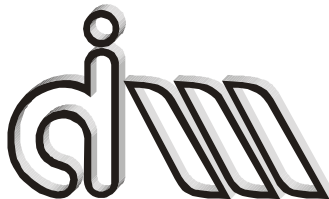


UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Máster de Ingeniería Mecánica y Materiales



Trabajo de Investigación de Máster

**ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE MATERIALES
MAGNÉTICOS PARA ALTAVOCES
ELECTRODINÁMICOS DE BOMBA MÓVIL**

Realizado por: José Martínez Irazo

Dirigido por: Alfonso Cristóbal Cárcel González

Valencia Junio 2012



Resumen

En el presente trabajo se analizan mediante técnicas de simulación por elementos finitos el comportamiento magnético y eléctrico de algunos materiales magnéticos para su aplicación en el motor de un altavoz electrodinámico de tipo profesional. El estudio ha incluido tanto los materiales magnéticos blandos de uso convencional: hierro, acero dulce o fundición dúctil de grafito esférico, como materiales alternativos y novedosos para esta aplicación, fabricados por metalurgia de polvos tales como las aleaciones Fe-Ni, Fe-P, Fe-Si y materiales compuestos por aglomeración, a base de hierro de alta pureza (SMC), en el rango de frecuencias de excitación característicos de esta aplicación.

Mediante el análisis efectuado se valoran las prestaciones de los diferentes materiales y sus efectos sobre los parámetros clave para la calidad y rendimiento del dispositivo. Las mejoras en el factor fuerza-producto de la inducción en el entrehierro por la longitud de hilo de la bobina-son imprescindibles para incrementar la eficacia del motor. Por lo tanto, cualquier solución que permita aumentar la inducción magnética tendrá una repercusión inmediata sobre la eficiencia del altavoz. El otro factor determinante es la reducción de las pérdidas por corrientes de Foucault. A estas pérdidas van asociados otros efectos perniciosos para las prestaciones de este tipo de transductor como es el incremento de la resistencia eléctrica de la bobina, las variaciones de la inductancia con la corriente aplicada y su repercusión en la impedancia total.

Los resultados obtenidos indican que a bajas frecuencias (0.5 kHz), las mejores prestaciones se obtienen con materiales Fe-Ni, Fe-Si y SMC. Al incrementar la frecuencia (5kHz), el material óptimo pasa a ser el SMC, con unas pérdidas relativas comparables a las de fundición esférica, pero con mayores valores de inducción de saturación. Globalmente, tanto las aleaciones Fe-Ni como los compuestos SMC ofrecen ventajas tecnológicas en sus prestaciones. No obstante, su incorporación final como alternativa a los materiales actuales depende también en gran medida de criterios económicos. El circuito magnético puede representar el 60% o más del coste total de un altavoz profesional, por lo que esta variable puede ser crítica al hora de realizar la selección final de materiales para el núcleo.

Abstract

The present work was aimed at analysing, by FEM simulation techniques, the magnetic and electrical behaviour of some soft magnetic materials as potential candidates for the magnetic core in professional electro-dynamic loudspeakers. The study included soft magnetic materials widely used for these devices, such as wrought pure iron, low carbon steels or ductile cast iron, and also some alternative and novel materials for this application, such as sintered Fe-Ni, Fe-P or Fe-Si alloys and non-sintered composite materials (SMC) based on pure iron powders. The analysis was performed over the typical excitation currents and frequency range of these devices.

The analysis allowed the quantification and evaluation of performance of these different materials and their effects on key parameters for quality of the loudspeakers. Improvements in the strength factor-product of the induction in the airgap by the length of the induction coil-are essential to increase the motor efficiency. As a consequence, any solution that increases the magnetic induction has an immediate impact on the efficiency of the speaker. The other important quality factor is the reduction of eddy current losses. These losses are associated with other adverse effects on the performance of this type of transducer, as the increased electrical resistance of the coil, the inductance variations with the applied current and its impact on the overall impedance.

The results indicate that at low frequencies (0.5 kHz), the best performance is obtained with materials Fe-Ni, Fe-Si and SMC. At higher frequency (5kHz), the optimal material becomes the SMC, with relative losses comparable to those of ductile cast iron, but with higher values of saturation induction. On average, both Fe-Ni alloys and SMC materials seem to offer technological advantages in performance. However, their incorporation as an alternative to existing materials also depends largely on economic criteria. The magnetic circuit may represent 60% or more of the total cost of a professional loudspeaker, so this variable may be critical in making the final selection of magnetic core materials.

Resum

A l'actual tesi s'analiza mitjançant tècniques de simulació per element finits el comportament magnètic i elèctric d'alguns materials magnètics per a la seua aplicació en el motor d'un altaveu electrodinàmic de tipus professional. L'estudi inclou tant els materials magnètics tous d'ús convencional: ferro, acer dolç o fosa dúctil de grafit esfèric, com materials alternatius nous per aquesta aplicació, fabricats per metal·lúrgia de pols com ara els aliatges Fe-Ni, Fe-P, Fe-S i materials compostos per aglomeració, a base de ferro d'alt nivell de puresa (SMC), en el rang de freqüències i excitació característic d'esta aplicació.

Mitjançant l'anàlisi efectuat es valoren les prestacions dels diferents materials i els seus efectes sobre els paràmetres de qualitat i rendiment del dispositiu. L'esmillor en el factor força-producte de la inducció en el entreferro per la longitud del fil de la bobina són imprescindibles per a incrementar l'eficàcia del motor. Per tant, qualsevol solució que permet augmentar la inducció magnètica tindrà una repercussió immediata sobre l'eficiència de l'altaveu. L'altre factor determinant és la reducció per les pèrdues per corrents de Foucault. A estes pèrdues van associats altres efectes perjudicials per a les prestacions d'aquest tipus de transductor, com ara l'increment de la resistència elèctrica de la bobina, les variacions de la inductància amb la corrent aplicada i la seua repercussió en la impedància total.

Els resultats obtinguts indiquen que a baixes freqüències (0.5 kHz), les millors prestacions s'obtenen amb materials Fe-Ni, Fe-S i SMC. Conforme s'incrementa la freqüència (5 kHz), el material òptim passa a ser el SMC, amb unes pèrdues relatives comparables a les de fosa esfèrica, però amb valors d'inducció de saturació més elevats. Globalment, tant els aliatges Fe-Ni com els compostos SMC ofereixen avantatges tecnològics a les seues prestacions. No obstant, la seua incorporació final com alternativa als materials actuals depèn també, en gran part, dels criteris econòmics. El circuit magnètic pot representar el 60% o més del preu d'un altaveu de tipus professional, per tant aquesta variable pot ser crítica al'horade realitzar la selecció final dels materials per al nudi.

Índice

1. Introducción.....	7
2. Generalidades.....	9
2.1. Magnetismo y materiales magnéticos.....	9
2.1.1. Clasificación de los materiales.....	10
2.1.2. Imantación y pérdidas magnéticas.....	12
2.1.3. Teoría de los dominios magnéticos.....	12
2.1.4. Pérdidas magnéticas en los materiales ferromagnéticos.....	15
2.1.5. El hierro y sus aleaciones.....	20
2.2. El altavoz electrodinámico.....	22
2.2.1. Descripción.....	22
2.2.2. Efectos por la presencia de corrientes de Foucault.....	26
3. Justificación del proyecto y objetivos.....	31
3.1. Procedimientos.....	32
3.2. Modelo utilizado para la simulación.....	33
3.2.1. Descripción de los elementos constituyentes del motor.....	34
3.3. Descripción del programa del MEF utilizado.....	34
4. Materiales magnéticos actuales en el altavoz.....	39
4.1. Materiales magnéticos alternativos.....	39
4.1.1. Aleaciones bajas en aleantes.....	40
4.1.2. Aleaciones con alto contenido en aleantes.....	41
5. Resultados.....	48
5.1. Pérdidas magnéticas de los materiales.....	48
5.2. Saturación y distribución de líneas de fuerza en el material.....	49
5.3. Valores de inducción en el entrehierro.....	53
5.4. Comportamiento ante las corrientes de Foucault.....	55
5.4.1. Pérdidas por corrientes inducidas.....	55
5.4.2. Variación de la impedancia de la bobina.....	58
5.4.3. Variación de la inductancia de la bobina.....	63



5.5. Variaciones relativas de las pérdidas en los materiales.....	66
5.6. Penetración de las corrientes inducidas en el material.....	71
5.7. Criterios de selección de los materiales.....	76
6. Conclusiones.....	79
Anexo I.....	82
Anexo II.....	84
7. Referencias bibliográficas.....	92

1. Introducción

La posibilidad de cambiar en un componente alguno de sus materiales base no suele darse con frecuencia durante el ciclo de vida de un producto por las desventajas que conlleva en cuanto a actualización de sus propiedades, rediseño o mejora de sus prestaciones o posibles incrementos de costes. Es obvio que tal eventualidad no siempre es fácil de implementar, por lo tanto, en caso de que se pretenda llevar a cabo, el enfoque ha de estar bien ajustado para que el resultado sea positivo y cumpla con las expectativas creadas.

La evolución que los materiales novedosos aporta a los productos, tanto de uso cotidiano como en aquellos para aplicaciones técnicas, son fruto de un estudio o desarrollo encaminado a aportar ventajas de algún tipo, principalmente técnicas, y que resulten verificables o puedan ser apreciadas por el usuario final, y no quedarse en un simple argumento comercial.

Estos nuevos materiales tienen a menudo aplicaciones en campos muy dispares y no siempre contemplados en el momento de su introducción en el mercado. De hecho una gran parte de esa mayor implementación se debe al ejercicio de innovación en el entorno técnico-científico, y esta es la que facilita que su utilización se generalice. El número de posibilidades para nuevos usos será por lo tanto consecuencia del interés en estudiar nuevas aplicaciones y predecir sus resultados con una finalidad determinada y unas herramientas apropiadas.

En el caso de la utilización de un material para el circuito magnético de una máquina eléctrica se acota singularmente la selección para este cometido por el reducido número de materiales aptos para esta aplicación. Por lo tanto no es de extrañar que en todos los casos éste estuviera basado en el hierro más o menos cargado con elementos aleantes que mejoren las propiedades que este posee y al que es imposible sustituir completamente, tanto por las cualidades técnicas como por el coste económico.

Espor ello que los cambios en este material magnético van encaminados sobre todo en reducir las pérdidas magnéticas que podrían lastimar el rendimiento de las máquinas y en perfeccionar la eficiencia de estas. De ahí el hierro al silicio, empleado de forma sistemática en maquinaria eléctrica de todo tipo como transformadores, generadores,

motores eléctricos, etc., o bien de aleaciones hierro-níquel, con mejores prestaciones por la presencia del níquel en una proporción muy alta y, por consiguiente, en la posibilidad de reducción de volumen en sensores y actuadores magnéticos. Cabe destacar asimismo el interés que han despertado los materiales nanoestructurados, como los vidrios metálicos, por las posibilidades de mejora en las propiedades magnéticas.

En el campo del circuito magnético del altavoz, las variaciones han sido menores, quizá en parte por el bajo rendimiento que caracteriza este transductor y por la facilidad de compensarlo con aportaciones de mayores potencias. Con estas se enmascaran las deficiencias de las que adolece como reproductor electroacústico. Bien es cierto que al tratarse de un componente pasivo, con una aplicación de baja responsabilidad, y cuyas insuficiencias se pueden compensar en parte por las correcciones electrónicas y las potencias aplicadas, el cambio del material actual a uno con mejores prestaciones pero con un coste más elevado no se ha dado, debido principalmente a los procesos de obtención requeridos y a los tratamientos posteriores necesarios.

Esto y la facilidad para obtener algunos de los materiales por un proceso basado en la metalurgia de los polvos frente a otros más convencionales -pero que normalmente requieren de tratamientos o mecanizados adicionales- ha hecho que se haya tenido en cuenta para llevar a cabo este trabajo. De hecho, y debido a la geometría y dimensiones de las piezas que forman el circuito magnético del altavoz, su obtención por este procedimiento es sencilla y su coste relativamente bajo. Las tolerancias no representan tampoco ningún problema pues no hay interferencias mecánicas entre las piezas que exijan una alta precisión en sus acabados.

2. Generalidades

2.1. Magnetismo y materiales magnéticos

A menudo el concepto de magnetismo se explica utilizando el modelo de la estructura atómica clásica. En este modelo, los electrones cargados negativamente giran alrededor de un núcleo cargado positivamente. El movimiento de estos electrones puede considerarse igual a una corriente circular, la cual da lugar a un dipolo magnético, de la misma manera que una corriente eléctrica fluyendo a través de un conductor produce un campo magnético.

En un material no magnético, esos dipolos magnéticos están orientados al azar y producen un campo magnético nulo en dicho material. En cambio, en un material magnético, los dipolos se alinean por sí mismos o localmente, en regiones llamadas dominios. Estos dominios están usualmente alineados al azar en el interior del material e igualmente no producen ningún momento magnético neto. En la presencia de un campo magnético externo, los dominios que ya estaban alineados con el campo externo crecen a expensas de los no alineados. En este caso el material presenta un momento magnético neto y se dice que está polarizado en la dirección del campo. A medida que crece este campo, los dominios se extienden progresivamente hasta que no queda ningún dominio por alinear. Se dice que el material ha alcanzado la saturación.

La facilidad con la cual un material magnético puede ser polarizado depende de su microestructura. Igualmente esto afecta a su comportamiento cuando el campo externo es eliminado; los dominios se resisten a volver al estado previo desorganizado, y la polarización residual que queda se conoce como remanencia. Para anular esta polarización, un campo en la dirección opuesta debe ser aplicado; la magnitud de este campo se conoce como coercitividad del material. Esta es una propiedad importante del material, pues su valor indica la "dureza magnética" del material [1]. Los materiales magnéticos blandos utilizados, por ejemplo, en transformadores y en circuitos magnéticos, tienen una coercitividad de unos pocos Amperios por metro. Por el contrario, los imanes permanentes se obtienen a partir de un material magnético duro, término por el que se conoce a aquellos materiales cuya coercitividad excede 1 kA/m , siendo este el límite más bajo para este tipo de materiales. En general, la coercitividad de estos suele ser considerablemente mayor, pudiendo exceder fácilmente los 1200 kA/m .

Este capítulo presenta las bases necesarias al estudio de los materiales magnéticos blandos en el contexto de la optimización y modelización de circuitos magnéticos para altavoces. En efecto, la concepción de este tipo de componente con materiales convencionales obtenidos básicamente mediante mecanización ha sufrido pocos cambios en los últimos años. El propósito que se persigue es el de posicionar los conceptos relacionados a la posible utilización de materiales obtenidos mediante pulvimetalurgia o por otros procedimientos ajenos a los convencionales, a fin de determinar sus ventajas más destacables y definir su aplicación con otros materiales alternativos a los actuales basados en aceros bajos en carbono.

2.1.1. Clasificación de los materiales

Ya se ha mencionado que la función de un material magnético blando en un circuito magnético es la de canalizar el flujo magnético para maximizar la conversión de energía. El conjunto de estos materiales está clasificado según cuatro tipos en función de su comportamiento en presencia de un campo magnético de excitación [2].

La reacción a este campo está determinada por la inducción, que es la cantidad de flujo magnético por unidad de área. La ecuación (1) permite relacionar la inducción al campo magnético:

$$B = \mu_0(1 + \mu)H \quad (1)$$

B inducción magnética (T)

μ_0 permeabilidad del vacío (H/m)

μ susceptibilidad magnética (adimensional)

H campo magnético (A/m)

Se observa que la inducción hallada para un campo magnético dado, es tanto mayor cuanto mayor es la susceptibilidad. Esta propiedad es la más perseguida y explotada durante la realización del circuito magnético de cualquier máquina eléctrica, incluido el propio del altavoz. Sobre la base del comportamiento de un campo magnético de excitación existen cuatro tipos principales de materiales:

- ? Los materiales diamagnéticos
- ? Los materiales paramagnéticos
- ? Los materiales ferrimagnéticos
- ? Los materiales ferromagnéticos

Tabla 2.1 Susceptibilidad magnética de los principales tipos de materiales magnéticos

Tipo de material	Susceptibilidad magnética	Ejemplos
Diamagnético	$\sim -1 \times 10^{-5}$	Cu, Au
Ferrimagnético	~ 3000	FeO, MnO, ZnO
Ferromagnético	50 a 10000	Fe, Ni, Co
Paramagnético	10^{-5} a 10^{-3}	Al, Pt

Los valores típicos de susceptibilidad hallados para estos tipos de materiales, así como algunos ejemplos representativos se presentan en la tabla 2.1

Los materiales utilizados para la industria eléctrica y, en especial, para el altavoz, con una utilización en un rango de frecuencias no superiores a 20 kHz, son de tipo ferromagnético, a causa de su susceptibilidad e imantación a saturación muy altas

En el entorno de la ingeniería eléctrica se prefiere trabajar con la noción de permeabilidad mejor que con la susceptibilidad, definiendo la permeabilidad relativa μ_r (H/m) como:

$$\mu_r = 1 + \chi \quad (2)$$

Según este formalismo, la inducción del campo magnético aplicado es igual a

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (3)$$

μ_r permeabilidad relativa

2.1.2. Imantación y pérdidas magnéticas

Las principales consideraciones durante la concepción del motor del altavoz que se tienen en cuenta son la imantación y las pérdidas magnéticas. Para concebir un altavoz eficiente hay que disponer de un material cuya imantación sea importante para una mínima excitación, que concentre el máximo de energía en el entrehierro y cuyas pérdidas magnéticas sean pequeñas. Las siguientes secciones presentan las nociones teóricas sobre la imantación y sobre las pérdidas magnéticas en los materiales ferromagnéticos.

2.1.3. Teoría de los dominios magnéticos

La teoría de los dominios magnéticos permite explicar los mecanismos responsables de la imantación de los materiales ferromagnéticos habituales. Fue elaborada por Pierre Weiss y presentada en dos artículos en los años 1906 y 1907 [3,4]. Esta teoría estipula que el material está constituido de dominios donde la imantación interna está alineada según una dirección única. Esta imantación en el interior de los dominios es denominada imantación espontánea. Los dominios están separados por paredes cuyo espesor es en los materiales habituales mucho más pequeño que la talla de los dominios. Estas paredes llevan el nombre de paredes de Bloch y representan aquellas regiones donde la orientación de la imantación varía rápidamente.

La formación de dominios magnéticos se puede explicar por la minimización de las sumas de tres formas de energía que son: la energía de anisotropía, la energía magnética almacenada y la energía de intercambio [5]. La energía de anisotropía magneto-cristalina favorece el alineamiento de los momentos magnéticos de los átomos con ciertos ejes cristalográficos del material. La energía magnética almacenada favorece el desalineamiento de los momentos magnéticos. La energía de intercambio es responsable del orden ferromagnético y busca mantener alineados los momentos magnéticos dentro de un dominio. El equilibrio de estas tres formas de energía da lugar a los dominios magnéticos y dicta su tamaño en estado desimantado.

El estado global de imantación del material viene dado por la orientación relativa de la dirección de la imantación de los dominios. En estado desimantado, la orientación de la imantación de cada dominio magnético no es predecible. La disposición de los dominios es tal que la suma de los momentos magnéticos es nula y la imantación global resultante

también lo es. En estado imantado a saturación, la imantación de todos los dominios magnéticos está alineada según una orientación única.

El movimiento de las paredes de los dominios magnéticos, principal mecanismo de variación de la imantación en campo de baja intensidad, se ve afectado por la presencia de defectos que se presentan en forma de precipitados o de dislocaciones en la red cristalina del material, especialmente en los bordes de grano. Estos defectos conportan una reducción de la permeabilidad y un aumento de las pérdidas magnéticas.

El mecanismo de imantación conporta tres fenómenos principales que se producen sucesivamente en función de la intensidad del campo magnético aplicado:

- ? El primer mecanismo de imantación es el movimiento elástico de las paredes de los dominios que se produce en campo de baja intensidad y que representa una imantación espontánea reversible del material. El movimiento de las paredes conlleva un aumento de la energía total del sistema pero no permite salvar la barrera de potencial creada por el defecto donde está anclada la pared; el sistema vuelve luego de manera natural al estado inicial si el campo magnético aplicado se anula.
- ? El segundo mecanismo de imantación es el movimiento irreversible de las paredes de los dominios que permite sobrepasar algunas barreras de potencial. Una vez retirado el campo magnético aplicado, no se vuelve al mismo reparto de dominios que existía previamente. Existe un nuevo estado metaestable que explica la aparición de una imantación mediana nula bajo un campo nulo. A esta imantación se le califica de remanente.
- ? El tercer mecanismo de imantación se produce cuando el material solo se compone de dominios con una componente alineada con la dirección de fácil imantación de los cristales más cercanos a la dirección del campo. El aumento del campo magnético aplicado provoca entonces una rotación de la orientación de la imantación al interior de los dominios para alinearse con el campo magnético aplicado.

La figura 2.1 presenta de manera esquemática el movimiento de las paredes de los dominios magnéticos cuando se aplica un campo magnético externo; la figura 2.1-a representa el estado desmagnetado; la figura 2.1-b representa el crecimiento de los dominios en los que una componente está alineada con el campo magnético aplicado; la transición entre las figuras 2.1-c y 2.1-d representa la rotación de la imantación y la figura 2.1-d representa el estado imantado a saturación.

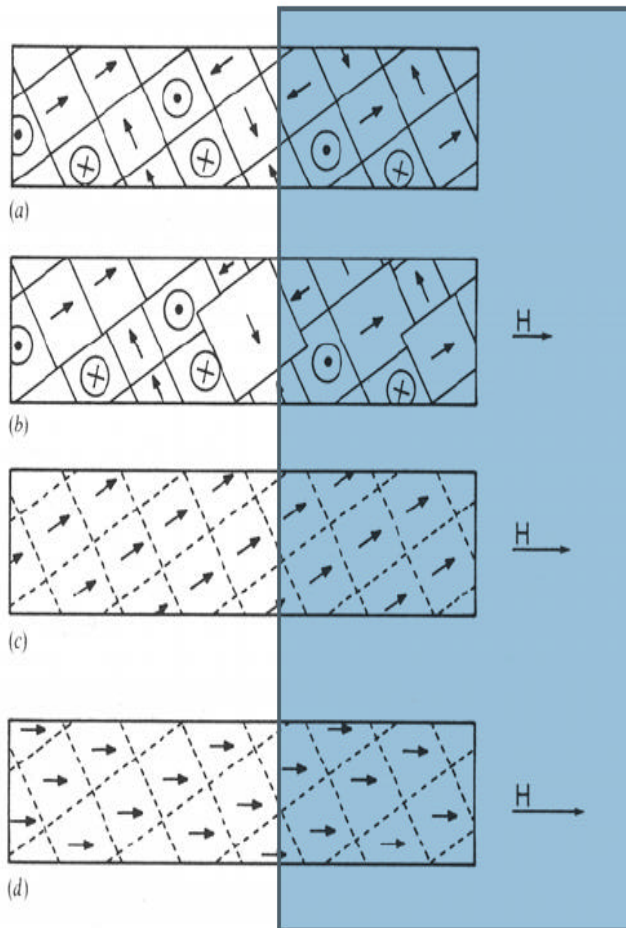


Fig. 2.1. Movimiento de las paredes durante la imantación de un material ferromagnético

La imantación del material presenta un carácter histerético que es debido al desplazamiento irreversible de las paredes de los dominios. La aplicación de un campo magnético alternativo da lugar al ciclo de imantación clásico de un material ferromagnético como el hierro (Fig.2.2).

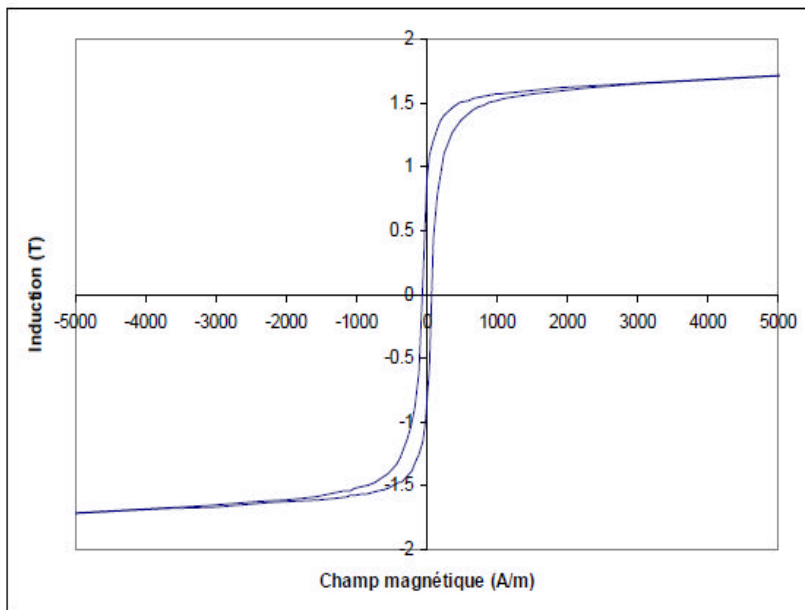


Figura 2.2. Ciclo de imantación del hierro

2.1.4. Pérdidas magnéticas en los materiales ferromagnéticos

Cuando se realiza la medición de un ciclo de imantación tal como el de la figura 2.2, un engrosamiento del ciclo es perceptible al aumentar la frecuencia aplicada. Un tal engrosamiento está representado en la figura 2.3.

