

Universidad Carlos III de Madrid  
Departamento de Ingeniería Mecánica



Proyecto Fin de Carrera  
Ingeniería Industrial

*“Sistema experimental para la  
medición del ángulo de equilibrio  
entre imanes y  
superconductores”*

Autor: Ignacio Valiente Blanco  
Tutor: Efrén Díez Jiménez  
Director: José Luís Pérez Díaz

Leganés, 23 de Septiembre de 2010

---

*A mi hermana*

---

---

## INDICE

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	Pág. 11
<b>RESUMEN</b>	Pág. 12
<b>ABSTRACT</b>	Pág. 13
<b>1. OBJETIVO DEL PROYECTO</b>	Pág. 15
<b>2. INTRODUCCIÓN</b>	Pág. 17
2.1 <u>Introducción a la superconductividad</u>	Pág. 17
2.1.1 Definición de superconductor	Pág. 17
2.1.2 El fenómeno de la superconductividad	Pág. 17
2.1.3 Introducción histórica	Pág. 19
2.1.4 Clasificación de los superconductores	Pág. 24
2.1.5 El efecto Meissner	Pág. 26
2.1.6 El $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$	Pág. 28
2.1.7 Aplicaciones: Estado del arte	Pág. 29
2.1.8 Aplicaciones: Perspectiva futura	Pág. 34
2.1.8.1 Transporte de energía eléctrica	
2.1.8.2 Otras aplicaciones	
2.2 <u>Introducción al experimento</u>	Pág. 37

---

---

<b>3. ESTUDIO EXPERIMENTAL</b>	Pág. 40
3.1. <u>Equipo y material empleado</u>	Pág. 40
3.1.1. Pastilla superconductora	Pág. 40
3.1.2. Imán permanente	Pág. 40
3.1.3. Nitrógeno líquido	Pág. 41
3.1.4. Contenedor del superconductor	Pág. 42
3.1.5. Sistema de posicionamiento y medición del ángulo de equilibrio	Pág. 43
3.1.6. Sistema de giro	Pág. 47
3.1.7. Sistema de registro	Pág. 49
3.1.8. Disposición final de elementos	Pág. 49
3.1.9. Sistema de análisis de resultados	Pág. 50
3.2. <u>Seguridad en el laboratorio</u>	Pág. 51
3.3. <u>Metodología experimental</u>	Pág. 52
3.3.1. Enfriamiento de la pastilla superconductora	Pág. 52
3.3.2. Posicionamiento relativo imán-pastilla superconductora	Pág. 54
3.3.3. Comprobación de magnetización	Pág. 56
3.3.4. Tratamiento informático de las fotografías	Pág. 57
3.4. <u>Resultados obtenidos y análisis</u>	Pág. 60
3.4.1. Estimación del error	Pág. 60
3.4.2. Resultados obtenidos	Pág. 60

---

---

<b>4. ANÁLISIS TEÓRICO</b>	Pág. 70
4.1. <u>Modelo</u>	Pág. 70
4.2. <u>Cálculos teóricos</u>	Pág. 72
4.2.1. Funcionamiento del algoritmo	Pág. 72
4.2.2. Error estimado	Pág. 77
4.2.3. Obtención de resultados teóricos	Pág. 77
4.3. <u>Comparación con los datos experimentales</u>	Pág. 80
<b>5. PLIEGO DE CONDICIONES</b>	Pág. 83
<b>6. PRESUPUESTO</b>	Pág. 86
<b>7. CONCLUSIONES</b>	Pág. 90
<b>8. REFERENCIAS</b>	Pág. 92
<b>ANEXOS</b>	Pág. 94
ANEXO I      MANUAL DE SEGURIDAD	Pág. 95
ANEXO II      PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LA PASTILLA SUPERCONDUCTORA	Pág. 106
ANEXO III    PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS IMANES PERMANENTES	Pág. 108
<b>PLANOS</b>	Pág. 116

---

---

## **INDICE DE FIGURAS**

### **CAPITULO 2**

*Figura 2.1. Efecto Meissner (izquierda) y comportamiento eléctrico de un superconductor en función de su temperatura (derecha).*

*Figura 2.2. Campo magnético crítico en función de la temperatura de transición*

*Figura 2.3. Evolución histórica de la evolución de superconductores y sus temperaturas de transición.*

*Figura 2.4. Fases de un superconductor tipo II.*

*Figura 2.5. Imán levitando sobre superconductor en posición de equilibrio estable*

*Figura 2.6. Dos representaciones de la red cristalina de YBaCuO*

*Figura 2.7 Representación de la temperatura crítica del  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  frente al contenido de oxígeno. Apréciase la presencia de dos mesetas*

*Figura 2.8. Limitador de corriente (izquierda) y detector de fotones de alta precisión (derecha.)*

*Figura 2.9. The Yamanashi MLX01 MagLev train. y equipo superconductor*

*Figura 2.10. SQUID (izquierda) y tomografía cerebral aprovechando esta tecnología (derecha)*

*Figura 2.11. Imanes Superconductores de acelerador de partículas del CERN en Suiza.*

*Figura 2.12. Cables superconductores: Tipo I (izq) y cable de enfriamiento dieléctrico (drcha).*

### **CAPITULO 3**

*Figura 3.1. Pastilla superconductora*

*Figura 3.2. Tanque secundario de nitrógeno líquido de capacidad 32 litros*

*Figura 3.3. Vaso Dewar empleado en el experimento*

*Figura 3.4. Representación y sistema de referencia para el estudio de la posición de equilibrio*

*Figura 3.5. Pletinas de plástico para determinación de la altura relativa entre el imán y el superconductor*

---

---

*Figura 3.6. Comparación entre alturas  $z$  de los diferentes imanes empleados en el estudio*

*Figura 3.7. Dispositivo medidor del ángulo de equilibrio o goniómetro.*

*Figura 3.8. Sistema de giro. Imán y eje de giro [izquierda] y cojinete de fricción [derecha].*

*Figura 3.9. Sistema de giro.*

*Figura 3.10. Recreación del sistema de medición: 1- Pastilla superconductora 2- Imán y eje de giro; 3- Goniómetro; 4- Cojinete de fricción; 5-Mesa 3D; 6- Mesa tipo Jack; 7- Recipiente contenedor del superconductor*

*Fig 3.11. Imagen real de la disposición final del sistema de medición.*

*Figura 3.12. Magnetómetro basado en efecto hall.*

*Figura 3.13.. Tratamiento gráfico de las imágenes registradas.*

*Figura 3.14. Desviación en la posición  $x=0$  respecto de la horizontalidad*

*Figura 3.15. Evolución del ángulo de equilibrio para 9 posiciones  $x$  en  $z=15$ .*

*Figura 3.16. Representación de los resultados obtenidos para  $z=15$  mm y  $x:[+34,-34]$ .*

*Figura 3.17. Dependencia entre la posición  $x$  y el ángulo de equilibrio para varias alturas  $z$ .*

*Figura 3.18. Dependencia del ángulo de giro con la posición  $x$  para imán cúbico y  $z=10$  mm.*

*Figura 3.19. Comparación para diferentes imanes del ángulo de equilibrio a  $z=10$  mm*

## **CAPITULO 4**

*Figura 4.1. Geometría generada para el estudio en Ansys.*

*Figura 4.2. Elementos. Superconductor e imán permanente.*

*Figura 4.3. Discretización en elementos finitos de los elementos de estudio.*

*Figura 4.4. Alzado del mallado del volumen de control y la pastilla superconductora.*

*Figura 4.5. Densidad corrientes superconductoras sobre la superficie del SC en A/m.*

*Figura 4.6. Variación del momento  $M_y$  de equilibrio con respecto a diferentes ángulos para la posición  $x= 15$  mm.*

---

---

*Figura 4.7 Comparación de datos teóricos y resultados experimentales para  $z=15\text{mm}$*

## **ANEXOS**

*Figura AI.1. Efectos de la carencia de oxígeno en el ser humano.*

*Figura AI.2 Guantes aislantes.*

*Figura AI.3. Gafas de protección.*

*Figura AI.4. Pinzas de plástico.*

*Figura AI.5. Depósito principal de nitrógeno líquido de la Universidad Carlos III de Madrid*

*Figura AI.6. Distancia de seguridad ( $d$ ) durante la recarga del tanque secundario*

*Figura AI.7. Posición de recarga segura del tanque*

*Figura AI.8. Maniobras seguras del desplazamiento del tanque hasta el laboratorio*

*Figura AII.1. Temperatura crítica de las  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  según su concentración de oxígeno  $X$ .*

*Figura AIII.1. Imanes 6,3x25,4.*

*Figura AIII.2. Imanes cúbicos  $l=5\text{ mm}$*

---

---

## **INDICE DE TABLAS**

### **CAPITULO 2**

*Tabla 2.1. Evolución histórica del campo de la superconductividad*

### **CAPITULO 3**

*Tabla 3.1.. Alturas relativas entre pastilla superconductora e imán para los diferentes experimentos del ensayo de medición del ángulo de equilibrio en efecto Meissner.*

