



Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
**Universidad** Zaragoza



- PROYECTO FIN DE CARRERA -

# ANÁLISIS MEDIANTE EL MEF DEL CAMPO MAGNÉTICO ROTATIVO DE UN "MÓVIL PERPETUO"

AUTOR

MARIO GIJÓN MARÍN

DIRECTOR

ANTONIO USÓN SARDAÑA

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL  
ESPECIALIDAD ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

ZARAGOZA, SEPTIEMBRE DE 2012





## Agradecimientos

*Me gustaría dar las gracias a mi director de proyecto Antonio Usón, que siempre tuvo tiempo para mí y me ayudó a llevarlo a cabo hasta el final.*

*También a Miguel Samplón, por haberme facilitado los medios necesarios siempre que los requería.*



## Resumen

Mediante el presente proyecto fin de carrera se pretende llevar a cabo la construcción de un prototipo formado por un disco de imanes permanentes que gire indefinidamente, gracias a la ayuda del campo magnético rotativo producido por una bobina alimentada por la red eléctrica.

Así mismo, se analizará el funcionamiento del dispositivo y el comportamiento del campo magnético rotativo mediante instrumental de laboratorio y se simulará mediante el método de elementos finitos (MEF) a través del programa informático FEMM 4.2.





# Índice general

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Agradecimientos .....</b>  | <b>3</b>  |
| <b>Resumen .....</b>  | <b>4</b>  |
| <b>Capítulo 1 .....</b>   | <b>9</b>  |
| <b>1. INTRODUCCIÓN GENERAL .....</b>  | <b>10</b> |
| 1.1. Objetivo del proyecto .....  | 10        |
| 1.2. Alcance .....  | 10        |
| 1.3. Condiciones existentes .....   | 10        |
| 1.4. Etapas del diseño .....  | 11        |
| <b>Capítulo 2 .....</b>   | <b>12</b> |
| <b>2. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO .....</b>                               | <b>13</b> |
| 2.1. Construcción del estator .....   | 13        |
| 2.2. Construcción del rotor .....   | 15        |
| 2.3. Acoplamiento estator - rotor .....   | 18        |
| 2.4. Principio de funcionamiento .....  | 19        |
| <b>Capítulo 3 .....</b>   | <b>22</b> |
| <b>3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL .....</b>   | <b>23</b> |
| 3.1. Análisis de la corriente consumida por la bobina .....                           | 23        |
| 3.2. Análisis del campo magnético rotativo mediante un<br>sensor de efecto Hall ..... | 23        |
| 3.2.1. El efecto Hall .....   | 24        |
| 3.2.2. Montaje de laboratorio .....   | 25        |
| 3.2.3. Análisis sin ningún disco conectado al eje .....                               | 28        |
| 3.2.4. Análisis con el disco p=2 de imanes cuadrados .....                            | 29        |
| 3.2.5. Análisis con el disco p=2 de imanes cúbico .....                               | 30        |
| 3.2.6. Análisis con el disco p=3 de imanes cuadrados .....                            | 31        |



|  |           |
|--|-----------|
| 3.2.7. Análisis con el disco $p=3$ de imanes cúbicos.....                  | 32        |
| 3.2.8. Análisis con el disco $p=4$ de imanes esféricos.....                | 33        |
| 3.3. Análisis de la velocidad de sincronismo del rotor.....                | 35        |
| <b>Capítulo 4.....</b>   | <b>38</b> |
| <b>4. ANÁLISIS TEÓRICO MEDIANTE EL MEF .....</b>                           | <b>39</b> |
| 4.1. Análisis del campo magnético creado por la bobina.....                | 40        |
| 4.2. Análisis del campo magnético con el disco de imanes<br>cuadrados..... | 43        |
| 4.3. Análisis del campo magnético con el disco de imanes<br>cúbicos.....   | 49        |
| 4.4. Secuencia de funcionamiento.....                                      | 53        |
| <b>Conclusiones.....</b>   | <b>60</b> |
| <b>Bibliografía.....</b>   | <b>62</b> |
| <b>Anexos – PLANOS DEL PROTOTIPO .....</b>                                 | <b>63</b> |
| PLANO 1. Disco $p=2$ de imanes cuadrados.....                              | 64        |
| PLANO 2. Disco $p=2$ de imanes cúbicos.....                                | 65        |
| PLANO 3. Disco $p=3$ de imanes cuadrados.....                              | 66        |
| PLANO 4. Disco $p=3$ de imanes cúbicos.....                                | 67        |
| PLANO 5. Disco $p=4$ de imanes esféricos.....                              | 68        |
| PLANO 6. Corte de la bobina .....  | 69        |
| PLANO 7. Vista general del prototipo .....                                 | 70        |



## Índice de figuras y tablas

|  |    |
|--|----|
| <b>Fig. 1.</b> Uno de los dos relés utilizados en la construcción del estator .....          | 13 |
| <b>Fig. 2.</b> Tensión nominal del relé: 110V, c.c. ....                                     | 14 |
| <b>Fig. 3.</b> Bobina desmontada, en la que se muestra también el núcleo ferromagnético..... | 14 |
| <b>Figs. 4 y 5.</b> Detalle de la conexión en serie de ambas bobinas .....                   | 15 |
| <b>Fig. 6.</b> Eje del rotor.....  | 16 |
| <b>Fig. 7.</b> Disco $p=2$ , imanes cuadrados .....  | 17 |
| <b>Fig. 8.</b> Disco $p=2$ , imanes cúbicos .....  | 17 |
| <b>Fig. 9.</b> Disco $p=3$ , imanes cuadrados .....  | 17 |
| <b>Fig. 10.</b> Disco $p=3$ , imanes cúbicos .....   | 17 |
| <b>Fig. 11.</b> Disco $p=4$ , imanes esféricos .....   | 17 |
| <b>Fig. 12.</b> Construcción finalizada del prototipo .....                                  | 19 |
| <b>Fig. 13.</b> Campo magnético creado por un imán permanente.....                           | 20 |
| <b>Fig. 14.</b> Campo magnético creado por un electroimán.....                               | 21 |
| <b>Fig. 15.</b> Efecto Hall .....  | 24 |
| <b>Fig. 16.</b> Montaje para la medida del campo magnético rotativo .....                    | 26 |
| <b>Fig. 17.</b> Ubicación de la sonda de efecto Hall.....                                    | 27 |
| <b>Fig. 18.</b> Imagen del osciloscopio sin ningún disco acoplado al eje .....               | 28 |
| <b>Fig. 19.</b> Campo magnético creado por la bobina.....                                    | 28 |
| <b>Fig. 20.</b> Imagen del osciloscopio con el disco $p=2$ de imanes cuadrados .....         | 29 |
| <b>Fig. 21.</b> Campo magnético creado por el disco $p=2$ de imanes cuadrados .....          | 29 |
| <b>Fig. 22.</b> Imagen del osciloscopio con el disco $p=2$ de imanes cúbicos .....           | 30 |
| <b>Fig. 23.</b> Campo magnético creado por el disco $p=2$ de imanes cúbicos .....            | 30 |
| <b>Fig. 24.</b> Imagen del osciloscopio con el disco $p=3$ de imanes cuadrados .....         | 31 |
| <b>Fig. 25.</b> Campo magnético creado por el disco $p=3$ de imanes cuadrados .....          | 31 |
| <b>Fig. 26.</b> Imagen del osciloscopio con el disco $p=3$ de imanes cúbicos .....           | 32 |
| <b>Fig. 27.</b> Campo magnético creado por el disco $p=3$ de imanes cúbicos .....            | 32 |
| <b>Fig. 28.</b> Imagen del osciloscopio con el disco $p=4$ de imanes esféricos .....         | 33 |
| <b>Fig. 29.</b> Campo magnético creado por el disco $p=4$ de imanes esféricos .....          | 33 |
| <b>Fig. 30.</b> Campo magnético alrededor de la bobina.....                                  | 41 |



|  |         |
|--|---------|
| <b>Fig. 31.</b> Módulo del campo magnético en la zona del eje de simetría de la bobina.....  | 42      |
| <b>Fig. 32.</b> Gráfica del campo magnético donde se colocó la sonda de efecto Hall .....  | 42      |
| <b>Fig. 33.</b> Ciclo de histéresis .....  | 44      |
| <b>Fig. 34.</b> Campo magnético alrededor del imán cuadrado .....  | 45      |
| <b>Fig. 35.</b> Módulo del campo magnético en la zona del eje de simetría del imán<br>cuadrado .....                                   | 46      |
| <b>Fig. 36.</b> Gráfica del campo magnético donde se colocó la sonda de efecto Hall en el<br>imán cuadrado .....                       | 46      |
| <b>Fig. 37.</b> Campo magnético alrededor de la bobina, con el imán cuadrado en las<br>proximidades .....                              | 47      |
| <b>Fig. 38.</b> Módulo del campo magnético en la zona del eje de simetría, con el imán<br>cuadrado en las proximidades .....           | 48      |
| <b>Fig. 39.</b> Gráfica del campo magnético donde se colocó la sonda de efecto Hall, con el<br>imán cuadrado en las proximidades ..... | 48      |
| <b>Fig. 40.</b> Campo magnético alrededor de la bobina, con el imán cúbico en las<br>proximidades .....                                | 50      |
| <b>Fig. 41.</b> Módulo del campo magnético en la zona del eje de simetría, con el imán<br>cúbico en las proximidades .....             | 50      |
| <b>Fig. 42.</b> Gráfica del campo magnético donde se colocó la sonda de efecto Hall, con el<br>imán cúbico en las proximidades .....   | 51      |
| <b>Fig. 43.</b> Campo magnético alrededor del imán cúbico.....   | 52      |
| <b>Fig. 44.</b> Módulo del campo magnético en la zona del eje de simetría del imán<br>cúbico .....                                     | 52      |
| <b>Fig. 45.</b> Gráfica del campo magnético donde se colocó la sonda de efecto Hall en el<br>imán cúbico .....                         | 53      |
| <b>Fig. 46.</b> Puntos de la onda de corriente representados para la secuencia 1 .....   | 54      |
| <b>Fig. 47.</b> Secuencia de funcionamiento 1.....   | 55 y 56 |
| <b>Fig. 48.</b> Puntos de la onda de corriente representados para la secuencia 2 .....   | 57      |
| <b>Fig. 49.</b> Secuencia de funcionamiento 2.....   | 58 y 59 |
| <b>Tabla 1.</b> Corriente consumida por la bobina.....   | 23      |



## Capítulo 1

# INTRODUCCIÓN GENERAL



## **1. INTRODUCCIÓN GENERAL**

### **1.1. OBJETIVO DEL PROYECTO**

El objetivo del presente proyecto es por una parte, la construcción de varios discos de imanes permanentes que, situados independientemente en las proximidades de un campo magnético variable producido por una bobina conectada a la red eléctrica, giren a una determinada velocidad a expensas de un primer impulso, funcionando a modo de móvil perpetuo.

Por otra parte, se analizará experimental y teóricamente –esto último mediante el método de elementos finitos (MEF)– el campo magnético rotativo producido en las proximidades del electroimán, así como la velocidad de sincronismo del disco, todo ello dependiendo del número de polos de este. De esta manera, se corroborarán mutuamente ambos análisis.

### **1.2. ALCANCE**

Con la creación de este dispositivo se pretende poner de manifiesto los fundamentos físicos que hacen girar un motor de imanes permanentes, explicando el campo magnético rotativo que se produce en el mismo.

Así mismo, formará parte de un programa de innovación docente, mediante el cual servirá para explicar a futuros alumnos los fundamentos del electromagnetismo a través de ejemplos prácticos. A su vez, puede servir para presentarse en exhibiciones y otros eventos de la Universidad.

Este programa puede consultarse en la página web <http://www.unizar.es/icee04/> y en el canal de EDEMUZ (Equipo docente de electromagnetismo de la Universidad de Zaragoza), perteneciente a la página web de almacenamiento de vídeos de Youtube, <http://www.youtube.com/>, en el cual se encuentran explicados numerosos experimentos.

### **1.3. CONDICIONES EXISTENTES**

Para la construcción del proyecto el director del mismo, Antonio Usón, proporcionaba dos relés de 110 V c.c. de tensión nominal a partir de los cuales se obtendrían las bobinas para crear el campo magnético rotativo, el eje que compondría el rotor, que era el eje de un antiguo lector de Cd's y una serie de imanes permanentes de



distinto tamaño y forma. A partir de aquí, se han empleado materiales fácilmente localizables en la vida cotidiana.

#### **1.4. ETAPAS DEL DISEÑO**

La realización del prototipo y posterior estudio está dividido en varias etapas, que se realizarán de forma sucesiva:

- 1.- Proceso de construcción del dispositivo.
- 2.- Análisis experimental de la corriente consumida por la bobina, de la velocidad de sincronismo del disco y del campo magnético rotativo.
- 3.- Análisis teórico mediante el MEF del campo magnético rotativo, utilizando el programa de análisis informático FEMM 4.2.
- 4.- Conclusiones obtenidas.



## Capítulo 2

# PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO





## 2. PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO

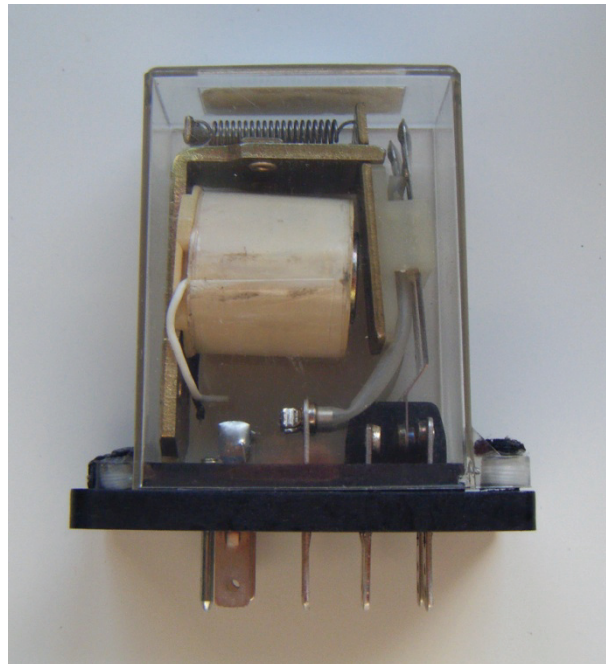
Debido al marcado carácter didáctico del prototipo, se han elegido materiales fácilmente localizables en la vida cotidiana, demostrando así que puede construirse con objetos que cualquier persona puede tener a su disposición.

A continuación se muestran los pasos seguidos para la elaboración del dispositivo, así como su principio de funcionamiento.

### 2.1. CONSTRUCCIÓN DEL ESTATOR

El estator es el encargado de producir el campo magnético variable que hará que el rotor, dependiendo del número de polos que tenga, gire a una determinada velocidad. Para producir éste campo magnético, se utilizará una bobina alimentada a la tensión de red:  $V_{\text{red}} = 230\text{V}$ ,  $f_{\text{red}} = 50\text{ Hz}$ .

Aquí el problema reside en encontrar una bobina que soporte la corriente que por ella circulará al conectarla a la red. De esta manera, se disponía de 2 relés cuya tensión nominal era de 110V en corriente continua cada una, tal y como se muestra en las siguientes imágenes:

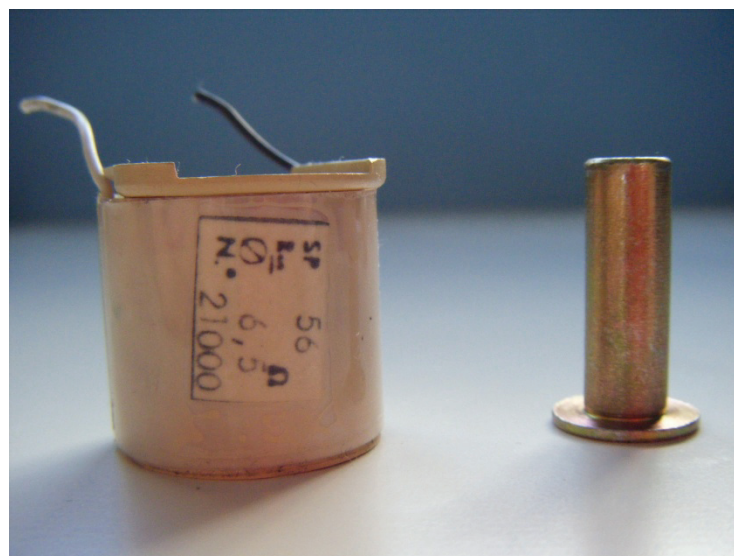


*Figura 1.- Uno de los dos relés utilizados en la construcción del estator*



***Figura 2.- Tensión nominal del relé: 110V, c.c.***

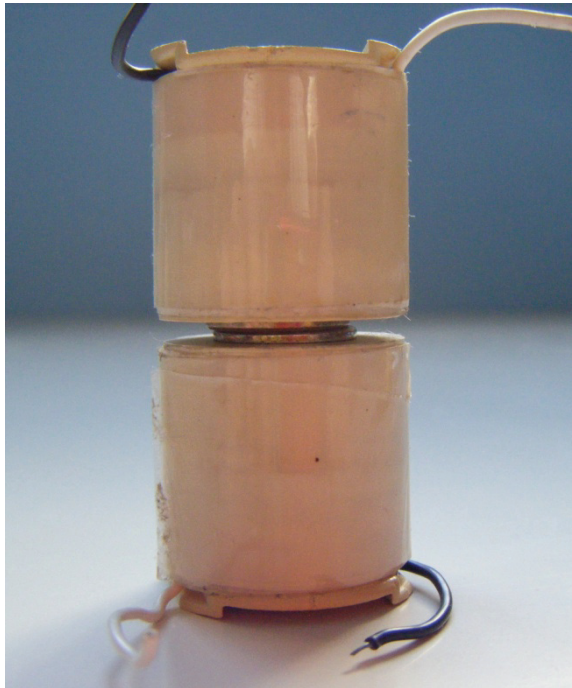
Por consiguiente, se abrieron las carcasas que recubrían las bobinas que componían los relés mediante un taladrado y se unieron en serie. De esta forma, su tensión nominal cambia a 220V en corriente continua. Como va a alimentarse a 230V eficaces durante intervalos no demasiado largos de tiempo, en principio no habrá problemas de sobrecalentamiento.



***Figura 3.- Bobina desmontada, en la que se muestra también el núcleo ferromagnético***



Por otra parte, resaltar también que se dispuso la conexión de los núcleos ferromagnéticos de ambas bobinas de manera que hubiese continuidad y mayor contacto entre ellos, ya que por un extremo disponían de mayor superficie para su unión que por el otro, tal y como puede observarse en la Figuras 3 y 4. Así se conseguiría que el flujo de campo magnético en el interior de la bobina fuese más uniforme y hubiese menor dispersión. Para fijar la unión de ambas inductancias se utilizó cinta aislante.

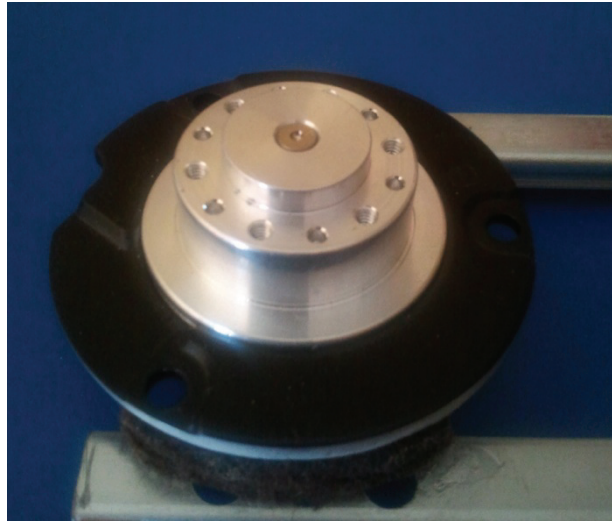


*Figuras 4 y 5.- Detalle de la conexión en serie de ambas bobinas*

Posteriormente se realizó la conexión a la red, verificándose que no se producía sobrecalentamiento en los conductores de las bobinas.

## **2.2. CONSTRUCCIÓN DEL ROTOR**

Para la construcción del rotor se pensó en el eje que llevan los ordenadores para introducir Cd's y proceder a su posterior lectura. En este eje se introduciría un disco de plástico como los que se incluyen en las tarrinas de Cd's para la protección de éstos y que tiene las dimensiones de un Cd convencional.



***Figura 6.- Eje del rotor***

A su vez, se acoplaron alrededor del disco una serie de imanes permanentes. Atendiendo al número y tipo de imanes de los que se disponían, se pudieron realizar 5 tipos distintos de discos, número más que suficiente para realizar las pruebas pertinentes.

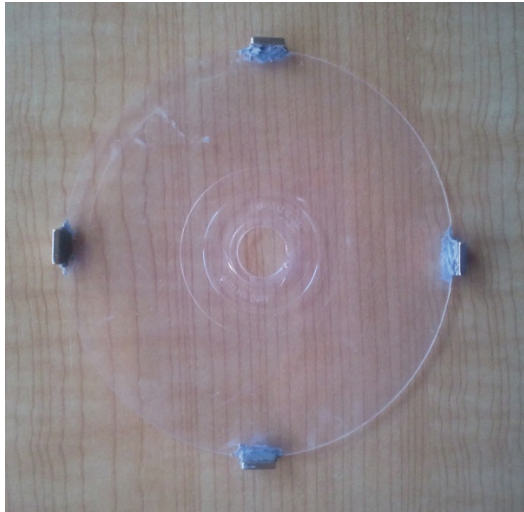
El acoplamiento se realizó con pegamento especial para plásticos y metales, de manera que aguantase las fuerzas magnéticas a la que se verían sometidos los imanes. También se tuvo en cuenta la altura a la que se unieron para que, al acercarse a la bobina, los imanes quedasen a la altura del núcleo ferromagnético, que es donde mayor flujo de campo magnético existe.

La disposición de los imanes en el disco es la siguiente:

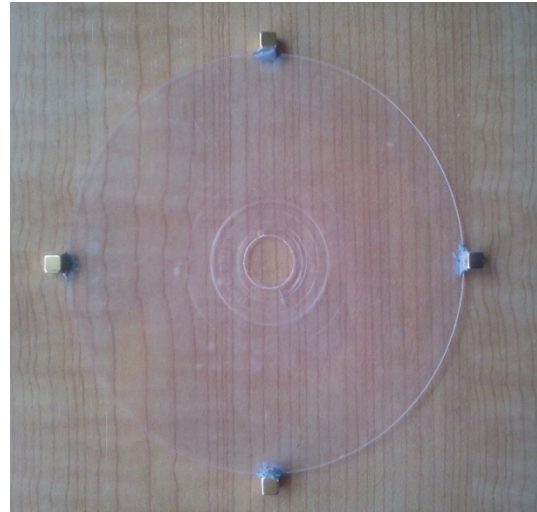
- 1.- Disco de  $p=2$  (2 pares de polos): Norte – Sur – Norte – Sur, separación de  $90^\circ$  entre cada uno.
- 2.- Disco de  $p=3$ : Norte – Sur – Norte – Sur – Norte – Sur, separación de  $60^\circ$  entre cada uno.
- 3.- Disco de  $p=4$ : Norte- Sur – Norte – Sur – Norte – Sur – Norte – Sur, separación de  $45^\circ$  entre cada uno.

