

PRIMERA PARTE

3.- ANTECEDENTES

Ya se han presentado estudios realizados sobre el servomotor de flujo axial de imanes permanentes MA-55 que se tomará, para esta primera parte, como geometría base de estudio. Las características de este servomotor se indican en el anexo I.

Las máquinas utilizadas en el presente trabajo son motores eléctricos de inducción. En concreto, su denominador común es el tipo de rotor: conductor y sin elementos ferromagnéticos. Estas máquinas son susceptibles de conseguir la autolevitación o levitación espontánea debido al campo generado por las bobinas externas en el caso de rotor de disco.

Una máquina eléctrica, por su propia esencia, no puede tener cualquier forma, y solo unas pocas, muy simétricas, son adecuadas. Entre ellas se escoge aquellas en la que el rotor es plano (bien como plano rectilíneo largo, bien como disco plano) o cilíndrico.

3.1.- MÁQUINAS

3.1.1.- MOTOR DE INDUCCIÓN DE FLUJO AXIAL

Un motor de inducción de flujo axial es aquel en el que los conductores estáticos generan un campo magnético paralelo al eje axial o eje principal del rotor.

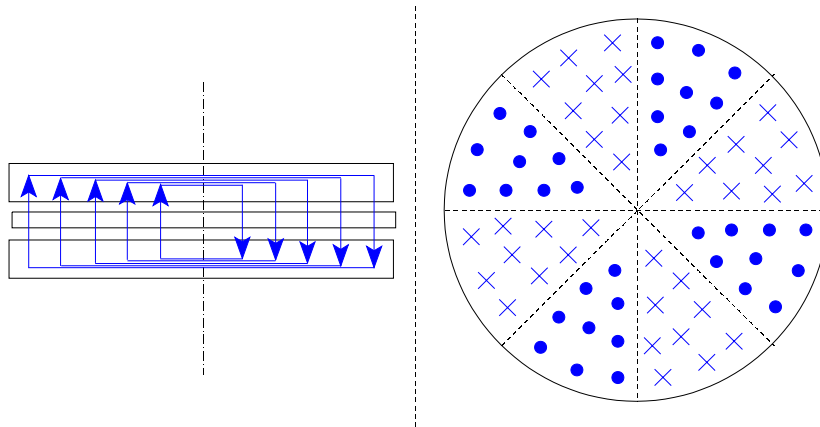
En el caso de un motor con rotor de disco el estator está dividido en dos partes -semiestatores- entre los que se encuentra el rotor. Si el rotor es conductor, toda la separación existente entre los semiestatores es un entrehierro efectivo demasiado grande. Este entrehierro inusual marca las características de este tipo de máquinas [25].

Importancia extrema tiene la distribución relativa de los bobinados estáticos para permitir un buen

ANTECEDENTES

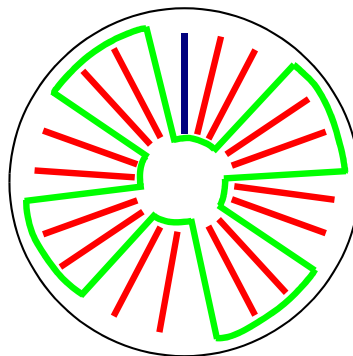
acoplamiento de campo magnético. En este caso también ha de contemplarse el efecto de las cabezas de bobina.

Se han tomado como base experimental los estatores del motor Mavilor MA-55 sustituyendo el rotor de imanes permanentes por otro de aluminio macizo y sin hierro. Existen serios inconvenientes derivados del diseño original con rotor de imán, como la ranura vacía, pero la disponibilidad permite observar muchos efectos positivos.



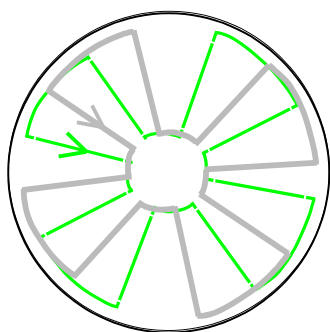
Dibujo 3.1: Esquema básico de la distribución del campo magnético creado por los inductores estatóricos. A la derecha se muestra la distribución en el caso de dos pares de polos efectivos.

Puede darse el caso que unos semiinductores formados por un número de polos magnéticos concreto, al acoplarse entre si, el número de pares de polos efectivos sea diferente.