*Tabla 3.2.. Posición longitudinal X para  $z= 15$  y  $18$  mm. La posición se mide desde el centro del superconductor al centro de gravedad del imán.*

*Tabla 3.3.. Posición longitudinal x para las medidas de  $z=10$  mm y  $z=12$  mm. y para imán cúbico  $z=10$  mm.*

*Tabla 3.4 Resultados para el ensayo de imán cilíndrico a  $z=15$ ,  $x=[34,-34]$ .*

*Tabla 3.5. Ángulo de equilibrio para el experimento de determinación de la dependencia del ángulo de equilibrio con la posición en efecto Meissner para imán cilíndrico.*

*Tabla 3.6. Datos recogidos para ensayo de imán cúbico y  $z=10$  mm*

### **CAPITULO 4**

*Tabla 4.1. Valores para fuerza, momentos y corrientes superficiales en el caso  $x=0.015$  m.*

*Tabla 4.2. Datos teóricos para ángulo de equilibrio para  $z=15$*

*Tabla 4.3. Comparación de los resultados experimentales y teóricos para  $z=15$ mm*

### **CAPITULO 5**

*Tabla 5.1. Elementos mínimos necesarios para el desarrollo del proyecto*

---

---

## **ANEXOS**

*Tabla AII.1. Dimensiones y características de las pastillas superconductoras.*

*Tabla AIII.1. Propiedades imán 6,3x25, 4mm*

*Tabla AIII.2. Propiedades de imán cúbico  $l=5$  mm*

*Tabla AIII.3. Propiedades físicas correspondientes a los imanes de calidad N42 y N50 de la empresa Supermagnete*

---

**AGRADECIMIENTOS**

Quisiera aprovechar esta oportunidad para agradecer, en primer lugar, a mis padres para que todo su apoyo incondicional se vea recompensado de algún modo.

También agradecer a mi tutor, Efrén Díez y a José Luis Pérez su plena confianza en mi desde el primer momento y sus sabios consejos.

Por último agradecer a Silvia todo lo que ha hecho para que esto pueda llevarse a cabo, pues es ella la que ha hecho posible esta nueva etapa de mi vida.

**RESUMEN**

La expulsión del campo magnético del interior de un superconductor debido al efecto Meissner genera un conjunto de fuerzas que son capaces de hacer levitar un imán. Las fuerzas generadas por este efecto han sido estudiadas indirectamente en este proyecto midiendo el ángulo girado por un imán sometido a efecto Meissner-Oschenfeld en su posición de equilibrio. Las interacciones de las distintas superficies de la pastilla superconductora con el imán para diferentes posiciones relativas entre este y la pastilla hacen el ángulo de equilibrio girado por el imán varíe compensándose así los momentos generados por las fuerzas de origen electromagnético del superconductor sobre el imán. Con ello se corrobora un modelo teórico planteado por los profesores José Luíz Pérez Díaz y Juan Carlos García Prada [1] de la Universidad Carlos III de Madrid.

Además el lector podrá consultar las condiciones de seguridad y precauciones a tener en cuenta cuando se emplea nitrógeno líquido, imanes y superconductores en el laboratorio, pudiéndose extrapolar algún conocimiento de este proyecto para el desarrollo de futuros experimentos similares.

A partir del texto a continuación se ha extraído un artículo que a fecha de defensa del presente proyecto ha sido aceptado para discusión en la 55ª edición de la Conferencia Anual de Magnetismo y Materiales Magnéticos y para su posterior publicación en el Journal Applied of Physics.

**Palabras clave:** efecto *Meissner*, *levitar*, *imán*, *superconductividad*, *ángulo de equilibrio*, *nitrógeno líquido*.

**ABSTRACT**

The expulsion of the magnetic flux due to Meissner effect in a superconductor creates forces that allows a permanent magnet to levitate over the superconductor. These forces have been studied in this project indirectly measuring the equilibrium angle by a permanent magnet under Meissner- Ochsensfeld effect.

The interaction of the different superconductor surfaces with the permanent magnet for different relative positions between the magnet and the superconductor makes the equilibrium angle to change, reaching the new equilibrium position.

The experimental results are in agreement to a theoretical model proposed by Doctors José Luís Pérez Díaz and Juan Carlos García Prada [1] from Universidad Carlos III de Madrid.

The reader also can find the necessary measures to avoid the hazards of using liquid nitrogen, permanent magnets and superconductors.

**Key words:** *Meissner effect, levitate, permanent magnet, superconductor, equilibrium, liquid nitrogen.*

---

# 1. OBJETIVOS DEL PROYECTO

---

**1. OBJETIVOS DEL PROYECTO**

El objetivo de este proyecto fin de carrera es avanzar en la comprensión del comportamiento mecánico del sistema magnético formado por un imán permanente y un superconductor de alta temperatura en estado Meissner.

Concretamente, se pretende analizar el efecto de alineamiento de un imán permanente con respecto a un superconductor en estado Meissner en distintas posiciones relativas.

Adicionalmente, se compararán los resultados experimentales con los valores teóricos proporcionados por un modelo teórico desarrollado en el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid por los profesores José Luís Pérez Díaz y Juan Carlos García Prada [1] con el fin de validar el modelo y extenderlo a su aplicación para pares de fuerzas.

Se redacta este proyecto para la obtención del título de Ingeniería Industrial.

---

## 2. INTRODUCCIÓN

---

## 2. INTRODUCCIÓN

### 2.1. Introducción a la superconductividad

#### 2.1.1. Definición de superconductor

La superconductividad es la propiedad de ciertos materiales que en determinadas condiciones reúnen dos características esenciales: la pérdida total de su resistencia eléctrica y la aparición del efecto Meissner-Ochsenfeld. [2]

#### 2.1.2. El fenómeno de la superconductividad

El fenómeno básico de la superconductividad contiene dos pilares fundamentales, la conductividad eléctrica perfecta y el diamagnetismo perfecto (fig.2.1), que hace al superconductor ideal impermeable a los campos magnéticos exteriores a partir de una longitud de penetración  $\lambda$  (fig.2.1 izquierda) específica de cada material.

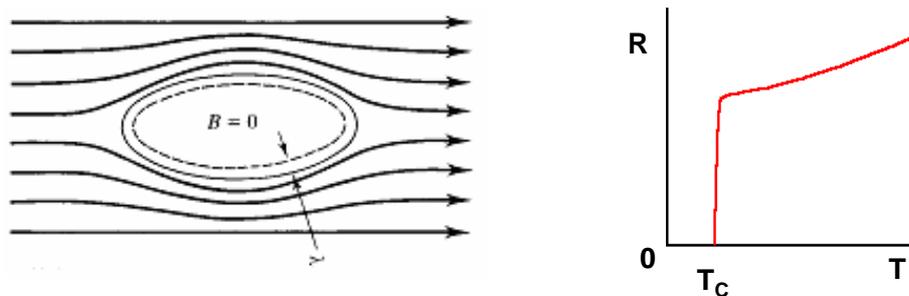


Figura 2.1. Efecto Meissner (izquierda) y comportamiento eléctrico de un superconductor en función de su temperatura (derecha).

Sin embargo, un campo magnético exterior suficientemente grande es capaz de destruir la superconductividad. La dependencia de este campo crítico con la temperatura se muestra en la figura 2.2.

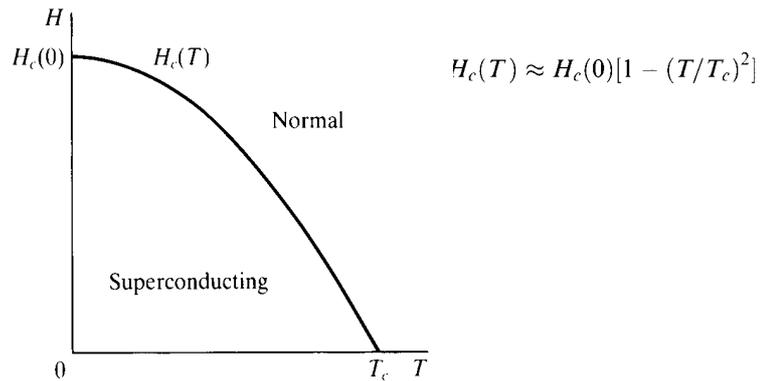


Figura 2.2. Campo magnético crítico en función de la temperatura de transición.