A continuación se exponen los cinco tipos de discos realizados:

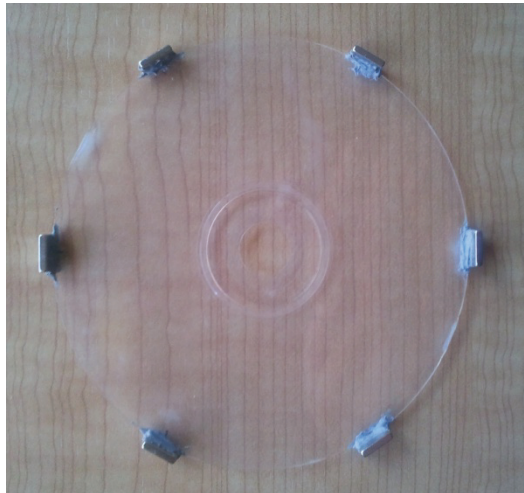




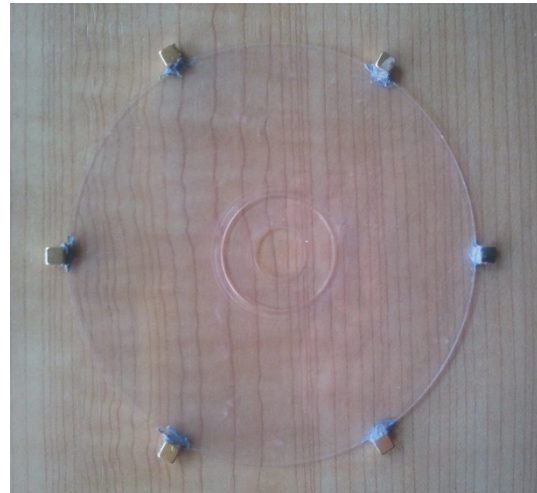
***Figura 7.- Disco  $p=2$ , imanes cuadrados***



***Figura 8.- Disco  $p=2$ , imanes cúbicos***



***Figura 9.- Disco  $p=3$ , imanes cuadrados***



***Figura 10.- Disco  $p=3$ , imanes cúbicos***



***Figura 11.- Disco  $p=4$ , imanes esféricos***



Resaltar que debido a la dificultad de acoplamiento de los imanes esféricos con el disco, éstos no quedan exactamente a la altura del núcleo ferromagnético en el acabado final, por lo que las pruebas con éste disco solo serán relevantes en cuanto a la velocidad de sincronismo del mismo.

### **2.3. ACOPLAMIENTO ESTATOR – ROTOR**

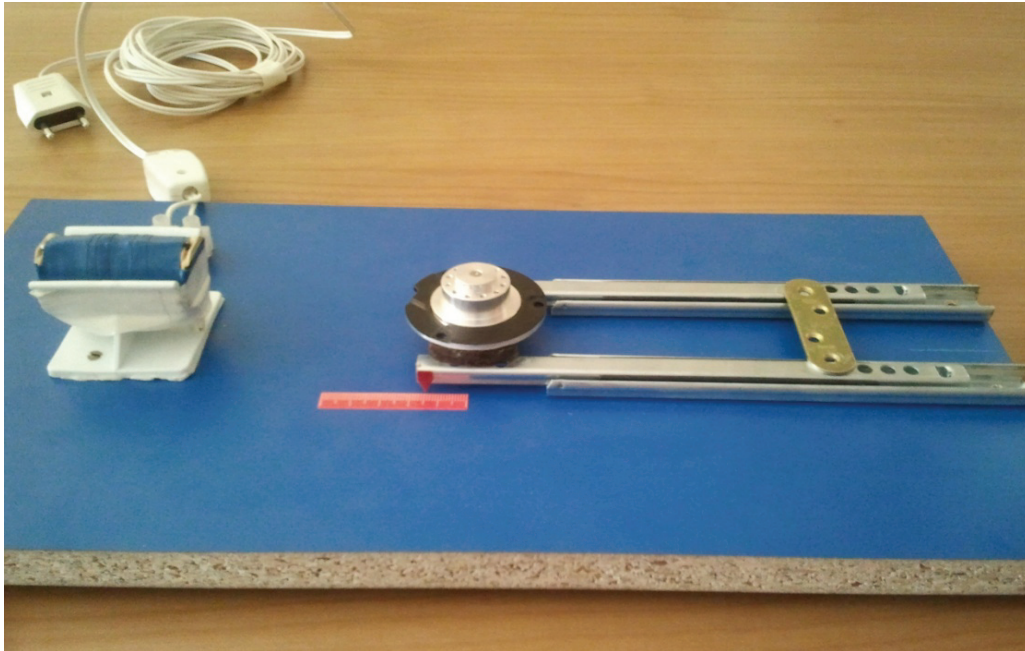
En primer lugar, se buscó una plataforma de dimensiones adecuadas en la que situar todos los elementos del dispositivo. Se eligió un panel de madera aglomerada azul, de 40cm x 20cm.

Para fijar el estator, se buscó un soporte de material no ferromagnético en el que acoplar la bobina, de manera que no alterase el campo magnético producido en las inmediaciones. Para ello, se utilizó un portaescobas de plástico, en el que encajaba perfectamente la bobina y le daba cierta altura.

Por otra parte, se debía buscar un mecanismo mediante el cual se pudiese acercar y alejar el eje del rotor, fijándolo a una determinada altura. Para ello se utilizaron dos guías para cajones. El eje del rotor se levantó un poco para que coincidiese la altura de los imanes con el eje de simetría de la bobina.

También se incluyó una regla para medir posteriormente a qué distancia del estator se producía el sincronismo de cada uno de los discos. El origen de dicha regla era la distancia a la cual tocaba la bobina con el disco de imanes cuadrados.

Por último, se incluyó un interruptor para facilitar la conexión y desconexión de la bobina a la red eléctrica.



***Figura 12.- Construcción finalizada del prototipo***

En el capítulo anexos, se muestran una serie de planos en el que se exponen todas las dimensiones de los distintos elementos del dispositivo.

## **2.4. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO**

Se define un móvil perpetuo como una máquina hipotética que sería capaz de continuar funcionando eternamente, después de un impulso inicial, sin necesidad de energía externa adicional. Se dice hipotética, porque en realidad es imposible obtener este objeto, al no haber manera alguna de seguir creando energía mecánica a partir “de la nada”. En nuestro caso se habla de éste tipo de máquina ya que, al no haber contacto mecánico alguno entre el rotor y el estator, se podría “engañar” a quien observara dicho dispositivo, ocultando de alguna manera el electroimán.

En otro orden de cosas, Ampere propuso la hipótesis de que todos los campos magnéticos tienen su origen en corrientes eléctricas. En la actualidad esto se explica basándose en la teoría atómica de la materia. En el interior de la materia existen pequeñas corrientes cerradas debidas al movimiento de los electrones que contienen los átomos. Cada una de estas corrientes origina un microscópico dipolo magnético. Cuando estos dipolos están orientados en direcciones aleatorias, sus efectos se anulan mutuamente y el material no presenta propiedades magnéticas; en cambio si todos los dipolos se alinean, como consecuencia de un campo magnético externo que tienda a orientarlos en su propia dirección, actúan como un único imán y en ese caso decimos que la sustancia se ha magnetizado y el material genera su propio campo magnético.

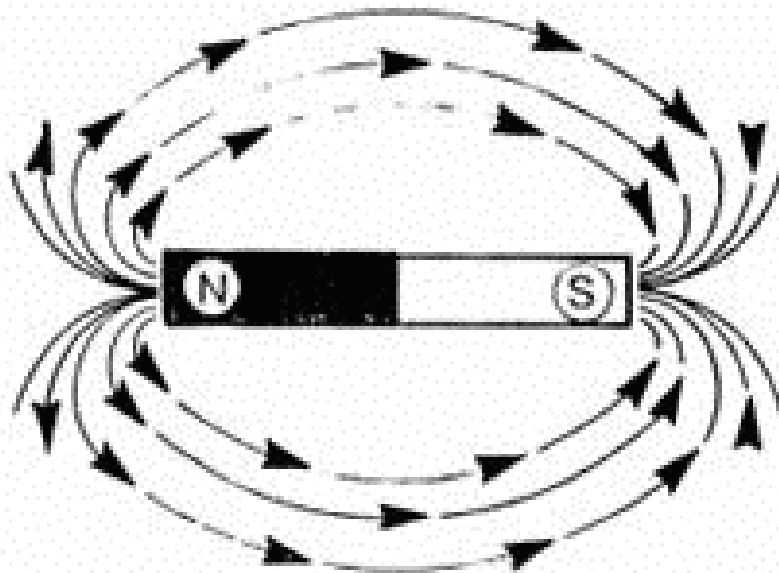


Algunos materiales, llamados ferromagnéticos, conservan la orientación de sus dipolos aún cuando desaparece el campo magnético externo que los polariza.

Un imán permanente tiene la capacidad, según su propio nombre indica, de retener un valor de magnetismo remanente después de ser imantado por algún medio. Además de ser resistente a la desmagnetización, un imán permanente tiene la propiedad de conservar su magnetismo con el tiempo.

Mediante la curva de histéresis podemos observar la forma en que se produce la magnetización de un material. Esta curva nos servirá para la modelización de los imanes permanentes en FEMM y por ello se explicará en ese propio capítulo.

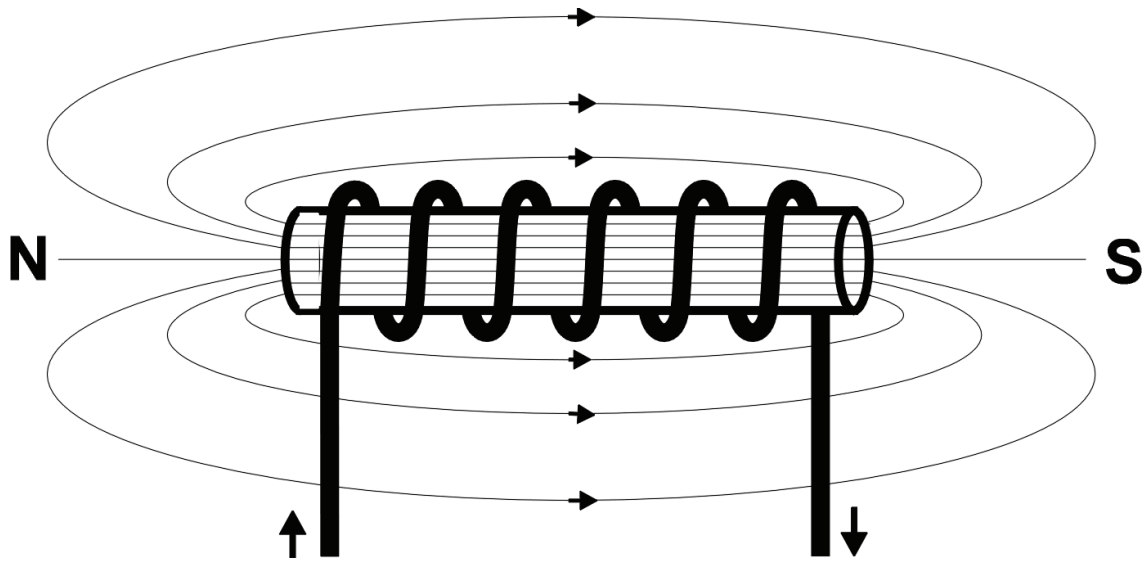
Mediante observaciones experimentales, se observó que los patrones de campo magnético para una barra imantada son los siguientes.



***Figura 13.- Campo magnético creado por un imán permanente***

Ampere propuso su hipótesis a partir de la observación, también experimental, de que con un solenoide también puede crearse un campo magnético igual al de un imán permanente. Cuando se enrolla hilo conductor sobre un tubo recto y se hace circular corriente eléctrica por el primero, se produce un campo magnético en su entorno que viene definido por la regla de la mano derecha, tal y como se muestra en la siguiente imagen.





**Figura 14.- Campo magnético creado por un electroimán**

De esta manera se crea un electroimán con líneas de campo magnético que definen un polo norte y un polo sur, según su sentido. Puede decirse, en primera instancia, que un imán y un electroimán son lo mismo, con la diferencia de que en el segundo podemos variar el campo magnético que crea variando la corriente que circule por él, y en el primero no.

Destacar que si se sitúa un núcleo de material ferromagnético dentro de la bobina pueden producirse campos magnéticos mucho más fuertes. Sin embargo, en el núcleo ferromagnético se crean corrientes inducidas cuando el campo magnético es variable, como será en nuestro caso. Estas corrientes son llamadas corrientes de Foucault y en general son indeseables, puesto que calientan el núcleo y provocan una pérdida de potencia. Son debidas al campo magnético variable al que está sometido el núcleo ferromagnético, de manera que en éste se inducen corrientes circulares de tal forma que creen un campo magnético en oposición al campo magnético principal, debido a que toda acción se opone a la causa que lo produce.

Dicho esto, si conectamos el electroimán a la red eléctrica, se producirá un campo magnético cuyo módulo será de carácter senoidal (por eso se dice que es rotativo) y con una frecuencia igual a la de la red. Colocando un disco como los descritos anteriormente cuyos imanes pasen por las cercanías del eje del electroimán y proporcionándole un pequeño impulso para iniciar el movimiento, el movimiento del rotor se sincroniza con el campo magnético creado por la bobina, de forma que el polo norte del imán se ve atraído por el “polo sur” del electroimán y viceversa. Los dos campos magnéticos (el creado por el imán permanente y el creado por el electroimán) se suman, dando lugar a un incremento en módulo que más tarde se observará en el osciloscopio. Ésta es la razón de la aparición de las fuerzas y pares de fuerzas que contrarrestan las que se oponen al movimiento y mantienen al rotor girando.



## Capítulo 3

# ANÁLISIS EXPERIMENTAL



### 3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

#### 3.1. ANÁLISIS DE LA CORRIENTE CONSUMIDA POR LA BOBINA

En primer lugar, se comprobó la corriente consumida por la bobina para verificar que no fuese excesiva y evitar sobrecalentamientos. Igualmente, este análisis era necesario para el estudio en FEMM del campo magnético rotativo, que se realiza en el siguiente capítulo.

Para ello, se conectó en serie con la bobina un amperímetro y a su vez el circuito se excitó a través de un autotrafo, para ir aumentando poco a poco la tensión de excitación hasta llegar a la nominal de red, 230 Voltios. A continuación se muestran los resultados obtenidos, por orden de medición.

|    | <i>Tensión (Voltios)</i> | <i>Corriente (Miliamperios)</i> |
|----|--------------------------|---------------------------------|
| 1º | 0                        | 0                               |
| 2º | 50                       | 3,62                            |
| 3º | 75                       | 5,42                            |
| 4º | 100                      | 7,15                            |
| 5º | 125                      | 8,96                            |
| 6º | 150                      | 10,72                           |
| 7º | 175                      | 12,52                           |
| 8º | 200                      | 14,33                           |
| 9º | <b>230</b>               | <b>16,56</b>                    |

*Tabla 1.- Corriente consumida por la bobina*

Destacar que se trata de valores eficaces de tensión y corriente, y que no son valores elevados. Simplemente tocando la bobina con la mano, se verifica que no se produce un calentamiento excesivo de la misma. El valor nominal de 16,56 mA se utilizará en el siguiente capítulo para el análisis en FEMM.

#### 3.2. ANÁLISIS DEL CAMPO MAGNÉTICO ROTATIVO MEDIANTE UN SENSOR DE EFECTO HALL

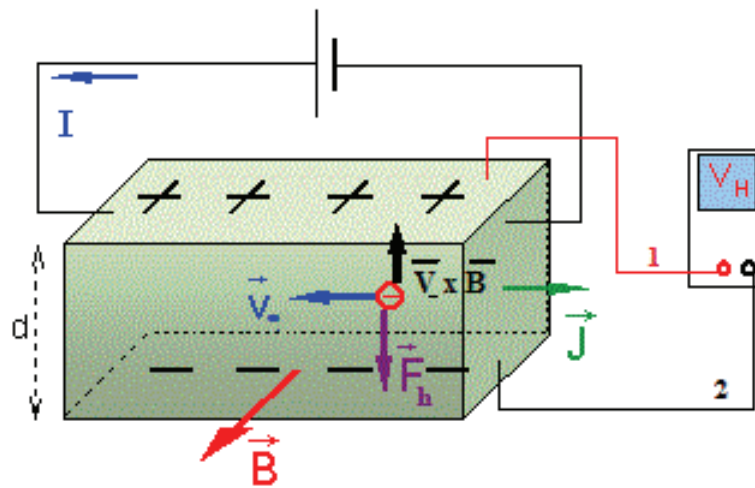
Antes de comenzar a exponer el montaje de laboratorio para el análisis del campo magnético rotativo, conviene explicar en qué consiste el efecto Hall.



### 3.2.1. EL EFECTO HALL

Edwin Hall expuso en 1879: “cuando un conductor por el que circula una corriente eléctrica se coloca en presencia de un campo magnético, aparece una fuerza  $\vec{F}_h$ , de naturaleza magnética, sobre los portadores libres de carga en dirección perpendicular tanto a la corriente ( $I$ ) que circula como al campo magnético ( $\vec{B}$ ) aplicado. Esta  $\vec{F}_h$  da lugar a una fuerza electromotriz  $\mathcal{E}_h$ , que depende de la  $I$  que circula y de  $B$ , denominada fuerza electromotriz Hall”.

Lo anterior implica, tal y como se muestra en la siguiente figura, que entre los terminales 1 y 2 aparece una diferencia de potencial ( $V_h$ ) debida a la  $\mathcal{E}_h$ , que se muestra en el voltímetro.



*Figura 15.- Efecto Hall*

El origen de la fuerza Hall se debe a la fuerza magnética ejercida sobre las cargas libres en movimiento dentro del conductor, regida por la ley de Lorentz:

$$\vec{F}_h = q \cdot \vec{V} \times \vec{B} \quad (3.1)$$

En el caso expuesto, si los responsables de la conducción son portadores de carga negativa se almacenarían en el terminal 2, mientras que si son portadores de carga positiva se almacenarían en el terminal 1. Imaginemos a partir de ahora que se trata de portadores de carga positiva.

La lámina conductora actúa entre los terminales 1 y 2 como un generador en el que el campo eléctrico asociado a su efecto es:

$$\vec{E}_h = \frac{\vec{F}_h}{q} = \vec{V} \times \vec{B} \quad (3.2)$$



En este caso,  $\vec{V}$  es perpendicular a  $\vec{B}$ , por lo que  $|\vec{E}_h| = V \cdot B$

Sabiendo que la fuerza electromotriz de un generador es el trabajo que ejerce este para llevar la unidad de carga positiva desde el terminal negativo al positivo:

$$\mathcal{E}_h = \int_{-}^{+} \vec{E}_h \cdot d\vec{l} \quad (3.3)$$

Obtenemos finalmente la expresión, al estar los terminales 1 y 2 en circuito abierto:

$$\mathcal{E}_h = V_h = V \cdot B \cdot d \quad (3.4)$$

Normalmente, la corriente  $I$  que circula por la lámina conductora es proporcional a la velocidad de los portadores:

$$I = K_i \cdot |\vec{V}| \quad (3.5)$$

Por lo tanto, la expresión de  $V_h$  queda:

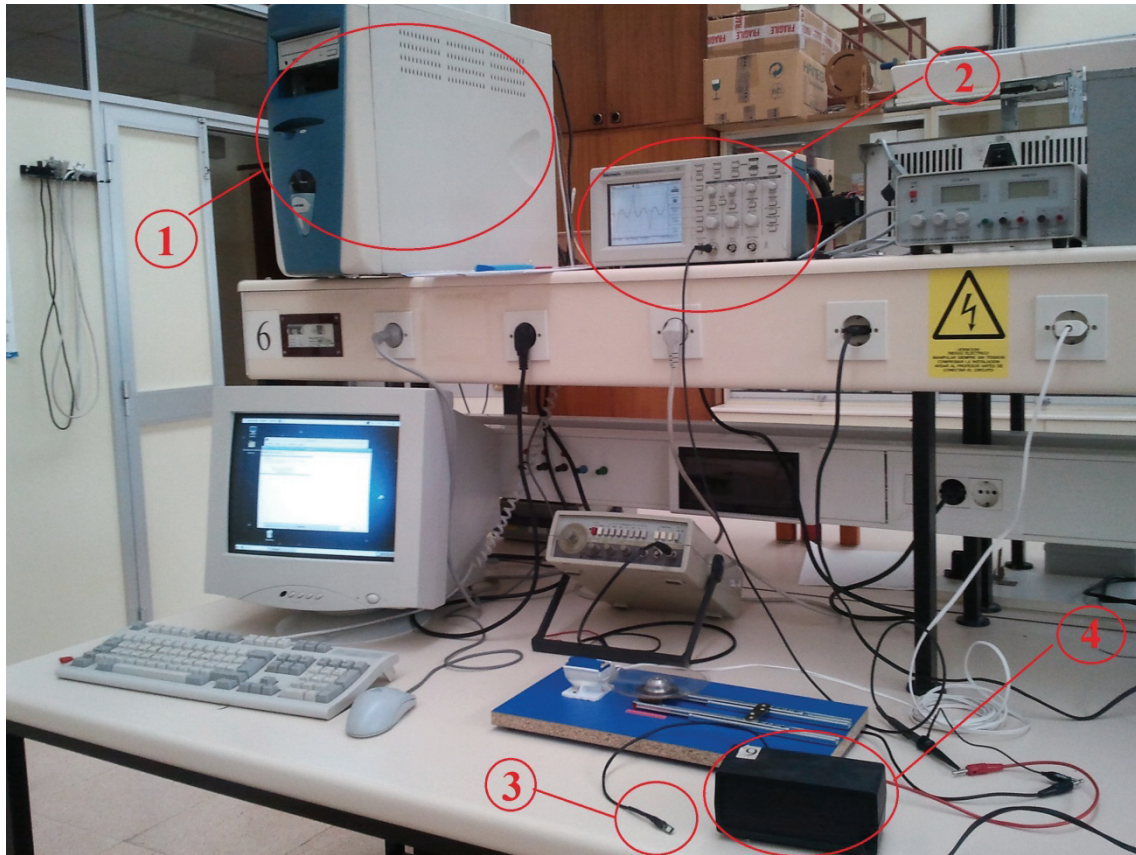
$$V_h = \frac{d}{K_i} \cdot B \cdot I \quad (3.6)$$

Si tomamos un material del que se conoce  $d$ ,  $K_i$  e inyectamos una corriente conocida  $I$ , la  $V_h$  entre los terminales 1 y 2 es proporcional a la componente perpendicular de  $\vec{B}$  a la lámina conductora.

En el montaje que se realizó en el laboratorio se utilizó una sonda de efecto Hall comercial, que unida a un amplificador se generaba a la salida 1 Voltio por cada 500 Gauss que traspasaban perpendicularmente la sonda, con una resolución máxima de 6 Voltios. En nuestro caso colocaremos la sonda en contacto con el eje del electroimán, donde se cumple que  $\vec{B}$  es perpendicular a la sonda y a  $\vec{V}$ , por lo que la medida que se registre será exactamente el módulo de  $\vec{B}$ .

### 3.2.2. MONTAJE DE LABORATORIO

Para la medida del campo magnético rotativo en las proximidades del electroimán se realizó el montaje que se muestra en la siguiente imagen, junto con la leyenda de los dispositivos utilizados:



**Figura 16.- Montaje para la medida del campo magnético rotativo**

- 1.- Ordenador con un programa instalado para la adquisición de datos del osciloscopio.
- 2.- Osciloscopio digital.
- 3.- Sonda de efecto Hall comercial.
- 4.- Amplificador de señal para la sonda de efecto Hall.

Por una parte, se puso a mi disposición un ordenador que, mediante un programa para la adquisición de datos procedentes del osciloscopio digital conectado a través de un cable RS-232, podía almacenar la visualización que mostraba el osciloscopio mediante dos archivos. Uno, de extensión \*.bmp, era una imagen de mapa de bits que, abierto con cualquier programa visualizador de fotos (al igual que un archivo \*.jpg), mostraba la imagen que directamente se representaba en la pantalla del osciloscopio. Otro, de extensión \*.dat, mostraba los valores del eje de abscisas y ordenadas de la gráfica representada en el osciloscopio, mediante una tabla.