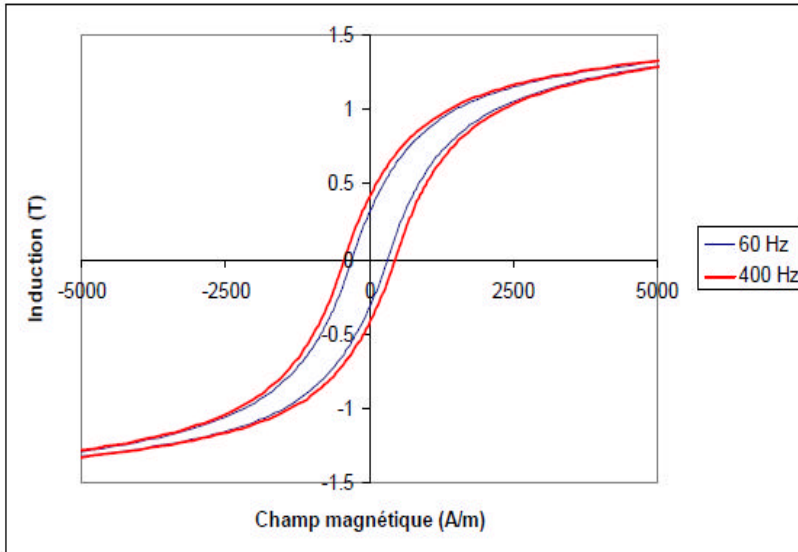


Fig.2.3. Ciclo de histéresis medido en función de la frecuencia para un material poco conductor

El área generada por la característica de imantación $B(H)$ es proporcional al sumatorio de las pérdidas magnéticas disipadas por ciclo de imantación. Para los materiales ferromagnéticos un solo mecanismo de disipación de energía es conocido y permite explicar todos los tipos de pérdidas magnéticas [5]. Se trata de la circulación de una corriente eléctrica en un medio resistivo, y que está regido por la ecuación:

$$\frac{P}{f} = \frac{1}{V} \int_0^s \int_0^t |j(r,t)|^2 dt d^3r \quad (4)$$

P/f pérdidas magnéticas por ciclo y por volumen en (J/m^3)

f frecuencia de trabajo (Hz)

V volumen de material magnético (m^3)

$j(r,t)$ densidad de corrientes inducidas en función de la posición y del tiempo (A/m^2)

s conductividad eléctrica del material (Ω/m)

r posición en la muestra (m)

Las pérdidas magnéticas están generalmente separadas en tres tipos: las pérdidas por histéresis, las pérdidas por corrientes de Foucault y las pérdidas excedentarias. Esta separación arbitraria no está basada en los mecanismos físicos que las engendran, pero más bien en función de las diversas escalas de tiempo y de espacio que les corresponden. La ecuación clásica de separación de pérdidas magnéticas es:

$$P_{tot} = P_{his} + P_{Fouc} + P_{exc} \quad (5)$$

- P_{tot} Densidad de pérdidas magnéticas totales (W/kg)
- P_{his} Densidad de pérdidas por histéresis (W/kg)
- P_{Fouc} Densidad de pérdidas por corrientes de Foucault (W/kg)
- P_{exc} Densidad de pérdidas excedentarias (W/kg)

Las pérdidas por histéresis están relacionadas a las pérdidas debidas a la circulación de las corrientes inducidas al producirse variaciones de la imantación provocadas por el desplazamiento de las paredes de Bloch. Estos desplazamientos son muy rápidos (del orden de 10^{-8} s) y se producen a tirones entre los puntos de anclaje de la pared, lo que les hace parecer independientes de la frecuencia del campo magnético aplicado. La figura 2.4 ilustra esquemáticamente la circulación de las corrientes inducidas en el material durante el movimiento de una pared de Bloch. Estas corrientes asociadas a la conductividad del material dan lugar a las pérdidas por histéresis.

En la figura 2.4, las flechas indican la dirección de imantación al interior de los dominios magnéticos. La circulación de la corriente inducida J_{ind} crea un flujo magnético que se opone a la variación del estado de imantación durante el desplazamiento de la pared.

Las pérdidas por histéresis se pueden calcular con la ayuda de la ecuación:

$$P_{his} = C_{his} f B^x \quad (6)$$

- C_{his} Coeficiente de pérdidas por histéresis
- f Frecuencia de excitación (Hz)
- B Inducción pico (T)
- x Número real, representando la dependencia de las pérdidas frente a la B

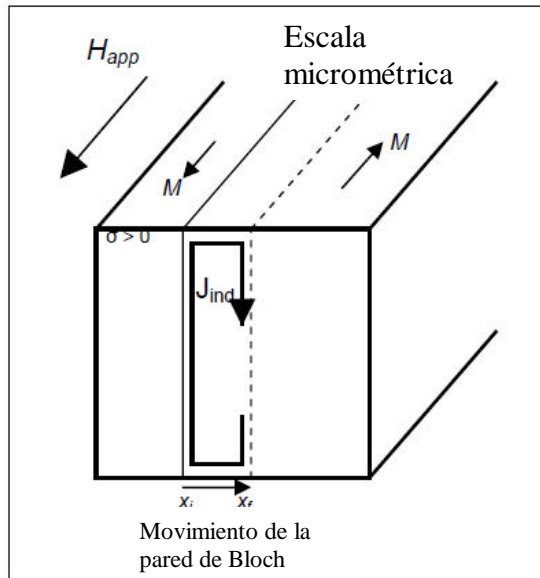


Fig.2.4. Corrientes inducidas durante el desplazamiento de una pared de Bloch

Las pérdidas excedentarias son debidas a la interacción espacio-temporal entre los dominios durante la imantación del material que provoca un aumento local de las pérdidas magnéticas alrededor de las paredes en movimiento. Bertotti demostró que esto es proporcional a la frecuencia con un exponente de 1.5 para una imantación senoidal. La expresión analítica de estas pérdidas es

$$P_{exc} = C_{exc} f^{1.5} B^{1.5} \quad (7)$$

C_{exc} Coeficiente de pérdidas excedentarias

Las pérdidas por histéresis y las pérdidas excedentarias dependen en gran medida del estado cristalino del material, relacionado al historial de deformación y recocido de la muestra y de la cantidad de inclusiones en forma de precipitados en el material.

Las pérdidas por corrientes de Foucault se producen a la frecuencia de excitación a la escala espacial del circuito magnético en los materiales pasivos. Por ejemplo, en el espesor de las chapas en el caso de los materiales laminados o en las partículas de polvo

en el caso de los materiales pulvimetalúrgicos. La variación del flujo magnético ($d\phi$) aplicado al material provoca la circulación de corrientes inducidas que se oponen a la variación del flujo magnético.

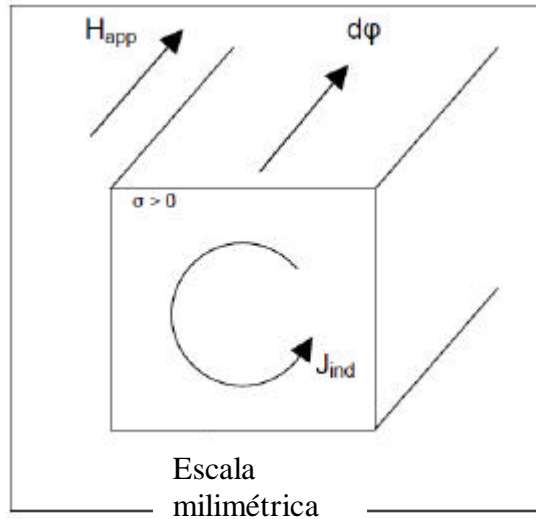


Fig.2.5. Corrientes inducidas durante la variación de la intensidad en el interior de un bloque conductor sometido a un campo magnético alternativo

La figura 2.5 presenta la circulación de corrientes de Foucault (J_{ind}) a escala de un circuito magnético, realizado en un bloque de hierro, durante la aplicación y aumento del campo magnético (H_{app}), y causando una variación de flujo dentro del material. La fórmula analítica de las pérdidas por corrientes de Foucault es

$$P_{fouc} = C_{fouc} f B^2 \quad (8)$$

C_{fouc} Coeficiente de pérdidas por corrientes de Foucault

La separación de las pérdidas magnéticas es artificial, puesto que los diversos componentes de pérdidas no son independientes. Todos los mecanismos de disipación por corrientes inducidas crean un efecto pantalla y disminuyen la inducción resultante en el interior del material magnético. En el caso de las máquinas eléctricas usuales, la

geometría de los circuitos magnéticos se selecciona de manera a limitar este efecto pantalla las pérdidas magnéticas pueden entonces separarse según la teoría descrita

2.1.5. El hierro y sus aleaciones

El hierro no aleado no se utiliza generalmente como material magnético, salvo para máquinas eléctricas de baja calidad. Bien que la permeabilidad del hierro purificado pueda alcanzar varias decenas de millares de veces la del vacío [6], el hierro técnico es débil y sus pérdidas magnéticas son elevadas. Estas malas prestaciones magnéticas son debidas a la presencia de impurezas que dificultan el mecanismo de imanación por el desplazamiento de las paredes de Bloch (ver capítulo 2.1.3). Una pequeña cantidad de impurezas se puede tolerar en la matriz de hierro sin formar precipitados y sin alterar las propiedades magnéticas [7].

2.1.5.1. Efecto de la adición de silicio

Las chapas comerciales que se utilizan para la fabricación de máquinas eléctricas de calidad media a alta se componen de una aleación de hierro y silicio, este último con una concentración de silicio desde un 3% hasta un 0.1% en las chapas de peor calidad [8]. Los otros elementos utilizados en las chapas son el níquel y el cobalto, con un aumento significativo del coste de las materias primas. La adición del silicio aumenta la resistividad eléctrica y disminuye la anisotropía magneto-cristalina. Por otro lado, favorece la precipitación del carbono en forma de grafito, lo que reduce el tamaño de los defectos en la estructura cristalina respecto a la formación de Fe_3C , que son más molestos para el movimiento de las paredes de Bloch. No obstante, también disminuye la inducción a saturación y la conductividad térmica del material y aumenta el efecto magnetoestrictivo.

El incremento de la resistividad limita la presencia de corrientes de Foucault, lo que permite utilizar una chapa más gruesa para un nivel de pérdidas dado. La disminución de la anisotropía magneto-cristalina disminuye la diferencia de permeabilidad según la dirección de imanación de la chapa. La disminución de la inducción a saturación puede conllevar un aumento de la sección del circuito magnético si la inducción de trabajo se ve afectada. La disminución de la conductividad térmica aumenta la superficie de disipación necesaria para evacuar una cantidad determinada de pérdidas, si bien las pérdidas magnéticas son más débiles que para las chapas sin silicio.

El aumento de la magnetoestricción podría conducir a un aumento del ruido generado por las variaciones dimensionales de las chapas, al doble de la frecuencia de alimentación, en los transformadores y en las máquinas eléctricas clásicas. Aun así es difícil cuantificar la importancia de esta fuente de ruido respecto a las generadas por los entrehierros parásitos. En resumen, la adición de silicio en el hierro técnico con proporciones usuales mejora las propiedades mecánicas y magnéticas de las chapas.

2.1.5.2. Influencia del trabajo en frío sobre las características de imantación

El otro factor determinante sobre las propiedades magnéticas del hierro es el estado de su red cristalina [9]. Las dislocaciones de la matriz de hierro disminuyen en gran medida las propiedades magnéticas ya que escavan el movimiento de las paredes de Bloch. La medida del ciclo de imantación del hierro técnico en función del historial de las tensiones aplicadas ha sido estudiado por algunos autores [10].

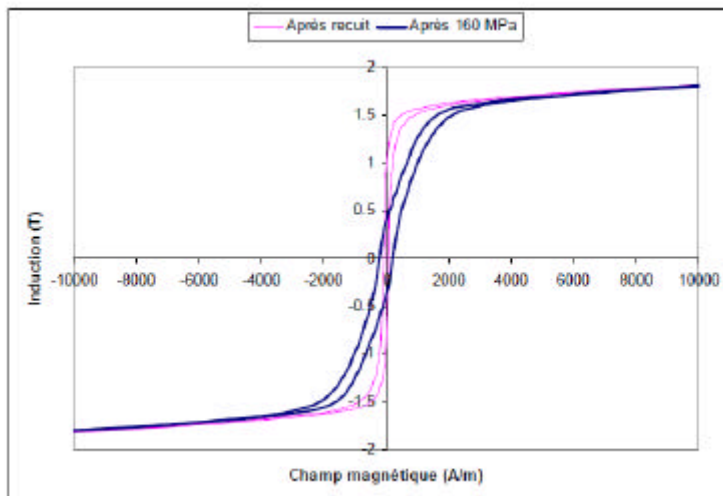


Fig.2.6 Curvas de imantación del hierro en función del historial de tensiones aplicadas

La deformación plástica generada por la aplicación de una presión de 160 MPa sobre una muestra causa un cambio permanente de las propiedades magnéticas. Según este estudio, una presión tal degrada la permeabilidad del hierro técnico en un factor de 3 a una inducción de 1T, y aumenta su fuerza coercitiva de 68 a 200 A/m (Fig.2.6).

2.2. El altavoz electrodinámico

2.2.1. Descripción

El altavoz de bobina móvil, de tipo electrodinámico, es un transductor electroacústico destinado a la reproducción del sonido. Este tipo de reproductor se caracteriza por ser el más difundido por su simplicidad, bajo coste y eficiencia en la respuesta en bajas frecuencias, similar al resto de frecuencias del rango audible. Este último punto es lo que lo diferencia del resto de altavoces presentes en el mercado y le hace ser, por lo tanto, tan popular.

El funcionamiento de este transductor se basa en el desplazamiento de una membrana que radia el sonido de forma directa al aire circundante, mediante la transformación de la energía eléctrica en energía mecánica y esta a su vez, en energía acústica [11]. La fuerza inicial requerida para provocar este desplazamiento se basa en la ley de Laplace, que predice que cuando a través de un conductor eléctrico, situado en el campo magnético estático de un imán, se hace pasar una corriente, se genera una fuerza normal a la dirección del conductor. Esta ley se suele representar por la regla de la mano derecha (Fig.2.7), que indica la dirección de la fuerza a la que se verá sometido el conductor, en función del sentido de la corriente (i) y del campo magnético (B).

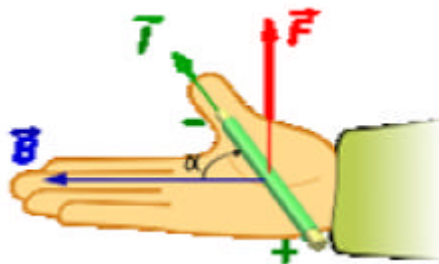


Fig.2.7 Regla de la mano derecha

Para ello la construcción de este reproductor precisa de un imán permanente y unas piezas polares para conducir el flujo magnético hasta un entrehierro donde se ubica la bobina móvil. Esta que va unida a la membrana y que es la responsable de provocar las variaciones de presión en el aire circundante, es recorrida por una corriente alterna de frecuencia y amplitud variables. El sistema móvil, así denominado al conjunto formado por

estas partes se completa con un sistema de retención para impedir que la bobina se salga del entrehierro, vuelva al punto de reposo en ausencia de señal y asegure un desplazamiento sin rozos con las paredes del entrehierro (Fig.2.8).

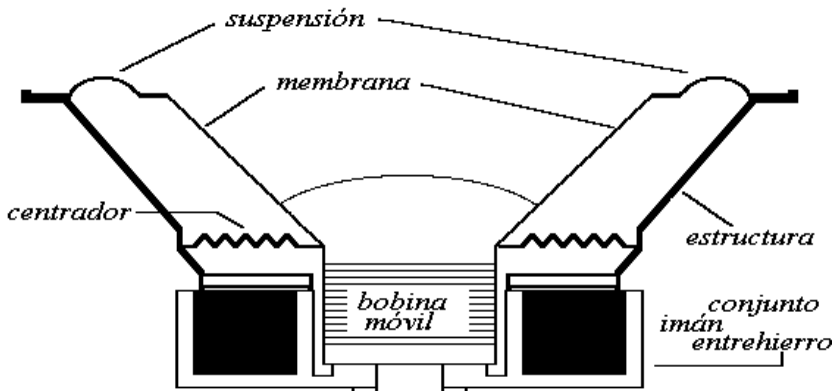


Fig.2.8 Dibujo esquemático del altavoz de bobina móvil

La principal desventaja de este reproductor es su rendimiento. Este, en efecto, presenta por regla general valores inferiores al 4%, por lo que prácticamente toda la energía entregada se disipa en forma de calor. El hecho de maximizar el motor tiene consecuencias directas en el rendimiento del altavoz. De acuerdo con la ecuación (9) este es directamente proporcional a la resistencia de radiación R_r , al cuadrado del producto de la inducción por la longitud del número de espiras presentes en el entrehierro e inversamente proporcional al cuadrado de la impedancia mecánica del equipoje móvil.

$$\eta \approx \frac{R_r * B^2 l^2}{R(R_0^2 + X_0^2)} \quad (9)$$

Una manera de paliar esta falta de sensibilidad consiste en sobredimensionar el circuito magnético, para poder utilizar bobinas móviles de mayores dimensiones. Al poder aplicar una potencia eléctrica mayor, el nivel de presión acústica aumenta si bien el calor generado también es mayor. Este tiene una consecuencia directa en la resistencia eléctrica de la bobina, pues los materiales utilizados para su realización, el cobre y, a veces, el aluminio, poseen un coeficiente térmico positivo, lo que se traduce en un incremento de la resistividad. Al aumentar esta potencia aplicada a la bobina se

reduce, pues los amplificadores que se utilizan siempre trabajan a tensión constante y, por lo tanto, a mayor impedancia de carga menor potencia entregada.

El calor producido en el altavoz no sólo se debe al causado por efecto Joule en la bobina sino igualmente al originado en las piezas polares al generarse corrientes inducidas en el material ferromagnético y disiparse esta energía en forma de calor. Estas pérdidas pueden llegar a ser muy superiores a las ocasionadas en la misma bobina. En algunos casos también hay un incremento del valor inductivo. Este aumento se traduce en una mayor reactancia la cual, sumada a la resistencia eléctrica contribuye igualmente a elevar el valor resistivo total, reduciendo aún más la potencia eléctrica entregada por el amplificador.

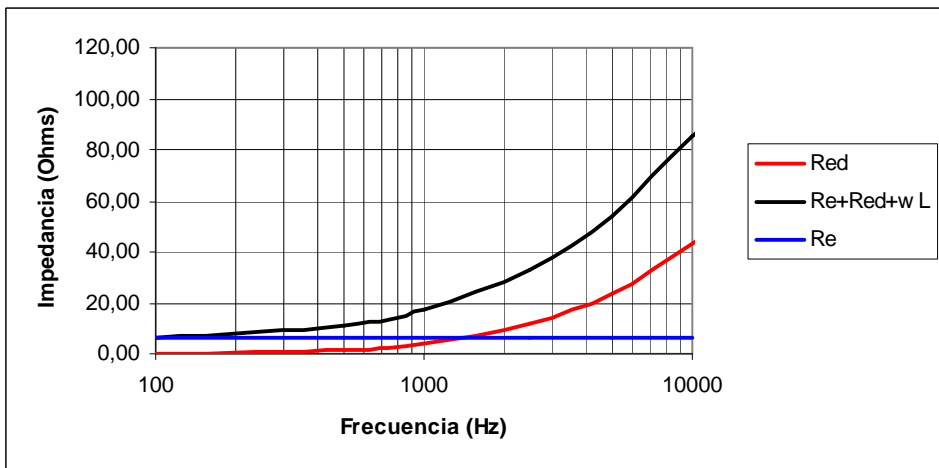


Fig.2.9 Representación de la impedancia del altavoz (negro), el valor de la resistencia de la bobina (azul), y el de la resistencia asociada a las pérdidas magnéticas (rojo).

Estas pérdidas se pueden representar al medir la impedancia de la bobina en función de la frecuencia al retirar de ella la componente reactiva relacionada con la parte imaginaria, la cual es debida a la inductancia de la bobina y la correspondiente a la resistencia eléctrica del devanado. De esta manera sólo queda la contribución de las corrientes inducidas y que se reflejan en la gráfica como una resistencia de valor creciente con la frecuencia (Fig.2.9).

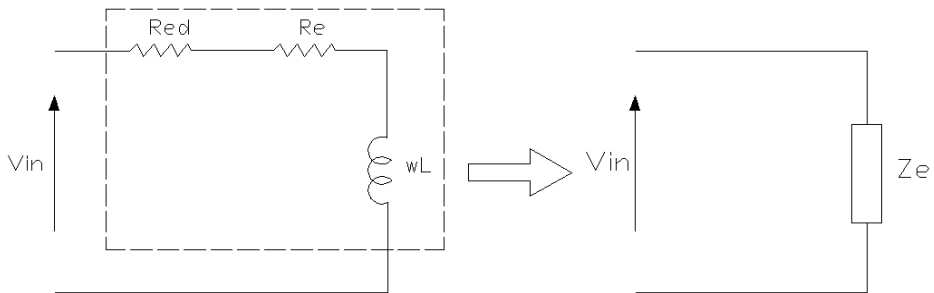


Fig.2.10 Circuito eléctrico equivalente del altavoz, a frecuencias medias y altas

La presencia de esta resistencia que se representa en el circuito equivalente del altavoz como una resistencia en serie con la bobina (Fig.2.10), va a tener otra consecuencia adicional y que se puede intuir de inmediato: el incremento del valor resistivo de la bobina según se desprende de la ec. (10), implica que a igualdad de voltaje aplicado -hay que tener en cuenta que se trabaja con amplificadores de tensión constante- la potencia que le llega al altavoz es menor (11) y, por consiguiente, la potencia radiada también lo será (11).

$$Z_e = \sqrt{R_e^2 + R_F^2 + \omega^2 L^2} \quad (10)$$

- R_F Resistencia debida a las pérdidas por corrientes de Foucault, (Ω)
- R_e Resistencia eléctrica de la bobina (Ω)
- ωL Reactancia de la bobina (Ω)
- Z_e Impedancia de la bobina (Ω)

$$P = \frac{V_{in}^2}{Z_e} \quad (11)$$

- P Potencia eléctrica (W)
- V_{in} Voltaje aplicado a la bobina (V)

$$A_{SPL} \approx 10 \log \frac{P}{P_{ref}} \quad (12)$$

A_{SPL} Variación de la potencia radiada (dB)

P_{ref} Potencia eléctrica de referencia (W)

Esto es especialmente crítico por cuanto se ha venido con entado, que este transductor se caracteriza por su baja eficiencia con lo cual el efecto es doblemente pernicioso.

Por lo tanto se puede colegir que el material empleado en la construcción del circuito magnético va a ser determinante para contener esas pérdidas dentro de un nivel razonable. El circuito magnético tiene como función la de conducir el flujo magnético, y también la de formar el entrehierro donde se hallará la bobina móvil, luego sus propiedades tales como permeabilidad, saturación, y fuerza coercitiva, son de gran trascendencia para las propiedades del altavoz. A esto hay que añadir el factor económico por el peso que representa en el coste final.

2.2.2. Efectos por la presencia de corrientes de Foucault

En el apartado anterior se han descrito los efectos sobre el nivel de radiación sonora cuando se generan corrientes inducidas en el material magnético. Por un lado hay un incremento en las pérdidas disipadas en forma de calor; por otro, el aumento de la impedancia de la bobina notable en frecuencias medias y altas y la consiguiente disminución de la potencia eléctrica aplicada.

Sobre las consecuencias de estos efectos se lleva investigando desde hace ya tiempo, y se ha llegado a conclusiones que son importantes con entar, de manera que este estudio no sólo contemple las características magnéticas y eléctricas asociadas a los materiales sino también las repercusiones que las posibles no linealidades por la presencia de las corrientes inducidas puedan tener sobre la respuesta sonora, tanto cuantitativamente como cualitativamente.

2.2.2.1. Profundidad de penetración de las corrientes de Foucault

Un análisis elemental llevado a cabo sobre el material magnético que forma el motor del altavoz muestra que estas se verán confinadas a una profundidad δ de la superficie, según la relación (13)

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (13)$$

- μ Permeabilidad magnética del material, (H/m)
- σ Conductividad eléctrica del material, (S/m)
- ω Frecuencia angular de la corriente excitadora, (A)

Los valores de permeabilidad y conductividad del hierro permiten deducir que la profundidad de penetración, aún a frecuencias bajas, es relativamente pequeña. Este detalle es interesante resaltar por las implicaciones que tiene sobre el componente inductivo de la bobina y que más adelante se detalla.

2.2.2.2. Análisis del comportamiento resistivo de la bobina

De acuerdo con la ec. (10), se puede presuponer que la variación de la impedancia Z estará dominada por el término ωL en altas frecuencias. En efecto, el componente resistivo puro R_e de la bobina es invariable con la frecuencia mientras que el término R_f , dependiente de la corriente que circula por la bobina, será muy pequeño en altas frecuencias, donde la Z es máxima. Por consiguiente es de esperar un crecimiento de esta última de aproximadamente 6 dB/oct., o 10 dB/dec. Ahora bien, al observar la curva de impedancia de un altavoz real (Fig.2.11), y lejos de la frecuencia natural del altavoz, se puede comprobar un cambio en la tendencia de la curva y que el incremento es más cercano al valor $(\omega L)^{1/2}$, es decir el aumento es de tan sólo 3dB/oct., o de 5 dB/dec, a partir de las frecuencias medias.

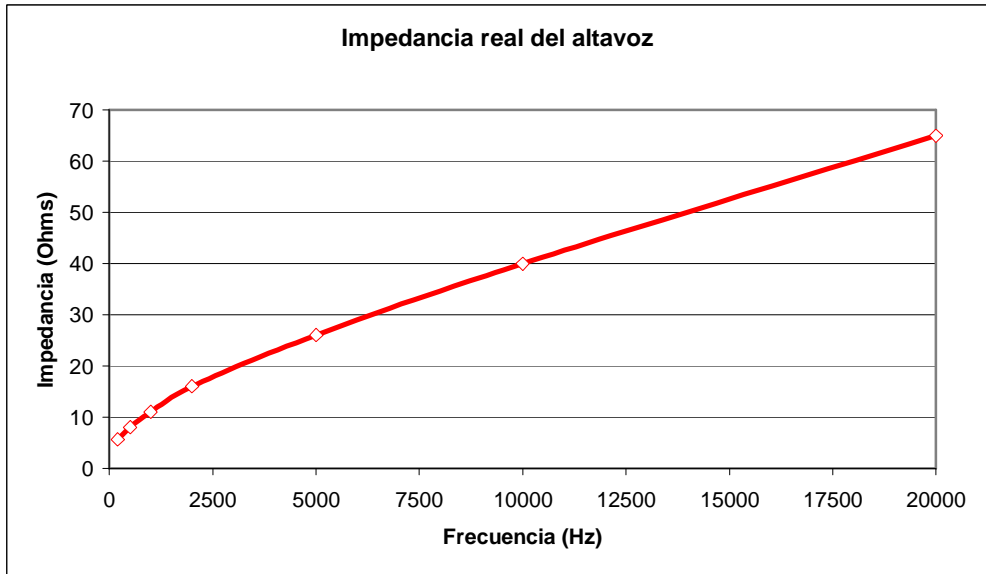


Fig.2.11 Variación de la impedancia del altavoz con la bobina bloqueada

La razón de esta variación significativa es debida precisamente a la presencia de las corrientes inducidas en las piezas polares. Esto ya ha sido descrito por varios autores [12,13], y su justificación se deduce de la dificultad de las ondas electromagnéticas para propagarse dentro de un medio por el cual fluye una corriente eléctrica (Ver anexo 1).

Por lo tanto, y al menos en teoría la presencia de estas corrientes tiene un efecto "positivo" sobre la impedancia del altavoz, al dificultar el incremento a medida que aumenta la frecuencia. Este efecto, a priori, es beneficioso, pues al ser alimentado el altavoz por una fuente de tensión constante, su pérdida de sensibilidad será tanto menor cuanto mayor sea este efecto. Esto se contradice con lo mencionado más arriba, pues se ha determinado que el efecto de estas corrientes es un mayor calentamiento de las piezas polares y su repercusión sobre un posible incremento de la resistividad del material conductor.

2.2.2.3. Influencia de las corrientes inducidas sobre la calidad sonora

Hasta ahora sólo se han descrito los efectos que pueden afectar a la respuesta del altavoz en cuanto a nivel sonoro y banda pasante. Falta valorar las consecuencias de la no

linealidad que estas corrientes puedan provocar en los materiales por cuanto su influencia puede llegar a ser notable, como se ha podido comprobar en las variaciones de la impedancia (Fig.2.11). De hecho, han sido varios los estudios llevados a cabo para confirmar esta hipótesis [14, 15], que muestran el efecto negativo sobre la distorsión armónica en la respuesta del altavoz.