Otro hecho relevante de la superconductividad es la presencia de una discontinuidad en el calor específico de los materiales superconductores en la temperatura crítica, aumentando sensiblemente, para después variar de la forma que muestra la ecuación 2.1 muestra la variación del calor específico en función de la temperatura del superconductor.

$$C_v = aT + bT^3 \quad \text{si } T > T_c$$

$$C_v = \begin{cases} \text{constante} \cdot T^3, & \text{si } T \sim T_c \\ \text{constante} \cdot e^{-\alpha T_c/T}, & \text{si } T \sim 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

Siendo:

- $C_v$  el calor específico del material.
- $T$  la temperatura del superconductor.
- $a$  y  $b$  constantes que dependen de cada material.
- $T_c$  la temperatura de transición del superconductor.

### 2.1.3. Introducción histórica

La superconductividad fue descubierta por un equipo de científicos liderado por uno de los más brillantes discípulos de Johanes Diderik van der Waals, Heike Kamerlingh Onnes en el año 1911. Onnes estaba investigando sobre las propiedades del mercurio a muy baja temperatura cuando se dio cuenta de que la resistencia eléctrica de este elemento desaparecía bruscamente a una temperatura de 4,2 K (-269°C) cuando lo que pretendía encontrar era que esta descendiese gradualmente hasta el cero absoluto.

En ese mismo año, el propio Onnes, experimentando con imanes de alto campo fabricados con superconductores. Descubre que existe un campo magnético crítico que destruye la superconductividad de estos materiales aun permaneciendo la temperatura del mismo por debajo de la temperatura de transición. En 1916, se descubre que también existe un valor crítico para la corriente eléctrica que atraviesa el superconductor capaz de destruir la superconductividad.

En años sucesivos, la escasa comprensión del fenómeno impidió descubrimientos relevantes en este campo, limitándose las investigaciones a estudios fenomenológicos del estado superconductor. En el año 1933, Walter Meissner y Robert Ochsenfeld midiendo la distribución de flujo en el exterior de muestras de plomo y estaño por debajo de su temperatura crítica en presencia de un campo magnético descubrieron la desaparición total del flujo del campo magnético en el interior del material superconductor, lo que se denomina actualmente efecto Meissner o efecto Meissner-Ochsenfeld, que explicó además la existencia de superconductores de tipo II descubiertos por primera vez tres años antes por Wander Johannes de Haas y J. Voogd.

El descubrimiento de estos físicos alemanes no pudo explicarse hasta dos años más tarde cuando los hermanos Fritz y Heinz London desarrollan una serie de ecuaciones que determinan la forma que debe de tener un campo magnético aplicado para que se cumplan las condiciones fundamentales que se

---

dan en el efecto Meissner. Sin embargo las suposiciones de fondo de esta teoría no local eran erróneas.

Desde 1935 hasta 1953, los avances en este campo se limitaron prácticamente a sucesivos descubrimientos de materiales con temperaturas de transición cada vez más elevadas, lo que permitía un trabajo más viable sobre ellos.

Los avances más significativos en la comprensión del fenómeno físico subyacente a la superconductividad tuvieron lugar en la década de 1950. En 1950, Vitaly Ginzburg y Lev Landau dos físicos soviéticos desarrollaron una generalización de la teoría de London que, aunque actualmente se considere una de las dos teorías con más éxito, tuvo escaso auge entonces por su carácter fenomenológico que se centra en más en la teoría macroscópica. El contexto político existente en aquella época indujo que esta teoría fuese desconocida por lo científicos occidentales hasta una década después.

En 1952, basándose en la teoría Ginzburg-Landau, Alexei A. Abrikosov, un físico teórico ruso explicó cómo podía los campos magnéticos penetrar en el superconductor. Estos campos penetran en forma de vórtices en la pieza generando un estado mixto o de Abrikosov, lo que explicaba el comportamiento entre las temperaturas de transición superior e inferior de los superconductores de tipo II.

En 1953, Brian Pippard introdujo la longitud de penetración, y propuso una generalización no local de la ecuación de los hermanos London denominada ecuación de Pippard y que sería corroborada por posteriores teorías.

Finalmente en Julio de 1957 John Bardeen, Leon Cooper y John Schieffer desarrollaron la primera teoría aceptada para explicar la superconductividad. Se basaron en los efectos microscópicos subyacentes a la superconductividad en vez de fijarse en los efectos macroscópicos como la mayoría de sus predecesores.

---

Los fundamentos de esta teoría son el hecho de que los portadores de carga ya no son considerados electrones sueltos sino pares de electrones (electrones de Cooper) interactuando entre sí por la propagación de fonones a través de la red cristalina. El otro hecho fundamental es la presencia de una banda prohibida superconductor que implica que no podemos excitar con cualquier energía el par de Cooper, sino que este no se excita hasta que le aplicamos la energía necesaria para poder romper la relación existente entre ellos, momento en el cual la energía sobrante se convierte en energía cinética.

En 1960 se construyó un superconductor de Cobre cubierto de niobio-titanio para un acelerador electromagnético de partículas de altas energías en el laboratorio de Rutherford-Appleton en Inglaterra

Otra contribución de vital importancia para el mundo de los superconductores la realizó Brian David Josephson de la Universidad de Cambridge en el año 1962. Es el denominado efecto Josephson, que explica la aparición de una corriente eléctrica por efecto túnel entre dos superconductores separados por una barrera potencial que desde un punto de vista clásico resulta infranqueable, compuesta por material no superconductor.

Es en 1962 cuando científicos de Westinghouse desarrollan el primer alambre superconductor comercial compuesto por una aleación de Niobio y Titanio.

Pequeños avances siguieron teniendo lugar hasta llegar a la década de los 80, década vital para el desarrollo de los superconductores. En 1986, Alex Muller y George Bednorz (ganadores del Nobel en 1987) detectaron superconductividad en una cerámica  $(\text{LaBa})_2\text{CuO}_4$  a una temperatura  $T_c$  superior a 35 K. En 1987, se emplea por primera vez el superconductor desarrollado en los 60 para un acelerador de partículas en el Fermilab.

En ese mismo año, Maw-Kuen Wu y Paul C. W. Chu sustituyen el Lantano de Muller y Bednorz por Itrio, inventando la famosa cerámica superconductor  $\text{YBaCuO}$  superconductor a 93 K y que por tanto se podría

---

enfriar con nitrógeno líquido. Desde entonces, los descubrimientos de nuevos compuestos superconductores de alta temperatura se han disparado.

En marzo de 2001 se descubren las propiedades superconductoras del Bromuro de Magnesio  $MgBr_2$  cuya temperatura crítica es de 39 K la más alta de los superconductores convencionales. La ventaja de este compuesto difícil de sintetizar es que con él pueden fabricarse cables, a diferencia de los compuestos cerámicos de mayor temperatura crítica.

El 6 de Marzo de 2008 se descubrió que el  $(Sn_{1.0}Pb_{0.5}In_{0.5})Ba_4Tm_5Cu_7O_{2+}$  tiene propiedades superconductoras a 185,6 K (-87°C).

También en Marzo de ese mismo año, un equipo compuesto por científicos canadienses y alemanes fabrican un compuesto de silicón e hidrógeno (Silano( $SiH_4$ )) que sometido a grandes presiones puede trabajar como superconductor a altas temperaturas incluso sin necesidad de refrigerante.

En la tabla 2.1 se muestra un resumen gráfico de la introducción histórica.

AÑO	HECHO
1911	Heike Onnes descubre superconductividad en el Mercurio.
1916	Se descubre la ruptura de la superconductividad para un corriente crítica.
1930	Wander Johannes de Haas y J. Voogd descubren la existencia de los superconductores de Tipo II.
1933	Meissner y Ochsenfeld descubren la impermeabilidad magnética de los superconductores explicando la existencia de superconductores de tipo II.
1935	Los hermanos London proponen su teoría para determinar la forma necesaria que debe tener un campo magnético para producir efecto Meissner.
1952	Alexei A. Abrikosov explica la penetración de los campos magnéticos en superconductores mediante su teoría de vértices.
1953	Brian Pippard introduce la longitud de coherencia y propone su generalización no local de las ecuaciones de los hermanos London.
1957	Nace la teoría BSC (Bardeen, Schieffer, Cooper) que explica la superconductividad con los pares de Cooper. Es la teoría aceptada actualmente.
1962	Brian David Joshepson explica el efecto túnel en superconductores, efecto que recibiría su nombre.
	Científicos de Westinhouse desarrollan el primer cable comercial superconductor compuesto de una aleación de Niobio y Titanio.
1987	Max-Kuen Wu y Paul C. W. Chu sintetizan por primera vez el compuesto cerámico YBaCuO de $T_c = 93$ K.
1989	ISCO Internacional comercializa un sensor de profundidad para equipos médicos con componentes superconductores.
2008	Se descubre la primera cerámica superconductora a $T^a$ ambiente, $T_c = 185,6$ K.
	Se demuestra que el Silano ( $\text{SiH}_4$ ) posee propiedades superconductoras a altísimas presiones a temperatura ambiente.

