

# **Memoria de Ejecución del Proyecto**

**AYUDAS DE LA UNIVERSIDAD DE SALAMANCA A  
PROYECTOS DE INNOVACIÓN Y MEJORA DOCENTE  
CURSO 2013/2014**

Título del proyecto:

**Creación de Trabajos de Fin de Grado en Física  
de carácter experimental**

**Código del proyecto: ID2013/002**

Coordinador del proyecto:

**Víctor Javier Raposo Funcia**

Facultad de Ciencias  
UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

# ÍNDICE

<b>I.- Relación de los miembros de la Universidad de Salamanca participantes en el proyecto .....</b>	<b>1</b>
<b>II.- Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>III.- Cumplimiento de objetivos .....</b>	<b>3</b>
<b>IV.- Memoria económica .....</b>	<b>4</b>
<b>V.-Anexos:</b>	
<b>Anexo I.- Ejemplo de presentación de una clase magistral.....</b>	<b>5</b>
<b>Anexo II.- Ejemplo de problemas planteados al alumno para realizar en los seminarios de la asignatura .....</b>	<b>7</b>
<b>Anexo III.- Ejemplo de tareas individuales para el alumno y que entregará al profesor para su revisión .....</b>	<b>8</b>
<b>Anexo IV.- Ejemplo de presentación teórica introductoria a las prácticas de laboratorio y del aula de informática.....</b>	<b>9</b>
<b>Anexo V.- Fotografías de experiencias de laboratorio.....</b>	<b>11</b>
<b>Anexo VI.- Ejemplo de guion de práctica de una experiencia.....</b>	<b>12</b>
<b>Anexo VII.- Asignatura en la plataforma Studium.....</b>	<b>15</b>

## **I. Relación de los miembros de la Universidad de Salamanca participantes en el proyecto**

José Ignacio Iñiguez de la Torre

Víctor Javier Raposo Funcia

Ana García Flores

Marcelino Zazo Rodríguez

## **II. Introducción**

El presente documento presenta la Memoria de Ejecución del Proyecto titulado “Creación de Trabajos de Fin de Grado en Física de carácter experimental”, concedido por la Universidad de Salamanca en el contexto del “Programa de mejora de la calidad” en la convocatoria de Ayudas a Proyectos de Innovación y Mejora Docente del curso 2013/2014.

La implantación de los nuevos títulos de Grado ha supuesto una notable variación en la forma de planificar la docencia, con una mayor participación de los estudiantes en el trabajo diario. Eso ha implicado un enorme esfuerzo de planificación docente, que en los últimos años ha dado como fruto la generación de nuevos recursos como lecturas recomendadas, acceso a páginas webs, tareas individualizadas..., para la consecución de las competencias previstas en las memorias de los respectivos títulos. En el último curso de las nuevas titulaciones ha aparecido una nueva asignatura, ya presente de alguna forma en algunas ingenierías de los planes antiguos, los Trabajos de fin de Grado, que guardan ciertas similitudes con los citados proyectos de fin de carrera, si bien sus características finales varían de unas titulaciones a otras atendiendo del peso que se les otorga.

El objetivo principal de este proyecto ha sido el desarrollo de una serie de líneas de trabajo que permitan la oferta de Trabajos de Fin de Grado en Física en los que al menos parte de los mismos implique la realización de algún experimento o medida, completando así la oferta de este tipo de trabajos que en las primeras promociones del Grado en Física han sido poco abundantes. De este modo pretendemos enriquecer la oferta didáctica que actualmente se viene impartiendo, siendo conscientes de que en los próximos años se incrementará notablemente la demanda por parte de los alumnos, de modo que debemos tener cubiertas las necesidades que tendremos en breve.

La elaboración de este tipo de oferta es particularmente complicada, pues por el especial carácter que tiene esta asignatura, el alumno es quien debe llevar a cabo la mayor parte del desarrollo de la misma. Sin embargo, es responsabilidad del profesor realizar propuestas adecuadas y guiar el trabajo, proporcionando en este caso los recursos materiales necesarios para llevar a cabo los experimentos pertinentes.

