

Memoria de Ejecución del Proyecto

**PROYECTO DE INNOVACIÓN Y MEJORA DOCENTE
CURSO 2017/2018**

Título del proyecto:

**ELABORACIÓN DE NUEVOS RECURSOS
DOCENTES PARA EL ESTUDIO DE LA FÍSICA
DEL ESTADO SÓLIDO**

Código del proyecto: ID2017/153

Coordinador del proyecto:

Marcelino Zazo Rodríguez

Facultad de Ciencias
UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

ÍNDICE

I.- Relación de los miembros de la Universidad de Salamanca participantes en el proyecto	1
II.- Introducción	1
III.- Cumplimiento de objetivos	3
IV.- Memoria económica	4
V.-Anexos:	
Anexo I.- Programa desarrollado del tema 3.1 y 1ª transparencia	5
Anexo II.- Problema	6
Anexo III.- Guion de práctica de una experiencia de laboratorio.....	9
Anexo IV.- Fotografías de la experiencia de laboratorio del anexo III.....	12

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

María Auxiliadora Hernández López

Luis Torres Rincón

Marcelino Zazo Rodríguez

II. Introducción

El presente documento presenta la Memoria de Ejecución del Proyecto titulado “Elaboración de nuevos recursos docentes para el estudio de la Física del Estado Sólido”, concedido dentro de la convocatoria del Programa de Mejora de la Calidad (Proyectos de innovación y mejora) del curso 2017/2018.

El objetivo principal de este proyecto es hacer una nueva reorganización y elaboración de nuevos recursos docentes para el estudio de la Física del Estado Sólido. El proyecto está principalmente enfocado a la asignatura de Física del Estado Sólido II, que es continuación y complemento de la de Física del Estado Sólido I, de la titulación de Grado en Física. Esas dos asignaturas quedan dentro de lo que se denomina la Física de la Materia Condensada, de gran importancia, ya que el estudio y caracterización de materiales es de gran interés para las aplicaciones tecnológicas en la actualidad. Antes del desarrollo de cualquier dispositivo electrónico es necesario conocer las propiedades, tanto mecánicas como electromagnéticas, de los materiales de fabricación que se emplearan.

En enfoque realizado hasta este momento de la asignatura de Física del Estado Sólido II ha sido más bien teórico, pero al ser una asignatura dedicada principalmente al estudio y caracterización de materiales es conveniente incluir una serie de recursos didácticos adicionales más prácticos, de manera que el alumno mejore y alcance de forma más conveniente las competencias de dicha materia. En el desarrollo teórico de la asignatura se ha mantenido prácticamente la estructura que tenía la anteriormente, modificando y actualizando las partes necesarias. En la parte práctica se han realizado la mayoría de las modificaciones, preparando una serie de ejercicios y problemas, que complemente de forma adecuada los conocimientos adquiridos de teoría. También, sean diseñado y preparado un conjunto de experiencias para poder analizar propiedades de gran importancia de los materiales, de gran interés en las nuevas tecnológicas.

Por otro lado, a la hora de la preparación del material docente se ha tenido en cuenta principalmente los conocimientos que el alumno ha adquirido en la asignatura de Física del Estado Sólido I, que la precede, el semestre en el que se imparte y la afinidad con otras asignaturas que se imparten dentro del Grado de Física, relacionadas con el estudio y análisis de las distintas propiedades de los materiales. Dicha asignatura es del segundo semestre y se complementa principalmente con la de Electrónica Física y Óptica.

En resumen, podemos decir que el objetivo principal de este proyecto de innovación es actualizar y mejora los recursos de aprendizaje y autoaprendizaje que el alumno necesita para conocer en detalle las propiedades físicas de los materiales, así como sus posibles aplicaciones tecnológicas. En el planteamiento, para la mejora de dicha asignatura, se ha considerado realizar un enfoque más práctico, donde a parte de los conocimientos teóricos aportados a los alumnos, se realizarán una serie de problemas y experiencias de laboratorio, para que éste se familiarice y adquiera habilidad y destreza sobre el manejo de distintos sistemas de medida empleados para la caracterización de materiales. Se ha preparado el material didáctico más adecuado, de manera que permita al alumno el estudio de la asignatura de Física del Estado Sólido II indicada anteriormente de la manera más efectiva posible.

