



## Trabajo Fin de Máster

Caracterización de las propiedades magnéticas de  
recipientes de inducción.

Aplicación al cálculo de la impedancia equivalente  
de un sistema inductor-recipiente

Autor/es

Jorge Juan Matute Arcos

Director/es

Dr. Jesús Acero Acero  
Dr. Claudio Carretero Chamarro

Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones  
Universidad de Zaragoza

2011



---

# Caracterización de las propiedades magnéticas de recipientes de inducción.

## Aplicación al cálculo de la impedancia equivalente de un sistema inductor- recipiente

---

### Resumen:

Con el presente Trabajo Fin de Máster se pretende desarrollar una metodología para poder caracterizar el equivalente  $\Delta R-L_{eq}$  de los recipientes usados como carga en encimera de inducción. Este procedimiento nos permitirá calcular la impedancia de la carga a partir de la conductividad eléctrica  $\sigma$  y permeabilidad magnética relativa del material  $\mu_r$ , donde esta última tendrá una forma compleja expresada como suma de la componentes real e imaginaria.

Para ello se ha dispuesto de un permeámetro, para poder medir la permeabilidad e incluir su parte compleja en su cálculo, ya que es representativa de las perdidas en este tipo de materiales. Los ficheros obtenidos mediante el PERMAC, serán usados para poder graficar mediante vectores su comportamiento no lineal, y como parte de la simulación mediante FEM para la obtención de una  $\Delta R$  y  $Leq$  de la carga.

Como parte del trabajo, se ha realizado el mecanizado de un recipiente de inducción para la extracción de una muestra y usarla como probeta de ensayo en el permeámetro. Con esta muestra, dos probetas de calibrado del permeámetro y el procedimiento descrito anteriormente, nos va a permitir realizar una comparación de resultados y obtener el equivalente eléctrico de cada una de ellas.

Como aplicación se incluirá una simulación con Simulink, en la que se introducen los valores obtenidos en COMSOL de la carga para observar el comportamiento no lineal en un sistema completo de inducción.



---

# Characterization of the magnetic properties of induction vessels.

## Application to the calculus of the equivalent impedance of an inductor –cookware.

---

### Summary:

This Master's Thesis tries to develop a methodology in order to characterize the equivalent  $\Delta R$ -Leq of cargo containers used as induction hobs.

This procedure will allow us to calculate the impedance of the load from the electrical conductivity  $\sigma$  and relative magnetic permeability  $\mu_r$  material, where the latter will have a complex shape expressed as the sum of real and imaginary components.

A permeameter has been provided in order to measure the permeability and include its complex hand calculation, since it is representative of the losses in this kind of materials.

The files obtained by PERMAC will be used by vectors to graph nonlinear behavior, and as a part of the simulation to obtain an AR and Leq of the load.

As a part of the work, a machining of an induction cookware has been made to extract a sample and using it as a test tube in the permeameter.

This sample, two calibration tubes of the permeameter and the procedure described above, will allow us to compare results and get the electrical equivalent of each of them.

As an application, a simulation with “simulkin” will be included. This application will supply the values obtained in COSMOL lead to observe the nonlinear behavior of a complete induction system.



*A Ruth.*



## AGRADECIMIENTOS

---

*A todos aquellos que han colaborado y que no aparecen por descuido.*



# ÍNDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>LISTA DE SÍMBOLOS .....</b>  | <b>15</b> |
| <b>CAP. 1 INTRODUCCIÓN .....</b>  | <b>17</b> |
| 1.1. <b>Fundamentos del calentamiento por inducción .....</b>                                     | <b>18</b> |
| 1.1.1. Inducción electromagnética. Efecto Joule. ....   | 18        |
| 1.1.2. Inducción electromagnética. Ley de Faraday. ....   | 20        |
| 1.2. <b>Permeabilidad en materiales ferromagnéticos .....</b>                                     | <b>21</b> |
| 1.3. <b>Descripción del sistema inductor – carga de un sistema de inducción domesticada .....</b> | <b>25</b> |
| 1.4. <b>Círculo equivalente del sistema Inductor – carga .....</b>                                | <b>27</b> |
| <b>CAP. 2 PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO .....</b>   | <b>33</b> |
| 2.1. <b>Motivación.....</b>   | <b>33</b> |
| 2.2. <b>Objetivo .....</b>  | <b>34</b> |
| 2.3. <b>Memoria descriptiva .....</b>   | <b>34</b> |
| 2.4. <b>Organización.....</b>   | <b>35</b> |
| <b>CAP. 3 METODOLOGÍA DE ENSAYO .....</b>   | <b>37</b> |
| 3.1. <b>Muestras.....</b>   | <b>37</b> |
| 3.2. <b>Medidas .....</b>   | <b>38</b> |
| 3.3. <b>Simulación .....</b>  | <b>38</b> |
| <b>CAP. 4 MUESTRAS DE CALIBRADO Y ENSAYO.....</b>   | <b>41</b> |
| 4.1. <b>Muestras de calibrado.....</b>  | <b>41</b> |
| 4.2. <b>Muestras a ensayo.....</b>  | <b>41</b> |
| 4.2.2. Mecanizado Zenith_Base.....  | 42        |
| <b>CAP. 5 DESCRIPCIÓN DEL PERMEÁMETRO DE MEDIDA.....</b>  | <b>45</b> |
| 5.1. <b>Introducción.....</b>   | <b>45</b> |
| 5.2. <b>Descripción por bloques.....</b>  | <b>46</b> |
| 5.2.1. Bloque de generación de señales de test.....   | 46        |
| 5.2.2. Bloque de medida .....   | 47        |

|  |                      |
|--|----------------------|
| 5.2.3. Bloque magnético .....  | 49                   |
| 5.2.4. Control, adquisición y visualización .....  | 50                   |
| <b>5.3. Preparación del equipo y Procedimiento en el ensayo.....</b>   | <b>51</b>            |
| <b>CAP. 6 SIMULACIÓN DE DATOS MEDIANTE F.E.M. ....</b>   | <b>53</b>            |
| <b>6.1. Fundamentos teóricos.....</b>  | <b>53</b>            |
| 6.1.1. Preproceso.....   | 54                   |
| 6.1.2. Proceso.....  | 55                   |
| 6.1.3. Postproceso.....  | 55                   |
| <b>6.2. Preproceso de diseño.....</b>  | <b>55</b>            |
| 6.2.1. Descripción de la geometría del sistema.....  | 56                   |
| 6.2.2. Parámetros físicos .....  | 59                   |
| 6.2.3. Condiciones del contorno.....   | 60                   |
| 6.2.4. Definición de constantes, cálculos con variables globales e integrales<br>sobre variables del sistema ..... | 60                   |
| 6.2.5. Mallado .....   | 63                   |
| <b>6.3. Resolución del procesado del problema y postprcesado de datos.....</b>                                     | <b>65</b>            |
| <b>CAP. 7 RESULTADOS Y REPRESENTACIÓN GRÁFICA .....</b>  | <b>67</b>            |
| <b>7.1. Resultados permeámetro.....</b>  | <b>67</b>            |
| <b>7.2. Resultados de <math>\Delta R</math> y <math>Leq</math> mediante F.E.M. ....</b>                            | <b>71</b>            |
| <b>7.3. Comparación permeabilidades complejas – no complejas .....</b>   | <b>77</b>            |
| <b>CAP. 8 SIMULACIÓN DE UN SISTEMA COMPLETO MEDIANTE SIMULINK ....</b>   | <b>81</b>            |
| <b>8.1. Descripción del sistema de simulación. ....</b>  | <b>81</b>            |
| <b>8.2. Resultados de la simulación.....</b>   | <b>84</b>            |
| <b>CAP. 9 APORTACIONES, CONCLUSIONES<br/>FUTURAS 85</b>  | <b>Y EXTENSIONES</b> |
| <b>9.1. Aportaciones y conclusiones .....</b>  | <b>85</b>            |
| <b>9.2. Extensiones futuras .....</b>  | <b>86</b>            |
| <b>ANEXO A BLOQUE MAGNÉTICO DEL PERMEÁMETRO .....</b>  | <b>89</b>            |
| <b>A.1. Principios teóricos .....</b>  | <b>89</b>            |

---

|  |            |
|--|------------|
| <b>A.2. Propiedades físicas de la bobina generadora de campo .....</b> | <b>92</b>  |
| <b>A.3. Propiedades físicas de la bobina captora.....</b>              | <b>93</b>  |
| <b>ANEXO B RESULTADOS. TABLAS DE DATOS.....</b>                        | <b>95</b>  |
| <b>B.1. Tabla de datos .....</b>                                       | <b>95</b>  |
| <b>B.2. Código Matlab. Representación de gráficas .....</b>            | <b>104</b> |
| <b>REFERENCIAS .....</b>   | <b>109</b> |



## LISTA DE SÍMBOLOS

|               |   |
|---------------|---|
| $x, r, z$     | <i>Coordenadas rectangulares</i>                                    |
| $J$           | <i>Densidad de corriente (A/m)</i>                                  |
| $J^e_\varphi$ | <i>Densidad de corriente</i>  |
| $J_{ind1}$    | <i>Densidad de corriente en el inductor 1 (A/m)</i>                 |
| $J_{ind2}$    | <i>Densidad de corriente en el inductor 2 (A/m)</i>                 |
| $J_{ind3}$    | <i>Densidad de corriente en el inductor 3 (A/m)</i>                 |
| $H$           | <i>Campo magnético (A/m)</i>  |
| $B$           | <i>Inducción magnética y/o densidad de flujo magnético (Teslas)</i> |
| $E$           | <i>Campo eléctrico</i>  |
| $\delta$      | <i>Profundidad de penetración (m)</i>                               |
| $\mu$         | <i>Permeabilidad magnética</i>                                      |
| $\mu'$        | <i>Permeabilidad magnética parte real</i>                           |
| $\mu''$       | <i>Permeabilidad magnética parte compleja (Factor de pérdidas)</i>  |
| $\mu_o$       | <i>Permeabilidad en el vacío</i>                                    |
| $\mu_r$       | <i>Permeabilidad relativa.</i>                                      |
| $\sigma$      | <i>Conductividad eléctrica</i>                                      |
| $\varepsilon$ | <i>Fuerza electromotriz inducida</i>                                |
| $\Phi$        | <i>Flujo magnético (Weber)</i>                                      |
| $W_{ciclo}$   | <i>Área ciclo de histéresis</i>                                     |
| $H_c$         | <i>Campo coercitivo</i>   |
| $B_r$         | <i>Inducción magnética remanente</i>                                |
| $B_s$         | <i>Inducción de saturación</i>                                      |
| $M_s$         | <i>Imanación de saturación</i>                                      |
| $R_o$         | <i>Resistencia inductor. Perdidas por disipación de potencia.</i>   |
| $\Delta R$    | <i>Contribución resistiva de la carga.</i>                          |
| $R_{eq}$      | <i>Resistencia global del sistema</i>                               |
| $L_o$         | <i>Inductancia del bobinado sin recipiente.</i>                     |

|                     |  |
|---------------------|--|
| $\Delta L$          | <i>Contribución de la carga a la inductancia.</i>    |
| $L_{eq}$            | <i>Inductancia global del sistema</i>                |
| $L_p$               | <i>Inductancia del primario.</i>                     |
| $L_s$               | <i>Inductancia del secundario</i>                    |
| $R_p$               | <i>Resistencia primario</i>                          |
| $R_s$               | <i>Resistencia secundario</i>                        |
| $Z_{eq}$            | <i>Impedancia equivalente total del sistema</i>      |
| $\text{Re}(Z_{eq})$ | <i>Parte real de la impedancia equivalente.</i>      |
| $\text{Im}(Z_{eq})$ | <i>Parte imaginaria de la impedancia equivalente</i> |
| $\eta_{ind}$        | <i>Rendimiento por inducción.</i>                    |
| $N$                 | <i>Número de vueltas del bobinado</i>                |
| $N_p$               | <i>Numero de vueltas del primario.</i>               |
| $l$                 | <i>Longitud media</i>                                |
| $L_m$               | <i>Longitud magnética media</i>                      |
| $I$                 | <i>Corriente</i>                                     |
| $I_{ind}$           | <i>Amplitud de la corriente en el inductor</i>       |
| $I_p$               | <i>Corriente de primario</i>                         |
| $1/RC$              | <i>Constante de tiempo del integrador.</i>           |
| $G$                 | <i>Ganancia.</i>                                     |
| $\omega$            | <i>Frecuencia angular.</i>                           |

## *Capítulo 1*

### **INTRODUCCIÓN**

---

En este capítulo se presentarán los fundamentos teóricos del calentamiento por inducción así como las propiedades de los materiales ferromagnéticos, que serán nuestro objeto de estudio, para poder obtener los resultados que caracterizan la carga en un sistema de inducción.

Se analizarán las pérdidas de inducción, y se establecerá un procedimiento en los siguientes capítulos que nos permitirá cuantificar, en función del campo aplicado, las perdidas en el sistema producidas por la carga aplicada y obtener un equivalente eléctrico  $R-L$ .

Se expondrá la metodología actual para el cálculo, diseño y análisis de un sistema inductor – recipiente, y las posibilidades que puede alcanzar el presente TFM.

## 1.1. Fundamentos del calentamiento por inducción

Como calentamiento por inducción se conoce a la disipación de potencia que se producen en algunos materiales al ser sometidos a campos magnéticos variables. Estos materiales toman energía del campo y la transforman en calor mediante dos fenómenos:

- Disipación de energía por efecto Joule debido a las corrientes inducidas en el material.
- Histéresis magnética debida a procesos irreversibles de imantación de los materiales.

### 1.1.1. Inducción electromagnética. Efecto Joule.

Los principios básicos de la inducción electromagnética son bien conocidos. Una corriente eléctrica que circula por un conductor en forma de bobina (inductor), genera un campo magnético en sus alrededores tal y como se indica en la Fig. 1.1. La mayor intensidad, se produce en el núcleo de la bobina y depende de la corriente de excitación y del número de espiras de la bobina.

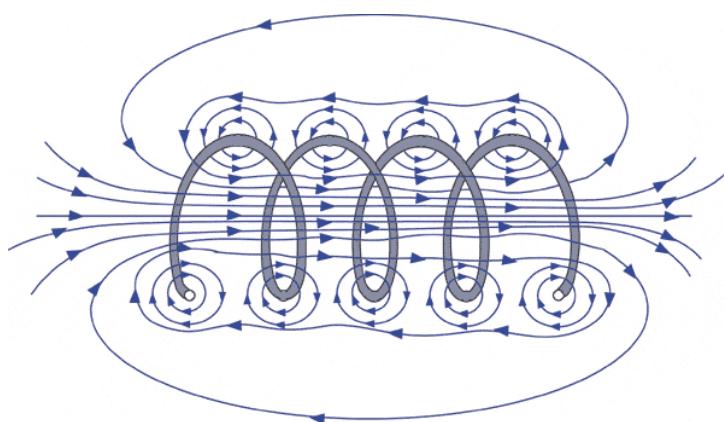


Fig. 1.1. Bobina y campo magnético generado al circular corriente.

Si se coloca un elemento de un material ferromagnético dentro de un campo magnético alterno, se inducen unas corrientes concentradas hacia la superficie, denominadas corrientes de *Foucault*. Estas corrientes se cierran dentro del mismo medio y son las responsables de la generación de calor por efecto Joule (Fig. 1.2).

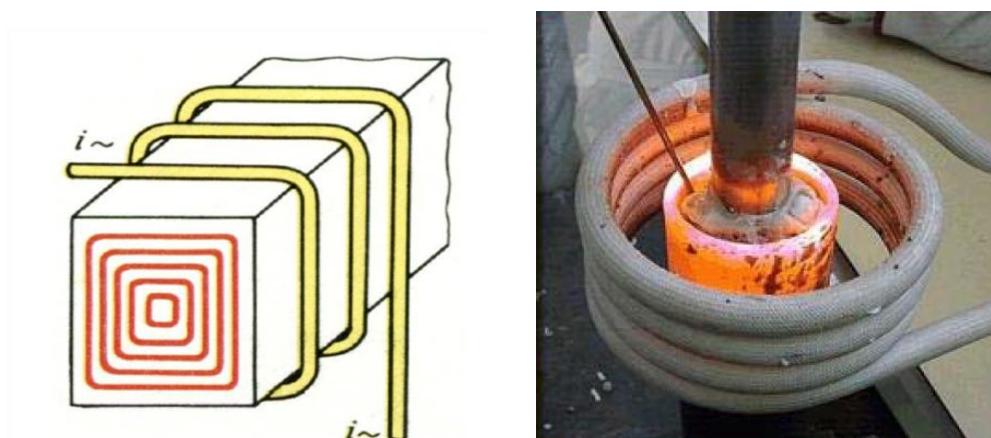


Fig. 1.2. Efecto de las corrientes inducidas. Calentamiento por inducción.

El campo alterno también produce sucesivas magnetizaciones y desmagnetizaciones en el material sometido al campo, que se traduce en sucesivos *ciclos de histéresis*, los cuales también producen pérdidas de energía electromagnética que se convierten en calor.

Lo que constituye un fenómeno indeseable en algunos circuitos eléctricos, es decir las pérdidas provocadas por la inducción electromagnética, se convierte en una herramienta de aplicación. Aplicando oscilaciones o frecuencias desde 60 Hz hasta los 60 MHz se pueden lograr diferentes temperaturas de miles de grados, con distinta profundidad de alcance sobre el cuerpo a calentar.

### 1.1.2. Inducción electromagnética. Ley de Faraday.

Las inducción electromagnética o Ley de Faraday es un fenómeno que origina una fuerza electromotriz en un cuerpo expuesto a un campo magnético variable y que cuando dicho cuerpo es conductor, se generan unas corrientes inducidas superficiales tal y como puede observarse en la Fig. 1.3.