Es por ello que en la elaboración de las diversas ofertas se debe tener en cuenta varios aspectos:

- Elaboración del plan de trabajo que permita al alumno de forma autodidacta la consecución de los objetivos planteados en cada trabajo, apoyándose en las tutorías.
- Intentar que el alumno adquiera habilidades en el uso de equipos, recopilación de bibliografía y en la defensa y presentación del trabajo

Para la elaboración de estos proyectos se ha contado con los recursos ya disponibles en el Área de Electromagnetismo, así como de la financiación del presente proyecto que ha permitido completar alguno de los sistemas experimentales que formarán parte de la oferta de trabajos aquí propuesta.

### **III. Cumplimiento de objetivos**

El objetivo fundamental del presente proyecto era diseñar una serie de experiencias y realizar la adecuada planificación de las mismas para que puedan ser llevadas a cabo por los alumnos dentro de la duración prevista en el Trabajo de Fin de Grado.

Evidentemente, en este caso el material no puede ser puesto a disposición del alumno en las plataformas virtuales, pues el principal objetivo es que los estudiantes alcancen con la mayor autonomía posible los resultados de las experiencias.

A lo largo del proyecto se han realizado las medidas, desarrollos teóricos y planificación de un conjunto de experiencias, centrándonos en ajustar el peso del trabajo de modo que sea abordable por el alumno, y diseñando una línea argumental que permita el trabajo autónomo con una serie de etapas bien definidas. Las experiencias que propondremos serán las siguientes:

- Medida de la conductividad en materiales no ferromagnéticos por técnicas inductivas
- Estudio de la levitación magnética con estructuras Halbach
- Estudio de la levitación magnética de conductores en presencia de campo magnético alterno
- Medidas de impedancia en alta frecuencia
- Estudio de la resonancia ferromagnética

En el anexo I se muestran brevemente los resultados, montajes y planificación de cada una de ellas.

## **IV.- Memoria económica**

En el proyecto de innovación y mejora de docente presentado se solicitaban 300 € para la compra de un multímetro con capacidad de medida de hasta 100 kHz. La cantidad concedida fue de 200 € insuficiente para ello, por lo que se ha empleado el dinero en la compra de imanes necesarios para una de las experiencias y se empleará un multímetro de alta frecuencia disponible en el Laboratorio de Investigación para realizar las medidas propuestas en la memoria original.

# Anexo I: Resumen de las propuestas de Trabajo de Fin de Grado en Física

## 1.- Medida de la conductividad en materiales no ferromagnéticos por técnicas inductivas

### 1.1. Propuesta

Se propone un trabajo en el que se estudiará de manera sencilla el apantallamiento de un campo magnético que varía en el tiempo. Para ello se analizará el efecto de los materiales conductores no ferromagnéticos en el apantallamiento de un campo magnético oscilante. En primer lugar se desarrollará el modelo analítico que rige el comportamiento del campo en una geometría de elevada simetría como es un cilindro hueco, para aplicar posteriormente los resultados mediante medidas experimentales en materiales conductores no ferromagnéticos, contrastando los resultados con la teoría. Las expresiones teóricas se verificarán además mediante simulación por elementos finitos para su posible aplicación a geometrías más complicadas que no tienen solución analítica sencilla.

### 1.2 Organigrama de trabajo

Repaso bibliográfico: conceptos de electrodinámica y técnicas de NDT

Desarrollo del modelo teórico

Elección de geometría (tubos, barras, láminas...)

Aproximación baja frecuencia: planteamiento circuital y de campos.

Expresiones en alta frecuencia (sin corriente de desplazamiento). Comparación con simulaciones.

Resultados experimentales

Puesta a punto del sistema de medida

Medidas en tubos

Medidas en barras

Conclusiones

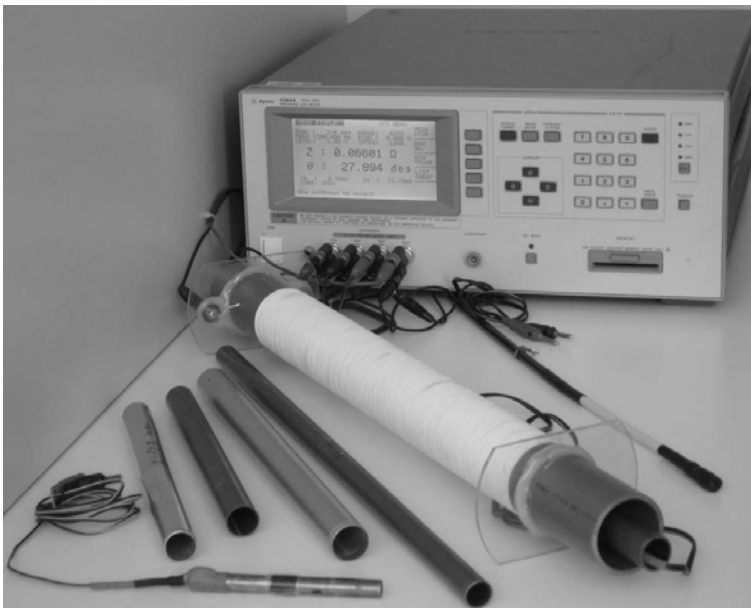
### 1.3 Resumen de expresiones relevantes a las que se debe llegar con el trabajo:

Voltaje en función de la geometría, frecuencia y conductividad en tubos y barras:

$$V_{rod} = -i\omega\mu \frac{2\pi R H_s}{k} \frac{J_1(kR)}{J_0(kR)} e^{i\omega t} \quad V_{tube-in} = -i\omega\mu\pi a^2 \frac{QJ_0(kR_{in}) - PY_0(kR_{in})}{QJ_0(kR_{ext}) - PY_0(kR_{ext})} H_s e^{i\omega t}$$

$$V_{tube-ext} = -\frac{i\omega\mu\pi}{QJ_0(kR_{ext}) - PY_0(kR_{ext})} \left( R_{in}^2 [QJ_0(kR_{in}) - PY_0(kR_{in})] + \right. \\ \left. + \frac{2}{k} (Q[R_{ext} J_1(kR_{ext}) - R_{in} J_1(kR_{in})] - P[R_{ext} Y_1(kR_{ext}) - R_{in} Y_1(kR_{in})]) \right) H_s e^{i\omega t}$$

### 1.4 Sistema de medida desarrollado



## 2.- Estudio de la levitación magnética con estructuras Halbach

### 2.1 Propuesta

Se desea desarrollar y medir un pequeño prototipo de sistema de levitación magnética a baja velocidad por medio de una rueda de cobre y una estructura de imanes Halbach. Se realizará iniciarme un análisis cualitativo analítico que se completará con un análisis computacional de las fuerzas de levitación y frenado, y se compararán los resultados con las medidas en el prototipo.