Tabla 2.1. Evolución histórica del campo de la superconductividad.

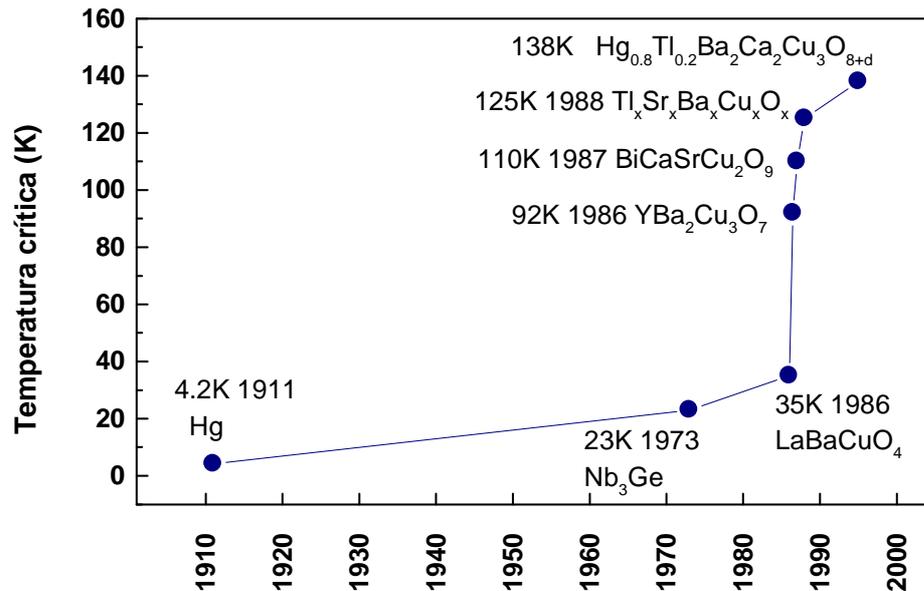


Figura 2.3. Evolución histórica de la evolución de superconductores y sus temperaturas de transición.

#### 2.1.4. Clasificación de los superconductores

Los superconductores pueden clasificarse atendiendo a diferentes criterios. En este proyecto se analizan tres de ellos: por su comportamiento físico, por la temperatura crítica y por la teoría que los explica.

##### 1. Comportamiento físico

Dos son las clases de superconductores atendiendo a esta clasificación y son los siguientes:

- **Tipo I:** Son aquellos superconductores capaces de mantener el campo magnético en su interior nulo hasta que el campo magnético exterior rompe el estado superconductor. Cuando el superconductor se encuentra en este estado, se dice que está en estado Meissner..

- **Tipo II:** Son aquellos en los cuales el campo magnético en su interior pasa por un estado de transición donde ciertas líneas de flujo cuantizadas (vórtices) se introducen en el sin destruir su estado superconductor. Cada vórtice genera en su interior exactamente un fluxoide de valor  $\varphi_0 = 2,07 \times 10^{-7} \text{ gauss}\cdot\text{cm}^2$ . Este estado se produce entre el estado superconductor y el estado normal, denominado estado mixto (fig 2.4).

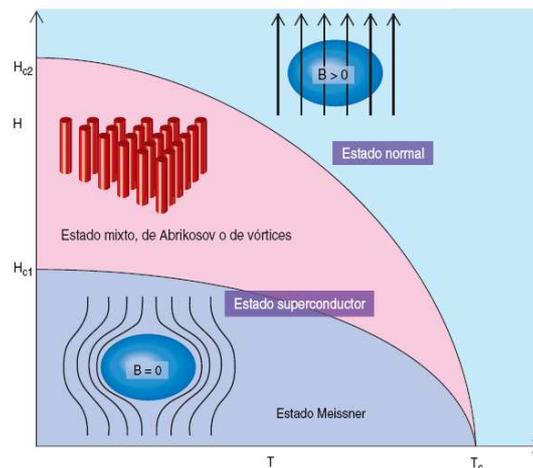


Figura 2.4. Fases de un superconductor tipo II.

## 2. Temperatura crítica

- **Superconductores de baja temperatura:** Aquellos cuya temperatura de transición al estado de superconductividad  $T_c$  es menor a 77 K.
- **Superconductores de alta temperatura:** Aquellos cuya temperatura de transición al estado de superconductividad  $T_c$  es mayor a 77 K.

La razón por la cuál se selecciona esta temperatura para diferenciar ambas clases de superconductores es que para temperaturas superiores a 77 K podemos emplear nitrógeno líquido para enfriar el superconductor mientras que para temperaturas inferiores debemos emplear helio líquido, mucho más caro y de manejo más complicado.

### 3. Por la teoría que los explica

- **Superconductores convencionales:** Son aquellos cuyo comportamiento puede ser explicado mediante la teoría BCS. A este grupo pertenecen por ejemplo los metales como el Mercurio y en general todos los superconductores del tipo I.
- **Superconductores exóticos:** También denominados no convencionales y su comportamiento no puede explicarse con la teoría BCS. Se considera un problema no resuelto en física. Para su estudio se emplea la teoría de Ginzburg-Landau que es una teoría macroscópica. A este grupo pertenecen la mayoría de los compuestos del tipo II.

#### 2.1.5. El efecto Meissner

Como se ha comentado en apartados anteriores el efecto Meissner es un suceso físico que define en parte la superconductividad. Se caracteriza por la expulsión del campo magnético aplicado en el interior de un material superconductor bajo ciertas circunstancias de temperatura, campo magnético aplicado y corriente eléctrica aplicada que permitan al material permanecer en estado superconductor. Bajo estas circunstancias el superconductor se comporta como un material diamagnético perfecto.

En consecuencia, se cumple la ecuación 2.2, siempre y cuando el superconductor sea de tipo I.

(2.2)

$$\begin{aligned} B &= \eta_0 (\vec{H} + \vec{M}) = 0 \\ \vec{M} &= -\vec{H} \end{aligned}$$

Siendo:

- $B$ = Densidad de campo magnético en el interior del superconductor

- $\eta_0$ = La permeabilidad magnética del medio.

- $H$ = Intensidad de campo magnético aplicado.

- $M$ = Magnetización de la pastilla superconductora.

Si el material superconductor es de tipo II (apartado 2.1.3), entonces entre el estado superconductor y el estado normal aparece un estado mixto que permite la penetración del campo magnético en el superconductor sin destruir su superconductividad.

Dicho lo anterior, el superconductor genera una fuerza de repulsión sobre el dipolo magnético que genere el campo que se puede medir y analizar.

Suponiendo un caso en el que se dispusiera de un imán permanente y de un material en estado superconductor, si se acercase el imán a éste último, el imán saldría despedido debido a las fuerzas de repulsión.

Si por el contrario, si se fuerza una aproximación mayor entre ambos, oponiéndose a la fuerza de repulsión, llega un momento en el cual el campo magnético penetra en el superconductor y el imán queda anclado a este, adoptando una posición de equilibrio estable en los 6 grados de libertad del espacio (fig. 2.5.). Esto no sucede en los sistemas de levitación magnética basados exclusivamente en imanes, donde la posición de equilibrio es siempre inestable.



*Figura 2.5. Imán levitando sobre superconductor en posición de equilibrio estable.*

### 2.1.6. El YBa2Cu3O7-x

El YBa2Cu3O7-x es el material cerámico superconductor no convencional de tipo II y alta temperatura de transición empleado en los experimentos del presente proyecto.

Algunas de sus propiedades características son:

- **Temperatura de transición**  $T_c = 92$  K. Permite la utilización de nitrógeno líquido puesto que su temperatura de fusión es 77,35 K aproximadamente. Ver referencia.
- Su **longitud característica de penetración**  $\lambda$  es de 170 nm y su **longitud coherente**  $\xi$  toma el valor de 1,8 nm.

Este compuesto presenta una estructura cristalina característica tipo perovskita (fig. 2.6) Esta estructura es fundamental par sus propiedades puesto que es conocido que las corrientes en el estado superconductor fluyen principalmente por las capas de CuO<sub>2</sub> en la dirección paralela al plano ab.

