Gráfica contorno: Caso 7 (Step 22) (Estator) 215
Figura 231. Gráfica contorno: Caso 7 (Step 7) (Estator)216
Figura 232. Gráfica contorno: Caso 7 (Step 11) (Estator) 216
Figura 233. Gráfica contorno: Caso 7 (Step 15) (Estator) 216
Figura 234. Gráfica contorno: Caso 7 (Step 19) (Estator) 217
Figura 235. Gráfica contorno: Caso 7 (Step 22) (Estator) 217
Figura 236. Gráfica contorno: Caso 10 (Step 7) (Estator)
Figura 237. Gráfica contorno: Caso 10 (Step 11) (Estator) 218
Figura 238. Gráfica contorno: Caso 10 (Step 15) (Estator) 218
Figura 239. Gráfica contorno: Caso 10 (Step 19) (Estator) 218
Figura 240. Gráfica contorno: Caso 10 (Step 22) (Estator) 219
Figura 241. Gráfico contorno: Caso 1 (Step 7 (izq.) y Step 22 (der.)) (Rotor) 219
Figura 242. Gráfico contorno: Caso 1 (Step 15) (Rotor)
Figura 243. Gráfico contorno: Caso 5 (Step 7 (izq.) y Step 22 (der.)) (Rotor) 220
Figura 244. Gráfico contorno: Caso 5 (Step 15) (Rotor)
Figura 245. Gráfico contorno: Caso 10 (Step 7 (izq.) y Step 22 (der.)) (Rotor) 221
Figura 246.Gráfico contorno: Caso 10 (Step 15) (Rotor)
Figura 247.Gráfico de vectores: Caso 5 (Step 15) (Estator+Rotor)
Figura 248. Gráfico de vectores: Caso 5 (Step 22) (Estator+Rotor)
Figura 249. Gráfico de vectores: Caso 10 (Step 15) (Estator+Rotor)
Figura 250. Gráfico de vectores: Caso 10 (Step 22) (Estator+Rotor)
Figura 251. Gráfico de vectores: Caso 10 (Step 15) (Estator- vista superior) 224
Figura 252. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 15) (Fase U) 225
Figura 253. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 15) (Fase V)
Figura 254. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 15) (Fase W)
Figura 255. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Fase U)
Figura 256. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Fase V)
Figura 257. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Fase W)
Figura 258. Gráfico contorno y vectores: Caso 10 (Step 15) (Fase U)
Figura 259. Gráfico contorno y vectores: Caso 10 (Step 15) (Fase V)
Figura 260. Gráfico contorno y vectores: Caso 10 (Step 15) (Fase W)

Figura 261. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 22) (Fase U)
Figura 262. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 22) (Fase V)230
Figura 263. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 22) (Fase W)230
Figura 264. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 22) (Fase U)
Figura 265. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 22) (Fase V)231
Figura 266. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 22) (Fase W)
Figura 267. Gráfico contorno y vectores: Caso 10 (Step 22) (Fase U)232
Figura 268. Gráfico contorno y vectores: Caso 10 (Step 22) (Fase V)
Figura 269. Gráfico contorno y vectores: Caso 10 (Step 22) (Fase W)233
Figura 270. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 15) (Jaula - vista en
perspectiva)235
Figura 271. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 22) (Jaula - vista en
perspectiva)235
Figura 272. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 15) (Jaula – vista posterior)
Figura 273. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 22) (Jaula – vista posterior)
200
Figura 274. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Jaula – vista en
Figura 274. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Jaula – vista en perspectiva)
Figura 274. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Jaula – vista en perspectiva)
Figura 274. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Jaula – vista en perspectiva)
Figura 274. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Jaula – vista en perspectiva)
Figura 274. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Jaula – vista en perspectiva)
Figura 274. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Jaula – vista en perspectiva)
Figura 274. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Jaula – vista en perspectiva)
Figura 274. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Jaula – vista en perspectiva)
Figura 274. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Jaula – vista en perspectiva)
Figura 274. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Jaula – vista en perspectiva)
Figura 274. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Jaula – vista en perspectiva)
Figura 274. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Jaula – vista en perspectiva)
Figura 274. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Jaula – vista en perspectiva)
Figura 274. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Jaula – vista en perspectiva)

ANEXO 1: Datos de partida obtenidos del ejemplo de JMAG-Designer

1 EJEMPLO ORIGINAL

El estudio de partida para este proyecto, tal y como se ha comentado, es un ejemplo resuelto del programa de estudios electromagnéticos JMAG-Designer, en concreto, *"63 - Analysis of Torque Characteristics of a Cage Induction Motor"*.

Este ejemplo, es un motor de inducción de jaula de ardilla, con el diseño que se observa en la figura [65]. En la tabla [2], definimos los datos geométricos de la máquina y en la tabla 2 los materiales.



Figura 65. Motor de inducción ejemplo de JMAG-Designer (Fuente: [8])

Tabla 2. Datos geométricos del ejemplo

PARTE	MEDIDA	VALOR
	Altura (mm)	108
Núcleo del estator	Anchura (mm)	108
(Stator core)	Espesor (mm)	42
	Nº de Ranuras	24
	Diámetro exterior (mm)	69.4
Núcleo del rotor	Diámetro interior (mm)	12
(Rotor core)	Espesor (mm)	42
	Nº de Ranuras	34
Jaula (Cage)	Sección anillos (mm ²)	17.8
	Diámetro exterior anillos (mm)	190.1

Página 87 de 267

Nuria Fernández Jorrín

Diseño de estator alternativo para motor asíncrono

Entrehierro Distancia entre rotor y estator (mm)		0.3
Bobinado del estator	Nº Fases	3
Motor completo	Nº de polos	4

Tabla 3. Materiales empleados en el ejemplo

PARTE	MATERIAL	PROPIEDAD	VALOR	
Estator	Material1	Curva B-H	Figura 66	
Bobinado del	Copper	Material de la	Material de la base de datos de	
estator	Сорреі	JMAG	JMAG-Designer	
Rotor	Material1	Curva B-H	Figura 66	
Jaula	Aluminium*	Conductividad Eléctrica	2.9841·10 ⁷ S/m	
Eje	Material1	Curva B-H	Figura 66	

(*) El Aluminio se toma tal y como viene en la base de datos del programa, pero se modifica la conductividad eléctrica.



Figura 66. Curva B-H de "Material1" (Fuente: [6])

De acuerdo al tipo de diseño que tiene el motor del ejemplo, este motor se estudia en 2D, ya que la distribución electromagnética que tiene lugar en la cara visible de la

[figura 65], es la misma a lo largo de todo el espesor, por lo que realmente, sólo se introduce el espesor para la realización de los cálculos.

Además, se reduce el análisis a 180° de la máquina, ya que los sentidos de las corrientes y camino del flujo magnético se repiten periódicamente. No se puede tomar una porción más pequeña, ya que geométricamente estamos limitados, es decir, si se dividiera la máquina en 4 partes de 90°, se estaría trabajando con la mitad de una ranura.



Figura 67. Geometría final estudiada en JMAG-Designer (Fuente: [6])

Este motor, ha sido estudiado mediante el método de elementos finitos, con el cual trabaja JMAG-Designer, y analizado magnéticamente en frecuencias, por lo tanto, en la tabla 4 se definen los datos de entrada del estudio.

Tabla 4. Valor de algunos parámetros de los materiales

PARTE	PARÁMETRO	VALOR
	Resistencia (Ω/fase)	2.92
Bobinado del estator	Nº Vueltas/fase/polo	66
	Tipo de conexión	Estrella y Serie
Jaula	Resistencia (Ω)	1.05·10 ⁻⁵
Fuente de alimentación	Amplitud Corriente (A)	Intervalo [1-10A]
de corriente	Secuencia de conmutación	Directa (U-W-V)

Este ejemplo, al estar diseñado en 2D, tiene una definición eléctrica en el programa especial, es decir, tal y como se observa en la [figura 67], no están representados los anillos de la jaula. El programa ofrece la posibilidad de definirlo en el circuito eléctrico mediante la macro "Cage" [figura 68], en la que introducimos el número de conductores y valor de resistencia que va a haber en la jaula. Con estos datos, el programa dibuja el equivalente eléctrico de la jaula [figura 68], dejándola definida por completo. No es la solución más precisa, pero permite estudiar la jaula al completo en casos 2D.



Figura 68. Circuito de la macro "Cage" (izq.) y circuito total del estudio (der.) (Fuente: [6])

En cuanto a las propiedades del estudio, este se ha realizado para diez amplitudes de corriente [1-10A], y cada uno de estos casos, para varias frecuencias (0.5, 5, 30 y 50Hz).

2 DATOS UTILIZADOS DEL EJEMPLO

Una vez definido el estudio tomado como base, se va a concretar los datos tenidos en cuenta para este proyecto.

 Tipo de estudio: Análisis electromagnético en frecuencia. El tipo de estudio se conserva, pero el caso de estudio de este proyecto se necesita estudiar en 3D, por lo que las características propias de 2D no son válidas.

- **Propiedades del estudio**: se conserva el número de casos a estudiar para cada valor de amplitud de corriente y distintas frecuencias.
- **Materiales:** se mantienen todos excepto el estator, que es la principal zona de trabajo de este proyecto, y, por lo tanto, la más modificada.
- Geometría: se han conservado:
 - Rotor y jaula: todas las medidas, pero adaptadas al nuevo diseño
 - Eje, entrehierro, nº de ranuras y nº de polos: se han conservado completamente

3 PROCEDIMIENTOS TOMADOS DE OTROS EJEMPLOS

El ejemplo que se ha comentado en los apartados anteriores, es del que se han extraído datos y la mayor parte de procedimientos, pero debido a que el estudio mencionado es 2D, se han necesitado consultar otros ejemplos como son: "195 - *Torque characteristics analysis of three-phase induction motors using 3D correcting function*" y "39 – *Torque analysis of three phase induction motors accounting for the skew*".

De estos dos ejemplos, se ha consultado el procedimiento para definir la jaula, ya que tal y como se ha comentado, el ejemplo anterior definía la jaula mediante una macro en el circuito exclusiva para 2D. En el caso de 3D, al mantenerse los anillos, no se necesita definir el valor de resistencia para el cálculo aproximado, ya que el programa puede obtener la información a partir de la geometría, a la cual, al ser asignada con un material, se ha especificado que se permitan corrientes parásitas.

ANEXO 2: Características de los softwares utilizados

1 CARACTERÍSTICAS SOLIDWORKS

Este software, ha sido facilitado por el departamento de ingeniería eléctrica y energética. En concreto, se trata del módulo geométrico CAD, ya que este mismo software tiene la posibilidad de simulaciones o diseños eléctricos.

Este software nos va a limitar el camino para diseñar la geometría, ya que la construcción de la geometría se debe llevar a cabo con las herramientas disponibles en el programa. Las herramientas utilizadas del programa son:

 Plano, croquis, línea: definición básica y necesaria para el posterior diseño en 3D. En esta fase, se definen los parámetros que tendrá el diseño, mediante la generación de cotas.



Figura 69. Herramientas para la generación de croquis (2D)

- *Extruir*: se parte de un croquis al que se indica una distancia de extrusión.
 Genera sólido en línea recta.
- Revolución: se parte de un croquis al que se le indica un eje de giro. Genera sólido cilíndrico.
- Recubrir: genera sólido a partir de varias secciones/croquis y las trayectorias que se quieran indicar. Esta herramienta se ha utilizado únicamente para el diseño de las cabezas de bobina del estator.



Figura 70. Herramientas para la generación y edición de sólidos (3D)

El procedimiento, a grandes rasgos, seguido en el programa ha sido:

- Generar cada pieza por separado:
 - Diseñar geometrías en 2D (croquis).

- Extruir, revolucionar o recubrir estos croquis, generando sólido 3D.
- Hacer agujeros o cortes de cualquier tipo.



Figura 71. Ejemplo con croquis inicial (izq.), extrusión posterior (centro) y recorte (der.)

- Generar el ensamblaje, restringiendo las posiciones de las piezas entre sí.
 - Se introducen las piezas individuales y se fija una (el resto van a referenciarse respecto de la fija).
 - Se seleccionan, cara, punto, línea, plano, de dos piezas y se les indica que restricción hay entre ellos. (Concéntricas, coincidentes, paralelas...)
 - Se restringen todas las piezas hasta que no se mueva nada, eso significa que el ensamblaje está totalmente definido.



Figura 72. Ejemplo: Dos piezas construidas por separado



Figura 73. Ejemplo del proceso de restricción: concéntrica (izq.), paralela (centro), coincidente (der.)

2 CARACTERÍSTICAS JMAG-DESIGNER

Este software ha sido facilitado por el grupo de accionamientos y máquinas eléctricas. La versión completa del programa incluye: JMAG-VTB, JMAG-RT, JMAG-Express, JMAG-Designer. En este proyecto, sólo se ha utilizado el módulo JMAG-Designer, ya que es el programa principal. El resto son complementos o versiones del programa simplificadas.

2.1 TIPO DE ESTUDIO

Este programa, está definido para varios tipos de estudios dentro de la temática electromecánica, en concreto:

- Análisis magnético Análisis eléctrico
- Análisis térmico Análisis transformador
- Análisis estructural Análisis de estrés térmico

En el caso de este proyecto, el tipo de estudio que se realiza es magnético 3D, en concreto, análisis en frecuencias, ya que no interesa la información que pudiera aportar el transitorio, es decir, la variación con el tiempo. Se busca el resultado ya estabilizado para un cierto valor de frecuencia/as.

Análisis magnéticos (estáticos, transitorio, frecuencia): estudio basado en el efecto del campo magnético, llevado a cabo mediante el método de elementos finitos (MEF).

- *Estático*: se emplea cuando el estudio no tiene como objetivo la variación en el tiempo, casos en los que este fenómeno no tiene influencia.
- *Transitorio*: caso opuesto al anterior, en este tipo de estudio, se busca el análisis de fenómenos que varían en el tiempo.
- *Frecuencia*: se utiliza para estudios que sufren la acción de una corriente o voltaje que varía sinusoidalmente con el tiempo para una frecuencia concreta.

2.2 PROPIEDADES DEL ESTUDIO

Las opciones del estudio magnético en frecuencia, se definen dentro de la misma ventana, la cual tiene distintos apartados y son los siguientes:

Frequency control: hay varias opciones para definir los intervalos o número de puntos que se van a estudiar. En todos los casos aparece el parámetro step:

 Step, es la cantidad total de puntos que se van a estudiar con la frecuencia que le corresponda a cada punto. Puede haber varias divisiones para la misma frecuencia.

En este apartado, además, se puede definir el método para indicar estas frecuencias.

- Intervalo de frecuencia: se emplea cuando se quiere indicar una secuencia de frecuencias que incrementan su valor una cantidad constante a lo largo de los steps. Los datos de entrada son la frecuencia del primer step y el incremento.
- Intervalos regulares: es igual que el método anterior, pero en este caso se introduce como dato la frecuencia del step inicial y final, y de las divisiones. De esta manera el programa calcula automáticamente el valor de frecuencia que debe aumentar entre steps.
- Secuencia de puntos de frecuencia: se emplea cuando no hay una relación de la cantidad que aumenta la frecuencia a lo largo de los steps. Los datos se introducen mediante una tabla.
- Intervalos regulares por sección: se emplea cuando se quiere dividir el total de steps en varios intervalos con una frecuencia concreta cada uno. Los datos se introducen mediante una tabla y se especifica las divisiones que va a tener el intervalo y la frecuencia que se estudia.
- Secuencia de tiempo frente a frecuencia: este método se utiliza en estudios dobles (magnético y térmico).

Para el caso de estudio de este proyecto, se ha empleado el método de intervalos regulares por sección, ya que se busca estudiar varias frecuencias para un número de divisiones distinto cada una.



Figura 74. Ventana de definición del control de frecuencia

Conversión: La condición de periodicidad se define en el apartado "*Condiciones*", y expresa la porción de modelo que se está estudiando. En esta ventana se indica el valor por defecto, pero también permite indicar otro valor de periodicidad.

En el estudio de este proyecto, se busca trabajar con la mínima porción de máquina posible, por lo que es importante este apartado en el que se indica que porción de la máquina se ha indicado al programa que tiene que computar.

Full Model Conversion		Parallel Computing Settings	
Convert to Full Model Values		🔿 Do Not Use	
Conversion Factor:		● Shared Memory Multiprocessing (SMP) Degree of Parallelism: 8 ▼	
Periodic Boundary: 16		O Massively Parallel Processing (MPP) Degree of Parallelism: 16 🜩	
Other than Periodic Boundary: 1		Use GPU	

Figura 75. Ventana de definición: conversión al modelo completo (izq.) y paralelismo en la computación (der.)

Paralelismo: Las opciones de computación del programa son varias. Se puede utilizar, mediante una licencia aparte, varios núcleos que trabajen en paralelo o utilizar varios ordenadores a la vez que se repartan la carga de computación. También se puede usar como apoyo la unidad de procesamiento gráfico del ordenador.

ICCG: En este apartado, se puede seleccionar el número de iteraciones para el método o la tolerancia en la convergencia.

No lineal: En este apartado, se configura la parte del cálculo no lineal. Este apartado es muy importante si hubiera elementos no lineales en la máquina (diodos). En este caso, debería escogerse "*Not used*" en el método.

En el caso de este proyecto, no hay elementos no lineales, por lo que se mantendrá la configuración por defecto. También se trabaja con la configuración por defecto en las iteraciones lineales "*ICCG*".

2.3 DEFINICIÓN Y ASIGNACIÓN DE MATERIALES

El programa contiene una biblioteca de materiales de varios tipos y marcas (*soft magnetic material, permanent magnet, ambient, conductor, insulation*) pero en el caso de que se necesite crear un material con unas características concretas se define de la siguiente manera:

Propiedades magnéticas: hay varios tipos de materiales magnéticos que se pueden generar.

 Soft magnetic material, este es el tipo de material que, si se le retira el campo después de haber sido magnetizado, pierde fácilmente la magnetización. Se puede configurar indicando el tipo de anisotropía (isótropo o anisótropo) o las propiedades magnéticas (lineal/ dependiente de la temperatura, o mediante curvas B-H, B-M).

Magnetic Properties	Electric Properties	Mechanical Properties	Thermal Pro 🔹	
Material Type: Soft M	Material Type: Soft Magnetic Material			
Anisotropy Type:	Isotropic		•	
Magnetic Property	Type: Linear(Cons	tant)	•	
Relative Permeability: Real Part: 1				
	Imaginary Part:		0	
Hysteresis Curve: Un	titled		2	
Note : Sets consider Hysteresis curve in the magnetic field analysis and iron loss analysis.				