Respercuión en la inductancia de la bobina móvil

La bobina del altavoz presenta una componente inductiva cuyo valor es función inicialmente de las dimensiones y número de espiras que la forman. Este valor es constante e independiente de la frecuencia cuando la bobina está montada "al aire", es decir su coeficiente de autoinducción no está influido por el medio y, por lo tanto, no hay efecto de saturación al incrementar la corriente en la bobina.

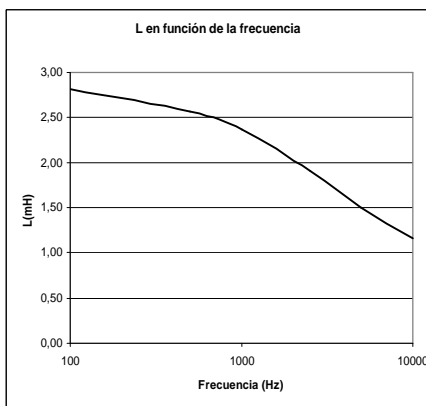


Fig.2.12 Valor de la inductancia en función de la frecuencia

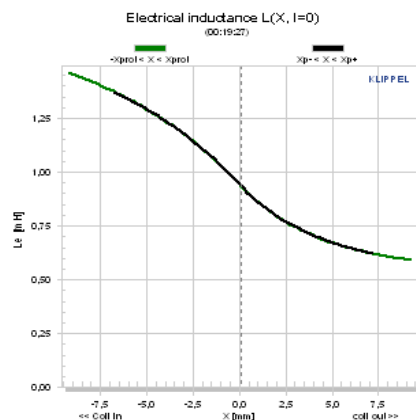


Fig.2.13 Valor de L en función de la posición de la bobina en el entrehierro

Por el contrario, cuando la bobina se halla dentro del entrehierro, parte de ella está posicionada con un núcleo metálico interior y una corona metálica exterior (ver Fig. 2.8). El valor de autoinducción se ve aumentado, pero es variable con la frecuencia (Fig.2.12). Además, este valor no es constante y también depende de la posición de la bobina en el entrehierro (Fig.2.13). A esto hay que añadir el efecto de saturación del material, dependiendo de la corriente aplicada.



Tanto un efecto como otro tiene repercusiones negativas en la respuesta acústica, siendo la causa principal de distorsión en el altavoz por la parte del motor. Como el efecto de la posición de la bobina es esencialmente inherente a aquellos modelos de baja frecuencia donde el desplazamiento es significativo, se ha centrado el estudio a frecuencias más altas donde las variaciones de posición son relativamente bajas o prácticamente nulas, de manera a acotar los problemas derivados a las no linealidades de la bobina a esta última causa.

3. Justificación del proyecto y objetivos

Uno de los pocos medios que permiten mejorar el rendimiento del altavoz es incrementar la eficiencia del motor. Como se ha visto en el capítulo 2.2, una mejora en el factor fuerza – producto de la inducción en el entrehierro por la longitud de hilo de la bobina – lo acrecienta sustancialmente. Por lo tanto, cualquier solución que permita aumentar la inducción magnética tendrá una repercusión inmediata sobre la eficiencia del altavoz.

El otro gran problema común a todas las máquinas eléctricas es la pérdida por corrientes de Foucault. Estas corrientes son causadas por la variación del campo magnético producido por la corriente que circula por la bobina y son inducidas en el seno de las piezas polares que forman el circuito magnético.

Por ello los objetivos que se pretenden conseguir con la realización de este proyecto son dos. El primero es el análisis de la inducción magnética en el entrehierro del altavoz con los diferentes materiales magnéticos estudiados. En efecto, esta variable, cuyas repercusiones tienen gran influencia en las prestaciones del altavoz permite determinar las cualidades de los materiales como conductores magnéticos. Este parámetro es crítico en determinadas aplicaciones por cuanto no siempre es fácil optimizar el valor de la inducción requerida con el volumen propuesto de imán, bien por dificultades dimensionales, bien por razones económicas. Como en cualquier tipo de conductor, la limitación suele estar en los valores de saturación producidos por las dimensiones geométricas, generalmente asociadas al diseño del motor. Esto representa que no siempre es posible alcanzar un valor de inducción dado con un material determinado por la posibilidad de dimensionarlo adecuadamente.

El segundo objetivo son las pérdidas asociadas a las corrientes de Foucault, principal causa de merma en el circuito magnético de cualquier máquina eléctrica, altavoz incluido. A estas pérdidas van asociados otros efectos perjudiciales para las prestaciones de este tipo de transductor como es el incremento de la resistencia eléctrica de la bobina, las variaciones de la inductancia con la corriente aplicada y su repercusión en la impedancia total.

En el caso de que el efecto de las corrientes inducidas sólo tuviera consecuencias sobre el incremento de la resistencia eléctrica de la bobina, es decir, sobre la impedancia global de

esta se podría hasta admitir o, al menos tolerar, por la posibilidad de llevar a cabo las correcciones oportunas mediante una mayor potencia aplicada desde la fuente al altavoz. Otra cosa es que estas consecuencias lleven aparejadas no linealidades que se van a trasladar a la escucha en forma de mayor distorsión, resultando complicado, por no decir imposible, la corrección necesaria para que la respuesta obtenida no difiera sensiblemente de la señal original aplicada a la entrada.

3.1. Procedimientos

Una de las maneras de abordar el comportamiento de los materiales magnéticos descritos en los apartados siguientes para una aplicación como circuito magnético de un motor de altavoz es mediante la simulación por elementos finitos. Este método permite definir las propiedades eléctricas y magnéticas en las condiciones de uso en las que se va a versometido el componente, en especial la potencia de entrada en este caso mediante la corriente que se hará circular por la bobina y la frecuencia que se ha fijado en la zona de trabajo del altavoz, es decir, en el rango audible. Por tratarse de una aplicación en el campo profesional, las corrientes se han delimitado a valores suficientemente representativos comprendidos entre 0.5 y 8 A (valores de pico), las cuales para una impedancia de la bobina de 8 Ω , equivalen a potencias entre 1 y 250 W eficaces. El rango de frecuencias se ha seleccionado de manera a dejar fuera la posible interacción causada en la inductancia de la bobina por el desplazamiento de esta última en la zona de bajas frecuencias. Por ello la frecuencia mínima estipulada ha sido 100 Hz, abarcando el estudio hasta un valor de 10 kHz, estimando este rango suficientemente representativo de la zona de mayor interés para un reproductor de este tipo.

Por lo tanto una herramienta numérica como la descrita a continuación deberá ayudar a definir las ventajas de unos materiales sobre otros en función del criterio de selección que se utilice. Esto redundará en una simplificación de los procesos al no tener que acudir a ensayos laboriosos, de elevado coste para la obtención de los materiales de las partes mecánicas requeridas y de gran complejidad por la dificultad de medición de algunos de los parámetros descritos.

3.2. Modelo utilizado para la simulación

Se ha trabajado con un modelo representativo de un altavoz para bajas y medias frecuencias que escapa de abarcar un amplio rango de reproducción, de manera a poder determinar las prestaciones de los diferentes materiales en una gama de frecuencias propias a la de la zona audible. El tamaño del circuito magnético, y también el de la bobina han sido definidos para que sean acordes a las potencias que se van a aplicar durante el proceso real de trabajo.

El modelo empleado es una representación 2D, con simetría axial. Esto permitirá acortar el coste computacional de manera sensible, especialmente si se compara con un modelo 3D. Los resultados hallados se recogen en el anexo II, mientras que en el apartado de Resultados se utilizarán de forma mayoritaria los resultados gráficos por su facilidad de interpretación y de comparación.

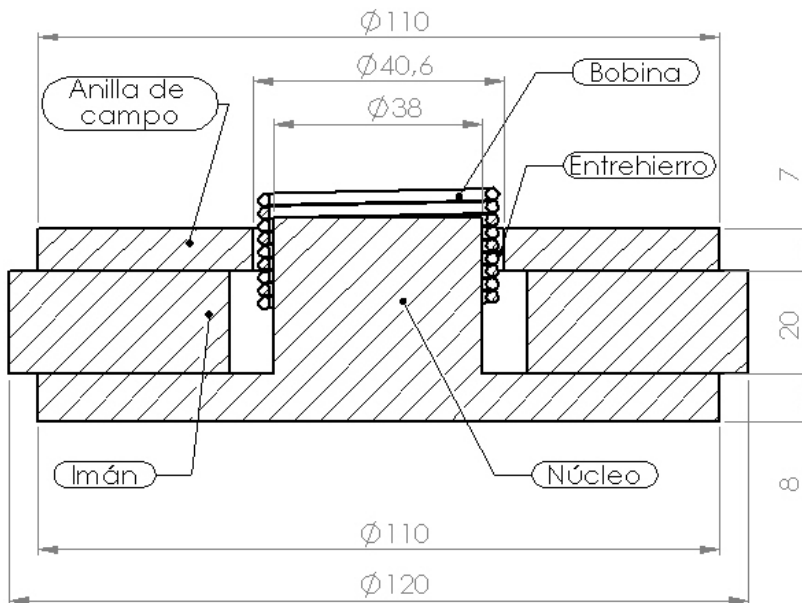


Fig.3.1 Sección del motor de la bobina del modelo utilizado

3.2.1 Descripción de los elementos constituyentes del motor

En la figura 3.1 se presenta el modelo a escala acotado. Se incluyen solamente aquellos componentes que van a intervenir en el estudio: el circuito magnético, compuesto por las piezas polares-anillo de campo y núcleo-el imán, de tipo cerámico, y la bobina formada por un hilo de cobre esmaltado arrollado sobre un soporte no metálico, con 100 espiras repartidas en dos capas, con unos 15 mm de ancho total. La bobina se ha posicionado de forma simétrica dentro del entrehierro, de tal manera que, en su posición de reposo, el punto medio de esta se encuentre situado en el centro geométrico del entrehierro, con un número de espiras sobresaliendo por igual por una y otra parte del entrehierro.

3.3 Descripción del programa del MEF utilizado

Para la simulación y obtención de los datos analizados se ha demostrado de gran utilidad la utilización de una herramienta numérica especializada en el diseño electromagnético, con varias actualizaciones por lo que se ha utilizado la última versión 3.2. La geometría del modelo, del tipo axisimétrico, y planteamiento en dos dimensiones simplifica notablemente las necesidades de memoria y de cálculo del programa.

El programa seleccionado, "FEMM Magnetics" es un software de libre difusión [16], que lleva aplicándose varios años. Este programa está diseñado para solucionar problemas electromagnéticos en baja frecuencia en un dominio bidimensional de tipo planar o axisimétrico. El programa también puede afrontar problemas de tipo magnetostáticos tanto lineales como no lineales de tipo electrostáticos lineales y otros, como los de conducción de calor en estado estacionario.

FEMM está dividido en tres partes:

1. Femm.exe. Este programa es una interfaz de pre y post procesamiento de documento múltiple para los varios tipos de problemas que se pueden solucionar con FEMM. Contiene una interfaz de CAD para la creación de las geometrías del problema propuesto y para definir las propiedades de los materiales y las condiciones de contorno. También permite importar ficheros DXF para facilitar el análisis de geometrías pre-definidas. Las soluciones halladas pueden ser representadas en la forma de trazados de contorno o de densidad. El programa también permite al usuario inspeccionar el campo en puntos arbitrarios y evaluar igualmente un

- número de integrales y trazar valores a lo largo de un contorno definido previamente.
2. Triangle.exe. Divide la región a solucionar en un gran número de triángulos siendo una parte vital del proceso de elementos finitos
 3. Solvers. Tres solvers diferentes según si se trata de un problema magnético, electrostático o de flujo de calor. Cada solver toma un conjunto de ficheros que describen el problema y resuelve la ecuación diferencial parcial de interés para obtener los valores requeridos dentro del dominio de la solución.

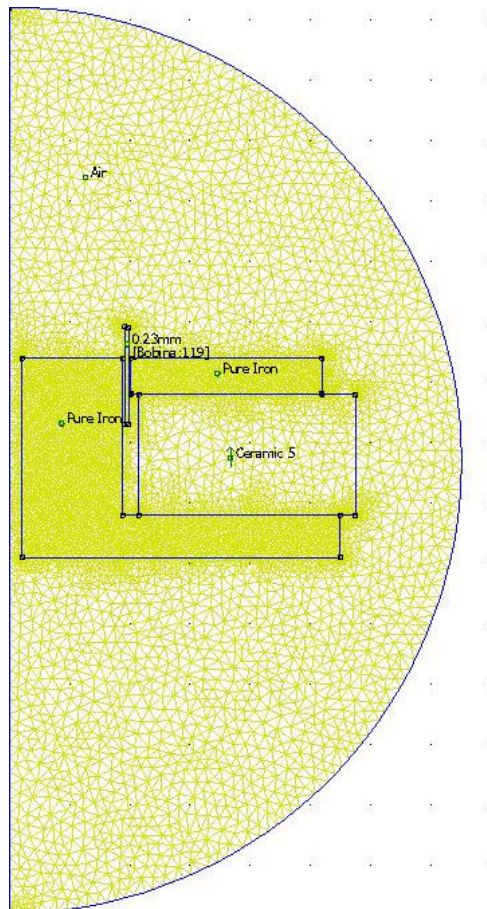


Fig. 3.2 M odelo utilizado para el M EF una vez m llado

FEM II aborda algunos casos límite de las condiciones de Maxwell. Los problemas magnéticos abordados son aquellos que se pueden considerar como ‘problemas de baja frecuencia’, en los que las corrientes de desplazamiento pueden ser ignoradas. Las corrientes de desplazamiento son típicamente relevantes en los problemas de magnetismo sólo a muy altas frecuencias (frecuencias de radio). De una forma similar, el solver electrostático considera sólo el campo eléctrico, mientras el campo magnético es despreciado. FEM II también resuelve problemas de conducción de calor en estado estacionario. El problema de conducción de calor es matemáticamente muy similar al problema electrostático.

En la figura 3.2 se muestra el modelo utilizado. Al tratarse de una geometría de revolución, sólo ha sido necesario representar la mitad del croquis para evitar coste computacional innecesario. Se ha utilizado un tamaño de malla de tipo triangular, apropiado para asegurar un error pequeño.

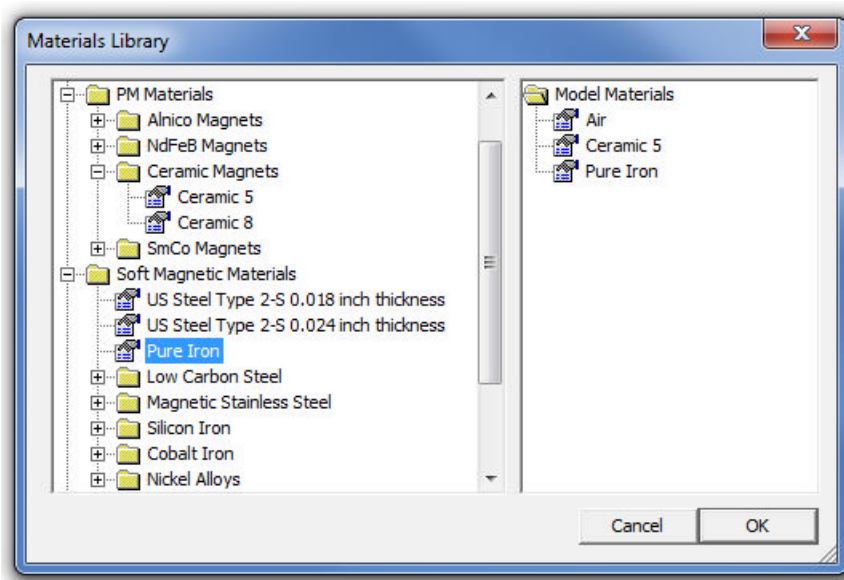


Fig.3.3 Librería de FEM II magnéticos

Para fijar los datos de entrada se han determinado previamente las propiedades de los materiales y se han añadido a la biblioteca incorporada al programa la cual ya viene

dotada con una importante selección (Fig.3.3). Las condiciones de contorno han sido definidas de manera a limitar la región de interés a un dominio razonable, quedando circunscrito dentro de la semicircunferencia que engloba el modelo. Además se introducirán los valores de corriente y de frecuencia a los que se excitará la bobina.

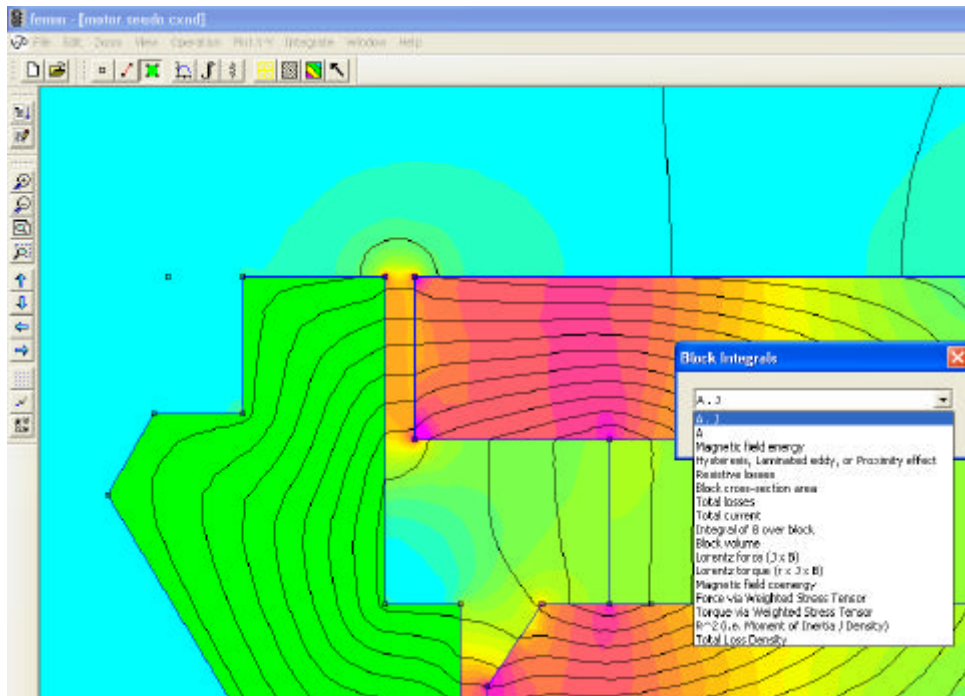
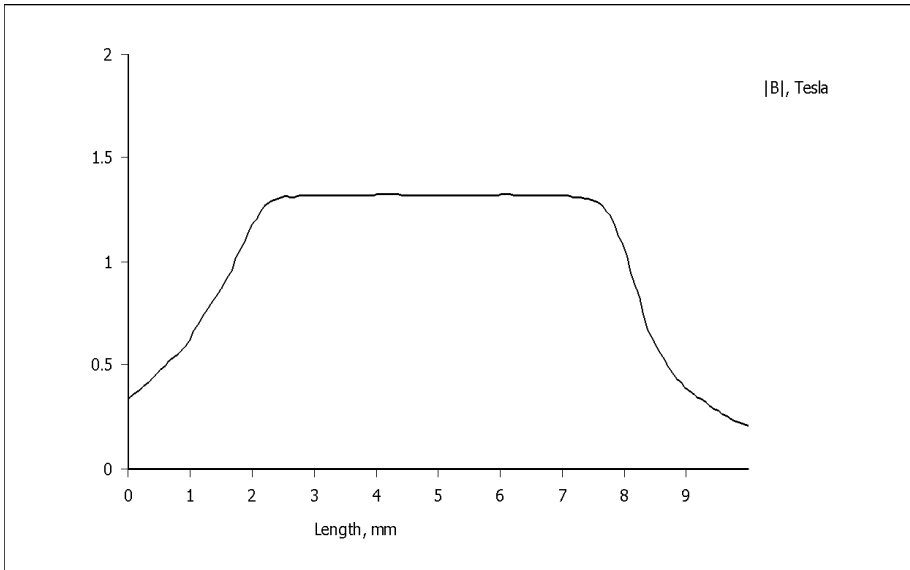


Fig.3.4 Detalle de las variables de salida propuestas por FEM M

Una vez realizada la ejecución del programa el post-procesado permite obtener una gran variedad de datos de tipo magnético, como el campo H , o la inducción B , y también de tipo eléctrico, tales como corrientes inducidas, pérdidas en los materiales, etc., (Fig. 3.4).

En este punto es posible trazar también integrales de contorno, siguiendo un camino definido con anterioridad por el usuario (Fig. 3.5). Se representa en abscisas el recorrido y en ordenadas el valor de la inducción hallada o cualquier otra magnitud relacionada con el campo magnético.



. Fig. 3.5 Representación gráfica del resultado integrado a lo largo de un contorno

4. Materiales magnéticos actuales en el altavoz

La utilización mayoritaria de los aceros bajo en carbono en la fabricación del circuito magnético del motor de un altavoz se justifica principalmente por su buen comportamiento como conductor magnético. Además se trata de un material abundante, de fácil procesamiento y con un coste económico bajo. Está tan fuertemente implantado que es difícil que se cuestione su uso, pues cualquier otra elección lo tendría complicado para competir, por las razones comentadas anteriormente.

Esto no significa que esté libre de defectos, en especial en lo relacionado con las pérdidas magnéticas. Aunque su valor de saturación es el más elevado de los materiales magnéticos, también es cierto que su elevada conductividad eléctrica facilita la formación de corrientes parásitas en su interior, causantes de pérdidas térmicas elevadas, especialmente en frecuencias medias y altas. Soluciones como las empleadas en otros tipos de máquinas eléctricas, como el hierro al silicio en forma de chapas laminadas con grano orientado, no se pueden aplicar aquí por la geometría particular del circuito magnético de este transductor.

Otras opciones como las basadas en aleaciones fuertemente aleadas tendrían una repercusión significativa en el costo, por los aleantes utilizados y porque precisarían de operaciones de tratamiento que encarecerían de forma prohibitiva el componente, aún en aplicaciones profesionales. Hay que recordar que el bajo rendimiento de este transductor se tiene que compensar al menos con la utilización de un número elevado de unidades para cubrir la sonorización de un espacio abierto importante, lo cual multiplica el importe de la instalación. Además, la alternativa propuesta debe ser compatible con el proceso de fabricación, y algunos de los tratamientos de tipo térmico principalmente, no pueden ser llevados a cabo in situ, precisando su transporte a industrias especializadas.

4.1. Materiales magnéticos alternativos

Para el propósito de este trabajo se han seleccionado materiales que presentan propiedades magnéticas interesantes a priori, y cuya obtención de forma mayoritaria mediante el proceso de pulvimetalurgia con polvos bien caracterizados por el fabricante, es relativamente sencillo y de bajo coste. Asimismo, se trata de materiales de los que, en la actualidad, no se conocen aplicaciones en este campo. Si bien algunos de ellos son, de

hecho, materiales ideados para aplicaciones magnéticas su aplicación está restringida a componentes de fuente de energía en sectores como el del automóvil, para micromotores eléctricos, sensores, etc. La selección que se ha llevado a cabo obedece a la necesidad de que la muestra utilizada sea lo bastante representativa en cuanto a lo que hay disponible en el mercado, por este proceso, aunque también se han incluido algunos materiales obtenidos por métodos más convencionales de manera a diversificar las posibilidades.

4.1.1 Aleaciones bajas en aleantes

Entre ellas figura el hierro dulce, pues ha sido el material empleado tradicionalmente en los circuitos magnéticos de altavoces. Este tiene unas propiedades excelentes en cuanto a valor de saturación, permeabilidad, bajo valor coercitivo, etc., es maleable, de fácil mecanización, y es relativamente económico comparado con aleaciones más sofisticadas, lo que lo convierte en el material base para una aplicación que no presenta grandes retos. De hecho el esfuerzo con este material se ha centrado en la manera de mejorar los procesos de obtención de las piezas, pues en muchos casos el enfoque económico ha primado sobre las prestaciones técnicas, especialmente cuando se trataba de fabricar un producto de gran consumo o aun coste relativamente bajo.

Por lo tanto ha sido el hierro, con un contenido escaso en carbono u otras impurezas, y utilizando tratamientos térmicos para el engrosamiento del grano con el fin de facilitar su deformación plástica por embutición en frío, el material más ampliamente utilizado. Al no ser necesaria una maquinaria sofisticada - las operaciones se realizan esencialmente con prensas de gran tonelaje y matrices sencillas - y al utilizar mano de obra poco especializada su implantación y desarrollo en países del sudeste asiático ha permitido una gran difusión en todo tipo de modelos tanto en altavoces de baja gama para instalación en radios y televisores, como en modelos para la industria del automóvil, igualmente, en los modelos de pequeño tamaño para aplicaciones profesionales.

Para los modelos de gran tamaño, con circuitos magnéticos extremadamente voluminosos se ha recurrido también a aceros de bajo contenido en carbono de fácil mecanización, que permiten un procesamiento fácil y rápido con máquinas herramientas tipo CNC. El coste de mano de obra es sustancialmente superior al proceso por embutición, pero se justifica en gran parte por el tamaño de las piezas, las series de fabricación, mucho más cortas y, en especial, las tolerancias y los acabados.

En consecuencia, las aleaciones que se estudiarán serán aquellas que, de forma mayoritaria, emplean el hierro en su forma pura, y a las aleadas con silicio y fósforo. La inclusión del silicio en hierro para chapas magnéticas ha sido de gran utilidad, y lo sigue siendo de hecho, para aplicaciones en máquinas eléctricas, como transformadores, generadores eléctricos, motores, etc., por su gran contribución en la reducción de pérdidas magnéticas. Igualmente, una pequeña adición de fósforo también mejora este comportamiento, siendo la razón por la cual se ha considerado oportuno el estudio de sus propiedades en la aplicación.

4.1.2. Aleaciones con alto contenido en aleantes

Se ha realizado un estudio previo para determinar qué otras aleaciones podrían ser susceptibles de utilizarse en este campo, teniendo en cuenta lo mencionado previamente. Se ha tenido presente que estas puedan aportar ventajas significativas para ser susceptibles de una aplicación sin que por ello se tenga que recurrir a medios de obtención excesivamente sofisticados o que requieran de inversiones no justificables desde el punto de vista económico. También se han descartado materiales que pudieran emplear elementos con un coste elevado, si la proporción en la aleación es alta. Esto podría ser el caso de aleaciones de tipo Permalloy, de gran difusión en aplicaciones como núcleos de transformadores, cabezas grabadoras, etc., pero con una proporción de níquel en ocasiones superiores al contenido de hierro y, por lo tanto, con un coste económico desorbitado para esta aplicación.

No obstante, se ha considerado oportuno estudiar una aleación similar, rica en níquel, cuando el proceso de obtención es por la metalurgia de polvos, pues las tolerancias de acabado permiten evitar el mecanizado necesario en una pieza obtenida por cualquier otro método y su posterior tratamiento térmico, imprescindible para rebajar la fuerza coercitiva del material como consecuencia del proceso. Esto permitirá juzgar las ventajas y los inconvenientes que puede aportar un material en principio muy prometedor para la aplicación en cuestión.