Una parte importante de la docencia es de carácter experimental y, por ello, se ha tratado de elaborar un conjunto de experiencias para que el alumno adquiera habilidad y destreza en el manejo de algunos equipos prácticos, que son la base para el estudio de las propiedades de ciertos materiales magnéticos y superconductores.

Para la actualización y mejora de la parte teórica de la asignatura ha sido necesario adquirir bibliografía más reciente y para la parte experimental se ha comprado un multímetro digital de precisión para el estudio de las propiedades electromagnéticas de algunos materiales. Con dicho multímetro y con el uso del equipamiento existente en el laboratorio de Electromagnetismo de la Facultad se han podido realizar diferentes sistemas de medida para la caracterización de los materiales.

III. Cumplimiento de objetivos

El objetivo fundamental del presente proyecto era que el alumno pueda obtener un conocimiento global de la Física del Estado Sólido y le abra una puerta a la ciencia y tecnología más actual en Física de la Materia Condensada, Óptica y Electromagnetismo. En el desarrollo de la asignatura se pretende principalmente que el alumno aprenda a utilizarlos métodos de cálculo de estructuras, de la energía de los estados electrónicos y le permita relacionar sus propiedades ópticas, eléctricas y magnéticas con las características del material. Para ello se han realizado una serie de transparencias para el desarrollo de las clases magistrales. Por otro lado, es necesario que el alumno estudie los materiales magnéticos con detalle, debido a la su gran utilidad a nivel industrial y tecnológico, de manera que le permita establezca la relación de las propiedades magnéticas macroscópicas de los materiales con los parámetros y observables microscópicos y cuánticos. Para complementar la parte estudio teórico de los materiales se han diseñado y preparado una serie de problemas de distintos temas del programa y un conjunto de experiencias de laboratorio para su caracterización. Con el presupuesto del proyecto de innovación hemos comprado un dispositivo que nos ha permitido llevar a cabo una serie de experiencias.

En conclusión, podemos decir que se han elaborado un conjunto de recursos didácticos (anexos de la memoria), como presentaciones, problemas y experiencias..., de manera que permitan a los estudiantes adquirir las competencias y resultados de aprendizaje más adecuados de la Física del Estado Sólido.

A continuación, se indica el material didáctico elaborado por los miembros del proyecto:

- Presentaciones que han permitido preparar las clases magistrales, donde el profesor ha explicado los contenidos propios de la materia (anexo I).

- Presentaciones de los problemas (anexo II).

- Se han diseñado distintas experiencias para realizar en el laboratorio y se ha preparado el siguiente material didáctico:
 - Guion de práctica para realizar las experiencias (anexo III)

Por otro lado, el proyecto de innovación docente se ha desarrollado según lo previsto en la solicitud. El del material didáctico necesario para que el alumno adquiriera los conocimientos teóricos de las asignaturas y los problemas ha sido realizado principalmente por profesor D. Marcelino Zazo Rodríguez. El desarrollo de las experiencias prácticas de la asignatura ha sido realizado conjuntamente por los profesores D. Luis Torres Rincón y D^a. María Auxiliadora Hernández López. En cualquier caso, ha existido una comunicación continua y fluida entre los profesores para conseguir una asignatura compacta, de manera que el alumno haya podido adquirir las competencias asignadas a dicha asignatura.