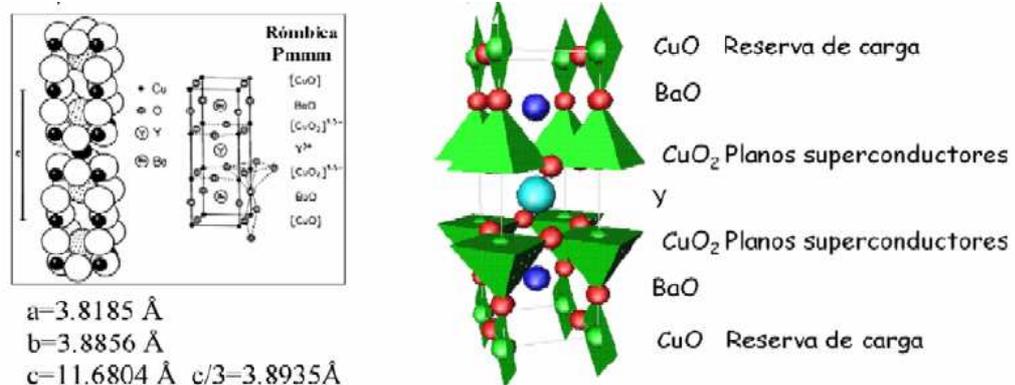


Figura 2.6. Dos representaciones de la red cristalina de YBaCuO

La presencia de oxígeno en la estructura cristalina es esencial para la superconductividad puesto que varía las dimensiones a,b y c. Por ello la presencia de oxígeno extra (x) determina la temperatura crítica del superconductor (fig. 2.7) siendo máxima para x=0.

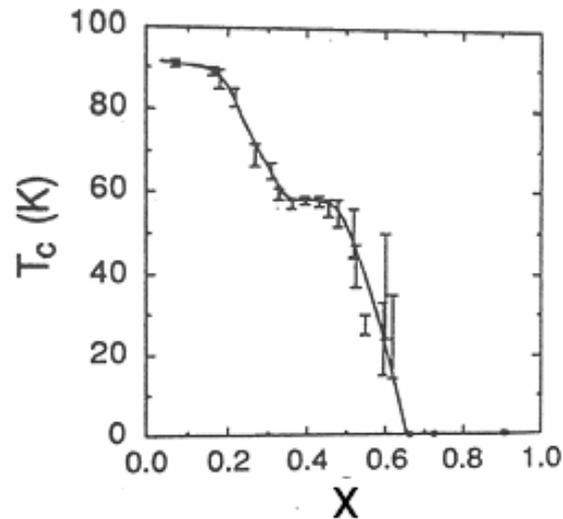


Figura 2.7. Representación de la temperatura crítica del  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  frente al contenido de oxígeno  $X$ . Apréciase la presencia de dos mesetas.

### 2.1.7. Aplicaciones: Estado del arte

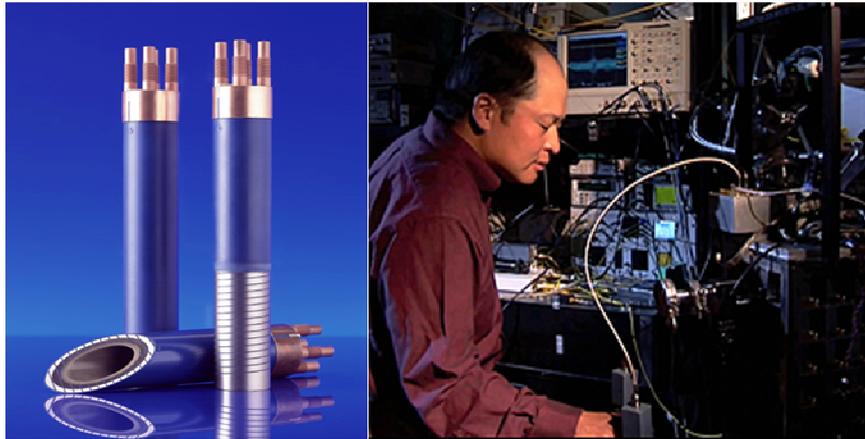
La aplicación práctica de los superconductores dejó de ser una quimera hace décadas, gracias a la obtención de materiales de temperaturas de transición cada vez mayores hasta el punto de poder emplear nitrógeno líquido para enfriarlos, un compuesto barato y fácil de emplear. Hoy en día es bastante habitual su uso en muchos campos, siendo de mayor utilidad actualmente en lo referente a la creación de electroimanes de alta potencia [3].

A continuación se comentarán brevemente algunas de las aplicaciones más comunes, dividiendo las utilidades de los superconductores según el campo de aplicación.

#### ▪ Campo de la electrónica

Las posibilidades en el campo de la electrónica son sin lugar a dudas una de las más importantes puesto que se emplean para hacer circuitos digitales y filtros de radiofrecuencia y microondas para estaciones base de telefonía.

También se emplean como detector de fotones de alta eficacia y limitadores de corriente (fig. 2.8).



*Figura 2.8. Limitador de corriente (izquierda) y detector de fotones de alta precisión (derecha.)*

Una aplicación reciente de grandísima utilidad y perspectivas prometedoras es la construcción de sensores fotométricos que miden con precisión una señal compuesta por muchos fotones sirven para múltiples aplicaciones actualmente, como la detección de materiales con los que se podría construir un arma nuclear en las aduanas de EEUU, buscar defectos en los microchips y una amplia gama de otras aplicaciones [3].

Estos detectores están basados en tecnología SQUID, dispositivos superconductores de interferencia cuántica de sus siglas en inglés y que aprovechan un complejo efecto cuántico denominado efecto túnel para detectar y medir campos magnéticos extremadamente pequeños.

#### ▪ Campo del transporte

Una de las mayores utilidades del efecto Meissner es la posibilidad de levitación de un imán sobre la superficie de superconductores (ver apartado 1.2). Haciendo uso de este efecto se han conseguido medios de transporte sobre carriles como el Maglev Train de Japón (fig 2.9), que reducen la fricción propia del contacto rueda-vía de los ferrocarriles, permitiendo obtener velocidades de

hasta 400 km/h mejorando la seguridad del desplazamiento puesto que el riesgo de descarrilamiento se reduce considerablemente [4].

Debido a la desaparición de efectos disipativos de la energía debido al rozamiento, se podrían obtener trenes más eficientes energéticamente que aumentasen su eficiencia y redujesen las emisiones de gases contaminantes.



*Figura 2.9. The Yamanashi MLX01 MagLev train. y equipo superconductor.*

▪ Campo de la medicina y la química.

Actualmente se emplea en los equipos de resonancias magnéticas más potentes.

También se emplea en los aparatos SQUIDS capaces de detectar variaciones en campos magnéticos 100 billones de veces inferior al campo magnético de la tierra, permitiendo analizar los órganos internos sin aplicar grandes campos magnéticos. Esta técnica es especialmente útil para el estudio del cerebro humano (fig. 2.10), donde las corrientes eléctricas existentes debido a la frenética actividad cerebral general campos magnéticos variables de intensidades muy pequeñas.

Otras aplicación actuales son la espectroscopia de rayos X que permite el análisis de metales en proteínas y otras muestras, la detección eficiente de

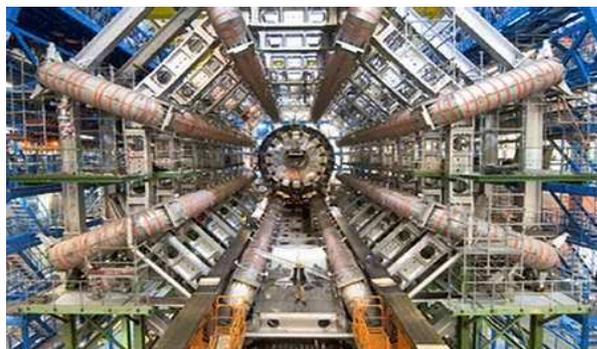
grandes polímeros biológicos y fragmentos de ADN en espectrómetros de masas que tiene aplicaciones en genómica, proteómica, descubrimientos de medicamentos y análisis de compuestos naturales [3].



*Figura 2.10. SQUID (izquierda) y tomografía cerebral aprovechando esta tecnología (derecha)*

#### ▪ Campo de la física

Los aceleradores de partículas se han hecho imprescindibles para ampliar los horizontes del conocimiento humano en la física atómica. La posibilidad de conseguir campos magnéticos cada vez más potentes para su utilización en estos aceleradores permiten impulsar las partículas en su recorrido a lo largo del acelerador. Estos potentísimos campos magnéticos, capaces de acelerar las partículas de los experimentos a velocidades cercanas a las de la luz, sólo pueden conseguirse empleando electroimanes construidos con superconductores (fig. 2.11).



*Figura 2.11. Imanes Superconductores de acelerador de partículas del CERN.*

- Campo militar

Los SQUIDS se emplean para detectar submarinos, y se emplean motores superconductores en barcos navales en la actualidad. [3].

- Investigación espacial y astronómica

Las aplicaciones son muy diversas, no solo en el espacio donde las temperaturas cercanas al cero absoluto permite la no refrigeración de los superconductores sino también en el estudio del Cosmos desde la tierra como por ejemplo se instaló en el año 2007 en el telescopio Clekr Maxwell en Hawai una matriz de sensores compuesta por un chip multiplexor SQUID basado en tecnología superconductora. [3].