Al margen de esta tecnología, se han contemplado dos alternativas más. La primera tiene un gran interés por tratarse de un compuesto magnético, de tipo composito, formado por partículas de hierro muy puro, aisladas eléctricamente entre ellas [17]. El proceso de obtención es similar a un material sinterizado. Se trataría de un material con un

com portamiento parecido a las ferritas, pero para aplicaciones en bajas frecuencias y de mayor valor de saturación. La segunda alternativa hace uso de una fundición de tipo esférica, en la cual la presencia de un porcentaje alto de carbono es la causa de un bajo valor de saturación, así como de una baja permeabilidad. Estas características parecen ser las responsables de una aplicación escasa de este material para este cometido, si bien con un dimensionamiento apropiado – mayor grosor del circuito magnético – es posible retrasar los valores de saturación y mejorar las prestaciones.

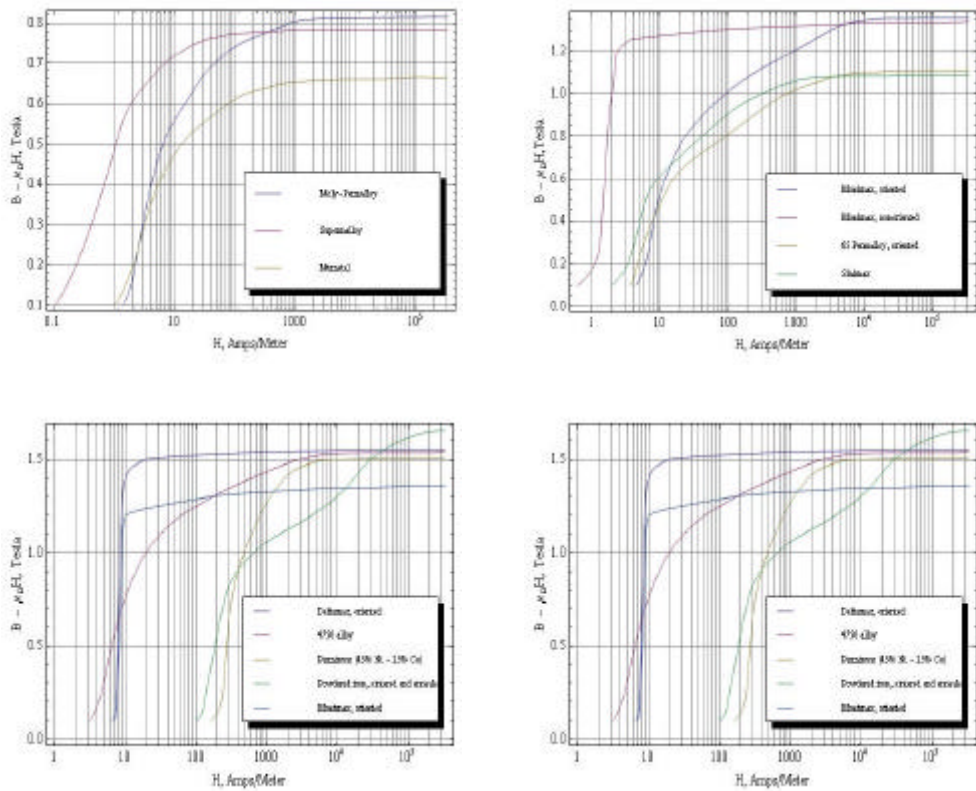


Fig. 4.1_a Curvas de magnetización para distintos materiales magnéticos

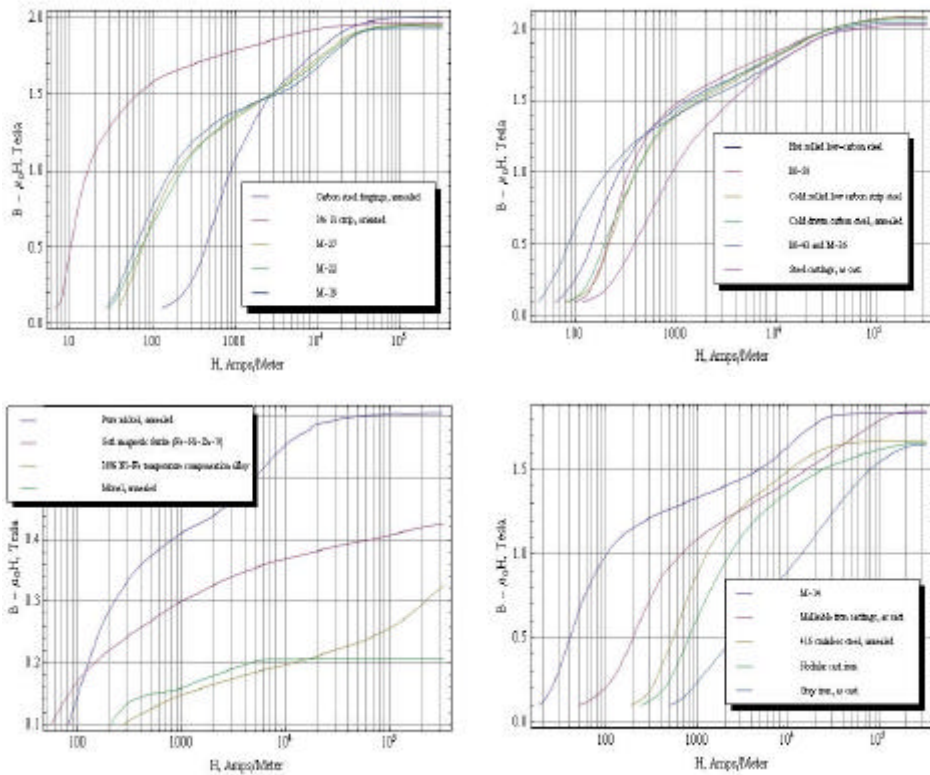


Fig. 4.1_b Curvas de magnetización para distintos materiales magnéticos

En la tabla 4.1 se representan algunas propiedades de los materiales estudiados como son la composición, la densidad y la conductividad eléctrica, mientras que en la figura 4.1_a y 4.1_b, se adjuntan algunas de las curvas de magnetización en corriente continua de materiales magnéticos publicadas por la American Society for Metals [18].

Es fácil advertir la gran diferencia en lo referido a susceptibilidad magnética entre aquellas aleaciones con un alto contenido en níquel, o en cobalto (Fig. 4.1_a), y también el hierro de gran pureza mientras que los aceros al carbono, las fundiciones, algunos materiales ferromagnéticos como el níquel, tiene un peor comportamiento, con una susceptibilidad menor, a pesar de tener un valor de saturación igual o incluso superior a los primeros (Fig. 4.1_b).

Tabla 4.1 Propiedades de los materiales

	Fe-Ni	Fe-Si	Fe-P	Fundición esférica	SM C	AIS 11006	Fe puro
Conductividad eléctrica σ (S/m)	2,22	2,04	4,55	1,9	0,143	5,8	10,44
Inducción a saturación B_{sat} (T)	1,56	1,69	1,58	2,07	1,85	2,5	2,56
Densidad (g/cm^3)	7,9	7,4	7,2	7,2	7,1	7,8	7,8

Mientras en la Tabla 4.2, se reporta la conductividad eléctrica de varios materiales obtenida también de la misma fuente, destacando el níquel puro, los hierros puros o débilmente aleados al carbono, seguidos por los aceros. En el extremo opuesto se encuentran las aleaciones con níquel, los aceros al silicio, las fundiciones tanto grises como esféricas. Algunos materiales como las ferritas, presentan de hecho una conductividad nula debido a la composición, formada por óxidos y materiales no conductores. Estas no son aptas para esta aplicación por su bajo valor de saturación, y si se utilizan para aplicaciones de alta frecuencia debido especialmente a su baja conductividad.

En esta lista no están contemplados los vidrios metálicos que, aun presentando una saturación magnética no tan buena como la de los elementos puros, la falta de una estructura cristalina puede ser una ventaja importante. En particular, las aleaciones amorfas tienden a presentar una baja coercitividad porque no hay límites entre los granos cristalinos que impidan el movimiento del campo magnético y porque no hay anisotropía magnética cristalina. Además, si bien los vidrios metálicos son eléctricamente conductores, su resistencia al flujo de corriente es generalmente más grande que la de las aleaciones cristalinas. Esto ayuda a minimizar las pérdidas de corriente que ocurren internamente.

Tabla 4.2. Conductividad eléctrica de algunos materiales magnéticos

Material	Conductivity, M S/m
Supermendur	2.61
Vanadium Permendur	2.61
Pure iron, annealed	10.29
Ingot iron, annealed	10.15
Hot rolled low-carbon steel	8.41
M-50	5.51
Cold rolled low-carbon strip steel	8.41
Cold drawn carbon steel, annealed	8.41
M-43 and M-36	3.19
Steel castings as cast	6.20
Carbon steel forgings annealed	8.41
3% Si strip, oriented	2.03
M-27	2.03
M-22	2.03
M-19	2.03
M-14	1.74
Malleable iron castings as cast	1.9
416 stainless steel, annealed	1.74
Nodular cast iron	1.9
Gray iron, as cast	1.1
Deltamax, oriented	2.08
4750 alloy	2.08
Perm Invar (45% Ni-25% Co)	5
Powdered iron, sintered and annealed	1
Monimax, oriented	1.45
Monimax, nonoriented	1.45
65 Perm alloy, oriented	2.32
Sinimax	1.16
78 Perm alloy	2.32
Moly-Perm alloy	1.74
Superm alloy	1.74
Mumetal	1.74
Pure nickel, annealed	13.34
Soft magnetic ferrite (Fe-Ni-Zn-V)	0
30% Ni-Fe temperature compensation alloy	2.03
Monel, annealed	2.08

En las figuras 4.2 a 4.7 se han representado las gráficas de magnetización de los materiales magnéticos con los que se ha trabajado, suministradas por el propio fabricante.

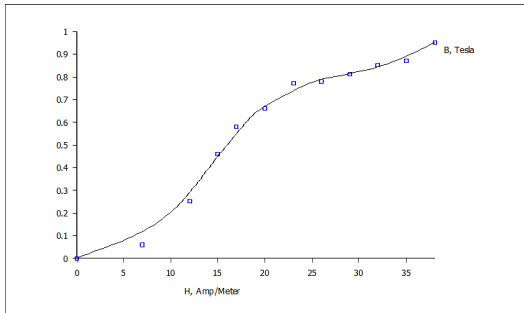


Fig.4.2 Magnetización del Fe-Ni sinterizado

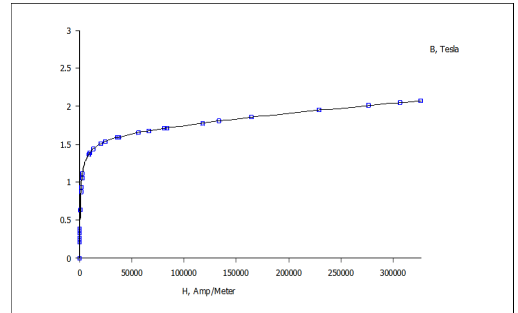


Fig.4.3 Magnetización del Fe-Si sinterizado

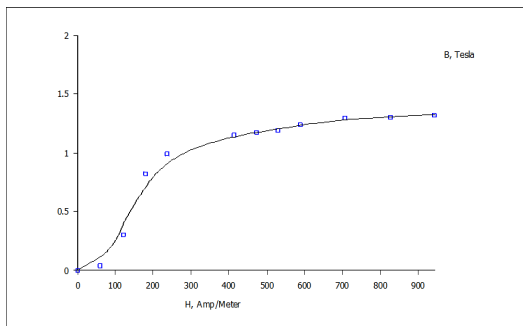


Fig.4.4 Magnetización del Fe-P sinterizado

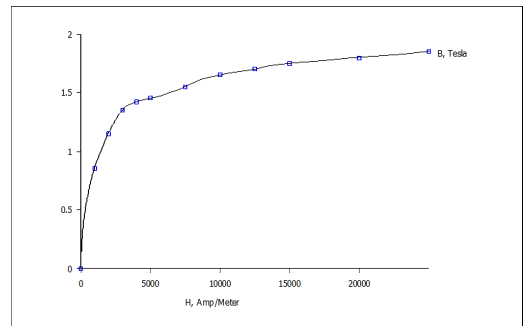


Fig.4.5 Magnetización del SM C

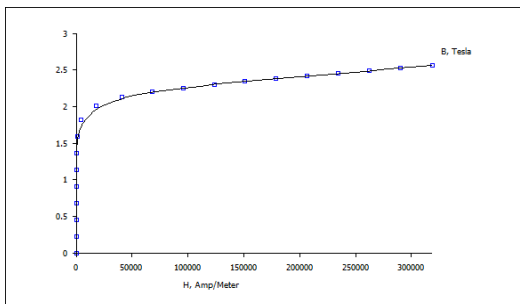


Fig. 4.6 Magnetización del hierro puro

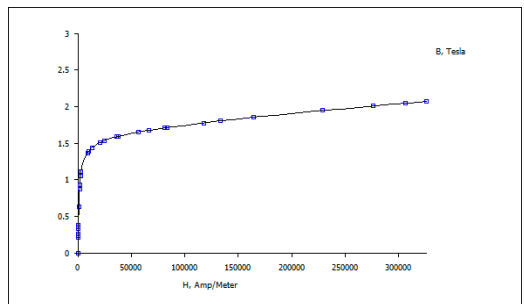


Fig.4.7 Magnetización de la fundición



Se puede comprobar que existen diferencias importantes en cuanto a valores de susceptibilidad y saturación, con el Fe-11 i con mejores cualidades, siendo su comportamiento muy parecido a su homólogo obtenido por colada. Algo similar sucede con las aleaciones Fe-P y Fe-S i, mientras que el material con positiformado por partículas de hierro puro atrapadas en una matriz polimérica muestra prestaciones inferiores por la presencia del polímero, que impide que exista una buena conductividad magnética entre las partículas.

5. Resultados

5.1. Prestaciones magnéticas de los materiales

Las primeras simulaciones se centran en el análisis del comportamiento magnético de los materiales cuando están integrados dentro del circuito magnético, formado por el imán y las piezas polares. Se determina el valor de la inducción en el entrehierro y en las zonas adyacentes y se integra el flujo dentro de la superficie que define la bobina (ver Fig.5.1).

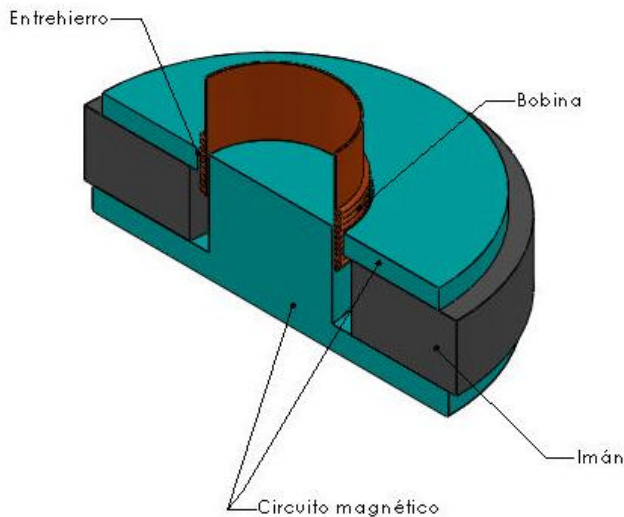


Fig.5.1 Sección del entrehierro del motor

La simulación de los materiales no incluye el tratamiento contra la corrosión que algunos de ellos precisan, por entender que el espesor del mismo -sobre unas 10 micras- no influye de manera significativa en las prestaciones de los materiales. Este tratamiento está formado por una capa de cinc depositada por electrodeposición, en los materiales conductores. El SM C, al tratarse de un material aislante, es el único que, a priori, no precisa de este tratamiento. No obstante, se considera que el error cometido al ignorarlo en las simulaciones es despreciable y no se ha tenido en cuenta.

La intensidad del campo magnético a lo largo del ancho de la bobina muestra una cierta asimetría (Fig.5.2) provocada por la geometría del circuito magnético (Fig.5.3); este defecto escarso de ciertas no linealidades en la respuesta del altavoz, las cuales quedan fuera del estudio actual. Este queda circunscrito a la valoración de los materiales en función de las propiedades magnéticas exclusivamente, como son la permeabilidad del material, o el valor de saturación, y su repercusión en el comportamiento resistivo e inductivo de la bobina

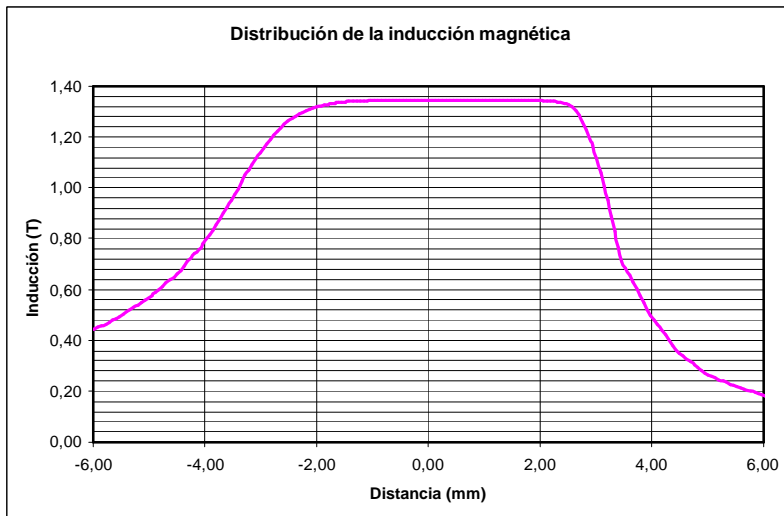


Fig.5.2 Intensidad y distribución de la inducción a lo ancho del bobinado

5.2. Saturación y distribución de líneas de fuerza en el material

Dependiendo de las características de permeabilidad y saturación del material, las líneas de fuerza pueden verse obligadas a seguir trayectorias más o menos ideales, pues la reluctancia que actúa como lo haría una resistencia en un circuito eléctrico, puede forzar a que parte de estas sigan un camino que no siempre se cierra a través del entrehierro. La consecuencia directa es la disminución del valor de inducción en este último y, por tanto, la pérdida de potencia del motor. En las figuras 5.3 a la 5.9, se puede apreciar cómo hay zonas que presentan mayores niveles de saturación que otras y, en función del material, esos niveles tienen valores muy distintos entre un material y otro.

Entre el hierro puro y el acero bajo en carbono es posible comprobar que existen pocas diferencias en el comportamiento magnético (Fig. 5.3 y 5.4). Hay una buena conducción, si bien existe una cierta saturación en la parte inferior de la placa de campo posterior y en la zona central. Estas saturaciones provocan que parte de la energía suministrada por el imán no se cierre a través del entrehierro, y se cierre a través del medio circundante en forma de fugas magnéticas.

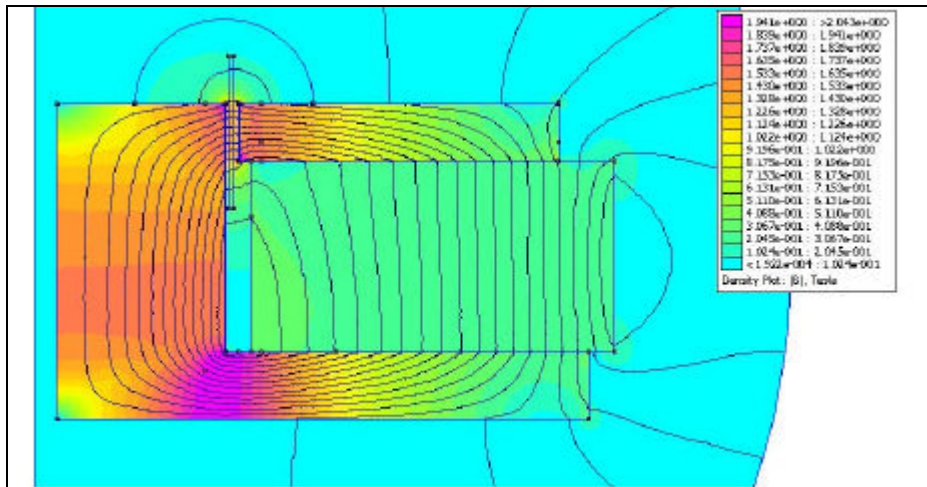


Fig.5.3 Líneas de fuerza en el hierro puro

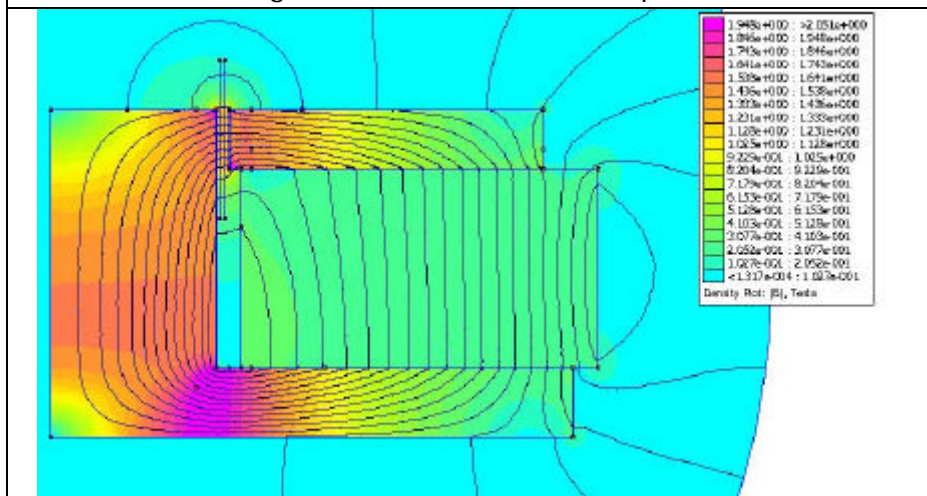


Fig.5.4 Líneas de fuerza en un acero bajo en carbono AISI 1006

Esto es fácil de ver por los valores de inducción que se forman principalmente en las aristas del imán y de las partes mecánicas

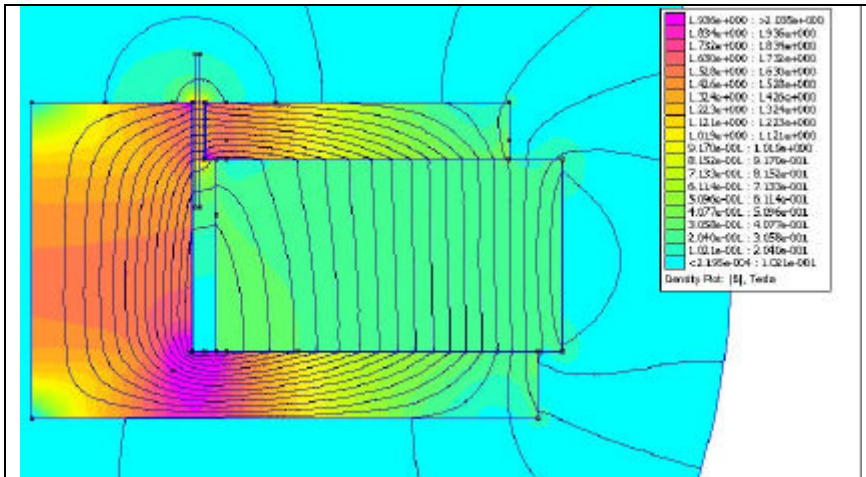


Fig.5.5 Líneas de fuerza en un hierro-fósforo

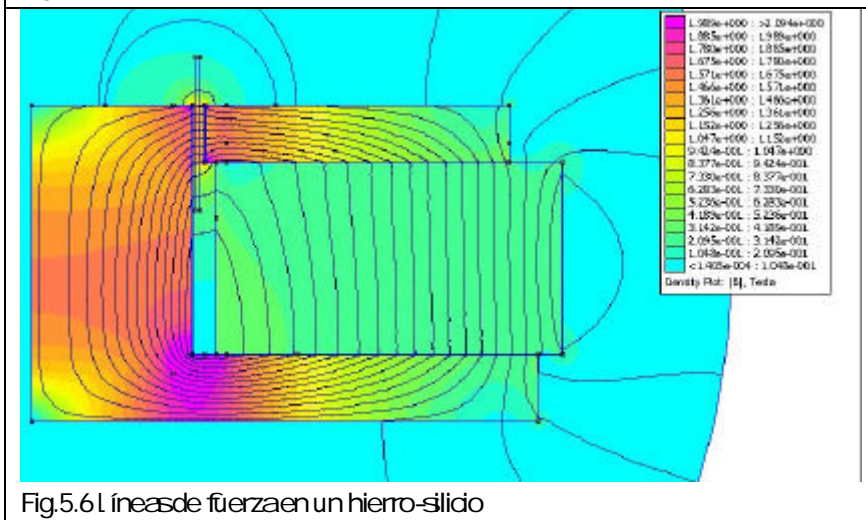
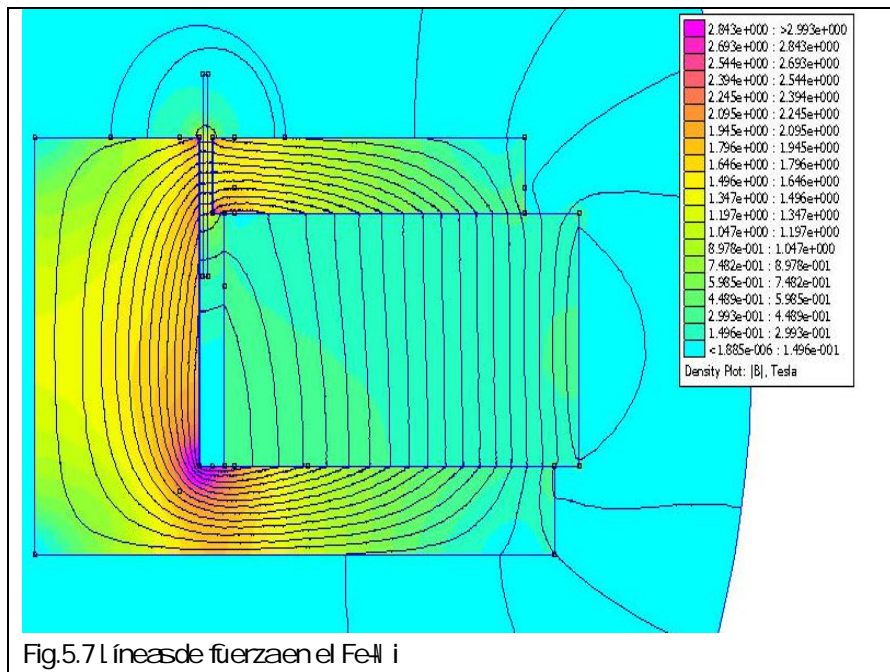


Fig.5.6 Líneas de fuerza en un hierro-silicio

Las figuras 5.5 y 5.6 también tienen un comportamiento bastante similar a los dos anteriores, aunque en el caso del FeSi los valores de saturación son algo mayores (1.98

frente a 1.94T para los otros tres). A pesar de no ser excesiva esta diferencia es de esperar un comportamiento algo mejor en el aspecto magnético por parte de esta aleación.