Por otra parte, las sondas del osciloscopio se conectaron a la salida de un amplificador de señal, que a su vez se conectó a una sonda de efecto hall. La sonda de efecto hall se colocó en contacto con el eje ferromagnético de la bobina, tal y como se muestra en la siguiente imagen con el motor funcionando, al tratarse de un lugar representativo para su posterior análisis en FEMM.





***Figura 17.- Ubicación de la sonda de efecto Hall***

A partir de aquí se hicieron las pertinentes pruebas. Por una parte, para la medida del campo magnético sin ningún disco acoplado al eje y, por otra, para cada tipo de disco funcionando en sincronismo. Se muestran a continuación las imágenes que se obtuvieron directamente sobre el osciloscopio y los valores reales de campo magnético, (en Teslas) en función del tiempo, obtenidos a partir del archivo \*.dat y tratados con una hoja de cálculo Excel. Posteriormente, en el capítulo de análisis mediante el MEF se corroborarán estos resultados.



### 3.2.3. ANÁLISIS SIN NINGÚN DISCO ACOPLADO AL EJE

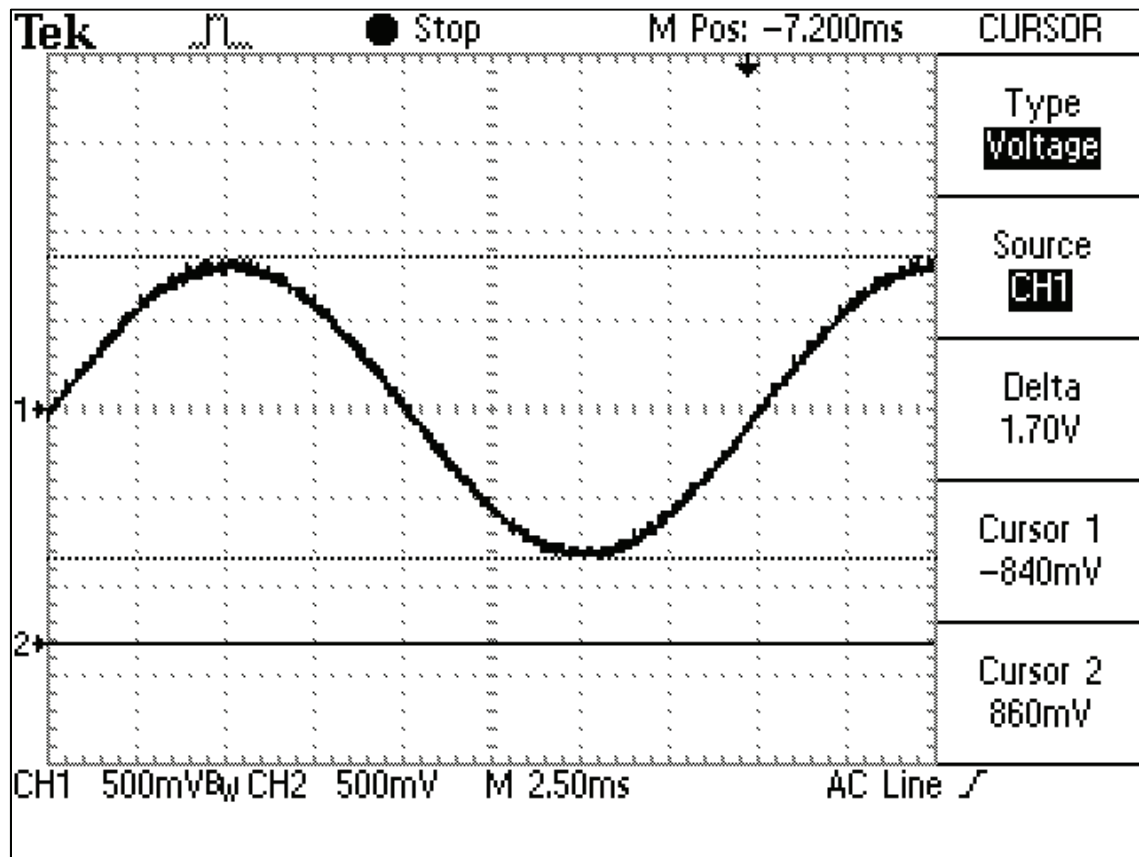


Figura 18.- Imagen del osciloscopio sin ningún disco acoplado al eje

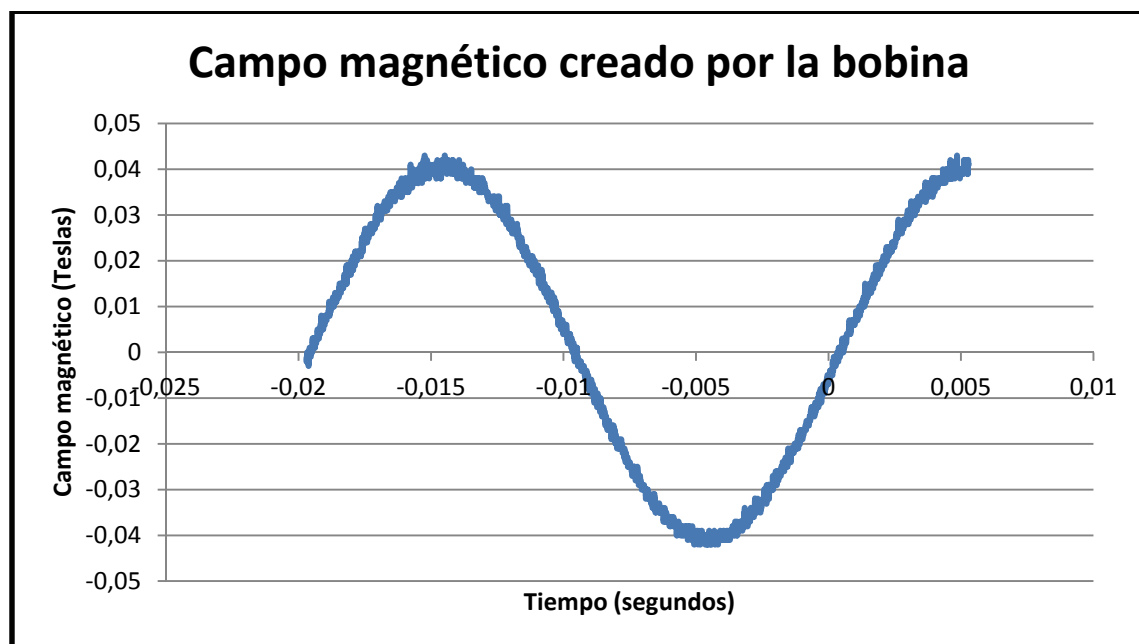


Figura 19.- Campo magnético creado por la bobina





### 3.2.4. ANÁLISIS CON EL DISCO P=2 DE IMANES CUADRADOS

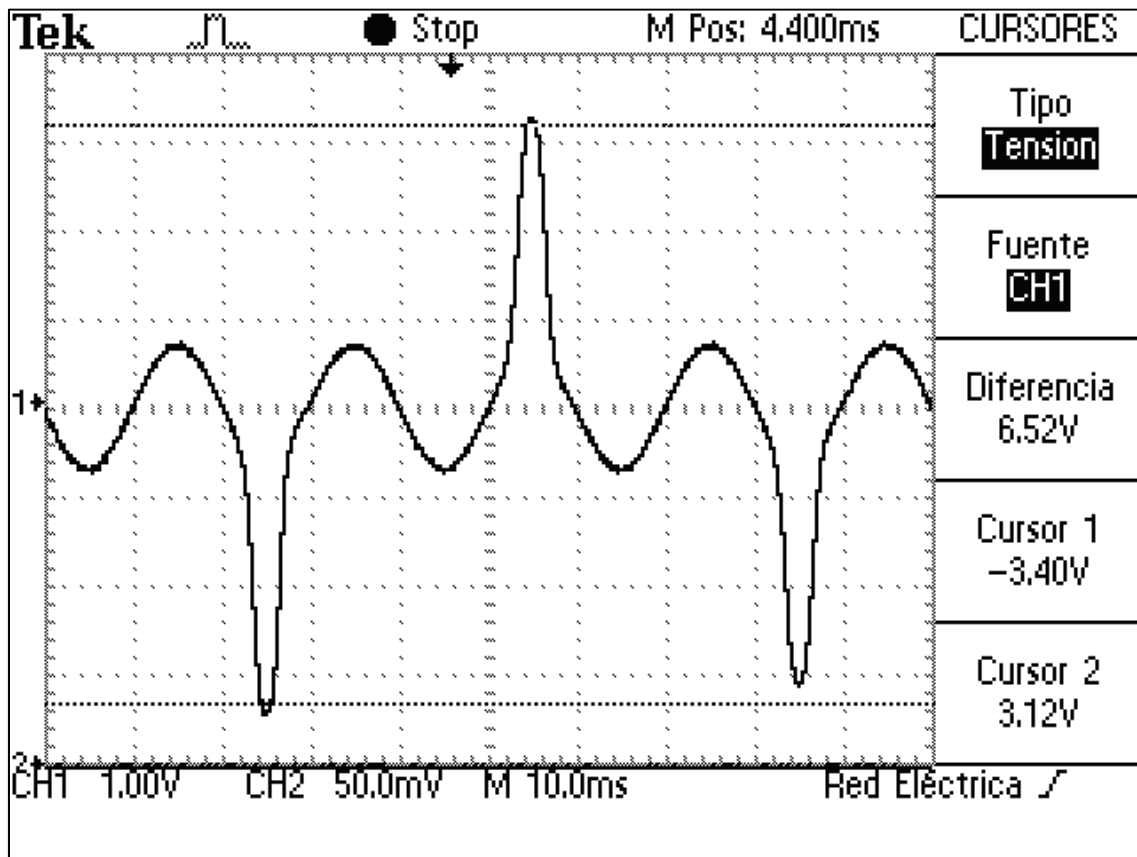


Figura 20.- Imagen del osciloscopio con el disco  $p=2$  de imanes cuadrados

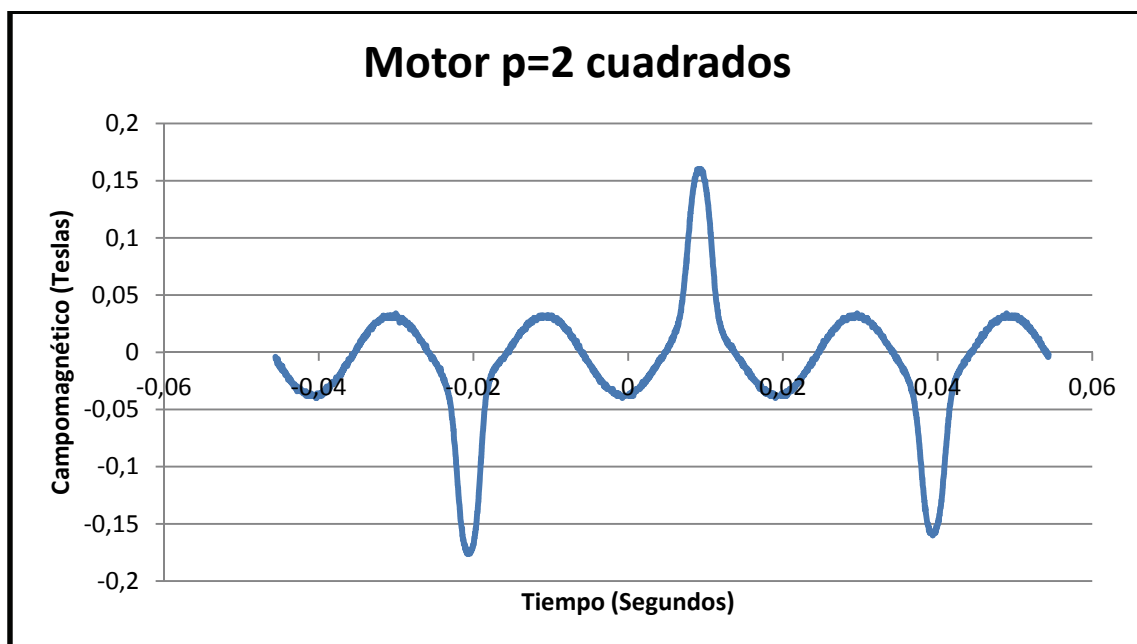


Figura 21.- Campo magnético creado por el disco  $p=2$  de imanes cuadrados



### 3.2.5. ANÁLISIS CON EL DISCO P=2 DE IMANES CÚBICOS

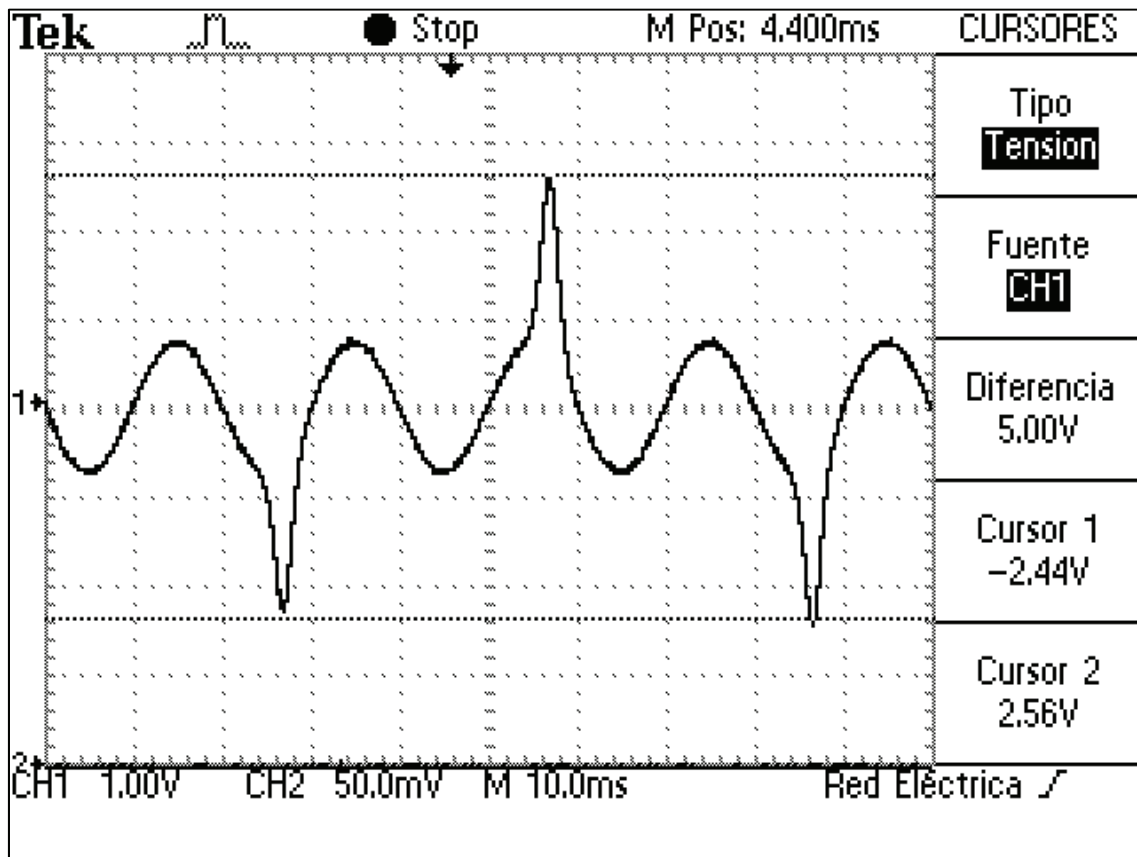


Figura 22.- Imagen del osciloscopio con el disco  $p=2$  de imanes cúbicos

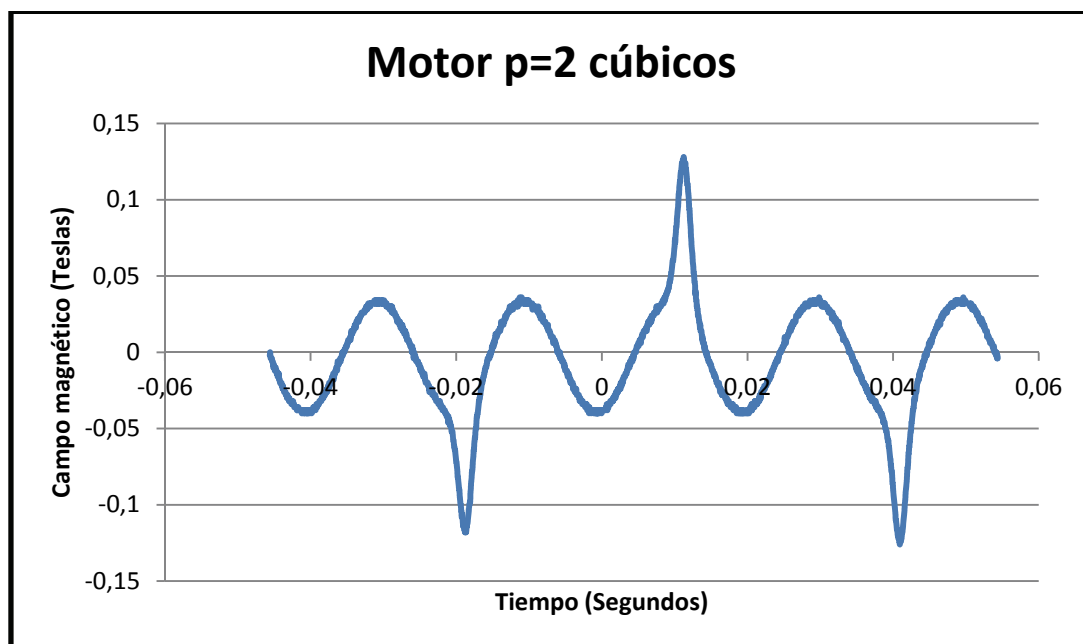


Figura 23.- Campo magnético creado por el disco  $p=2$  de imanes cúbicos



### 3.2.6. ANÁLISIS CON EL DISCO P=3 DE IMANES CUADRADOS

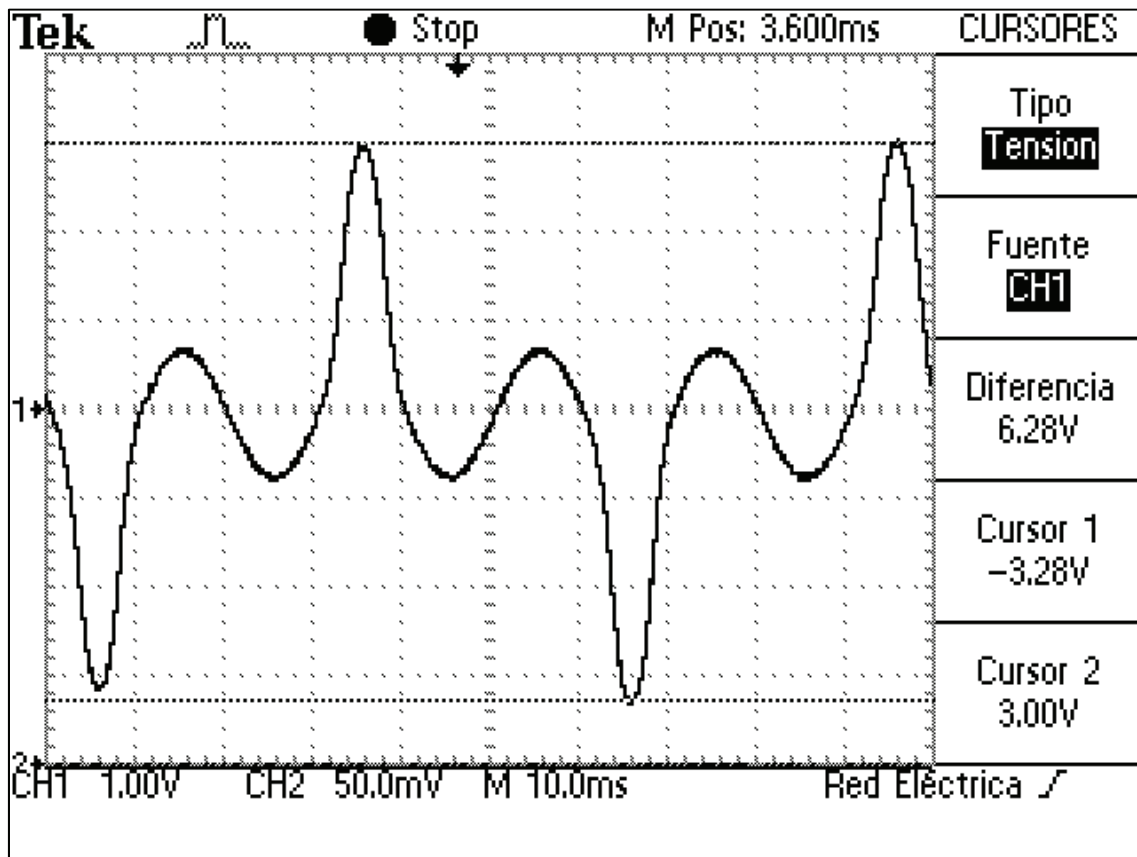


Figura 24.- Imagen del osciloscopio con el disco  $p=3$  de imanes cuadrados

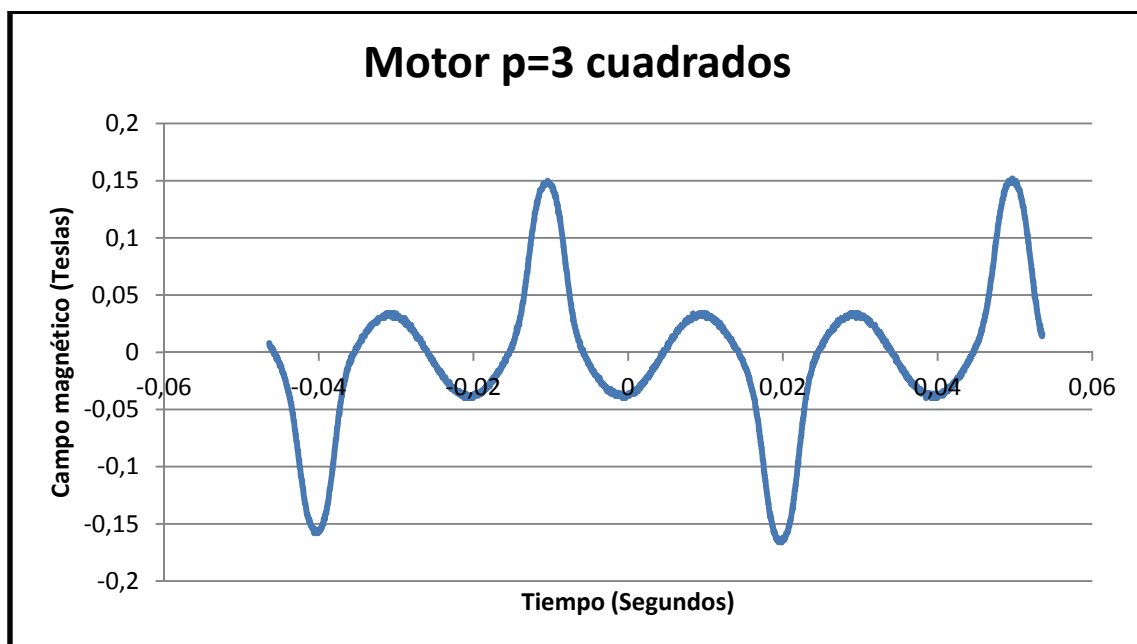


Figura 25.- Campo magnético creado por el disco  $p=3$  de imanes cuadrados



### 3.2.7. ANÁLISIS CON EL DISCO P=3 DE IMANES CÚBICOS

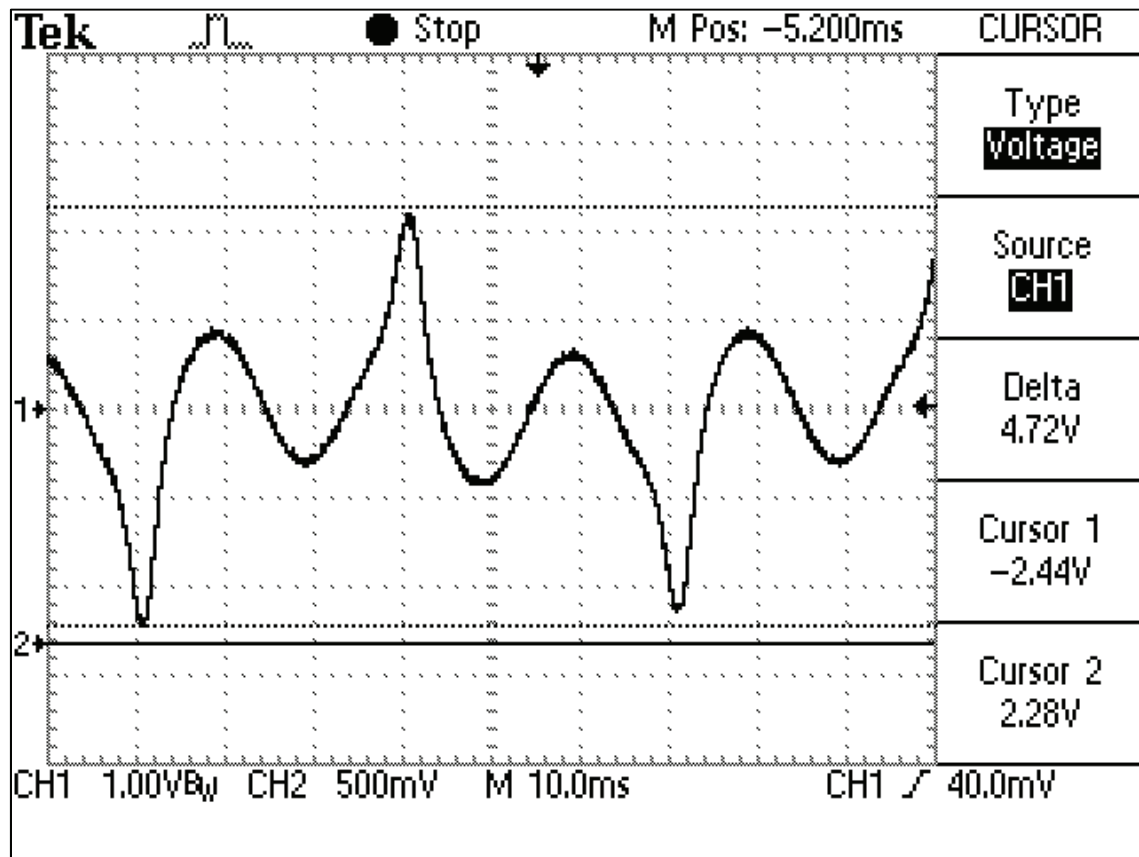


Figura 26.- Imagen del osciloscopio con el disco  $p=3$  de imanes cúbicos

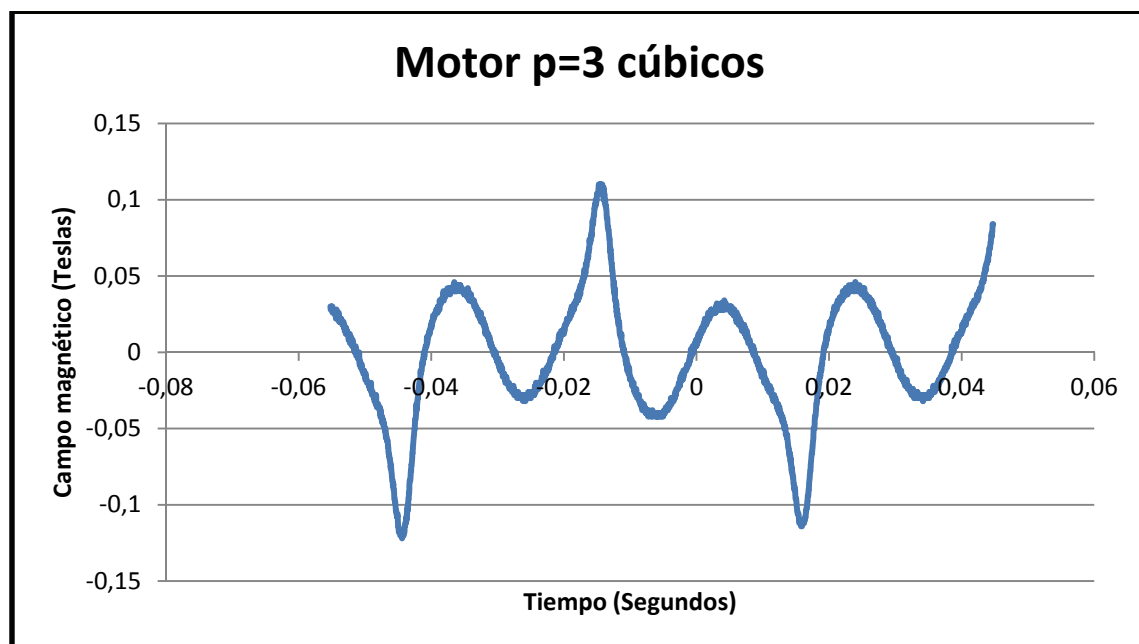


Figura 27.- Campo magnético creado por el disco  $p=3$  de imanes cúbicos



### 3.2.8. ANÁLISIS CON EL DISCO $P=4$ DE IMANES ESFÉRICOS

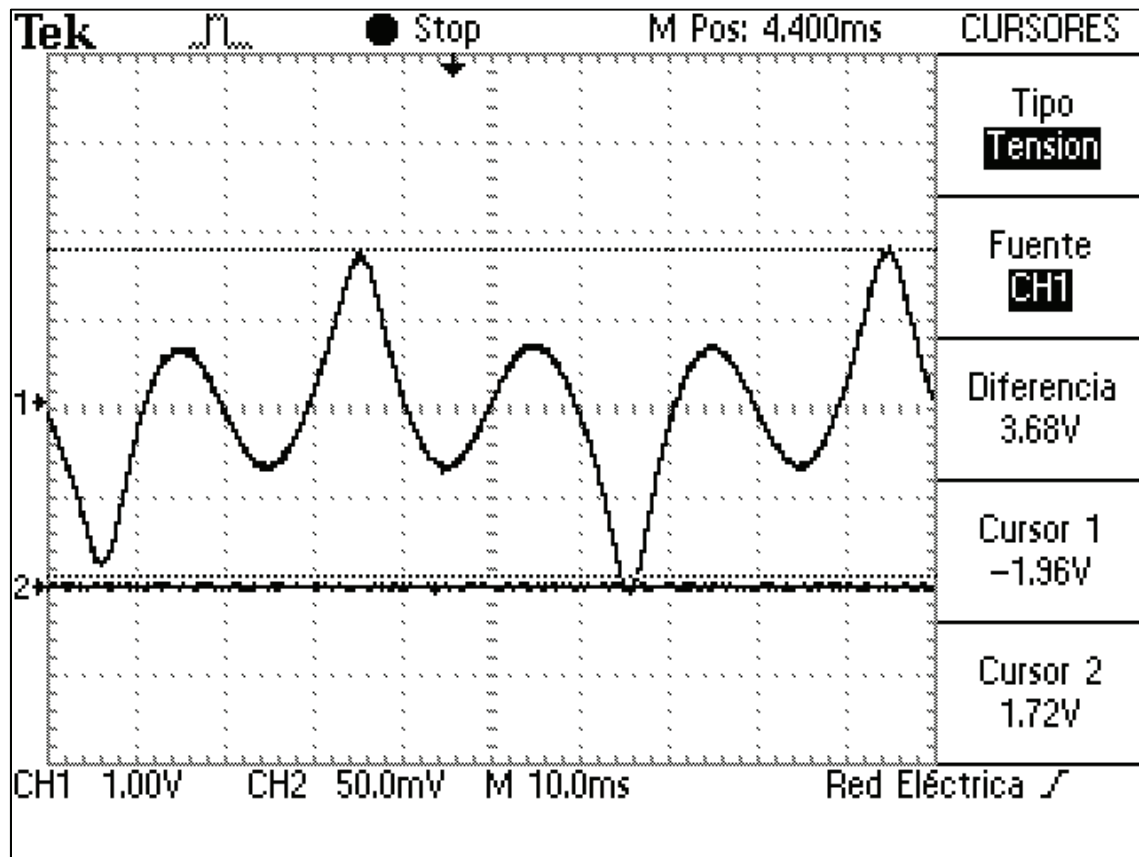


Figura 28.- Imagen del osciloscopio con el disco  $p=4$  de imanes esféricos

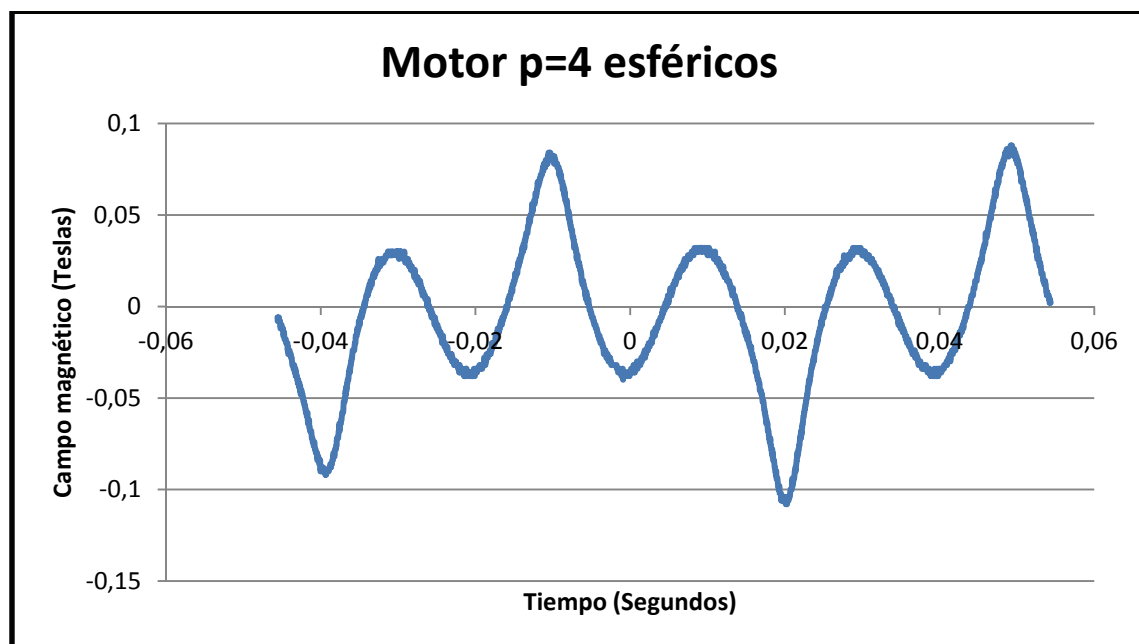


Figura 29.- Campo magnético creado por el disco  $p=4$  de imanes esféricos



Observaciones:

1.- La onda de campo magnético en las proximidades de la bobina es senoidal, con una frecuencia de 50 Hz, al igual que la onda de tensión de la red. Cabe resaltar el valor de pico de la onda, 0,04 Teslas, y su valor eficaz, 0,0283 Teslas, que más adelante se comprobarán mediante el análisis en FEMM.

2.- En todas las gráficas se produce el incremento en módulo del campo magnético al pasar el imán permanente por el eje de la bobina. Sin embargo, en vez de hacerlo en semiciclos consecutivos de la onda de campo magnético, ha de pasar un ciclo completo antes de que el imán se acerque al eje. Esto es debido a que con el impulso inicial que se le aplica con la mano no es posible adquirir la velocidad suficiente para que el sincronismo se realice en semiciclos consecutivos. De esta manera, con el motor funcionando, la frecuencia y el periodo de la onda de campo magnético son:

$$f = \frac{f_{red}}{3} = 16,6 \text{ Hz.} \quad (3.7)$$

$$T = T_{red} \times 3 = 60 \text{ ms.} \quad (3.8)$$

A partir de las gráficas podemos obtener la velocidad del giro del rotor. Entre que pasa un imán y el siguiente por el eje del electroimán transcurre un tiempo  $t_1 = T/2 = 30 \text{ ms}$ . Una vuelta completa del disco ocurre cuando han pasado todos los imanes del disco, es decir, en un tiempo  $t_2 = 2 \cdot p \cdot t_1$  (siendo  $p$  el número de pares de polos). Por lo tanto, para obtener la velocidad, en revoluciones por minuto:

$$n = \frac{60}{t_1 \cdot 2 \cdot p} = \frac{60}{\frac{T}{2} \cdot 2 \cdot p} = \frac{60}{T \cdot p} = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (3.9)$$

3.- Los valores de pico para el disco de imanes cuadrados están en torno a 0,15 Teslas y para el disco de imanes cúbicos en torno a 0,12 Teslas, valores que más adelante se analizarán con FEMM. La razón por la cual el valor de pico de la gráfica del disco de imanes cuadrados sea mayor al de imanes cúbicos puede deberse a que la superficie de la cara que se enfrenta al eje del electroimán de los primeros sea mayor que la de los segundos. El disco de imanes esféricos no se tiene en cuenta para datos numéricos y, por lo tanto no se analizará en FEMM, dado que la geometría de los imanes no es la apropiada para su correcta colocación en el disco.



4.- Otro ensayo muy interesante que podría haberse llevado a cabo sería la visualización de la onda de corriente en el osciloscopio mediante un shunt. En ella se intuye que podría haberse visto un pequeño incremento del módulo de la corriente en el paso del imán por el eje de la bobina, debido a que intentaría aumentar su campo magnético conforme cada imán del disco se acercase, que aumentaría la fuerza de atracción. Este ensayo no se llevó a cabo por falta de recursos y por seguridad, ya que habría que aislar todas las referencias conectadas a red que intervienen en el ensayo para que no hubiese ningún cortocircuito. Para la simulación en FEMM este efecto se despreció, ya que el incremento de corriente sería mínimo e irrelevante.

### **3.3. ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD DE SINCRONISMO DEL ROTOR**

Para medir la velocidad de giro del disco de imanes permanentes se usó un tacómetro láser facilitado por el departamento de ingeniería eléctrica. Dicho instrumento funciona emitiendo un estrecho haz de luz contra el elemento de rotación. El elemento de rotación ha de tener un lugar de reflexión y el tacómetro mide el tiempo que tarda en reflejarse dos veces consecutivas el haz de luz.

Aquí el problema residía en que la luz se reflejaba en todos los imanes que componían el disco, así que se pegó una pequeña pestaña de papel reflectante en uno de los imanes, de manera que su superficie se levantara unos centímetros del disco y así el tacómetro solamente leyese el tiempo que tardaba en dar una vuelta dicha pestaña.

También se podía haber medido la velocidad directamente sobre los imanes del disco y haberla dividido entre el número de imanes que componen el disco, pero se prefirió el anterior método para que se mostrase la lectura “real” directamente sobre el tacómetro.

Por otra parte, se midió hasta qué distancia del eje del rotor se seguía manteniendo la sincronización para cada tipo de disco utilizado. Las mediciones que a continuación se muestran tienen su origen en la distancia a la cual toca cada tipo de disco con el eje de la bobina. Cabe resaltar que el impulso inicial para comenzar la sincronización se dio a 2,5 mm del eje de la bobina, en todos los casos.