Figura 76. Configuración de propiedades magnéticas

 Permanent Magnet, corresponde al tipo de material magnético que una vez magnetizado es difícil de magnetizar, incluso aunque se empleen campos en sentido opuesto. Se define cuando se buscan propiedades magnéticas lineales o no lineales, mediante la permeabilidad relativa o una tabla de valores. - *Magnetization*, se indica el tipo inicial de magnetización (lineal o no lineal) y la permeabilidad relativa. Lo mismo con la desmagnetización.

Propiedades eléctricas: se indica el valor de conductividad o resistividad, indicando si es contante o dependiente de la temperatura. También se puede especificar la permitividad, en caso de tener los datos.

Magnetic Properties	Electric Properties	Mechanical Properties	Thermal Pro 🔩
	Conduc	ctivity	
Conductivity Type: R	lesistivity		•
Constant			
			0 ohm m 🔻
O Temperature [Dependent		
Untitled			P
Electric Field D	ependency		
Untitled			2
Frequency De	pendency		
Untitled			2
	Permit	tivity	
Permittivity Type: Co	onstant		•
Real Part:			1
Imaginary Part:			0

Figura 77. Configuración de las propiedades eléctricas

Propiedades mecánicas y térmicas: en este proyecto no se definen ya que se busca un estudio electromagnético.

Pérdidas: hay varias opciones para definir pérdidas en el caso que se quieran incluir, siendo isótropas o anisótropas.

- Ecuación de las pérdidas en el hierro: en este caso, las pérdidas se definen mediante una ecuación, y los datos que se deben introducir son las constantes de esa ecuación.
- Tabla de histéresis/ pérdidas de Joule: las pérdidas se definen mediante una tabla de datos de histéresis o de pérdidas de Joule.
- *Tabla de pérdidas en el hierro*: al igual que el caso anterior, mediante una tabla de valores de pérdidas en el hierro, se definen las pérdidas.

Loss Type:	Iron Loss Equation	•
	No Loss	
Anisotro	Iron Loss Equation	
Loss Equatio	Tron Loss Table	
LOSS Equate	$W = K_h B^{\alpha} f^{\beta} + K_e B^{\gamma} f^{\delta}$	
Кл: 🔘	Constant 1 O Table	Edit
К.: 🔘	Constant 1 O Table	Edit
a: 🔘	Constant 2 O Table	Edit
β: 🔘	Constant 1 O Table	Edit
ү: 🔘	Constant 2 O Table	Edit
δ: 🔘	Constant 2 Cable	Edit
Resi	idual Strain Loss Correction (Edge / Face) Untitled	P
Resi	idual Strain Hysteresis Loss Correction (Region) Untitled	P
Dec	ay Constant β:	0

Figura 78. Configuración de las pérdidas

Definir material a una parte: Si se quiere que una pieza del modelo tenga un material concreto (creado o de la biblioteca del programa), basta con pinchar en el nombre de la lista de materiales y arrastrar hasta la pieza. Una vez se suelta, aparece una nueva ventana de configuración. En este nuevo apartado, se define una configuración más concreta de esa pieza, como puede ser un porcentaje de laminación o la existencia de corrientes parásitas.

En este proyecto, se ha utilizado materiales de la biblioteca y materiales creados nuevos, debido al uso de material de grano orienta, el cual no se encuentra en la biblioteca del programa.

2.4 AÑADIR CIRCUITO ELÉCTRICO

Este programa, incluye la posibilidad de añadir un circuito eléctrico, en el cual se indica mediante símbolos, los datos de propiedades y configuración eléctrica que tiene las piezas del modelo geométrico.



2.5 CONDICIONES

El programa tiene varios tipos de condiciones agrupados por temática. Se van a comentar los grupos utilizados para este proyecto.

Boundary, este grupo recoge las condiciones de tipo frontera:

- Rotación/ traslación periódica: se utiliza en estudios en los que no se trabaja con la geometría completa, sino que se trabaja con una porción. Se indica la cara o plano por el que se ha hecho el corte de la figura, y se indica el tipo de periodicidad en la dirección de rotación/traslación.
- Simetría/Natural: este tipo de condición se impone en planos en los que se quiere indicar la dirección que siguen las líneas de flujo magnético. En el caso de "simetría", el campo es perpendicular al plano indicado, y en "natural", el campo es paralelo.

Corriente, este grupo recoge las condiciones que asocian la partes/piezas de la geometría con el circuito.

FEM Coil/Conductor, tal y como se ha indicado, se imponen a una pieza de la geometría y se escoge el elemento del circuito con el que se quiere asociar. Además, es necesario indicar la dirección de la corriente. En el caso de FEM Coil, cuando se define el elemento en el circuito, se pueden aportar datos de número de vuelta, resistencia e inductancia. En el caso de FEM Conductor, no se indica ningún valor, ya que el propio programa realiza los cálculos con los datos que se tengan del material y de la geometría.



Figura 80. Grupos de condiciones "Boundary" y "Current"

2.6 MALLA

A la hora de realizar el mallado hay varias opciones, principalmente se definen unos ajustes generales, y posteriormente se puede definir de forma más concreta con otras herramientas.

Basic settings/ Configuración básica, en este apartado se definen las características de la malla que definirán sus bases.

- Mesh type/ Tipo de malla: hay tres tipos de malla que se pueden utilizar dependiendo de las características del estudio.
 - <u>Standard Meshing</u>, es un tipo de malla genérico, hace un bloque de malla cúbico. Para evitar estudiar elementos innecesarios, se definen condiciones "boundary", las cuales acotan la zona de mallado, y, por lo tanto, reducen el tiempo de computación.
 - <u>Slide Mesh</u>, esta malla se adapta a la condición de movimiento (rotación o traslación), teniendo en cuenta las zonas fijas, móviles y el entrehierro entre ellas. En este entrehierro, crea una malla más fina que se configura en el apartado "*Slide Division*". Además, genera la condición "*Slide*".
 - <u>Generate Mesh at Each Step</u>, es un tipo de malla parcheada, que se utiliza para modelos en los que hay rotación y traslación. Genera la malla en cada step teniendo en cuenta la posición del estator y de la parte móvil.
- Generation Method/ Método de generación, hay varios métodos que podemos utilizar:
 - <u>Auto mesh</u>, genera la malla teniendo en cuenta la geometría del modelo.
 Se genera una malla más fina en las zonas en las cuales, con las especificaciones básicas no es suficiente.
 - <u>Semi auto mesh</u>, genera una malla basta inicialmente con el tamaño de elementos que se le ha indicado, y reduce el tamaño en las zonas que sea necesario. Este método es más rápido que el anterior.

- <u>Extruded Mesh</u>, genera la malla a partir de elementos en 2D extruidos, resultando en prismas. Se utiliza para modelos con una geometría uniforme en la dirección que se pretende extruir.
- Air Region/ Región de aire, en este apartado se define cuanto porcentaje, en la dirección del eje y en dirección radial, se quiere de malla generada. El porcentaje se coge en referencia a la medida que ya tiene la figura en esas direcciones. Alguna de estas medidas, como el caso de la dirección del eje, queda definida si ya se ha definido la condición de simetría. No se puede utilizar sólo la medida del modelo, el mínimo porcentaje es 1.05, un 5% más que el tamaño de la figura en esa dirección.

Element Size, en este apartado se define el tamaño genérico de los elementos, de las zonas con material del modelo y las zonas vacías en donde irá el aire. Este tamaño de elemento se toma inicialmente, pero si se define mediante otras opciones con otros tamaños, se utilizan los definidos en ese otro apartado.

Slide Division, sólo aparece si se ha seleccionado el tipo de malla "Slide Mesh". Esto corresponde a la configuración de la malla que se genera entre la parte móvil y la fija (entrehierro). En el estudio de este proyecto no se ha utilizado condición de movimiento y por lo tanto no hay opción de generar esta malla.

Solid Modification, se puede seleccionar el tipo de tolerancia que se quiere que tenga la malla cuando se forma, en cuanto a reconocimiento de contacto de caras. Esto puede ser automático, estricto o tolerante.

Hay otras opciones para definir partes concretas o tipos de malla concretos, a continuación, se comenta un tipo de definición más concreta utilizado en este estudio:

Add size control, en este apartado, se indica el tamaño de elemento que se quiere dar a una pieza de la figura tomando un punto, una cara, un borde o la pieza entera. De acuerdo a lo que se haya elegido, la malla será más fina en la cara/vértice/borde.

2.7 RESULTADOS

A la hora de presentar los resultados, JMAG-Designer tiene varias opciones:

Graphs, corresponde a las gráficas y tablas de resultados de un estudio. De acuerdo a los datos que se hayan seleccionado en el apartado "*Output*" de propiedades, habrá más o menos datos calculados.

Contour, Vector, flux line Plot, estas tres opciones, se ven representadas sobre la figura, mediante colores (tonalidades desde rojo a azul), flechas y líneas. Algunos de los datos que se pueden representar son: densidad de flujo magnético, fuerza del campo magnético, magnetización, densidad de corriente y densidad de la fuerza de Lorentz.

Reponse Graph:

- Response table, se obtiene una tabla con todos los resultados obtenidos de la computación para cada caso. Estos datos se pueden exportar a un archivo Excel.
- *Correlation,* este es un tipo de gráfico en el cual se puede comparar la importancia de cada parámetro sobre el resultado final de una optimización.
- *Response Graph*, aparecen las gráficas de las expresiones que se han utilizado en función de un parámetro variable.
- Create expression, en este apartado, podemos crear una expresión incluyendo parámetros. Estas expresiones, se pueden generar en la tabla de opciones de la optimización o aquí.

ANEXO 3: Adaptaciones de la geometría al grano orientado

1 DISEÑO DEL ESTATOR

1.1 MATERIALES MAGNÉTICOS

En función del comportamiento que presenten los materiales ante un campo magnético excitador, se clasifican en:

Diamagnéticos, este tipo de material no sufre apenas variación por la acción del campo magnético, la débil magnetización que sufre, es en dirección opuesta al campo magnético de excitación.

Paramagnéticos, este caso, es igual que el anterior, pero en este caso, la magnetización que sufre es en la misma dirección que el campo magnético de excitación.

Los dos materiales anteriores, no tiene un interés práctico en el diseño de máquinas eléctricas, cuando se encuentran en una máquina, están magnéticamente inactivos.

Ferromagnéticos, este tipo de material, los momentos magnéticos se alinea con el campo magnético excitador en igual dirección y sentido, esto provoca que haya una distensión muy fuerte en las líneas de flujo magnético del campo excitador. Este tipo de materiales, mantienen la magnetización durante un tiempo, una vez se les ha retirado el campo excitador. Estos materiales se caracterizan por una permeabilidad mayor a la del vacío.

Los materiales ferromagnéticos metálicos se clasifican en dos grupos:

- Duros, son los tipos de materiales que encontramos en imanes permanentes, ya que conservan una gran cantidad de campo magnético cuando se les retira el campo excitador externo.
- Blandos, este tipo conserva menor cantidad de campo magnético al retirar el campo excitador, debido a su fácil manipulación magnéticamente y las bajas pérdidas, es el más utilizado para la fabricación de chapas magnéticas.

Ferrimagnéticos o ferritas, son materiales similares a los ferromagnéticos, pero son de tipo óxido, lo que implica una menor conductividad eléctrica.

1.2 CHAPAS DE GRANO ORIENTADO

Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, los materiales magnéticos blandos se emplean mayoritariamente para la construcción de chapas magnéticas. Estas se pueden clasificar en:

Chapas de grano no orientado o isótropas, este tipo de chapas se fabrican con acero al silicio, pero con una composición de silicio más variable. No hay una dirección preferente para el campo magnético, las propiedades magnéticas en todas las direcciones son muy similares. Se emplea en máquinas de las que no se conoce con exactitud la distribución del campo magnético, por lo tanto, se suele emplear en máquinas rotativas.

Chapas de grano orientado o anisótropas, estas chapas suelen ser de acero al silicio al 3%, y se fabrican mediante una laminación en frío. Inicialmente, se lamina en caliente hasta un espesor aproximado de 2.5mm, seguido, se laminan en frio para reducir el espesor a 0.8mm, y, por último, tras un recocido, se vuelven a laminar en frio hasta alcanzar espesores de 0.35mm. El material magnético está formado por cristales, los cuales, al sufrir la laminación en frio adquieren una dirección, que será la dirección con preferencia magnética. Al tener una dirección predefinida, este material es idóneo para máquinas en las que conocemos de forma concreta que camino magnético va a haber. Además, al haber un mayor aprovechamiento magnético, permite construir núcleos de menor tamaño. Debido a sus características, las aplicaciones más comunes son los trasformadores eléctricos.

En la máquina que estudia este proyecto, se ha empleado material de grano orientado para el núcleo del estator. Para el rotor, en cambio, se ha empleado un material de grano no orientado.

Tal y como se ha comentado, el uso del material de grano orientado, no está enfocado para máquinas de tipo rotativo, pero la posibilidad de emplear este tipo de material mejoraría la magnetización, consiguiendo que haya menos líneas de flujo magnético que se salgan de la distribución magnética de la máquina a estudiar.
1.3 CAMPO BIDIRECCIONAL RADIAL-AXIAL Y COLOCACIÓN DE CHAPAS

Normalmente, para generar los estatores o rotores laminados, se colocan las chapas apiladas. De acuerdo al tipo de distribución de campo magnético que se busque, será necesario llevar a cabo un tipo de apilamiento u otro.

La máquina a estudiar tiene 4 polos, por lo que habrá dos polos sur y dos polos norte.



Figura 81. Representación de las líneas entrantes (polo norte) y salientes (polo sur)

En el caso de este proyecto, se busca que la distribución del campo magnético sea: en el rotor las líneas son radiales en cada polo, y circulares entre un polo y otro; en el entrehierro las líneas son radiales; en el estator las líneas llegan del entrehierro radiales, y al llegar a la parte superior de este, pasan a ser axiales. En este punto se habría llegado a la mitad, el resto del camino de vuelta al rotor sería igual.



Figura 82. Representación sobre el rotor y el estator de la distribución del campo magnético

Página 108 de 267

Conocida la distribución del campo magnético, ya se puede considerar el tipo de apilamiento que se necesita.

El tipo de apilamiento, va a consistir en colocar las chapas de grano orientado formando aproximadamente una sección con forma de "C". Para conseguir esta forma, será necesario hacer dos dobles en las láminas, generando toda una capa cilíndrica. Una vez se tienen todas las capas cilíndricas, se apilan las chapas, generando el estator.

1.4 RESTRICCIONES EN EL CÁLCULO DE LA FORMA DEL ESTATOR DE ACUERDO A LA COLOCACIÓN DE CHAPAS

Las chapas de grano orientado, tal y como se ha comentado, obligan a construir un estator que encauce el camino magnético. Para llevar a cabo este diseño, se han tenido en cuenta 2 diseños posibles.

Caso básico: inicialmente, si se piensa en como doblar las chapas de grano orientado de forma física, la opción más simple para diseñar el estator sería un solo pliegue, a 45°, dejando una forma triangular y manteniendo la misma anchura en toda la sección, lo que significa que sería la misma densidad de flujo en toda la geometría.

El hecho de que se mantenga constante el ancho en toda el área, se debe a tener en cuenta la realidad física, ya que, al doblar las chapas de grano orientado, no va a variar su espesor.



Página 109 de 267

El ancho de la sección, 21mm, se debe al tamaño del rotor que se va a utilizar. El valor proviene del ejemplo base de JMAG-Designer, tal y como se ha comentado en el Anexo 1.

La altura de la abertura, es una medida que no está subordinada a otro parámetro, únicamente tener en cuenta que el bobinado tenga espacio para pasar por el interior.

Caso avanzado: se va a tener una sección a cada lado, la cual respetará la medida de 21mm, pero también se le añadirá una sección superior. Esta nueva sección, no va a tener el mismo ancho que los extremos, sino que también se debe tener en cuenta la sección útil de acero en los extremos.

En los extremos tenemos las ranuras de las bobinas (aire) y las partes útiles para el paso del flujo magnético (acero). En cambio, en la sección superior sólo hay acero, es todo útil. Por lo tanto, a continuación, se va a hallar la relación aire-acero y con ello, las medidas que tendrá la sección del estator.

Para conocer el diseño, se van a hacer los cálculos basados en las relaciones que debe cumplir la geometría para que circule el mismo flujo en toda la sección. Estas relaciones se encuentran recogidas en [figura 84].



Figura 84. Sección del estator para el caso más avanzado

Siendo:

- B, ancho sección superior (mm)
- C, ancho sección extremos (mm)
- α , ángulo sección extremos con la horizontal (°)

x, fragmento cuyo valor es C-B (mm)

En primer lugar, se toma el triángulo de la [figura 84] cuyo cateto inferior es "x". Si el ángulo contiguo a "x" es " α ":

$$tg\alpha = \frac{B}{C - B} \tag{20}$$

En la ecuación anterior, hay dos variables, por lo que se tiene en cuenta la relación aire-acero que hay en la fracción que ocupa 1 polo.



Figura 85. Ranuras y acero del estator

Siendo:

A, arco de acero entre dos ranuras (mm)

a, arco de una ranura (mm)



Figura 86. Profundidad estator - sección superior chapas



Figura 87. Profundidad estator - sección extremos chapas

(21)

(22)

 $\acute{A}rea\ Superior = B \cdot P$

 $\acute{A}rea\ Extremos = C \cdot 3 \cdot A$

Se sabe que "P" va a equivaler a la suma de fragmento de aire más acero que hay en los extremos.

$$P = 3 \cdot (A + a) \tag{23}$$

Si se juntan las ecuaciones [21], [22] y [23] se obtiene:

$$B \cdot 3 \cdot (A+a) = C \cdot 3 \cdot A \tag{24}$$

Despejando "B" de la ecuación [24]:

$$B = \frac{C \cdot A}{(A+a)} \tag{25}$$

Sustituyendo [25] en [20]:

$$tg\alpha = \frac{A}{a} \tag{26}$$

Se obtiene que:

$0 < lpha < 45^{\circ}$	A < a
45°	A = a
$45^\circ < lpha < 90^\circ$	A > a

Viendo la tabla, se identifica que la zona en la que interesa trabajar, es la última. Esta zona es en la que se tiene menos aire que acero. Cuento más acero, más fragmento por el que puede pasar el flujo magnético.