Finalmente, entre aquellos materiales que presentan propiedades diferentes, destaca la aleación Fe-11 i por su alto valor de saturación (2.84T). Esta alta saturación, a diferencia del resto, permite que las líneas de fuerza encuentren más fácil circular dentro del material y crucen por el entrehierro, reduciendo drásticamente el valor del flujo de fuga que se produce externamente (Fig. 5.7). En cambio, en materiales como la fundición y el SM C, la gran limitación en el valor de saturación provocan grandes fugas por la parte externa (Fig.5.8 y 5.9) que cortocircuitan la energía entregada por el imán.



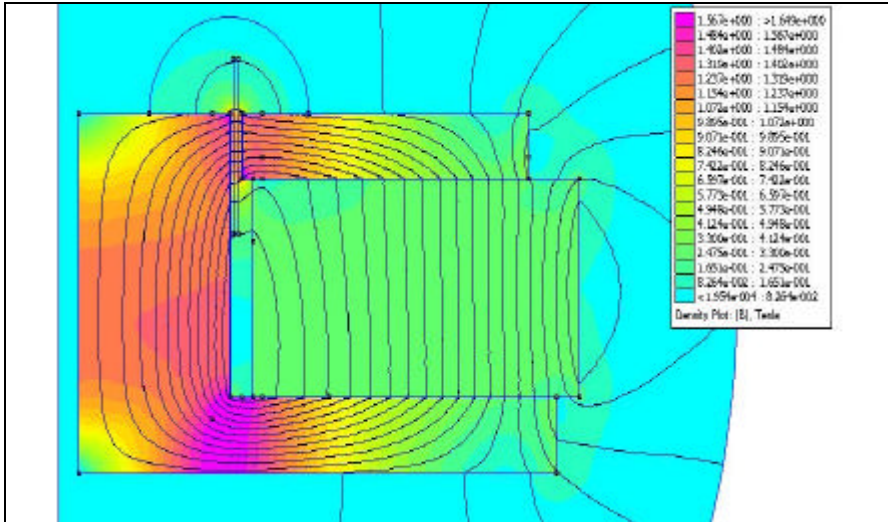


Fig.5.8 Líneas de fuerza en una fundición esferoidal

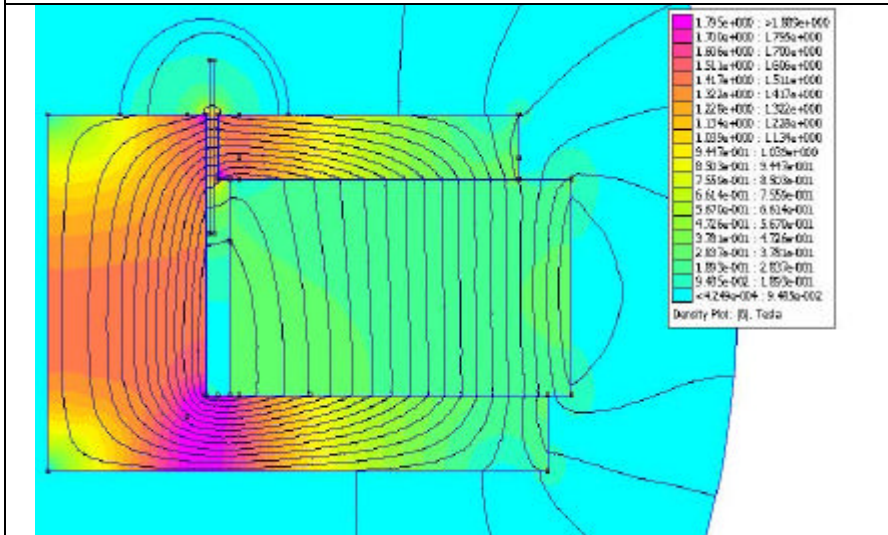


Fig.5.9 Líneas de fuerza off Magnetic Composite

5.3. Valores de inducción en el entrehierro

La figura 5.10 muestra los niveles de inducción magnética alcanzados en el entrehierro con los distintos materiales. Destaca claramente la deación Fe-11 i por un valor muy

superior al resto. Esto confirma la observación en la simulación anterior, con un menor grado de saturación de las partes del circuito. Mientras en la parte inferior del gráfico, es la fundición nodular la que tiene un peor comportamiento. Esto también era de esperar, pues los valores de saturación son claramente los más bajos de toda la serie (1.56 T). El comportamiento puede justificarse, como ya se ha comentado previamente, por la presencia de gran cantidad de carbono, en forma de esferas de grafito, así como la inclusión de un gran número de precipitados e impurezas, que aumentan la reluctancia del material y generan altos niveles de saturación, a valores muy inferiores al resto de materiales como se ha podido comprobar en la simulación.

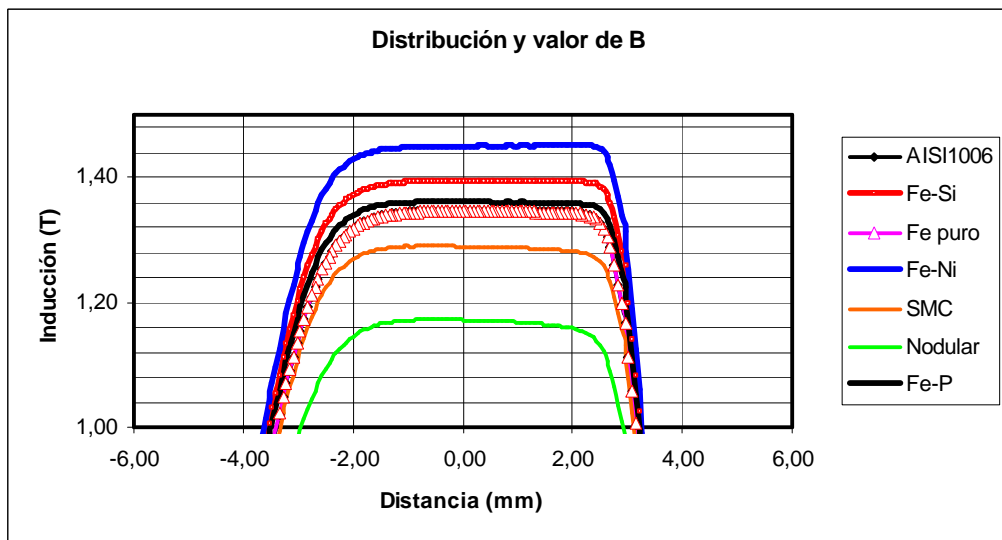


Fig.5.10 Valores de inducción de los diferentes materiales

Los valores que se dan en el SMC también en cierta manera eran previsible por la presencia del polímero entre las partículas de hierro, el cual actúa como un entrehierro parásito que impide una buena circulación de las líneas de flujo, mientras que la saturación, llevada a niveles algo menores que el resto, a excepción del esferoidal, se puede entender como una disminución del volumen total de hierro, a igualdad de dimensiones de las piezas polares. Aun así, los valores de inducción no son exageradamente bajos, debido probablemente a que el hierro es de alta pureza y que el tamaño de las partículas es muy pequeño, mejorando la compactibilidad de la pieza.

5.4. Comportamiento ante las corrientes de Foucault

La influencia de la corriente que recorre la bobina y la frecuencia a la que está aplicada tiene unos efectos nada despreciables sobre la respuesta del material magnético, como se ha descrito en el capítulo 2. Estos efectos son principalmente la formación de corrientes parásitas que van a generar pérdidas en el material, disipadas en forma de calor, por lo que se reflejarán en la impedancia de la bobina como una resistencia en serie con esta última. Este incremento resistivo afectará directamente a la potencia aplicada al altavoz y en consecuencia a la presión sonora entregada por este. Parece por lo tanto que se trata de un efecto adverso, y que cabrá analizar en detalle.

Existen otras pérdidas en el material, como son las halladas por el efecto de histéresis y que son debidas a la remanencia o, dicho de otro modo, a la energía disipada para magnetizar de forma permanente un material en un ciclo determinado y luego desmagnetarlo en el ciclo siguiente. Este efecto también favorecerá el incremento de las pérdidas totales si bien esta contribución, en los materiales magnéticos blandos, es poco relevante frente a la generada por las corrientes de Foucault, y por lo tanto no serán objeto de estudio en este trabajo.

Para llevar a cabo la investigación en los materiales estudiados se han utilizado valores de corriente y frecuencia que lógicamente se dan durante el trabajo del altavoz. Los valores de corriente indicados son valores pico, que es el único que contempla el programa si bien el resto de magnitudes están expresadas en valores eficaces. En cuanto al rango de frecuencias utilizado se justifica por la ancho de banda que viene a cubrir este tipo de reproductor. Aunque existan altavoces especializados en un rango determinado, el comportamiento observado puede ser extrapolado a cualquiera de ellos al ser común la mayor parte de los componentes que los forman.

5.4.1. Pérdidas por corrientes inducidas

Las figuras 5.11 a 5.15 muestran las variaciones de las pérdidas en función de la frecuencia para distintos valores de corriente en la bobina. Se puede apreciar de entrada el incremento de las pérdidas con el aumento de la frecuencia. De hecho, a frecuencias bajas estas pérdidas son extremadamente pequeñas. Hasta los 2 KHz, los valores en casi

todos los materiales quedan por debajo de la potencia disipada en la bobina por efecto Joule. Por el contrario, a frecuencias altas, los valores hallados se cuadruplican fácilmente.

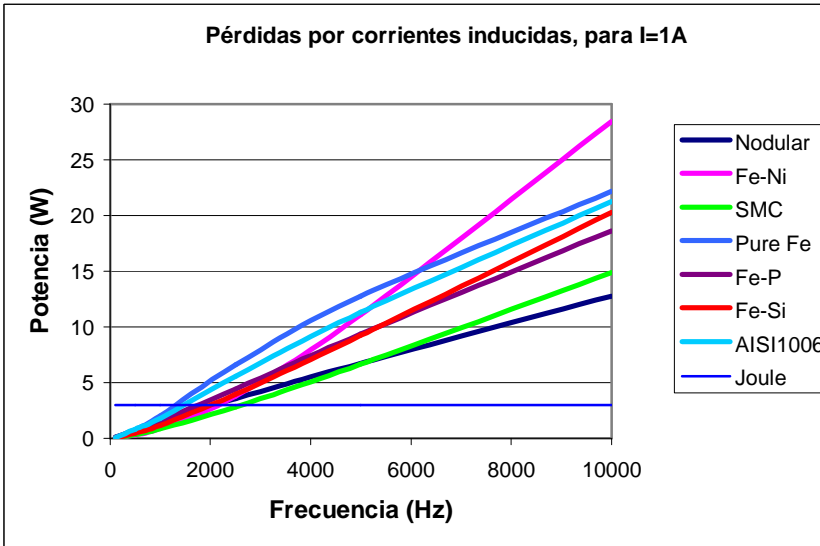
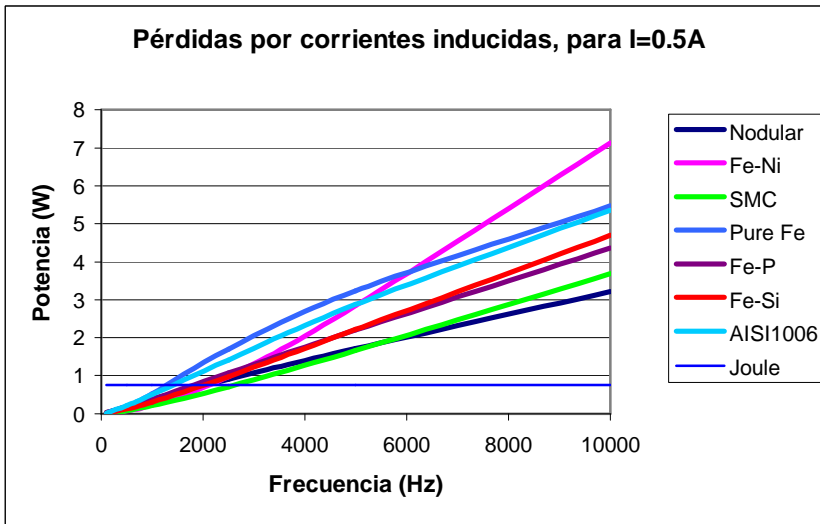


Fig.5.11-5.12 Pérdidas para diferentes valores de corriente en la bobina (0.5-1 A)

Un dato interesante es la manera de cómo se comportan los diferentes materiales magnéticos. En el caso del Fe-Ni, este destaca sobre los demás por tener valores mucho más importantes que el resto, acrecentándose la diferencia a medida que aumenta la corriente.

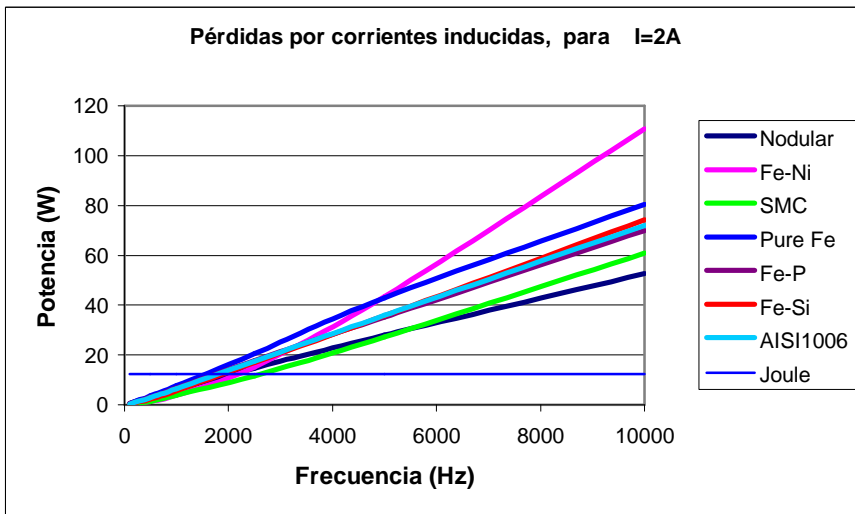


Fig.5.13 Pérdidas para 2, 4 y 8 A de corriente en la bobina

Así, para valores bajos de intensidad, la horquilla de valores es prácticamente todo el rango es muy amplia quedando en la parte superior e inferior el ya mencionado Fe-Ni, mientras que se mantienen en la zona inferior la fundición nodular y el material con poste (Fig.5.11 y 5.12), materiales que presentan propiedades de conducción más bajas que el resto (ver tabla 1.1).

A medida que crece la corriente en la bobina el comportamiento cambia radicalmente: la horquilla de valores se estrecha considerablemente, mientras que en la zona inferior hay una sustitución de los materiales esteóricamente peores conductores eléctricos por el hierro puro y el acero bajo en carbono (Fig.5.13 a 5.15). Estos, curiosamente, presentan los valores más altos de conductividad eléctrica.

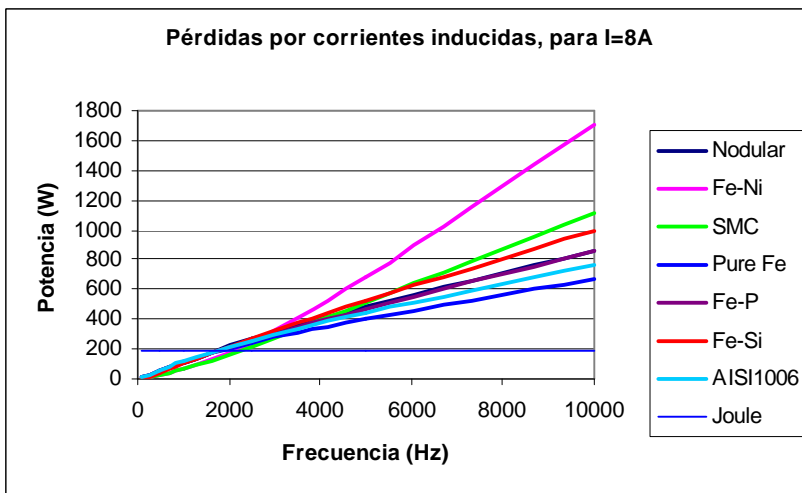
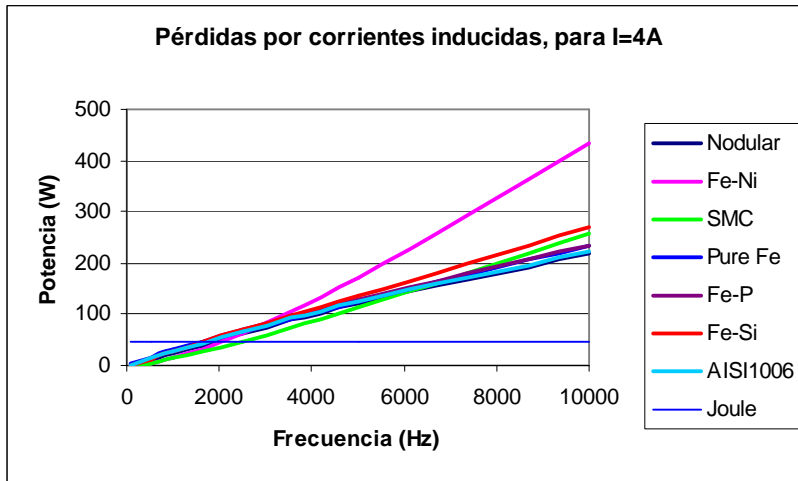


Fig.5.14 y 5.15 Pérdidas para 2, 4 y 8 A de corriente en la bobina

5.4.2. Variación de la impedancia de la bobina

De acuerdo a lo descrito previamente, la impedancia de la bobina es una magnitud compleja formada por una parte real, la resistencia en continua de la bobina más la resistencia debida a las pérdidas por corrientes de Foucault, y una parte imaginaria debida a la reactancia de la bobina. Esta última tiene un peso mayor a medida que aumenta la

frecuencia por ser proporcional a esta última. Las figuras 5.16 a 5.22 muestran los valores obtenidos por simulación, que explican los resultados visualizados previamente con las pérdidas de potencia halladas. Se puede apreciar cómo los valores de impedancia, tanto la parte imaginaria de mayor peso, como la parte real, van decreciendo paulatinamente a medida que se incrementa la corriente en la bobina en el hierro puro y en el acero bajo en carbono (Fig. 5.16 y 5.17).

Este comportamiento anómalo, claramente no lineal, parece ser más importante cuanto mayor es la pureza del hierro, y también es de destacar el valor resistivo, especialmente en la componente imaginaria, pues corresponde al valor más bajo de entre todos los materiales. Esto es propio de un valor inductivo menor, es decir que el hierro puro parece ser el material con mayor resistencia magnética de toda la serie analizada, especialmente en corrientes elevadas. El siguiente es obviamente el acero menos aleado, que sigue la pauta de forma muy parecida al hierro puro, y la fundición esférica. En estos dos últimos la presencia del carbono es predominante, aunque sea en proporciones muy distintas.

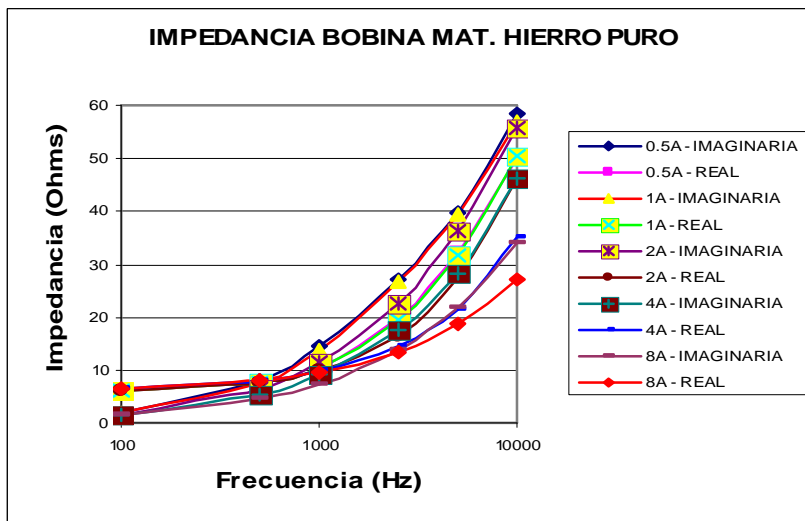


Fig. 5.16 Parte real e imaginaria de la impedancia de la bobina en el hierro puro

Este resultado es menos sensible a medida que el hierro va siendo aleado de forma más significativa. Al hacerlo con el fósforo, hay una cierta mejora, al menos para valores de corriente medios bajos, en peorando a medida que se alcanzan valores altos (Fig. 5.18).

Cuando se utiliza el silicio, la mejora es más evidente en la parte real (Fig. 5.19) mientras que en la fundición esférica el defecto sólo se manifiesta en valores altos de corriente (Fig. 5.20) en la parte imaginaria. No obstante la mejora en forma de una menor no linealidad es evidente, pues la dispersión que aparece es relativamente baja comparada con los otros materiales y acormentados.

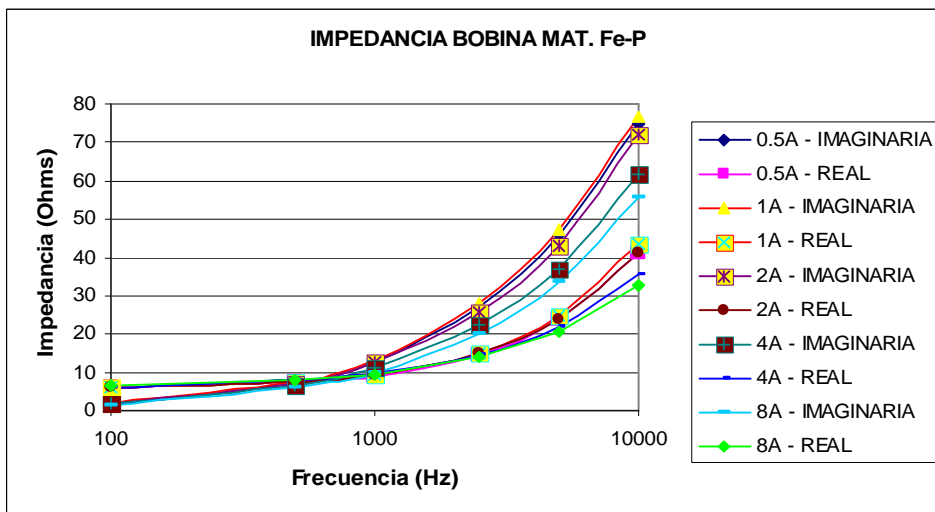
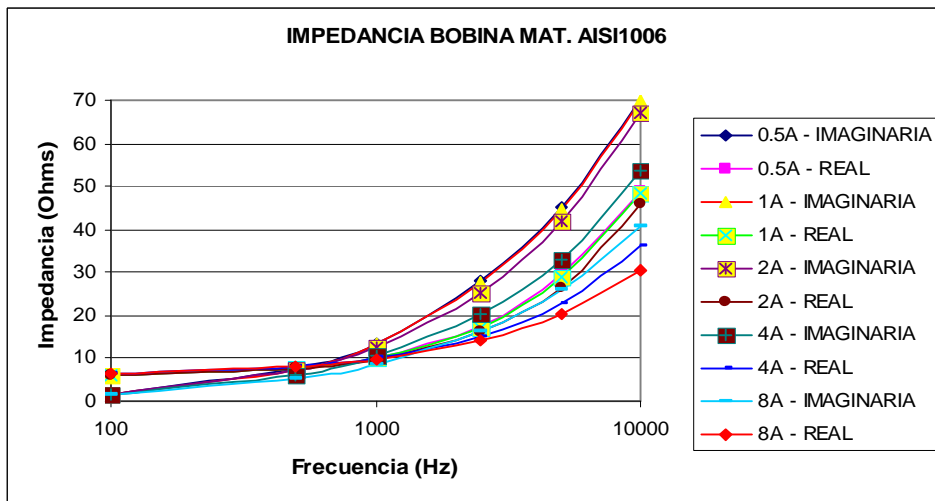


Fig.5.17-5.18 Parte real e imaginaria de la impedancia de la bobina

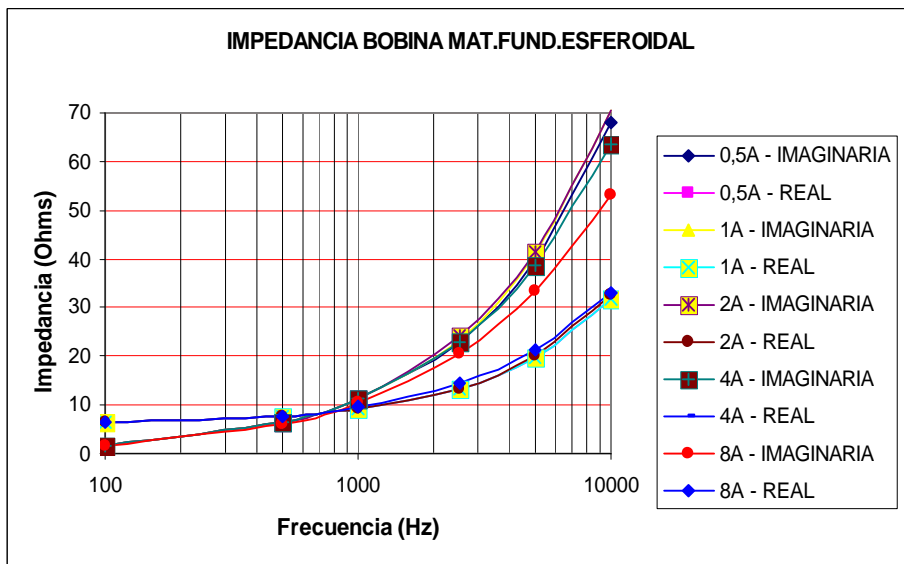
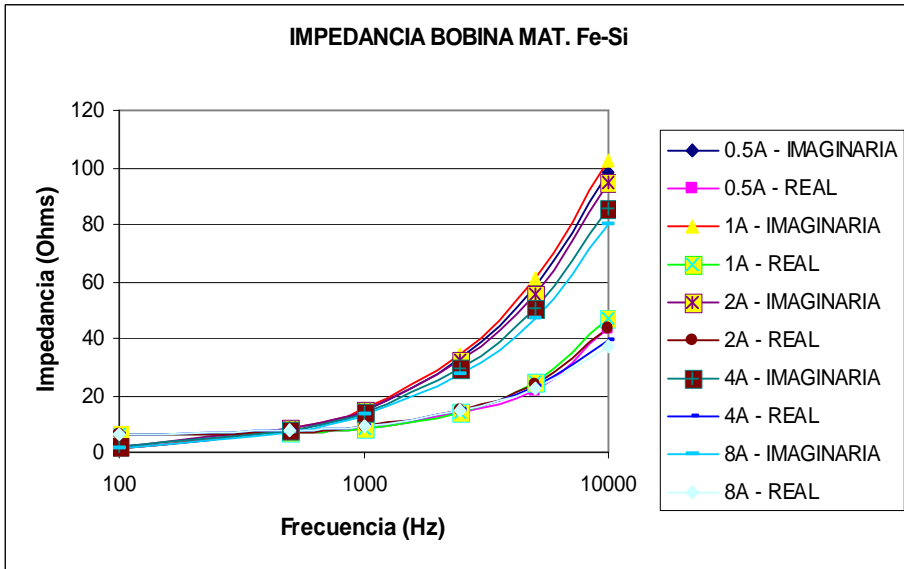


Fig.5.19-5.20 Parte real e imaginaria de la impedancia de la bobina

Finalmente, en los materiales fuertemente aleados como el FeNi, o en el material composito (Fig.5.21 y 5.22) este defecto desaparece por completo, manteniendo una gran linealidad entre los diferentes cambios de corriente, tanto en la parte real como en la parte imaginaria de la impedancia

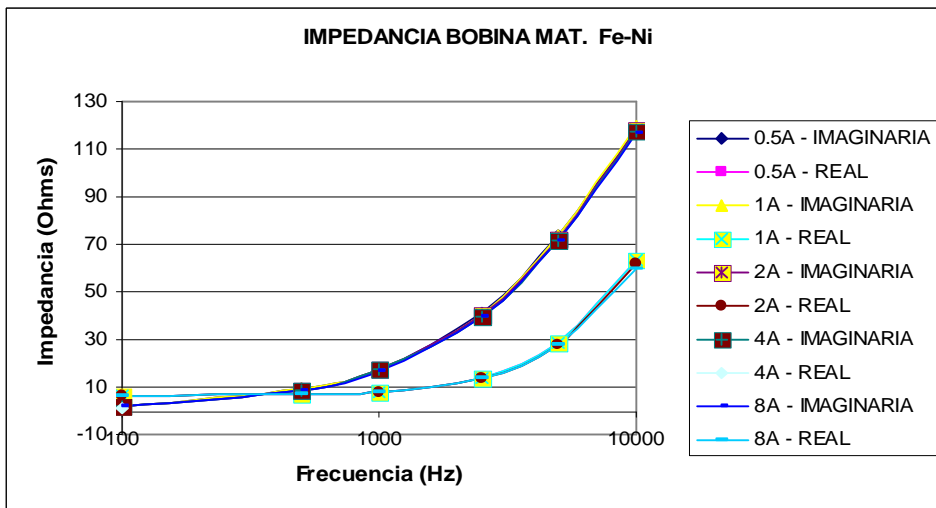
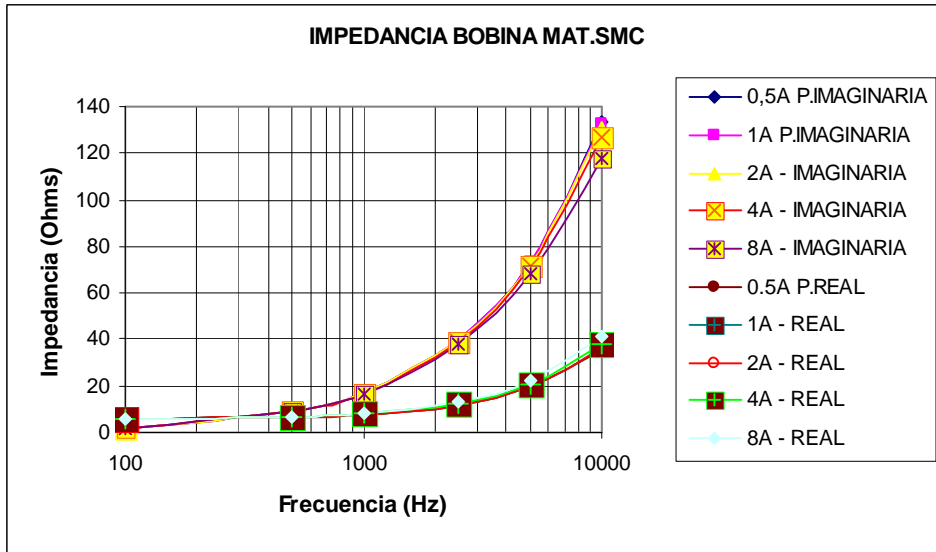


Fig.5.21-5.22 Parte real e imaginaria de la impedancia de la bobina para diferentes valores de corriente

5.4.3. Variación de la inductancia de la bobina

Puesto que la parte imaginaria de la impedancia es el reflejo de la inductancia de la bobina se han obtenido los valores de esta y se ha representado en las figuras 5.23 a 5.29 la evolución en función de la frecuencia de la corriente.