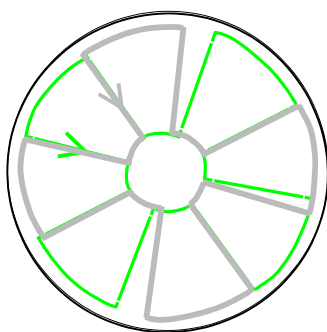


Dibujo 3.2: Forma de una bobina en un semiestator de un motor de flujo axial (Cruz de Malta).

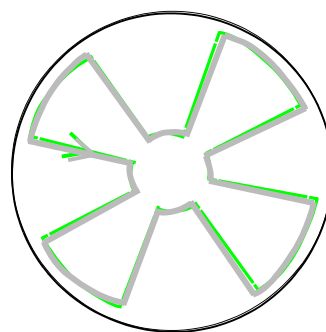
La ranura vacía, en azul, innecesaria en un motor de inducción es una reminiscencia del diseño con rotor de imanes permanentes. Así se disminuye el cosido magnético de las ranuras estatóricas por parte de los imanes rotóricos.



Dibujo 3.3: Distribución relativa n° 1 entre bobinas de los semiestatores.



Dibujo 3.4: Distribución relativa n° 2 entre bobinas de los semiestatores.



Dibujo 3.5: Distribución relativa n° 3 entre bobinas de los semiestatores.

La posición relativa entre los semiestatores produce diferentes características del motor. Las posibilidades de conexión dan un número de polos magnéticos para cada una de las conexiones.

La conexión entre los bobinados de ambos semiestatores puede ser en serie o en paralelo. La conexión en paralelo presenta posibilidades desde el punto de vista de la autoestabilización o de la levitación.

Uno de los inconvenientes del rotor propuesto frente a los motores de inducción estándares es el bajo rendimiento. Este inconveniente pasa a un segundo plano cuando se trata de una aplicación concreta en la que los motores estándares no dan un buen resultado.

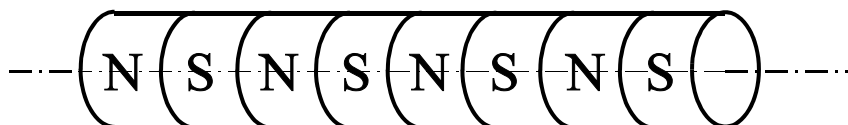
Se está explorando la aplicación para superconductores o de estatores excitados con alta frecuencia en los que los citados inconvenientes se minimizan.

3.1.2.-MOTOR LINEAL TUBULAR

El autor ha colaborado en el estudio de un nuevo material magnético dulce que se quería utilizar en la construcción del prototipo P-1. Se ensayó con una geometría magnética mucho más simple: motor lineal tubular [10]. Los mediocres resultados magnéticos obtenidos desaconsejan su utilización. Se incluyen, no obstante, los principales resultados y caracterización en la que participó muy activamente el autor.

E. R. Laithwaite [1] define el motor de inducción lineal como “una máquina rotativa convencional, la cual ha sido seccionada a lo largo de un plano axial y luego desarrollada a fin de conseguir una estructura plana, que a su vez es capaz de conseguir un movimiento de traslación lineal sin usar ningún mecanismo convertidor del movimiento rotatorio en lineal”. Un motor lineal es una secuencia de polos magnéticos que se desplazan a lo largo de un eje. Este eje sería por el que se movería el rotor del motor.

En el caso de querer tener un motor lineal tubular, hay que conseguir que, a lo largo del eje, con el paso del tiempo, tenga lugar una la secuencia de polos de campo magnético. Hay que tener en cuenta que en una posición concreta del eje, el polo que corresponde a esa posición en un instante dado, existe en toda la circunferencia contorno del eje del motor:



Uno de los inconvenientes de este tipo de motor es que tiene generalmente un único semiestátor, las líneas

de campo magnético tienen un camino de elevada reluctancia y el rendimiento de la máquina es bastante bajo. Por este motivo las aplicaciones de este tipo de motores son casos particulares en los que los motores convencionales no dan una solución satisfactoria [10].

3.2.- MATERIALES

Las máquinas con las que se va a trabajar pueden estudiarse desde varios puntos de vista ya que están formados por un mínimo de cinco circuitos estrechamente vinculados entre sí aunque parezcan independientes: circuito eléctrico, circuito dieléctrico, circuito magnético, circuito mecánico o de soporte de elementos, circuito térmico y, si es necesario, circuito hidráulico de refrigeración.