1.5 CÁLCULO DE LA PERMEABILIDAD REALTIVA DEL EJE DIFÍCIL

El material empleado para las chapas de grano orientado tiene toda la información necesaria para rellenar los datos que requiere JMAG-Designer en su catálogo, excepto la permeabilidad relativa en el "*Hard Axis*" o eje difícil, el camino difícil para las líneas de campo magnético.



Calculo a 90°

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{13 \ kGausses}{10 \ oersted} = \frac{\frac{13}{10}T}{\frac{10}{0.01257}A/m} = \frac{1.3T}{795.54 \ A/m} = 0.001634$$

La relativa será:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_o} = \frac{0.001643}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 1307.46$$

1.6 CUESTIONES A TENER EN CUENTA EN LA CONSTRUCCIÓN DEL ESTATOR DE FORMA PRÁCTICA

El método de colocación de las chapas del estator es formar capas, una encima de otra, comenzando desde el diámetro interior del estator, hasta el exterior.

A la hora de llevar a cabo esta construcción en la realidad, se pretende tomar una lámina y enrollar en forma de espiral hasta formar todo el núcleo del estator. Esto provoca que se pierda longitud perimetral y anchura axial en cada vuelta espiral.

Para solucionar este problema constructivo, se podría diseñar la chapa de forma que vaya variando su anchura con cierto ángulo de inclinación.

```
Página 113 de 267
```

2 DEVANADO DEL ESTATOR

El hecho de utilizar las chapas de grano orientado, no sólo afecta al diseño del estator, ya que al modificar este, restringe el diseño del devanado. Teniendo en cuenta la geometría que va a tener el estator, se conoce que el bobinado va a pasar por dos ranuras distintas, es decir, el estator tiene forma de "C", por lo que será necesario conectar las fases de una mitad de la "C" y de la otra.

Para el diseño del devanado, se han tenido en cuenta dos opciones

Devanado 1: este diseño de bobinado tiene 7 conexiones laterales, 4 se colocarán en el interior del estator, y 3 que se unirán por el exterior de la geometría. Cada fase se llevará con un solo cableado, en serie. Por lo tanto, cada 3 ranuras, aparece la misma fase. Al ser un motor alimentado por una fuente trifásica, el bobinado real será la repetición del diseño de la [figura 88] 3 veces.



Figura 88. Representación del Devanado 1 para una fase

Devanado 2: este diseño de bobinado tiene 5 conexiones laterales, 1 se desarrollará por el interior del estator, y 3, al igual que el devanado anterior, se conectar por el exterior de la geometría. Este caso, también se elabora con un solo cableado. No se reparte la corriente de cada fase por varias ramas de cableado que circulan por distintas ranuras, como se observa en el diseño utilizado como base de JMAG-Designer. Al ser un motor alimentado por una fuente trifásica, el bobinado real será la repetición del diseño de la [figura 89] 3 veces.



Figura 89. Representación del Devanado 2 para una fase

3 RESTO DE PIEZAS AFECTADAS

Tal y como ha ocurrido con el devanado del núcleo del estator, otras partes de la máquina se ven afectadas por los cambios que impone le estator:

Rotor: el estator está diseñado en forma de "C" para encauzar el flujo que le llega por una rama de la "C" y sale por la otra rama. Esto, junto con el diseño del bobinado, hace que se necesite trabajar con flujos distintos, y, por lo tanto, utilizar dos rotores, uno para cada rama del estator. De esta manera, se aprovecha sólo la zona útil de paso de flujo para que se enfrente al rotor, ya que, el espacio de aire del centro del estator, por el que circulan las ramas del bobinado, no tiene efecto sobre el rotor. Es decir, si se colocara un rotor que abarcara todo el estator, no se estaría aprovechando todo el material.



Figura 90. Vista de sección del estator con los 2 rotores

Página 115 de 267

Jaula: debido a la configuración de los dos rotores, es necesario adaptar la jaula. Las opciones son, utilizar una sola jaula para ambos rotores, dejándolos de esta manera unidos, o utilizar una jaula individual para cada rotor.

ANEXO 4: Generación de las piezas del primer modelo en SolidWorks

1 ESTATOR

Se ha partido de un croquis en el cual se ha dibujado la sección que se busca en el estator. En este primer caso se ha probado con la sección más básica que cumpla las condiciones de mismo ancho, y, por lo tanto, misma densidad de flujo magnético circulando.



Figura 91. Croquis del estator en SW (izq.) y croquis de ranuras (der.)

Esta sección, se revoluciona respecto al eje horizontal que se ve en la [figura 91]. Una vez se tiene el sólido, se dibuja el croquis correspondiente a las ranuras sobre el sólido generado y se extruye quitando material. El resultado, es un estator con dos tramos de ranura separados.



Figura 92. Estator final

En este primer modelo, para el diseño de las ranuras no se ha tenido en cuenta la forma de las originales, ya que es más sencillo trabajar con esta sección. A pesar de ello, se ha tenido en cuenta el valor de área utilizado en el caso de ejemplo, pero

adaptado a este proyecto. La diferencia entre este diseño y el tomado como referencia, es el uso de diferentes ranuras por fase, es decir, el ejemplo de JMAG-Designer emplea pares de ranuras para el paso de cada fase, mientras que el caso de este proyecto, utiliza ranuras individuales. Esto implica que el área utilizado en este estudio sea el doble al tomado como base.

> Área modelo JMAG – Designer = 75,59mm² Área modelo alternativo $\approx 140mm^2$

Los valores y diseños de ambos casos no corresponden exactamente, porque el objetivo del estudio de este proyecto, no es obtener la misma máquina, los datos tomados del ejemplo de JMAG-Designer son una referencia inicial para el diseño.

2 ROTOR

Una vez tenemos diseñado el estator, se puede observar que la geometría correspondiente a rotor que propone el ejemplo de JMAG-Designer, ya no vale. Por lo que este primer rotor se ha diseñado pensando en que cumpla la función de adaptarse al camino de flujo magnético que impone el estator.

En primer lugar, se ha dibujado el croquis del rotor [figura 93], con sus ranuras correspondientes y agujero para alojar el eje. Estas ranuras se han diseñado como el ejemplo base.



Figura 93. Croquis inicial del rotor

Tras el diseño en 2D, el croquis se ha extruido [figura 94] una distancia correspondiente a la máxima longitud del estator, para que el ancho total de la máquina sea el mismo en ambas piezas. Como el estator no es un bloque, sino que está dividido en dos partes separas en contacto con el rotor, este también se modifica para que tenga dos partes de rotor del mismo largo que las del estator.



Figura 94. Bloque rotor del mismo ancho que el estator (izq.) y bloque separado en dos por ranura central (der.)

Para diferenciar dos partes en el rotor, se dibuja un plano en la mitad del sólido y se dibuja el croquis correspondiente a la parte de material que se va a retirar. Una vez se dibuja, se extruye quitando ese material, resultando el diseño de [figura 94].

El tamaño de la ranura central se debe a que se va a alojar el anillo central de la jaula.

Tal y como se ha comentado en el estator, en el rotor también se ha tenido en cuenta el área de las ranuras del rotor del modelo tomado como referencia para este estudio.

> Área modelo JMAG – Designer = $16.9mm^2$ Área modelo alternativo $\approx 13mm^2$

En este caso, el área es el mismo para ambos estudios porque no se ha variado el número de ranuras. A pesar de ello, se puede observar que ni el diseño ni los valores de sección son exactamente los mismo. Esto se debe a que tal y como se ha comentado en el apartado del estator, no se pretende obtener la misma máquina, los datos tomados del ejemplo de JMAG-Designer son una referencia inicial para el diseño.

3 JAULA

Al igual que ha ocurrido con el rotor, el cual está supeditado al diseño del estator, la jaula también se ha diseñado de acuerdo a la forma del rotor donde se va a alojar.

Para comenzar su diseño, se parte de las ranuras dibujadas para el rotor [figura 95], las cuales se extruyen el espesor del rotor. Al conjunto de barras generado, se le extruye un anillo en los extremos. Una vez está diseñada la mitad de la jaula, se genera la jaula completa mediante simetría.



Figura 95. Barras y ranuras de media jaula (izq.) y jaula completa (der.)

ANEXO 5: Generación de las piezas del segundo modelo en SolidWorks

1 ESTATOR

En este segundo modelo, se ha seguido el mismo procedimiento que en el modelo anterior, se ha dibujado el croquis de la chapa y se ha revolucionado formando el bloque del estator macizo. Posteriormente se han dibujado las ranuras mediante otro croquis y se han extruido cortando el material sobrante.

Las modificaciones que incorpora este modelo, es la utilización de chapas de sección trapezoidal comentadas en el Anexo 3. Para conocer la inclinación que tendrá la forma trapezoidal de la chapa, es necesario plantear en primer lugar un tamaño de ranura, el cual proporcionará la relación acero-aire.

La otra modificación aplicada a este nuevo modelo, es la reducción del área de ranura a la mitad, respecto a la del modelo original. Esta reducción tiene el objetivo de conseguir más sección de material magnético útil para el paso de flujo magnético.

$$\acute{A}rea\ modelo\ JMAG - Designer = 75,59mm^2$$

$$\text{ Å} rea \ modelo \ alternativo} = \frac{75,59 mm^2}{2} = 37,8 mm^2$$

Se busca el ángulo que dé más acero que aire y que cumpla el área:

Para $\alpha = 76^{\circ}$, sustituimos los nuevos valores de ranura en la ecuación [26].

$$tg\alpha = \frac{A/R}{a/R} = 4 = \frac{\beta}{\gamma} = \frac{24^{\circ}}{6^{\circ}}$$



Figura 96. Ranura-acero

 $\acute{A}rea ranura = \acute{A}rea Bobina = 37,2mm^2$

Altura Ranura = 9mm

$$A = \beta * R = 24^{\circ} \cdot \frac{2\pi}{360^{\circ}} \cdot 35mm = 14,66mm$$

$$a = \gamma * R = 6^{\circ} \cdot \frac{2\pi}{360^{\circ}} \cdot 35mm = 3,67mm$$

Con la ecuación [25], se obtiene "B":

$$B = \frac{C \cdot A}{(A+a)} = \frac{21mm \cdot 14,66mm}{(14,66mm + 3,67mm)} = 16,8mm$$



Figura 97. Sección final de las chapas del estator

Incorporando estas nuevas modificaciones en el diseño del estator, se obtiene el estator de la [figura 98].



Figura 98. Medio estator

Página 124 de 267

2 ROTOR

En este modelo, el rotor en la máquina pasa a ser de una sola pieza a dos, es decir, se diseñan dos rotores iguales pero independientes, sin conexión entre ellos.



Figura 99. Rotores colocados en el ensamblaje total de la máquina (izq.) y sección final de ranura del rotor (der.)

De esta manera, se consigue un ahorro de material, ya que el fragmento intermedio que hay en el primer modelo, no está en contacto con el estator y por lo tanto no es de utilidad para el camino del flujo magnético de la máquina.

Tal y como ha ocurrido con el estator, en el rotor también se busca reducir el área de la ranura, en este caso también se va a reducir a la mitad.

$$\acute{A}rea modelo JMAG - Designer = 16,92mm^2$$

Área modelo alternativo =
$$\frac{16,92mm^2}{2} = 8,5mm^2$$

3 EJE

El diseño de esta pieza es exactamente igual que el del modelo de referencia, tiene la misma sección y la longitud total corresponde a la distancia de la cara externa del primer rotor, a la cara externa del segundo rotor. En primer lugar, se dibuja el croquis con la sección del eje, y seguido se extruye la longitud comentada.



Figura 100. Medio eje

4 BOBINADO ESTATOR

Para el diseño de esta pieza hay varias opciones de devanados, tal y como se comenta en el Anexo 3, devanado 1 y devanado 2. Finalmente, se tomó para este estudio el devanado 2.

El primer paso para generar esta pieza, es dibujar un croquis con el tamaño de las ranuras que tenga el estator. Posteriormente, se extruye la misma cantidad que la profundidad de la ranura del estator.



Figura 101. Bobinado que va por el interior de las ranuras y parte de las cabezas de bobinas

Una vez se tiene esta primera parte, se diseñan las cabezas de bobina. Para ello, se dibuja un croquis con rectángulos que representen las tres fases, a 3 alturas diferentes, y se extruyen [figura 101]. Seguido, se genera el resto de las cabezas de bobinas, para ellos se dibujan las 4 líneas correspondientes a la sección cuadrada, y mediante recubrimiento, se crea la conexión entre dos extremos, y con ello, la cabeza de bobina completa. Este procedimiento se lleva a cabo para las cabezas de bobinas de todas las fases [figura 102].



Figura 102. Proceso de generación de las cabezas de bobina (izq.) y resultado final (der.)

A continuación, se diseña la mitad de la conexión interior entre las fases, mediante el mismo procedimiento que las cabezas de bobina.



Figura 103. Proceso de generación de las conexiones internas entre fases (izq.) y resultado final (der.)

Por último, se hace simetría para obtener el bobinado completo.



Figura 104. Medio bobinado del estator

5 JAULA

El diseño de esta pieza para este segundo modelo, varía igual que el rotor, es decir, se pasa de tener una sola pieza, a tener dos jaulas separadas, una para cada rotor. El diseño es igual que el caso anterior, con la diferencia, al igual que el rotor, de la sección de los conductores de la jaula, que se ha reducido a la mitad.



Figura 105. Posición de las dos jaulas en el ensamblaje

ANEXO 6: Generación de las piezas del último modelo en SolidWorks

1 BOBINADO DEL ESTATOR

En cuanto al diseño en SolidWorks de este modelo, los pasos para generar la geometría son los mismos. Las variaciones en el diseño son, en primer lugar, reducir la sección de paso por las ranuras lo máximo posible, para ello, se acorta la sección hasta los salientes.



Figura 106. Salientes de las cabezas de bobinas en el modelo anterior (izq.) y en este nuevo modelo (der.)

La otra modificación, consiste en alargar el área de paso de la corriente en las cabezas de bobina y en el bobinado interior. Respecto al caso anterior, las cabezas de bobina duplican su sección, y el bobinado interior multiplica por cuatro su sección.



Figura 107. Cabezas de bobinas del modelo anterior (izq.) y del nuevo modelo (der.)

2 ESTATOR

Al modificar el bobinado interior, es decir, las conexiones entre fases en la zona interior del estator, el espacio de paso para este ya no es suficiente, lo que provoca que varíe la sección de chapa del estator.



Figura 108. Sección de chapa del estator en el modelo anterior (izq.) y en el modelo nuevo (der.)

3 JAULA

La variación que sufre la jaula respecto al modelo anterior, se debe a una modificación en las condiciones de trabajo del estudio en el programa electromagnético, por la cual, pasamos de trabajar con el motor completo en la dirección axial, a solamente la mitad. Para conseguir que las condiciones se impongan sobre todas las piezas, se alarga la jaula de ardilla, y, de esta manera quede un anillo en el centro igual que el de los laterales. Con esta nueva geometría, al cortar por la mitad la máquina, cortamos al anillo por la mitad.

La geometría resultante debido a estos cambios, es una única jaula para los dos rotores, con un anillo en el medio que diferencie las dos zonas de camino magnético, una en cada rotor.



Figura 109. Jaulas para el modelo anterior (izq.) y jaula para el modelo nuevo (der.)

Página 131 de 267

ANEXO 7: Fragmentación de las piezas en SolidWorks para el estudio en JMAG-Designer

1 ESTATOR

Una vez se ha escogido la geometría para enviar a JMAG-Designer y se trabaja en este, surgen problemas con la geometría, ya que el programa electromagnético tiene limitaciones a la hora aplicar condiciones a las piezas. Estas razones, son las que han hecho obligatorio el utilizar algunas piezas de la maquina divididas en varias partes.

El estator, se ha dividido en 3 partes. Esto se debe a que en este proyecto se ha utilizado material de grano orientado, en concreto, chapas, para el estator. Estas chapas marcas 3 direcciones de camino para la distribución magnética. Teniendo en cuanta que el software electromagnético no ofrece una posibilidad sencilla para definir las tres direcciones diferentes, ha sido necesario separar las tres partes de la pieza para tener las tres direcciones por separado.



Figura 110. Croquis de lámina del estator partida en 3 (izq.) y pieza lateral izquierdo del estator (der.)

2 BOBINADO DEL ESTATOR

El caso del devanado del estator, es el único en el cual no se ha partido la construcción en fragmentos en SolidWorks, sino que el propio software electromagnético ha detectado las tres fases del bobinado y las ofrece separadas en el panel del programa para trabajar.

Al trabajar con media máquina en la dirección axial, la definición de las corrientes en el bobinado es más sencilla. En el caso de que no se trabajara con esta partición de la máquina, sería necesario fragmentar el bobinado en las diferentes direcciones de corriente que fueran necesarias. Tal y como se ha hecho en modelos geométricos intermedios, desarrollados entre los modelos primero, segundo y últimos de este proyecto, y que no han sido recogidos en este documento.



Figura 111. Las tres fases del bobinado del estator reconocidas en JMAG-Designer

3 EJE

En el caso del eje, la razón por la que se debe fragmentar, se debe, al igual que el estator, a una condición del estudio electromagnético. Esta condición se indica en la cara de la mitad de la máquina que queda al recortar radialmente. En esta cara, se especifica que una mitad de ella es igual que la otra, por lo que se necesita tener físicamente separadas las dos partes, y el punto de unión es el eje, por ello, se divide el eje a la mitad.



Figura 112. Pieza correspondiente a medio eje

ANEXO 8: Asignación de materiales a cada pieza en JMAG-Designer

1 ESTATOR

Como se ha comentado en el Anexo 7, esta pieza se encuentra en el programa de diseño dividida en dos partes: Estator superior y estator inferior.

A ambas piezas se las asigna el mismo material, en forma de chapas de grano orientado, cuyo nombre comercial es TRAN-COR H2 0.3mm. Los datos de perdidas, electricidad y magnetismo, se han obtenido del catálogo de este producto.

Una vez se asigna el material a la pieza correspondiente aparecen nuevas opciones, en el caso de este material, [figura 113]:

Laminated					Laminated			
	Magnetic Properties					Magnetic Properties		
Factor:		97.3	%		Factor:	97.3	3 %	
Saturation:		100	%		Saturation:	100) %	
	Electric Properties					Electric Properties		
Eddy Currents					Eddy Currents			
Allow Eddy Current 👻				Allow Eddy Current 👻				
In-Plane Direction				In-Plane Direction				
Use Material Resistivity 🔻			•		Use Material Resistivity 💌			
Value:	5	5e-07 oh	mm		Value:	5e-07 o	hm m	
Lamination Direction					Lamination Direction			
Electric Res	sistivity		-		Electric Res	sistivity	•	
Value:		460 oh	mm		Value:	460 o	hm m	
Insulation			Insulation					
	Direction					Direction		
, Cylindrical(Z-Theta)				Cylindrical(R-Theta)				

Figura 113. Opciones de material para estator superior (izq.) y estator lateral (der.)