Los satélites proyectados actualmente empiezan a incluir sistemas de posicionamiento ultraprecisos basados en tecnología de superconductores utilizando esferas superconductoras esféricas que al girar sobre si mismas generan un campo magnético perfectamente alineado con su eje de giro. Este curioso efecto fue descubierto por Fritz London y permite un posicionamiento mucho más preciso de los satélites. [5]

- Campo de la industria

Se emplean superconductores en la separación magnética para disociar materiales paramagnéticos de ferromagnéticos en la industria del caolín para separar sustancias magnéticas de la arcilla y para la limpieza selectiva del carbón. También se emplean como sensores y transductores para multitud de aplicaciones [3].

### 2.1.8. Aplicaciones: Perspectiva futura

A continuación se exponen algunos proyectos futuros que se manejan en la actualidad con el fin de crear una sensibilidad en el lector del presente proyecto ante el inmenso potencial del campo de la superconductividad.

#### 2.1.8.1. Transporte de energía eléctrica

Puesto que los superconductores permiten el paso de la corriente eléctrica sin resistencia alguna, se presentan como medios de transporte perfectos para evitar las pérdidas por calentamiento del efecto Joule y así ahorrar energía en su transporte. Los cables compuestos de superconductores de alta temperatura actualmente permiten quintuplicar la capacidad de transporte.

En la actualidad hay dos tipos de cables superconductores. El diseño más simple, denominado warm-dielectric cable en inglés consta de un conductor sencillo formado por cables reunidos alrededor de un núcleo flexible por donde circula el nitrógeno líquido que actúa como refrigerante (fig. 2.12)

Un diseño alternativo, denominado cable de enfriamiento dieléctrico, emplea capas concéntricas de cables de HTS y material dieléctrico que garantiza un aislamiento eléctrico compatible con las bajas temperaturas. El líquido refrigerante (nitrógeno líquido) fluye entre las capas de los alambres aportando refrigeración y comportándose a la vez como aislante dieléctrico [6]. La construcción de este tipo de cables puede consultarse en la figura 2.12.



Figura 2.12. Cables superconductores: Tipo I (izq) y enfriamiento dieléctrico (drcha).

Hay que mencionar que las cualidades mecánicas de los nuevos materiales superconductores cerámicos para la fabricación de alambres son muy pobres. Sin embargo, se está trabajando febrilmente en desarrollar una tecnología que permita hacer alambres con los nuevos materiales superconductores cerámicos; ya se están comercializando algunas pequeñas bobinas para diferentes usos, especialmente en las fábricas de componentes electrónicos muy pequeños [3].

### **2.1.8.2. Otras aplicaciones**

Otras aplicaciones muy prometedoras del campo de la superconductividad son:

- Generadores y máquinas de alto rendimiento e incluso transformadores mucho más eficientes: El rendimiento de estos generadores rebasaría un 99% y el tamaño sería alrededor de la mitad de los convencionales. Además, cables superconductores en vez de cobre, podrían aumentar la transmisión de energía en un cable, por lo que se mejoraría hasta en un 7000% la eficiencia con respecto al espacio utilizado [7]
  
- En el área de computación tienen aplicaciones sorprendentes. Se pretende construir computadoras "petraflop", las cuales pueden realizar mil trillones de operaciones por segundo, mientras que la más avanzada tecnología en computadoras sólo puede realizar 12.3 trillones de operaciones por segundo. Para alcanzar estas velocidades, el tamaño del sistema sería del orden de alrededor de 50 nanómetros y basados en el efecto Josephson, en vez del sistema de switch en microchips convencionales [3].

- La NASA tiene prevista la creación de un sensor ultrasensible para el fondo de microondas basado en superconductividad. [3].
  
- Las aplicaciones tecnológicas son cada vez más amplias y se están desarrollando un elevado número de prototipos de máquinas de muy diversas aplicaciones. [3].

## **2.2. Introducción al experimento**

La levitación debida al efecto Meissner es posiblemente el fenómeno más popular utilizado para demostrar la superconductividad. De hecho, el interés por este fenómeno va más allá de una manifestación, incluye su uso potencial de los vehículos o mecanismos [8-11]. El fenómeno resulta bastante complejo, pues la expulsión del campo magnético del interior del superconductor presenta un problema físico que a día de hoy no está resuelto en toda su extensión [ver apartado]. Es un campo interesante y complejo que atrae, cada vez más la atención de científicos alrededor de todo el mundo [12-14].

Puesto que el material superconductor empleado en este experimento es de tipo II, mientras el campo magnético aplicado no sobrepase el campo crítico inferior, el campo magnético será expulsado del superconductor. Esto generalmente se conoce como el efecto Meissner.

Esta repulsión magnética puede ser mecánicamente analizada al medir las fuerzas de repulsión que ejerce un superconductor sobre un generador de campo magnético finito (normalmente imanes permanentes o bobinas). Muchos de los experimentos en la literatura actual utilizan sistemas de medición de fuerzas como las células de carga o galgas extensiométricas empleadas en una viga sometida a flexión para medir las fuerzas entre el imán y el superconductor [15-18]. Otros investigadores se han centrado en la medida del par para poder medir indirectamente estas fuerzas [1]. Este es el caso de este experimento.

En el experimento desarrollado aquí, se pretende analizar la interacción imán-superconductor mediante la medición del ángulo que el imán es capaz de inclinarse debido a las fuerzas a las que se ve sometido en el efecto Meissner.

El giro de un imán permanente sobre un superconductor cilíndrico es el único grado de libertad permitido en el experimento. Se ha registrado el ángulo de giro del imán permanente en diferentes posiciones relativas entre el superconductor y el imán. Los resultados son útiles para saber cómo se mueve el imán y la comparación de los resultados experimentales obtenidos con los cálculos teóricos servirá para verificar un modelo teórico (ver apartado 4.1) y permitirá avanzar en el sentido de la

aplicabilidad de un modelo matemático para el futuro de los diseños mecánicos del Departamento basados en este importante efecto de la superconductividad.

Para la realización de este experimento, se emplean dos imanes de dimensiones y propiedades recogidas en el Anexo III. Un primer imán de 25,4 mm de longitud se emplea para realizar el grueso de los experimentos y posteriormente, para comprobar la dependencia de la posición de equilibrio con la geometría del imán se utiliza un imán cúbico de 5 mm de lado de las mismas propiedades magnéticas (coercitividad 875 kA/m y campo magnético 1.29 Tn). Con ello se pretende observar como afecta la geometría del imán a los resultados obtenidos.

---

### 3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

---

---

### 3. **ESTUDIO EXPERIMENTAL**

#### 3.1. **Equipo y material empleado**

Para la realización de este ensayo se ha trabajado en el Laboratorio 1.0.C03 de la Universidad Carlos III de Madrid utilizando los siguientes recursos:

##### 3.1.1. **Pastilla superconductora**

Se trata de un cilindro cerámico compuesto de  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  adquirido a la empresa alemana THEVA. La pastilla superconductora en forma de disco tiene un diámetro de 45 mm (fig 3.1). Pueden consultarse sus características más detalladas en el Anexo II.



*Figura 3.1. Pastilla superconductora.*

##### 3.1.2. **Imán permanente**

Se emplean imanes de forma cilíndrica de 6,35 mm de diámetro y 25,4 mm de longitud y de magnetización N42 en dirección axial de la empresa alemana Supermagnete S.A. También se utiliza un imán cúbico de 5 mm de lado y magnetización N42. Para más información consultar el Anexo III.

### 3.1.3. Nitrógeno Líquido (N<sub>2</sub>)

Se emplea para enfriar la pastilla superconductor por debajo de la temperatura de transición. La temperatura de ebullición a presión ambiente de este compuesto es de aproximadamente 77 K (-195,8 °C), lo que permite alcanzar la fase superconductor en la pastilla cuya temperatura crítica de transición se encuentra entre los 90 y los 95 K según especificaciones del fabricante [20].

El nitrógeno molecular o diatómico es un gas inerte, metálico, incoloro, inodoro e insípido. En estado líquido se produce industrialmente en grandes cantidades por destilación fraccionada del aire líquido.

La utilización de este compuesto puede presentar riesgo para las personas por lo que se deben seguir una serie de consejos de seguridad (ver apartado 3.2).

#### **Almacenamiento de nitrógeno líquido**

Inicialmente, el nitrógeno líquido es almacenado en un tanque cercano al laboratorio. Con el fin de evitar constantes desplazamientos al punto de abastecimiento, se utiliza un tanque secundario menor, de 32 litros de capacidad (fig.3.2) que se almacena en el laboratorio adecuadamente señalizado. Esto permite un manejo cómodo y eficaz del nitrógeno líquido.



*Figura 3.2. Tanque secundario de nitrógeno líquido de capacidad 32 litros.*

Por último, se utiliza un vaso Dewar (fig.3.3) como recipiente final antes de su utilización que aporta manejabilidad y aislamiento térmico para evitar la rápida evaporación del nitrógeno líquido a temperatura ambiente.