IV.- Memoria económica

En el proyecto de innovación y mejora de docente presentado se solicitaban 480 € para comprar un multímetro digital de precisión. Para mejorar las prestaciones del equipo se ha comprado un multímetro de mayor precio que el indicado en la solicitud de proyecto. La financiación concedida por el proyecto de innovación fue de 419.52 €, que no cubre el precio final del material de 605 €. El presupuesto se ha complementado con el dinero asignado al departamento de Física Aplicada, de manera que se ha podido adquirir el equipo. Con el equipamiento e infraestructura existente en el laboratorio del área de Electromagnetismo de la Facultad de Física y el material comprado hemos diseñado y preparado alguna de las experiencias del laboratorio para la caracterización de materiales magnéticos.

Anexo I

PROGRAMA DESARROLLADO DEL TEMA 3.1 Y 1ª TRANSPARENCIA

TEMA 3-1

DIAMAGNETISMO Y PARAMAGNETISMO

Índice

1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Propiedades magnéticas	2
1.2. Momentos dipolares magnéticos	5
1.3. Interacción de un campo magnético exterior con un momento dipolar magnético	7
2. DIAMAGNETISMO DE ÁTOMOS E IONES	10
3. INTRODUCCIÓN AL PARAMAGNETISMO DE ÁTOMOS E IONES	14
4. ACOPLAMIENTO RUSSELL-SAUNDERS. REGLAS DE HUND	18
4.1. Estado fundamental de n electrones: Reglas de Hund	19
5. PARAMAGNETISMO DE ÁTOMOS E IONES	25
5.1. Fenomenología	25
5.2. Planteamiento clásico. Paramagnetismo de Langevin	26
5.3. Teoría cuántica del paramagnetismo	31
6. MATERIALES CRISTALINOS. EFECTO DEL CAMPO CRIS- TALINO	36
6.1. Fenomenología	36
6.2. Efecto del campo cristalino. Ruptura de la degeneración	38
7. PARAMAGNETISMO Y DIAMAGNETISMO DE PORTA- DORES LIBRES	47
7.1. Paramagnetismo de W. Pauli	47
7.2. Diamagnetismo de Landau	53

Tema 3.1. Diamagnetismo y Paramagnetismo.

1. INTRODUCCIÓN

- Las propiedades magnéticas de estos materiales depende del momento magnético de sus átomos:

$$\vec{m}_{\text{átomo}} = \sum \vec{m}_{e^-} = \sum (\vec{m}_{\text{espín}} + \vec{m}_{\text{orbital}})$$

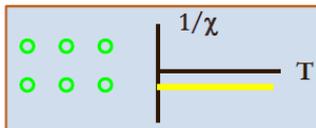
- Clasificación de sustancias magnéticas:

Diamagnéticas

$$\vec{m} = 0 \Rightarrow \text{si } \vec{H} = 0, \vec{M} = 0$$

$$\Rightarrow \text{si } \vec{H} \neq 0, \vec{M} = \chi_m \vec{H} \text{ con } \chi_m < 0$$

$$\text{Cobre: } \chi_m = -0.98 \cdot 10^{-5}$$

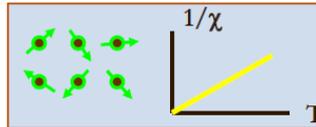


Paramagnéticas

$$\vec{m} \neq 0 \Rightarrow \text{si } \vec{H} = 0, \vec{M} = 0$$

$$\Rightarrow \text{si } \vec{H} \neq 0, \vec{M} = \chi_m \vec{H} \text{ con } \chi_m > 0$$

$$\text{Aluminio: } \chi_m = 2.3 \cdot 10^{-5}$$



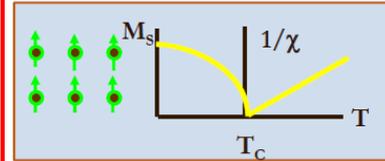
2

Ferromagnéticas

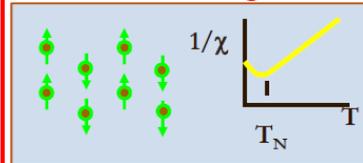
$$\vec{m} \neq 0 \Rightarrow \text{si } \vec{H} = 0, \text{ puede } \vec{M} \neq 0$$