3.2.1- MATERIALES CONDUCTORES

Para formar el circuito eléctrico se va a utilizar conductor de cobre (en chapa o tubo hueco) o aluminio. El tipo de cobre es cobre electrolítico comercial con un contenido mínimo de cobre del 99.9%. Presenta una elevada resistencia a la rotura y buenas condiciones de ductilidad y maleabilidad, al estar recocido. Las características de este material son:

Densidad:	$d = 8.89 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Resistividad:	$\rho = 1.77 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$
Punto de fusión:	$T_f = 1083 \text{ }^\circ\text{C}$
Calor específico:	$c = 393.5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

3.2.2- MATERIALES MAGNÉTICOS. CHAPA MAGNÉTICA

Los materiales magnéticos se dividen en dos grandes grupos [7], los magnéticamente blandos o dulces y los duros.

Los materiales duros son los que presentan una inducción remanente y se utilizan para fabricar imanes. En el caso que nos ocupa nos interesan más los materiales blandos. Requisitos:

- Disponen de gran permeabilidad magnética relativa μ que permite obtener una alta inducción magnética B con un bajo número de amperios-vuelta.
- Presentan mínimas pérdidas por histéresis o por corrientes de Foucault.
- Poseen propiedades magnéticas estables.

Ejemplos de materiales magnéticamente blandos y características:

- Se utilizan como conductores magnéticos en máquinas eléctricas y en núcleos de transformador.
- Hierro electrolítico en polvo: Se emplea para fabricar piezas magnéticas sinterizadas. Se fabrica de forma similar a como se hace con las cerámicas. Pureza del 99.95%
- Hierro carbonillo: Se obtiene en forma de polvo. Se sinteriza a 1200 °C para fabricar piezas. Tiene una pureza del 99.95%
- Acero electrotécnico en chapas: es el material más utilizado en máquinas eléctricas y transformadores. Se le añade silicio con dos finalidades, una es elevar las características magnéticas y de esta forma reducir las pérdidas por histéresis, la otra es aumentar la resistividad del producto final disminuyendo las pérdidas por corrientes parásitas. El espesor de las chapas varía entre 3 y 5 décimas de milímetro.
- Permalloy: Es una aleación de hierro (entre el 10% y el 18%) y níquel (entre el 30% y el 80%), el resto lo componen Cr, Mn, Mb, Cu... se fabrica en forma de chapa y presenta una elevada permeabilidad magnética ($\mu \cdot 2.0 \cdot 10^7 \text{ H/m}$).

ANTECEDENTES

- Alsifer: Aleación de aluminio (5.6%), silicio (9.5%) y hierro (resto). Mecánicamente débil tiene como ventaja la alta permeabilidad magnética ($\mu \cdot 1.1 \cdot 10^7$ H/m) y elevada resistividad ($\rho = 0.81 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$). Se utiliza en núcleos para instalaciones de alta frecuencia.
- Permendur: aleación de cobalto (50%), vanadio (1.8%) y hierro (resto). Se utiliza en núcleos de electroimanes.

3.2.2.1- Resina con polvo de hierro

A partir de polvo de hierro aglomerado con una resina como el poliéster. Permite obtener características magnéticas aceptables y reducir las pérdidas por histéresis y por corrientes de foucault. La permeabilidad relativa es muy baja de momento. Jugar con la granulometría (entre décimas de milímetro y decenas de micra) permite un llenado más eficaz de los huecos intergranulares, de forma similar a lo que se busca en el hormigón al mezclar granos con arenas de granulometrías controladas [23].

3.2.2.1.1.- Medidas de inducción con poliéster con polvo de hierro

Se fabrica un toro de poliéster con polvo de hierro. Para estudiar el comportamiento del conjunto, se colocan dos bobinados, uno actuará de primario por el que se suministrará corriente, de hecho corrientes muy elevadas, y un secundario por el que se tomarán las lecturas de tensión inducida. Se trata de un simple ensayo con el secundario en vacío:

Primario: $N_p=7$. Tubo de cobre hueco de refrigeración, $\phi = 5$ mm.

Secundario: $N_s=23$.

El caudal de refrigeración es prácticamente constante y de $450 \text{ cm}^3/\text{min}$.

La corriente es suministrada por un transformador de corriente alterna que permite obtener intensidades del orden de kiloamperios, TS (se comentará en el capítulo 5).