En este nuevo apartado se detallan las propiedades de ese material concretas para cada pieza en la que se impone. En ambas piezas hay el mismo factor de laminado, ya que tienen el mismo número de chapas. Se escoge que tengan corrientes parásitas, de esta manera se puede definir una resistividad en la dirección paralela a la chapa y en la dirección perpendicular. En la dirección perpendicular o de laminación, se ha modificado el dato para que la resistividad fuera mucho mayor, tal y como correspondería a un aislante. En el caso de la dirección paralela, se mantiene el valor ya que es la resistividad correspondiente al material de la chapa.

La parte en la que difieren ambas piezas, y la razón por la que se han separado, es la configuración de dirección. En este caso, se refiere a dirección del eje fácil, difícil y dirección de laminación. El eje fácil, corresponde a la dirección preferente para que circule el campo magnético en las chapas, y difícil es la dirección perpendicular a esta y que corresponde al camino más difícil de tomar para el campo magnético. La dirección de laminación, es la dirección en la cual están apiladas las chapas.

Atendiendo a estas opciones, cada parte del estator tiene la configuración correspondiente:

Estator superior, en el caso de esta pieza, si se mira la colocación de las chapas desde el eje Z, se observa de frente el canto de las láminas apiladas [figura 114], por lo que el eje Z es la dirección fácil. Y, por lo tanto, theta (θ) está en el plano perpendicular, eje difícil, y R la dirección de laminación de las chapas. Estos dos valores quedan definidos respecto a la posición de Z.

Estator lateral, en esta pieza, la dirección del campo magnético o fácil que se tiene realmente, es inclinada, no corresponde a una dirección cilíndrica o radial [figura 114], por lo que el programa no ofrece la posibilidad de indicar esta dirección de forma directa, sería necesario programar una subrutina para la dirección.

La solución que se ha adoptado, es tomar el caso de los que ofrece el programa que sea más similar al estudiado. Esta opción sería una dirección de eje fácil correspondiente a la dirección radial, eje R. Y, por lo tanto, Z está en la dirección perpendicular y corresponde a la dirección de laminación y theta (θ), está en el plano correspondiente a la lámina, pero indicando la dirección contraria, la difícil. Tanto Z como theta (θ), quedan definidos una vez se indica la dirección de R, ya que corresponden a un sistema cilíndrico.



Figura 114. Direcciones eje fácil, difícil y laminación de estator superior (izq.) y estator lateral (der.)



Figura 115. Direcciones fáciles reales que deberían tener las chapas

2 EJE Y ROTORES

En el caso de estas dos partes de la máquina, se mantiene el material utilizado por JMAG-Designer en el ejemplo comentado en el Anexo 1.

En cuanto a las propiedades que se definen una vez se asigna el material a la pieza, ninguna de las dos tiene una configuración extra.

3 JAULA

En la jaula de ardilla, el comportamiento de corrientes parásitas tiene gran influencia, y en el caso de este estudio es necesaria su definición, ya que es la única configuración de corriente relacionada con el circuito que se puede hacer. Se emplea el Aluminio recogido en la base de datos del programa, pero al configurar las opciones de material en cada pieza, se cambia el valor de resistividad por el definido en el ejemplo de JMAG-Designer del Anexo 1. También se selecciona la opción de permitir corrientes parásitas como se ha comentado en el párrafo anterior.

4 BOBINADO DEL ESTATOR

Las tres fases del devanado del estator (Fase U, V y W), emplea como material el cobre definido en la base de datos de JMAG-Designer. No se hace ninguna modificación en sus propiedades específicas para cada fase.



Figura 116. Piezas asignadas con Material1



Figura 117. Pieza asignada con Aluminio (izq.) y pieza asignada con Cobre (der.)

ANEXO 9: Asignación de condiciones y creación del circuito eléctrico en JMAG-Designer

1 CONDICIONES DE CONTORNO

Este tipo de condiciones que se definen en la creación del estudio electromagnético, se emplean cuando se quiere especificar las propiedades magnéticas y geométricas de ese plano. Se suele emplear cuando se estudia una porción de la máquina, y se quiere especificar como son las propiedades geométricas y magnéticas en el plano del corte. También sirven para definir por donde se va a generar la malla, ya que donde haya una condición de contorno terminará la malla, ahorrando carga de computación. Las condiciones de contorno empleadas en este estudio son:

Rotation periodic boundary/ Condición de rotación periódica, esta condición explicada en el Anexo 2, se ha empleado en el plano por el cual se ha cortado la pieza a 180°, en la dirección radial. Por lo tanto, los datos que se han especificado son: el tipo de periodicidad, en este caso es periódica cada 180°, es decir, los 180° que faltan tienen los mismos fenómenos electromagnéticos que la parte estudiada.

Natural Boundary/ Condición natural, esta condición explicada en el Anexo 2, se ha empleado en el plano por el cual se ha cortado la pieza a la mitad en la dirección axial. Este tipo de simetría se impone sobre una cara o plano, y corresponde a una corriente paralela a ese plano y un flujo magnético perpendicular.



Figura 118. Condición de periodicidad (izq.) y condición de simetría natural (der.)

2 CIRCUITO

Este grupo de opciones del programa, no está dentro del bloque de condiciones, y tampoco aparece directamente cuando se crea un estudio, es necesario generar un circuito para que aparezca este nuevo grupo. Se ha incluido en este Anexo ya que la definición del circuito va totalmente asociada a las condiciones que los asignan a la geometría.

En este caso, el circuito es sencillo, representa únicamente la fuente de corriente trifásica que alimenta al bobinado del estator, correspondiente a las 3 bobinas conectadas en estrella.



Figura 119. Circuito completo (izq.) y elementos dentro de la macro "Star connection" (der.)

3-Phase Power Supply/ Fuente de corriente trifásica, tiene la opción de definir el tipo de secuencia que se va a utilizar para las tres fases (U, V y W), en este caso se ha empleado directa (U, W y V), es decir, los vectores giran en sentido horario. También se puede especificar la amplitud, que en este estudio será tomado como parámetro y se le asignará un valor para cada caso, y la fase, que en este estudio se toma como cero. Estos valores son los que se sustituyen en las ecuaciones de la [figura 71], mediante las que se genera el valor de la corriente de cada fase para cada instante de tiempo.



Figura 120. Representación de los vectores de las corrientes de cada fase (izq.) y sus ecuaciones (der.)

Star connection/ Macro de conexión en estrella, este elemento corresponde a un grupo de tres bobinas, correspondientes a las tres fases U, V y W, las cuales están conectadas en estrella. En cada una de estas bobinas se puede especificar el número de vueltas, la resistencia contante o variable con la temperatura y la inductancia residual. En este estudio los datos introducidos son los mismos que el ejemplo de JMAG-Designer del Anexo 1: Vueltas=66, Resistencia=2.92 Ω , constante, e Inductancia residual=0H.

3 CONDICIONES DE CIRCUITO

Una vez se tiene definido el circuito, se asignan las condiciones correspondientes que asocian a la geometría con los elementos del circuito. En este estudio, sólo se ha empleado la condición FEM Coil para asociar las bobinas conectadas en estrella con las piezas del circuito "*FaseU*", "*FaseV*" y "*FaseW*". El procedimiento seguido ha sido, seleccionar a que fase del circuito va a pertenecer esa condición, poner un tic en la opción de densidad de corriente uniforme, seleccionar la pieza a la que se asigna la condición y, por último, la cara entrante de la corriente para indicar de esta manera la dirección que va a tener.

4 CONDICIONES DE RESULTADOS

Este tipo de condición, se añade a las condiciones del estudio para especificar unos resultados concretos que se quieran obtener en unas piezas indicadas. En esta simulación se han utilizado:
Force – Nodal Force/ Fuerza nodal, esta condición se asigna a las piezas del estudio con propiedades magnéticas, ya que calcula, a partir de la suma de la fuerza de cada nodo de la malla, la fuerza electromagnética total. En este caso se ha especificado al bloque rotor, compuesto por eje, rotor y jaula, que corresponde a la transmisión de la energía mecánica.

Torque - Nodal Force/ Par de fuerza nodal, esta condición es igual que la anterior, con la diferencia de que para calcular el par de cada elemento se necesita multiplicar por la distancia de este nodo al eje de giro. Por lo tanto, el resultado total es el par. En la simulación se ha seleccionado el mismo grupo de piezas que para la fuerza. El valor de par es el más importante, ya que da una referencia directa de la potencia de salida del motor.

Iron Loss Calculation/ Cálculo de las pérdidas en el hierro, esta condición es equivalente a seleccionar el tipo de estudio de pérdidas en el hierro, que estudia las pérdidas en una computación aparte, y se puede generar sobre un estudio que ya tenga resultados.

En el estudio de este proyecto se ha empleado la condición, en vez del estudio. Para asignar esta condición, es necesario que el material receptor de esta tenga datos de pérdidas entre las propiedades del material. En este proyecto se ha asignado la condición al estator, ya que es del único material que se conoce los datos de pérdidas.

ANEXO 10: Generación de la malla en JMAG-Designer

1 PROPIEDADES GENERALES

El software electromagnético JMAG-Designer basa sus estudios en el método de elementos finitos (MEF), por lo que la generación del mallado es un paso muy importante para obtener los resultados más precisos posibles. Además, con un mallado eficiente se puede conseguir reducir el gasto computacional.

La metodología de generación empieza por un bloque de opciones general de malla que aparecen en los diferentes estudios.

Tipo de malla, en este estudio se ha seleccionado un mallado estándar, ya que el estudio no tiene definida condición de movimiento, por lo que una malla que se desliza basada en el entrehierro no vale, y la generación para cada step no es la más apropiada para este estudio.

Método de generación y zona de aire, se ha seleccionado un mallado semiautomático para que la carga de computación no sea muy grande. En cuanto a la zona de aire, se limita para que sólo genera malla un 10% más que el tamaño de la pieza, ya que, no hay una cantidad muy grande de campo magnético que se salga de las piezas. Por lo tanto, con esa cantidad de malla extra será suficiente para recoger los fenómenos que se salgan de la máquina.

Tamaño de elemento, en este apartado se define el tamaño de cada elemento según si es material lo que se está mallando o aire. En este estudio se ha utilizado 4mm de tamaño genérico para el material, y 6mm para el aire.

A pesar de utilizar tamaños predefinidos para la generación de malla, al ser un proceso semi-automático, no se respeta el tamaño definido en toda la generación, ya que se adapta a las esquinas y contornos que necesiten un tamaño menor.

2 DEFINICIÓN DEL TAMAÑO DE ELEMENTO EXTRA

Aparte del mallado genérico, el software de simulación tiene otras posibilidades para hacer mallados más concretos, o para simplificar las geometrías para el mallado.

En este proyecto, se ha empleado la opción de especificar el tamaño de elemento concreto a una cara. Esto se ha utilizado ya que, la zona más delicada para el flujo magnético por donde circulan todas las líneas del estator al rotor, es el entrehierro, y esto necesita un tamaño de elemento más pequeño que resulte en mayor precisión. Las caras seleccionadas han sido el interior del estator y el exterior del rotor, incluido la superficie de la jaula en contacto con el entrehierro y la cara interior entre el estator superior e inferior donde cambia la dirección del camino magnético.

Se ha empleado un tamaño de elemento 0.8mm para las 4 caras.



Figura 121. Mallado en la cara externa del rotor (izq.) y en la cara interna del estator (der.)



Figura 122. Mallado cara en contacto con el entrehierro de la jaula (izq.) y cara entre estator superior y lateral (der.)

Además de esta modificación, se han añadido en las piezas completas, rotor y estator, un tamaño de elemento máximo de 2mm. En estas zonas también es importante un tamaño de elemento pequeño ya que son las partes que recogen el camino magnético.



Figura 123. Mallado en la parte del estator (izq.) y del rotor (der.)

Por lo tanto, el mallado resultante del modelo es:



Figura 124. Mallado completo del motor simulado

Página 148 de 267

ANEXO 11: Definición de las propiedades del estudio en JMAG-Designer

1 CONTROL DE FRECUENCIA

El bloque de propiedades del estudio, tiene un enfoque principalmente para configurar opciones de la computación, es decir, el número de iteraciones máximas para los cálculos lineales o no lineales, valores de tolerancia, etc. A parte de esto, la parte más importante es el apartado *"Frecuency"*, en el cual se va a definir el número de steps en los que se divide el estudio, y que valores de frecuencia se van a trabajar.

En el caso de este estudio, se ha empleado la metodología de datos por intervalos regulares. Una vez definido el número de steps, se define la cantidad de steps que queremos para cada frecuencia o intervalos de frecuencia. De esta manera se define uno de los datos de entrada más importantes en un análisis frecuencial, como son las frecuencias de estudio. La tabla de datos utilizada es la siguiente:

Type: Division vs Frequency									
	Frequency	Divisions	Maximum Nonlinear Iterations						
	Hz								
1	50	1	0						
2	30	4	0						
3	5	25	0						
4	0.5	1	0						

Figura 125. Valores de entrada de frecuencia para cada división

A partir de esta tabla, se pueden conocer las frecuencias que se han pedido al programa que estudie: 50, 45, 40, 35, 30-5 y 0.5Hz.

Se parte de 50Hz (1 división), después, desde 50Hz hasta 30Hz, dividir en 4 trozos (4 divisiones), los siguientes valores, desde 30Hz hasta 5Hz, dividir en 25 trozos, y por último, 0.5Hz (1 división).

2 CONVERSIÓN DEL MODELO COMPLETO

Este apartado es bastante importante para este estudio, ya que se define la porción de máquina con la que se está trabajando. Aparece el factor de conversión de la máquina mediante la condición de periodicidad, en este caso 2, ya que se trabaja con 180° de los 360°. Se define este valor de forma automática si se ha empleado la condición "*Rotation periodic boundary*" o "*Translation periodict boundary*".

3 OPCIONES DEL CIRCUITO

Este apartado, es similar al anterior, pero la información de periodicidad se emplea en el circuito eléctrico. Hay otras opciones de configurar o definir como es el circuito eléctrico, pero en este estudio se ha empleado la condición de periodicidad, y, por defecto, se emplea la opción asociada a esta condición.

Además de este dato, se especifica qué tipo de conexión hay entre las partes del circuito que hay representadas y las que faltan. En este estudio se ha escogido conexión en serie.

4 ICCG

En el apartado para configurar las cuestiones de computación para las iteraciones lineales, se ha seleccionado un método de cálculo diferente, ya que el método que viene seleccionado por defecto "*A Method*", no tiene en cuenta la opción de corrientes parásitas. Para que esto se tenga en cuenta, se ha seleccionado "*A-phi Method 1*".

5 CONTROL DE RESULTADOS

Dentro de la configuración de propiedades del estudio, hay un apartado para seleccionar los resultados que se quieren obtener tras la computación, y las piezas para las que se quieren los resultados.

En el estudio de este proyecto, se ha seleccionado que se computen todas las opciones para obtener todos los resultados. En este apartado no aparecen todas las posibilidades del programa, algunas opciones de "*Output*" se seleccionan mediante las condiciones, como se ha comentado en el Anexo 9.

6 GENERACIÓN DE LOS DIFERENTES CASOS

El programa de simulación, ofrece la posibilidad de tomar como parámetro casi todas las opciones y configuraciones del programa. Se puede trabajar con parámetros importados de SolidWorks, que corresponde a las medidas geométricas que hayamos acotado, y con los parámetros procedentes de las condiciones, los materiales, las propiedades del estudio, el mallado y el circuito eléctrico.

En esta simulación, se ha trabajado únicamente con el parámetro del circuito eléctrico de la fuente de corriente trifásica "*Amplitude*", el cual se ha renombrado como "*Amplitud*".

~	Circuit			
	✓ Three-phase Current Source	3-phase Power Supply		
	X-axis type		Flag	Time
	Amplitude	Amplitud	Real	1 A
	Frequency		Real	0 Hz
	Phase		Real	0 deg

Figura 126. Parámetro seleccionado para el estudio

Una vez seleccionado el parámetro se generan los casos que se van a estudiar, en este estudio se ha seleccionado un intervalo incremental desde 1A hasta 10A.

De esta manera, se generan 10 casos diferentes, que el software computa como 10 estudios distintos con la misma configuración de estudio, únicamente variando el parámetro seleccionado.

ANEXO 12: Resultados mediante gráficos de contorno y de vectores

1 INTRODUCCIÓN

Los resultados que se definen en este anexo, corresponden a datos diferentes, y se muestran de maneras distintas:

Gráficos de contorno, este tipo de gráficos representa los resultados sobre el modelo geométrico mediante un degradado de color, el cual se corresponde con la diferente intensidad del parámetro que se está mostrando. De acuerdo al valor más alto y más bajo de los resultados, genera una escala junto con los colores correspondientes. Los valores numéricos que se están representando en este gráfico, son valores eficaces, es decir, se representa la media cuadrática (RMS), el valor medio de todo el modelo, parte, línea, cara o punto que tengamos seleccionado.

Gráfico de vectores, este tipo de gráfico representa, al igual que el tipo anterior, los resultados sobre el modelo, pero, en este caso, mediante flechas de colores. Estos colores corresponden a la escala de degradado definida por el valor más alto y más bajo. Los valores numéricos que se representan en este gráfico mediante flechas, corresponden al valor de cada elemento del modelo. Este valor varía según se modifica el ángulo en la barra con el "*deslizador de fase*" [figura 127].

 1 1	1	I	1	1 1	I.	1	deg
					2		

Figura 127. Deslizador de fase / Phase slider

El ángulo que se modifica, corresponde a Φ en la ecuación de la [figura 128].

$$\omega t = \frac{\Phi \cdot \pi}{180^{\circ}} \tag{27}$$

$$F(\Phi) = A\{\cos(\Phi + \theta_0 - 90^\circ) + j\sin(\Phi + \theta_0 - 90^\circ)\}$$
$$= A\{\sin(\Phi + \theta_0) + j\sin(\Phi + \theta_0 - 90^\circ)\}$$

Figura 128. Ecuación que representa la oscilación de una onda sinusoidal (Fuente: Opción "Help" del programa JMAG-Designer)

El software recoge en sus tablas, por defecto, los valores correspondientes a $\Phi = 0 \text{ deg}$, y representa en el gráfico de vectores los valores reales.