*Figura 3.3. Vaso Dewar empleado en el experimento.*

Se recomienda nuevamente revisar el apartado Seguridad en el Laboratorio (apartado 3.2) donde se exponen claramente los riesgos del empleo de nitrógeno líquido así como las precauciones tomadas durante el desarrollo de los ensayos y que se recomienda seguir en futuros experimentos similares desarrollados en el Departamento.

#### **3.1.4. Contenedor para el superconductor**

Es un recipiente compuesto de polietileno impermeable al nitrógeno líquido que permite un enfriamiento eficiente y duradero de la pastilla. Las dimensiones del mismo son 60x60 mm y tiene una altura de 30 mm. La profundidad del mismo se ajusta bastante a la altura del superconductor para permitir medidas cercanas a su superficie sin entrar en contacto con el nitrógeno líquido.

También se emplean elementos de fijación que aseguran que la pastilla superconductora permanezca siempre en la misma posición dentro del recipiente.

Tanto el recipiente como los elementos de fijación se sitúan sobre una mesa tipo Jack anclada a su vez sobre la mesa de ensayos, reduciendo la movilidad del sistema con el fin de asegurar un procedimiento de medición lo más riguroso y exento de variaciones accidentales en la medida de lo posible.

### **3.1.5. Sistema de posicionamiento y medición del ángulo de equilibrio**

Para realizar las medidas en diferentes posiciones relativas entre el imán permanente y la pastilla superconductora, se emplea una **mesa 3D** (fig. 3.10) capaz de actuar sobre los grados de libertad necesarios en cada caso, según se explica a lo largo de este apartado.

Los tres grados de libertad implicados en este ensayo son los siguientes (fig. 3.4):

1. Altura relativa entre el imán y el superconductor  $z$ .
2. Posición longitudinal del imán  $x$ .
3. Ángulo de equilibrio  $\theta$ .

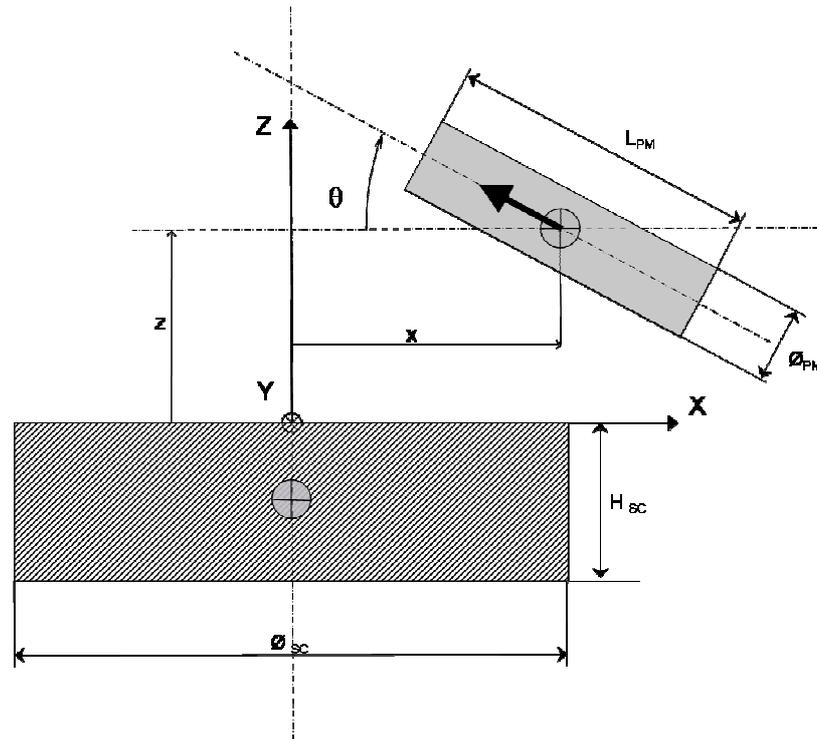


Figura 3.4. Representación y sistema de referencia para el estudio de la posición de equilibrio.

Para determinar con exactitud cada uno de estos grados de libertad se emplean en combinación con la mesa 3D una serie de componentes adicionales que permiten fijar las distancias necesarias de forma más eficaz. Su error por tratarse de un elemento analógico es de la mitad de la mínima medida que se puede tomar y tiene el valor de 0.5 mm.

- Altura relativa (z): Se emplean varias placas milimetradas de 2 y 5 mm de espesor (fig. 3.5). Una vez situadas las placas sobre la superficie del superconductor, se regula la altura de la mesa 3D para ajustar la distancia imán-superconductor a la distancia deseada. Se debe tener en cuenta que esta distancia, es entre caras, y que hasta el eje de rotación en el caso del imán cilíndrico se deben sumar 3 mm correspondientes a la distancia entre el eje de simetría del imán y el eje de giro (fig. 3.6).



Figura 3.5. Pletinas de plástico para determinación de la altura relativa entre el imán y el superconductor.

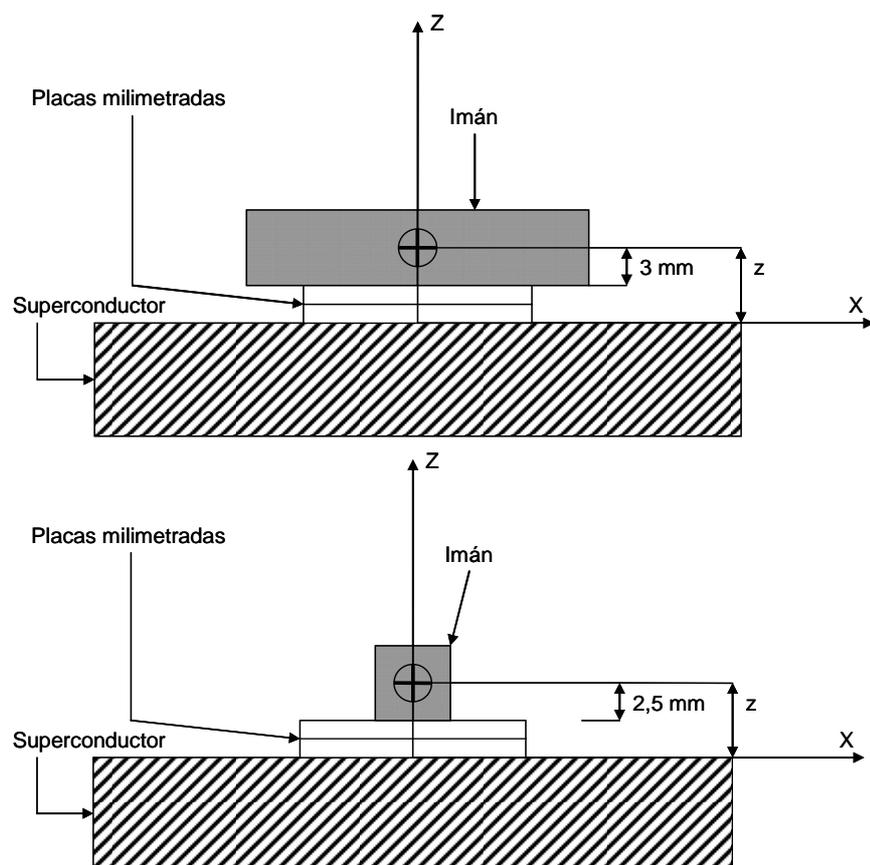


Figura 3.6. Comparación entre alturas  $z$  de los diferentes imanes empleados en el estudio.

En el caso del imán cúbico, la distancia real  $z$  es 0,5 mm menor, pues del eje de rotación a la cara del imán hay 2,5 mm en lugar de 3mm del caso del superconductor cilíndrico (fig3.6). Debido a lo insignificante de esta discrepancia y a efectos prácticos para conseguir una buena comparación entre los efectos de los imanes, se empleará el semicanto del imán cúbico igual a 3mm.

- Posición longitudinal ( $x$ ): Se regula mediante un accionador manual situado en la mesa 3D disponible.
- Ángulo de equilibrio ( $\theta$ ): Se emplea un goniómetro consistente en un semidisco graduado con precisión de  $0,5^\circ$  (fig3.7).