### 2.2 Organigrama de trabajo

Repaso bibliográfico: repaso de electromagnetismo y levitación magnética

Estimación de las fuerzas

Modelo analítico sencillo

Simulaciones por técnicas de elementos finitos

Resultados experimentales

Puesta a punto del sistema de medida

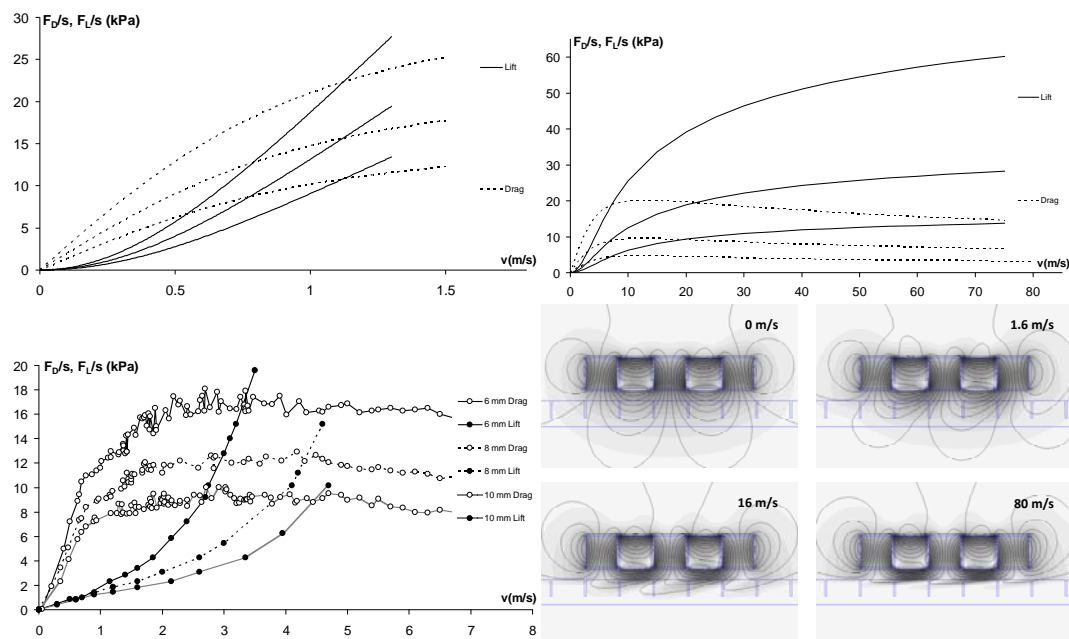
Medidas de la levitación

Conclusiones

### 2.3 Resumen de resultados relevantes a los que se debe llegar

$$\frac{F_D}{s}(v) = v \frac{\sigma B_0^2}{4k} (e^{2ky_1} - e^{2ky_2}) \cos[\text{atan}(k\tau v)]$$

$$\frac{F_L}{s}(v) = u_y \frac{v \sigma B_0^2}{4k} (e^{2ky_1} - e^{2ky_2}) \sin[\text{atan}(k\tau v)]$$



### 2.4 Sistema de medida desarrollado





### 3.- Estudio de la levitación magnética de conductores en presencia de campo magnético alterno

#### 3.1 Propuesta

Se propone un trabajo introductorio al estudio y aplicaciones de los sistemas de levitación magnética. Una vez realizada una revisión de los principios básicos de la levitación se orientará el trabajo al caso de levitación electrodinámica, por inducción. En el curso del proyecto, además de la parte teórica, se realizará un trabajo práctico de levitación y se contrastarán los resultados experimentales con las previsiones analíticas aproximadas en modelos sencillos. Se atenderá también a la posibilidad de emplear estas técnicas en la caracterización y medida de parámetros eléctricos y magnéticos de diversos materiales.

#### 3.2 Organigrama de trabajo

Repaso bibliográfico: principio de levitación magnética

Cálculo de las fuerzas de levitación en geometrías sencillas

Fuerza experimentada por un aro en presencia de una bobina

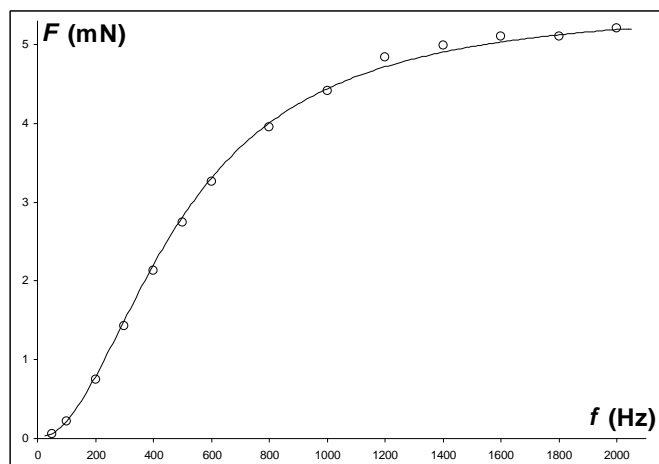
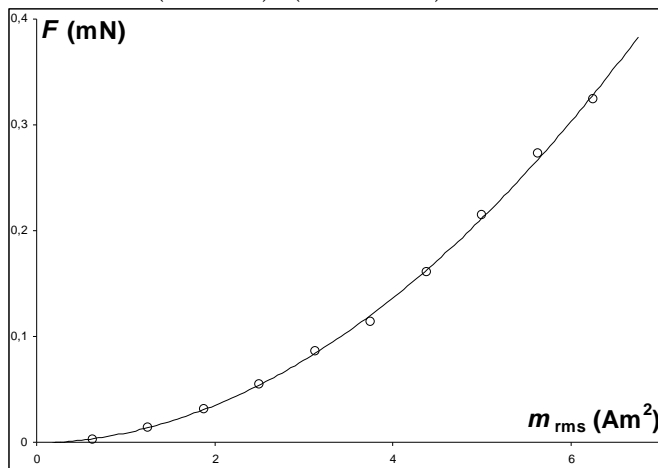
Medias experimentales

Fuerza en función de la corriente y de la frecuencia

Conclusiones

#### 3.3 Resumen de resultados relevantes a los que se debe llegar

$$\mathbf{F}_m = \frac{3\mu_0^2}{4} \frac{z \rho^4 m_{rms}^2 \omega^2 L}{(\rho^2 + z^2)^4 (R^2 + \omega^2 L^2)} \mathbf{u}_z$$