En la simulación llevada a cabo para este proyecto, se ha empleado la misma escala de colores para los resultados de ambos tipos de gráficos, un degradado de color [figura x]. Tal y como se observa en la imagen, la escala va de valores pequeños con tonos fríos, hacia los valores más elevados en tonos cálidos.

En esta escala, también se ofrecen los datos de valor máximo y mínimo, que se indican en la figura mediante dos recuadros que señalan a los puntos correspondiente.



Figura 129. Ejemplo de representación de escala de color para los resultados de Densidad de corriente

2 GRÁFICAS DE CONTORNO Y VECTORES DENSIDAD DE CAMPO MAGNÉTICO

Caso 1: Se han tomado 3 de las frecuencias estudiadas 50, 30 y 10Hz para ver la diferencia de la densidad de campo magnético en el estator y el rotor, las partes de la máquina principales para la distribución magnética.

Tanto en los gráficos de contorno como los de vectores se observa como aumenta la densidad de flujo magnético, en las esquinas de las ranuras del estator donde se definen los dos polos magnéticos, cuando se disminuye la frecuencia.



Figura 130. Gráfico contorno: Caso 1 - 50Hz (Estator)



Figura 131. Gráfico contorno: Caso 1 - 50Hz (Rotor)

En el step para 50Hz la intensidad en esta zona de los polos para el estator está dentro del rango verde-azul, [0.3-0.5T], el rotor está en el rango verde-azul, [0.108-0.18T].



Figura 132. Gráfico contorno: Caso 1 - 30Hz (Estator)

Página 156 de 267



Figura 133. Gráfico contorno: Caso 1 - 30Hz (Rotor)

En el step para 30Hz la intensidad en los polos para el estator está dentro del rango verde-azul, [0.33-0.77T], el rotor está en el rango verde-azul, [0.12-0.28T].



Figura 134. Gráfico contorno: Caso 1 - 10Hz (Estator)



Figura 135. Gráfico contorno: Caso 1 - 10Hz (Rotor)

En el step para 10Hz la intensidad en los polos para el estator está dentro del rango verde-azul, [0.33-0.77T], el rotor está en el rango verde-azul, [0.165-0.385T].



Figura 136. Gráfico de vectores: Caso 1 - 50Hz



Figura 137. Gráfico de vectores: Caso 1 - 30Hz

En el rotor se puede observar con más claridad lo mucho que varía la densidad de flujo magnético para frecuencias menores.



Figura 138. Gráfico de vectores: Caso 1 - 50Hz (izq.) y Caso 1 – 10Hz (der.) (Rotor)

La densidad de flujo magnético del gráfico de vectores, está centrado en la cara, ya que es donde se ve más claramente la distribución, pero también se pueden ver los resultados centrados en la pieza. A pesar de ello, los resultados numéricos son los mismos, la diferencia es una cuestión de visualización de los resultados.



Figura 139. Gráfico de vectores: Caso 1 - 50Hz (Distribución en la pieza)

En cuanto a los vectores, se ve claramente el aumento de intensidad en las esquinas de las ranuras donde se encuentran los polos magnéticos, y en el entrehierro, en esta misma zona, donde se observa que ha disminuido la tonalidad de azul, implicando un aumento de densidad de campo magnético.

Dentro de los resultados de gráficas de vectores, al ser un tipo de resultado instantáneo, se puede ver la variación de las líneas del flujo cuando se modifica el ángulo de la función senoidal impuesta, comentada en la introducción de este anexo.



Figura 140. Gráfico de vectores: Caso 1 - 50Hz (Estator) para $\Phi = 90^{\circ}$

Al mover la fase 90°, se ha producido un cambio de posición de los polos, y con ellos las zonas más intensas del estator.

Caso 5: en este caso, al igual que el anterior, se sacarán resultados para varias frecuencias que den una idea de las variaciones que estas provocan.



Figura 141. Gráfico contorno: Caso 5 - 50Hz (Estator)



Figura 142. Gráfico contorno: Caso 5 - 25Hz (Estator)



Figura 143. Gráfico contorno: Caso 5 - 0.5Hz (Estator)

En este último caso, el valor máximo no tiene un valor mayor al caso anterior, pero la distribución general del flujo magnético sí que tiene un valor mayor. Los valores

máximos y mínimos son orientativos para la escala, pero no siempre son representativos del fenómeno general.





Figura 144. Gráfico contorno: Caso 5 - 50Hz (Rotor)



Figura 145. Gráfico contorno: Caso 5 - 25Hz (Rotor)



Figura 146. Gráfico contorno: Caso 5 - 0.5Hz (Rotor)



Figura 147. Gráfico de vectores: Caso 5 - 50Hz (Estator)



Figura 148. Gráfico de vectores: Caso 5 - 25Hz (Estator)



Figura 149. Gráfico de vectores: Caso 5 - 50Hz (izq.) y Caso 5 – 25Hz (der.) (Rotor)

Al igual que el Caso 1, la variación es la misma, aumenta la densidad de flujo magnético al aumentar la frecuencia y la intensidad es mayor en las esquinas de las ranuras colocadas en las posiciones de los polos.

Caso 10: en este caso, al igual que los anteriores, se sacarán resultados para varias frecuencias que den una idea de las variaciones que estas provocan.



Figura 150. Gráfico contorno: Caso 10 - 50Hz (Estator)



Figura 151. Gráfico contorno: Caso 10 - 30Hz (Estator)



Figura 152. Gráfico contorno: Caso 10 – 0.5Hz (Estator)

En este último caso, el valor máximo no tiene un valor mayor al caso anterior, pero la distribución general del flujo magnético sí que tiene un valor mayor. Los valores

máximos y mínimos son orientativos para la escala, pero no siempre son representativos del fenómeno general.



Figura 153. Gráfico contorno: Caso 10 - 50Hz (Rotor)



Figura 154. Gráfico contorno: Caso 10 - 30Hz (Rotor)



Figura 155. Gráfico contorno: Caso 10 - 0.5Hz (Rotor)



Figura 156. Gráfico de vectores: Caso 10 - 50Hz (Estator)



Figura 157. Gráfico de vectores: Caso 10 - 25Hz (Estator)



Figura 158. Gráfico de vectores: Caso 10 - 50Hz (izq.) y Caso 10 - 25Hz (der.) (Rotor)

Al igual que los casos anteriores, la variación es la misma, aumenta la densidad de flujo magnético al aumentar la frecuencia y la intensidad es mayor en las esquinas de las ranuras colocadas en las posiciones de los polos.

Restos de Casos (2,3,4,6,7): Vamos a mostrar los resultados anteriores, pero únicamente para la frecuencia 50Hz, para ver el rango de valor de densidad de flujo magnético para cada corriente.

Debido a problemas de convergencia en los estudios 8 y 9, estos no se incluyen entre los resultados mostrados para analizar.



Figura 159. Gráfico contorno: Caso 2 - 50Hz (Estator)



Figura 160. Gráfico contorno: Caso 3 - 50Hz (Estator)



Figura 161. Gráfico contorno: Caso 4 - 50Hz (Estator)

Página 166 de 267



Figura 162. Gráfico contorno: Caso 6 - 50Hz (Estator)





Maximum: 3.0604 Minimum: 0.0010

Figura 163. Gráfico contorno: Caso 7 - 50Hz (Estator)



Figura 164. Gráfico contorno: Caso 2 - 50Hz (Rotor)





Figura 165. Gráfico contorno: Caso 3 - 50Hz (Rotor)





Figura 166. Gráfico contorno: Caso 4 - 50Hz (Rotor)



Figura 167. Gráfico contorno: Caso 6 - 50Hz (Rotor)



Figura 168. Gráfico contorno: Caso 7 - 50Hz (Rotor)

Los resultados obtenidos de estos gráficos, tienen una mayor importancia cualitativa que cuantitativa, es decir, se ve sobre la figura la densidad de campo magnético, su sentido, y su intensidad dentro de un rango marcado por el máximo y mínimo de la pieza. Los valores numéricos son menos precisos que los que podemos obtener en el apartado de tablas. Aun así, sirven para comparar entre los diferentes casos de corriente y frecuencias.

3 GRÁFICAS DE CONTORNO Y VECTORES DENSIDAD DE CORRIENTE

Caso 1: La densidad de corriente sólo varía en frecuencia para la gráfica de vectores, por lo que se va a representar con una sola imagen, gráfica de contorno y de vectores, para una frecuencia. La diferencia respecto al resto de las frecuencias sería el sentido de la corriente, los conos, en las gráficas y su colocar. El valor instantáneo de la corriente sí varia, además de variar con modificaciones en la función senoidal Φ . En el caso de la función senoidal, varía el sentido de las corrientes según la fase que se indique.

Los resultados se muestran de la jaula y las 3 fases del bobinado, que son las partes de la máquina donde se concentra la mayor actividad eléctrica.



Figura 169. Gráfico de contorno y vectores: Caso 1 - 50Hz (Fase U)



Figura 170. Gráfico de contorno y vectores: Caso 1 - 50Hz (Fase V)



Figura 171. Gráfico de contorno y vectores: Caso 1 - 50Hz (Fase W)



Figura 172. Gráfico de contorno y vectores: Caso 1 - 50Hz (Jaula - vista frontal)



Figura 173. Gráfico de contorno y vectores: Caso 1 - 50Hz (Jaula - vista en perspectiva)

Caso 5: Al igual que el caso anterior, se representa la densidad de corriente en una sola imagen para cada pieza.



Figura 174. Gráfico de contorno y vectores: Caso 5 - 50Hz (Jaula - vista frontal)



Figura 175. Gráfico de contorno y vectores: Caso 5 - 50Hz (Jaula - vista en perspectiva)



Figura 176. Gráfico de contorno y vectores: Caso 5 - 50Hz (Fase U)

Página 172 de 267



Figura 177. Gráfico de contorno y vectores: Caso 5 - 50Hz (Fase V)



Figura 178. Gráfico de contorno y vectores: Caso 5 - 50Hz (Fase W)



Figura 179. Gráfico de contorno y vectores: Caso 5 - 50Hz (Jaula - vista en perspectiva)

Caso 10: Al igual que los casos anteriores, se representan las piezas más importantes en cuanto a densidad de corriente con una sola imagen.



Figura 180. Gráfico de contorno y vectores: Caso 10 - 50Hz (Jaula - vista frontal)



Figura 181. Gráfico de contorno y vectores: Caso 10 - 50Hz (Jaula - vista en perspectiva)



Figura 182. Gráfico de contorno y vectores: Caso 10 - 50Hz (Fase U)

Página 174 de 267



Figura 183. Gráfico de contorno y vectores: Caso 10 - 50Hz (Fase V)



Figura 184. Gráfico de contorno y vectores: Caso 10 - 50Hz (Fase W)

A través de los gráficos de la corriente en las fases, se obtiene una aproximación de la densidad de corriente más predominante en cada caso. Para la fase U, las corrientes son: Caso 1, [0.4-0.6 A/mm²], caso 5, [2-2.7 A/mm²] y caso 10, [4-6 A/mm²]. Para la fase V, las corrientes son: Caso 1, [0.35-0.45 A/mm²], caso 5, [1.5-2.4 A/mm²] y caso 10, [3.5-4.5 A/mm²]. Para la fase W, las corrientes son: Caso 1, [0.2-0.6 A/mm²], caso 5, [1-3 A/mm²] y caso 10, [2-6 A/mm²].

En cuanto a la jaula, es más difícil definir un intervalo de valores, ya que su distribución de corriente no es uniforme. En este caso, los gráficos se emplean para conocer la distribución y la diferencia de intensidades de forma visual.

Los resultados que se obtienen están dentro de lo esperado, teniendo en cuenta que la diferencia entre los casos es la corriente de alimentación, por lo tanto, es lógico que aumente la densidad de corriente al aumentar la corriente, ya que no se varía el área de paso. Las fases del bobinado del estator, corresponden a una fuente de tensión trifásica, con onda sinusoidal, cuya diferencia de ángulo entre los argumentos son 120°.

4 GRÁFICAS DE CONTORNO FUERZA NODAL

La fuerza nodal efectiva, se va a mostrar para el rotor, pieza en la cual se concentra el estudio de este parámetro, y para 3 casos a 50Hz.

Caso 1: Para este primer caso, además de estudiarlo a 50Hz, se muestran los resultados para 30Hz y 10Hz.

Dentro de este caso, la comparativa para varias frecuencias es la siguiente: para 50Hz se obtiene un valor máximo de 0.0036N, para 30Hz se obtiene 0.0055N y para 10Hz se obtiene 0.0089N. Por lo tanto, se deduce que la fuerza aumenta su intensidad con la disminución de la frecuencia.





Figura 185. Gráfico contorno: Caso 1 - 50Hz (Vista superior)



Figura 186. Gráfico contorno: Caso 1 - 30Hz (Vista superior)



Figura 187. Gráfico contorno: Caso 1 - 10Hz (Vista superior)

Caso 5 y 10: se muestran sólo los valores a 50Hz.



Figura 188. Gráfico contorno: Caso 5 - 50Hz (Vista superior)

Página 177 de 267



Figura 189. Gráfico contorno: Caso 10 - 50Hz (Vista superior)

En cuanto a la comparación entre distintos casos de amplitud de corriente de la fuente de alimentación, se obtiene los siguientes datos. Para el caso 1 el valor máximo es 0.006N, para el caso 5 es 0.09N, y para el caso 10, 0.29N. A partir de estos datos se deduce que el aumento de la amplitud de la corriente de alimentación, aumenta el valor de la fuerza nodal efectiva. Además, el efecto de la corriente sobre la fuerza es mucho mayor que el de la frecuencia.

5 GRÁFICAS DE CONTORNO DENSIDAD DE PÉRDIDAS DE JOULE

Las pérdidas de joule se han obtenido en las piezas con materiales que incluyen el dato de resistividad o conductividad eléctrica. En este caso son: la jaula, el bobinado del estator, y el estator. De cada pieza se muestran 3 casos, y del caso inicial se muestran 3 frecuencias diferentes.

El programa da los datos de pérdidas en unas unidades mayores a las que estamos trabajando, a la hora de analizar los datos hay que tener en cuenta que la máquina tiene proporciones en un rango de milímetros o centímetros.

Caso 1: Las frecuencias analizadas en las siguientes imágenes son 50Hz, 30Hz y 10Hz, excepto el bobinado del estator que tiene una distribución de corriente uniforme y no varía con la frecuencia.



Figura 190. Gráfico contorno: Caso 1 - 50Hz (Estator)



Figura 191. Gráfico contorno: Caso 1 - 30Hz (Estator)



Figura 192. Gráfico contorno: Caso 1 - 10Hz (Estator)

Página 179 de 267




Figura 193. Gráfico contorno: Caso 1 - 50Hz (Jaula)



Figura 194. Gráfico contorno: Caso 1 - 30Hz (Jaula)



Figura 195. Gráfico contorno: Caso 1 - 10Hz (Jaula)



Figura 196. Gráfico contorno: Caso 1 (Bobinado del estator)

Caso 5 y 10:



Figura 197. Gráfico contorno: Caso 5 - 50Hz (Estator)





Página 181 de 267



Figura 199. Gráfico contorno: Caso 5 (Bobinado del estator)



Figura 200. Gráfico contorno: Caso 10 - 50Hz (Estator)



Figura 201. Gráfico contorno: Caso 10 - 50Hz (Jaula)

Página 182 de 267



Figura 202. Gráfico contorno: Caso 10 (Bobinado del estator)

En cuanto a la comparación de perdidas de Joule en frecuencia en el caso 1, se observa que estas son menores con menores frecuencias para todas las piezas estudiadas. En cuanto a la comparación de diferentes corrientes para los 3 casos, se observa que, para todas la piezas expuestas, las perdidas aumentan con la corriente, debido a que la ecuación de Joule es la siguiente:

$$P_{p\acute{e}rdidas\ el\acute{e}ctricas} = R \cdot I^2 \tag{28}$$

La influencia de la corriente es mucho mayor sobre las pérdidas de Joule que la frecuencia.

ANEXO 13: Resultados mediante tablas de datos y sus correspondientes gráficos

1 TABLAS Y GRÁFICOS DENSIDAD DE PÉRDIDAS DE JOULE

En las gráficas sólo se muestran las partes de la máquina en las que se producen perdidas de Joule. En el caso de las fases del bobinado del estator, sólo se presenta una fase en la gráfica, ya que las 3 fases son iguales. Esto se debe a que cuando se ha configurado el estudio se ha seleccionado que fueran uniformes.