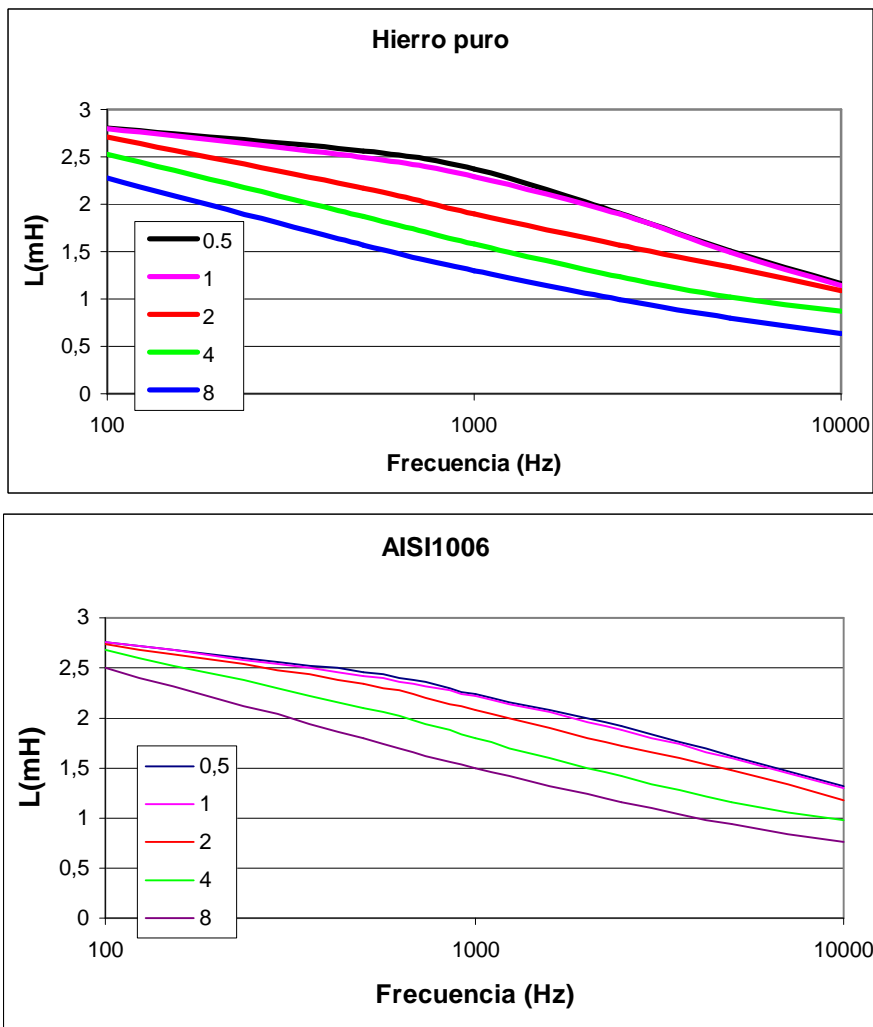


Fig.5.23-5.24 Inductancia vs frecuencia del hierro puro y del AISI 1006, a diferentes valores de corriente.

Hay que resaltar dos comportamientos bien diferenciados el primero es la evolución de autoinducción con la frecuencia con una tendencia evidente a decrecer con el aumento de esta última excepto en algunos materiales donde esta disminución no está marcada. De acuerdo con las ecuaciones de Maxwell, la ausencia del término de desplazamiento de corriente suele ser muy significativa, pues representa que las ondas electromagnéticas no pueden propagarse en un medio fuertemente conductor (ver Anexo I).

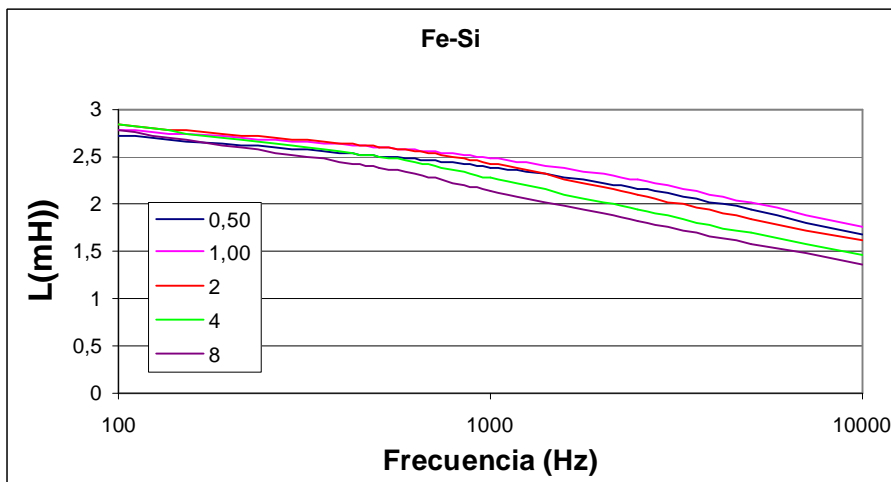
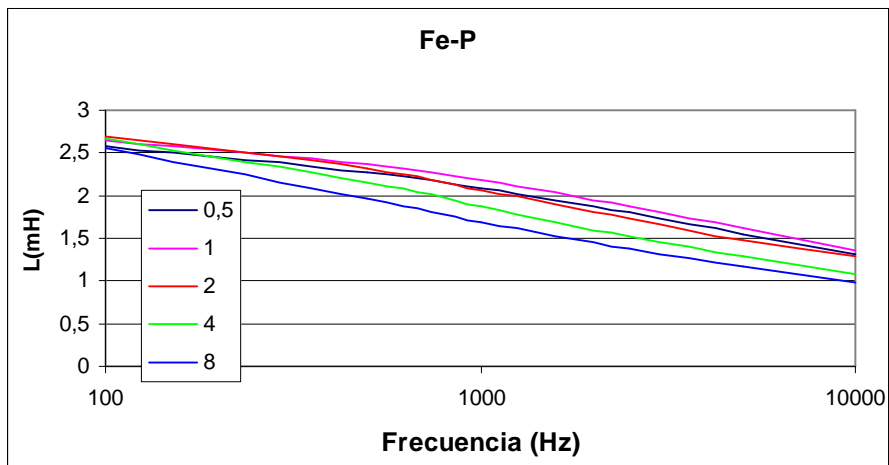


Fig.5.25 y 5.26 Inductancia vs frecuencia del Fe-P y del Fe-Si

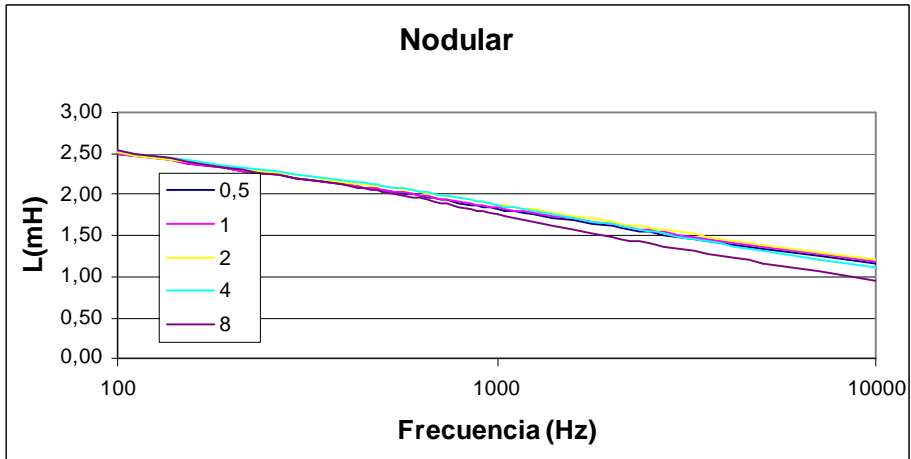


Fig. 5.27 Inductancia vs frecuencia de la fundición esferoidal

Esto justificaría el hecho de que materiales fuertemente conductores como el hierro puro, e incluso en aceros bajo en carbono, tales como el AISI 1006 y el FeP, presenten una reducción importante de la inductancia de la bobina a medida que aumenta la frecuencia por el hecho de mostrar el medio una mayor resistencia magnética (Fig. 5.23 y 5.24). Además notable la falta de linealidad en cuanto se aumenta la intensidad de corriente en la bobina con un efecto de saturación importante, menos marcada en materiales más aleados, caso del FeP o del FeSi, por ejemplo (Fig. 5.25 y 5.26).

Por el contrario, en los materiales débilmente conductores como la fundición nodular (Fig. 5.27) o como el SM C (Fig. 5.28), se produce el caso contrario, menor conducción eléctrica menor resistencia magnética mayor autoinducción. Además y debido a los bajos niveles de densidad de corriente, las diferencias entre valores bajos de corriente, y valores altos no inciden significativamente en el valor de la inducción, por lo que esta sufre pocas variaciones aun en altas frecuencias.

Aun así, esto no parece explicar por qué materiales como el FeNi (Fig. 5.29), que tiene una conductividad incluso mayor que el FeSi, mantiene un comportamiento parecido al SM C. Eso sí, con una mayor linealidad a pesar del incremento de corriente.

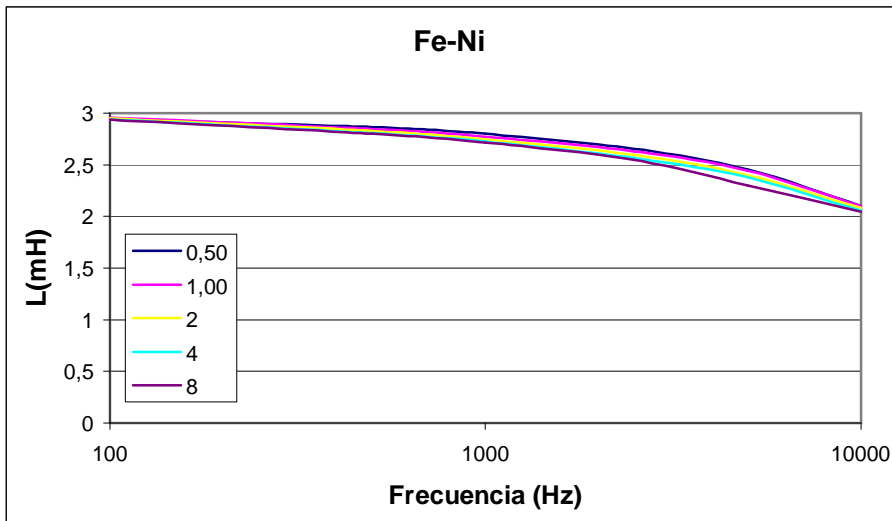
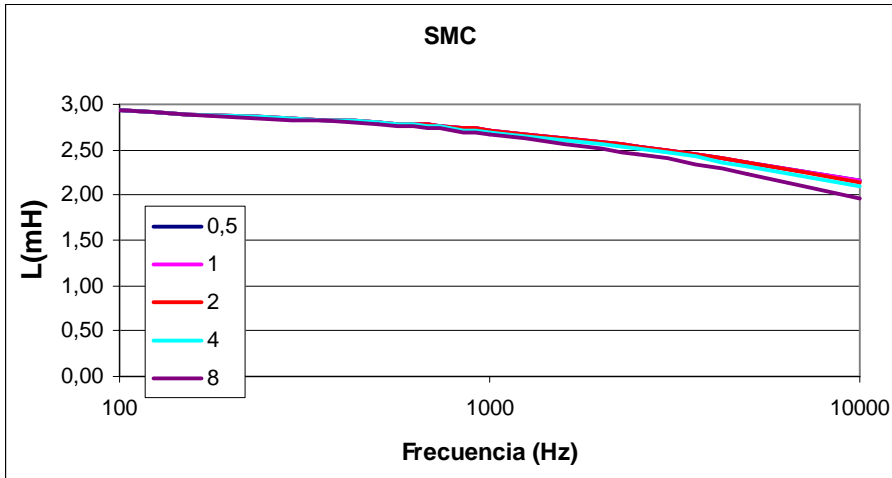


Fig.5.28-5.29 Inductancia vs frecuencia del SMC y del Fe-Ni, a diferentes corrientes

5.5. Variaciones relativas de las pérdidas en los materiales

Al relacionar las pérdidas con la potencia disipada por efecto Joule en la bobina esto permitirá hallar la evolución de las primeras a diferentes intensidades y facilitará la comparación del comportamiento de los materiales en función de la frecuencia de trabajo

de la corriente aplicada. En las figuras 5.30 a 5.35 se ha representado el valor entre pérdidas por corrientes inducidas respecto a las disipadas por efecto Joule en función de la corriente aplicada a la bobina, de tal manera es fácil determinar por un lado cómo varían estas y por otra parte con respecto a esa evolución entre los diferentes materiales que dará una idea de la linealidad del material en este aspecto.

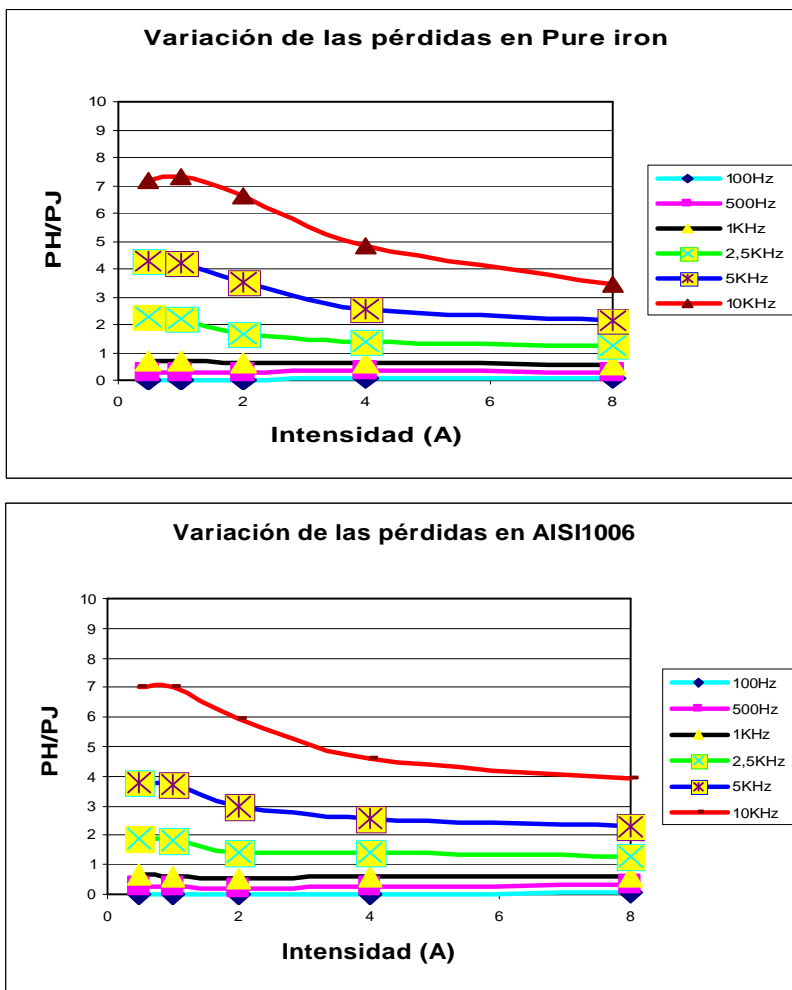


Fig. 5.30-5.31 Pérdidas relativas P_H/P_J en el hierro puro y en el AISI 1006

De esta manera, el hierro puro y el AISI 1006 (Fig. 5.30 y 5.31) y, en menor medida, del Fe-P, presentan una fuerte no linealidad al medida que aumenta la corriente aplicada. Cuando esta va creciendo, las pérdidas relativas van disminuyendo, especialmente a partir de 500 Hz. Al contrario, en la fundición nodular y en el SMC, los valores a diferentes corrientes se mantienen constantes y proporcionales a la frecuencia (Fig. 5.32 y 5.33). Sólo en alta frecuencia se puede apreciar un cierto repunte de pérdidas en el SMC.

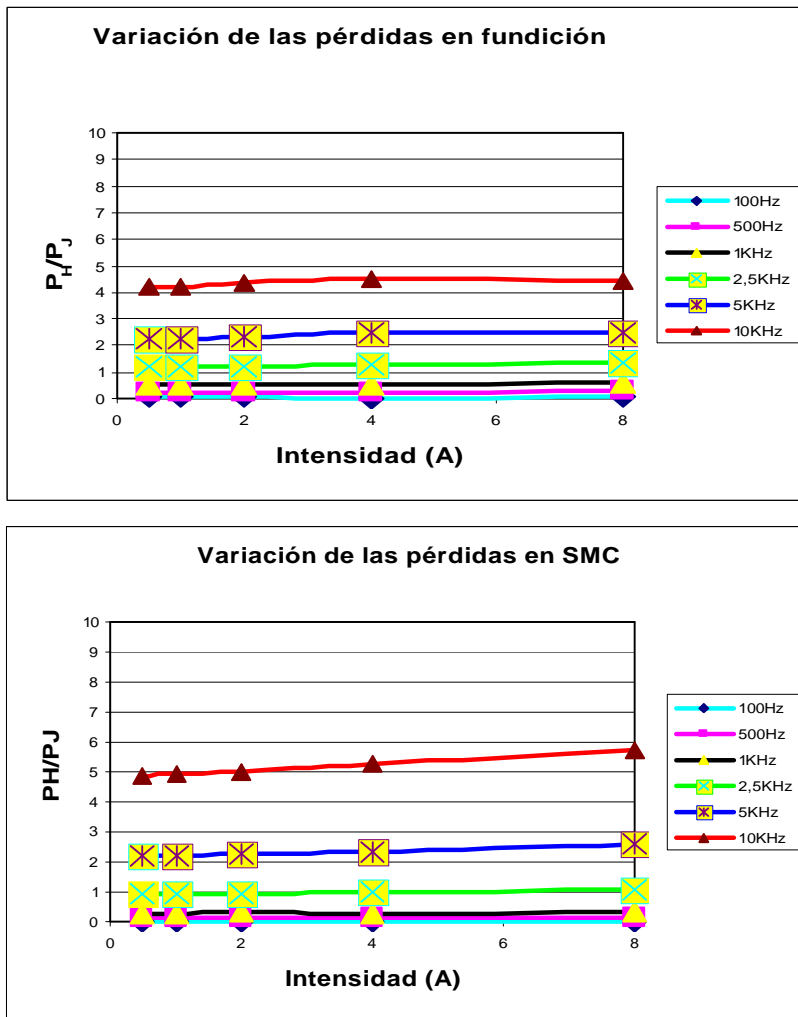


Fig. 5.32-5.33 Pérdidas relativas P_H/P_J en la fundición esferoidal y en el SMC

En el Fe-Si el comportamiento está a medio camino entre estos últimos y el hierro, pues si bien hay una cierta tendencia a caer en función del crecimiento de la corriente, la pendiente es mucho más débil y tiende a mantenerse constante (Fig. 5.34).

En cuanto al Fe-Ni, se producen dos respuestas diferentes según la frecuencia de trabajo: por debajo de 2.5 KHz, las pérdidas relativas son claramente inferiores al resto de materiales y constantes con la intensidad que recorre la bobina, mientras que por encima de ese valor estas muestran valores mucho más elevados que el resto de los materiales analizados (Fig. 5.35).

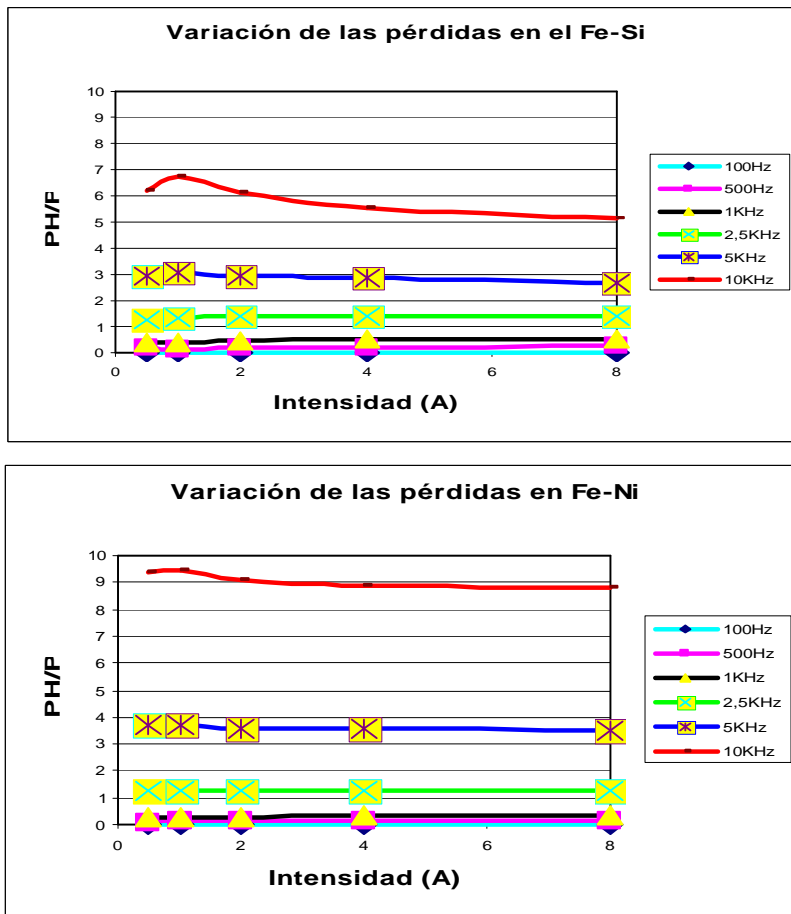


Fig. 5.34-5.35 Pérdidas relativas P_r/P_j en los distintos materiales magnéticos

Una comparación a diferentes frecuencias entre las pérdidas generadas en este material con las producidas en materiales como la fundición, el SMC y en la bobina por efecto Joule, confirman un comportamiento atípico. En la figura 5.36 se confirma el bajo valor de pérdidas en el Fe-Ni, para una frecuencia de 500 Hz, muy similar a la que presenta el SMC, y claramente inferior a la fundición, quedando todos estos valores por debajo de la potencia disipada por la bobina por el efecto Joule, independientemente del valor de corriente aplicada.