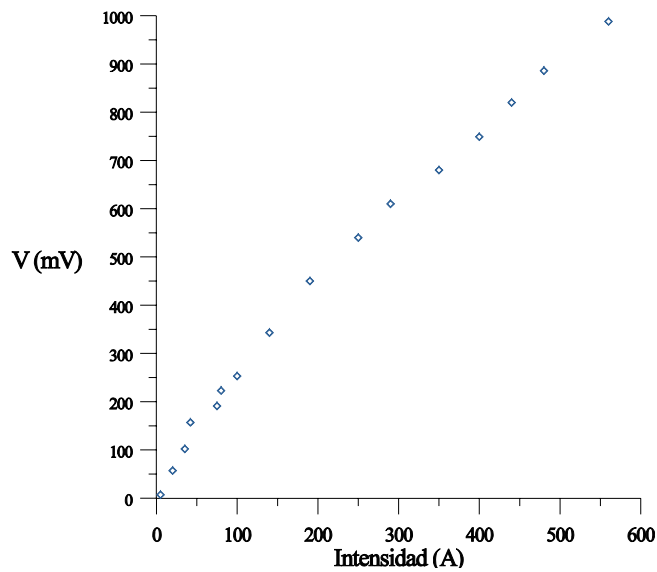
El toro tiene una sección rectangular de $26 \text{ mm} \cdot 18 \text{ mm} = 468 \text{ mm}^2 = 4.68 \text{ cm}^2$

Resultados:

Prueba 1

I_p (A)	5	20	35	42	75	80	100	140
V_s (mV)	7	57	102	157	191	223	253	343

I_p (A)	190	250	290	350	400	440	480	560
V_s (mV)	450	540	610	680	749	820	886	988

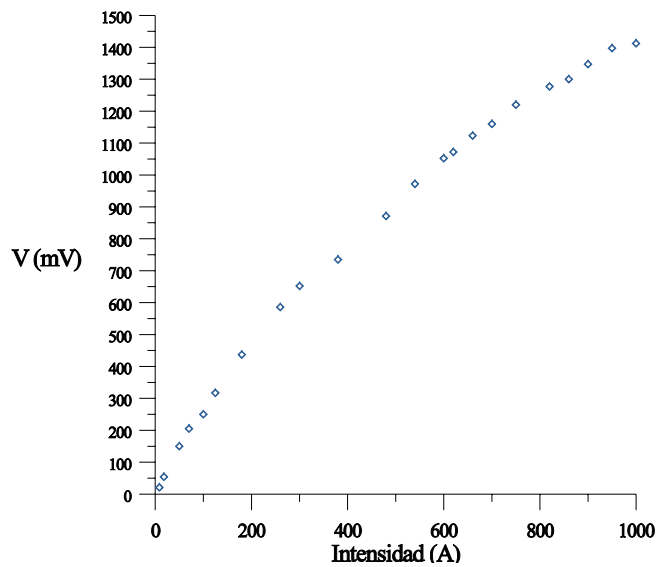


Gráfica 3.1: Primera prueba: Tensión inducida en el secundario frente a la corriente del primario. Valores más bajos.

Prueba 2

I_p (A)	8.5	18	50	70	100	125	180	260	300	380	480	540
V_s (mV)	21	54	150	205	250	317	437	586	652	735	871	972

I_p (A)	600	620	660	700	750	820	860	900	950	1000
V_s (mV)	1052	1072	1123	1160	1220	1277	1300	1347	1397	1412