Los resultados que se obtuvieron fueron los siguientes:

#### 1.- Disco p=2 de imanes cuadrados

- La velocidad de sincronismo oscilaba entre 499,5 rpm y 500,5 rpm.
- Se mantuvo esa misma velocidad alejando el disco hasta 15 mm, momento en el que se fue frenando hasta detenerse.



## 2.- Disco p=2 de imanes cúbicos

- La velocidad de sincronismo oscilaba entre 499,6 rpm y 499,8 rpm.
- Se mantuvo alejando el disco hasta 17,5 mm, momento en el que se fue frenando hasta detenerse.

(\*) También logró sincronizarse en dos ocasiones a 300 rpm, pero el sincronismo no era muy estable y en cuanto se alejaba un poco el rotor, el disco se frenaba.

## 3.- Disco p=3 de imanes cuadrados

- La velocidad de sincronismo oscilaba entre 333 rpm y 334 rpm.
- Se mantuvo alejando el disco hasta 19 mm, momento en el que se fue frenando hasta detenerse.

## 4.- Disco p=3 de imanes cúbicos

- La velocidad de sincronismo oscilaba entre 332,9 rpm y 333,4 rpm.
- Se mantuvo alejando el disco hasta 20,5 mm, momento en el que se fue frenando hasta detenerse.

## 5.- Disco p=4 de imanes cuadrados

- La velocidad de sincronismo oscilaba entre 249,5 rpm y 250,5 rpm.
- Se mantuvo alejando el disco hasta 10 mm, momento en el que se fue frenando hasta detenerse.

Como puede observarse, en todos los casos la velocidad de sincronismo se corresponde con la expresión anteriormente calculada en (3.9). Por ejemplo, para el caso del disco de imanes cuadrados, con:

$$p = 2$$
$$f = 16,6 \text{ Hz}$$

$n = \left( \frac{60 \times f}{p} \right) = \left( \frac{60 \times 16,6}{2} \right) = 500 \text{ rpm}$ , valor que se corresponde con el obtenido mediante el tacómetro, que oscilaba entre 499,6 rpm y 499,8 rpm.

(\*) La explicación para el caso en que se consiguió que la velocidad de sincronismo fuese de 300 rpm, es que la sincronización se conseguía cuando entre el paso de un imán y el siguiente, por el eje del rotor, pasaban 5 semiciclos de la onda de tensión de la red en vez de 3, como habitualmente se conseguía. Por lo tanto la ecuación quedaría:

$$n = \left( \frac{60 \times f}{p} \right) \times \frac{1}{5} = 300 \text{ rpm}.$$





Pero éste solo fue un caso aislado que era muy difícil de conseguir.

Por otro lado, el caso de que al alejar el rotor éste siguiese girando hasta una determinada distancia, resulta de que el módulo del campo magnético debido a la bobina en los imanes es menor a medida que aumenta la distancia entre ellos y por lo tanto el par motor disminuye. Es por ello que, al llegar a una determinada posición, el par motor no es suficiente para contrarrestar las fuerzas que se oponen al movimiento. De hecho, se percibe una mayor vibración en el movimiento del disco que es mayor cuanto más cerca de la bobina está, debido a que el par motor es mayor. Por eso, al dar el impulso inicial se coloca el rotor cerca del electroimán para que el par motor sea más elevado.



## Capítulo 4

# ANÁLISIS TEÓRICO MEDIANTE EL MEF



#### 4. ANÁLISIS TEÓRICO MEDIANTE EL MEF

El método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física. Éste método está pensado para ser usado en ordenadores y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas.

El método consiste en dividir la región del espacio a analizar en elementos más pequeños, no necesariamente iguales, proceso que se denomina “mallado”. En nuestro caso se tomarán elementos triangulares en 2D. Una vez dividido el espacio tenemos un conjunto de elementos y de nodos. Habitualmente el problema consiste en obtener cuánto vale la función buscada en los nodos elegidos, de forma que se verifiquen las condiciones de contorno propuestas. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no. Dicho método es aproximado y por eso se corrobora, en nuestro caso, mediante un análisis experimental.

Para aplicar éste método, se utilizó el software FEMM 4.2; es un programa de libre distribución desarrollado por David Meeker, que permite resolver problemas magnéticos de baja frecuencia (por debajo de 1 MHz) en 2D axisimétricos y planos. Puede obtenerse en la página web <http://www.femm.info>. El proceso para hallar la solución está dividido en 3 partes:

- **Preproceso:** consiste en la definición de la geometría, generación de la malla, las condiciones de contorno y asignación de propiedades a los materiales representados.
- **Cálculo:** el resultado del preproceso, en un problema simple no-dependiente del tiempo, permite generar un conjunto de  $n$  ecuaciones y  $n$  incógnitas, que puede ser resuelto con cualquier algoritmo para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales. . Cuando el problema a tratar es un problema no-lineal o un problema dependiente del tiempo a veces el cálculo consiste en una sucesión finita de sistemas de  $n$  ecuaciones y  $n$  incógnitas que deben resolverse uno a continuación de otro, y cuya entrada depende del resultado del paso anterior.
- **Postproceso:** el cálculo proporciona valores de cierto conjunto de funciones en los nodos de la malla de manera que los resultados obtenidos de la resolución del sistema son tratados, para obtener representaciones gráficas y magnitudes derivadas, que permitan extraer conclusiones del problema.



#### 4.1. ANÁLISIS DEL CAMPO MAGNÉTICO CREADO POR LA BOBINA

En primer lugar, se realizó la representación en FEMM de la bobina mediante un modelo axisimétrico de 2 dimensiones a partir del eje de simetría, cuyas medidas pueden consultarse en el plano correspondiente del capítulo Anexos. A continuación se definió cada material en la representación gráfica, de manera que cada uno tenía unas propiedades características ya predefinidas en las librerías incluidas en FEMM. Los materiales representados fueron aire, cobre 32AWG (que es una notación para especificar el diámetro del hilo conductor), aislante (para definir el barniz aislante que recubre al hilo conductor) y acero (material del núcleo ferromagnético). Este último se definió con cierta conductividad, para que el programa simulase también las corrientes parásitas de Foucault en el núcleo.

El tamaño de la malla se definió más pequeño según nos acercamos al eje de simetría, ya que es la zona que vamos a analizar y en la que necesitamos mayor precisión en el resultado.

La frecuencia de trabajo se definió en 50 Hz, y la corriente en 0,01656 A, valor eficaz determinado experimentalmente en el capítulo anterior.

Por otra parte, el devanado de cobre se representó en 10 superficies, con el correspondiente aislante entre cada una, para que este modelo se acercase más al real. Debido a esto, el número de vueltas del devanado en cada superficie se dividió entre 10, pasando de 21000 vueltas a 2100, para que la corriente total no se viese modificada. Para verificarlo se calculó, en primer lugar, la densidad de corriente teórica de la bobina.

La corriente total por cada una de las 10 superficies es:

$$I_t = N \cdot I = 0,01656 \cdot 2100 = 34,776 \text{ A.} \quad (4.1)$$

Siendo:

$I$ : corriente eficaz que circula por la bobina.

$N$ : número de vueltas del devanado.