#### 3.4 Sistema de medida desarrollado



#### 4.- Medidas de impedancia en alta frecuencia

##### 4.1 Propuesta

Se abordará el problema del estudio de las propiedades de transporte en materiales conductores con diversas propiedades magnéticas. A medida que aumenta la frecuencia de trabajo la medida comienza a presentar complicaciones, y se hacen necesarias técnicas sofisticadas de calibración y compensación para la extracción de los parámetros intrínsecos de las muestras una vez eliminadas las impedancias parásitas. Se desarrollarán los modelos teóricos que describen la impedancia en alta frecuencia de diversas estructuras y se realizarán medidas en distintos materiales para comprobar su aplicabilidad.

##### 4.2 Organigrama de trabajo

Repaso bibliográfico: efecto pelicular y propiedades magnéticas de materiales

Calculo de la impedancia en conductores cilíndricos

Conductores cilíndricos homogéneos

Conductores cilíndricos no homogéneos

Resultados experimentales

Calibración en alta frecuencia del sistema de medida

Medidas de impedancia en distintos materiales

Conclusiones

##### 4.3 Resumen de resultados relevantes a los que se debe llegar

$$\frac{Z}{R_{DC}} = \frac{k r_0}{2} \frac{J_0(k r_0)}{J_1(k r_0)}$$

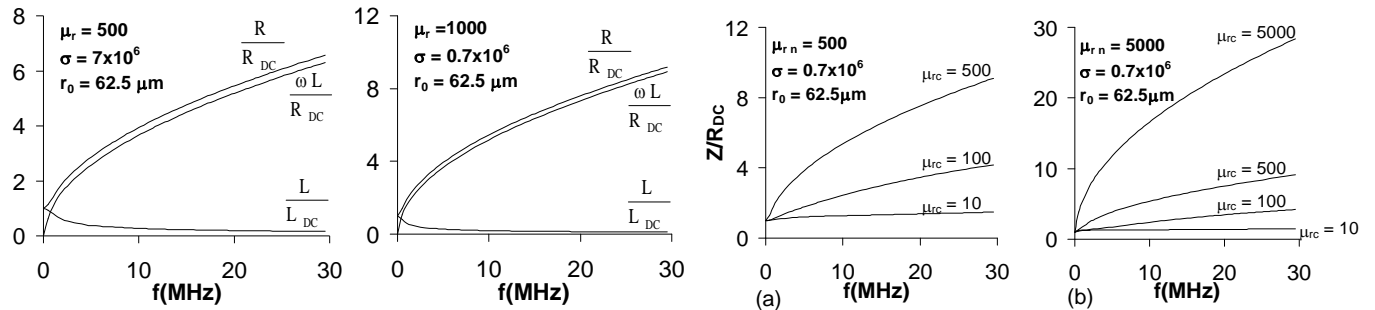
$$Z = \frac{\ell k_c}{2 \pi \sigma r_0 G} [C_c J_0(k_c r_0) + D_c Y_0(k_c r_0)]$$

$$C_n = k_c J_1(k_c r_n) Y_0(k_c r_n) - k_c Y_1(k_c r_n) J_0(k_c r_n)$$

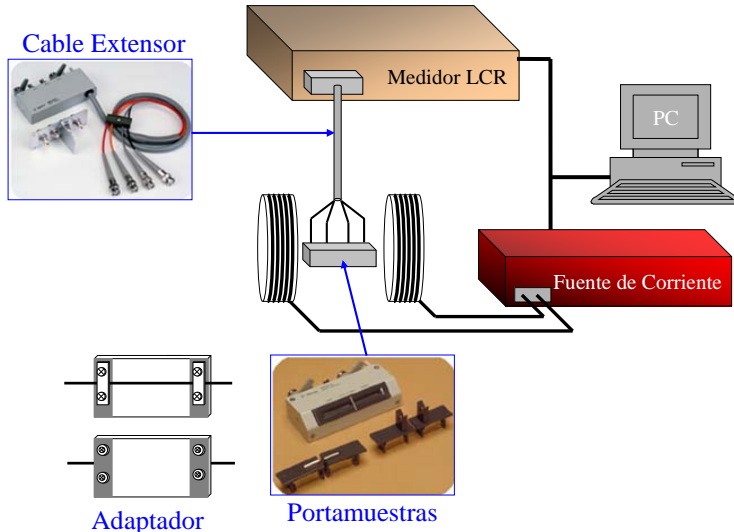
$$C_c = k_c J_1(k_n r_n) Y_0(k_c r_n) - k_n Y_1(k_c r_n) J_0(k_n r_n)$$