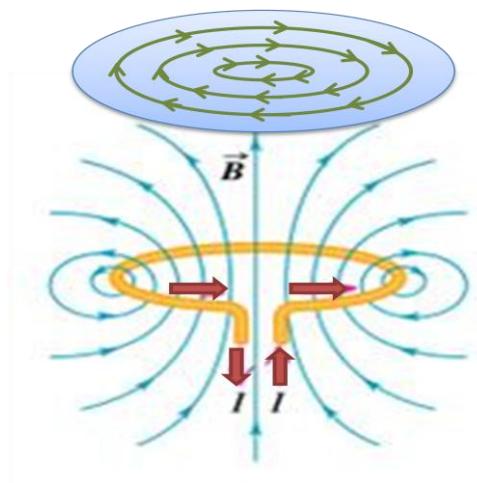


Fig. 1.3. Representación de La Ley de Faraday. En rojo la corriente inductora, en azul el flujo producido por una espira, y en verde la corriente inducida en un material ferromagnético. Bobina y campo magnético generado al circular corriente.

La ley de inducción de Faraday (1.1) establece que la Fuerza Electromotriz inducida en un circuito es igual a menos la derivada del flujo magnético  $\phi$  con respecto del tiempo. Matemáticamente se puede expresar como:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1)$$

Donde:

$\varepsilon$  : Fuerza electromotriz inducida.

$\phi$  : Flujo magnético en Weber

$t$  : Tiempo en segundos

## 1.2. Permeabilidad en materiales ferromagnéticos

Son dos características esenciales las que definen un material ferromagnético en cuanto a su comportamiento frente a un campo magnético externo y que están relacionadas entre sí:

- *Permeabilidad magnética relativa.*
- *Ciclo de histéresis*

Se denomina *permeabilidad magnética* a la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través de sí los campos magnéticos, la cual está dada por la relación entre la inducción magnética existente y la intensidad de campo magnético que aparece en el interior de dicho material.

Los materiales se pueden clasificar según su permeabilidad magnética relativa en:

- Ferromagnéticos, cuyo valor de permeabilidad magnética relativa es muy superior a 1.
- Paramagnéticos o no magnéticos, cuya permeabilidad relativa es aproximadamente 1 (se comportan como el vacío).
- Diamagnéticos, de permeabilidad magnética relativa inferior a 1.

La magnitud así definida, el grado de magnetización de un material en respuesta a un campo magnético, se denomina permeabilidad absoluta y se suele representar por el símbolo  $\mu$ .

La permeabilidad magnética y las perdidas magnéticas en un material ferromagnético, son factores importantes para poder establecer un modelo de análisis de la carga en un sistema de inducción. Por esta razón es conveniente estudiar la permeabilidad magnética de materiales ferromagnéticos realizando los ensayos sin tener en cuenta su dependencia con la frecuencia. Estos materiales pueden considerarse materiales homogéneos, y lineales a los que se

les aplica una excitación que corresponde a un campo magnético  $H$ , y dicho sistema responde con una densidad de flujo magnético  $B$ .

La relación entre  $B$  y  $H$  en un sistema lineal será la permeabilidad magnética:

$$B = \mu^* H \quad (1.2)$$

Los materiales magnéticos en campos sinusoidales, tienen en la práctica, perdidas magnéticas, esto se puede expresar considerando a  $\mu$  como una magnitud compleja:

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (1.3)$$

Siendo  $\mu''$  el factor de pérdidas y que corresponde con el área que encierra el ciclo de histéresis.

Como es sabido el *ciclo de histéresis* puede representarse como  $B$  frente a  $H$ , tal y como se indica en la figura 1.4.

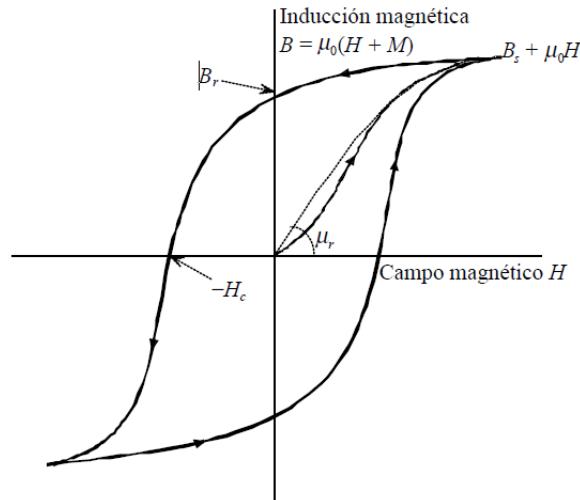


Fig. 1.4. Ciclo de histéresis de un material ferromagnético B-H.

Dentro del ciclo de histéresis magnético, inducción magnética  $B$  generada frente a campo magnético aplicado  $H$ , esquematizado en la Fig. 1.4, podemos distinguir los siguientes puntos básicos marcados:

$H_c$  : campo coercitivo definido como el campo necesario para anular la inducción magnética en el material

$B_r$  : inducción magnética remanente, valor de  $B$  para  $H = 0$ ; en este punto todo el  $B$  presente es debido a la imantación remanente en el material.

$B_s$  : inducción de saturación que es valor límite de  $B - \mu_0 H$  para valores grandes de campo magnético; este valor es suma de la imantación de saturación en el material más el campo aplicado

$M_s$  : imantación de saturación  $= B_s / \mu_0$ . En este punto tenemos en el material un único dominio con su imantación apuntando en la dirección del campo aplicado

$\mu'$  : Permeabilidad relativa definida como la pendiente de la recta asociada al movimiento irreversible de paredes de dominio en el primer ciclo de aplicación de campo.

El área incluida en la curva de histéresis es proporcional a la energía disipada en forma de calor en el proceso irreversible de imantación y desimantación. Si este área es pequeña, las pérdidas de energía en cada ciclo será pequeña, y el material se denomina magnéticamente blando y en caso contrario duro.

Existe una relación entre el área del ciclo de histéresis  $w_{ciclo}$  y la parte compleja de la permeabilidad  $\mu''$ , así como la relación entre la pendiente al comienzo del proceso de imantación del material ferromagnético y la parte real de la permeabilidad  $\mu'$ .

$$\mu' = \operatorname{tg} \alpha = \frac{B_0}{H_0} = \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (1.4)$$

$$w_{ciclo} = \oint \mu_0 B dH = \pi \mu_0 \mu'' H_0^2 \quad (1.5)$$

El área del ciclo de histéresis puede obtenerse de manera experimental para cada tipo de material de una manera cuasiestática, es decir, con frecuencias del orden de 1-2Hz tal y como se explica en el capítulo 5.

### 1.3. Descripción del sistema inductor – carga de un sistema de inducción domestica

En un sistema inductor – carga , el inductor es el encargado de generar el campo magnético variable que será el responsable de que se produzca una disipación de potencia en la carga.

Se trata de una transformación de energía eléctrica en energía calorífica.

En el diseño, la carga debe de considerarse como parte del modelado del circuito y tratarlo como un conjunto completo.

Los elementos del sistema inductor – carga en una cocina de inducción domestica, mostrados en la figura 1.5 consta de varios elementos que son detallados a continuación. Cada uno de ellos cumple una misión debido a sus propiedades electromagnéticas y a su forma geométrica cilíndrica, que será la base de coordenadas en el análisis posterior al problema.

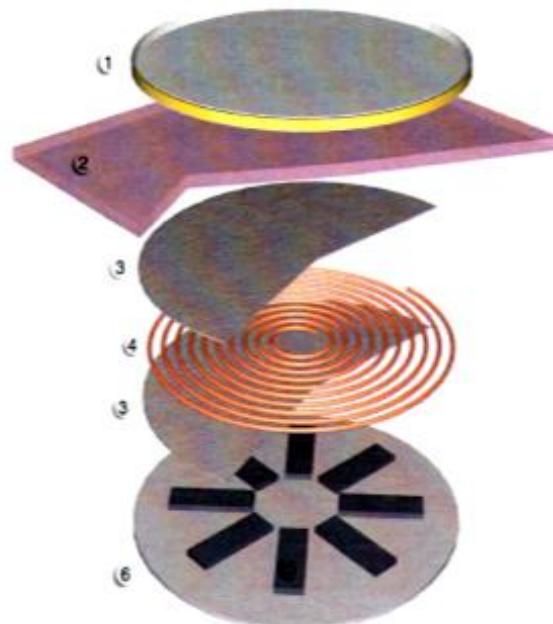


Fig. 1.5. Elementos del sistema inductor - carga en una cocina de inducción domestica

1.- Recipiente: Constituye la carga del sistema inductor – carga. La disipación de potencia se produce en la carga caracterizada por su geometría cilíndrica y propiedades electromagnéticas.

En la carga, se producen una serie de pérdidas que deben de ser consideradas en el modelado y análisis del sistema. Posteriormente, el recipiente será nuestro objeto de estudio como carga del sistema inductor-carga.

2.- Cristal vitrocerámico: Es una lámina de cristal de 4 mm de espesor de cristal vitrocerámico, usado como soporte de los recipientes.

3.- Aislante eléctrico: La normativa exige que exista una distancia mínima de 5 mm entre el usuario y los elementos sometidos a tensión. Por tal motivo se dispone una lámina de mica de 1mm entre el inductor y el cristal vitrocerámico.

4.- Inductor: Está compuesto por un arrollamiento de cable conductor, de difícil diseño y sujeto a muchas restricciones tales como su forma, tamaño, potencia requerida y perdidas en el propio inductor.

El diseño del sistema inductor – carga, va a ser unas de las claves del sistema de inducción, ya que un sistema será más eficiente cuantas menos pérdidas tenga o menos pérdidas generen otros elementos del sistema.

5.- Ferritas: Son elementos con una alta permeabilidad magnética y nula conductividad, usados para redirigir el campo magnético mejorando el rendimiento del sistema y apantallando el sistema electrónico situado por debajo.

6.- Apantallamiento: Dispuesto bajo el sistema inductor- carga evitando que distintos elementos se calienten y sufran alteraciones debido a interferencias producidas por el campo generado por el inductor sobre la electrónica.

## 1.4. Circuito equivalente del sistema Inductor – carga

El modelo equivalente de la Fig. 1.6 es dependiente de diversos factores tales como la frecuencia, corriente, geometría del inductor, distancias, geometría de la ferrita, y por parte del recipiente, conductividad del material, permeabilidad, tamaño, afectando así a las pérdidas que se producen en el sistema.

El sistema inductor – recipiente es un modelo bastante complejo que se modela como un sistema acoplado. El conjunto del sistema inductor recipiente, Fig. 1.6., puede quedar idealizado como un transformador donde el devanado del primario es el inductor y el secundario es el núcleo y el recipiente.

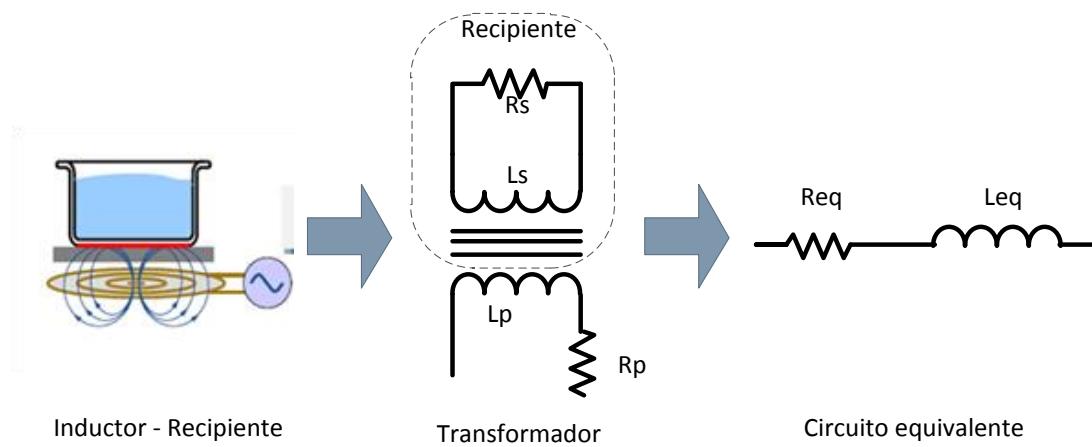


Fig. 1.6. Modelo equivalente del sistema Inductor - Carga.

En el circuito equivalente,  $Req$  representa la resistencia global del sistema en cuanto a disipación de potencia.  $Leq$  representa la relación entre el flujo de campo magnético y la corriente de excitación.

Si analizamos el circuito, tanto  $Req$  como  $Leq$  pueden descomponerse en dos partes, una perteneciente a la resistencia e inductancia del bobinado,  $R_o$  y  $L_o$ , y otra que representa la variación de resistencia e inductancia de la carga  $\Delta R$  y  $\Delta L$ .

$$Req = R_o + \Delta R \quad (1.6)$$

$$Leq = L_o + \Delta L \quad (1.7)$$

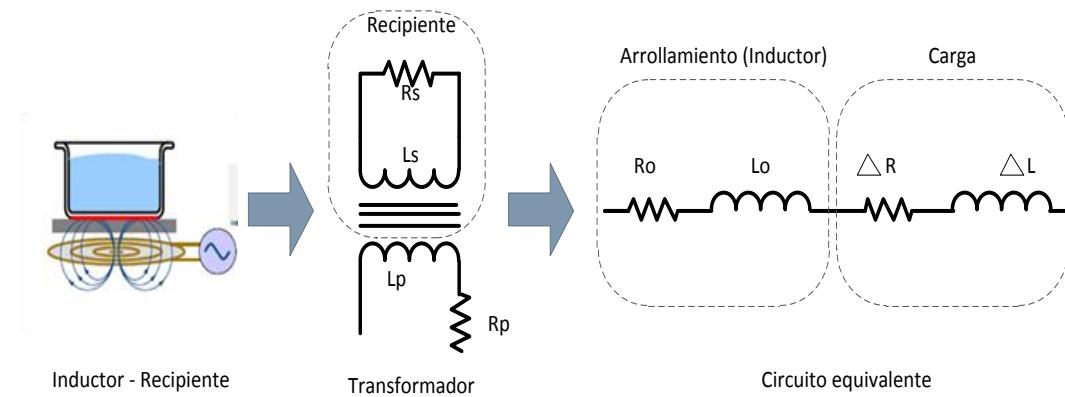


Fig. 1.7. Equivalencias de inductancia y resistencia en sistema inductor - carga.

Siendo:

$R_o$ : Resistencia del inductor. Representa las pérdidas provocadas por disipación de potencia en los devanados de cobre.

$L_o$ : Inductancia del bobinado sin el recipiente

$\Delta R$ : Contribución de resistiva de la carga. Resistencia debida a la inducción.

$\Delta L$ : Contribución de la carga a la inductancia.

Por lo tanto la impedancia total  $Zeq$  del sistema será:

$$Zeq = Req + j\omega Leq \quad (1.8)$$

Bien es cierto que,  $R_o$  y,  $L_o$  son parámetros que varían en función de la geometría del inductor y de las características físicas propias del sistema, pero también varían sus valores dependiendo del tipo de carga aplicada, ya que existe una relación entre las perdidas en el inductor, el campo magnético total y la carga aplicada.

Se puede ver, que los parámetros  $Req$  y  $Leq$  dependen de factores tales como los mostrados en la Fig. 1.8.

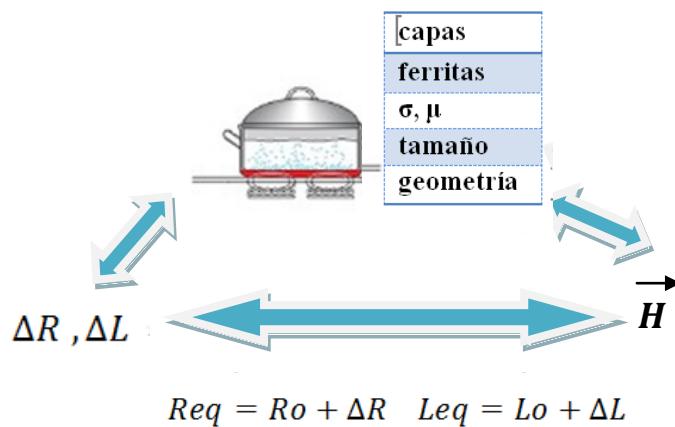


Fig. 1.8. Representación de la relación entre parámetros.

El rendimiento por inducción,  $\eta_{ind}$ , del sistema inductor – carga cuantifica la eficiencia de la transmisión de energía a la carga y depende tanto del inductor como de las propiedades de la carga.

$$\eta_{ind} = \frac{\Delta R}{R_{eq}} = \frac{\Delta R}{R_o + \Delta R} \quad (1.9)$$

El rendimiento en el inductor depende de varios parámetros tal y como se muestra en las Tabla 1.1 y Tabla 1.2 .

Tabla 1.1

| Parámetros dependientes de $R_o$                 |  |
|--|--|
| Tipo de cable del inductor                       | Cable rígido:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro</li> </ul> Cabe Multihebra:<br><ul style="list-style-type: none"> <li>• Diámetro</li> <li>• Numero de hebras</li> <li>• Diámetro de la hebra</li> <li>• Geometría del cable</li> <li>• Empaquetamiento</li> </ul> |
| Propiedades del inductor                         | Conductividad eléctrica<br>Temperatura   |
| Inductor   | Geometría<br>Numero de vueltas<br>Diámetro interior y exterior   |
| Parámetros que afectan al campo electromagnético | Geometría del sistema<br>Ferrita<br>Apantallamiento<br>Tipo de carga (Recipiente)<br>Excitación<br>Temperatura de operación  |

Tabla 1.2

| Parámetros dependientes de $\Delta o$ |  |
|---------------------------------------|--|
| Propiedades eléctricas y magnéticas   | Conductividad eléctrica<br>Permeabilidad magnética   |
| Parámetros constructivos              | Diámetro del recipiente<br>Espesor<br>Estructura y composición<br>Número de vueltas del inductor<br>Diámetros interior y exterior del inductor<br>Distancias inductor – recipiente<br>Centraje |
| Ferritas y apantallamiento            | Existencia o ausencia<br>Propiedades magnéticas y eléctricas<br>Geometría<br>Distancias inductor – recipiente  |
| Excitación                            | Nivel de señal<br>Tipo de señal<br>Frecuencia  |
| Temperatura                           | Dependencia de las propiedades del recipiente con la temperatura   |



## Capítulo 2

# PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO

---

### 2.1. Motivación

Una carga apropiada en un sistema de calentamiento por inducción domestica, puede mejorar la eficiencia y la calidad del sistema completo. En el capítulo 1 hemos podido observar que la caracterización de la carga en un sistema de inducción es una tarea compleja debido a la multitud de variables de las que depende.