Por lo tanto, la densidad de corriente por cada superficie  $|J|$  es:

$$|J| = \frac{I_t}{S} = \frac{34,776}{1,4196 \cdot 10^{-5}} = 2,4497 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2 \quad (4.2)$$

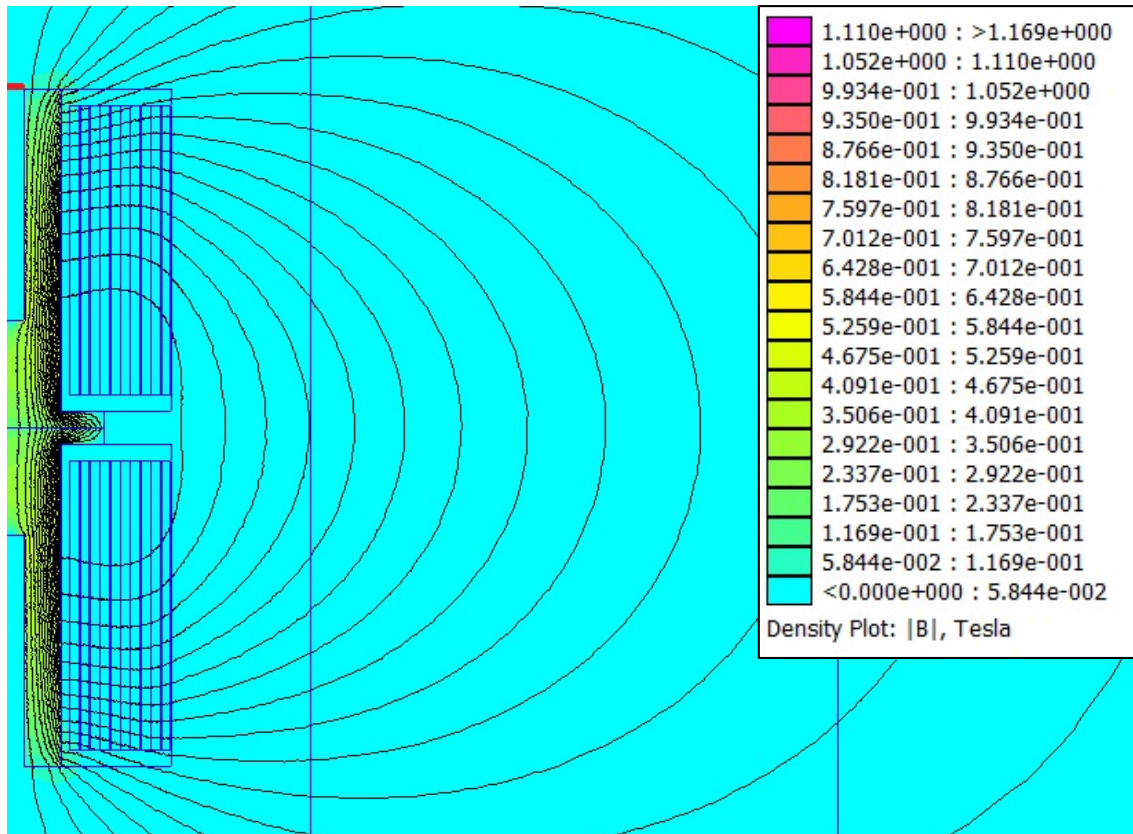
Por lo tanto, la densidad de corriente por la superficie total será:

$$|J_t| = |J| \cdot 10 = 2,4497 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2 \quad (4.3)$$



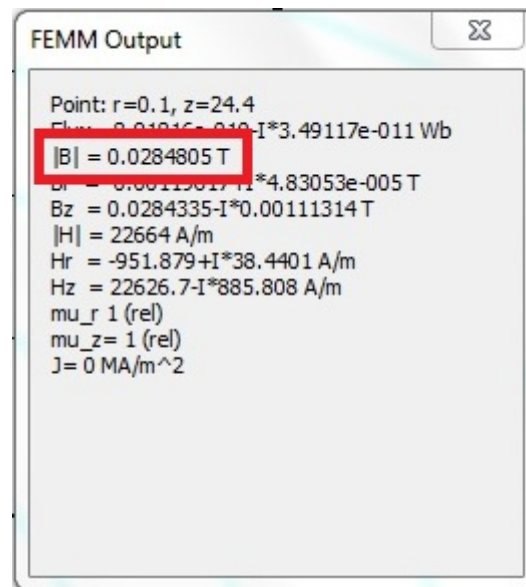
Resultado que se comparó con el que mostraba el postprocesador de FEMM, coincidiendo exactamente.

La siguiente figura muestra la distribución de flujo magnético en las inmediaciones de la bobina.



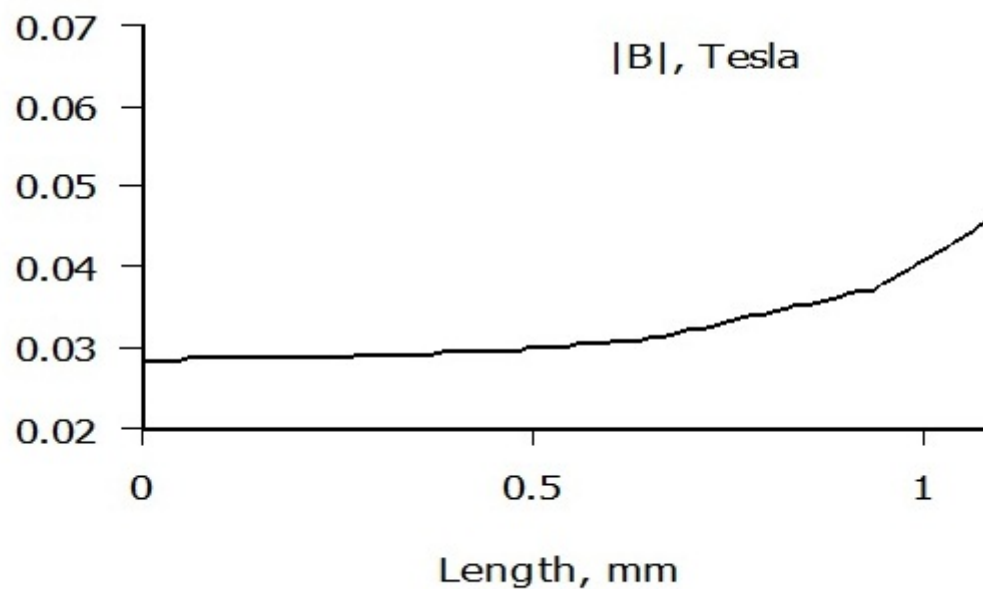
**Figura 30.- Campo magnético alrededor de la bobina**

A su vez, se comprobó el valor del módulo de la inducción magnética en la zona donde se colocó la sonda de efecto Hall. Haciendo “click” en la zona más próxima al eje de simetría en la línea señalada en rojo, el postprocesador de FEMM nos da el valor de dicha magnitud.



**Figura 31.- Módulo del campo magnético en la zona del eje de simetría de la bobina**

Por otra parte, también podemos obtener el valor de la inducción magnética a lo largo de la línea representada en rojo.



**Figura 32.- Gráfica del campo magnético donde se colocó la sonda de efecto Hall**

Según nos alejamos del eje de simetría, las líneas de campo magnético son menos perpendiculares a la sonda de efecto Hall, por lo que el error aumenta.



Como se puede observar, el valor próximo al eje de simetría coincide con el valor obtenido experimentalmente, 0,0283 Teslas, valor eficaz.

#### **4.2. ANÁLISIS DEL CAMPO MAGNÉTICO CON EL DISCO DE IMANES CUADRADOS**

También se realizó la simulación del paso del imán de tipo cuadrado por las inmediaciones del eje de simetría de la bobina. Sólo es posible representar este instante de paso del imán en el modelo axisimétrico, ya que si este se representase en otro lugar de giro se perdería la simetría del problema.

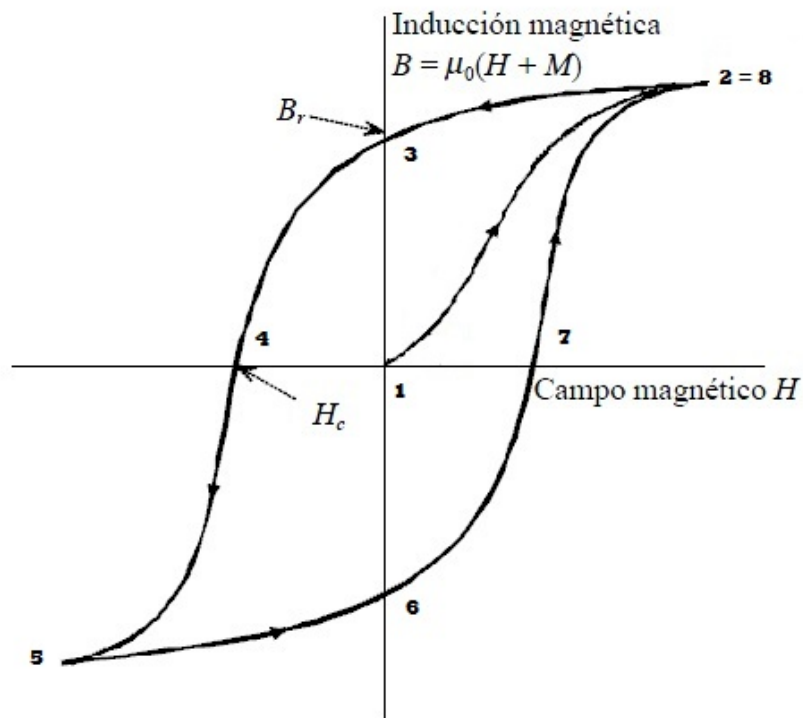
Para comenzar el análisis, se procedió a simular el citado imán permanente en FEMM. Para empezar, se hicieron equivalentes las medidas del imán a un modelo cilíndrico axisimétrico, para poder representarlo en FEMM. Para ello, se calculó el radio del círculo que hiciese que su área fuese igual al área de la cara del imán que se enfrentaba al eje del electroimán. De ésta manera:

$$\text{Área cuadrado} \rightarrow 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} = 100 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área círculo} \rightarrow 100 \text{ mm}^2 = \pi \cdot r^2 \rightarrow r = 5,64 \text{ mm}$$

El siguiente paso era definir el material del imán permanente con sus propiedades magnéticas características. Se introdujeron las características de un imán cerámico a partir de la librería del programa, pero también había que introducir su valor de coercitividad. Para ello, cabe explicar la curva de histéresis de un material, mediante la cual se puede observar cómo se produce su magnetización.

Si realizásemos un ensayo en el que variásemos el valor de H progresivamente y pudiésemos invertir su sentido, la curva  $B = f(H)$  que obtendríamos sería la que puede verse en la figura 33. Esta curva se obtiene mediante la alimentación de la bobina recorrida por corriente con una fuente variable de intensidad, tanto en amplitud como en polaridad. Los puntos más importantes del ciclo son los siguientes:



**Figura 33.- Ciclo de histéresis**

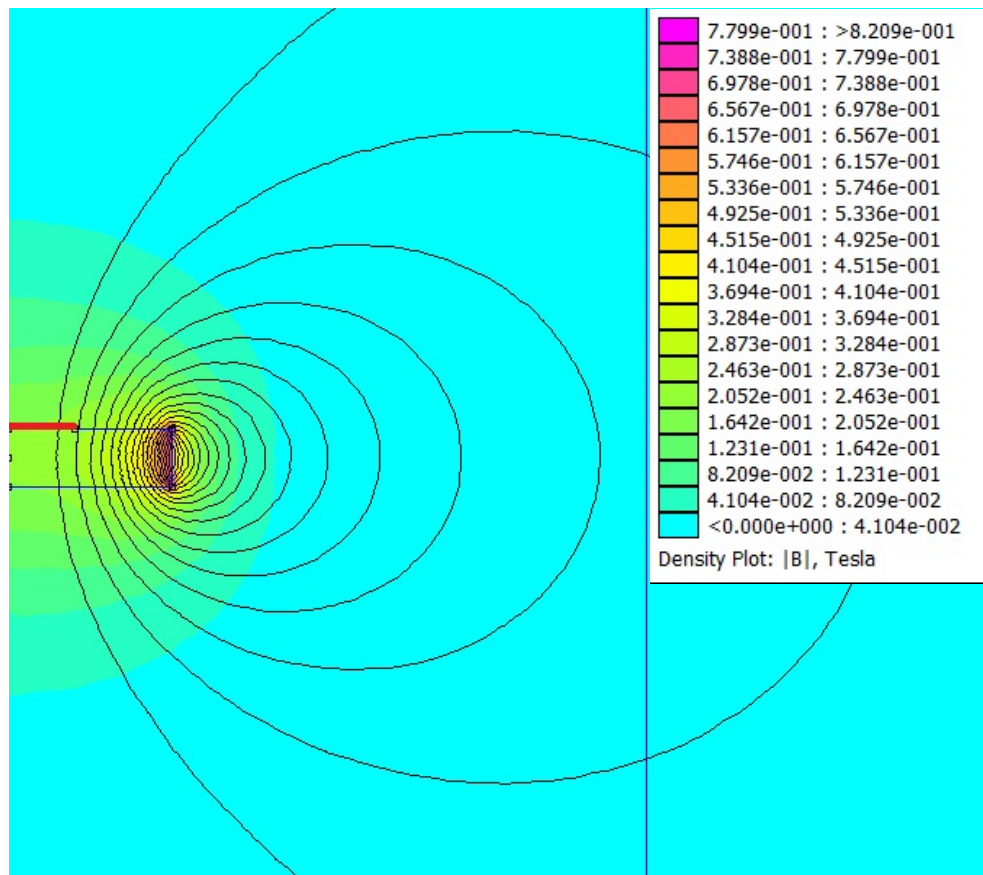
- Punto 1: Se parte de un material ferromagnético nunca antes imanado.
- Punto 2: A partir del punto anterior se incrementa el valor de H, produciéndose un incremento de B hasta que se alcanza la saturación en el punto 2.
- Punto 3: Se disminuye desde 2 el valor de H hasta hacerse cero, pero ahora los valores de B son superiores a los obtenidos en la subida. En el punto 3 el material presenta una imanación residual denominada magnetismo remanente.
- Punto 4: Se hace negativo H hasta conseguir que B sea cero, esta es la fuerza coercitiva. Es la intensidad del campo magnético que se debe aplicar a ese material para reducir su magnetización a cero.
- Punto 5: Se incrementa el valor negativo H hasta alcanzar la saturación.
- Punto 6: Se disminuye H hasta hacerse cero, en este punto el material permanece imanado invirtiendo la polaridad respecto del punto 3.
- Punto 7: Se incrementa H en valor positivo hasta que B se anula.
- Punto 8: Se retorna al punto 2.



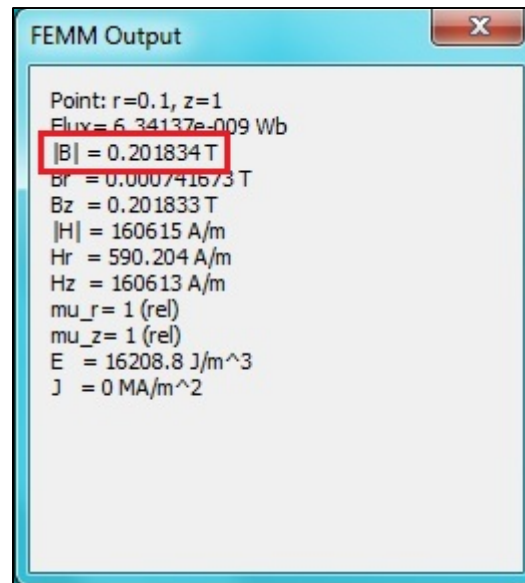


En nuestro caso teníamos que introducir el valor de  $H_c$  en FEMM. Para ello, se recurrió al sensor de efecto Hall en el laboratorio. Se midió que el imán producía una excitación de 4 V en su superficie por lo que, teniendo en cuenta la relación expuesta en el capítulo anterior, el módulo de campo magnético que producía en su superficie era de 0,2 Teslas.

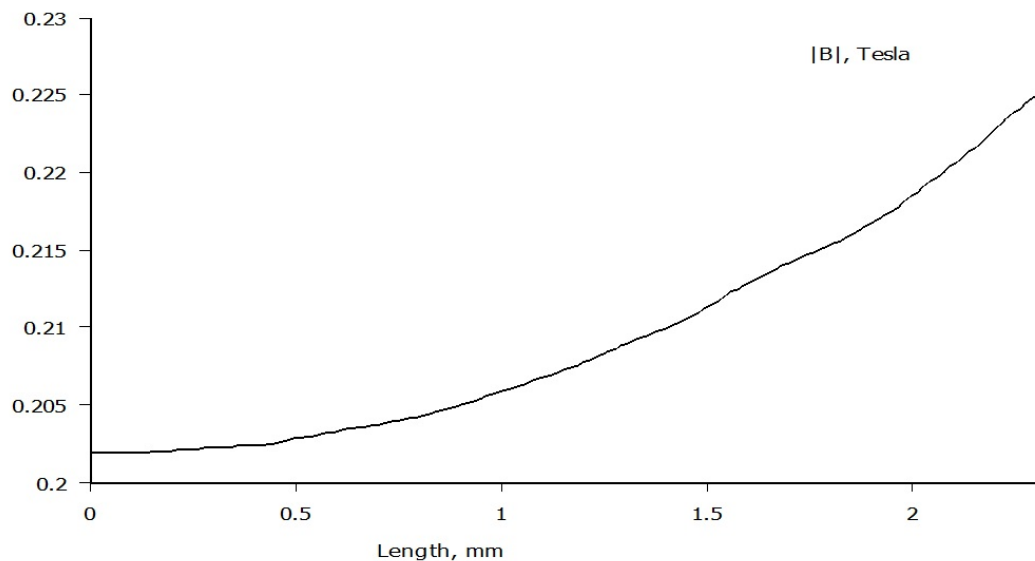
Introduciendo distintos valores de  $H_c$  se obtuvo que, para  $H_c = 900.568 \text{ A/m}$ , se conseguía que el campo magnético en su superficie fuese de 0,2 Teslas, tal y como se muestra en las siguientes imágenes.



**Figura 34.- Campo magnético alrededor del imán cuadrado**



**Figura 35.- Módulo del campo magnético en la zona del eje de simetría del imán cuadrado**

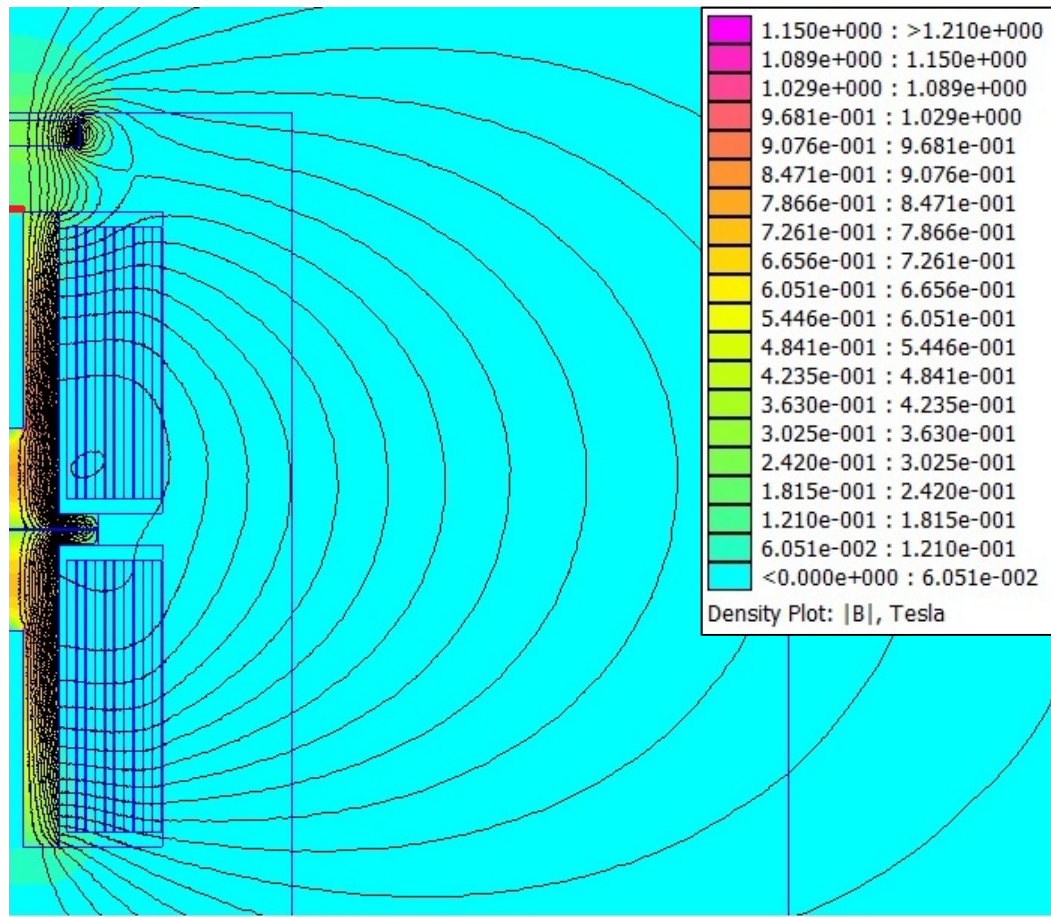


**Figura 36.- Gráfica del campo magnético donde se colocó la sonda de efecto Hall en el imán cuadrado**

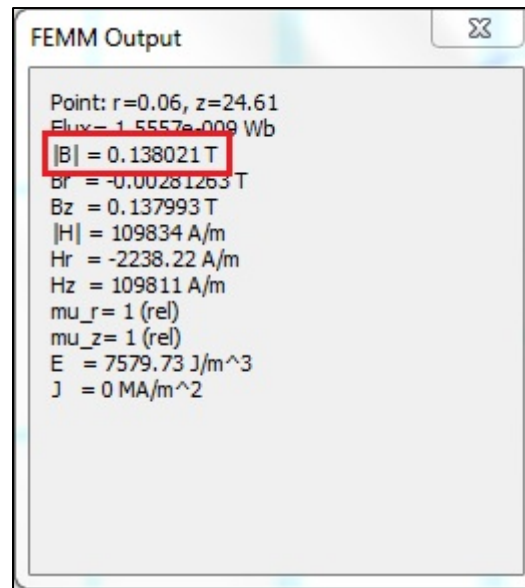
Con el imán permanente correctamente representado, se dispuso a introducirlo en el análisis con el electroimán. Se colocó a 5 mm de la bobina, al igual que en el análisis experimental, y se colocó el polo sur del imán enfrentado al “polo norte” del electroimán. Como es un instante determinado en el dominio del tiempo, la frecuencia de trabajo se definió en 0 Hz y la corriente en 0,02342 A, que es la amplitud de la onda



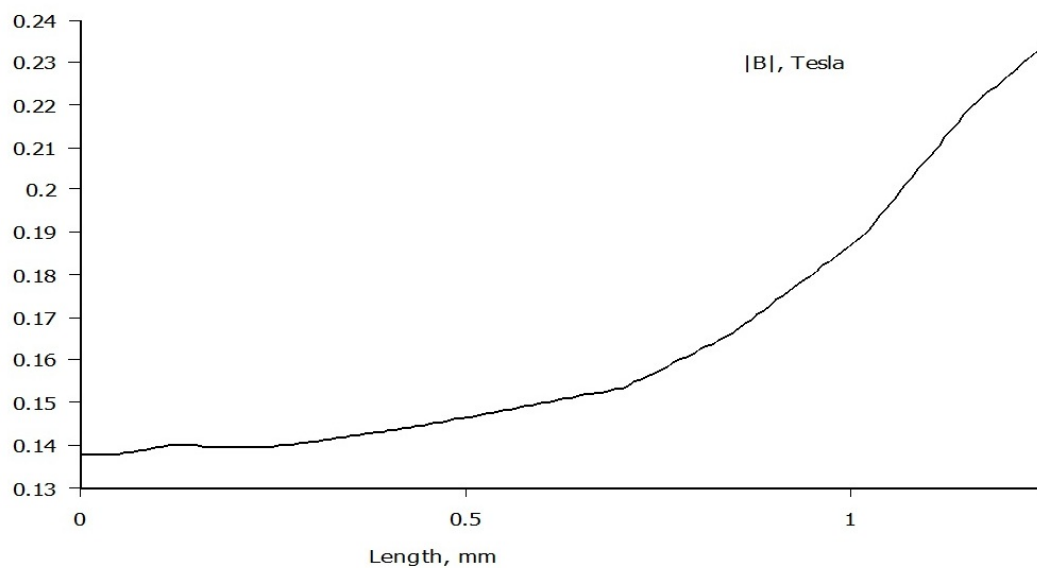
de corriente ( $0,01656 \cdot \sqrt{2}$ ) y el valor que presenta cuando el imán pasa por ese lugar. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:



**Figura 37.- Campo magnético alrededor de la bobina, con el imán cuadrado en las proximidades**



**Figura 38.- Módulo del campo magnético en la zona del eje de simetría, con el imán cuadrado en las proximidades**



**Figura 39.- Gráfica del campo magnético donde se colocó la sonda de efecto Hall, con el imán cuadrado en las proximidades**

Experimentalmente se obtuvieron 0,15 Teslas en las cercanías del eje de simetría, valor ligeramente superior al obtenido en la simulación, pero dentro de un mínimo error permisible.