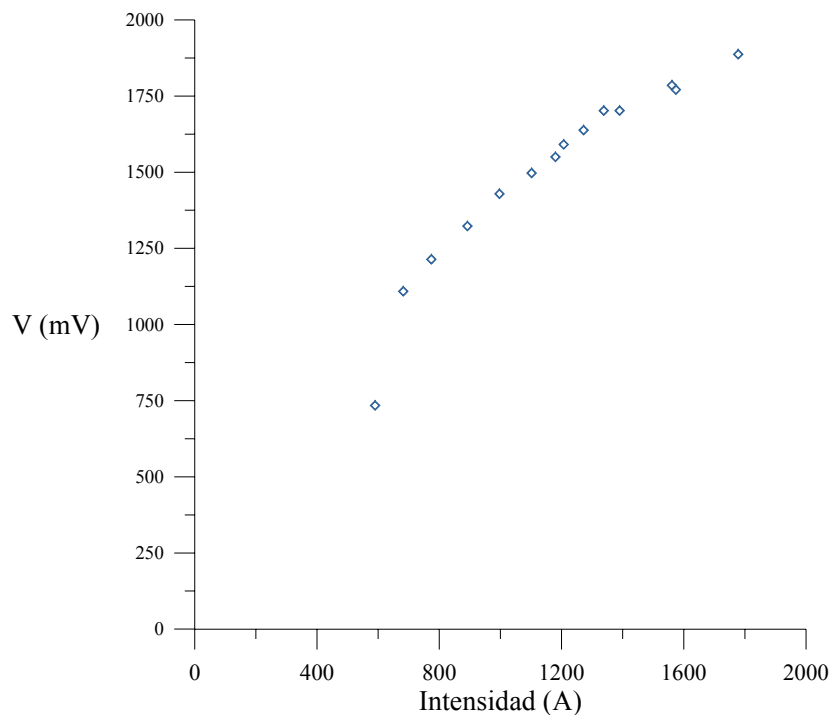


Gráfica 3.2: Segunda prueba. Tensión inducida en el secundario frente a la corriente del primario. Valores medios.

Prueba 3

I_p (A)	590	682	774	892	997	1102	1180
V_s (mV)	734	1109	1214	1323	1429	1497	1550

I_p (A)	1207	1272	1338	1390	1561	1574	1778
V_s (mV)	1591	1638	1702	1702	1785	1771	1887



Gráfica 3.3: Tercera prueba. Tensión inducida en el secundario frente a la corriente del primario. Valores máximos.

De estas curvas, sería interesante obtener dos valores de este material:

- 1.- El campo magnético de saturación.
- 2.- La permeabilidad magnética del material μ_r .

3.2.2.1.2.- Campo magnético de saturación

De las tres curvas, únicamente en las dos últimas se empieza a observar una posible saturación magnética del material. Los valores de saturación se intuyen en las gráficas 2 y 3. Los codos de saturación corresponderían a los puntos: (1000, 1.421) en la gráfica 2 y (1574, 1.771) en la gráfica 3.

La tensión inducida en el secundario es función de la frecuencia, del campo magnético creado, de la superficie por la que pasa el flujo magnético y el número de espiras del secundario:

$$fem = g + N_s \cdot \frac{d\phi}{dt} = N_s \cdot \frac{d(B \cdot S)}{dt} = N_s \cdot \frac{d(B_0 \cdot S \cdot \cos(\omega t))}{dt}$$

$$g_{max} = N_s \cdot B_0 \cdot S \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) \quad , \quad g_{ef} = \frac{N_s \cdot B_0 \cdot S \cdot \omega}{\sqrt{2}}$$

por lo que:

$$B_0 = \frac{\sqrt{2} \cdot g_{ef}}{N_s \cdot S \cdot \omega}$$

de donde se puede hallar el valor B_0 en los codos de saturación:

gráfica 2: $B_0 = 0.59 \text{ T}$

gráfica 3: $B_0 = 0.74 \text{ T}$

Se podría entender como un valor medio de 0.67 T, lo que no es un valor nada despreciable, aunque precisa un valor de H muy superior a la necesaria en la magnetización de plancha magnética..

3.2.2.1.3.- Permeabilidad magnética del material

La permeabilidad relativa se intenta hallar a partir de la permeabilidad total. La permeabilidad total es la pendiente en el origen de una gráfica H-B. De las tres gráficas, se podrán hacer servir las dos primeras, la primera tiene un comportamiento prácticamente lineal.

La Gráfica I-V es equivalente a la representación H-B de donde se obtiene la permeabilidad magnética relativa μ_r del material ya que la relación entre H y B es:

$$B = H \cdot \mu \quad \text{y} \quad \mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

Si el primario se puede considerar en primera aproximación como una bobina ideal, la variación del flujo a través del secundario origina una fem inducida que ya se calculó anteriormente:

$$B_0 = \frac{\sqrt{2} \cdot g_{ef}}{N_s \cdot S \cdot \omega}$$

Y por otro lado, si se tiene en cuenta que:

$$\oint H \cdot dl = N_p \cdot I$$

La relación entre H e I es:

$$H \cdot L = N_p \cdot I, \quad H = \frac{N_p \cdot I}{L}$$

El eje de B es proporcional al de tensión inducida con un factor $\frac{\sqrt{2}}{N_s \cdot S \cdot \omega}$, y el eje de H es proporcional a la intensidad con un factor $\frac{N_p}{L}$.