Hasta ahora el modelo equivalente de la carga se obtenía a partir de la permeabilidad del material, pero solo teniendo en cuenta su parte real, es decir, con una permeabilidad constante característica de cada material (Cargas lineales). De esta manera se puede obtener la *profundidad de penetración*  $\delta$  para el cálculo de perdidas en la carga  $\Delta R$ .

El equivalente de la carga se obtiene de forma analítica mediante las ecuaciones de Maxwell, o bien de forma numérica mediante F.E.M. (Finite Element Method).

Este tipo de simulaciones mediante F.E.M., nos permiten integrar multitud de parámetros tanto geométricos como físicos de distintos tipos de materiales y nos aportan soluciones que no lo hacen las mencionadas anteriormente.

Esto nos lleva a buscar una metodología de ensayo y simulación que nos permita extraer la permeabilidad compleja de diversos materiales y poder utilizarla para obtener un modelo equivalente de la carga, no lineal, en la que la parte compleja de la permeabilidad representa las pérdidas que se producen en el material al magnetizarse.

## 2.2. Objetivo

El propósito de este Trabajo Fin de Máster (TFM) es establecer una metodología para poder caracterizar los materiales ferromagnéticos que son usados como carga (recipientes) en sistemas de calentamiento por inducción.

Mediante un sistema de ensayo y simulación se obtendrán valores  $\Delta R$  y  $L_{eq}$ , incluyendo la permeabilidad relativa compleja del material,  $\mu = \mu_{real} - j\mu_{imag}$ , siendo la parte imaginaria, la que origina perdidas en el sistema debido a la magnetización-desmagnetización del material (Ciclo de histéresis). Esto nos permitirá extraer el comportamiento no lineal de la carga al aplicarle un campo magnético.

## 2.3. Memoria descriptiva

Con esta memoria se desea establecer el procedimiento que se ha de seguir para obtener el equivalente eléctrico de un sistema inductivo con cargas con comportamiento R-L no lineal.

El siguiente TFM comprende las siguientes tareas y actividades:

- Obtención de la permeabilidad relativa compleja y del ciclo de histéresis del material ferromagnético a ensayar.
- Representación de los valores obtenidos de permeabilidades y ciclos de histéresis en MATLAB para cada una de las muestras.
- Simulación mediante F.E.M. del sistema completo inductor – carga para la obtención de  $\Delta R$  y  $L_{eq}$  con los valores obtenidos anteriormente para cada una de las muestras.
- Representación con MATLAB de los valores obtenidos de  $\Delta R$  y  $L_{eq}$  para cada una de las muestras.
- Simulación de la carga no lineal con los valores obtenidos anteriormente en una etapa medio puente resonante para un ciclo de red y comprobación cualitativa con formas de onda de osciloscopio.

## 2.4. Organización

El trabajo Fin de Máster, está organizado en 11 capítulos. Tras la introducción realizada en el capítulo 1, en el capítulo 2 se desarrolla una planificación del trabajo y del capítulo 3, surgirán los capítulos siguientes, así como los resultados obtenidos en los ensayos realizados.

De manera concisa el trabajo desarrollado y las conclusiones alcanzadas comprenden las siguientes tareas y actividades:

Capítulo 1: El primer capítulo es una breve introducción a los fundamentos del calentamiento por inducción y del comportamiento de los materiales ferromagnéticos cuando les es aplicado un campo magnético externo.

Capítulo 2: En este capítulo se justifica la realización de este trabajo fin de máster exponiendo la motivación, objetivos y su alcance.

Capítulo 3: El capítulo 3 es una descripción de la metodología de los ensayos que se van a realizar así como de la secuencia en pasos que se ha de seguir para la obtención de los resultados.

Capítulo 4: El capítulo 4 explica las características de las muestras a ensayar, diferenciando las de calibrado de las muestras que se han de mecanizar para poder realizar su medición.

Capítulo 5: El capítulo 5 contiene los aspectos relacionados con el permeámetro en cuanto a fundamentos, descripción, características, procedimientos en el ensayo y resultados obtenidos en la obtención del ciclo de histéresis y permeabilidades.

Capítulo 6: El capítulo 6 describe el procedimiento de diseño y simulación mediante F.E.M.

Capítulo 7: El capítulo 7 muestra todos los resultados y representaciones gráficas obtenidas

Capítulo 8: Simulación en simulink con los resultados obtenidos de  $\Delta R$  y  $L_{eq}$  para un ciclo de red

Capítulo 9: El capítulo 9 recoge respectivamente las conclusiones, aportaciones y líneas abiertas en siguientes proyectos futuros.

Adjuntos al documento principal figuran los Anexos, que aportan aspectos complementarios al estudio del proyecto.

## *Capítulo 3*

# METODOLOGÍA DE ENSAYO

En este capítulo se expondrá la metodología de ensayo y simulación que consiste en la extracción de muestras, medidas y simulación. Este capítulo es el preámbulo al desarrollo de los siguientes, que de forma más detallada, se explican tanto los fundamentos físicos como los procedimientos llevados a cabo.

### 3.1. Muestras

Dado que en el mercado existen multitud de recipientes para cocinas de inducción, la muestra que usaremos para poder caracterizar la carga en este tipo de sistemas será representativa de los materiales y espesores de dichos recipientes. Para disponer de la muestra se tendrá que realizar un mecanizado y extraer la parte que entra en acoplamiento magnético con el inductor. El recipiente utilizado es un Zenith, por ser unos de los más usados en este tipo de encimeras.

Para que los ensayos realizados muestren una fiabilidad en cuanto a medidas, se ensayaran dos muestras de calibrado antes que la muestra obtenida del recipiente de inducción.

Las muestras medidas son las siguientes:

- *Zenith\_Base*: Muestra de recipiente de inducción doméstico.
- *FX*: Muestra de calibrado.
- *FY*: Muestra de calibrado.

### 3.2. Medidas

Para poder realizar las medidas de las permeabilidades de las muestras y probetas, así como, sus ciclos de histéresis, necesitaremos un permeámetro que tenga la capacidad de medir la permeabilidad de un material en estático o cuasiestático con un margen de error tolerable muy próximo a una medida hecha en DC.

Tras un procesado de los datos obtenidos mediante la lectura de distintas variables con un Sistema de Adquisición de Datos (S.A.D.), el software vinculado ha de calcular la magnitud real y compleja de la permeabilidad en función del campo  $H$ .

### 3.3. Simulación

Con los datos obtenidos de las medidas realizadas con el permeámetro, procederemos a realizar una simulación en la que se pueda incluir la permeabilidad en su forma compleja para la obtención de los equivalentes eléctricos de un sistema inductor – recipiente,  $\Delta R$  y  $L_{eq}$

Resolveremos el problema mediante F.E.M. por las ventajas que ofrece este método tal y como se indica en el capítulo anterior y podremos obtener distintos valores de  $\Delta R$  y  $L_{eq}$  para cada valor de  $H$ , y por lo tanto de  $I$ , ya que, según la ley de Ampere de forma general se relaciona la generación de campo magnético a partir de una corriente:

$$\oint H dl = \sum I \quad (3.1)$$

Teniendo en cuenta el número de vueltas  $N$ , y la longitud media  $l$  se puede establecer una relación entre  $H$  e  $I$ :

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \quad (3.2)$$

Así como de  $B$ :

$$B = \mu H = \frac{\mu \cdot I \cdot N}{l} \quad (3.3)$$

A partir de la fuerza electromotriz en el inductor,

$$\mathcal{E} = \oint_{\text{espiras}} Edr \quad (3.4)$$

Obtendremos la impedancia equivalente del sistema:

$$Z_{eq} = \frac{\mathcal{E}}{I_{ind}} \quad (3.5)$$

Hay que tener en cuenta que los valores de  $\Delta R$  y  $L_{eq}$  son no lineales, pero la impedancia para cada uno de los valores de permeabilidad será constante.

En los siguientes capítulos se desarrolla más ampliamente cada uno de estos pasos.



## Capítulo 4

### MUESTRAS DE CALIBRADO Y ENSAYO

---

#### 4.1. Muestras de calibrado.

Para comprobar la calibración del permeámetro realizada en ENAC (Entidad Nacional de Acreditación), se han mandado a caracterizar dos muestras al Laboratorio de Medidas Magnéticas (LMM). Las dos muestras enviadas son las siguientes:

- FY , anchura 40 mm espesor 3 mm
- FX, anchura 30 mm espesor 3 mm

Estas muestras son ensayadas por nuestro permeámetro y comparadas con un permeámetro del LMM para poder realizar una comparación y ajuste de las medidas magnéticas resultantes tanto en AC como en una aproximación en DC (Frecuencias del orden de 1Hz-2Hz).

#### 4.2. Muestras a ensayo.

Las muestras sometidas a ensayo y sus características dimensionales son:

---

Tabla 4.1

| DENOMINACION | DIMENSIONES  | DESCRIPCIÓN   |
|--------------|--|---|
| FX           | Anchura(mm):30,00<br>Espesor(mm):3,00<br>Sección(mm <sup>2</sup> ):90,00 | Probeta de calibrado del PERMAC   |
| FY           | Anchura(mm):40,00<br>Espesor(mm):3,00<br>Sección(mm <sup>2</sup> ):90,00 | Probeta del calibrado del PERMAC  |
| Zenith_Base  | Anchura(mm):40,0<br>Espesor(mm):0,70<br>Sección(mm <sup>2</sup> ):28,00  | Probeta mecanizada correspondiente a la base de un recipiente de inducción domestica. |

---

#### 4.2.2. Mecanizado Zenith\_Base.

El modelo de recipiente que hemos elegido para la obtención de una muestra es representativo de los recipientes que se encuentran en la actualidad en el mercado.

Su base consta de tres capas:

- A.-Base ferromagnética. (Muestra Zenith)
- B.- Elemento medio con aleación de aluminio.
- C.- Acero inoxidable como superficie en contacto con el alimento.

De forma generalizada los recipientes usan fondos termodifusores de calor con la siguiente composición: (Acero Inoxidable 18/10 + Aluminio + Acero Inoxidable 17%Cr). (Fig.4.1.)

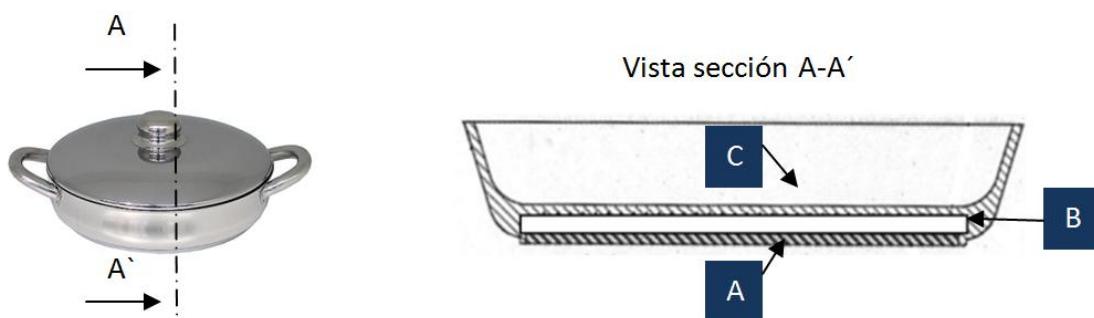


Fig.4.1.: Vista de sección de un recipiente usado en cocinas de inducción domestica, formado por tres capas: A.- Acero inoxidable con un 17% de cromo., B.- Elemento termodifusor de aluminio, C.- Acero inoxidable 18/10

*Elemento A:* Los aceros inoxidables que contienen solamente cromo, se llaman "ferríticos", ya que tienen una estructura metalográfica formada básicamente por ferrita. Son magnéticos, y se distinguen porque son atraídos por un imán. Estos aceros, con elevados porcentajes de carbono, son templables y, por tanto, pueden endurecerse por tratamiento térmico.

*Elemento B:* Aluminio como elemento difusor del calor que se provoca en el elemento A, debido a las corrientes inducidas que por el circulan. Permite un reparto de calor más uniforme en el elemento B.

*Elemento C:* Los aceros inoxidables que contienen más de un 7% de níquel, no son magnéticos en estado recocido, y por tanto no son atraídos por un imán. Estos aceros austeníticos se pueden endurecer por deformación, pasando su estructura metalográfica a contener "martensita". En esta situación se convierten en parcialmente magnéticos.

La muestra objeto de estudio, será aquella que entre en contacto con el campo, ya que las corriente inducidas son de unas pocas micras de espesor. Así pues la muestra A será nuestro campo de estudio.

Para mecanizar la superficie de apoyo del recipiente será necesario realizar las siguientes acciones:

- Obtención de la muestra principal mediante corte con esmeril.
- Al ser un corte destructivo, la muestra tendrá un tamaño superior al de la probeta a ensayar.
- Rectificado de la muestra con rectificadora convencional.
- Se rectificara la muestra hasta obtener la medida deseada.
- Separación del compuesto.

Los compuestos están pegados mediante pasta probablemente termodifusora, que es muy utilizada en el diseño y fabricación de estos elementos.

Lo que se ha podido comprobar en el mecanizado de la muestra Zenith\_Base, es que la estampación, es la que hace que los materiales estén fielmente unidos más que el adherente. Con un correcto rectificado, sin síntomas en la muestra de curvaturas de embutición, las capas se despegan con unos ligeros tirones.



## Capítulo 5

# DESCRIPCIÓN DEL PERMEÁMETRO DE MEDIDA

---

### 5.1. Introducción

La caracterización magnética de aceros magnéticos industriales se realiza habitualmente con permeámetros AC de circuito cerrado, a la frecuencia de red (50 Hz) y a temperatura ambiente. El sistema que aquí se va a presentar es un permeámetro AC de circuito magnético cerrado para la caracterización magnética de cintas de aceros. El diseño del equipo está basado en la norma internacional IEC 60404-3.

El sistema consta de un bobinado primario y secundario en torno a un soporte en el que se introduce la muestra. Una fuente de voltaje sinusoidal hace circular una corriente en el primario que produce un campo magnético en la cinta. La circulación de las líneas de campo se cierra con un cortocircuito magnético. La integral del voltaje inducido en el secundario es proporcional a la permeabilidad magnética de la muestra y al campo magnético aplicado.

El valor del campo magnético se obtiene mediante una sonda hall. La sonda hall está insertada en un soporte fijo en el centro de la bobina justo debajo de la muestra.

El rango de funcionamiento es el siguiente:

---

Tabla 5.1

---

| Frecuencias | Campo magnético    | El error de medida<br>a 5 Hz | Dimensiones<br>máximas de la<br>probeta                                 |
|-------------|--------------------|------------------------------|---|
| 1 – 200 Hz  | 30 A/m – 9400 A/m. | < 5%.                        | Longitud $\geq$ 20 cm<br>Anchura $\leq$ 4.5 cm<br>Espesor $\leq$ 0.5 cm |

---

## 5.2. Descripción por bloques

En la Fig. 5.1 se puede observar una imagen general del equipo donde se aprecian los cuatro bloques que conforman el PERMAC. El primero de ellos es el de generación de las señales de test, el segundo es el bloque de medida, el tercero es el bloque magnético y el cuarto bloque es el de control, adquisición y visualización.

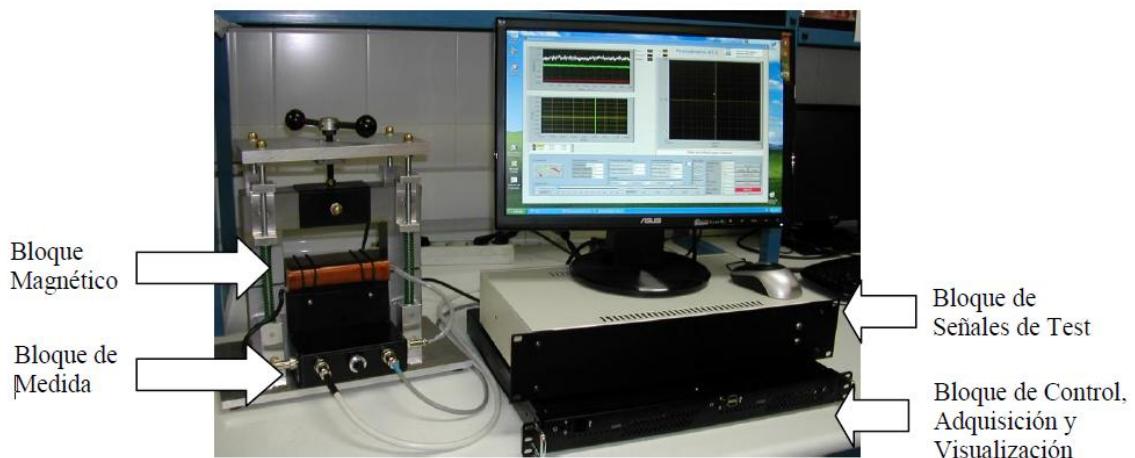


Fig 5.1.: Bloques de los que consta el Equipo PERMAC

Inicialmente nos centraremos en los bloques que llevan circuitería eléctrica y electrónica y que se corresponden con los de generación de señales de test y medida. Los otros dos bloques (el magnético y el de control, adquisición y visualización) serán tratados a continuación.