Se van a mostrar los resultados de 3 de los 10 casos:



Figura 203. Gráfico Pérdidas Joule-Frecuencia: Caso 1

Frecuencia	Estator	Estator	Fase U	Jaula	Total
(Hz)	Lateral	Superior			(W)
50	0.297	0.031	1.460	1.830	6.539

Página 185 de 267

45	0.284	0.031	1.460	1.736	6.431
40	0.270	0.031	1.460	1.626	6.307
35	0.253	0.031	1.460	1.497	6.160
30	0.232	0.030	1.460	1.343	5.986
29	0.228	0.030	1.460	1.309	5.947
28	0.223	0.030	1.460	1.274	5.907
27	0.218	0.030	1.460	1.237	5.865
26	0.212	0.029	1.460	1.200	5.821
25	0.207	0.029	1.460	1.160	5.776
24	0.201	0.029	1.460	1.119	5.729
23	0.195	0.028	1.460	1.077	5.681
22	0.189	0.028	1.460	1.033	5.630
21	0.182	0.028	1.460	0.987	5.577
20	0.175	0.027	1.460	0.940	5.522
19	0.168	0.026	1.460	0.891	5.466
18	0.160	0.026	1.460	0.841	5.407
17	0.152	0.025	1.460	0.789	5.346
16	0.143	0.024	1.460	0.735	5.283
15	0.135	0.023	1.460	0.680	5.217
14	0.125	0.022	1.460	0.623	5.150
13	0.115	0.021	1.460	0.565	5.082
12	0.105	0.020	1.460	0.507	5.012
11	0.095	0.018	1.460	0.448	4.941
10	0.084	0.017	1.460	0.389	4.870
9	0.073	0.015	1.460	0.331	4.799
8	0.062	0.013	1.460	0.274	4.729
7	0.051	0.011	1.460	0.219	4.662
6	0.040	0.009	1.460	0.168	4.598
5	0.030	0.007	1.460	0.121	4.539
0.5	0.000	0.000	1.460	0.001	4.382
RMS	0.205	0.026	1.460	1.198	5.679

El valor de la tabla RMS es el valor medio cuadrático de todos los datos. De estas tablas se obtiene el valor de pérdidas en cada pieza, pero también el valor total de pérdida en toda la máquina. A través de los casos, se puede observar como este valor aumenta al aumentar al disminuir la frecuencia. Esto es coherente teniendo en cuenta que la formulación para las pérdidas eléctricas de Joule es:

$$P_{p\acute{e}rdidas\ el\acute{e}ctricas} = R \cdot I^2 \tag{29}$$



Figura 204. Gráfico Pérdidas Joule-Frecuencia: Caso 2

Tabla 6. Datos de pérdidas de J	oule vs. Frecuencia: Caso 2
---------------------------------	-----------------------------

Frecuencia	Estator	Estator	Fase U	Jaula	Total
(Hz)	Lateral	Superior			(W)
50	1.187	0.126	5.840	7.314	26.146
45	1.140	0.125	5.841	6.951	25.739

40	1.080	0.125	5.840	6.501	25.225
35	1.012	0.123	5.840	5.984	24.639
30	0.930	0.121	5.840	5.371	23.942
29	0.911	0.120	5.840	5.235	23.787
28	0.892	0.120	5.840	5.094	23.626
27	0.872	0.119	5.840	4.948	23.458
26	0.851	0.118	5.840	4.796	23.284
25	0.829	0.117	5.840	4.638	23.104
24	0.806	0.116	5.840	4.475	22.916
23	0.782	0.114	5.840	4.305	22.721
22	0.756	0.112	5.840	4.129	22.518
21	0.730	0.111	5.840	3.947	22.307
20	0.700	0.108	5.840	3.752	22.081
19	0.672	0.106	5.840	3.563	21.861
18	0.641	0.103	5.840	3.359	21.622
17	0.609	0.100	5.840	3.153	21.383
16	0.575	0.097	5.840	2.939	21.131
15	0.540	0.093	5.836	2.719	20.859
14	0.502	0.089	5.840	2.489	20.600
13	0.464	0.085	5.840	2.265	20.334
12	0.422	0.079	5.840	2.025	20.047
11	0.380	0.073	5.840	1.790	19.764
10	0.337	0.067	5.839	1.555	19.477
9	0.293	0.061	5.840	1.322	19.195
8	0.249	0.053	5.840	1.095	18.918
7	0.204	0.046	5.833	0.874	18.622
6	0.162	0.038	5.840	0.672	18.392
5	0.121	0.030	5.840	0.485	18.157
0.5	0.002	0.001	5.840	0.006	17.528
RMS	0.819	0.105	5.840	4.790	22.717



Figura 205. Gráfico Pérdidas Joule-Frecuencia: Caso 3

Frecuencia	Estator	Estator	Fase U	Jaula	Total
(Hz)	Lateral	Superior			(W)
50	2.681	0.284	13.140	16.454	58.839
45	2.568	0.283	13.140	15.598	57.869
40	2.436	0.281	13.140	14.606	56.744
35	2.283	0.279	13.140	13.437	55.419
30	2.104	0.275	13.140	12.066	53.864
29	2.059	0.273	13.140	11.736	53.489
28	2.006	0.270	13.103	11.366	52.951
27	1.967	0.269	13.135	11.062	52.703
26	1.928	0.268	13.139	10.758	52.371
25	1.870	0.265	13.135	10.356	51.896

Tabla 7. Datos de pérdidas de Joule vs. Frecuencia: Caso 3

Página **189** de **267**

24	1.825	0.262	13.140	10.008	51.515
23	1.755	0.257	13.019	9.549	50.620
22	1.668	0.249	13.124	9.002	50.290
21	1.657	0.252	13.140	8.813	50.141
20	1.588	0.248	13.143	8.399	49.663
19	1.570	0.250	13.143	8.176	49.424
18	1.454	0.237	13.143	7.506	48.625
17	1.384	0.230	13.140	7.027	48.061
16	1.288	0.219	13.140	6.439	47.365
15	1.228	0.214	13.140	6.051	46.913
14	1.143	0.204	13.140	5.534	46.300
13	1.056	0.194	13.140	5.032	45.703
12	0.970	0.184	13.179	4.536	45.226
11	0.875	0.170	13.140	3.977	44.442
10	0.776	0.156	13.138	3.481	43.829
9	0.673	0.140	13.140	2.943	43.176
8	0.568	0.123	13.113	2.431	42.461
7	0.465	0.104	13.156	1.917	41.955
6	0.377	0.089	13.124	1.522	41.361
5	0.279	0.070	13.140	1.083	40.852
0.5	0.004	0.002	13.141	0.012	39.441
RMS	1.851	0.238	13.137	10.741	51.074

Tal y como se ha comentado antes, los resultados de pérdidas totales de los 3 casos presentados son: P(Caso 1)=5.679W; P(Caso 2)=22.717W; P(Caso 3)=51.074W.

Y, por lo tanto, las pérdidas eléctricas de Joule en estator, bobinado del estator y jaula son mayores cuanto mayor es la corriente, tal y como corresponde a la ecuación que define estas pérdidas, y es mayor al aumentar la frecuencia.

2 TABLAS Y GRÁFICOS INDUCTANCIA EN LAS BOBINAS

En este apartado se muestran los resultados de inductancia de las 3 fases del estator, ya que es de las únicas que se tiene resultados.



Figura 206. Gráfico Inductancia bobinado-Frecuencia: Caso 1

f	FaseII	Fase V	Fase W	24	0.004	0.006	0.012
(Hz)	1 436 0			23	0.004	0.006	0.012
50	0.002	0.004	0.006	22	0.004	0.007	0.012
45	0.002	0.004	0.007	21	0.005	0.007	0.013
40	0.002	0.004	0.008	20	0.005	0.007	0.013
35	0.003	0.005	0.009	19	0.005	0.007	0.014
30	0.003	0.005	0.010	18	0.005	0.007	0.014
29	0.003	0.006	0.010	17	0.006	0.008	0.014
28	0.003	0.006	0.011	16	0.006	0.008	0.015
27	0.004	0.006	0.011	15	0.007	0.008	0.015
26	0.004	0.006	0.011	14	0.007	0.008	0.016
25	0.004	0.006	0.011	13	0.007	0.009	0.016

Tabla 8. Datos de inductancia bobinado vs. Frecuencia: Caso 1

Página **191** de **267**

Diseño de estator alternativo para motor asíncrono

0.018

0.018

0.018

0.017

0.013

12	0.008	0.009	0.016	7	0.011	0.010	
11	0.009	0.009	0.017	6	0.012	0.011	
10	0.009	0.009	0.017	5	0.013	0.011	
9	0.010	0.010	0.018	0.5	0.017	0.012	
8	0.011	0.010	0.018	RMS	0.007	0.007	



Figura 207. Gráfico Inductancia bobinado-Frecuencia: Caso 2

Tabla 9. Datos de inductancia bobinado vs. Frecuencia: Caso	2
---	---

f	Fase II	Fase V	Fase W	27	0.004	0.006	0.011
(Hz)	1 400 0	1 400 1	1 400 11	26	0.004	0.006	0.011
50	0.002	0.004	0.006	25	0.004	0.006	0.011
45	0.002	0.004	0.007	24	0.004	0.006	0.012
40	0.002	0.004	0.008	23	0.004	0.006	0.012
35	0.003	0.005	0.009	22	0.004	0.007	0.012
30	0.003	0.005	0.010	21	0.005	0.007	0.013
29	0.003	0.006	0.010	20	0.005	0.007	0.013
28	0.003	0.006	0.011	19	0.005	0.007	0.014

Diseño de estator alternativo para motor asíncrono

18	0.005	0.007	0.014
17	0.006	0.008	0.014
16	0.006	0.008	0.015
15	0.007	0.008	0.015
14	0.007	0.008	0.016
13	0.007	0.009	0.016
12	0.008	0.009	0.016
11	0.009	0.009	0.017

10	0.009	0.009	0.017
9	0.010	0.010	0.018
8	0.011	0.010	0.018
7	0.011	0.010	0.018
6	0.012	0.010	0.018
5	0.013	0.011	0.018
0.5	0.017	0.012	0.017
RMS	0.007	0.007	0.013



Figura 208. Gráfico Inductancia bobinado-Frecuencia: Caso 3

f	Fase U	Fase V	Fase W	30	0.003	0.005	0.010
(Hz)		1 400 1	1 400 11	29	0.003	0.006	0.010
50	0.002	0.004	0.006	28	0.003	0.006	0.011
45	0.002	0.004	0.007	27	0.004	0.006	0.011
40	0.002	0.004	0.008	26	0.004	0.006	0.011
35	0.003	0.005	0.009	25	0.004	0.006	0.011

Página 193 de 267

Diseño de estator alternativo para motor asíncrono

24	0.004	0.006	0.012	13	0.007	0.009	0.016
23	0.004	0.006	0.012	12	0.008	0.009	0.016
22	0.004	0.007	0.012	11	0.009	0.009	0.017
21	0.005	0.007	0.013	10	0.009	0.009	0.017
20	0.005	0.007	0.013	9	0.010	0.010	0.017
19	0.005	0.007	0.014	8	0.011	0.010	0.018
18	0.005	0.007	0.014	7	0.011	0.010	0.018
17	0.006	0.008	0.014	6	0.012	0.011	0.018
16	0.006	0.008	0.015	5	0.013	0.011	0.018
15	0.006	0.008	0.015	0.5	0.017	0.012	0.017
14	0.007	0.008	0.016	RMS	0.007	0.007	0.013

A través de los resultados, se observa que no hay una variación notable de la inductancia respecto a la corriente, dentro del intervalo de corriente pequeñas. En cuanto a la relación con la frecuencia, sí que se observa que la inductancia aumenta cuando aumenta la frecuencia.

3 TABLAS Y GRÁFICOS PAR

El par, es el resultado más importante de este estudio, ya que este dato corresponde a la potencia mecánica de la salida del motor, y por lo tanto la que puede utilizar un aparato conectado a su eje.

Para esta característica operativa, se van a obtener diferentes gráficos en los que se enfrente el par a distintos datos, frecuencia y corrientes de alimentación.

Los resultados de par de los casos 5-10, tienen una variación en su forma debido a problemas en su computación con el software de simulación electromagnética. En cuanto a los valores negativos de par, se debe a que el vector de cálculo está en la dirección opuesta a la que tiene el par.



Figura 209. Gráfico par vs. frecuencia Todos los casos (Bloque rotor)

f (Hz)	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
50	-0.00419	-0.0167	-0.0376	-0.0668	-0.105
45	-0.00453	-0.0181	-0.0407	-0.0721	-0.111
40	-0.00490	-0.0196	-0.0440	-0.0778	-0.120
35	-0.00529	-0.0212	-0.0475	-0.0841	-0.129
30	-0.00568	-0.0227	-0.0510	-0.0887	-0.138
29	-0.00575	-0.0230	-0.0516	-0.0895	-0.139
28	-0.00582	-0.0233	-0.0520	-0.0907	-0.140
27	-0.00589	-0.0235	-0.0527	-0.0924	-0.141
26	-0.00595	-0.0238	-0.0534	-0.0942	-0.142
25	-0.00601	-0.0240	-0.0537	-0.0951	-0.144
24	-0.00607	-0.0243	-0.0543	-0.0956	-0.145
23	-0.00611	-0.0244	-0.0543	-0.0958	-0.058
22	-0.00615	-0.0246	-0.0539	-0.0964	-0.146
21	-0.00618	-0.0247	-0.0553	-0.0984	-0.034

Tabla 11. Tabla par vs. frecuencia Casos 1-5 (Bloque rotor)

Página **195** de **267**

20	-0.00620	-0.0248	-0.0555	-0.0968	-0.061
19	-0.00620	-0.0248	-0.0568	-0.0950	-0.040
18	-0.00619	-0.0247	-0.0554	-0.0943	-0.142
17	-0.00616	-0.0247	-0.0550	-0.0937	-0.110
16	-0.00611	-0.0245	-0.0540	-0.0949	-0.139
15	-0.00604	-0.0242	-0.0539	-0.0905	-0.137
14	-0.00594	-0.0237	-0.0528	-0.0917	-0.115
13	-0.00580	-0.0232	-0.0517	-0.0896	-0.127
12	-0.00563	-0.0225	-0.0504	-0.0602	-0.121
11	-0.00542	-0.0217	-0.0482	-0.0812	-0.116
10	-0.00516	-0.0206	-0.0462	-0.0784	-0.083
9	-0.00485	-0.0194	-0.0432	-0.0714	-0.100
8	-0.00449	-0.0179	-0.0399	-0.0652	-0.090
7	-0.00406	-0.0162	-0.0357	-0.0578	-0.051
6	-0.00358	-0.0143	-0.0324	-0.0513	-0.068
5	-0.00303	-0.0121	-0.0270	-0.0434	-0.038
0.5	0.00013	0.0005	0.0012	0.0149	0.015
RMS	0.00514	0.0206	0.0460	0.0796	0.112

Tabla 12. Tabla par vs. frecuencia Casos 6-10 (Bloque rotor)

f (Hz)	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9	Caso 10
50	-0.146	-0.195	-0.137	-0.138	-0.379
45	-0.158	-0.136	-0.266	-0.331	-0.406
40	-0.170	-0.094	-0.280	-0.349	-0.427
35	-0.182	-0.239	-0.290	-0.326	-0.234
30	-0.192	-0.125	-0.306	-0.365	-0.284
29	-0.127	-0.246	-0.305	-0.217	-0.415
28	-0.155	-0.077	-0.297	-0.347	-0.304
27	-0.196	-0.250	-0.196	-0.243	-0.226
26	-0.059	-0.251	-0.179	-0.357	-0.378
25	-0.197	-0.251	-0.304	-0.318	-0.300
24	-0.198	-0.249	-0.243	-0.321	-0.234

Página 196 de 267

23	-0.195	-0.248	-0.289	-0.342	-0.231
22	-0.143	-0.247	-0.290	-0.337	-0.328
21	-0.048	-0.244	-0.289	-0.318	-0.316
20	-0.193	-0.159	-0.268	-0.308	-0.327
19	-0.047	-0.235	-0.183	-0.311	-0.173
18	-0.048	-0.222	-0.238	-0.270	-0.298
17	-0.186	-0.225	-0.151	-0.184	-0.132
16	-0.138	-0.214	-0.244	-0.276	-0.178
15	-0.054	-0.210	-0.188	-0.123	-0.173
14	-0.170	-0.186	-0.223	-0.230	-0.166
13	-0.163	-0.175	-0.203	-0.221	-0.222
12	-0.120	-0.111	-0.196	-0.214	-0.108
11	-0.175	-0.132	-0.182	-0.179	-0.173
10	-0.054	-0.153	-0.157	-0.157	-0.174
9	-0.121	-0.134	-0.144	-0.137	-0.122
8	-0.107	-0.113	-0.126	-0.111	-0.109
7	-0.092	-0.091	-0.106	-0.090	-0.080
6	-0.075	-0.079	-0.069	-0.078	-0.080
5	-0.064	-0.060	-0.052	-0.051	-0.049
0.5	0.027	0.050	0.029	0.067	0.077
RMS	0.147	0.175	0.232	0.273	0.284

El par obtenido es bastante pequeño, por lo que la máquina tendría un fin de cargas de poca potencia.

4 TABLAS Y GRÁFICOS DENSIDAD DE CORRIENTE Y CORRIENTE

Una vez conocidos los valores medios de densidad de corriente en la jaula para los 3 casos que se están estudiando, y conociendo el área de los conductores de la jaula, se obtiene la corriente.

 $\acute{A}rea\ modelo\ alternativo = 8,5mm^2$

Además, se debe tener en cuenta el factor de llenado de cobre en la ranura, que se toma del 70%.

$$I(A) = Densidad\left(\frac{A}{mm^2}\right) \cdot \text{ Årea conductores } (mm^2) \cdot Factor \, llenado \quad (30)$$



Figura 210. Gráfica de densidad de corriente: Caso 1 (Jaula)

f (H⁊)	Densidad	24	1.510
· (112)	corriente (A/mm ²)	23	1.481
50	1.927	22	1.450
45	1.878	21	1.418
40	1.819	20	1.383
35	1.745	19	1.347
30	1.654	18	1.308
29	1.633	17	1.267
28	1.611	16	1.223
27	1.587	15	1.176
26	1.563	14	1.126
25	1.537	13	1.073

Tabla 13. Densidad de corriente vs. frecuencia Caso 1 (Jaula)
---	--------

Página 198 de 267

Diseño de estator alternativo para motor asíncrono

12	1.016	7	
11	0.955	6	
10	0.890	5	
9	0.820	0.5	
8	0.747	RMS	

7	0.668
6	0.585
5	0.497
0.5	0.053
RMS	1.927

6.043

5.681

5.294

4.881

4.442

3.975

3.480

2.958

0.315

11.466

Tabla 14. Corriente vs. frecuencia Caso 1 (Jaula)

f (Hz)	Corriente	24	8.982		12
	(A)	23	8.810		11
50	11.465	22	8.628	-	10
45	11.174	21	8.435		9
40	10.821	20	8.231	-	8
35	10.385	19	8.014		7
30	9.840	18	7.783	-	6
29	9.715	17	7.538		5
28	9.583	16	7.276	-	0.5
27	9.444	15	6.997		RMS
26	9.298	14	6.700		
25	9.144	13	6.382		

Se hacen los mismos cálculos para los casos 2 y 3.