#### 4.3. ANÁLISIS DEL CAMPO MAGNÉTICO CON EL DISCO DE IMANES CÚBICOS

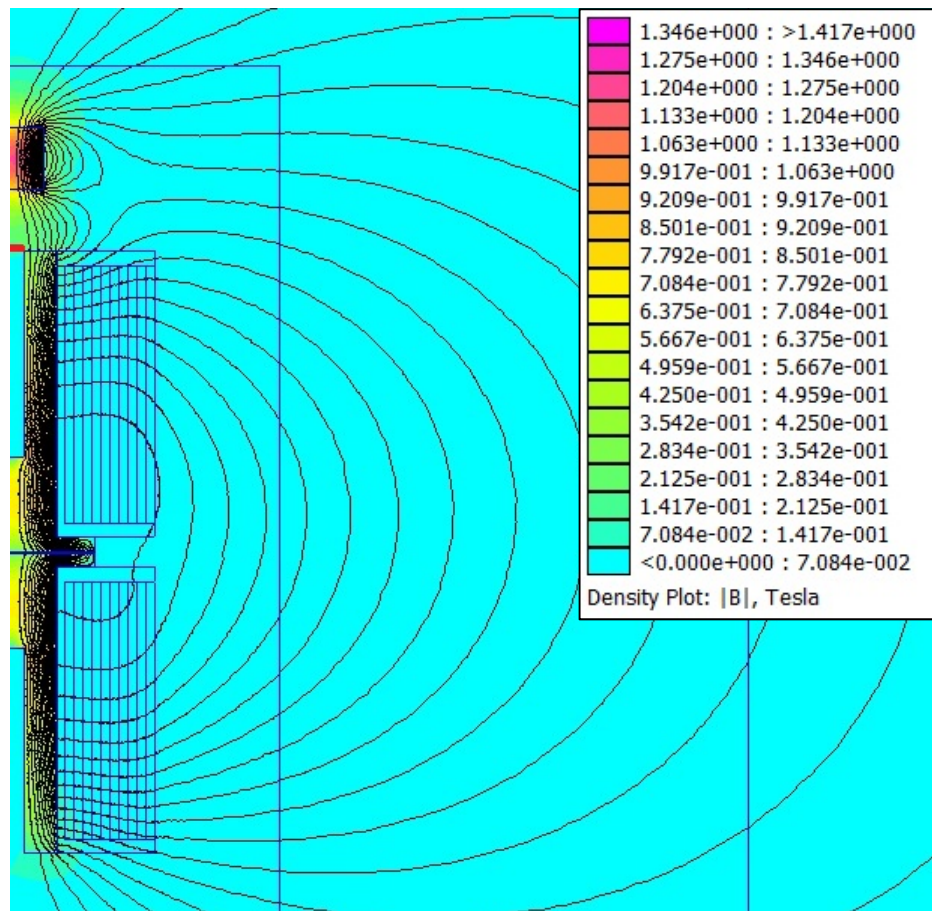
Al igual que en el apartado anterior, primero se realizó la equivalencia de la cara del imán que se enfrentaba al eje del electroimán, para representar un cilindro en FEMM.

$$\text{Área cuadrado} \rightarrow 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} = 25 \text{ mm}^2$$

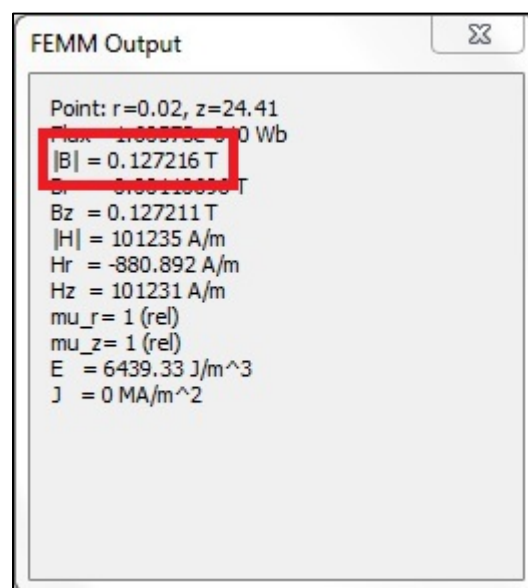
$$\text{Área círculo} \rightarrow 25 \text{ mm}^2 = \pi \cdot r^2 \rightarrow r = 2,82 \text{ mm}$$

En el siguiente paso, se recurrió a la sonda de efecto Hall para medir la magnetización del imán. Pero en este caso, el polímetro registró una excitación de 6 Voltios, que era el valor límite de escala de nuestro dispositivo de medida. Al no poder medir la coercitividad del imán con la sonda de efecto Hall, se recurrió a simular el problema con el electroimán y el paso del imán en FEMM de la misma manera que anteriormente, de forma que dando distintos valores de coercitividad al imán se lograra dar con el resultado del campo magnético obtenido en el análisis experimental. Después, se procedería a simular el imán permanente con el valor de coercitividad obtenido, verificando que su valor excedería la escala de la sonda de efecto Hall. Así, para un valor de  $H_c = 1.300.000 \text{ A/m}$  se obtuvieron los siguientes resultados:

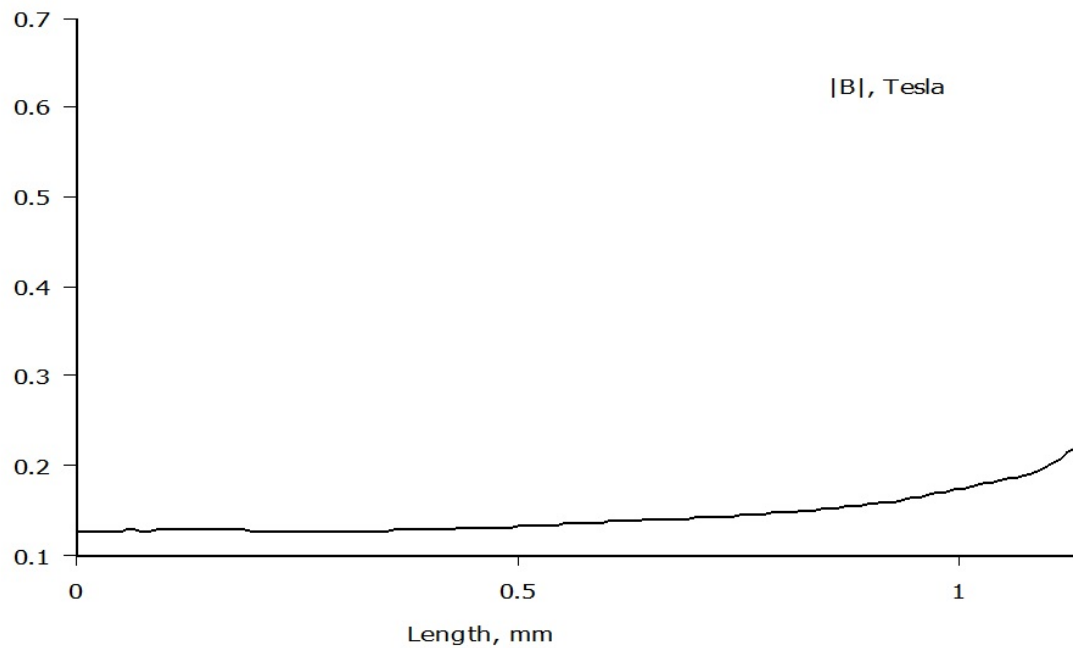




**Figura 40.- Campo magnético alrededor de la bobina, con el imán cúbico en las proximidades**



**Figura 41.- Módulo del campo magnético en la zona del eje de simetría, con el imán cúbico en las proximidades**



**Figura 42.- Gráfica del campo magnético donde se colocó la sonda de efecto Hall, con el imán cúbico en las proximidades**

Como puede observarse se consiguió que el módulo del campo magnético en las cercanías del eje de simetría coincidiese con el obtenido experimentalmente, que eran alrededor de 0,12 Teslas. Posteriormente, se realizó el análisis del imán permanente con el valor obtenido de coercitividad.

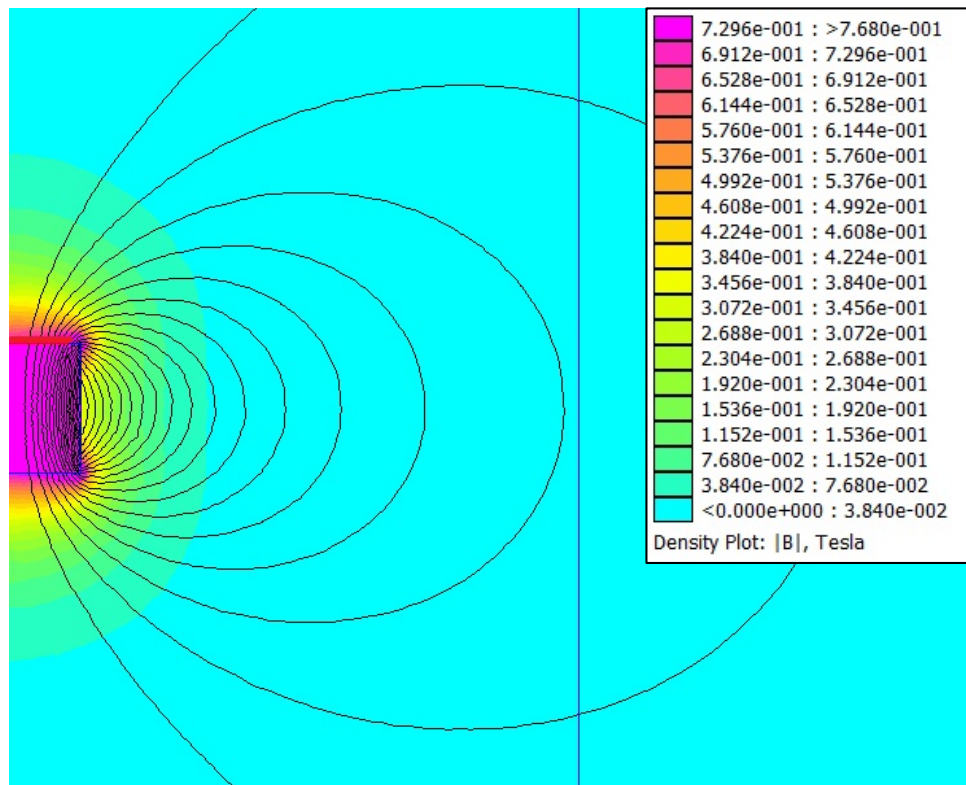


Figura 43.- Campo magnético alrededor del imán cúbico

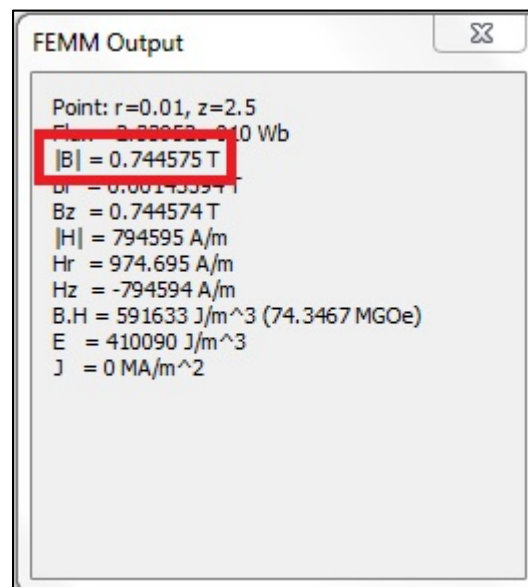
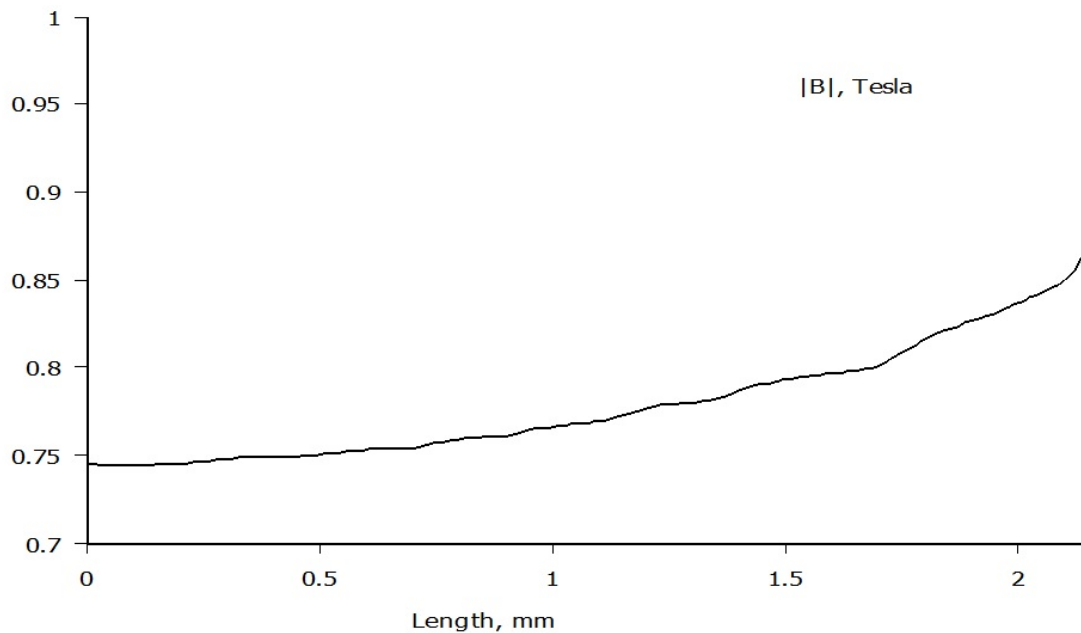


Figura 44.- Módulo del campo magnético en la zona del eje de simetría del imán cúbico





**Figura 45.- Gráfica del campo magnético donde se colocó la sonda de efecto Hall en el imán cúbico**

Según estos resultados se produce un campo magnético en las inmediaciones del imán de módulo 0,745 Teslas ó, lo que es lo mismo, usando la sonda de efecto Hall nos debería salir un valor de 14,9 Voltios, que es muy superior al fondo de escala de la sonda, 6 Voltios.

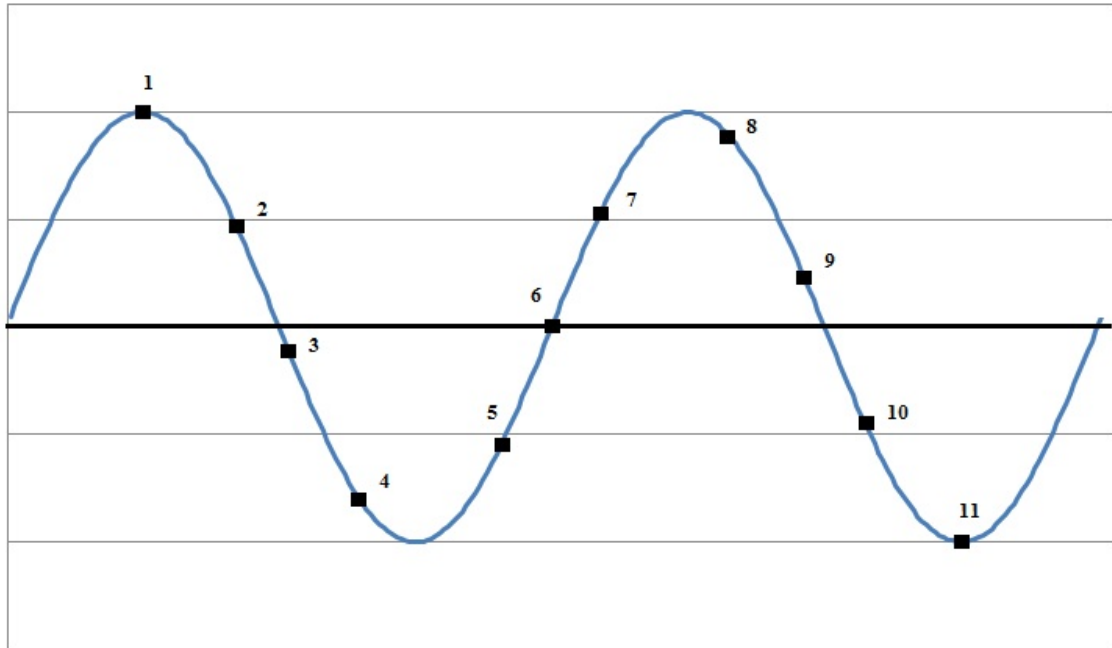
#### 4.4. SECUENCIA DE FUNCIONAMIENTO

También se representó mediante FEMM la variación del campo magnético en función del movimiento del disco y de la variación de la corriente que circulaba por el electroimán. Para ello se realizó un modelo planar del sistema, que en ningún caso representa valores significativos en cuanto a magnitudes debido a que la representación es en 2D, pero sí expone de forma adecuada el comportamiento de la variación del campo magnético.

En primer lugar se trasladó el modelo axisimétrico de la bobina a un modelo planar, de profundidad igual al diámetro de esta. Se colocó un eje de rotación del disco de manera que estuviese a la misma distancia del estátor que en el modelo experimental y se modeló el disco de  $p=2$  de imanes cuadrados. La frecuencia de trabajo se definió en 0 Hz al tratarse de instantes de tiempo determinados y se fue rotando el disco para tomar varias instantáneas entre que pasaba un imán y el siguiente por las proximidades del electroimán. El valor instantáneo de la corriente se fue modificando, teniendo en cuenta



que en el análisis experimental la sincronización no se producía en semiciclos consecutivos de la onda de corriente.

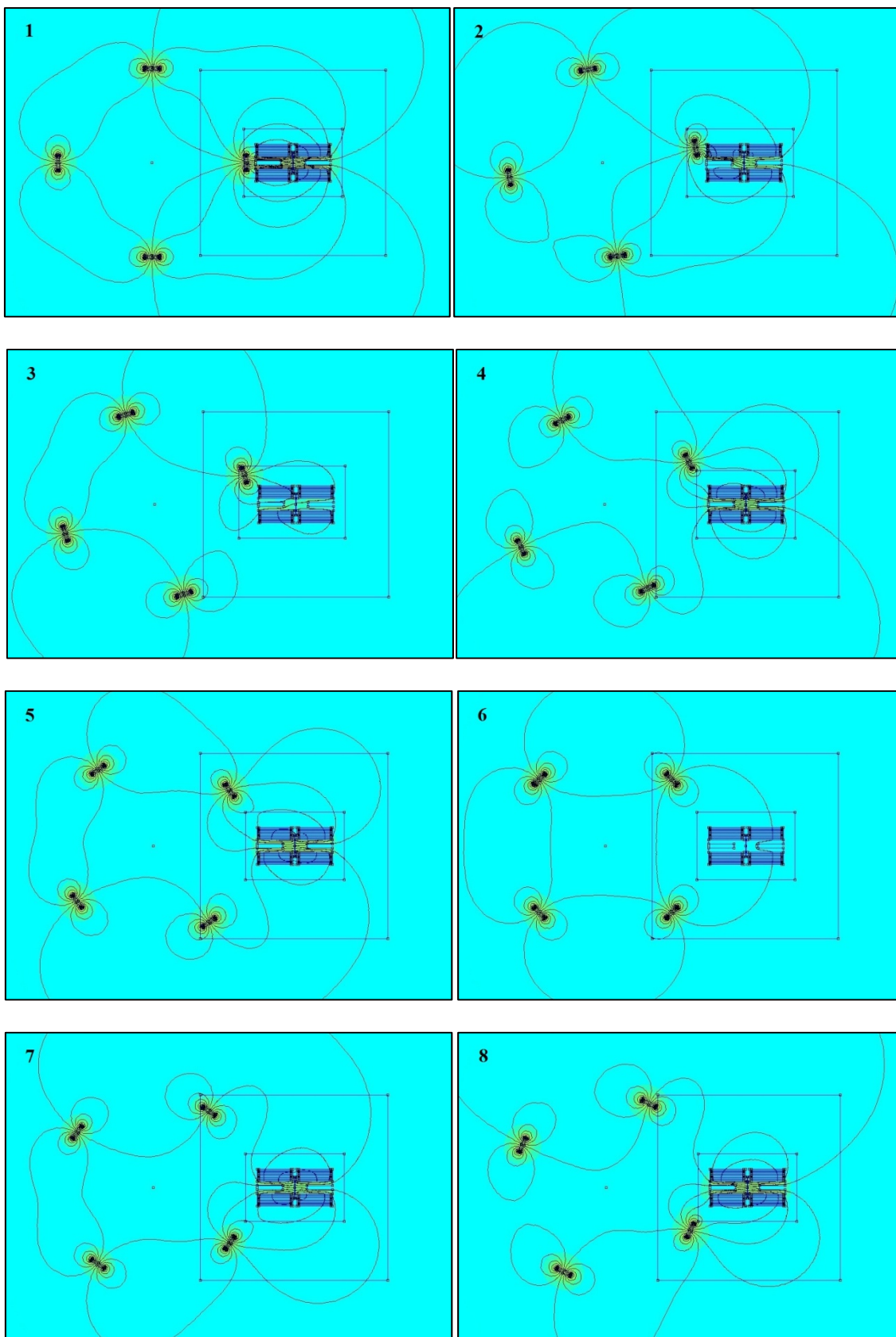


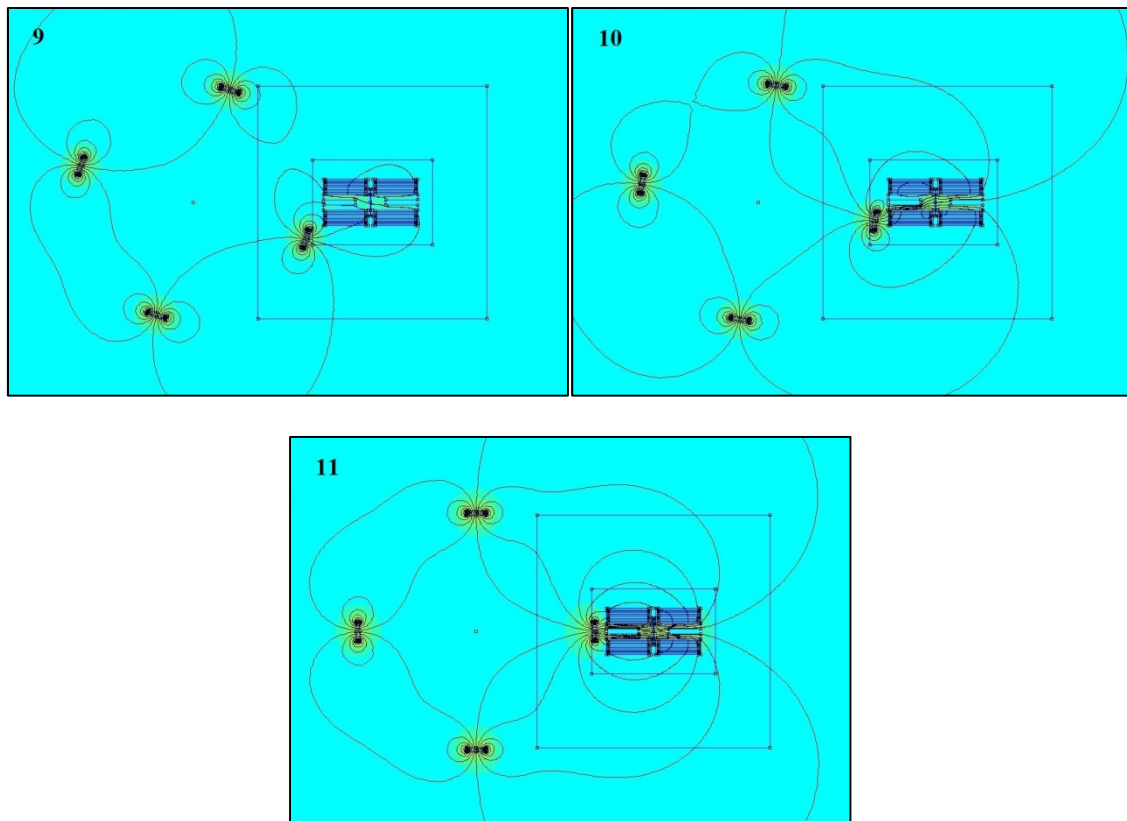
**Figura 46.- Puntos de la onda de corriente representados para la secuencia 1**