### 5.2.1. Bloque de generación de señales de test

En esta sección se describe el bloque para generar las señales de test. Dicho bloque se divide en tres partes: control, acondicionamiento y potencia.

El PC genera dos señales (AC y DC) a partir de una tarjeta de adquisición de datos que son sumadas. La señal resultante proporciona sendas contribuciones del campo magnético generado por el bobinado primario en el bloque magnético.

Sin embargo, entre el PC y el bloque magnético es necesario incluir una etapa de potencia que proporciona  $\pm 30$  V y 5 A. En Fig. 5.2. se puede apreciar una imagen con la apariencia final de la etapa de potencia.



Fig 5.2.: Etapa de potencia mediante dos fuentes S-150-27, Meanwell de 150 W que proporcionan  $\pm 30$  V y 5 A.

### 5.2.2. Bloque de medida

En este apartado se describen los diferentes sistemas electrónicos utilizados para el preprocesamiento de las señales de salida. Más concretamente, estas señales son la medida de la corriente real que circula por el bobinado primario, el campo magnético aplicado sobre la muestra y la tensión generada en el bobinado secundario. En Fig. 5.3. se puede apreciar una imagen general del bloque de medida.



Fig 5.3. Acondicionamiento y Preprocesamiento de las señales del bloque de medida

*Medida de la corriente del bobinado primario:* El primer circuito que compone este bloque de medida se corresponde con la estimación de la corriente que entra al bobinado primario. Este valor es obtenido a través de un sensor de corriente conectado en serie. El voltaje generado por el sensor es procesado con un filtro pasa baja.

Desde un punto de vista teórico el campo magnético,  $H$  (A/m), generado por el primario, puede calcularse haciendo uso de la expresión:

$$H = I_p \frac{N_p}{L_m} \quad (5.1)$$

Donde:  $N_p$  es el número de espiras del bobinado primario y  $L_m$  es la longitud magnética del circuito. Aunque esta expresión permite calcular el campo de manera teórica, una estimación mucho más precisa se lleva a cabo mediante la lectura directa del valor del campo magnético a través de un sensor Hall.

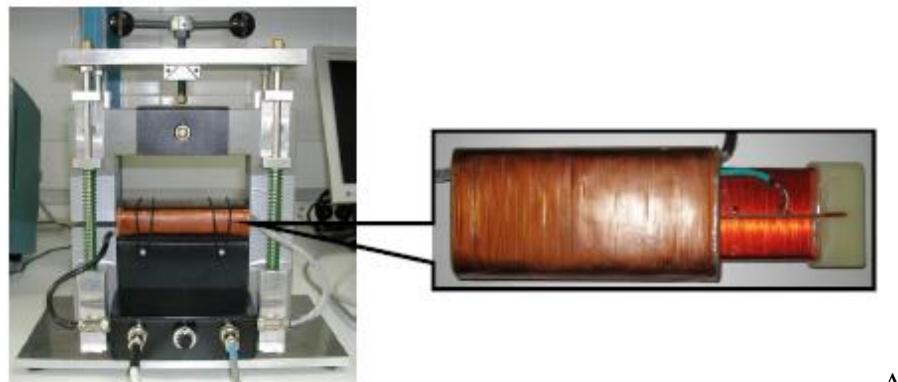
*Medida del campo magnético:* El campo aplicado a la chapa se mide con un sensor Hall situado en el interior del conjunto de bobinas y cuya señal de salida se amplifica, filtra y se digitaliza mediante la tarjeta de adquisición de datos. Mediante software se determina el valor cresta del campo aplicado.

*Medida de la tensión del bobinado secundario:* La señal generada en el bobinado secundario es directamente integrada, amplificada, filtrada y digitalizada para su posterior tratamiento por software.

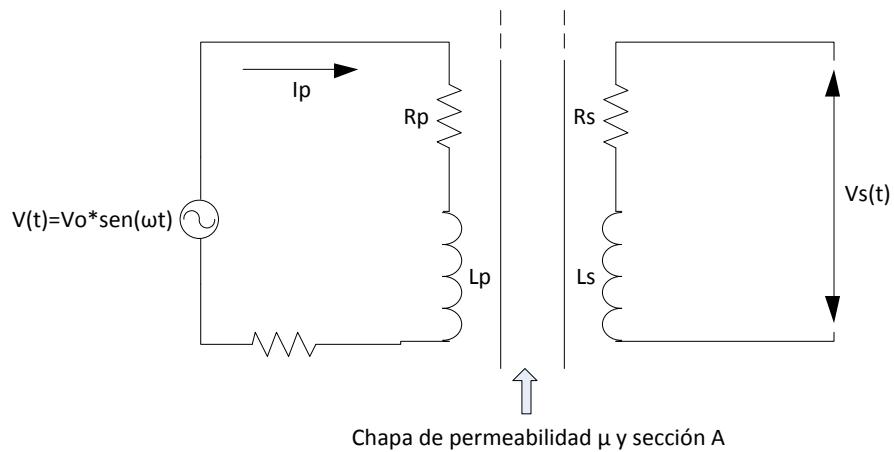
### 5.2.3. Bloque magnético

La estructura de este bloque puede dividirse en varias partes: bobinas y entrehierro.

En el Anexo B se desarrolla la relación entre el voltaje de salida de esta etapa y la inducción magnética de la chapa de acero colocada en el entrehierro haciendo uso del circuito equivalente de la Fig 5.4.



A



B

Fig5.4.: A: Vista de la disposición de los bobinados primario y secundario del PERMAC.  
B: Circuito equivalente del bobinado del PERMAC.

Dado que el circuito se alimenta con una tensión sinusoidal  $V(t)=V_0 \cdot \sin(\omega t)$ , el voltaje inducido en el secundario,  $V_s(t)$ , también será sinusoidal si no satura la muestra.

A frecuencias inferiores a 50 Hz, para determinar la el flujo  $\phi$ , es necesario realizar la integral de  $V_s$ .

$$\phi(t) = \frac{-G}{RC} \int V_s(t) dt \quad (5.2)$$

Siendo  $V_i(t)$  la salida del integrador del bloque de acondicionamiento de la señal del PERMAC con una constante de tiempo del integrador  $\frac{1}{RC}$  y una ganancia  $G$ . El flujo  $\phi$  se relaciona con  $B$  a partir de la sección del bobinado.

#### 5.2.4. Control, adquisición y visualización

El bloque de control, adquisición y visualización de datos, se lleva a cabo con un PC.

La tarjeta de adquisición de datos es una NI USB-6221 de National Instruments con conexión interna a PC.

La fuente de alimentación interna, suministra  $\pm 12V$  al bloque de medida.

El software ha sido programado con Labview con el nombre de (PermeametroV71.exe) Fig. 5.5. Se divide la interface en varias partes: la zona de gráficas y la zona de datos y control.

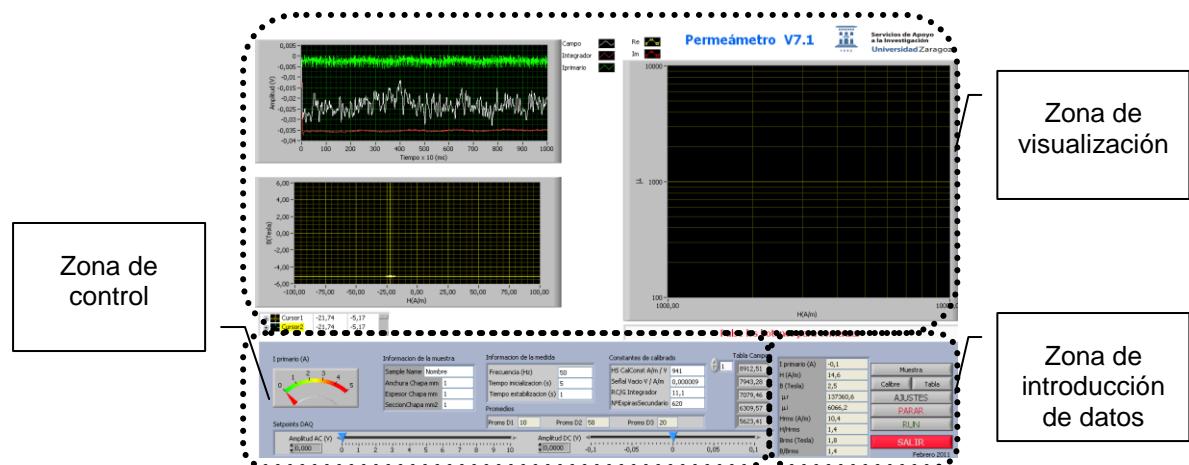


Fig. 5.5.: PermeametroV71

### 5.3. Preparación del equipo y Procedimiento en el ensayo.

Mediante el software “PermeametroV7.1.exe” se obtiene el ciclo de histéresis de la muestra a medir. Dicha muestra deberá de estar simétricamente dispuesta en el GAP como parte del entrehierro de la bobina

En la Fig 5.5 podemos distinguir dentro de la zona de visualización tres campos:

1.- La gráfica superior izquierda muestra la señal correspondiente al campo H, a la inducción B y de la medida de intensidad del circuito primario leída con el sensor de corriente en función del tiempo.

2.- La gráfica inferior izquierda representa el ciclo de histéresis de B frente a H.

3.- La tercera gráfica visualiza la permeabilidad relativa  $\mu$ , frente al campo H y permite seguir la evolución.

#### *Procedimiento de ensayo:*

1.- Información sobre la muestra (Fig.5.6.): nombre, anchura, espesor, sección (tabla 4.1) y frecuencia de medida (2 Hz), ya que vamos a realizar una medición en estático o cuasiestático. Esta información se introducirá en ‘MUESTRA’ (Primera opción en la zona de introducción de datos) para poder obtener el ciclo de histéresis.



Fig5.6.: Zona de Datos (MUESTRAS)

## 2.- Ajuste del ciclo de histéresis.

Hay que evitar que el material sature en profundidad, por lo que variaremos la tensión AC hasta obtener un ciclo de histéresis razonable verificando que  $B$  máxima está comprendida entre 1.5 y 2 Tesla. Si este estuviera desplazado también podríamos ajustarlo en OFFSET, tal y como se muestra en la figura 5.7

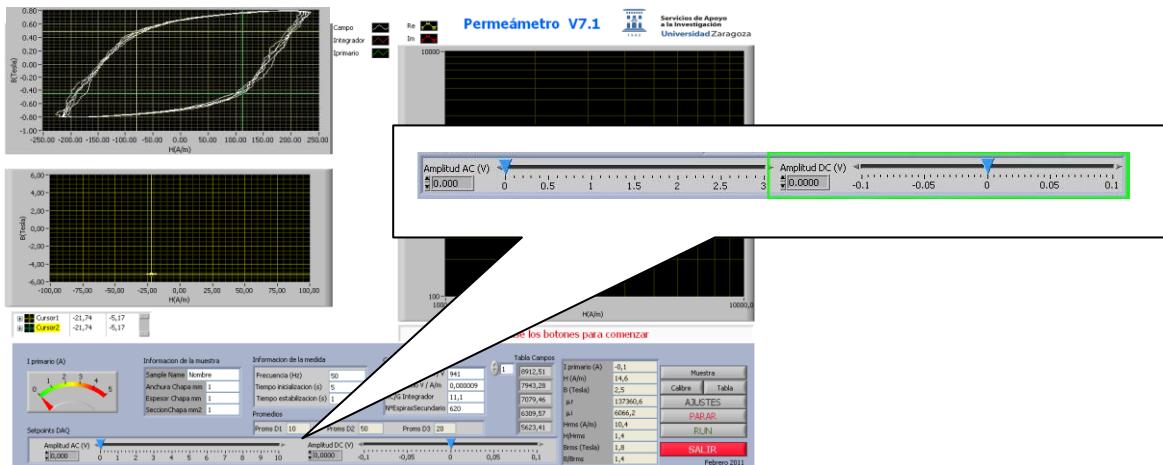


Fig. 5.7.: Ajuste del ciclo de histéresis

3.- Una vez realizado el ajuste del ciclo de histéresis (Fig.5.7), se realiza la medida. El programa de medida genera dos ficheros de datos, uno con extensión “.dat” que guarda todos los datos de los nueve parámetros ( $H(A/m)$ ,  $\mu'$ ,  $B(Tesla)$ ,  $I_{primario}(A)$ ,  $\mu''$ ,  $H_{rms}$ ,  $H/H_{rms}$ ,  $B_{rms}$ ,  $B/B_{rms}$ ) junto con la información de la muestra y de las condiciones de medida, y un fichero con extensión “.wfm” que guarda el ciclo de histéresis obtenido al máximo valor de  $H$ .

Se graficaran una serie de valores de  $\mu'$  y  $\mu''$  obteniendo la permeabilidad del material en función de  $H(A/m)$ .

## *Capítulo 6*

# **SIMULACIÓN DE DATOS MEDIANTE F.E.M.**

---

### **6.1. Fundamentos teóricos.**

El Método de Elementos Finitos (MEF o FEM por sus siglas en inglés Finite Element Method), es una técnica numérica para encontrar soluciones aproximadas de ecuaciones en derivadas parciales, así como de ecuaciones integrales, que se ha convertido en una de las herramientas más utilizadas para obtener resultados rápidos y fiables para los diferentes problemas que se presentan en el área de ingeniería, en donde es necesario obtener soluciones a problemas complejos de abordar mediante otras técnicas. El enfoque de solución se basa en la eliminación de la ecuación diferencial completa (los problemas de estado estacionario), que luego son numéricamente integradas usando técnicas estándar como el método de Euler.

El método consiste en discretizar un medio continuo mediante una cantidad finita de elementos llamados elementos finitos, los que están enlazados entre sí a través de nodos ubicados en los contornos de cada uno de estos elementos. En cada elemento se asume una función de aproximación que definirá el comportamiento de la variable que se está estudiando. Una vez obtenidas estas funciones, se plantean las ecuaciones de compatibilidad de todos los elementos, que relacionan los elementos unos con otros y que luego se resuelven utilizando métodos matriciales.

El método de elementos finitos puede plantearse en una serie de etapas divididas en tres grupos: el preproceso o idealización de la realidad, el proceso o cálculo en sí, y el post proceso o visualización de los resultados.

A su vez estas etapas están divididas en subprocesos, que son detallados a continuación:

### 6.1.1. Preproceso.

El sistema será definido de forma que se asemeje lo más posible al sistema real tanto en su diseño como en sus propiedades físicas. Debido a la dificultad que entrañan los cálculos y dependencia de variables tal y como se trato en el capítulo 1, alguno de los elementos, como el inductor, son idealizados para facilitar su cálculo.

#### *Discretización o mallado de la estructura:*

La estructura es dividida en una cantidad finita de elementos unidas por nodos. Esta es una de las etapas más importantes, puesto que determina la precisión de los resultados obtenidos con el modelo.

#### *Definición del tipo de elemento y de sus parámetros:*

En este paso se selecciona el tipo de elemento que es el más adecuado para modelar el sistema físico a estudiar y se definen las propiedades de los elementos elegidos, como por ejemplo, los espesores, longitudes y parámetros eléctricos y magnéticos.

#### *Condiciones de contorno:*

Las condiciones y fronteras del contorno son aplicadas al modelo. Las condiciones de contorno se aplican los nodos o superficies, para así obtener un modelo que pueda ser resuelto por el programa y que se asemeje a la realidad.

### 6.1.2. Proceso

Solución del sistema de ecuaciones algebraico lineal:

Los pasos anteriores conducen a un sistema de ecuaciones simultáneas, donde las incógnitas son  $\Delta R$  y  $L_{eq}$ .

### 6.1.3. Postproceso.

Revisión de Resultados:

Una vez calculados todos los parámetros necesarios, estos se pueden representar de forma gráfica para mostrar los resultados.

## 6.2. Preproceso de diseño.

El objetivo del modelado de un sistema completo de inducción doméstico (inductor y carga) es simular y calcular la impedancia equivalente de un sistema de calentamiento por inducción mediante la herramienta de Elementos Finitos COMSOL.

El sistema de inducción consta de los siguientes elementos: recipiente, inductor, ferrita y apantallamiento de aluminio. Para modelar este sistema se han asumido las siguientes simplificaciones:

- El sistema posee simetría de revolución. Este hecho permite resolver el sistema con un coste computacional relativamente bajo.
- El inductor se modela como una densidad de corriente constante de sección rectangular, es decir, el inductor no se modela como un conjunto de espiras discretas.
- El inductor se modela con un material sin pérdidas, es decir, no se obtendrán directamente las pérdidas de conducción y proximidad. Sin embargo estas pérdidas se pueden introducir a posteriori a partir de los resultados obtenidos.

- Las ferritas no son discretas sino que, para mantener la simetría, se modelan como un disco de material magnético con propiedades uniformes.
- Se supondrá excitación armónica es decir, régimen estacionario senoidal. Además, no se realizará la simulación temporal del sistema.

Se debe seleccionar un modelo matemático que describa el comportamiento del fenómeno que se requiere estudiar. En primer lugar se definirán algunas cuestiones básicas como la simetría del problema o el tipo de problema (acústico, electromagnético, térmico, mecánico, etc.).

El proyecto definido será:

- *Model Navigator -> New -> Space dimension: Axial symmetry (2D)*
- *Applications Mode -> AC/DC Module -> Quasi-Statics Magnetic -> Azimuthal Induction Currents, Vector Potential: Time-Harmonic analysis*

Así queda definido el problema como un sistema con simetría de revolución. También quedan determinadas las ecuaciones que la herramienta debe resolver para este problema.

### 6.2.1. Descripción de la geometría del sistema

En este paso se introducen las dimensiones de los elementos del sistema. Las distancias, espesores y características elegidas son:

#### **Recipiente**

El recipiente quedara modelado como un subsistema formado por tres partes cuadrangulares con las dimensiones que se muestran en la Fig. 6.1.