$$\Rightarrow \text{si } \vec{H} \neq 0, \vec{M} \text{ muy intensa}$$

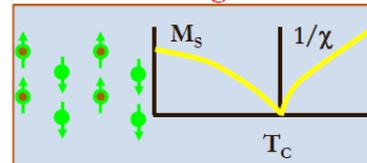
Hierro, Cobalto, Níquel



Antiferromagnéticas



Ferrimagnéticas

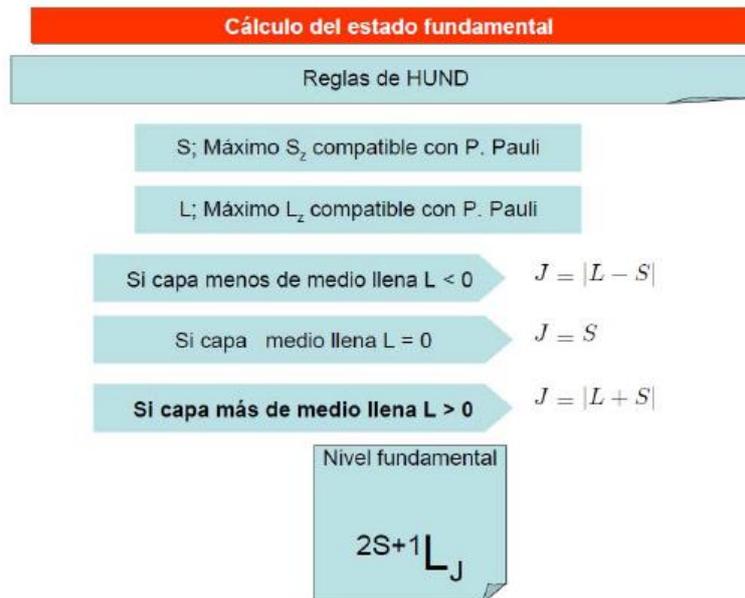


Anexo I

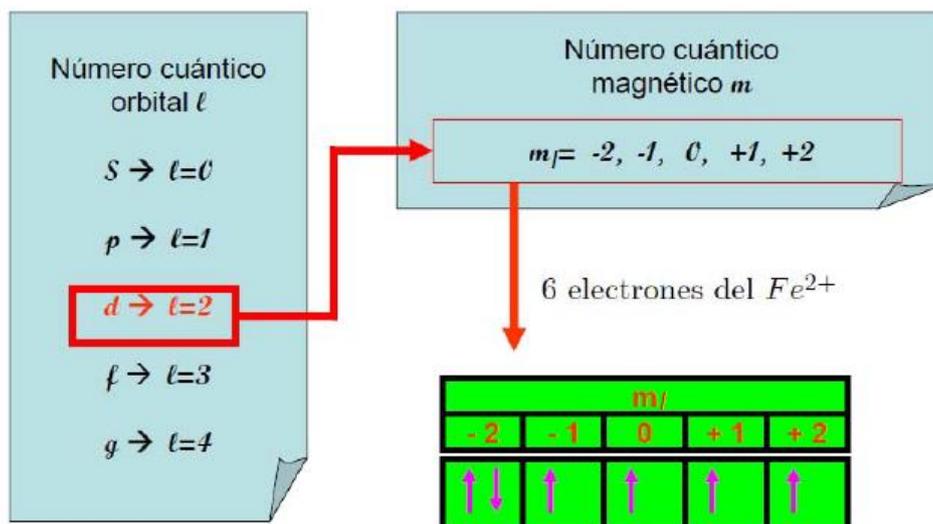
PROBLEMA

Problema

Determinar el estado fundamental del Hierro (elemento de transición) en el estado de oxidación 2. Fe: $[Ar] 3d^6 4s^2$