Se fueron tomando valores cada  $54^\circ$ :

- Punto 1  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 90^\circ = 0,02342 \text{ A}$
- Punto 2  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 144^\circ = 0,01377 \text{ A}$
- Punto 3  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 198^\circ = -0,00724 \text{ A}$
- Punto 4  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 252^\circ = -0,02227 \text{ A}$
- Punto 5  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 306^\circ = -0,01895 \text{ A}$
- Punto 6  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 360^\circ = 0$
- Punto 7  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 54^\circ = 0,01895 \text{ A}$
- Punto 8  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 108^\circ = 0,02227 \text{ A}$
- Punto 9  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 162^\circ = 0,00724 \text{ A}$
- Punto 10  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 216^\circ = -0,01377 \text{ A}$
- Punto 11  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 270^\circ = -0,02342 \text{ A}$

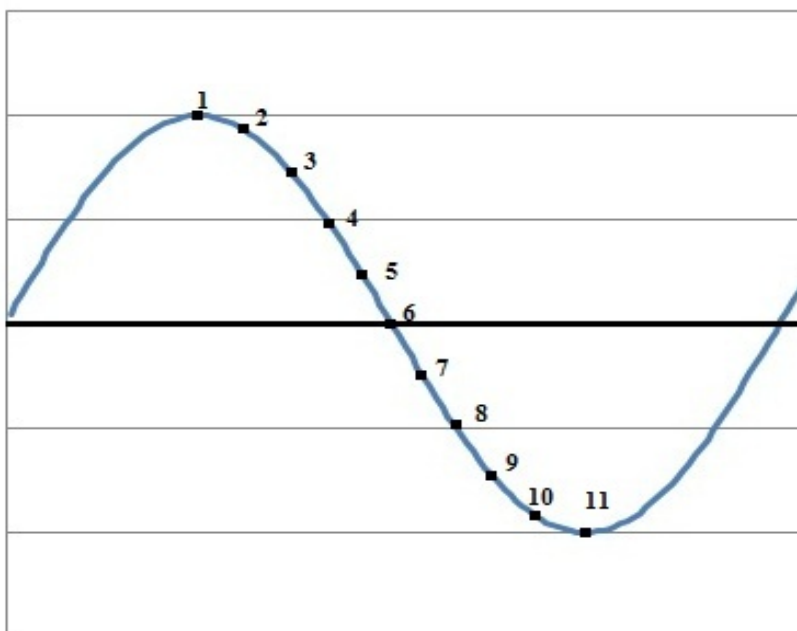
Finalmente, la secuencia de funcionamiento es:





***Figura 47.- Secuencia de funcionamiento 1***

Por otra parte, se realizó también la representación de cómo variaría el campo magnético si se consiguiese proporcionar una velocidad inicial al rotor tal que se pudiese sincronizar su movimiento con semiciclos consecutivos de la onda de corriente.

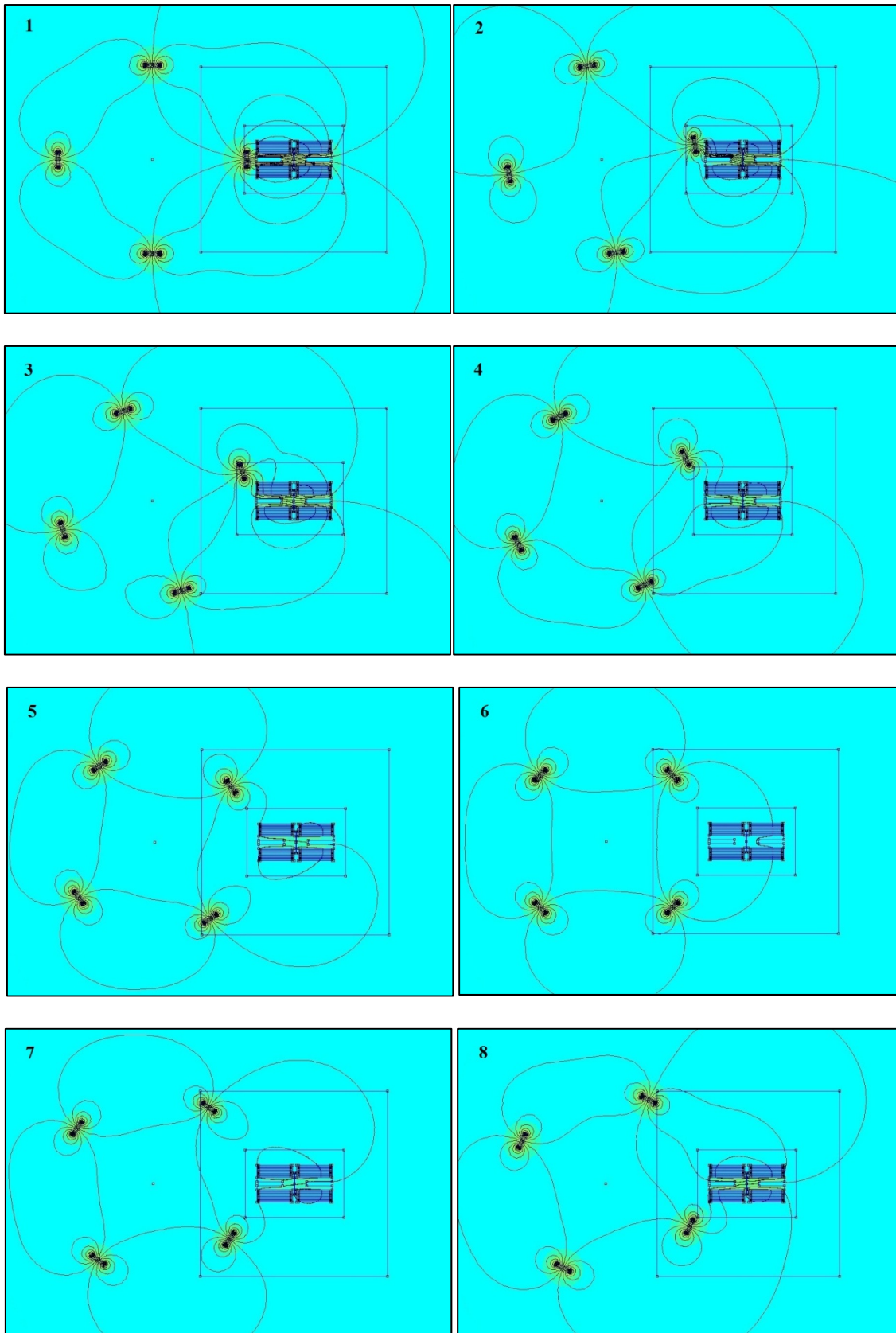


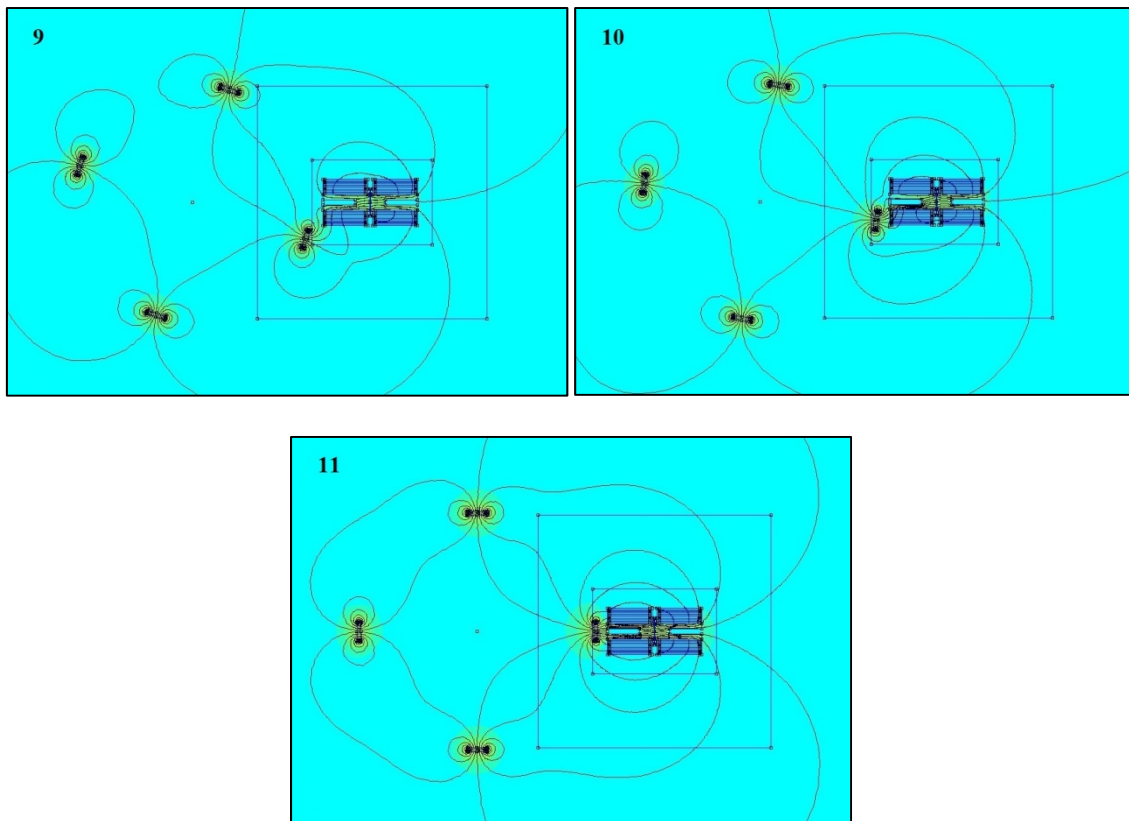
**Figura 48.- Puntos de la onda de corriente representados para la secuencia 2**

Se fueron tomando valores cada 18°:

- Punto 1  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 90^\circ = 0,02342 \text{ A}$
- Punto 2  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 108^\circ = 0,02227 \text{ A}$
- Punto 3  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 126^\circ = 0,01895 \text{ A}$
- Punto 4  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 144^\circ = 0,01377 \text{ A}$
- Punto 5  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 162^\circ = 0,00724 \text{ A}$
- Punto 6  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 180^\circ = 0$
- Punto 7  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 198^\circ = -0,00724 \text{ A}$
- Punto 8  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 216^\circ = -0,01377 \text{ A}$
- Punto 9  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 234^\circ = -0,01895 \text{ A}$
- Punto 10  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 252^\circ = -0,02227 \text{ A}$
- Punto 11  $\rightarrow I = \sqrt{2} \cdot 0,01656 \cdot \text{sen } 270^\circ = -0,02342 \text{ A}$

Finalmente, la secuencia de funcionamiento es:





*Figura 49.- Secuencia de funcionamiento 2*





## Conclusiones

Este proyecto se puede dividir en tres partes bien diferenciadas. Una primera que consistiría en la construcción del dispositivo a partir de la idea de funcionamiento. La segunda, el análisis experimental de sus características mediante instrumentos de laboratorio. Y por último, el análisis teórico del campo magnético rotativo mediante el MEF, a través de la aplicación informática FEMM 4.2.

En la primera parte del proyecto se construyó el dispositivo después de estudiar los materiales que se utilizarían, su disposición y la implementación de un sistema que nos permitiese acercar y alejar el rotor del estator. Una vez terminado el dispositivo se comprobó que funcionaba convenientemente, tal y como se preveía en la idea inicial.

En la segunda se sientan las bases de su funcionamiento mediante análisis experimentales y se verifican las ideas que en un principio se pensaba que podían obtenerse, mediante el uso de diferentes tipos de discos de imanes permanentes.

En la tercera y última parte se simula el dispositivo y su funcionamiento, por una parte para corroborar los resultados experimentales y, por otra, para visualizar qué es lo que realmente ocurre con el campo magnético con el dispositivo en funcionamiento. Ambos objetivos se consiguieron satisfactoriamente, aunque los valores obtenidos mediante FEMM no sean totalmente exactos, debido a que el método de elementos finitos es en sí mismo un método aproximado (aunque muy preciso) y la representación del dispositivo se realiza en 2D, mediante las consiguientes aproximaciones que ello conlleva.

Respecto al futuro del presente proyecto de investigación, expongo a continuación una serie de temas que pueden progresar en la misma línea de trabajo.

- *Análisis teórico mediante un software de elementos finitos que permita la simulación en 3D.*
- *Incorporar un variador de frecuencia para modificar la velocidad de sincronismo del rotor.*
- *Incorporación conveniente de nuevos electroimanes alrededor del rotor que refuercen el campo magnético y su posterior análisis.*
- *Análisis de la onda de corriente por el electroimán.*
- *Análisis de consumo y pérdidas de potencia.*





Personalmente, estoy contento con el conocimiento adquirido y el trabajo realizado ya que el desarrollar un proyecto desde cero, momento que mayor esfuerzo supuso para mí para comenzar a dar forma al trabajo, me ha capacitado para afrontar futuras labores de similares características o que requieran herramientas parecidas a las utilizadas durante este tiempo. Por otra parte, espero que el trabajo realizado pueda ser útil para facilitar el aprendizaje sobre estos temas.



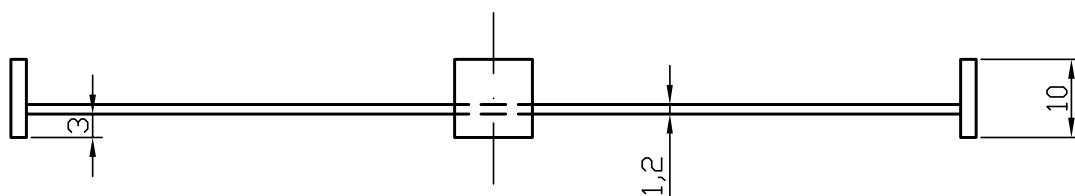
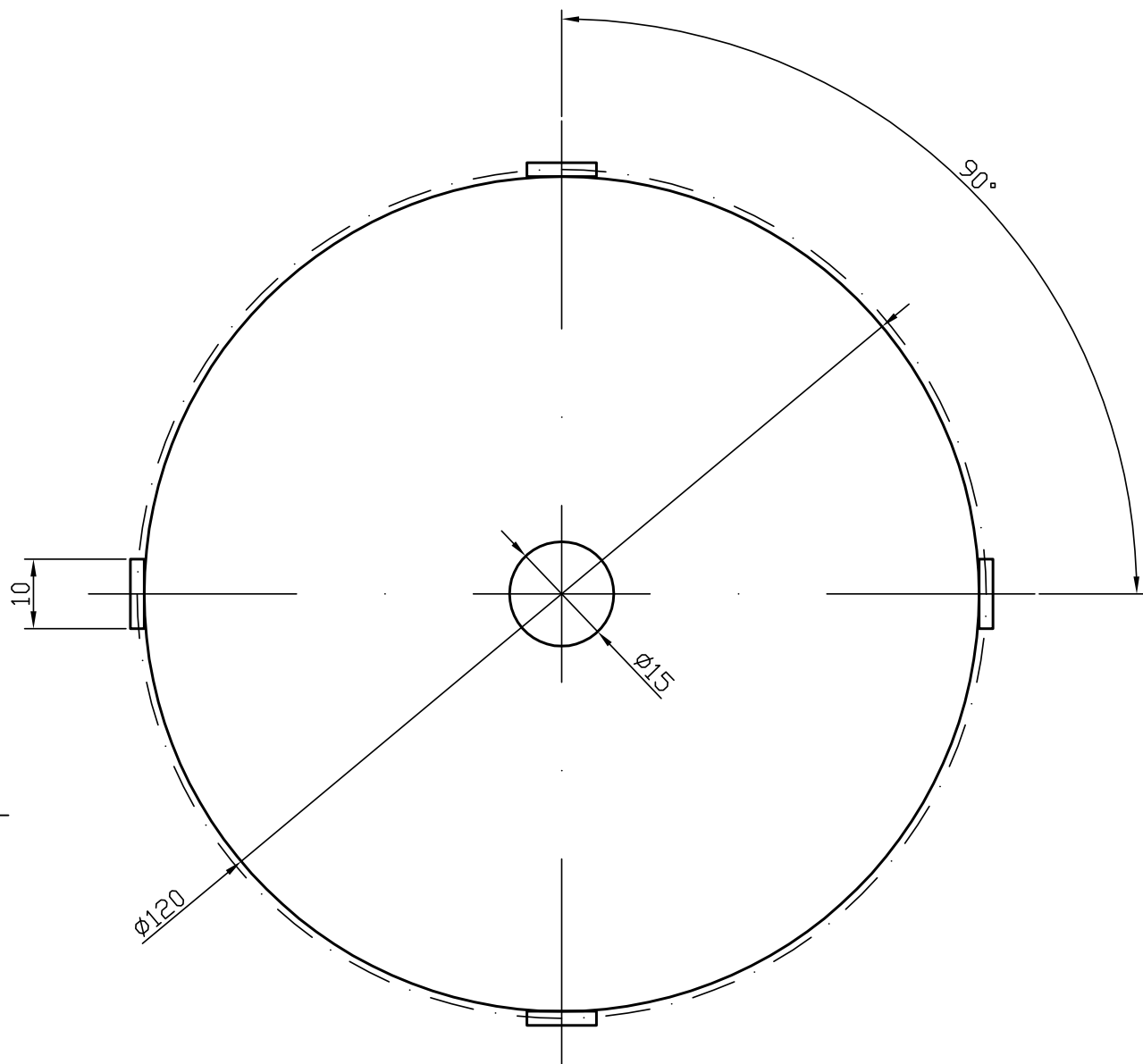
## Bibliografía


- Antonio Usón, Miguel Samplón, Jesús Letosa y Joaquín Mur. *Apuntes de Electricidad y electrometría, ingeniería técnica industrial, especialidad electrónica industrial*. Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Zaragoza.
- P. Abad, V. Alcalá, E. Sainz, J.F. Sanz, M.J. Velilla y J.L. Villa. “*Máquinas eléctricas. Máquinas de corriente continua, transformadores y máquinas de corriente alterna*”. Copy Center, Zaragoza, 2008.
- Jesús Letosa Fleta. “*El método de elementos finitos para la resolución de problemas electromagnéticos*”. Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Zaragoza, 2011.
- David Meeker. “*Finite Element Method Magnetics, User’s Manual*”. [ [www.femm.info/](http://www.femm.info/) ], 2010.
- David Meeker. “*Magnetostatic tutorial*”. [ [www.femm.info/](http://www.femm.info/) ], 2006.
- A. Carnicero. “*Introducción al método de los elementos finitos*”. [ [http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/industrial/sistemasinteligentes/FFlexible/Introduccion\\_al\\_MEF.pdf](http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/industrial/sistemasinteligentes/FFlexible/Introduccion_al_MEF.pdf) ].
- “*Materiales magnéticos*”. [ [http://www.tecnun.es/asignaturas/PFM\\_Mat/Prog/Matmagv2.pdf](http://www.tecnun.es/asignaturas/PFM_Mat/Prog/Matmagv2.pdf) ].
- “*El efecto Hall*”. [ <http://personales.upv.es/jquiles/prffi/magnetismo/ayuda/hlphall.htm> ].
- “*La coercitividad*”. [ <http://es.wikipedia.org/wiki/Coercividad> ].
- Programa de análisis de campos magnéticos mediante elementos finitos FEMM 4.2.