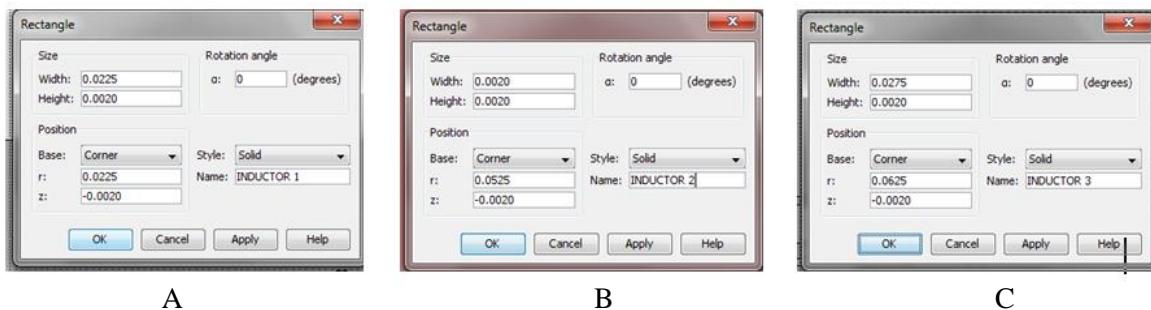


Fig. 6.1. Capturas de pantalla de COMSOL correspondientes a: Espesor, longitud y distancias a los ejes de simetría r y z correspondientes al dominio del recipiente compuesto por tres subdominios.  
A: base\_recipiente, B: Pared\_recipiente, C: esquina\_recipiente.

## Inductor

El inductor real está construido en forma de espiral no uniforme de tal manera que la mayor concentración de bobinado se encuentra en el inicio y en el final.

El modelado se realizara en tres partes. Dos que corresponden al inicio y final del inductor (Inductor\_1 e Inductor\_3) y uno que representa la unión teniendo en cuenta también su aporte de campo (Inductor\_2).

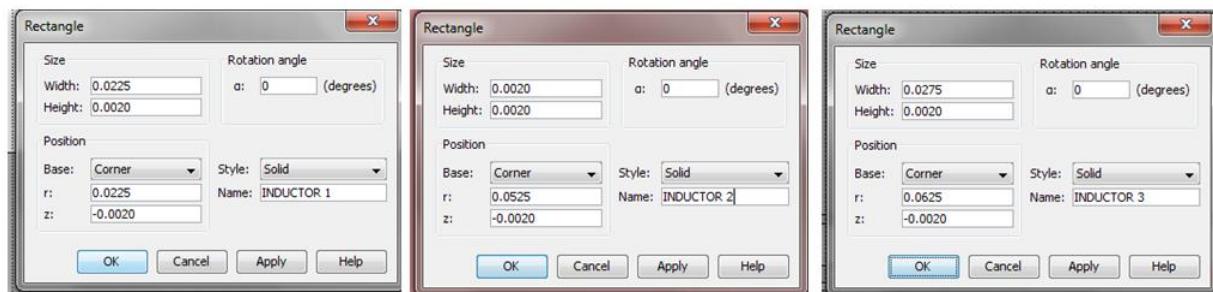


Fig. 6.2. Capturas de pantalla de COMSOL correspondientes a: Espesor, longitud y distancias a los ejes de simetría r y z correspondientes al dominio del inductor compuesto por tres subdominios. A:Inductor\_1, B:Inductor\_2, C: Inductor\_3.

## Ferrita y aluminio

La ferrita se modelara como un disco concéntrico.

Se ha considerado un disco de aluminio de 2mm de espesor.

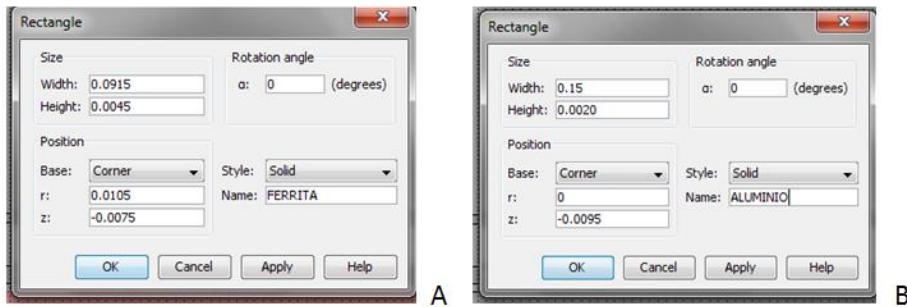


Fig. 6.3. Capturas de pantalla de COMSOL correspondientes a: Espesor , longitud y distancias a los ejes de simetría r y z correspondientes los dominios de la Ferrita y del Aire. A:Ferrita, B:Aire

Como puede observarse, los subdominios están definidos como rectángulos, que aplicando la simetría de revolución dan lugar a toroides de sección rectangular. Estos subdominios están fundamentados en la geometría real del problema.

Una vez definidos todos los subdominios debería aparecer dibujado un sistema de inducción como el representado en la Fig 6.4.

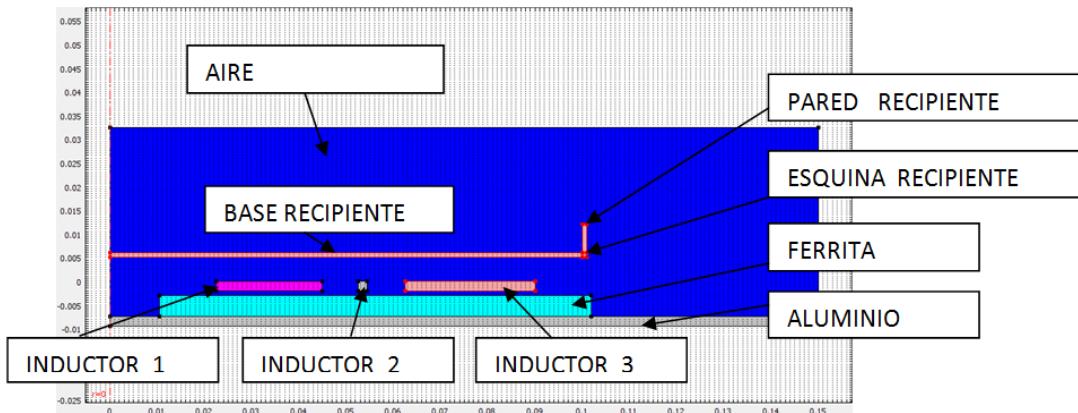


Fig. 6.4. Geometría completa del sistema de inducción

### 6.2.2. Parámetros físicos

Una vez definida la geometría del sistema, se deben determinar las propiedades físicas de los distintos subdominios.

Estas propiedades se definen en el siguiente menú.

*Physics -> Subdomain Settings*

A cada elemento se le asignaran las siguientes características físicas y variables de la tabla 6.1 que se muestra a continuación.

---

Tabla 6.1

---

| Denominación                     | Parámetros magnéticos          | Parámetros eléctricos         |                        |                       |
|----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------------------------|-----------------------|
|                                  | Permeabilidad relativa $\mu_r$ | Densidad de corriente $J_e^e$ | Conductividad $\sigma$ | Permitividad relativa |
| Aire                             | 1                              | 0                             | 0                      | 1                     |
| Recipientе (En tres subdominios) | Mu_carga (Variable)            | 0                             | Sigma_carga (Variable) | 1                     |
| Inductor (En tres subdominios)   | 1                              | J_ind1,<br>J_ind2,<br>J_ind3  | 0                      | 1                     |
| ferrita                          | 50                             | 0                             | 0                      | 1                     |
| Aluminio                         | 1                              | 0                             | 3e7                    | 1                     |

Como puede observarse, algunas propiedades se han introducido explícitamente y otras, sin embargo, se han introducido como identificadores alfanuméricos. Estas propiedades deberán determinarse posteriormente. También puede observarse que el inductor se ha definido como un material sin conductividad (es decir, sin pérdidas) con una densidad de corriente de valor  $J_{ind}$ . (Una para cada uno de los subdominios del inductor).

### 6.2.3. Condiciones del contorno

Estas condiciones de las fronteras se establecen mediante el menú

*Physics -> Boundary Settings*

Las condiciones del contorno se establecerán de la siguiente manera.

- Fronteras situadas sobre el eje de simetría: a estas fronteras se les asigna la condición *Axial symmetry* que aparece al desplegar la pestaña *Boundary conditions*.
- Fronteras que determinan los límites del sistema (excluyendo el eje de simetría): a estas fronteras se les debe asignar la condición *Magnetic insulation*. Esta condición equivale a forzar a que el campo magnético en el infinito (las fronteras exteriores) sea nulo.

### 6.2.4. Definición de constantes, cálculos con variables globales e integrales sobre variables del sistema

Las constantes se declaran en el menú

*Options -> Constants...*

Para este problema se declararán las siguientes constantes:

---

Tabla 6.2

---

| Nombre             | Expresión                  | Descripción   |
|--------------------|----------------------------|---|
| <b>Sigma_carga</b> | 2e6                        | Conductividad carga   |
| <b>Mu_ferri</b>    | 50                         | Permeabilidad de la ferrita                                       |
| <b>N1_esp</b>      | 8                          | Numero espiras n1   |
| <b>N2_esp</b>      | 1                          | Numero de espiras n2  |
| <b>N3_esp</b>      | 9                          | Numero de espiras n3  |
| <b>A_ind1</b>      | 0.0225*0.002               | Área inductor n1  |
| <b>A_ind2</b>      | 0.002*0.002                | Área inductor n2  |
| <b>A_ind3</b>      | 0.0275*0.002               | Área inductor n3  |
| <b>A_esp1</b>      | $A_{ind1}/n1\_esp$         | Área espira n1  |
| <b>A_esp2</b>      | $A_{ind2}/n2\_esp$         | Área espira n2  |
| <b>A_esp3</b>      | $A_{ind3}/n3\_esp$         | Área espira n3  |
| <b>I_ind</b>       | $30*\sqrt{2}$              | Corriente inductor $30 * \sqrt{2}$                                |
| <b>frecuencia</b>  | 35000                      | Frecuencia constante  |
| <b>Mu_carga</b>    | (tabla<br>permeabilidades) | Introducir a mano permeabilidades complejas<br>de la forma (a-jb) |

---

El objetivo de la simulación por elementos finitos de este sistema es la obtención de su impedancia equivalente formada por la conexión serie de una resistencia e inductancia equivalentes,  $R_{eq}$  y  $L_{eq}$ . Sin embargo, estos parámetros no aparecen de forma directa de la simulación, por ejemplo,  $R_{eq}$  no es la resistencia del inductor, al haberse declarado éste como una densidad de corriente constante que circula por un material de conductividad nula. Los parámetros,  $R_{eq}$  y  $L_{eq}$  están asociados a la disipación de potencia en el recipiente y a la energía magnética del sistema y se obtendrán mediante el postprocesado de los campos electromagnéticos obtenidos en la simulación.

Concretamente, se hará uso de la fuerza electromotriz  $\varepsilon$  en el inductor definida como:

$$\varepsilon = \oint_{\text{espiras}} E dr \quad (6.1)$$

A partir de la fuerza electromotriz se puede obtener la impedancia equivalente del inductor y por lo tanto los parámetros  $R_{eq}$  y  $L_{eq}$ .

$$Z_{eq} = \frac{\varepsilon}{I_{ind}} \Rightarrow R_{eq}(Z_{eq}), L_{eq} = \left( \frac{Z_{eq}}{\omega} \right) \quad (6.2)$$

Como puede observarse, según (6.1) para la obtención de  $\varepsilon$  es necesario evaluar la integral del campo eléctrico a lo largo de la longitud de las espiras del inductor. COMOSL permite evaluar la integral de las magnitudes de campo calculadas en los diferentes subdominios mediante el menú:

*Options -> Integration Coupling Variables -> Subdomain Variables*

Se seleccionaran los diferentes subdominios y además se definirá la integral a realizar en cada uno de ellos. Para ello se seleccionará el subdominio del inductor1, inductor2 e inductor3 e introducir los siguientes datos:

Tabla 6.3

| Name          | Expression                                     | Subdominio |
|---------------|--|------------|
| <i>V_ind1</i> | <b><math>-Ephi\_emqa*2*pi*r/A\_esp1</math></b> | Inductor_1 |
| <i>V_ind2</i> | <b><math>-Ephi\_emqa*2*pi*r/A\_esp2</math></b> | Inductor_2 |
| <i>V_ind3</i> | <b><math>-Ephi\_emqa*2*pi*r/A\_esp3</math></b> | Inductor_3 |

Una vez calculada la fuerza electromotriz por integración del campo eléctrico, se deberán realizar los cálculos mostrados en la tabla 6.4 para la obtención de los parámetros equivalentes. Para ello COMSOL dispone de una herramienta que permite realizar operaciones a partir de variables globales. Se accede a esta herramienta mediante

*Options -> Expressions -> Global Expressions*

Se definirán las siguientes expresiones:

Tabla 6.4

| Nombre          | Expresión   |
|-----------------|---|
| <i>J_ind1</i>   | $I\_ind/a\_esp1$  |
| <i>J_ind2</i>   | $I\_ind/a\_esp2$  |
| <i>J_ind3</i>   | $I\_ind/a\_esp3$  |
| <i>J_ind</i>    | $I\_ind/a\_esp$   |
| <i>L_eq</i>     | $Img((V\_ind3+V\_ind1+V\_ind2)/(I\_ind*2*pi*frecuencia))$ |
| <i>L_eq1</i>    | $Img((V\_ind1)/(I\_ind*2*pi*frecuencia))$                 |
| <i>L_eq2</i>    | $Img((V\_ind2)/(I\_ind*2*pi*frecuencia))$                 |
| <i>L_eq3</i>    | $Img((V\_ind3)/(I\_ind*2*pi*frecuencia))$                 |
| <i>Delta_R</i>  | $Real(V\_ind3+V\_ind1+V\_ind2)/(I\_ind)$                  |
| <i>Delta_R1</i> | $Real(V\_ind1)/(I\_ind)$                                  |
| <i>Delta_R2</i> | $Real(V\_ind2)/(I\_ind)$                                  |
| <i>Delta_R3</i> | $Real(V\_ind3)/(I\_ind)$                                  |

Además de las constantes y expresiones declaradas hasta ahora, es necesario también definir la frecuencia de las corrientes en el inductor. Sin embargo, la frecuencia

se trata de un modo especial en COMSOL. Para declarar la frecuencia bien con un valor concreto o bien como parámetro se debe ejecutar la siguiente secuencia:

*Physics -> Scalar Variables -> nu\_emqa: frecuencia*

Aunque la frecuencia este declarada como constante y sea constante en todo el proceso de simulación, es necesario realizar esta secuencia en ‘scalar variables’. El funcionamiento de la simulación no será correcto si no se realiza esta operación.

### 6.2.5. Mallado

El mallado consiste en dividir una geometría en una serie de elementos (elementos finitos) sobre los que se plantean las ecuaciones a resolver. En nuestro caso los elementos de la malla pueden ser triángulos o rectángulos. El mallado adecuado es esencial para la correcta resolución del problema.

El mallado de una geometría se puede realizar de dos formas: mallado automático y mallado definido por el usuario. En la primera opción la herramienta decide como mallar según unos algoritmos previamente definidos. En la segunda opción, el usuario controla las propiedades del mallado y puede aprovechar el conocimiento del problema para optimizar los resultados.

Para mallar de forma automática ejecutar los siguientes pasos:

*Mesh -> Initialize Mesh*

El mallado se determinará en base a estas dos características del problema:

- Como es sabido, el fenómeno de las corrientes inducidas (tanto en el recipiente como en el aluminio) tiene lugar en unas pocas micras en la superficie del material a las frecuencias de interés.
- En los subdominios anteriormente mencionados se produce una rápida variación de los campos en la dirección del eje z y una variación moderada según el eje r.
- En la ferrita, al ser un material no conductor, no se aplicarán la fenomenología descrita para los materiales conductores de acuerdo a los puntos anteriores.

En el recipiente y en el aluminio se va a realizar, por tanto, un mallado según rectángulos de forma que la altura de los rectángulos sea creciente de forma logarítmica en dirección del eje z. El aspecto de la malla en el subdominio del recipiente debería ser el mostrado en la Fig 6.6. Para ello se utilizará la siguiente combinación de menús:

*Mesh -> Mapped Mesh Parameters -> Boundary*

Se deberán seleccionar las fronteras de interés y se fijarán los puntos de la malla mediante la opción:

*Edge vertex distribution*

En esta entrada se definirá un vector cuyos puntos estén entre sí a las distancias deseadas. Para generar estos vectores se utilizará la función *range* tal y como se muestra en la Fig 6.5.