Figura 211. Gráfica de densidad de corriente: Caso 2 (Jaula)

Página 199 de 267

f (H⁊)	Densidad
(112)	corriente (A/mm ²)
50	3.852
45	3.758
40	3.637
35	3.490
30	3.307
29	3.265
28	3.221
27	3.174
26	3.125
25	3.073
24	3.018
23	2.960
22	2.899
21	2.835
20	2.763

Tabla 15. Densidad de corriente vs. frecuencia Caso 2 (Jaula	a)
--	----

19	2.693
18	2.615
17	2.533
16	2.446
15	2.352
14	2.251
13	2.147
12	2.030
11	1.909
10	1.779
9	1.640
8	1.493
7	1.333
6	1.169
5	0.994
0.5	0.106
RMS	2.924

Tabla 16. Corriente vs. frecuencia Caso 2 (Jaula)

f (Hz)	Corriente	24	17.958	12	12.079
	(A)	23	17.614	11	11.357
50	22.919	22	17.251	10	10.583
45	22.361	21	16.865	9	9.759
40	21.637	20	16.442	8	8.881
35	20.766	19	16.022	7	7.934
30	19.677	18	15.556	6	6.957
29	19.426	17	15.073	5	5.913
28	19.162	16	14.551	0.5	0.630
27	18.884	15	13.996	RMS	17.398
26	18.592	14	13.392		
25	18.284	13	12.774		

Página 200 de 267



Figura 212. Gráfica de densidad de corriente: Caso 3 (Jaula)

f (Hz)	Densidad	19	4.080
· (112)	corriente (A/mm ²)	18	3.909
50	5.778	17	3.782
45	5.630	16	3.620
40	5.451	15	3.510
35	5.230	14	3.356
30	4.957	13	3.200
29	4.889	12	3.039
28	4.811	11	2.845
27	4.746	10	2.662
26	4.681	9	2.447
25	4.592	8	2.224
24	4.514	7	1.975
23	4.410	6	1.760
22	4.281	5	1.485
21	4.236	0.5	0.158
20	4.135	RMS	4.377

Página 201 de 267

f (H⁊)	Corriente	24	26.861		12	18.080
· (·· <i>2)</i>	(A)	23	26.237	-	11	16.929
50	34.377	22	25.473		10	15.839
45	33.498	21	25.205		9	14.561
40	32.434	20	24.605		8	13.233
35	31.120	19	24.276		7	11.753
30	29.494	18	23.259		6	10.473
29	29.088	17	22.504		5	8.834
28	28.625	16	21.542		0.5	0.942
27	28.241	15	20.882		RMS	26.044
26	27.849	14	19.969		1	
25	27.324	13	19.042			

Tabla 18. Corriente vs. frecuencia Caso 3 (Jaula)

En los 3 casos se ve como disminuye la corriente en los conductores de la jaula cuando disminuye la frecuencia, y como aumenta cuando aumenta la corriente de la fuente de alimentación.

5 TABLAS Y GRÁFICOS FLUJO MAGNÉTICO

Las dos zonas que se han considerado más importantes en cuanto a paso de flujo magnético son, la cara entre las dos piezas que forman el estator, donde cambia la dirección de la distribución magnética, y el flujo magnético saliente del rotor, en contacto con el entrehierro.



Figura 213. Flujo magnético Caso 1 (Cara del Estator y cara del rotor)

f	Estator (Real)	Estator (Imag)	Rotor (Real)	Rotor (Imag)
(Hz)	(Wb)	(Wb)	(Wb)	(Wb)
50	1.282E-06	2.890E-06	2.070E-07	6.869E-07
45	1.265E-06	2.886E-06	1.950E-07	6.938E-07
40	1.247E-06	2.879E-06	1.808E-07	7.008E-07
35	1.227E-06	2.869E-06	1.638E-07	7.076E-07
30	1.207E-06	2.855E-06	1.431E-07	7.136E-07
29	1.203E-06	2.851E-06	1.384E-07	7.146E-07
28	1.199E-06	2.847E-06	1.336E-07	7.155E-07
27	1.195E-06	2.843E-06	1.285E-07	7.163E-07
26	1.191E-06	2.839E-06	1.233E-07	7.169E-07
25	1.187E-06	2.834E-06	1.178E-07	7.174E-07

Tabla 19. Flujo magnético Caso 1 (Cara del estator y cara del rotor)

Página 203 de 267

24	1.184E-06	2.829E-06	1.122E-07	7.178E-07
23	1.180E-06	2.823E-06	1.064E-07	7.180E-07
22	1.177E-06	2.817E-06	1.003E-07	7.179E-07
21	1.174E-06	2.811E-06	9.408E-08	7.176E-07
20	1.172E-06	2.805E-06	8.766E-08	7.172E-07
19	1.170E-06	2.798E-06	8.107E-08	7.164E-07
18	1.168E-06	2.790E-06	7.431E-08	7.153E-07
17	1.167E-06	2.783E-06	6.740E-08	7.140E-07
16	1.167E-06	2.775E-06	6.034E-08	7.124E-07
15	1.167E-06	2.767E-06	5.317E-08	7.105E-07
14	1.168E-06	2.759E-06	4.585E-08	7.083E-07
13	1.169E-06	2.752E-06	3.839E-08	7.059E-07
12	1.172E-06	2.744E-06	3.078E-08	7.031E-07
11	1.175E-06	2.737E-06	2.298E-08	7.001E-07
10	1.179E-06	2.730E-06	1.490E-08	6.969E-07
9	1.184E-06	2.725E-06	6.466E-09	6.934E-07
8	1.189E-06	2.720E-06	-2.506E-09	6.897E-07
7	1.194E-06	2.716E-06	-1.225E-08	6.857E-07
6	1.198E-06	2.714E-06	-2.317E-08	6.812E-07
5	1.202E-06	2.713E-06	-3.584E-08	6.759E-07
0.5	1.199E-06	2.674E-06	-1.063E-07	5.906E-07
RMS	1.210E-06	2.814E-06	1.308E-07	6.987E-07



Figura 214. Flujo magnético Caso 2 (Cara del Estator y cara del rotor)

f	Estator (Real)	Estator	Rotor (Real)	Rotor (Imag)
(Hz)	(Wb)	(Imag) (Wb)	(Wb)	(Wb)
50	2.563E-06	5.779E-06	4.142E-07	1.373E-06
45	2.533E-06	5.774E-06	3.909E-07	1.388E-06
40	2.494E-06	5.759E-06	3.623E-07	1.401E-06
35	2.456E-06	5.739E-06	3.285E-07	1.415E-06
30	2.416E-06	5.710E-06	2.876E-07	1.427E-06
29	2.408E-06	5.702E-06	2.784E-07	1.429E-06
28	2.400E-06	5.695E-06	2.689E-07	1.431E-06
27	2.392E-06	5.686E-06	2.589E-07	1.432E-06
26	2.385E-06	5.677E-06	2.485E-07	1.434E-06
25	2.378E-06	5.668E-06	2.380E-07	1.435E-06

Tabla 20. Flujo magnético Caso 2 (Cara del estator y cara del rotor)

Página 205 de 267

24	2.371E-06	5.657E-06	2.270E-07	1.436E-06
23	2.364E-06	5.647E-06	2.156E-07	1.436E-06
22	2.358E-06	5.635E-06	2.038E-07	1.436E-06
21	2.353E-06	5.622E-06	1.918E-07	1.435E-06
20	2.344E-06	5.606E-06	1.777E-07	1.433E-06
19	2.343E-06	5.596E-06	1.659E-07	1.433E-06
18	2.340E-06	5.580E-06	1.530E-07	1.431E-06
17	2.338E-06	5.568E-06	1.387E-07	1.429E-06
16	2.339E-06	5.554E-06	1.251E-07	1.427E-06
15	2.339E-06	5.540E-06	1.098E-07	1.423E-06
14	2.339E-06	5.520E-06	9.574E-08	1.418E-06
13	2.343E-06	5.508E-06	7.965E-08	1.414E-06
12	2.346E-06	5.490E-06	6.383E-08	1.407E-06
11	2.353E-06	5.475E-06	4.773E-08	1.401E-06
10	2.360E-06	5.462E-06	3.103E-08	1.393E-06
9	2.369E-06	5.449E-06	1.362E-08	1.385E-06
8	2.379E-06	5.439E-06	-4.202E-09	1.377E-06
7	2.385E-06	5.424E-06	-2.297E-08	1.368E-06
6	2.397E-06	5.426E-06	-4.633E-08	1.360E-06
5	2.403E-06	5.425E-06	-7.185E-08	1.350E-06
0.5	2.394E-06	5.346E-06	-2.164E-07	1.181E-06
RMS	2.421E-06	5.628E-06	2.630E-07	1.397E-06



Figura 215. Flujo magnético Caso 3 (Cara del Estator y cara del rotor)

£ (11-)	Estator	Estator	Rotor (Real)	Rotor (Imag)	
т (п <i>z</i>)	(Real) (Wb)	(Imag) (Wb)	(Wb)	(Wb)	
50	3.841E-06	8.671E-06	6.168E-07	2.061E-06	
45	3.791E-06	8.654E-06	5.817E-07	2.077E-06	
40	3.741E-06	8.634E-06	5.442E-07	2.098E-06	
35	3.686E-06	8.601E-06	4.971E-07	2.116E-06	
30	3.630E-06	8.561E-06	4.370E-07	2.138E-06	
29	3.614E-06	8.550E-06	4.209E-07	2.140E-06	
28	3.587E-06	8.522E-06	3.991E-07	2.140E-06	
27	3.581E-06	8.521E-06	3.846E-07	2.146E-06	
26	3.579E-06	8.526E-06	3.721E-07	2.156E-06	
25	3.555E-06	8.497E-06	3.500E-07	2.154E-06	
24	3.547E-06	8.493E-06	3.313E-07	2.158E-06	

Table 21		mognótico	Casa	2	(Cara	d I	antatory	00 r0	dal	rotor)
1 avia 2 1. I	riujo	maynetico	Casu	3	(Cara	uei	estator y	Cara	uei	10101)

Página 207 de 267

23	3 520E-06	8 445E-06	3 100E-07	2 152E-06
20	0.020E 00	0.446	0.1002 07	2.1022 00
22	3.482E-06	8.401E-06	2.971E-07	2.126E-06
21	3.509E-06	8.438E-06	2.675E-07	2.153E-06
20	3.511E-06	8.404E-06	2.590E-07	2.139E-06
19	3.545E-06	8.425E-06	2.362E-07	2.163E-06
18	3.501E-06	8.360E-06	2.212E-07	2.132E-06
17	3.493E-06	8.329E-06	1.968E-07	2.118E-06
16	3.683E-06	8.600E-06	3.391E-07	2.380E-06
15	3.500E-06	8.280E-06	1.629E-07	2.107E-06
14	3.503E-06	8.251E-06	1.429E-07	2.097E-06
13	3.520E-06	8.240E-06	1.310E-07	2.101E-06
12	3.528E-06	8.235E-06	1.120E-07	2.100E-06
11	3.535E-06	8.183E-06	8.202E-08	2.070E-06
10	3.483E-06	8.192E-06	-3.130E-09	2.091E-06
9	3.552E-06	8.191E-06	2.232E-08	2.095E-06
8	3.546E-06	8.192E-06	-2.032E-08	2.109E-06
7	3.578E-06	8.291E-06	-1.625E-08	2.193E-06
6	3.573E-06	8.228E-06	-1.076E-07	2.122E-06
5	3.529E-06	8.207E-06	-1.813E-07	2.090E-06
0.5	3.387E-06	8.078E-06	-5.237E-07	1.824E-06
RMS	3.617E-06	8.453E-06	4.063E-07	2.107E-06

En los tres casos estudiados, las variaciones del flujo magnético para las distintas frecuencias son muy pequeñas, se podría considerar constante. En cuanto a la variación respecto a la corriente de la fuente de alimentación, se observa que, al aumentar, aumenta el flujo magnético.

A través de los datos de las tablas se ve como el flujo en el estator es mayor, ya que es la parte que se excita, y cuando llega al rotor después de haber pasado por el entrehierro, ya ha perdido bastante intensidad.

ANEXO 14: Análisis magnético transitorio

1 MODIFICACIONES RESPECTO AL ESTUDIO EN FRECUENCIA

La principal diferencia entre ambos tipos de estudios, es que en el análisis en frecuencia se van a obtener resultados respecto a distintos valores de frecuencia, y en el análisis transitorio, se van a obtener resultados respecto al tiempo.

Propiedades del estudio, se van a empelar intervalos regulares para las 30 divisiones, para los 0.04s que corresponden a una vuelta completa del rotor sobre el estator a la velocidad seleccionada, 1500rpm. Es resto de opciones son iguales que el análisis en frecuencia.

Condiciones, se añade la condición de movimiento rotacional al bloque rotor, y se le asigna una velocidad de 1500rpm. Se ha tomado esta velocidad, ya que está dentro del rango de trabajo habitual de este tipo de máquinas. El vector de velocidad corresponde a la dirección positiva del eje Z.

Circuito, como el estudio no es en frecuencia, es necesario indicar la frecuencia a la que va a trabajar la fuente de alimentación de corriente, 50Hz.

2 GRÁFICAS DE CONTORNO Y VECTORES DE DENSIDAD DE FLUJO MAGNÉTICO VARIANDO EN EL TIEMPO

Los resultados van a variar a lo largo de todos los instantes de tiempo estudiados, es decir, todas las divisiones. Por lo tanto, se van a tomar unos instantes de tiempo para analizar. Se tiene en cuenta que los resultados se repiten dos veces, ya que se está estudiando 360° y los resultados se repiten cada 180° tal y como se indica con la condición de rotación periódica.

Teniendo en cuenta esto, los steps o divisiones que se van a mostrar estarán dentro del intervalo [0.007-0.027s], y son los step 7,11, 15, 19 y 22.

Caso 1:







Figura 217. Gráfica contorno: Caso 1 (Step 11) (Estator)



Figura 218. Gráfica contorno: Caso 1 (Step 15) (Estator)



Figura 219. Gráfica contorno: Caso 1 (Step 19) (Estator)



Figura 220. Gráfica contorno: Caso 1 (Step 22) (Estator)



Caso 2:

Figura 221. Gráfica contorno: Caso 2 (Step 7) (Estator)



Figura 222. Gráfica contorno: Caso 2 (Step 11) (Estator)



Figura 223. Gráfica contorno: Caso 2 (Step 15) (Estator)



Figura 224. Gráfica contorno: Caso 2 (Step 19) (Estator)

La densidad de flujo magnético varía para cada posición del rotor. A través de las imágenes se observa como los polos están en posiciones diferentes, a diferencia del estudio en frecuencia, donde todas las variaciones eran sobre una misma posición.



Figura 225. Gráfica contorno: Caso 2 (Step 22) (Estator)

Caso 5:



Figura 226. Gráfica contorno: Caso 7 (Step 7) (Estator)





Página 214 de 267



Figura 228. Gráfica contorno: Caso 7 (Step 15) (Estator)



Figura 229. Gráfica contorno: Caso 7 (Step 19) (Estator)



Figura 230. Gráfica contorno: Caso 7 (Step 22) (Estator)
Caso 7:



Figura 231. Gráfica contorno: Caso 7 (Step 7) (Estator)



Figura 232. Gráfica contorno: Caso 7 (Step 11) (Estator)



Figura 233. Gráfica contorno: Caso 7 (Step 15) (Estator)





Figura 234. Gráfica contorno: Caso 7 (Step 19) (Estator)



Figura 235. Gráfica contorno: Caso 7 (Step 22) (Estator)



Figura 236. Gráfica contorno: Caso 10 (Step 7) (Estator)

Página 217 de 267



Figura 237. Gráfica contorno: Caso 10 (Step 11) (Estator)



Figura 238. Gráfica contorno: Caso 10 (Step 15) (Estator)



Figura 239. Gráfica contorno: Caso 10 (Step 19) (Estator)



Figura 240. Gráfica contorno: Caso 10 (Step 22) (Estator)

Cada posición tiene una posición de los polos magnéticos diferentes, por lo que se compara la misma posición para los diferentes casos, es decir, las diferentes corrientes de alimentación.

La intensidad de la densidad de flujo magnético aumenta al aumentar la corriente, tal y como se puede ver en las imágenes donde las ranuras situadas en la posición de los polos magnéticos van cambiando su color de azul a verde, o de verde a amarillo.

En cuanto al rotor, se van a tomar tres posiciones, 7, 15 y 22 steps, para mostrar las variaciones que sufre con la corriente de alimentación.



Figura 241. Gráfico contorno: Caso 1 (Step 7 (izq.) y Step 22 (der.)) (Rotor)



Figura 242. Gráfico contorno: Caso 1 (Step 15) (Rotor)



Figura 243. Gráfico contorno: Caso 5 (Step 7 (izq.) y Step 22 (der.)) (Rotor)



Figura 244. Gráfico contorno: Caso 5 (Step 15) (Rotor)

Página 220 de 267



Figura 245. Gráfico contorno: Caso 10 (Step 7 (izq.) y Step 22 (der.)) (Rotor)



Figura 246. Gráfico contorno: Caso 10 (Step 15) (Rotor)

En todos los casos se ha juntado los step 7 y 22, ya que corresponden a la misma distribución magnética. El rotor tiene posiciones en cada imagen, ya que corresponde al lugar en el que estaría posicionado en ese instante respecto al estator.

En cuanto a los resultados obtenidos, al igual que en el estator, la densidad de flujo magnético es mayor para mayores corrientes de alimentación. Dentro del mismo caso, la variación respecto al tiempo no es tan elevada como pueda ser en el estator.

Para poder observar de forma concreta la distribución magnética, en cuanto a sentido y dirección instantáneos, tanto en el estator como en el rotor, se van a mostrar diferentes posiciones para 2 casos del estudio, caso 5 y 10, mediante gráficas de vectores.

Nuria Fernández Jorrín



Figura 247.Gráfico de vectores: Caso 5 (Step 15) (Estator+Rotor)



Figura 248. Gráfico de vectores: Caso 5 (Step 22) (Estator+Rotor)

A través de los dos steps empleados, se confirma como la variación entre ambos instantes no es muy grande, en cuanto al rotor. Además se comprueba la conexión entra las distribución en el rotor y en el estator.

Nuria Fernández Jorrín



Figura 249. Gráfico de vectores: Caso 10 (Step 15) (Estator+Rotor)



Figura 250. Gráfico de vectores: Caso 10 (Step 22) (Estator+Rotor)

En ambas imágenes, se puede observar como las flechas siguen dos direcciones principales, que corresponden a los dos polos magnéticos visibles en este instante.

Además, se comprueba que siguen las direcciones, radial en la cara frontal del estator, tal y como impone la dirección preferente del material de grano orientado, y axial en la zona superior del estator, tal y como corresponde al material de grano orientado en esa pieza.



Figura 251. Gráfico de vectores: Caso 10 (Step 15) (Estator- vista superior)

En cuanto a la comparación entre los dos casos, se corrobora el aumento de densidad de flujo magnético con el aumento de corriente de alimentación.

3 GRÁFICAS DE CONTORNO Y VECTORES DE DENSIDAD DE CORRIENTE VARIANDO EN EL TIEMPO

Para los gráficos de densidad de corriente, se va a mostrar los resultados de las bobinas del estator y de la jaula, ya que son las partes de la máquina que más sufren el efecto eléctrico.

En concreto, se van a mostrar los casos 1, 5 y 10 para los instantes correspondientes a los step 15 y 22. Visualmente, la distribución es la misma para ambos instantes, pero la escala de valores es diferente. Puede variar el sentido de la corriente, como ha ocurrido en los dos casos tomados.

Los valores numéricos para el gráfico de contorno y para el de vectores son los mismos, ya que, en este tipo de análisis, la gráfica de contorno no es la media cuadrática, sino que es el valor instantáneo como en el caso de los vectores.