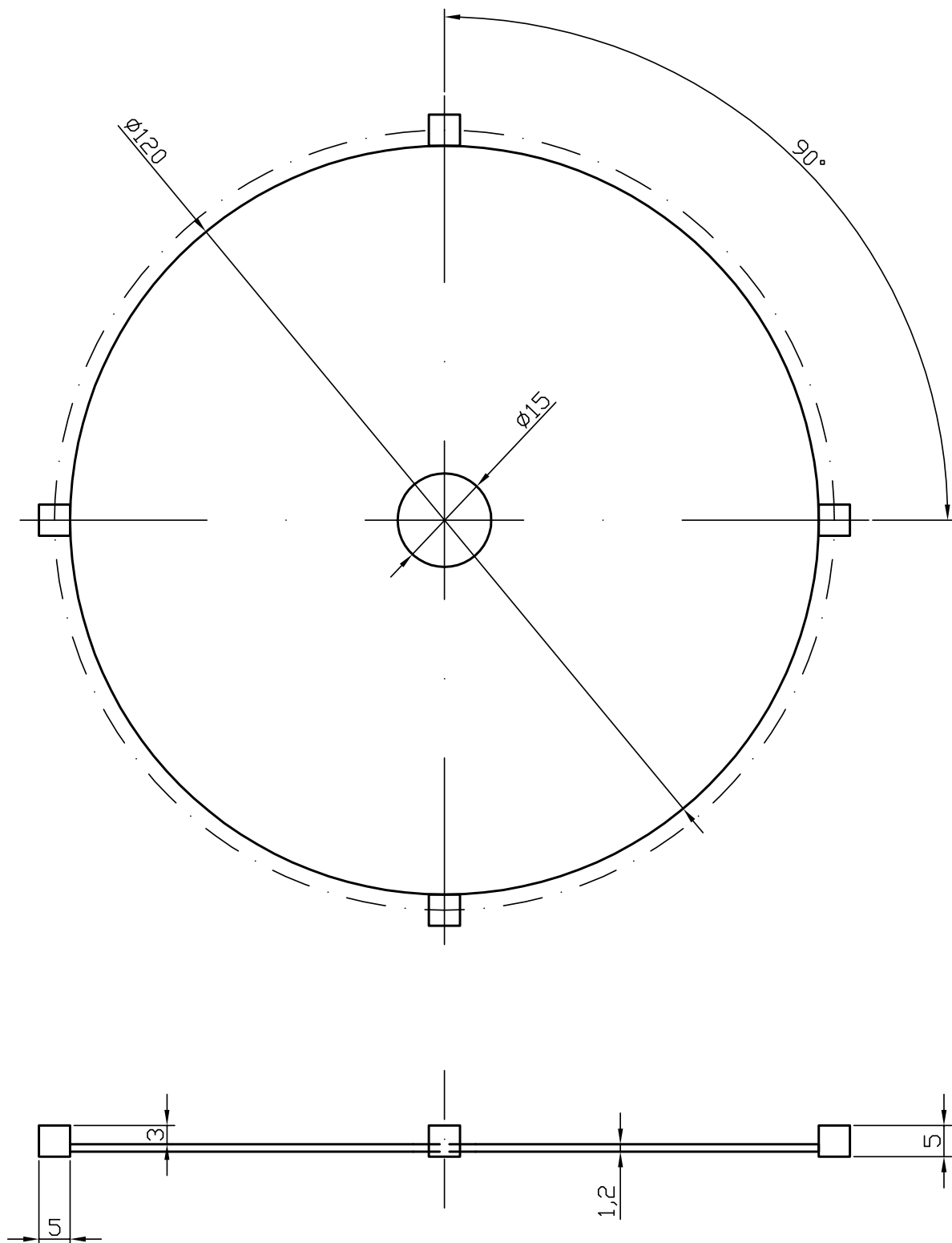



## **Anexos**

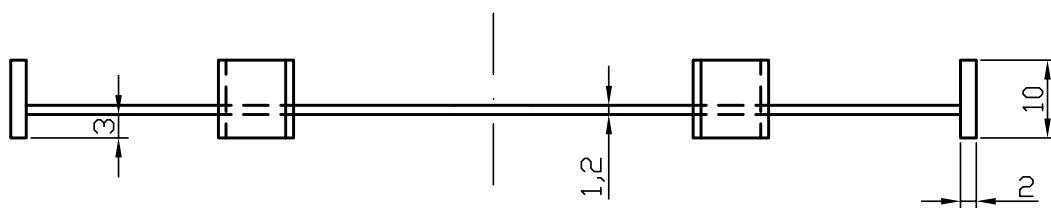
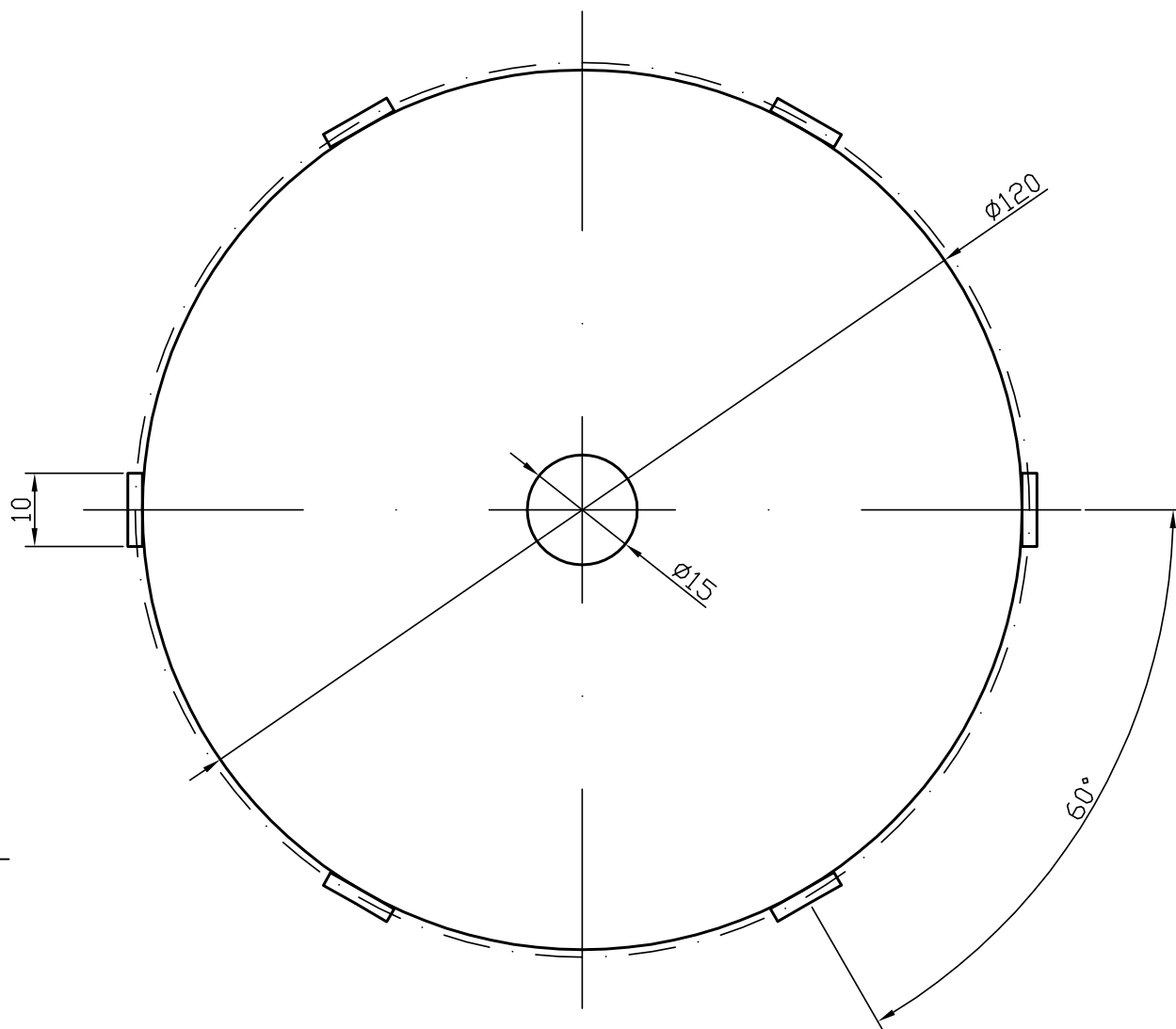
### **- Planos del prototipo -**




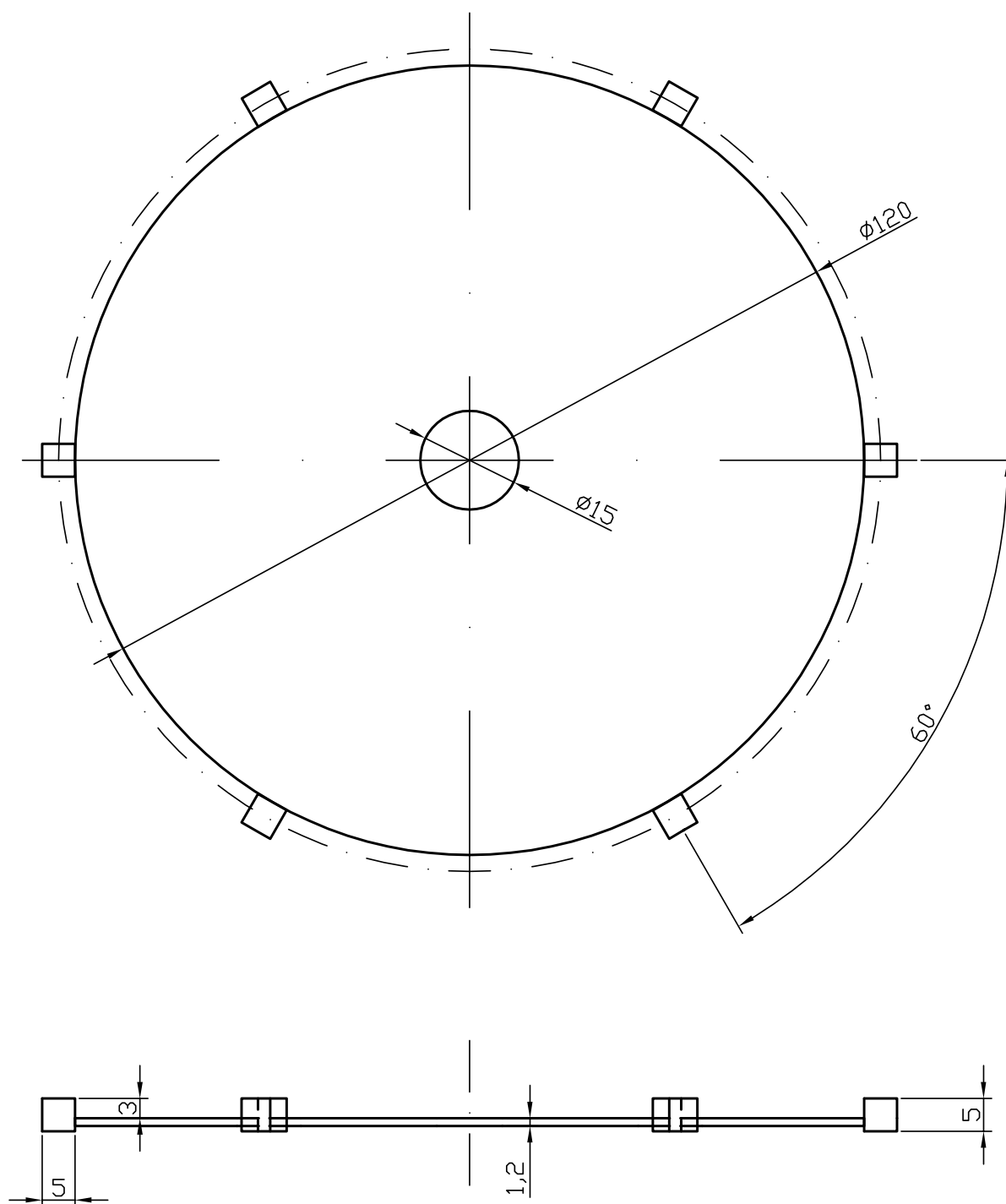
|          |                               |                   |  |                                      |
|----------|-------------------------------|-------------------|--|--------------------------------------|
|          | Fecha                         | Nombre            |  | ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA |
| Dibujado | 31-08-12                      | Mario Gijón Marín |  |                                      |
| Comprob. |                               |                   |  |                                      |
| Escala:  | Disco p=2 de imanes cuadrados |                   |  | Plano: 1                             |
| 1:1      |                               |                   |  | Hoja: 1                              |
|          |                               |                   |  | Especialidad:<br>Electrónica         |




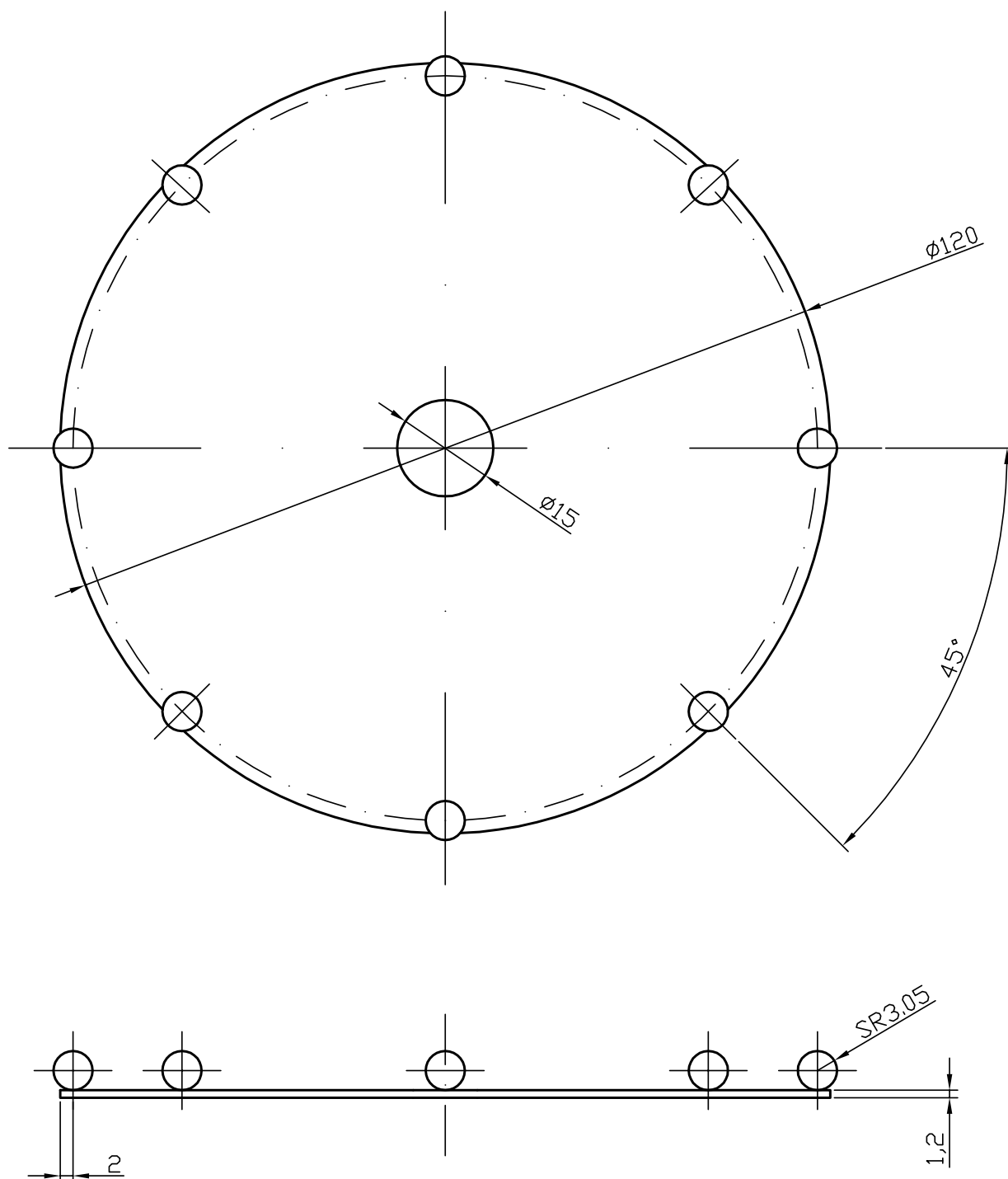
|          |                             |                   |  |                                      |
|----------|-----------------------------|-------------------|--|--------------------------------------|
|          | Fecha                       | Nombre            |  | ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA |
| Dibujado | 31-08-12                    | Mario Gijón Marín |  |                                      |
| Comprob. |                             |                   |  |                                      |
| Escala:  | Disco p=2 de imanes cúbicos |                   |  | Plano: 2                             |
| 1:1      |                             |                   |  | Hoja: 1                              |
|          |                             |                   |  | Especialidad:<br>Electrónica         |




|          |                               |                   |  |                                      |
|----------|-------------------------------|-------------------|--|--------------------------------------|
|          | Fecha                         | Nombre            |  | ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA |
| Dibujado | 31-08-12                      | Mario Gijón Marín |  |                                      |
| Comprob. |                               |                   |  |                                      |
| Escala:  | Disco p=3 de imanes cuadrados |                   |  | Plano: 3                             |
| 1:1      |                               |                   |  | Hoja: 1                              |
|          |                               |                   |  | Especialidad:<br>Electrónica         |

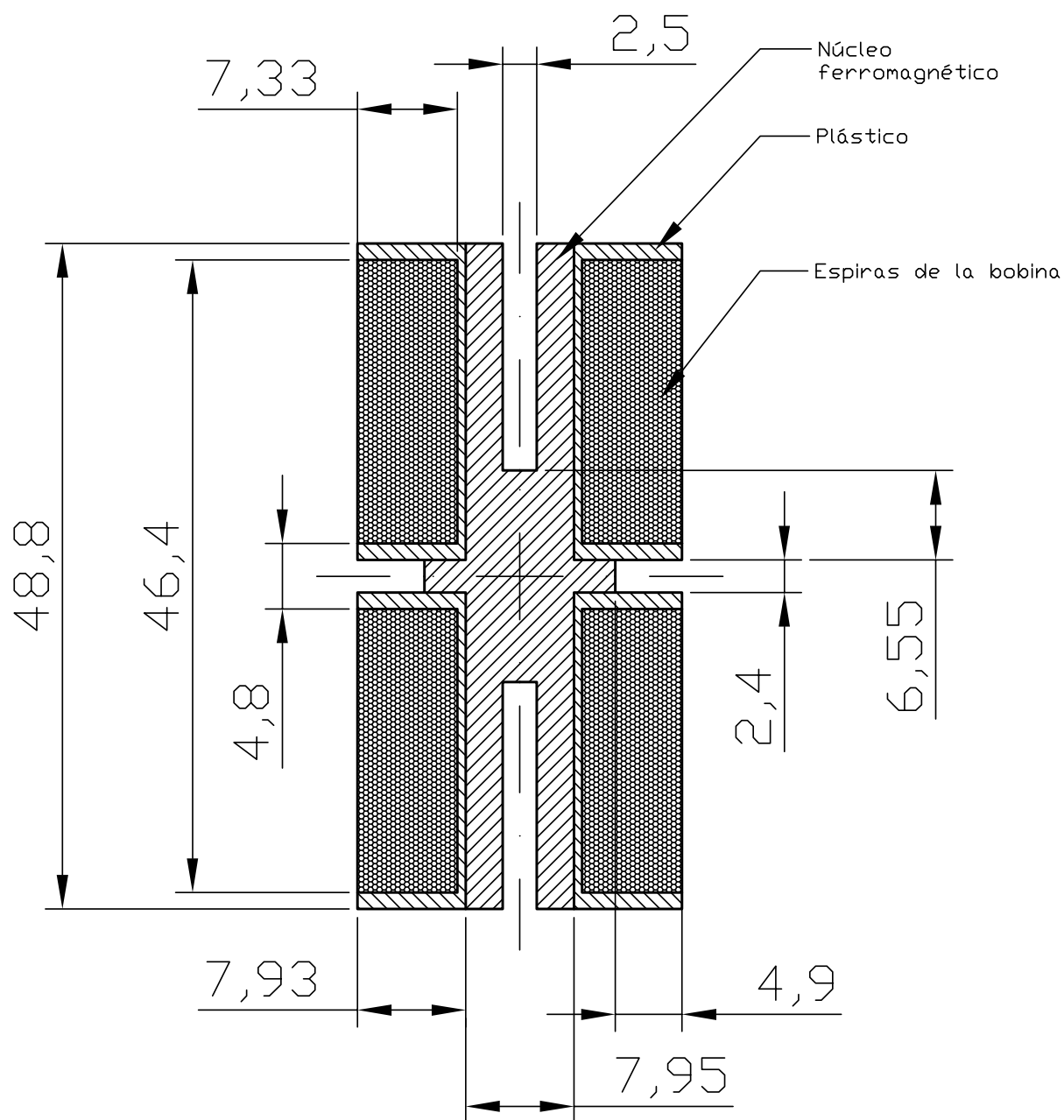



|          |                             |                   |  |                                      |
|----------|-----------------------------|-------------------|--|--------------------------------------|
|          | Fecha                       | Nombre            |  | ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA |
| Dibujado | 31-08-12                    | Mario Gijón Marín |  |                                      |
| Comprob. |                             |                   |  |                                      |
| Escala:  | Disco p=3 de imanes cúbicos |                   |  | Plano: 4                             |
| 1:1      |                             |                   |  | Hoja: 1                              |
|          |                             |                   |  | Especialidad:<br>Electrónica         |

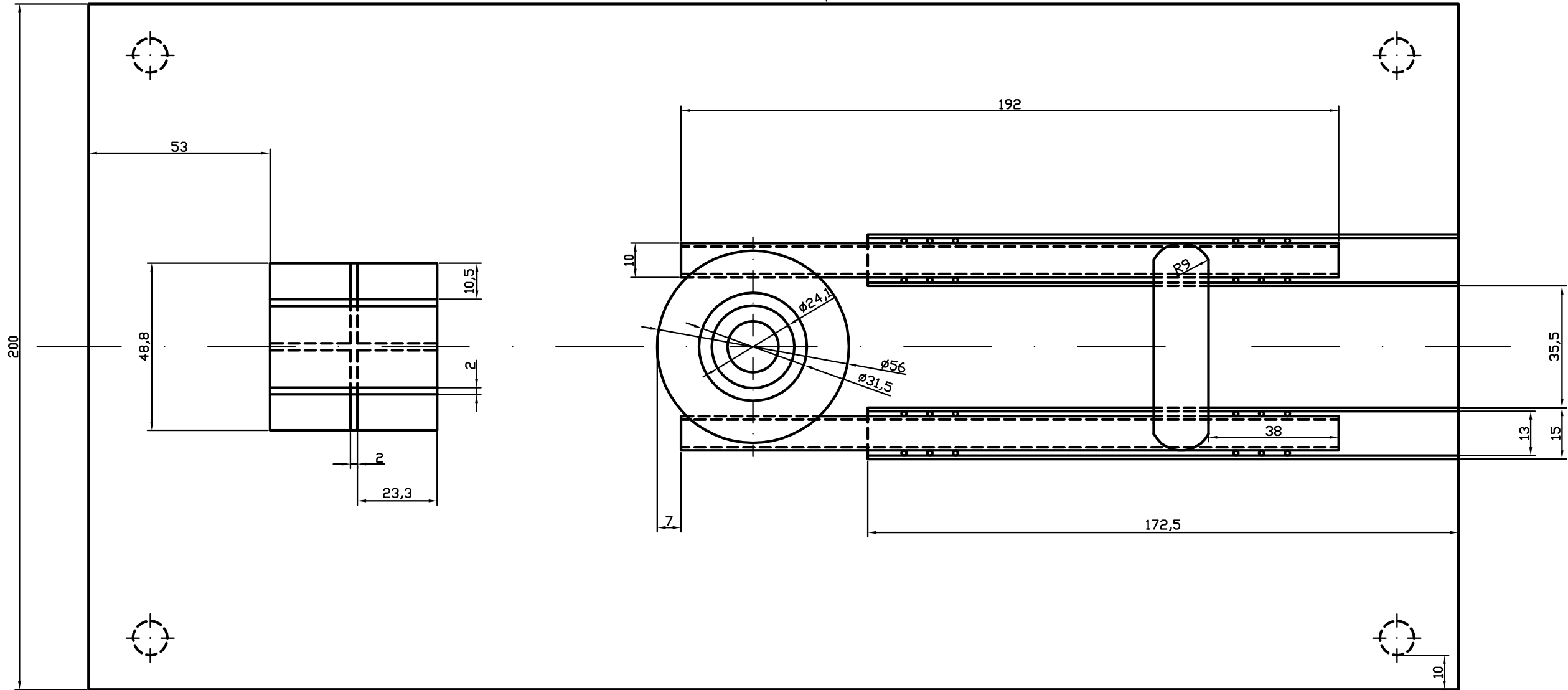


|          |                               |                   |  |                                      |
|----------|-------------------------------|-------------------|--|--------------------------------------|
|          | Fecha                         | Nombre            |  | ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA |
| Dibujado | 31-08-12                      | Mario Gijón Marín |  |                                      |
| Comprob. |                               |                   |  |                                      |
| Escala:  | Disco p=4 de imanes esféricos |                   |  | Plano: 5                             |
| 1:1      |                               |                   |  | Hoja: 1                              |
|          |                               |                   |  | Especialidad:<br>Electrónica         |





|          |                                |                   |  |                                      |
|----------|--------------------------------|-------------------|--|--------------------------------------|
|          | Fecha                          | Nombre            |  | ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA |
| Dibujado | 31-08-12                       | Mario Gijón Marín |  |                                      |
| Comprob. |                                |                   |  |                                      |
| Escala:  | Corte transversal de la bobina |                   |  | Plano: 6                             |
| 2:1      |                                |                   |  | Hoja: 1                              |
|          |                                |                   |  | Especialidad:<br>Electrónica         |



ESCUELA DE  
INGENIERÍA Y  
ARQUITECTURA

|          |                             |                   |
|----------|-----------------------------|-------------------|
|          | Fecha                       | Nombre            |
| Dibujado | 31-08-12                    | Mario Gijón Marín |
| Comprob. |                             |                   |
| Escala:  | Vista general del prototipo |                   |
| 1:2      |                             |                   |
|          |                             |                   |

|                              |
|------------------------------|
| Plano: 7                     |
| Hoja: 1                      |
| Especialidad:<br>Electrónica |