Mediante el procedimiento descrito se mallarán todos los dominios con la excepción del inductor y del aire. El mallado en estos dos dominios no va a ser tan decisivo y por tanto se utilizará otro método. En este caso se hará uso del menú:

*Mesh -> Free Mesh Parameters*

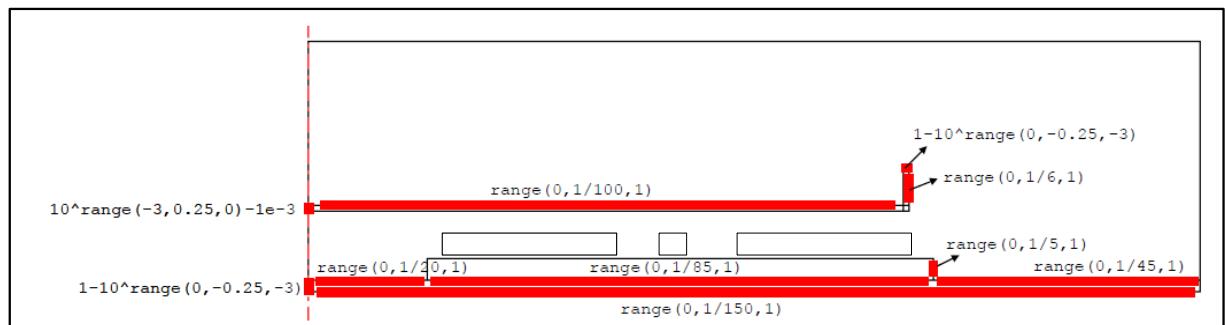


Fig. 6.5. Vectores de puntos a definir en las fronteras seleccionadas mediante *Edge vertex distribution*

Con los pasos seguidos hasta ahora el mallado deberá de tener este aspecto:

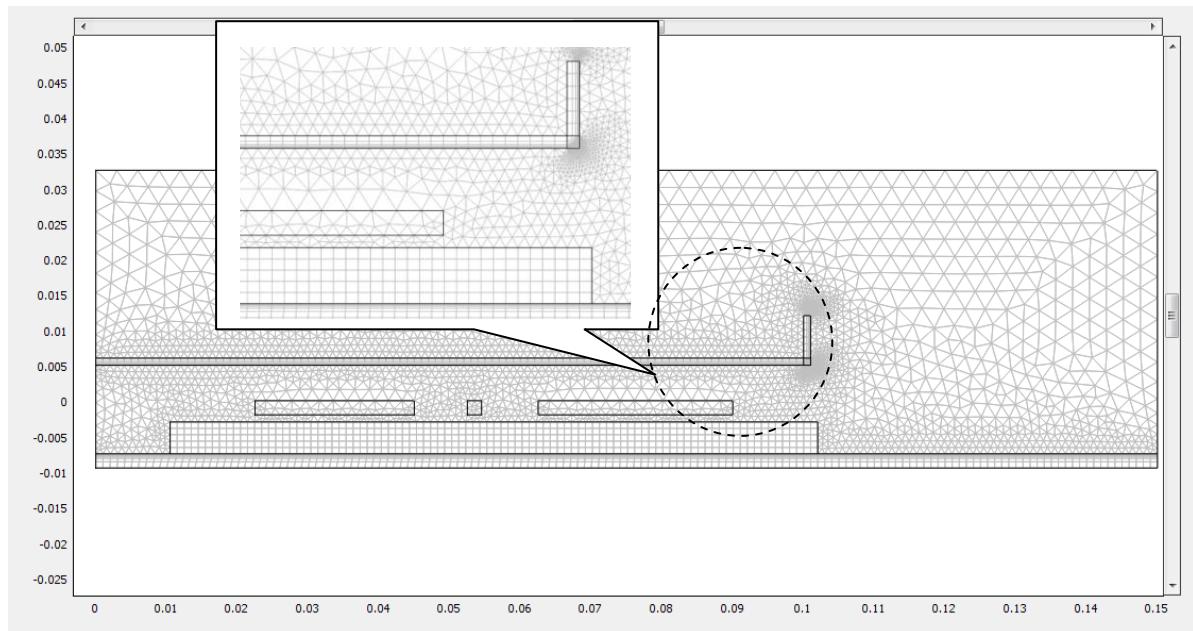


Fig. 6.6. Mallado del sistema. *Mesh*

### 6.3. Resolución del procesado del problema y postprocesado de datos

El último paso en la resolución del problema (proceso) y el tratamiento de los datos (postproceso) para una única frecuencia será:

Ejecutaremos la simulación mediante

*Solve -> Solve Problem*

Obtendremos las impedancias calculadas con el siguiente menú:

*Postprocessing -> Data Display -> Global -> Predefined quantities -> Delta\_R*

*Postprocessing -> Data Display -> Global -> Predefined quantities -> L\_eq*

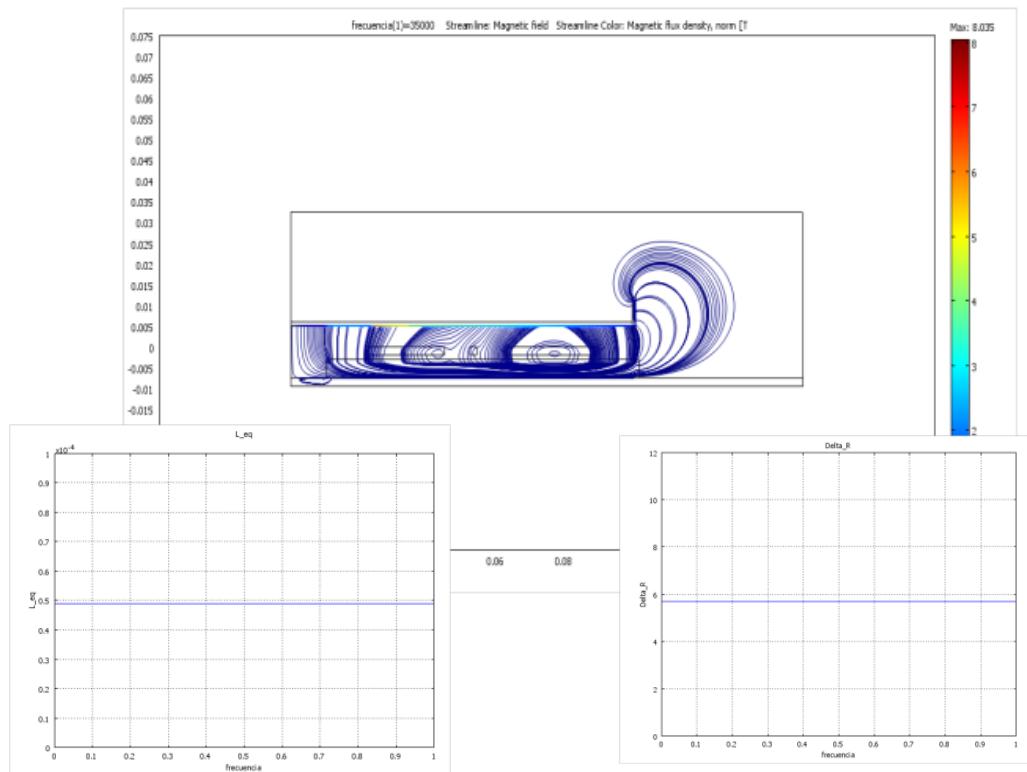


Fig. 6.7. Procesado y postprocesado. Resultados de  $\Delta R$  y  $L_{eq}$

## *Capítulo 7*

# RESULTADOS Y REPRESENTACIÓN GRÁFICA

### **7.1. Resultados permeámetro**

A continuación están representados mediante MATLAB los resultados de los ficheros de datos generados por el permeámetro, incluidos en el Anexo B.

Desde MATLAB se ha realizado una carga de los ficheros tras realizar algunas modificaciones en su formato para poder ser leídos. Los ficheros del permeámetro están generados por columnas y permiten ser manejados como vectores.

*Curva de ciclo de histéresis y Permeabilidades de la muestra FX*

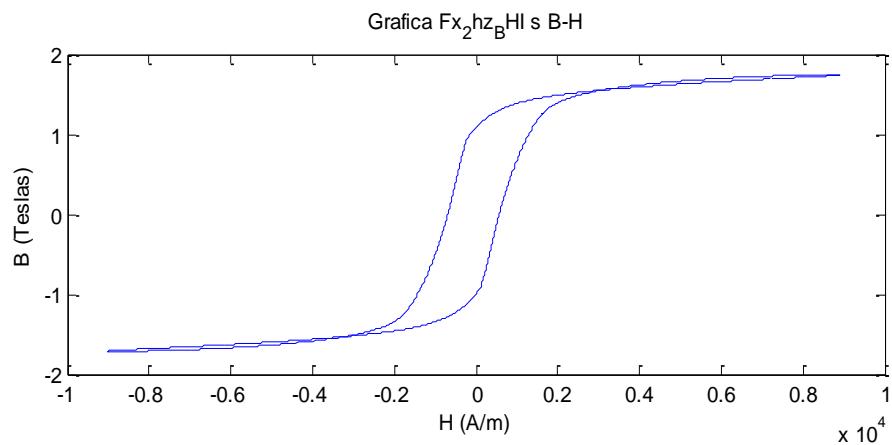


Fig. 7.1. Ciclo de histéresis de la muestra FX

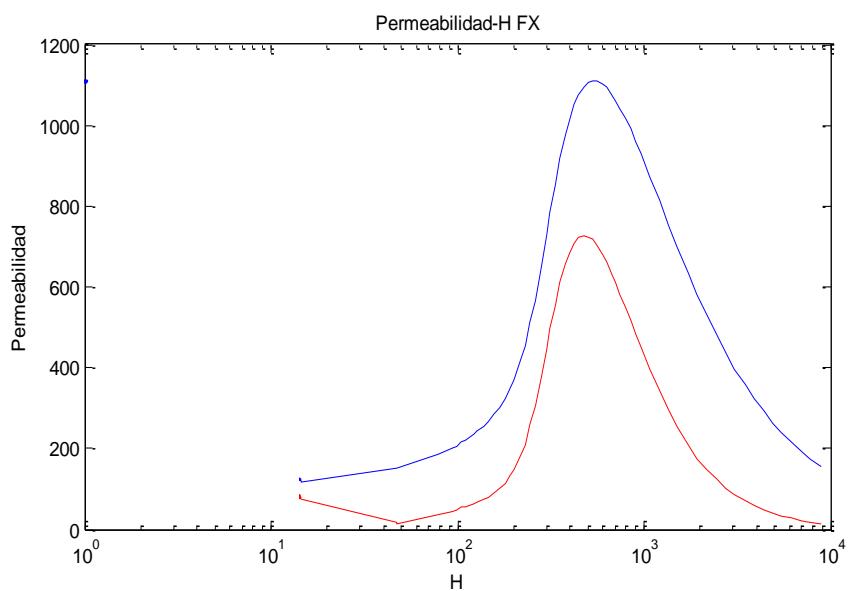


Fig. 7.2. Permeabilidades de la muestra FX

*Curva de ciclo de histéresis y Permeabilidades de la muestra FY*

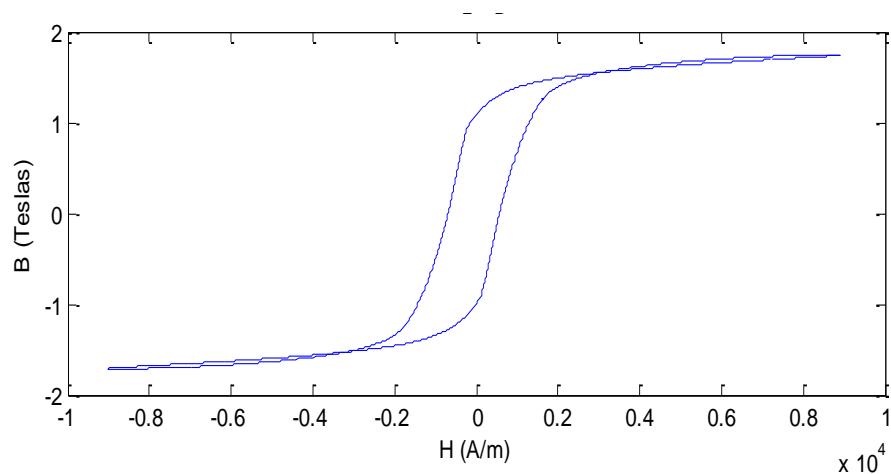


Fig. 7.3. Ciclo de histéresis de la muestra FX

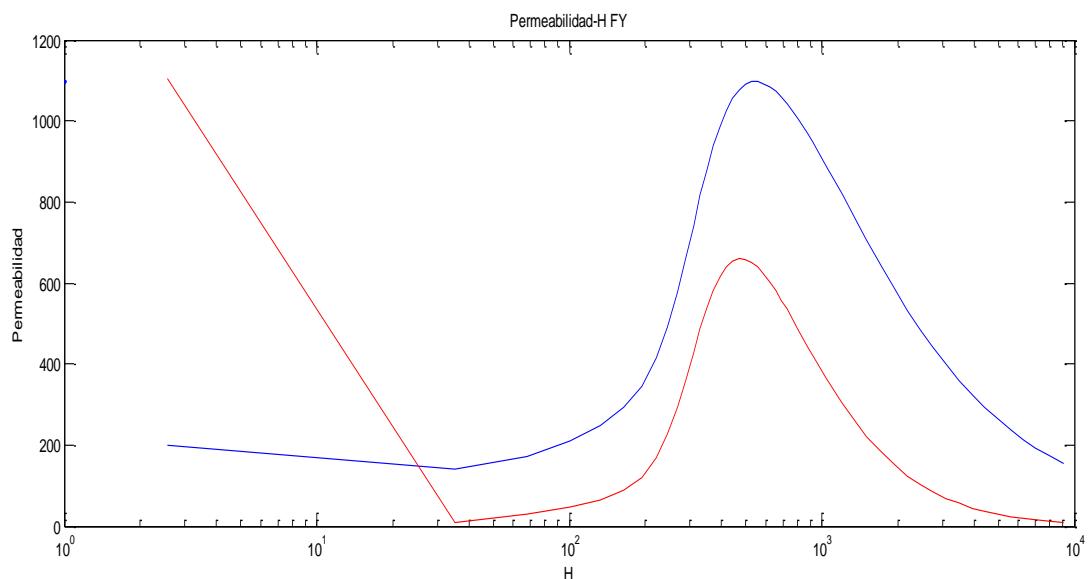


Fig. 7.4. Permeabilidades de la muestra FY

*Curva de ciclo de histéresis y Permeabilidades de la muestra Zenith\_Base*

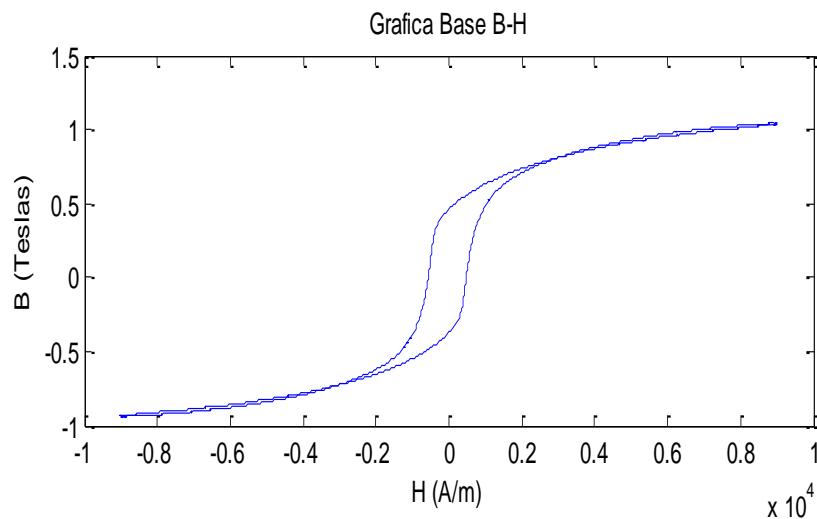


Fig. 7.5. Ciclo de histéresis de la muestra Zenith\_Base

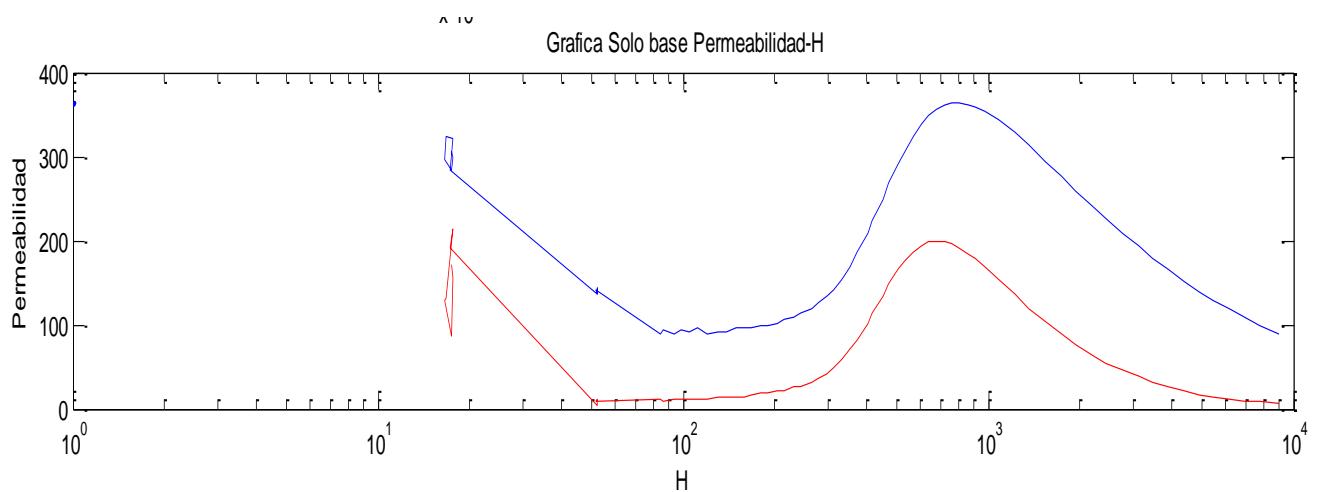


Fig. 7.6. Permeabilidades de la muestra Zenith\_Base

## 7.2. Resultados de $\Delta R$ y $L_{eq}$ mediante F.E.M.

Con los valores de los vectores de las permeabilidades iremos introduciendo manualmente los valores en COMSOL de la forma (a-jb) correspondientes a las permeabilidades complejas para cada valor de H.

De esta manera obtendremos los resultados  $\Delta R$  y  $L_{eq}$  para cada permeabilidad. En este proceso se han introducido diez valores de permeabilidad por década, por lo tanto se han obtenido los mismos resultados de  $\Delta R$  y  $L_{eq}$ .