Resultados Step 15:



Figura 252. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 15) (Fase U)



Figura 253. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 15) (Fase V)

Página 225 de 267



Figura 254. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 15) (Fase W)



Figura 255. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Fase U)



Figura 256. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Fase V)



Figura 257. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Fase W)



Figura 258. Gráfico contorno y vectores: Caso 10 (Step 15) (Fase U)



Figura 259. Gráfico contorno y vectores: Caso 10 (Step 15) (Fase V)

Página 228 de 267



Figura 260. Gráfico contorno y vectores: Caso 10 (Step 15) (Fase W)

Resultados Step 22:



Figura 261. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 22) (Fase U)

Página **229** de **267**



Figura 262. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 22) (Fase V)



Figura 263. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 22) (Fase W)

Se puede observar, que, en este otro instante escogido, la visualización de la densidad de corriente es la misma, pero cambia el sentido de los conos o flechas.



Figura 264. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 22) (Fase U)



Figura 265. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 22) (Fase V)

Página 231 de 267



Figura 266. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 22) (Fase W)



Figura 267. Gráfico contorno y vectores: Caso 10 (Step 22) (Fase U)



Figura 268. Gráfico contorno y vectores: Caso 10 (Step 22) (Fase V)



Figura 269. Gráfico contorno y vectores: Caso 10 (Step 22) (Fase W)

Tal y como se espera, al aumentar la corriente en la fuente de alimentación, aumenta la corriente en el bobinado, ya que las bobinas reciben directamente la corriente de la fuente. La distribucción a lo largo de cada fase es uniforme y tiene una dirección única a lo largo de la pieza para el instante tomado.

En cuanto a la variación de densidad de corriente entre el bobinado que atraviesa las ranuras del estator y el que queda por los lados, se debe a la diferencia de sección que se ha impuesto a cada fragmento. Esta variación provoca la diferencia de color, ya que la condición está impuesta para que la corriente sea uniforme por la pieza, es decir, para que no se tenga en cuenta un posible efecto piel, por el cual las corrientes se concentran en la capa exterior de los cables.

En la construcción física del devanado del estator, la sección total de las fases es uniforme.

Teniendo en cuenta que esta máquina trabaja con secciones de mm², se puede considerar que los casos intermedios, como el caso 5 tomado para las imágenes, trabaja dentro de un rango entre 1-3 A/mm², que corresponden a una densidad de corriente razonable.

En cuanto a la jaula, analizamos los mismos casos que el apartado anterior, caso 1, 5 y 10, para los mismos instantes, step 15 y 22, ya que el 7 es el mismo que el 15 pero en la posición opuesta, es decir, ambas posiciones son simétricas.

Los resultados se van a mostrar mediante dos imágenes para cada situación, ya que debido a que la jaula es una pieza que gira en el bloque rotor, las posiciones en las que se muestran los resultados son incomodas e insuficientes para poder analizar completamente los resultados.



Figura 270. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 15) (Jaula – vista en perspectiva)



Figura 271. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 22) (Jaula – vista en perspectiva)



Figura 272. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 15) (Jaula – vista posterior)



Figura 273. Gráfico contorno y vectores: Caso 1 (Step 22) (Jaula – vista posterior)



Figura 274. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Jaula – vista en perspectiva)



Figura 275. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 22) (Jaula – vista en perspectiva)

Página 237 de 267



Figura 276. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 15) (Jaula – vista posterior)



Figura 277. Gráfico contorno y vectores: Caso 5 (Step 22) (Jaula – vista posterior)



Figura 278. Gráfico contorno y vectores: Caso 10 (Step 15) (Jaula – vista en perspectiva)



Figura 279. Gráfico contorno y vectores: Caso 10 (Step 15) (Jaula – vista posterior)



Figura 280. Gráfico contorno y vectores: Caso 10 (Step 22) (Jaula – vista en perspectiva)



Figura 281. Gráfico contorno y vectores: Caso 10 (Step 22) (Jaula – vista posterior)

Página 240 de 267

A través de los resultados, se ha comprobado que, en cada estudio, la densidad de corriente, en cuanto a valores numéricos, no varía demasiado, aproximadamente 1A/m². En cuanto a la distribución dentro de un mismo caso, es bastante similar para los dos instantes tomados.

En cuanto a las variaciones entre los tres casos diferentes, se observa que como se esperaba, al aumentar la corriente de la fuente de alimentación, aumenta la densidad de corriente que circula por la jaula. La distribución para los mismos instantes en casos distintos, es muy similar, únicamente varía el número de conos y su color, lo que corresponde a un aumento de intensidad.

Visualmente, se observan unas mayores densidades de corriente en el anillo central de la jaula y en la superficie de algunas barras. En cuanto a los valores obtenidos en la zona de las barras, caso 1 [0.1-0.4 A/mm²], caso 5 [0.3-1.8 A/mm²] y caso 10 [0.7-2.5 A/mm²]. Teniendo en cuenta que la superficie de las barras es de un rango de mm², se puede deducir que los casos estudiados están dentro de rangos razonables. En especial, el caso 5 y los casos próximos a este con un rango intermedio de funcionamiento.

DOCUMENTO Nº3: PLANOS

Índice de Documento 3: Planos

1	Ν	LLADO MÁQUINA COMPLETA
2	Ν	LLADO DE CADA PIEZA
	2.1	NÚCLEO DEL ESTATOR
	2.2	NUCLEO DEL ROTOR
	2.3	EJE
	2.4	BOBINADO DEL ESTATOR
	2.5	JAULA
3	Ρ	ANOS
	PL/	S
	PL/	NO 2: ROTOR
	PL/	IO 3: JAULA
	PL/	NO 4: BOBINADO DEL ESTATOR

PLANO 5: EJE

1 MALLADO MÁQUINA COMPLETA



Figura 282. Vista delantera



Figura 283. Vista superior



Figura 284. Vista lateral

2 MALLADO DE CADA PIEZA

2.1 NÚCLEO DEL ESTATOR



Figura 285. Vista delantera



Figura 286. Vista superior



Figura 287. Vista trasera

Página 245 de 267

2.2 NUCLEO DEL ROTOR



Figura 288. Vista delantera



Figura 289. Vista superior

2.3 EJE



Figura 290. Vista en perspectiva (izq.) y vista delantera (der.)

2.4 BOBINADO DEL ESTATOR



Figura 291. Vista delantera



Figura 292. Vista superior



Figura 293. Vista en perspectiva

Página 247 de 267

2.5 JAULA



Figura 294. Vista delantera



Figura 295. Vista superior



Figura 296. Vista en perspectiva

Página 248 de 267










DOCUMENTO Nº4: PLIEGO DE CONDICIONES

Índice de Documento 4: Pliego de condiciones

1 ES	PECIFICACIONES DE LOS MATERIALES DEL MOTOR OBJETO DEL
PROYI	ECTO
1.1	CHAPAS MAGNÉTICAS DEL ESTATOR: TRAN-COR H2
1.2	BOBINADO DEL ESTATOR: COBRE
1.3	ANILLO Y BARRAS DE LA JAULA: ALUMINIO
1.4	EJE Y ROTOR: MATERIAL1
2 RE	GLAMENTACIÓN Y NORMATIVA APLICABLE AL MOTOR DE INDUCCIÓN
DE JA	JLA DE ARDILLA
3 AS	PECTOS LEGALES

1 ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES DEL MOTOR OBJETO DEL PROYECTO

1.1 CHAPAS MAGNÉTICAS DEL ESTATOR: TRAN-COR H2

Las chapas empleadas en este proyecto, son una de las modificaciones que hacen característico este diseño frente a un motor de inducción común. Normalmente se emplean chapas magnéticas de grano no orientado, pero en este caso se han empleado chapas de grano orientado. Debido a este cambio, el tipo de chapa comercial que se ha elegido está enfocado para aplicaciones de máquinas transformadoras.

Las chapas son de la marca comercial AK Steel, en concreto el modelo H2 CARLITE de la gama TRAN-COR H.

Aislamiento, estas chapas contienen un recubrimiento de aislante de esta misma marca, CARLITE 3, cuyas características corresponden al aislamiento de tipo ASTM A976 C-5.

Factor de laminación y perdidas en el núcleo, los valores se han medido bajo las condiciones de 1.5T y 50Hz y 1.7T y 50Hz.

Propiedad	Va	lor	
Espesor nominal (mm)	0.3		
Densidad (mg/cm ³)	7.65		
Resistividad (Ωm)	50·10 ⁻⁸		
Máximas pérdidas en el núcleo	1.5T	0.74	
(W/kg) a 50Hz	1.7T	0.99	
Factor de laminación (%)	97.3		

Tabla 1. Propiedades generales de TRAN-COR H2 CARLITE (Fuente: [6])

Datos de curva de magnetización, pérdidas en el núcleo y ciclo de histéresis:



Figura 1. Curva de magnetización: Densidad de flujo magnético vs. intensidad de campo magnético (Fuente: [6])

Tabla 2. Curva de magnetización para TRAN-COR H2 CARLITE (Fuente: [6])				
Intensidad campo	Flujo			
magnético (A/m)	magnético (T)			
0	0			
1	0.026			
2	0.08			
3	0.14			
5	0.28			
7	0.56			
10	1			
20	1.5			
30	1.62			

50	1.72
70	1.76
100	1.8
200	1.84
300	1.866
500	1.896
700	1.91
1000	1.92
2000	1.95
3000	1.96
5000	1.97
7000	1.972
10000	1.976



Figura 2. Gráfica de los datos de la tabla anterior (50Hz negro) (Fuente: [6])

Tabla	З.	Datos	de	pérdidas	en	el	núcleo	originales
"Core	los	s" (Fue	ente	e: [6])				

Flujo magnético	Densidad de
(T)	pérdidas (W/kg)
0.1	0.00423
0.2	0.01586
0.3	0.0343
0.4	0.0593
0.5	0.0902
0.6	0.1267
0.7	0.1687
0.8	0.216

0.9	0.269
1.1	0.329
1.2	0.395
1.3	0.468
1.4	0.548
1.5	0.636
1.6	0.737
1.7	0.846
1.8	0.992
1.9	1.222

Los datos de la tabla, se han introducido en el programa tras ser convertidos a las unidades empeladas en este. Pasamos de (W/kg) a (W/m³) mediante la densidad (kg/m³).

Densidad de pérdidas/Core Loss
$$\left(\frac{W}{m^3}\right) = Core Loss \left(\frac{W}{kg}\right) \cdot Densidad \left(\frac{kg}{m^3}\right)$$
 (31)

Flujo magnético	Densidad de
(T)	pérdidas (W/m³)
0.1	0.0323595
0.2	0.121329
0.3	0.262395
0.4	0.453645
0.5	0.69003
0.6	0.969255
0.7	1.290555
	1.6524

Tabla 4. Datos de pérdidas convertidos "Core loss"

0.8	
0.9	2.05785
1.1	2.51685
1.2	3.02175
1.3	3.5802
1.4	4.1922
1.5	4.8654
1.6	5.63805
1.7	6.4719
1.8	7.5888
1.9	9.3483



Figura 3. Ciclos de histéresis (Fuente: [6])

Página 259 de 267

Intensidad campo	Flujo
magnético (A/m)	magnético (T)
6	0.1
6.4	0.2
6.9	0.3
7.2	0.4
7.8	0.5
8.1	0.6
8.8	0.7

9.4	0.8
10.1	0.9
12	1.1
13.1	1.2
14.5	1.3
17	1.4
21	1.5
29.5	1.6
48	1.7

Tabla 5. Datos del ciclo de histéresis de la gráfica

1.2 BOBINADO DEL ESTATOR: COBRE

Este material pertenece a la base de datos de JMAG-Designer y tiene las siguientes características:

Resistividad= $1.673 \cdot 10^8 \Omega m$

Densidad= 8960 kg/m³

1.3 ANILLO Y BARRAS DE LA JAULA: ALUMINIO

Este material pertenece a la base de datos de JMAG-Designer y tiene las siguientes características:

Resistividad= $2.655 \cdot 10^8 \Omega m$

Densidad= 2699 kg/m³

El valor de resistividad se ha sustituidos por: Conductividad= 29841.103 S/m

1.4 EJE Y ROTOR: MATERIAL1

Este material ha sido generado en el programa mediante el creador de materiales. La información de este material se ha obtenido del estudio tomado como base para este proyecto, Anexo 1.



Figura 4. Gráfica de curva de magnetización de Material1 (Fuente: [8])

Tabla 6.	Datos	de la	curva	de	magnetización	de la	1
gráfica a	nterior	(Fuer	nte: [8])	1	-		

Intensidad campo	Flujo
magnético (A/m)	magnético (T)
0	0
80	0.73
90	0.82
100	0.88
150	1.07
200	1.16
300	1.28

400	1.34
500	1.38
700	1.44
1000	1.48
2000	1.56
4000	1.64
7000	1.73
10000	1.78
20000	1.9
40000	2.02

2 REGLAMENTACIÓN Y NORMATIVA APLICABLE AL MOTOR DE INDUCCIÓN DE JAULA DE ARDILLA

UNE-EN ISO 1680:2014

Acústica. Código de ensayo para la medición del ruido aéreo emitido por maquinas eléctricas rotativas. (ISO 1680:2013).

UNE-EN 60034-1:2011

Máquinas eléctricas rotativas. Parte 1: Características asignadas y características de funcionamiento.

UNE-EN 60034-12:2003/A1:2008

Maquinas eléctricas rotativas. Parte 12: Características de arranque de los motores trifásicos de inducción de jaula con una sola velocidad. (IEC 60034-12:2002/A1:2007).

UNE-EN 60034-26:2008

Máquinas eléctricas rotativas. Parte 26: Efectos de las tensiones desequilibradas en el funcionamiento de los motores trifásicos de inducción de jaula.

UNE-EN 60034-28:2013

Máquinas eléctricas rotativas. Parte 28: Métodos de ensayo para determinar las magnitudes de los esquemas del circuito equivalente para motores de inducción de jaula trifásicos de baja tensión.

UNE-EN 60085:2008

Aislamiento eléctrico. Evaluación y designación térmica.

UNE-EN 10107:2014

Chapas y bandas de acero de grano eléctricamente orientado en estado final de suministro.

3 ASPECTOS LEGALES

Aspectos legales por ser propiedad intelectual:

Real Decreto Legislativo 1/1996, de 12 de abril, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Propiedad Intelectual, regularizando, aclarando y armonizando las disposiciones legales vigentes sobre la materia.

Ley Orgánica 15/1999, de 13 de diciembre, de Protección de Datos de Carácter Personal.

- Aspectos legales por ser un Trabajo de Fin de Grado de la Universidad de Cantabria:

El proyecto se va a acoger a la normativa de propiedad intelectual, pero se va a ceder al depósito UCrea de la Universidad de Cantabria, bajo licencia de tipo "*Licencia Creative Commons*".

La información de la normativa de la Universidad de Cantabria sobre los Trabajos Fin de Grado, está recogida en "*Normativa de gestión académica de estudios oficiales de grado*", dentro del "*Título VI: Trabajo de Fin de Grado*".

DOCUMENTO Nº5: MEDICIONES Y PRESUPUESTO

Índice de Documento 5: Mediciones y presupuesto

1	MEDICIONES	266
2	PRESUPUESTOS PARCIALES	266
	CAPÍTULO 1. SOFTWARES DE DISEÑO Y SIMULACIÓN	266
	CAPITULO 2. MANO DE OBRA DEL PROYECTISTA	267
3	PRESUPUESTO GENERAL	. 267

1 MEDICIONES

En este proyecto no se lleva a cabo la construcción física del modelo, únicamente se analiza en un software de simulación electromagnético. Por lo tanto, los únicos gastos del proyecto son la mano de obra del proyectista y la licencia y servicio de mantenimiento de los softwares utilizados.

Coste softwares, este proyecto se ha desarrollado principalmente mediante los softwares de diseño SolidWorks, 2000€/año y de simulación electromagnética JMAG-Designer 3000€/año, junto con su servicio de mantenimiento 2700€/año. Las licencias y el coste de mantenimiento se venden para mínimo 1 año, es decir, pagos anuales.

Horas de trabajo: El proyecto se ha desarrollado durante 20 semanas (Aproximadamente 5 meses), con una dedicación de 20h/semana.

$$Total horas de trabajo = 20 semanas \cdot \frac{20 h}{semana} = 400h$$

Precio por hora de trabajo: El proyectista con nivel de formación graduado tiene un salario de 1828.19€/mes con un pago de 14 pagas cada 12 meses. Se supone que el salario es para una jornada de 8h, 5 días a la semana.

 $Total \ precio \ por \ hora = \frac{1828.19 \notin}{mes} \cdot \frac{14 \ pagas}{12 \ meses} \cdot \frac{1 \ mes}{20 \ días} \cdot \frac{1 \ día}{8 \ h} = \ 13.33 \notin/h$

2 PRESUPUESTOS PARCIALES

ld.	Unidad	Descripción	Medición	Precio unitario (€)	Precio total (€)
2.01	Año	Licencia anual de SolidWorks 2016	1	2.000	2.000
2.02	Año	Licencia anual de JMAG- Designer 16.0	1	3.000	3.000
2.03	Año	Servicio de mantenimiento de JMAG-Designer	1	2.700	2.700
Total softwares diseño y simulación:				7.700	

CAPÍTULO 1. SOFTWARES DE DISEÑO Y SIMULACIÓN

CAPITULO 2. MANO DE OBRA DEL PROYECTISTA

ld.	Unidad	Descripción	Medición	Precio unitario (€)	Precio total (€)
1.01	h	Formación, aprendizaje y recopilación de información	50	13,33	666,5
1.02	h	Etapa de diseño geométrico	120	13,33	1.599,6
1.03	h	Etapa de modelización y simulación en computador	80	13,33	1.066,4
1.04	h	Análisis de resultados y comparación con la información recopilada	50	13,33	666,5
1.05	h	Redacción del proyecto	100	13,33	1.333
Total mano de obra proyectista:				5.332	

3 PRESUPUESTO GENERAL

PRESUPUESTOS PARCIALES		TOTALES (€)		
CAPÍTULO 1	Softwares de diseño y simulación	7.700		
CAPÍTULO 2	Mano de obra Proyectista	5.332		
PRESUPUESTO EJECUCCIÓN MATERIAL (PEM)		13.020		
13% Gastos Generales		1.694,16		
6% Beneficio Industrial		781,92		
PRESUPUESTO DE CONTRATA (PC)		15.496,08		
21% IVA		3.254,18		
PRESUPUESTO TOTAL (PT)		18.750,26		

Santander, Julio 2017

La ingeniera: Nuria Fernández Jorrín