$$D_c = k_n J_1(k_c r_n) J_0(k_n r_n) - k_c J_1(k_n r_n) J_0(k_c r_n)$$

$$G = k_n J_0(k_n r_n) [J_1(k_c r_n) Y_1(k_c r_0) - Y_1(k_c r_n) J_1(k_c r_0)] + k_c J_1(k_n r_n) [Y_0(k_c r_n) J_1(k_c r_0) - J_0(k_c r_n) Y_1(k_c r_0)]$$



##### 4.4 Sistema de medida desarrollado



## 5.- Estudio de la resonancia ferromagnética

### 5.1 Propuesta

El estudio de la resonancia ferromagnética es un método habitual para la caracterización de las propiedades de materiales magnéticos. El estudio a distintas frecuencias nos permite calcular de manera directa la magnetización de saturación y el campo de anisotropía. Para ello es necesario emplear sistemas de medida en alta frecuencia especialmente adaptados al tipo de muestras que se desean analizar. En el presente trabajo se diseñará un sistema de medida de resonancia en banda ancha y se analizarán un conjunto de muestras tras deducir las expresiones que rigen el comportamiento de la resonancia en frecuencia.

### 5.2 Organigrama de trabajo

Repaso bibliográfico: propiedades magnéticas de materiales y medida de la EPR

Calculo frecuencia de resonancia

Modelo de Smith-Suhl

Aplicación a muestras esféricas y planas

Resultados experimentales

Puesta a punto de la medida de FMR

Medida del diagrama de dispersión  $\omega^2$ - $H_r$  en diversas muestras

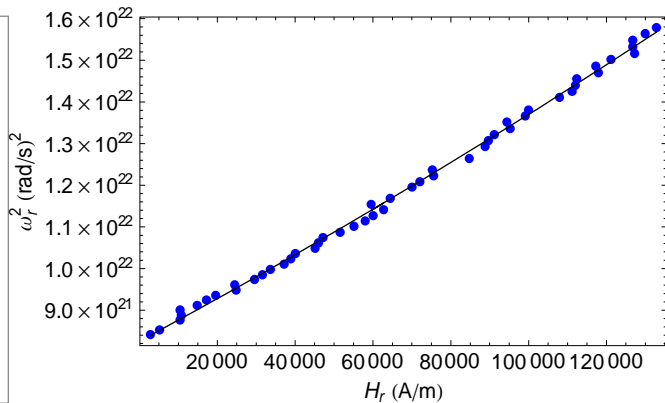
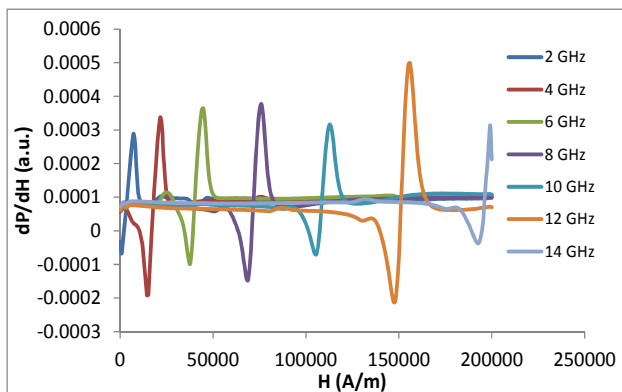
Conclusiones

### 5.3 Resumen de resultados relevantes a los que se debe llegar

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \theta}\right)_{\theta+\varepsilon} - \left(\frac{\partial G}{\partial \theta}\right)_{\theta} = N_x^e M_s^2 \sin \varepsilon$$

$$\left(\frac{\partial G}{\partial \phi}\right)_{\phi+\varepsilon} - \left(\frac{\partial G}{\partial \phi}\right)_{\phi} = \sin \theta N_y^e M_s^2 \sin \delta$$

$$\left(\frac{\omega}{\mu_0 \gamma}\right)^2 = [H + \cos 2\phi(2K_1 / M_s)] \times [H + M_s + \cos^2 \phi(2K_1 / M_s)]$$



### 5.4 Sistema de medida desarrollado