*Tabla de valores de la muestra FX*

| Tabla 7.1          |            |              |
|--------------------|------------|--------------|
| H[A/m]             | $\Delta R$ | $L_{eq}$     |
| <b>8956.404387</b> | 3,4255762  | 3,0181003E-5 |
| <b>7771.634391</b> | 3,565371   | 3,123837E-5  |
| <b>6173.724680</b> | 3,990823   | 3,2087453E-5 |
| <b>4367.706307</b> | 4,291035   | 3,305918E-5  |
| <b>3474.126372</b> | 4,7888875  | 3,6043257E-5 |
| <b>2439.345214</b> | 5,1326957  | 3,817337E-5  |
| <b>1512.546516</b> | 5,51368    | 4,404374E-5  |
| <b>1078.057191</b> | 6,022008   | 4,6631645E-5 |
| <b>845.887839</b>  | 6,3581285  | 5,0090937E-5 |
| <b>679.142666</b>  | 6,623816   | 5,2305455E-5 |
| <b>528.390649</b>  | 6,841323   | 5,481255E-5  |
| <b>397.287406</b>  | 6,8486595  | 5,33607E-5   |
| <b>298.803904</b>  | 6,3353477  | 4,7751564E-5 |
| <b>190.959266</b>  | 4,744838   | 3,749714E-5  |
| <b>158.084624</b>  | 4,347314   | 3,539225E-5  |
| <b>122.581599</b>  | 3,9946556  | 3,3530676E-5 |

Para la representación grafica de los valores de la Tabla 7.1, se utiliza el siguiente código en MATLAB

```

%% representación grafica fx leq(ur-jui) y Delta R(ur-jui) respecto H
load hrl_fx.dat

r=hrl_fx(:,2);
h=hrl_fx(:,1);
l=hrl_fx(:,3);

subplot(2,1,1)
semilogx(h,r,'r')
title(' FX ')
xlabel('H (A/m)') %Nombramos al eje de las abscisas
ylabel('Delta_R') %nombramos al eje de la ordenadas
hold on

subplot(2,1,2)
semilogx(h,l,'b')
title('FX')
xlabel('H (A/m)') %Nombramos al eje de las abscisas
ylabel('Lequ') %nombramos al eje de la ordenadas
hold on

```

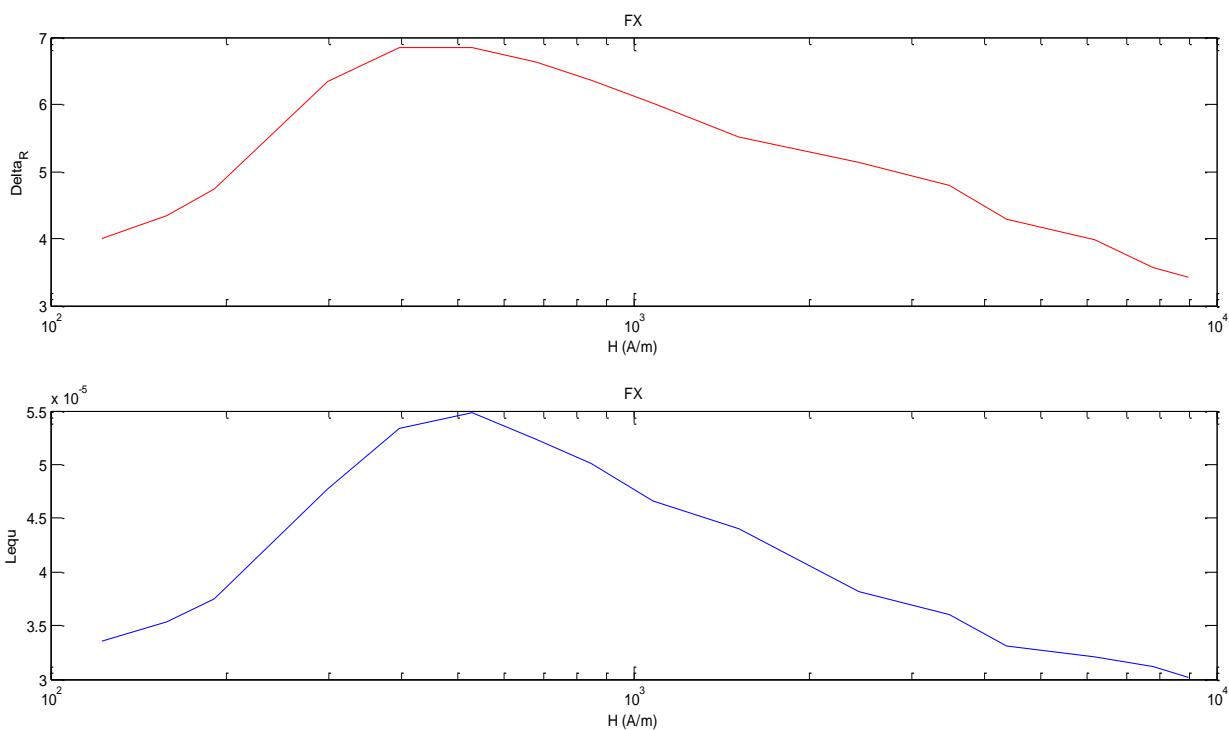


Fig. 7.7.  $\Delta R$  y  $L_{eq}$  de la muestra FX

Tabla de valores de la muestra FY

| H[A/m]             | R Tabla 7.2 | L            |
|--------------------|-------------|--------------|
| <b>9035.425814</b> | 3,0793154   | 3,0302366E-5 |
| <b>7860.059617</b> | 3,224715    | 3,133968E-5  |
| <b>6270.561519</b> | 3,474714    | 3,3131466E-5 |
| <b>4949.418144</b> | 3,7512846   | 3,5136753E-5 |
| <b>3940.007169</b> | 4,0345016   | 3,7191738E-5 |
| <b>3085.731152</b> | 4,3549056   | 3,951896E-5  |
| <b>2464.291965</b> | 4,6649704   | 4,1762993E-5 |
| <b>1941.049509</b> | 5,0053487   | 4,4197615E-5 |
| <b>1508.097181</b> | 5,3696527   | 4,6751666E-5 |
| <b>1200.066414</b> | 5,70157     | 4,8989325E-5 |
| <b>921.256214</b>  | 6,0748982   | 5,1388855E-5 |
| <b>881.679344</b>  | 6,1329737   | 5,1750696E-5 |
| <b>728.933903</b>  | 6,372218    | 5,3141757E-5 |
| <b>622.388190</b>  | 6,5385933   | 5,396487E-5  |
| <b>497.630006</b>  | 6,6954436   | 5,426022E-5  |
| <b>418.958597</b>  | 6,7017913   | 5,3306638E-5 |
| <b>351.331896</b>  | 6,5242753   | 5,0742954E-5 |
| <b>268.398904</b>  | 5,736259    | 4,009023E-5  |
| <b>194.057767</b>  | 4,6589      | 3,7468522E-5 |
| <b>100.829508</b>  | 3,7435532   | 3,2538617E-5 |

Para la representación grafica de los valores de la tabla 7.2 se utiliza el siguiente código en MATLAB.

```
% Representación FY DeltaR(ur-jui) y L (ur-juimg) respecto de H
load hrl_fy.dat

r=hrl_fy(:,2);
h=hrl_fy(:,1);
l=hrl_fy(:,3);

subplot(2,1,1)
semilogx(h,r,'r')
title(' FY ')
xlabel('H (A/m)') %Nombramos al eje de las abscisas
ylabel('Delta_R') %nombramos al eje de la ordenadas
hold on

subplot(2,1,2)
semilogx(h,l,'b')
title('FY')
xlabel('H (A/m)') %Nombramos al eje de las abscisas
ylabel('Lequ') %nombramos al eje de la ordenadas
hold on
```

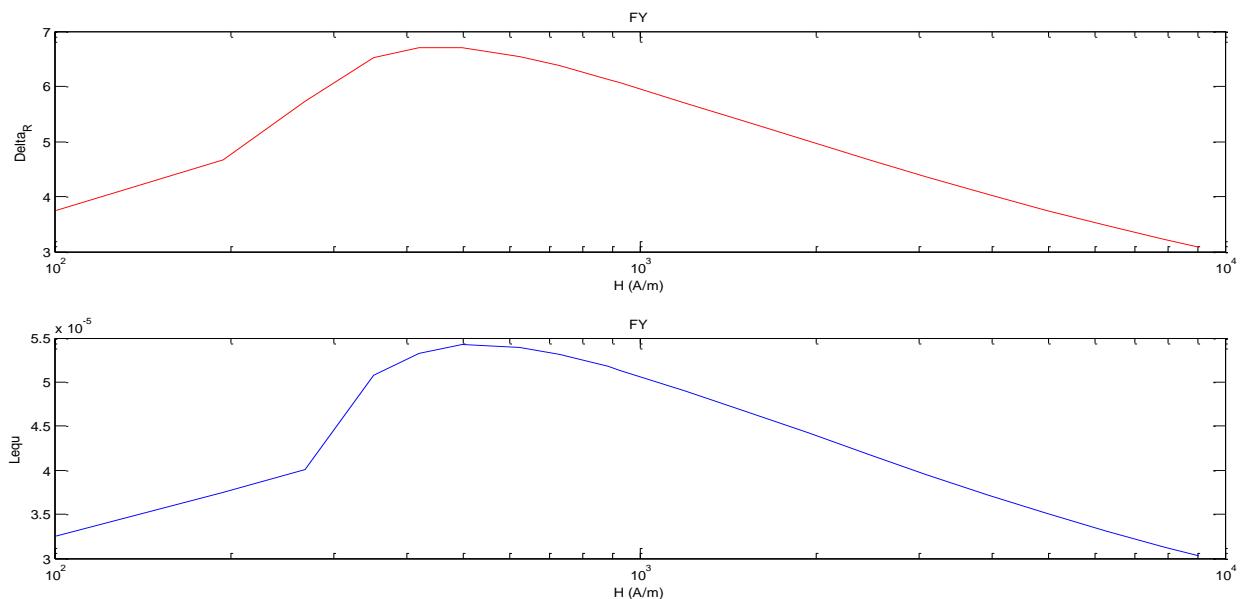


Fig. 7.8.  $\Delta R$  y  $L_{eq}$  de la muestra FY

*Tabla de valores de la muestra Zenith\_Base*

Tabla 7.3

| H[A/m]             | R()       | L()          |
|--------------------|-----------|--------------|
| <b>9007,500968</b> | 2,5443695 | 2,6088703E-5 |
| <b>7744,342991</b> | 2,6777716 | 2,6877218E-5 |
| <b>6951,573377</b> | 2,7769866 | 2,7456268E-5 |
| <b>5470,988682</b> | 2,9995785 | 2,8729219E-5 |
| <b>4369,553183</b> | 3,220528  | 2,9919305E-5 |
| <b>3444,191448</b> | 3,4735837 | 3,123026E-5  |
| <b>2746,341227</b> | 3,732416  | 3,2464235E-5 |
| <b>2186,885917</b> | 4,0120006 | 3,3743578E-5 |
| <b>1739,67892</b>  | 4,3072524 | 3,4999972E-5 |
| <b>1362,890395</b> | 4,6308265 | 3,695697E-5  |
| <b>1082,781258</b> | 4,9132156 | 3,7290352E-5 |
| <b>970,682658</b>  | 5,034184  | 3,7623788E-5 |
| <b>803,93443</b>   | 5,195661  | 3,7940754E-5 |
| <b>674,685706</b>  | 5,2570305 | 3,7668007E-5 |
| <b>531,388409</b>  | 5,086318  | 3,5947334E-5 |
| <b>416,801858</b>  | 4,470967  | 3,2528E-5    |
| <b>332,495146</b>  | 3,7063615 | 2,937281E-5  |
| <b>263,56799</b>   | 3,1952677 | 2,76134E-5   |
| <b>202,886206</b>  | 2,9100003 | 2,6682272E-5 |
| <b>158,197574</b>  | 2,7752771 | 2,6406235E-5 |
| <b>119,663207</b>  | 2,6633303 | 2,5974668E-5 |

Para la representación grafica de los valores de la tala 7.3 se utiliza el siguiente código en MATLAB

```
% Representación hrl_zenbase DeltaR(ur-jui) y L (ur-juimg) respecto de H
load hrl_zenbase.dat

r=hrl_zenbase(:,2);
h=hrl_zenbase(:,1);
l=hrl_zenbase(:,3);

subplot(2,1,1)
semilogx(h,r,'r')
title(' Zenith Base ')
xlabel('H (A/m)') %Nombramos al eje de las abscisas
ylabel('Delta_R') %nombramos al eje de la ordenadas
hold on

subplot(2,1,2)
semilogx(h,l,'b')
title('Zenith Base')
xlabel('H (A/m)') %Nombramos al eje de las abscisas
ylabel('Lequ') %nombramos al eje de la ordenadas
hold on
```

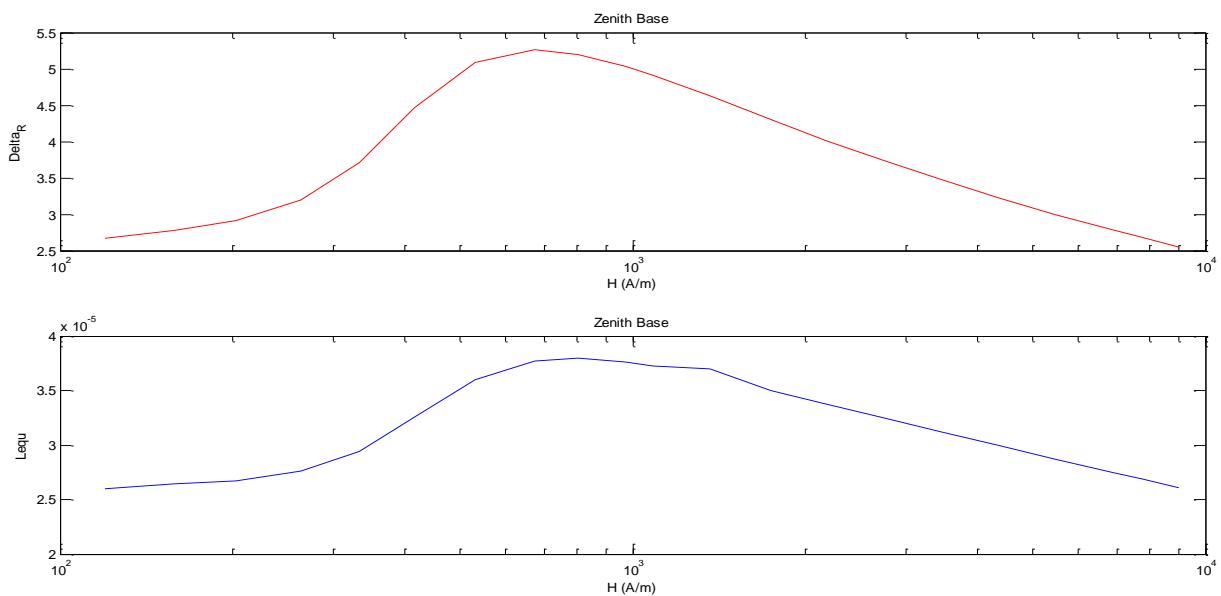


Fig. 7.9.  $\Delta R$  y  $L_{eq}$  de la muestra Zenith\_Base

### 7.3. Comparación permeabilidades complejas – no complejas

Durante la simulación se han realizado ensayos en los que solamente estaba involucrada la parte real. Esto nos va a poder permitir en esta sección realizar una comparación de los resultados de  $\Delta R$  y  $L_{eq}$ .