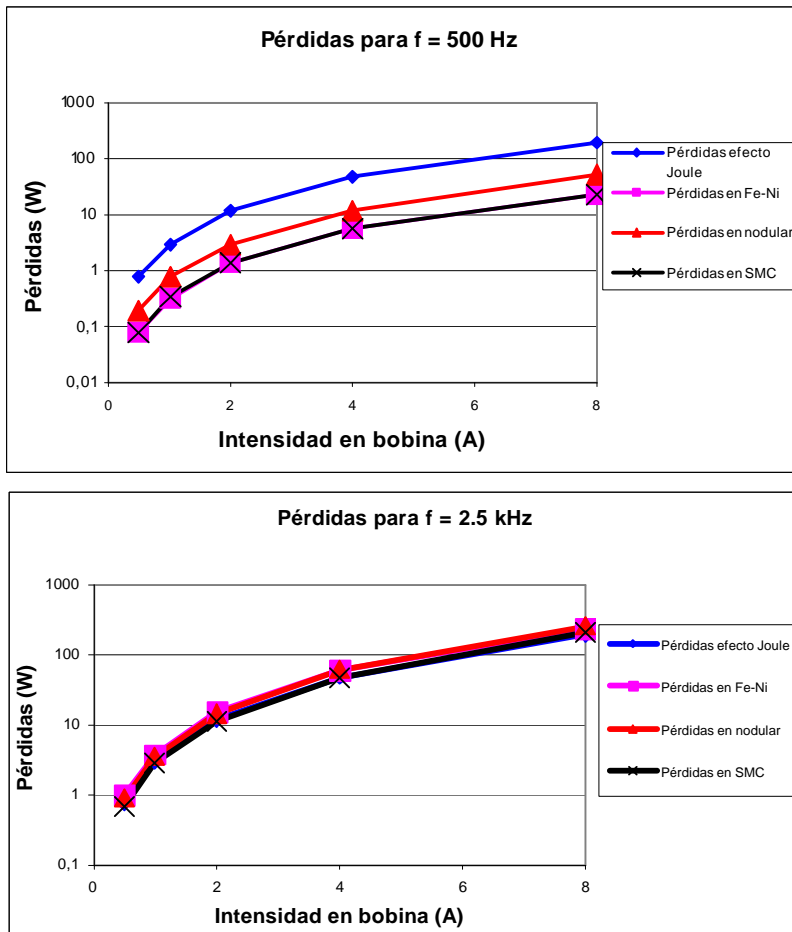


Fig. 5.36 - 5.37 Pérdidas en los materiales en función de la corriente en la bobina

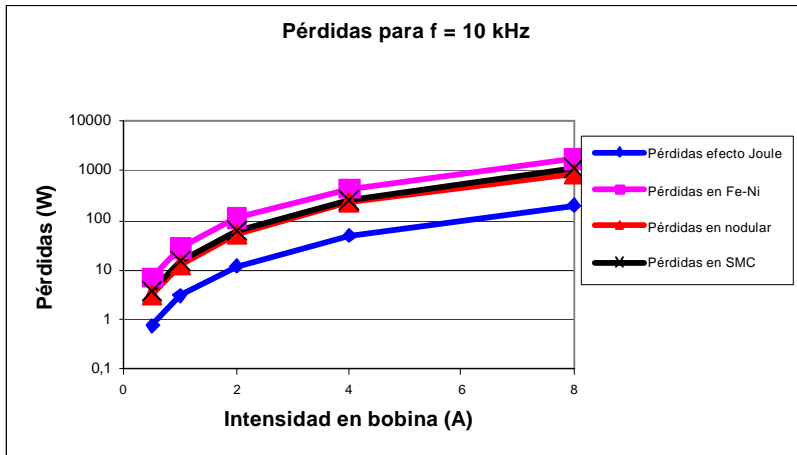


Fig. 5.38 Pérdidas en los materiales en función de la corriente en la bobina

A la frecuencia de 2.5 kHz, los tres valores se igualan entre sí, (fig. 5.37), mientras que a partir de esta frecuencia, en este caso se toma 10 kHz, se comprueba que se invierte el comportamiento, obteniendo un valor muy superior en pérdidas para el Fe-Ni, mientras que el SMC y la fundición quedan por debajo, y todos ellos muy por arriba de la potencia disipada por la bobina (Fig. 5.38).

A raíz de lo observado se puede concluir que cuando los valores de pérdidas en los materiales están por debajo del hallado en la bobina por efecto Joule, es decir para frecuencias bajas, estos valores en el Fe-Ni son de los más reducidos de entre todos ellos, si acaso similares a los obtenidos con el SMC, mientras que cuando el efecto es inverso, es decir la potencia disipada en el material supera a la que se produce en la bobina (frecuencias altas), las pérdidas en el Fe-Ni se disparan respecto a la del resto. Este fenómeno ya se intuía al observar las figuras 5.11 a 5.15, donde en todas ellas el Fe-Ni presentaba un cambio pronunciado de la pendiente en torno a 2.5 kHz, reflejándose igualmente en la variación de la inducción de la bobina con la frecuencia (Fig. 5.29).

5.6. Penetración de las corrientes inducidas en el material

Lo descrito en el apartado anterior parece estar ligado directamente a la profundidad de penetración de las corrientes inducidas en el material. Según la ecuación (12), esta es inversamente proporcional a la frecuencia, a la conductividad eléctrica y a la

permeabilidad magnética del material. De hecho si se com prueba la distribución de estas corrientes en el hierro puro y en la fundición esferoidal (Fig.5.39 y 5.40), desde la superficie del material hacia su interior, a bajas frecuencias, la densidad es muy uniforme en toda esta distancia. No obstante esta es notablemente inferior en la fundición, debido a la menor cantidad de pérdidas, de acuerdo con lo visto anteriormente. También la pendiente es ligeramente más suave, mostrando que el grado de penetración es mayor, coincidiendo con su mayor conductividad.

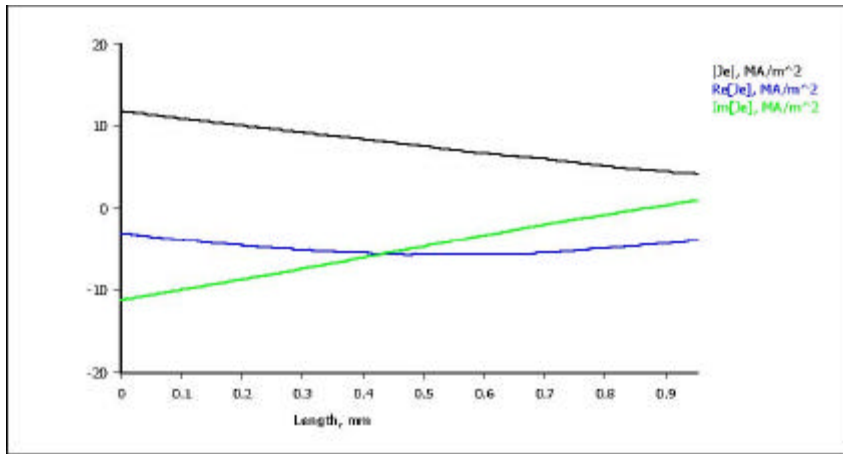


Fig. 5.39 Hierro puro, $f=100$ Hz

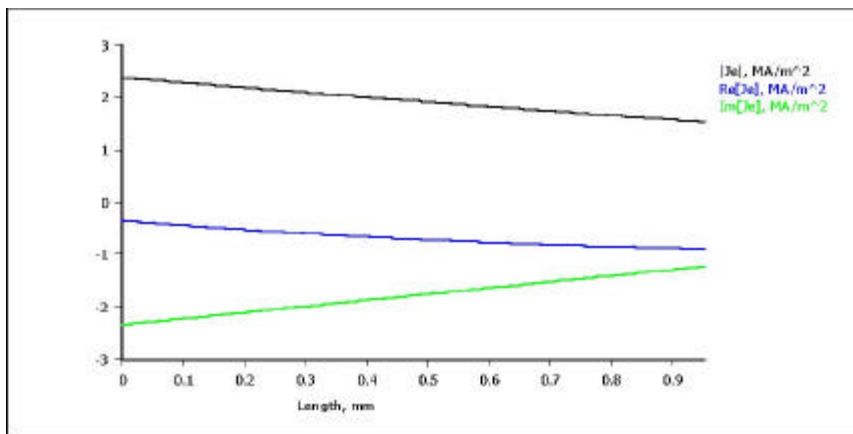


Fig. 5.40 Fundición esferoidal, $f=100$ Hz

Por el contrario, a frecuencias altas, las corrientes se concentran en una zona mucho más superficial (Fig. 5.41 y 5.42), manteniéndose la misma conducta en cuanto a densidad y pendiente. La concentración sigue siendo mucho menor en la fundición, y la profundidad de penetración mayor.

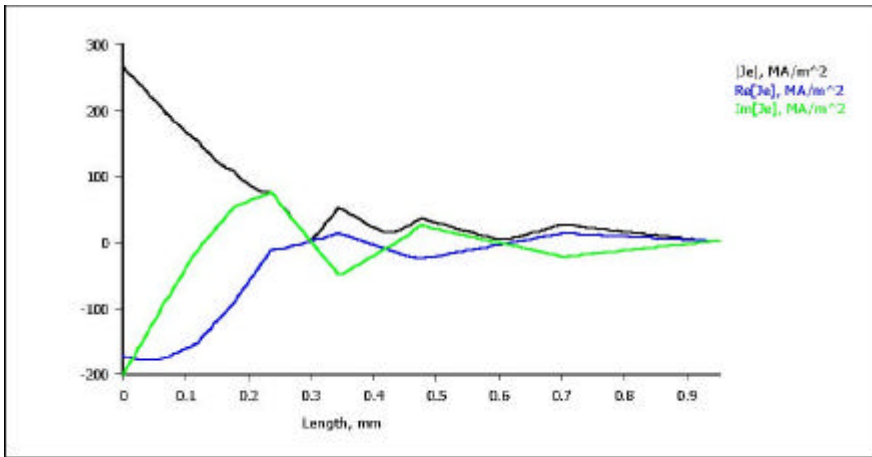


Fig. 5.41 Hierro puro, f= 10 kHz

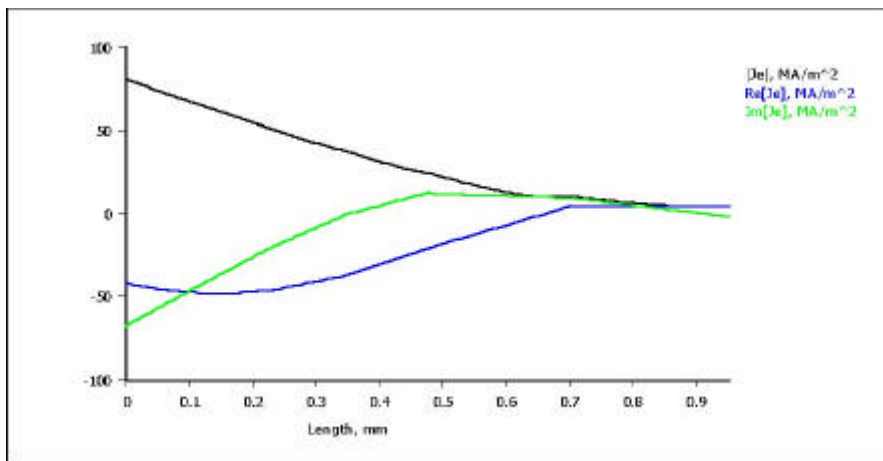


Fig. 5.42 Fundición esférica, f= 10 kHz

Se puede deducir por lo tanto que el hecho de que, al margen de que un material sea un conductor, y por lo tanto con mayor facilidad para tener unas corrientes mucho mayores

que otro, que lo es menos, aun si esto no es así, pero si la distribución de estas corrientes se hace en una superficie mucho menor, será suficiente para que la densidad de corrientes crezca de forma espectacular. Esto se traduce en una aparente reducción de las pérdidas cuando realmente lo que se ve reflejada es la incapacidad del material en permitir la circulación de un nivel tan alto de corriente (Fig. 5.41), lo cual no sucede con el esferoidal (Fig. 5.42).

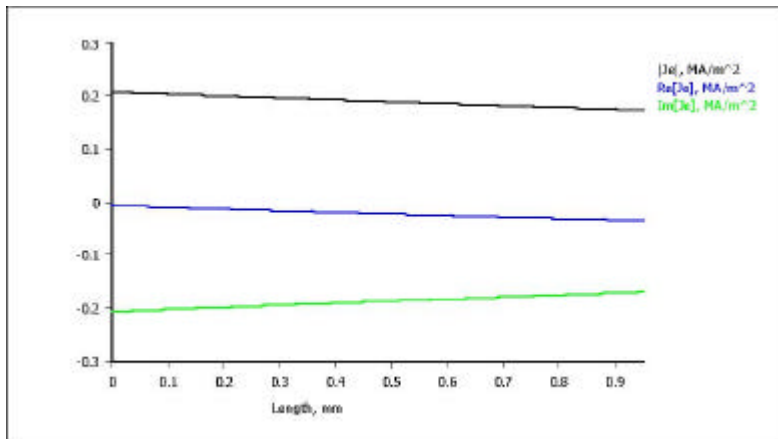


Fig. 5.43 Material con poste (M C), $f=100$ Hz

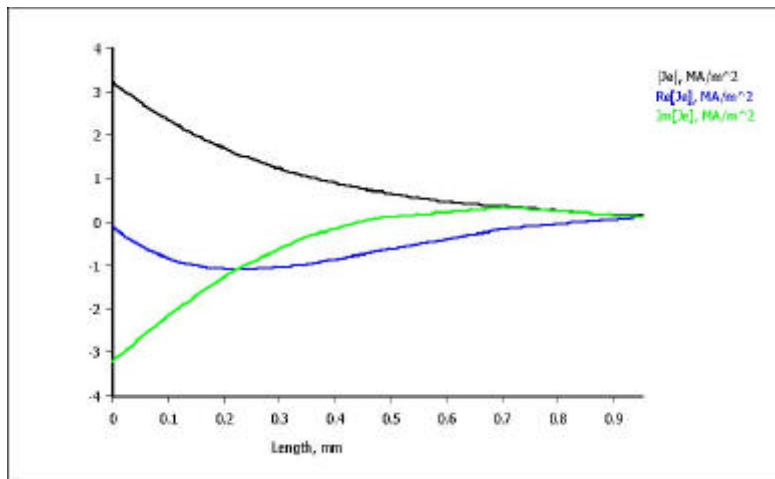


Fig. 5.44 Fe-11, $f=100$ Hz

El fenómeno es menos aparente a medida que aumenta el grado de aleación en el material, que se ve reflejado en la disminución de la conductividad eléctrica y de la permeabilidad magnética. En el caso del SiMnCo, su comportamiento ha sido descrito por algunos autores al indicar su uso estaría restringido a valores de frecuencia inferiores a 10 KHz [14], y que las pérdidas dominantes en baja frecuencia se deben mayoritariamente a pérdidas en continua.

Al observar las corrientes inducidas en alta frecuencia (10KHz), es interesante comprobar que la distribución de estas no sigue el patrón de los otros materiales (Fig.5.43 y 5.45). El efecto es comparable al de un condensador, con el material aislante entre las partículas actuando como un dieléctrico y las partículas como placas conductoras. Así, al aumentar la frecuencia, las propiedades del dieléctrico se verían afectadas y reducidas, aumentando la conductividad del material y permitiendo mayores niveles de corriente en su interior.

El caso del FeNi es completamente diferente a los demás materiales. A pesar de una distribución de la densidad de corriente de una manera similar a un hierro puro (Fig. 5.44 y 5.46). En el caso de este material se ha visto que presenta pocas pérdidas para valores de frecuencia inferiores a 2.5KHz, al de mayores pérdidas para altas frecuencias. Esta dualidad en función de la frecuencia puede representar un serio handicap para su uso en esta aplicación, dependiendo del rango de frecuencia de trabajo del altavoz.

El efecto de saturación magnética que se aprecia a frecuencias altas incrementa sustancialmente la resistencia magnética de estos materiales, haciendo decrecer la inductancia de la bobina por un lado, y recortando las corrientes inducidas, lo que se traduce en un menor crecimiento relativo de las pérdidas. Aun así, es cierto que aquellos materiales débilmente conductores como el SiMnCo, o la fundición, presentan unos indicios de saturación que el resto, por la dificultad que encuentran las corrientes a circular por ellos. De ahí que sean mucho más lineales. En el FeNi, aunque su linealidad es muy buena, esta se da en dos rangos de frecuencia distintos, caracterizándose por un cambio brusco. Esta consecuencia no es debida al contrario que en los demás al efecto de saturación que se produce en la mayoría de ellos.

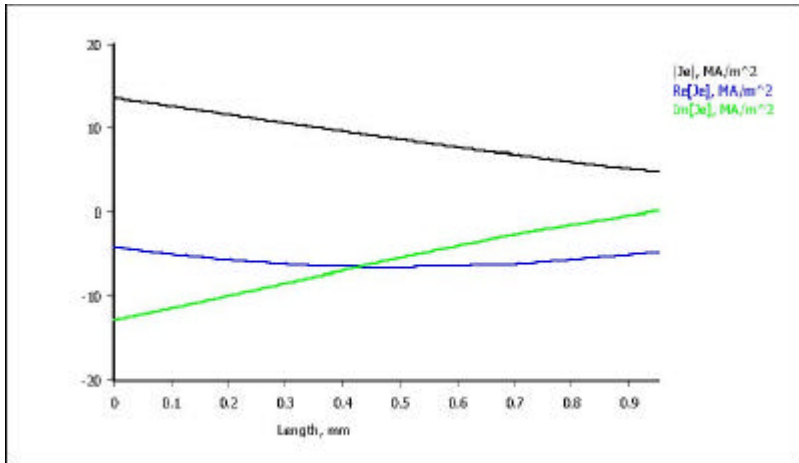


Fig. 5.45 Material con poste (M C), f= 10 KHz

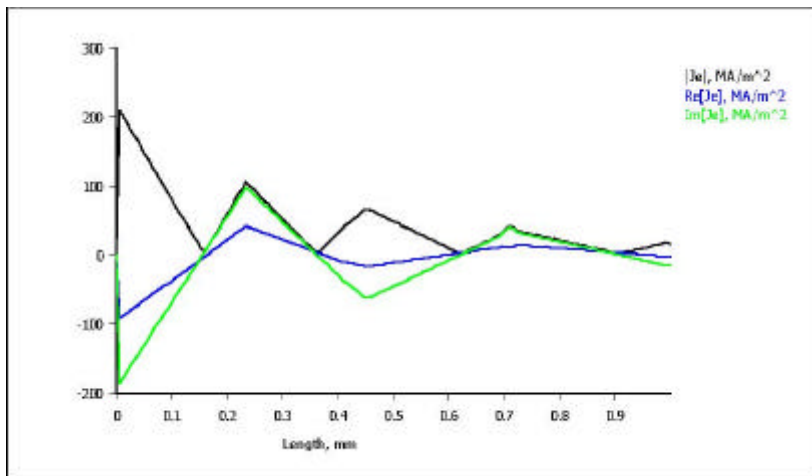


Fig. 5.46 Fe-11, f= 10 KHz

5.7. Criterios de selección de los materiales

Una manera rápida de determinar las ventajas de un material según las variables de interés en este caso inducción y pérdidas, es utilizando un diagrama de tipo Ashby. Este permite tener una visión detallada de los pesos de ambas variables en los materiales magnéticos estudiados.

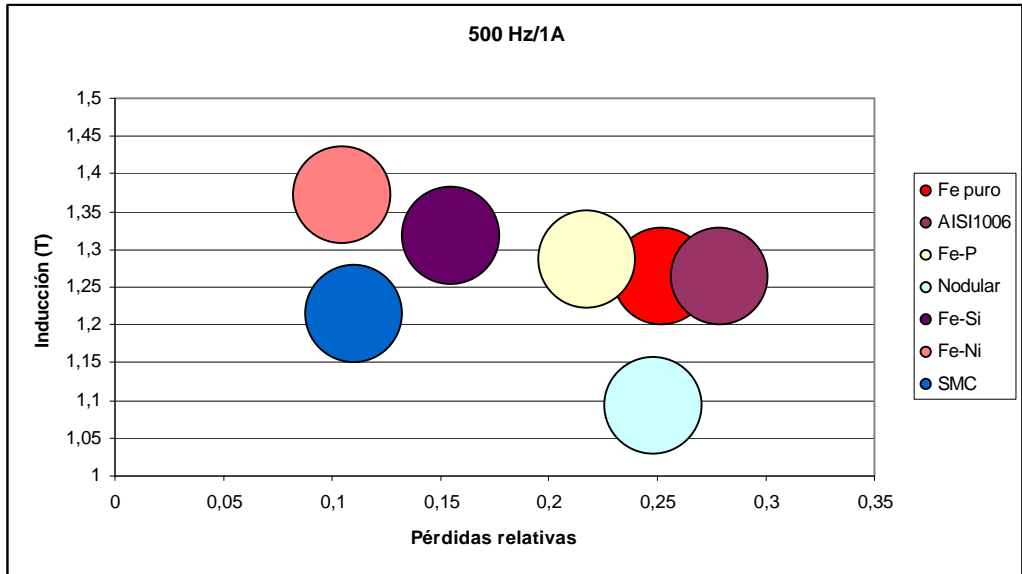


Fig. 5.47 Pérdidas relativas e inducción en los materiales magnéticos a 500 Hz de frecuencia y 1 A de intensidad en la bobina

El gráfico está dividido de tal forma que aquellos materiales que quedan más hacia el extremo superior izquierdo son los más óptimos para la aplicación que se demanda mientras que, por otro lado, aquellos más hacia el extremo inferior derecho son los que peor comportamiento presentan. La distribución obtenida deja en evidencia al acero con bajo contenido en carbono, y al hierro puro, por el peor comportamiento en pérdidas por corrientes inducidas y a la fundición esférica destacando por el menor nivel de inducción. En el extremo opuesto se sitúa el Fe-Si, que mejor optimiza estas dos variables para bajas frecuencias (Fig. 5.47).

Al modificar el parámetro frecuencia pasando a un valor superior, 5 KHz, se comprueba que la distribución ha cambiado bastante: el hierro y el AISI 1006 se mantienen en la zona superior derecha mientras el Fe-Si se desplaza hacia la zona derecha por el incremento importante en pérdidas en el material (Fig. 5.48). Por el contrario, la fundición, junto con el SMC, se sitúan como mejor opción cuando se requieran menores pérdidas.

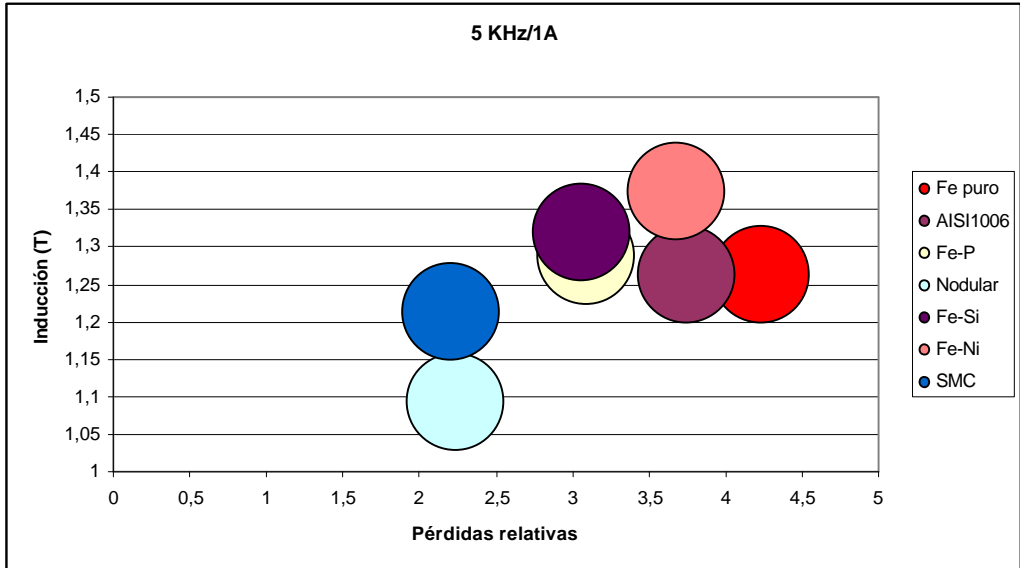


Fig. 5.48 Pérdidas relativas e inducción en los materiales magnéticos a 5 KHz de frecuencia y 1 A de intensidad en la bobina

No obstante, una comparación directa de este tipo puede resultar errónea si no se tiene en cuenta el comportamiento no lineal de la mayoría de ellos ante la corriente de excitación en la bobina. Sí que se puede resumir que el grupo con mayores no linealidades, al presentar un efecto de saturación a frecuencias medias y altas, simula unas pérdidas menores por corrientes inducidas, si bien esto no es garantía en absoluto de unas prestaciones adecuadas en cuanto a distorsión. En efecto, es de prever que este comportamiento, que de hecho se ve reflejado tanto en la falta de linealidad de la inductancia como en la impedancia de la bobina, tenga un claro reflejo en las prestaciones acústicas del altavoz, lo cual ya se adelantaba al final del capítulo 3, sobre la influencia de las corrientes inducidas en la calidad sonora.

6. Conclusiones

Se ha estudiado mediante la simulación por elementos finitos el comportamiento magnético y eléctrico de algunos materiales magnéticos para una aplicación en el motor de un altavoz electrodinámico de tipo profesional. Los resultados obtenidos han puesto en evidencia algunas particularidades interesantes, tales como el nivel de saturación del material ante la presencia de una fuerza magnética, que repercute directamente en el valor de inducción que se halla en el entrehierro y que define el factor de fuerza que caracteriza al motor del altavoz; otras como la conductividad eléctrica dentro del material, y la mayor o menor susceptibilidad de este para generar pérdidas por corrientes de Foucault en el mismo, cuando se hace circular una corriente eléctrica por la bobina del altavoz.

Así ha sido posible comprobar como un material como el hierro puro, o en su defecto un acero con muy bajo contenido en carbono, presenta limitaciones en la conducción de las líneas de fuerza que circulan a través del circuito magnético. La utilización de ciertos aleantes como el fósforo o el silicio, aporta una mejora sensible al incrementar ligeramente el valor de saturación. Aun así el que se situara antes por encima de todos es una aleación de hierro y níquel, la cual, por su alto contenido en este componente, permite alcanzar valores mucho mayores en cuanto a saturación, reduciendo el nivel de fugas magnéticas al aumentar el valor de inducción en el entrehierro.

Por el contrario un material como la fundición esférica, debido a su microestructura y gran contenido en carbono, con valores de saturación claramente por debajo de todos los demás, dificulta el paso de las líneas de fuerza provocando que estas tiendan a escapar por la parte externa del circuito y que se reduzca la intensidad de la inducción en el entrehierro. El material compuesto se comporta de una manera parecida debido a la presencia del material que recubre las partículas de hierro y que crea un gran número de entrehierros parásitos.

El segundo aspecto de interés es la presencia de corrientes de Foucault, generadas por la circulación de una corriente por la bobina del altavoz, y que son las causantes de pérdidas magnéticas disipadas en forma de calor. Aquí se han hallado pautas de conducta bastante dispares y que obstaculizan la comparación directa entre los materiales empleados en el trabajo. Si bien por regla general los aceros poco aleados se muestran un comportamiento

parecido al del hierro, especialmente la existencia de no linealidades asociadas a la potencia aplicada. Sus diferencias hacen complicado encontrar un patrón que justifique estas no linealidades. Si parece que gran parte de la responsabilidad de esta conducta la tenga la elevada densidad de corrientes inducidas en la zona superficial del material. Al saturarse el material, se reduce la corriente que debería circular, por lo que el valor de pérdidas relativas entre las que se producen en el material y las generadas en la bobina por efecto Joule se va reduciendo a medida que se aplica mayor corriente al altavoz. Al mismo tiempo, este alto valor de corriente impide que se mantenga constante el valor de autoinducción de la bobina, por lo que se traduce en una disminución de la misma a medida que crece la corriente aplicada.