La constante μ es la pendiente en el origen de la curva H-B. De las dos primeras gráficas, se puede hallar la tangente en el origen:

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{\frac{\sqrt{2} \cdot g_{ef}}{N_s \cdot S \cdot \omega}}{\frac{N_p \cdot I}{L}} = \frac{\sqrt{2} \cdot L}{N_s \cdot S \cdot \omega \cdot N_p} \cdot \frac{g_{ef}}{I}$$

ANTECEDENTES

La relación $\frac{\sqrt{2} \cdot L}{N_s \cdot S \cdot \omega \cdot N_p}$ tiene un valor de $65.65 \cdot 10^{-4}$ s/m.

Mediante regresión lineal se puede calcular la pendiente en el origen en las dos primeras gráficas. En la primera gráfica se utilizan los ocho primeros pares de puntos y en la segunda los siete primeros pares de puntos.

gráfica 1: pendiente: $m_1 = 0.0024 \Omega$
gráfica 2: pendiente: $m_2 = 0.00238 \Omega$

Los valores de μ obtenidos son:

gráfica 1: $\mu = 65.65 \cdot 10^{-4} \text{ s/m} \cdot 0.0024 \Omega = 1.58 \cdot 10^{-5} \text{ T} \cdot \text{m/A}$
gráfica 2: $\mu = 65.65 \cdot 10^{-4} \text{ s/m} \cdot 0.00238 \Omega = 1.56 \cdot 10^{-5} \text{ T} \cdot \text{m/A}$

A partir de estos resultados, los valores de μ_r son:

gráfica 1: $\mu_r = \mu / \mu_0 = 1.58 \cdot 10^{-5} / (4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}) = 12.6$
gráfica 2: $\mu_r = \mu / \mu_0 = 1.56 \cdot 10^{-5} / (4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}) = 12.4$

Estos resultados de la permeabilidad relativa μ_r de la resina de polvo de hierro no son nada alentadores ya que son dos órdenes de magnitud inferior a los de la plancha de hierro, pero tiene por contrapartida la facilidad de producción y la posibilidad de recubrir bobinados complejos con una cierta comodidad.

Una de las ventajas que presenta este tipo de material es el hecho de que los componentes de polvo de hierro que lo componen estén aislados entre sí por la resina. De esta forma las pérdidas por histéresis magnética se reducen drásticamente y permite el funcionamiento a muy altas frecuencias.

Para observar la estrechez observada del ciclo de histéresis, se recurrió a la colaboración de un prestigioso laboratorio industrial especializado en la caracterización de materiales magnéticos dulces. Pertenece a la empresa AMES, dedicada a la sinterización de materiales ferromagnéticos dulces y piezas de precisión. Su director de investigación, el Dr. Juan A. Bas, prestó una valiosa colaboración.

Se tuvieron que construir dos anillos nuevos, de dimensiones adaptadas al magnetómetro existente en AMES ($\phi_{\text{int}} = 50 \text{ mm}$, $\phi_{\text{ext}} = 60 \text{ mm}$, $h = 8 \text{ mm}$). En uno de los anillos se aglomeró el polvo con resina epoxi, en el otro con cola de silicatos. Este último es para disponer de un material que permita trabajar por encima de los $200 \text{ }^\circ\text{C}$ de temperatura, aunque también puede ser válido para resistir el estrés térmico de una inyección de aluminio sobre el núcleo magnético bobinado.

Resultados de la comparación del polvo de hierro (en resina epoxi o en silicatos) realizada en los laboratorios de la empresa AMES. La comparación se realiza respecto al material utilizado en las planchas de hierro (buen ferromagnético) y el aire (mal ferromagnético).

Fe + 3% Si	P. Fe Epoxi	P. Fe Silicatos	Aire
-------------------	--------------------	------------------------	-------------

ANTECEDENTES

Densidad (g/cm ³)	7.45	4.11	3.11	
Permeabilidad relativa (μ_r)	0.85	0.0021	0.002	0.001
Pérdidas a 500 Hz (W/kg)	132	0.617	0.702	0.1
B _{máximo} a 500 Hz. (T)	1.25	0.04	0.03	0.02
H _{máximo} a 500 Hz. (A/cm)	11.81	0.06	0.03	0.05

El estudio de este material o de otros similares para obtener los mismos fines (facilidad de fabricación de un motor a partir del bobinado, permitir trabajar a mayores frecuencias sin pérdidas por histéresis) se aleja del alcance del presente trabajo y de hecho podría dar lugar a una tesis por si sólo.

Una vez descartado el empleo de este material dada su baja permeabilidad, se pasa a plantear el estudio de máquinas eléctricas con núcleos de plancha magnética o incluso macizos, como se verá a continuación.