Cálculo de L, S y J para Fe^{2+}



Cálculo de L, S y J para Fe²⁺



m/				
-2	-1	0	+1	+2
↑↓	↑	↑	↑	↑

$$S_z = +\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 2$$

$$S = 2$$

$$L_z = |-2 - 1 - 0 + 1 + 2 - 2| = |-2| = 2$$

$$L = 2$$

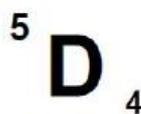
Si capa más de medio llena

$$J = |L + S|$$

$$J = |2 + 2| = 4$$

Nivel fundamental

$$2S+1 L_J$$



Anexo III

GUION DE PRÁCTICA DE UNA EXPERIENCIA DE LABORATORIO

HISTÉRESIS FERROMAGNETICA EN AC Y DC

Planteamiento

Por debajo de la denominada temperatura de Curie, T_c , los materiales magnéticos ordenados presentan una estructura en dominios ferromagnéticos que corresponden a pequeñas regiones del material en las que una magnetización espontánea es la de saturación, M_s en la dirección de fácil anisotropía. Ello es una consecuencia directa del principio de minimización de energía, que es responsable de la configuración y tamaños de esos dominios.

En ausencia de campo magnético externo y partiendo de un estado de desmagnetización macroscópica del material, los dominios se disponen en todas las direcciones al azar, justificándose de esta forma la nula magnetización observada. Por el contrario, cuando se somete el material a un campo externo, los dominios se orientan (o tienden a orientarse) en la dirección del campo aplicado. Ello ocurre por traslación reversible o irreversible de las paredes de Bloch de forma que el volumen de los dominios con magnetización paralela o próxima al campo externo crece a expensas de los demás. También crece la magnetización del material por rotación global de la magnetización dentro de los dominios, de forma que M_s se aparta de la dirección de fácil anisotropía. Si el campo externo es suficientemente intenso se alcanza la saturación, M_s , del material.

Cuando eliminamos el campo externo, en general no se recupera la situación de partida, sino que el material queda imanado con la denominada magnetización remanente. Para cancelarla hace falta aplicar nuevamente un campo externo (opuesto al original), el campo coercitivo. Todo este comportamiento da origen a lo que conocemos con el nombre de histéresis magnética. Es una cuestión de gran interés teórico y práctico en la física de los materiales magnéticos y también resulta importantísima desde el punto de vista técnico; piénsese en la construcción de transformadores, alternadores, electroimanes, motores eléctricos, sensores magnéticos, memorias en soporte magnético...

Hay materiales magnéticos muy diversos. Resultan especialmente conocidos los compuestos en los que mayoritariamente aparecen los metales de transición (capa 3d incompleta: Fe, Ni, Co...) o de tierras raras (capa 4f incompleta: Nd, Sm...), pero también son importantes por su baja conductividad eléctrica los óxidos magnéticos (espinela, granate, perovskita...) o los materiales amorfos o nanocristalinos compuestos a base de Co, Fe, Si y B, por su débil campo coercitivo.

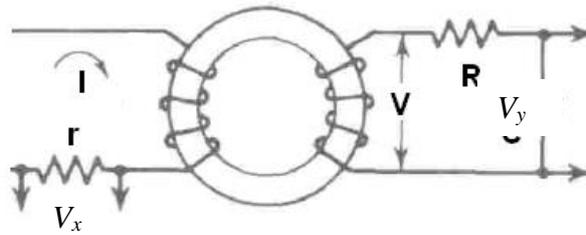
El comportamiento de estos materiales depende tanto de la composición como de su microestructura de forma que la remanencia y la coercitividad (y por lo tanto el ciclo de histéresis) resultarán dependientes de ello. Teniendo presente que la saturación (y también la remanencia) se relacionan con la magnetización por unidad de volumen, y que la densidad de átomos en los diferentes materiales sólidos es esencialmente la misma, concluiremos que la saturación de los diversos compuestos difícilmente puede variar de unos a otros en un orden de magnitud, (si nos fijamos en los elementos de transición encontraremos entre uno y cinco magnetones de Bohr por átomo). Por el contrario, en función de la composición y muy especialmente de la microestructura, tratamientos térmicos, tensiones, annealing..., tendremos materiales con muy diferentes campos coercitivos que podrán variar en cinco o seis órdenes de magnitud. Ésta es la razón fundamental de la investigación en estas sustancias: conseguir fabricar la composición adecuada para cada aplicación mejorando las especificaciones, reduciendo costes, disminuyendo las pérdidas...