El efecto que presentan estas no linealidades en la respuesta del altavoz va a ser la formación de distorsiones no lineales importantes, por la inconsistencia de la inductancia de la bobina, que se van a traducir en la degradación de la señal acústica entregada. Este defecto es claramente perjudicial por la imposibilidad de prevenirlo, o de aplicar una corrección posterior. Por lo tanto sería deseable seleccionar, de entre los materiales con esta tara, aquel que menor la sufre, siendo el Fe-Si el más indicado.

Entre los materiales con bajas corrientes inducidas, destacan el Fe-Ni, la fundición esférica y el Si-Mn. El primero también parece ciertas no linealidades en función de la frecuencia aplicada. Por debajo de 2.5 kHz, los valores asociados a las pérdidas por corrientes inducidas eran claramente ventajosos, pues quedaban prácticamente por debajo del resto, mientras que por encima estos mismos valores se disparaban y se situaban claramente por arriba de todos ellos. Las consecuencias cuantitativas son un incremento de la resistencia serie asociada a la bobina o, dicho de otra manera, una mayor impedancia de esta última. Acústicamente esto se traduce en una menor eficiencia del altavoz en esa zona de trabajo, lo que equivale a una distorsión lineal de la señal de entrada. En este caso, no obstante, la corrección sí es factible, equalizando convenientemente la señal antes de ser enviada al altavoz. Este material parece ser un buen candidato en la aplicación que se persigue, si la repercusión económica no es un problema.

En cuanto a los otros dos materiales, la fundición y el Si-Mn parece que sus posibilidades sean prometedoras por sus propiedades eléctricas. Al igual que el Fe-Ni, presentan una distorsión lineal elevada en frecuencias altas, pero subsanable por la misma razón.

expuesta para este último, pero además tienen la ventaja de tener un precio bastante competitivo. Teniendo en cuenta que el circuito magnético puede representar el 60% o más del coste total de un altavoz profesional, esta variable puede ser crítica a la hora de realizar una selección de materiales. Respecto al otro problema asociado a estos dos materiales, la menor saturación magnética, se puede compensar con un aumento de las secciones del circuito magnético, o con un volumen mayor de imán. Eso sí, siempre que el diseño de esto lo permita y que la repercusión en coste salga a cuenta.

Anejo I

Mediante las ecuaciones de Maxwell que gobiernan la propagación de las ondas electromagnéticas dentro de un material conductor, es posible demostrar, en función del campo eléctrico E , el desplazamiento D , la inducción B , la intensidad magnética H , y la densidad de corriente J

$$\operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (14)$$

$$\operatorname{rot} H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (15)$$

y puesto que no hay cargas eléctricas libres dentro de un conductor, ni tampoco existen monopolos magnéticos, las dos divergencias de campo son nulas

$$\operatorname{div} E = 0 \quad (16)$$

$$\operatorname{div} B = 0 \quad (17)$$

La densidad de corriente J en el material conductor del circuito magnético está relacionado con el campo eléctrico por

$$J = \sigma E \quad (18)$$

donde σ es la conductividad del material. En realidad el campo magnético estático, debido al imán permanente, produce un efecto Hall en el flujo de la corriente, por lo que la ecu. (9) no es completamente cierta, pero se ignora tal efecto aquí.

Además, a las ecuaciones anteriores hay que añadir la relación:

$$B = \mu H \quad (19)$$

en la cual μ representa la permeabilidad magnética, que es un orden de magnitud de varios miles de veces mayor en el hierro que en el medio ambiente, en este caso $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m en el vacío. Igualmente el término de desplazamiento de la densidad de corriente $\partial D / \partial t$ en la ec. (6) se ignora normalmente cuando se trata de un medio conductor, puesto que suele ser menor que J en un factor $\mu \sigma / \omega$, donde μ es la permeabilidad del material y ω la frecuencia angular. Normalmente $\mu \sigma / \omega < 10^{-13}$, aún a las frecuencias más altas. Esta pérdida del término de desplazamiento de corriente es muy significativa, pues representa que las ondas electromagnéticas normales no pueden propagarse en medios fuertemente conductores. El resultado que la presencia de estas corrientes tiene sobre la inductancia de la bobina es la disminución del valor de la inductancia.

Anejo II

Pérdidas en los materiales

Inten- sidad (A)	Frec. (Hz)	Nodular	Fe-Ni	SMC	Pure Fe	Fe-P	Fe-Si	AISI1006	Pérdidas en la bobina (Joule) (W)
		Pérdidas en el material (W)	Pérdidas en el material (W)	Pérdidas en el material (W)	Pérdidas en el material (W)	Pérdidas en el material (W)	Pérdidas en el material (W)	Pérdidas en el material (W)	
0,5	100	0,029	0,0067	0,007786	0,017288	0,0238	0,02	0,02054	0,76
	500	0,187	0,077	0,08	0,1874	0,166	0,13	0,20999	0,76
	1000	0,383	0,2285	0,21189	0,523	0,38	0,31	0,494	0,76
	2500	0,907	0,975	0,7048	1,704	1,069	0,97	1,418	0,76
	5000	1,71	2,84	1,663	3,237	2,2	2,22	2,873	0,76
	10000	3,21	7,133	3,6877	5,47	4,36	4,70	5,3619	0,76
1	100	0,117	0,0269	0,0311	0,0721	0,0836	0,06	0,0914	3,02
	500	0,7499	0,318	0,3326	0,762	0,658	0,47	0,8428	3,02
	1000	1,513	0,906	0,848	2,033	1,54	1,19	1,822	3,02
	2500	3,589	3,807	2,831	6,61	4,45	3,96	5,56	3,02
	5000	6,756	11,11	6,6668	12,777	9,356	9,25	11,31	3,02
	10000	12,78	28,42	14,863	22,165	18,64	20,26	21,253	3,02
2	100	0,461	0,121	0,1248	0,393	0,331	0,20	0,315	12,16
	500	2,905	1,34	1,3398	3,507	2,95	2,12	2,855	12,16
	1000	5,969	3,76	3,873	7,59	6,75	5,57	6,481	12,16
	2500	14,615	15,21	11,524	20,497	17,73	16,99	17,43	12,16
	5000	27,92	43,53	27,251	42,894	35,23	35,80	35,909	12,16
	10000	52,654	110,8	60,823	80,54	70,02	74,22	72	12,16
4	100	1,765	0,52	0,5014	2,2345	1,67	0,96	1,613	48,64
	500	12,01	5,58	5,4747	15,123	13,77	10,64	13,78	48,64
	1000	25,33	15,47	14,1859	29,6761	28,78	25,41	28,64	48,64
	2500	62,805	61,16	48,278	67,708	68,59	69,33	67,45	48,64
	5000	119,217	172,01	114,899	123,577	127,13	137,98	123,72	48,64
	10000	219,59	433,66	256,258	233,58	236,17	267,65	224,09	48,64
8	100	7,374	2,156	2,051	11,1489	8,37	5,12	9,0138	194,56
	500	53,62	22,73	23,249	59,92	56,54	46,78	59,9947	194,56
	1000	111,278	62,8	61,6117	110,5089	111,02	104,34	115,12	194,56
	2500	264,57	245,82	213,984	237,238	252,83	268,94	253,58	194,56
	5000	485,81	684,27	508,256	409,69	463,844	520,75	443,844	194,56
	10000	864,682	1711,9	1113,03	676,696	854,52	1000,01	760,01	194,56

Resultados simulación con hierro puro

Intensidad max. (A)	Frecuencia (Hz)	Pérdidas reales (W)	Pérdidas reactivas (Var)	Pérdidas aparentes (VA)	Resistencia (Ohms)		Módulo resistencia (Ohms)	Inductancia (mH)
0,50	100	0,78	0,22	0,80	6,22	1,8	6,46	2,8
	500	0,95	0,99	1,37	7,58	7,93	10,97	2,52
	1000	1,28	1,79	2,20	10,27	14,35	17,65	2,28
	2500	2,47	3,40	4,20	19,73	27,25	33,64	1,7
	5000	4,00	4,94	6,36	32,02	39,58	50,91	1,26
	10000	6,25	7,31	9,62	49,98	58,56	76,99	0,93
1,00	100	3,11	0,88	3,23	6,226	1,75	6,47	2,79
	500	3,80	3,84	5,40	7,6	7,69	10,81	2,45
	1000	5,08	6,90	8,58	10,15	13,83	17,15	2,2
	2500	9,66	13,37	16,50	19,32	26,74	32,99	1,7
	5000	15,83	19,66	25,25	31,66	39,33	50,49	1,25
	10000	25,22	28,49	38,50	50,454	56,98	76,11	0,9
2	100	12,56	3,39	13,00	6,279	1,69	6,50	2,69
	500	15,67	13,25	20,52	7,83	6,62	10,25	2,1
	1000	17,77	22,68	30,09	9,88	11,34	15,04	1,8
	2500	32,67	45,05	55,65	16,33	22,52	27,82	1,43
	5000	55,08	42,36	90,94	27,54	36,18	45,47	1,15
	10000	92,78	111,55	145,19	46,38	55,77	72,54	0,88
4	100	50,89	12,53	52,41	6,36	1,566	6,55	2,49
	500	63,79	44,48	77,77	7,97	5,5	9,68	1,77
	1000	78,33	73,72	107,57	9,79	9,21	13,44	1,466
	2500	116,38	139,90	181,98	14,54	17,4879	22,74	1,11
	5000	172,28	224,73	283,17	21,53	28,09	35,39	0,894
	10000	282,38	369,32	464,90	35,298	46,16	58,11	0,7347
8	100	205,78	44,49	210,54	6,43	1,39	6,58	2,21
	500	254,57	146,28	293,60	7,955	4,57	9,17	1,45
	1000	305,15	236,90	386,30	9,536	7,4	12,07	1,178
	2500	431,81	439,53	616,15	13,49	13,73	19,25	0,874
	5000	604,42	692,56	919,23	18,88	21,64	28,72	0,6889
	10000	871,59	1092,00	1397,22	27,23	34,12	43,65	0,54

Resultados simulación con AIS I 1006

Intensidad max. (A)	Frecuencia (Hz)	Pérdidas reales (W)	Pérdidas reactivas (Var)	Pérdidas aparentes (VA)	Resistencia (Ohms)		Módulo resistencia (Ohms)	Inductancia (mH)
0,50	100	0,79	0,22	0,81	6,28	1,73	6,51	2,75
	500	0,97	0,94	1,35	7,76	7,53	10,81	2,40
	1000	1,26	1,70	2,11	10,04	13,60	16,90	2,16
	2500	2,18	3,48	4,11	17,43	27,89	32,89	1,78
	5000	3,64	5,65	6,72	29,64	45,22	54,07	1,44
	10000	6,13	8,80	10,72	49,00	70,40	85,77	1,12
1,00	100	3,14	0,86	3,26	6,28	1,73	6,51	2,75
	500	3,88	3,73	5,39	7,77	7,46	10,77	2,37
	1000	5,00	6,71	8,37	10,00	13,42	16,74	2,13
	2500	8,60	13,77	16,24	17,20	27,54	32,47	1,75
	5000	14,37	22,43	26,64	28,74	44,86	53,28	1,43
	10000	24,30	35,04	42,65	48,63	70,00	85,23	1,11
2	100	12,58	3,42	13,03	6,29	1,71	6,52	2,73
	500	15,65	14,26	21,17	7,82	7,13	10,58	2,27
	1000	19,90	24,96	31,93	9,96	12,48	15,97	1,99
	2500	32,50	50,40	59,98	16,25	25,20	29,99	1,60
	5000	53,00	83,00	99,16	26,54	41,88	49,58	1,33
	10000	91,70	134,50	162,80	45,85	67,25	81,39	1,00
4	100	50,58	13,30	52,30	6,32	1,66	6,53	2,65
	500	64,05	50,49	81,56	8,00	6,30	10,18	2,00
	1000	80,20	84,56	116,54	10,00	10,57	14,55	1,68
	2500	122,06	162,54	203,27	15,25	20,30	25,39	1,29
	5000	182,38	262,80	319,90	22,80	32,85	39,99	1,04
	10000	288,67	428,60	516,76	36,08	53,58	64,59	0,85
8	100	204,47	49,34	210,35	6,39	1,54	6,57	2,45
	500	257,98	170,44	309,20	8,06	5,33	9,66	1,70
	1000	315,39	278,42	420,70	9,85	8,70	13,14	1,38
	2500	459,10	522,34	695,40	14,34	16,32	21,73	1,04
	5000	656,00	829,23	1057,38	20,50	25,90	33,03	0,82
	10000	982,65	1303,33	1632,26	30,70	40,72	51,00	0,65

Resultados simulación con Fe-P

Intensidad max. (A)	Frecuencia (Hz)	Pérdidas reales (W)	Pérdidas reactivas (Var)	Pérdidas aparentes (VA)	Resistencia (Ohms)	Módulo resistencia (Ohms)	Inductancia (mH)
0,50	100	7,00	0,20	0,81	6,28	1,6	2,57
	500	0,93	0,88	1,28	7,41	7,03	2,238
	1000	1,14	1,60	1,97	9,11	12,845	2,04
	2500	1,83	3,39	3,85	14,64	27,1	1,72
	5000	2,96	5,70	6,44	23,69	45,76	1,45
	10000	5,12	9,35	10,66	41,01	74,86	1,19
1,00	100	3,13	0,83	3,23	6,25	1,66	2,64
	500	3,70	3,65	5,20	7,4	7,3	2,32
	1000	4,59	6,65	8,08	9,18	13,3	2,12
	2500	7,50	14,03	15,91	15	28,06	1,786
	5000	12,40	23,67	26,72	24,8	47,33	1,5
	10000	21,70	38,44	44,14	43,4	76,89	1,22
2	100	12,50	3,37	12,94	6,25	1,69	2,686
	500	15,11	14,31	20,81	7,55	7,155	2,277
	1000	18,92	25,19	31,50	9,46	12,59	2
	2500	29,90	51,21	59,30	14,95	25,6	1,63
	5000	47,42	86,50	98,65	23,7	43,25	1,376
	10000	82,26	144,02	165,86	41,13	72	1,15
4	100	50,28	13,33	52,02	6,2849	1,666	2,65
	500	62,42	52,26	81,41	7,8	6,53	2,08
	1000	77,44	89,48	118,34	9,68	11,185	1,78
	2500	117,01	178,01	213,02	14,66	22,25	1,42
	5000	175,86	296,85	345,03	21,98	37,1	1,181
	10000	285,23	492,97	569,54	35,63	61,62	0,98
8	100	203	50,56	209,20	6,34	1,58	2,51
	500	251,18	188,89	314,28	7,89	5,9	1,88
	1000	305,67	321,73	443,78	9,55	10,05	1,6
	2500	447,54	642,27	782,82	13,98	20,07	1,28
	5000	658,72	1075,30	1261,02	20,58	33,6	1,069
	10000	1049,85	1778,13	2064,93	32,8	55,57	0,884

Resultados simulación con Fe-Si

Intensidad max. (A)	Frecuencia (Hz)	Pérdidas reales (W)	Pérdidas reactivas (Var)	Pérdidas aparentes (VA)	Resistencia (Ohms)		Módulo resistencia (Ohms)	Inductancia (mH)
0,50	100	0,78	0,21	0,80	6,23	1,7	6,46	2,72
	500	0,89	0,98	1,32	7,118	7,828	10,58	2,49
	1000	1,07	1,85	2,14	8,53	14,82	17,10	2,36
	2500	1,74	4,15	4,50	13,88	33,238	36,02	2,11
	5000	2,99	7,31	7,90	21,93	58,48	62,46	1,86
	10000	5,47	12,32	13,48	43,76	98,54	107,82	1,56
1,00	100	3,10	0,87	3,22	6,198	1,749	6,44	2,78
	500	3,51	4,07	5,38	7,025	8,145	10,76	2,59
	1000	4,24	7,72	8,80	8,48	15,44	17,62	2,458
	2500	7,00	17,26	18,63	14,02	34,52	37,26	2,198
	5000	12,31	30,47	32,86	24,62	60,94	65,73	1,93
	10000	23,34	51,40	56,46	46,67	102,8	112,90	1,63
2	100	12,37	3,55	12,87	6,18	1,78	6,43	2,83
	500	14,30	16,30	21,67	7,15	8,15	10,84	2,59
	1000	17,74	30,00	34,87	8,87	15	17,43	2,389
	2500	29,16	64,03	70,36	14,58	32,02	35,18	2,03
	5000	48,00	110,94	120,88	24	55,468	60,44	1,76
	10000	86,49	189,68	208,47	43,24	94,87	104,26	1,5
4	100	49,61	14,25	51,62	6,2	1,78	6,45	2,83
	500	59,30	62,20	85,93	7,41	7,77	10,74	2,47
	1000	74,07	111,80	134,11	9,26	13,97	16,76	2,22
	2500	118,03	234,00	262,09	14,75	29,25	32,76	1,86
	5000	186,76	401,80	443,09	23,34	50,22	55,38	1,6
	10000	316,68	683,87	753,63	39,58	85,48	94,20	1,36
8	100	199,55	55,79	207,40	6,24	1,74	6,48	2,77
	500	241,42	235,18	337,04	7,54	7,35	10,53	2,34
	1000	299,00	419,25	514,96	9,34	13,1	16,09	2,08
	2500	463,70	876,76	989,18	14,49	27,3	30,91	1,74
	5000	715,80	1503,24	1664,97	22,37	46,98	52,03	1,5
	10000	1195,98	2562,19	2827,57	37,37	80,07	88,36	1,27

Resultados simulación con Fe-Ni

Intensidad max. (A)	Frecuencia (Hz)	Pérdidas reales (W)	Pérdidas reactivas (Var)	Pérdidas aparentes (VA)	Resistencia (Ohms)	Módulo resistencia (Ohms)	Inductancia (mH)
0,50	100	0,77	0,23	0,80	6,136	1,9	2,94
	500	0,84	1,12	1,40	6,698	8,986	2,86
	1000	0,99	2,19	2,40	7,91	17,51	2,785
	2500	1,74	5,13	5,41	13,9	41,03	2,61
	5000	3,61	9,24	9,92	28,86	73,92	2,35
	10000	7,90	14,90	16,80	63,27	119,229	1,897
1,00	100	3,07	0,93	3,20	6,136	1,859	2,96
	500	3,36	4,46	5,59	6,72	8,926	2,84
	1000	3,96	8,67	9,53	7,91	17,33	2,758
	2500	6,86	20,32	21,45	13,717	40,64	2,587
	5000	14,17	36,75	39,39	28,34	73,49	2,34
	10000	31,51	59,69	67,50	63,07	119,38	1,9
2	100	12,29	3,71	12,83	6,14	1,85	2,95
	500	13,51	17,72	22,29	6,75	8,86	2,82
	1000	15,94	34,32	37,84	7,97	17,16	2,73
	2500	27,40	80,20	84,75	13,698	40,0977	2,55
	5000	55,75	144,99	155,34	27,88	72,5	2,3
	10000	123,17	236,91	267,00	61,58	118,458	1,885
4	100	49,18	14,79	51,35	6,15	1,85	2,94
	500	54,23	70,55	88,99	6,78	8,82	2,80
	1000	64,14	136,41	150,73	8,017	17,05	2,71
	2500	109,89	317,70	336,16	13,73	39,71	2,52
	5000	220,92	573,55	614,62	27,6	71,69	2,28
	10000	483,09	940,16	1057,02	60,38	117,52	1,87
8	100	196,789	59,00	205,46	6,15	1,845	2,936
	500	217,39	281,45	355,63	6,79	8,795	2,8
	1000	257,49	543,70	601,59	8,046	16,99	2,7
	2500	440,73	1263,79	1338,44	13,77	39,49	2,5
	5000	879,87	2278,71	2442,68	27,49	71,2	2,2
	10000	1909,54	3740,54	4199,47	59,67	116,88	1,86

Resultados simulación con Fundición esferoidal

Intensidad max. (A)	Frecuencia (Hz)	Pérdidas reales (W)	Pérdidas reactivas (Var)	Pérdidas aparentes (VA)	Resistencia (Ohms)	Módulo resistencia (Ohms)	Inductancia (mH)
0,50	100	0,79	0,19	0,81	6,32	1,55	2,47
	500	0,95	0,78	1,23	7,60	6,27	2,00
	1000	1,14	1,38	1,80	9,16	11,07	1,76
	2500	1,68	2,88	3,33	13,41	23,06	1,47
	5000	2,48	4,97	5,55	19,81	39,77	1,27
	10000	3,97	8,50	9,38	31,75	68,03	1,08
1,00	100	3,16	0,78	3,25	6,32	1,55	2,47
	500	3,79	3,15	4,92	7,58	6,29	2,00
	1000	4,55	5,58	7,21	9,11	11,17	1,78
	2500	6,63	11,74	13,48	13,27	23,49	1,50
	5000	9,81	20,42	22,65	19,60	40,84	1,30
	10000	15,85	35,18	38,58	31,70	70,36	1,12
2	100	12,63	3,12	13,00	6,31	1,56	2,48
	500	15,07	12,81	19,78	7,53	6,40	2,04
	1000	18,14	22,87	29,18	9,07	11,43	1,82
	2500	26,79	47,94	54,92	13,39	23,97	1,53
	5000	40,11	82,64	91,86	20,05	41,32	1,32
	10000	64,89	140,58	154,83	32,44	70,29	1,12
4	100	50,42	12,60	51,97	6,30	1,57	2,51
	500	60,67	51,60	79,64	7,58	6,45	2,05
	1000	73,99	90,79	117,12	9,25	11,35	1,81
	2500	111,49	184,86	215,88	13,94	23,10	1,47
	5000	167,95	309,33	351,98	20,99	38,66	1,23
	10000	268,47	508,59	575,10	33,56	63,57	1,01
8	100	202,00	50,41	208,20	6,31	1,58	2,51
	500	248,26	196,98	316,91	7,76	6,16	1,96
	1000	305,93	335,49	454,03	9,56	10,48	1,67
	2500	459,29	655,55	800,43	14,35	20,49	1,30
	5000	680,68	1065,99	1264,77	21,27	33,31	1,06
	10000	1059,94	1703,65	2006,46	33,12	53,24	0,85

Resultados simulación con Soft Magnetic Composite (SMC)

Intensidad max. (A)	Frecuencia (Hz)	Pérdidas reales (W)	Pérdidas reactivas (Var)	Pérdidas aparentes (VA)	Resistencia (Ohms)	Módulo resistencia (Ohms)	Inductancia (mH)
0,50	100	0,77	0,23	0,80	6,14	1,85	2,94
	500	0,84	1,10	1,38	6,75	8,78	2,79
	1000	0,97	2,12	2,33	7,78	16,93	2,69
	2500	1,47	4,93	5,14	11,73	39,47	2,51
	5000	2,42	9,16	9,47	19,36	73,26	2,33
	10000	4,46	16,65	17,24	35,68	133,19	2,12
1,00	100	3,07	0,92	3,21	6,14	1,85	2,94
	500	3,37	4,39	5,53	6,75	8,78	2,79
	1000	3,89	8,46	9,31	7,78	16,93	2,69
	2500	5,88	19,71	20,57	11,58	39,44	2,51
	5000	9,73	36,56	37,83	19,45	73,12	2,33
	10000	17,96	66,36	68,74	35,91	132,71	2,11
2	100	12,29	3,70	12,83	6,14	1,88	2,94
	500	13,50	17,55	22,14	6,75	8,77	2,79
	1000	15,60	33,82	37,24	7,80	16,91	2,69
	2500	23,71	78,63	82,13	11,85	39,32	2,50
	5000	39,47	145,32	150,59	19,74	72,66	2,31
	10000	73,18	262,36	272,37	36,59	131,18	2,09
4	100	49,16	14,79	51,34	6,15	1,85	2,94
	500	54,14	70,09	88,56	6,77	8,76	2,79
	1000	62,86	134,82	148,75	7,86	16,85	2,68
	2500	97,00	311,57	326,32	12,13	38,95	2,48
	5000	163,78	570,76	593,79	20,47	71,35	2,27
	10000	305,65	1016,80	1061,75	38,21	127,10	2,02
8	100	196,69	59,13	205,38	6,15	1,85	2,94
	500	217,90	279,05	354,04	6,81	8,72	2,78
	1000	256,29	533,76	592,10	8,01	16,68	2,65
	2500	408,87	1214,19	1281,18	12,78	37,94	2,42
	5000	703,72	2179,29	2290,09	21,99	68,10	2,17
	10000	1310,26	3780,41	4001,03	40,95	118,14	1,88

7. Referencias bibliográficas

- [1] D. C. Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials* Chapman & Hall, 1991.
- [2] R. O. Handley, *Modern Magnetic Materials: Principles and Applications* New York Wiley, 2000.
- [3] P. Weiss, "La variation du ferromagnétisme avec la température," *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences* vol. 143, pp. 1136-1139, 1906.
- [4] P. Weiss, "L'hypothèse du champ moléculaire et la propriété ferromagnétique," *Journal de physique*, vol. 6, p. 661, 1907.
- [5] G. Bertotti, *Hysteresis in Magnetism: For Physicists, Materials Scientists, and Engineers* San Diego: Academic Press, 1998.
- [6] P. P. Cioffi, "Hydrogenized Iron," *Physical Review*, vol. 39, pp. 363-367, 1932.
- [7] R. M. Bozorth, *Ferromagnetism*. New York Wiley, 1993.
- [8] J.-C. Bayle and J. Verdun, *Alliages fer-silicium*, Techniques de l'ingénieur ed. vol. D 2110, 1991.
- [9] V. E. Lordache, F. O. Sart, and E. Hug, "Magnetic characterization of elastically and plastically tensile strained non-oriented Fe-3.2% Si steel," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* vol. 254-255, pp. 57-59, 2003.
- [10] J. M. Makar and B. K. Tanner, "The effect of plastic deformation and residual stress on the permeability and magnetostriction of steels," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* vol. 222, pp. 291-304, 2000.
- [11] H.F.O. Ison, *Acoustical Engineering*, Van Nostrand Company, 1966
- [12] I.M. Dash, "An equivalent Circuit Model for Moving Coil Loudspeakers", Honours Thesis 1982, School of Electrical Engineering, University of Sydney, Australia



- [13] J. Vanderkoy, "A Model of Loudspeaker Impedance incorporating Eddy Currents in the Pole Structure", 84th Convention of AES, 1988, March 1-4, Paris
- [14] A. Voishvillo, V. Mazin, "Finite element method modeling of Eddy currents and their influence on nonlinear distortion in electrodynamic loudspeakers", 99th AES Convention, 1995 October 6-9, New York
- [15] V. Mazin, "Modeling of magnetic hysteresis and its influence on harmonic distortion in electrodynamic loudspeakers", 106th Convention of the AES, 1999 May 8-11, Munich.
- [16] David Meeker "Finite Element Method Magnetics" Version 4.2, User's Manual October 2010
- [17] L. Hultman, O. Andersson, "Advances in SMC Technology - Materials and Applications", Presented at EJR O PM 2009, Copenhagen, Denmark, October 2009
- [18] "Direct current magnetization curves for various magnetic materials" p. 792, Metals Handbook, 8th edition, Volume 1, American Society for Metals, 1966.