*Comparación para la muestra FX*

---

Tabla 7.4

| Con permeabilidad REAL |              | Con permeabilidad COMPLEJA |              |
|------------------------|--------------|----------------------------|--------------|
| $\Delta R$             | $L_{eq}$     | $\Delta R$                 | $L_{eq}$     |
| 2.9653757              | 3.0578685E-5 | 3,4255762                  | 3,0181003E-5 |
| 3.089042               | 3.168069E-5  | 3,565371                   | 3,123837E-5  |
| 3.2917774              | 3.3577853E-5 | 3,990823                   | 3,2087453E-5 |
| 3.5955455              | 3.6675563E-5 | 4,291035                   | 3,305918E-5  |
| 3.7901602              | 3.8867736E-5 | 4,7888875                  | 3,6043257E-5 |
| 4.0703497              | 4.2407835E-5 | 5,1326957                  | 3,817337E-5  |
| 4.387651               | 4.7207563E-5 | 5,51368                    | 4,404374E-5  |
| 4.554576               | 5.0287268E-5 | 6,022008                   | 4,6631645E-5 |
| 4.63936                | 5.2097937E-5 | 6,3581285                  | 5,0090937E-5 |
| 4.689859               | 5.3291253E-5 | 6,623816                   | 5,2305455E-5 |
| 4.7103744              | 5.380704E-5  | 6,841323                   | 5,481255E-5  |
| 4.653959               | 5.2432766E-5 | 6,8486595                  | 5,33607E-5   |
| 4.42139                | 4.7789585E-5 | 6,3353477                  | 4,7751564E-5 |
| 3.7634585              | 3.8555547E-5 | 4,744838                   | 3,749714E-5  |
| 3.572507               | 3.642793E-5  | 4,347314                   | 3,539225E-5  |
| 3.3844817              | 3.4487435E-5 | 3,9946556                  | 3,3530676E-5 |

---

*Comparación para la muestra FY*

Tabla 7.5

| Con permeabilidad REAL |              | Con permeabilidad COMPLEJA |              |
|------------------------|--------------|----------------------------|--------------|
| $\Delta R$             | $L_{eq}$     | $\Delta R$                 | $L_{eq}$     |
| 2.9635022              | 3.0562285E-5 | 3,0793154                  | 3,0302366E-5 |
| 3.084583               | 3.1640266E-5 | 3,224715                   | 3,133968E-5  |
| 3.2844224              | 3.350689E-5  | 3,474714                   | 3,3131466E-5 |
| 3.49343                | 3.5595014E-5 | 3,7512846                  | 3,5136753E-5 |
| 3.6913338              | 3.7731086E-5 | 4,0345016                  | 3,7191738E-5 |
| 3.8951018              | 4.013413E-5  | 4,3549056                  | 3,951896E-5  |
| 4.0714765              | 4.242318E-5  | 4,6649704                  | 4,1762993E-5 |
| 4.241064               | 4.4857923E-5 | 5,0053487                  | 4,4197615E-5 |
| 4.39491                | 4.7331305E-5 | 5,3696527                  | 4,6751666E-5 |
| 4.509545               | 4.9402388E-5 | 5,70157                    | 4,8989325E-5 |
| 4.611758               | 5.148487E-5  | 6,0748982                  | 5,1388855E-5 |
| 4.6253486              | 5.1783594E-5 | 6,1329737                  | 5,1750696E-5 |
| 4.6727543              | 5.287566E-5  | 6,372218                   | 5,3141757E-5 |
| 4.6964707              | 5.3455336E-5 | 6,5385933                  | 5,396487E-5  |
| 4.698914               | 5.3516476E-5 | 6,6954436                  | 5,426022E-5  |
| 4.661519               | 5.260926E-5  | 6,7017913                  | 5,3306638E-5 |
| 4.5613                 | 5.042352E-5  | 6,5242753                  | 5,0742954E-5 |
| 4.227602               | 4.46547E-5   | 5,736259                   | 4,009023E-5  |
| 3.7579048              | 3.84911E-5   | 4,6589                     | 3,7468522E-5 |
| 3.269552               | 3.3363933E-5 | 3,7435532                  | 3,2538617E-5 |
| 2.9635022              | 3.0562285E-5 | 3,0793154                  | 3,0302366E-5 |
| 3.084583               | 3.1640266E-5 | 3,224715                   | 3,133968E-5  |
| 3.2844224              | 3.350689E-5  | 3,474714                   | 3,3131466E-5 |
| 3.49343                | 3.5595014E-5 | 3,7512846                  | 3,5136753E-5 |

## Comparación para la muestra Zenith\_Base

Tabla 7.6

| Con permeabilidad REAL |              | Con permeabilidad COMPLEJA |              |
|------------------------|--------------|----------------------------|--------------|
| $\Delta R$             | $L_{eq}$     | $\Delta R$                 | $L_{eq}$     |
| 2.4462306              | 2.6342255E-5 | 2,5443695                  | 2,6088703E-5 |
| 2.555017               | 2.7182736E-5 | 2,6777716                  | 2,6877218E-5 |
| 2.6334627              | 2.7803257E-5 | 2,7769866                  | 2,7456268E-5 |
| 2.8014855              | 2.9176577E-5 | 2,9995785                  | 2,8729219E-5 |
| 2.9540222              | 3.0479458E-5 | 3,220528                   | 2,9919305E-5 |
| 3.1153562              | 3.1920354E-5 | 3,4735837                  | 3,123026E-5  |
| 3.2615633              | 3.328742E-5  | 3,732416                   | 3,2464235E-5 |
| 3.4047348              | 3.4690045E-5 | 4,0120006                  | 3,3743578E-5 |
| 3.5368009              | 3.604864E-5  | 4,3072524                  | 3,4999972E-5 |
| 3.6618242              | 3.74013E-5   | 4,6308265                  | 3,695697E-5  |
| 3.7514732              | 3.841667E-5  | 4,9132156                  | 3,7290352E-5 |
| 3.7796886              | 3.874484E-5  | 5,034184                   | 3,7623788E-5 |
| 3.8051276              | 3.9044455E-5 | 5,195661                   | 3,7940754E-5 |
| 3.782887               | 3.8782313E-5 | 5,2570305                  | 3,7668007E-5 |
| 3.6419222              | 3.7181242E-5 | 5,086318                   | 3,5947334E-5 |
| 3.326224               | 3.391251E-5  | 4,470967                   | 3,2528E-5    |
| 2.9688022              | 3.0608695E-5 | 3,7063615                  | 2,937281E-5  |
| 2.7272                 | 2.8561717E-5 | 3,1952677                  | 2,76134E-5   |
| 2.5842443              | 2.7412463E-5 | 2,9100003                  | 2,6682272E-5 |
| 2.5297422              | 2.6985444E-5 | 2,7752771                  | 2,6406235E-5 |
| 2.4624593              | 2.6466227E-5 | 2,6633303                  | 2,5974668E-5 |

Para una comparación más exhaustiva de los resultados para cada  $H$ ,  $I$  y permeabilidad se han incluido todos los resultados en una misma tabla en el Anexo B.



## Capítulo 8

# SIMULACIÓN DE UN SISTEMA COMPLETO MEDIANTE SIMULINK

---

### 8.1. Descripción del sistema de simulación.

Para todo punto de red al sistema le va a corresponder un punto B-H, por lo tanto le corresponderá a su vez una permeabilidad distinta tal y como puede observarse en las tablas de vectores del Anexo B.

Si la carga fuera lineal, es decir, totalmente resistiva, la corriente de red sería senoidal, pero como la carga tiene un comportamiento R-L existe una distorsión de la señal de red.

El comportamiento de la carga en una cocina de inducción tendrá el mismo comportamiento, existiendo una  $H$  proporcional a la corriente  $I$

$$H \text{ (permeametro)} = \frac{A \text{ (permeametro)}}{m} \text{ Tendrá una proporcionalidad } H \text{ (cocina)} = \frac{A \text{ (cocina)}}{m}$$

Para poder comprobar los resultados como parte de un sistema de inducción doméstica se ha realizado una simulación mediante simulink de una etapa de potencia completa en la que la carga se comporta de forma no lineal adoptando distintos valores de  $\Delta R$  y  $L_{eq}$  en función de la corriente. A continuación se describe la composición del sistema:

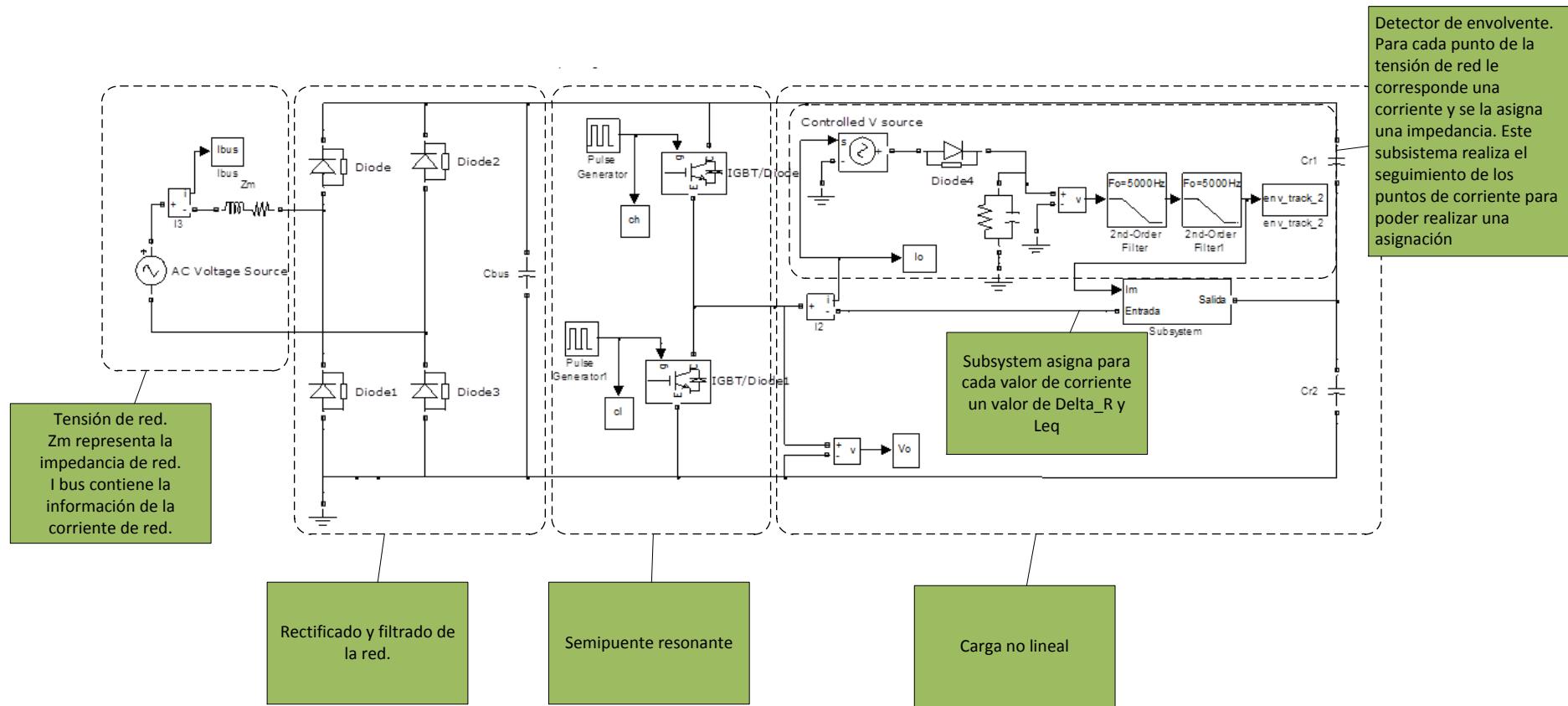


Fig. 8.1. Etapa semipuente resonante.

Tal y como se muestra en la figura 8.2 el bloque Subsystem contiene la información de las  $\Delta R$  y  $L_{eq}$ , tras la lectura de la corriente asignada para cada punto de red.

Los bloques *Nonlinear resistor emulator* y *Nonlinear inductor emulator* (Fig8.2) contiene la información mediante tablas de los valores  $\Delta R$  y  $L_{eq}$  obtenidos en COMSOL.

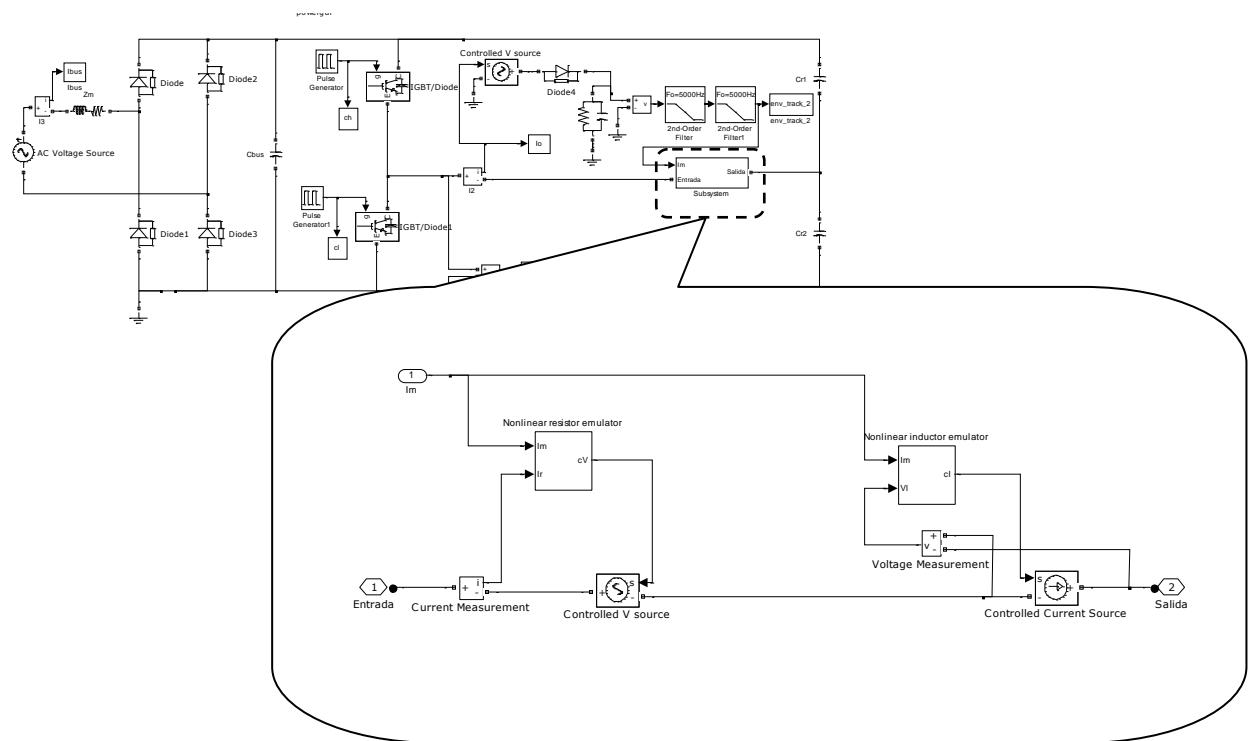


Fig. 8.2. Composición de Subsystem (Asignador de la impedancia R-L)

## 8.2. Resultados de la simulación.

En los resultados obtenidos comparados con un ciclo de red puede observarse una pequeña distorsión de la corriente debido a la naturaleza de la carga. Con este procedimiento, la no linealidad de la carga hace que el comportamiento de la carga sea más semejante a la realidad.

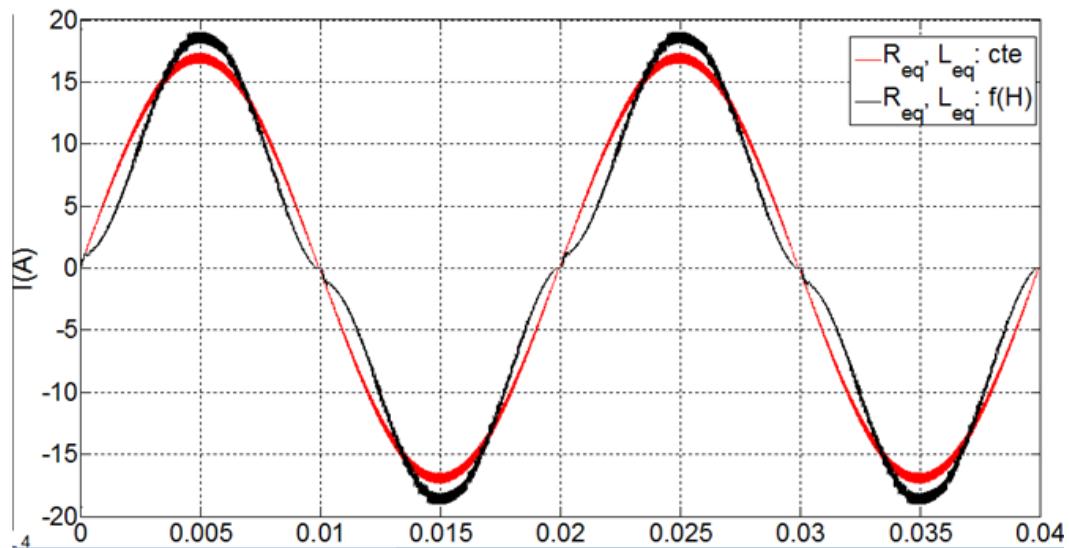


Fig. 8.3. Comparación. En rojo carga lineal. En azul carga no lineal.

## *Capítulo 9*

# APORTACIONES, CONCLUSIONES Y EXTENSIONES FUTURAS

---

### **9.1. Aportaciones y conclusiones**

En este trabajo fin de máster, se ha caracterizado un sistema de calentamiento por inducción formado por un inductor espiral plano y una carga, mediante ensayo – simulación para poder estudiar su comportamiento.

El objetivo principal de este trabajo ha sido el desarrollo de una metodología de ensayo y simulación lo más completo posible del sistema inductor – carga y su verificación mediante simulación.

Las principales aportaciones y conclusiones, de forma resumida, de este trabajo son las siguientes:

- Se ha propuesto un procedimiento de mecanizado de muestras de recipientes comerciales para uso en cocinas de inducción domestica y ensayos en permeámetro para la obtención de las permeabilidades complejas del material.
- Se ha desarrollado una metodología en la extracción del equivalente eléctrico a partir de la permeabilidad compleja de un material
- Se han caracterizado las cargas como elementos no lineales dentro de un sistema de inducción domestica.
- Se han comparado los resultados entre distintos elementos ferromagnéticos de las contribuciones resistivas que presenta la carga, teniendo en cuenta su parte compleja (carga no lineal) y contando solo con su parte real (carga lineal).

- Se ha puesto en funcionamiento el permeámetro realizando un ajuste de los ciclos de histéresis, primeramente con las probetas del LMM, para que sin saturar en exceso el material, pueda realizarse la medición de permeabilidades con la máxima precisión.
- Se ha explorado la vía de establecer una mejora en el rendimiento del conjunto inductor - carga teniendo en cuenta el modelo de comportamiento no lineal de la carga, es decir, su variación en la contribución resistiva al sistema.
- Se ha comprobado que existe un máximo en el crecimiento de la resistencia por inducción en función del campo. Un aumento de la resistencia puede hacer reducir la corriente necesaria para su funcionamiento.
- Esta metodología puede emplearse, una vez extraídos los equivalentes eléctricos, como base para el estudio y simulación en el comportamiento que tiene la carga, en los posibles armónicos introducidos en la red.

## 9.2. Extensiones futuras

Este trabajo constituye una base que sirve de apoyo y puede permitir avanzar en la comprensión y caracterización del comportamiento de los materiales ferromagnéticos usados como carga en sistemas de inducción. En consecuencia abre la posibilidad de futuras líneas de trabajo que se presentan de forma resumida:

- Optimización de los recipientes de inducción domésticos, profundizando en la composición y comportamiento, pudiéndose desarrollar recipientes con resultados prometedores.
- Mejora de problemas electromagnéticos o eléctricos tales como los armónicos generados por el sistema.
- Profundizar en el concepto de rendimiento energético y poder caracterizar un modelo, en el que incluida la carga, optimice el conjunto en cuanto a transferencia de calor.

- Mediante la simulación de elementos finitos se comprobó que las permeabilidades han de ser tratadas como complejas. Esto nos abre la posibilidad de poder realizar un estudio del comportamiento no lineal para distintas frecuencias de resonancia.