En esta práctica se va a hacer el estudio de la histéresis magnética en dos núcleos de hierro (fundición y laminado de chapa magnética de transformador o hierro-silicio). El estudio se realizará tanto en condiciones de AC (la forma de operación usual de un transformador) como de DC. Para ello se utilizarán diferente bobinado primario y secundario, medidor de campo magnético (teslámetro) e instrumentación básica de un laboratorio de electromagnetismo.

Experiencia

La realización práctica se compone de las siguientes etapas:

1. Conectar uno y otro núcleo como transformador con diferentes bobinas primario y secundario. Observar la relación de transformación experimental y compararla con la teórica.
2. Con el circuito de la figura se puede visualizar en un osciloscopio el ciclo de histéresis en AC. La intensidad en el primario es proporcional al campo \mathbf{H} (ley circuital de Ampère), mientras que el voltaje V inducido en el secundario corresponde a la derivada del flujo magnético o del vector \mathbf{B} (ley de Faraday). Para poder ver el ciclo en el osciloscopio se sugiere integrar con un circuito RC el voltaje del secundario. Tomar los valores del número de espiras del primario N_p y del secundario N_s , de r , R y C .

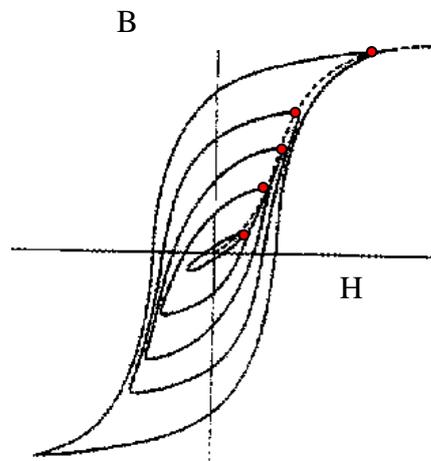


3. Visualizar el ciclo de histéresis del núcleo de hierro laminado en el osciloscopio digital.
4. Mediante el osciloscopio digital guardar en un usb los datos de varios ciclos de histéresis del **núcleo laminado** para distintos valores de voltaje del autotransformador. Se puede obtener el campo magnético \mathbf{H} y la inducción magnética \mathbf{B} mediante las siguientes expresiones

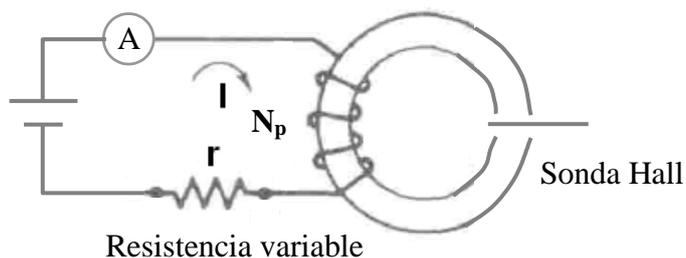
$$H = \frac{N_p I}{L_m} = \frac{N_p V_x}{L_m r} \quad B = \frac{R C V_y}{N_s S}$$

donde L_m es la longitud media del núcleo ($L_m = 0.38 \text{ m}$) y S es su sección transversal ($S = 8.7 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$)

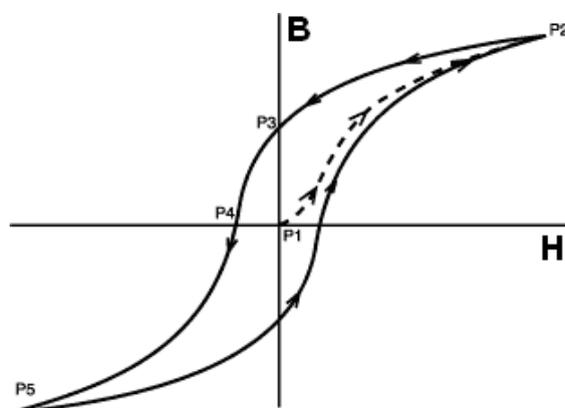
5. Representar los ciclos de histéresis individualmente y de forma conjunta, como se indica en la figura siguiente



6. A partir de los datos del ciclo de histéresis (puntos rojos de la gráfica anterior) obtener los valores para dibujar la curva de primera imanación.
7. Con el montaje de la figura se puede estudiar el ciclo de histéresis estático (en DC) en el **núcleo de hierro fundido**, midiendo la inducción magnética con el teslámetro.



8. Efectuar la medida de histéresis estática. Obtener la curva de primera imanación (P1-P2) y un ciclo de histéresis saturado (P2-P3-P4-P5-P2). Para obtener el valor de H a partir de la corriente I es necesario medir la longitud media del núcleo.

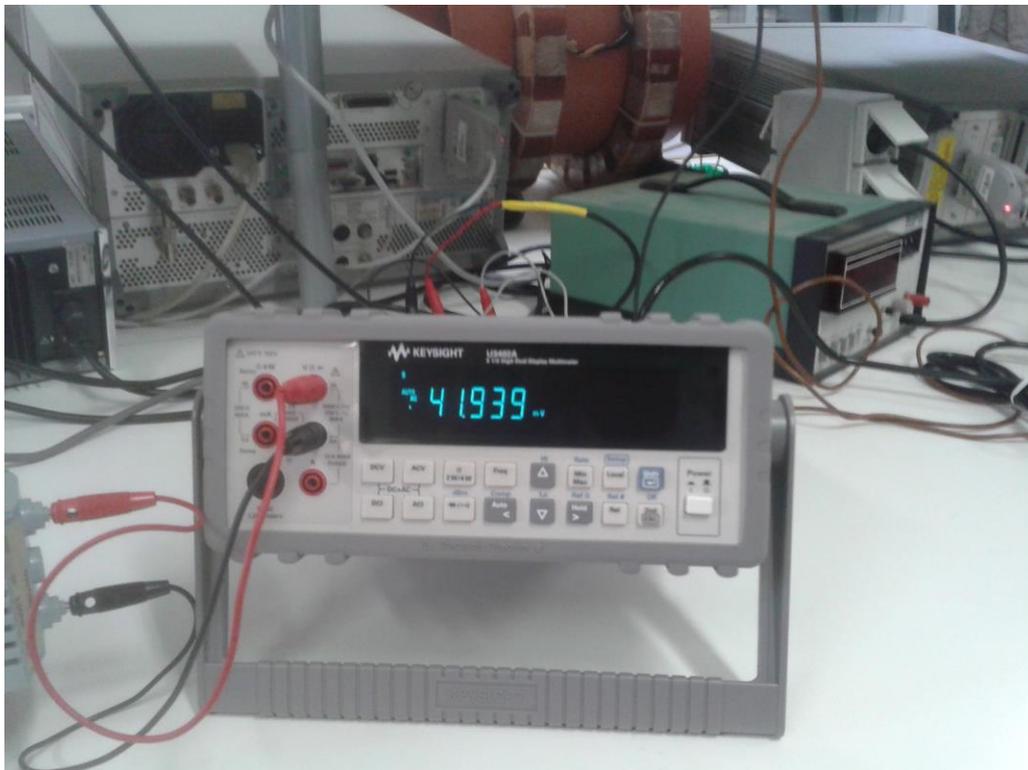


Anexo IV

FOTOGRAFÍAS DE LA EXPERIENCIA DEL LABORATORIO DEL ANEXO III



Montaje para el estudio de un transformado con núcleo de hierro laminado



Multímetro digital de precisión