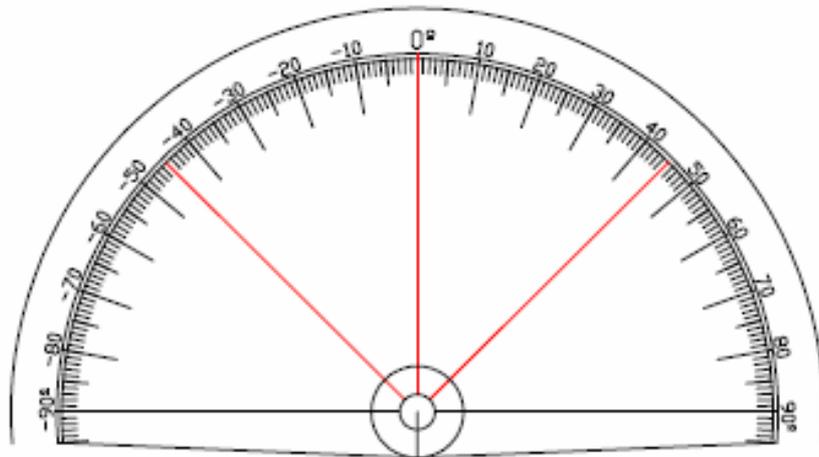


Figura 3.7. Dispositivo medidor del ángulo de equilibrio o goniómetro.

Como puede apreciarse en la figura anterior, su base no es perfectamente recta. Esto se debe a que de esta manera se puede aprovechar al máximo el recorrido de  $Z$  (fig.3.4) sin que los extremos del dispositivo medidor interaccionen con el recipiente del nitrógeno líquido, cosa que ocurre para las medidas de 10 y 12 mm de altura relativa ( $z$ ) entre el imán y la pastilla superconductora para algunas de las medidas realizadas en las posiciones laterales más alejadas del centro de la pastilla ( $x=0$ ).

### 3.1.6. Sistema de giro

Para permitir el giro del imán se emplea un sistema compuesto por los elementos citados a continuación:

1. Imán: Como se comentó en el apartado 3.1.2, se emplean dos imanes diferentes. El primero, de dimensiones 25,4x6,3 mm es un cilindro considerado perfecto de magnetización axial, de diámetro. Sus propiedades físicas y magnéticas se encuentran recogidas en el anexo III. A continuación se emplea un imán cúbico de 5 mm de lado y propiedades magnéticas recogidas también en el anexo III. Los siguientes componentes de giro se explican exclusivamente para el imán cilíndrico, suponiéndose idénticos para el imán cúbico a excepción, claro está, de las características del imán.
2. Eje de rotación: Compuesto por un cilindro plástico hueco de pequeño diámetro (fig. 3.8)
3. Sistema de fijación eje-imán: Compuesto por un adhesivo industrial adecuado para el experimento que se aplica en la zona a unir, procurando un posicionamiento simétrico eje sobre el imán.(fig. 3.8) La precisión máxima estimada en esta unión es de 1 mm y por lo tanto se espera un desequilibrio que afecta a las medidas y se tendrá en cuenta durante el análisis de resultados.
4. Cojinete de fricción: Formado por un cojinete cilíndrico de polipropileno de longitud 50 mm (fig. 3.8) fijo en uno de sus extremos sobre el banco de ensayos que permite un ajuste adecuado entre el eje de rotación y las dimensiones interiores del cojinete.
5. Lubricante: Se emplea lubricante para minimizar la fricción entre el eje de giro y el cojinete de fricción. Este efecto de carácter disipativo de la energía reduce inexorablemente el giro experimentado por el imán e introduce un error en las medidas.

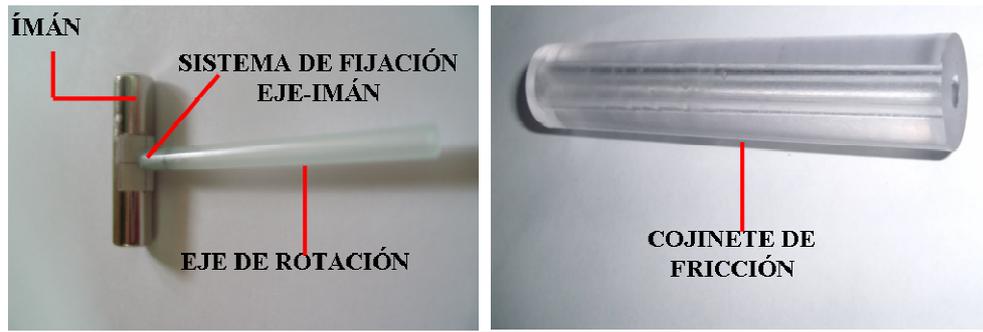


Figura 3.8. Sistema de giro. Imán y eje de giro [izquierda] y cojinete de fricción [derecha].

La combinación de los componentes anteriores permite girar libremente al imán (fig. 3.9), pudiendo recogerse entonces los ángulos de equilibrio para su posterior análisis.

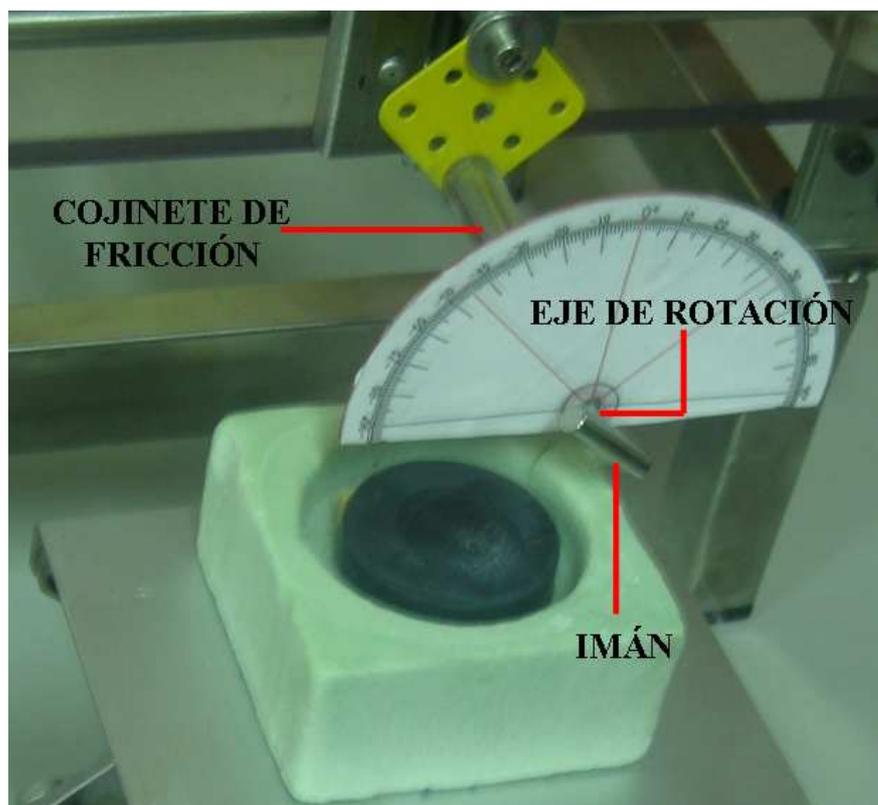


Figura 3.9. Sistema de giro.

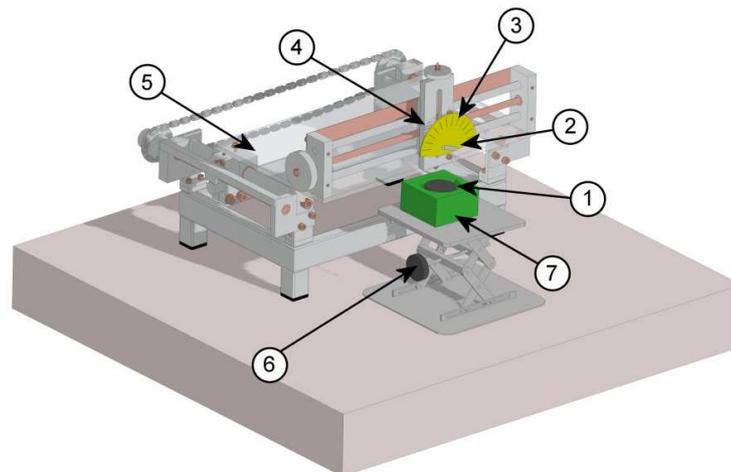
### 3.1.7. Sistema de registro

Para poder almacenar las medidas tomadas y realizar un registro minucioso de las mismas, se decidió emplear una cámara fotográfica de resolución de 9 megapíxeles. Las fotografías son almacenadas en una tarjeta de memoria para su posterior almacenamiento en una unidad de procesamiento adecuada (PC portátil). La cámara está situada sobre un trípode cuya posición se mantiene fija durante todo el ensayo.

Por cada posición registrada en el experimento, se toma una fotografía para su posterior procesamiento.

### 3.1.8. Disposición final de elementos

Una vez se dispone de todos los elementos mencionados con anterioridad, se procede a su ensamblaje y colocación para poder iniciar el experimento. Se puede consultar la disposición final del banco de ensayo en la figura 3.10, que es una recreación tridimensional del banco de ensayos y en la figura 3.11, que es una imagen real.



*Figura 3.10. Recreación del sistema de medición: 1- Pastilla superconductora 2- Imán y eje de giro; 3- Goniómetro; 4- Cojinete de fricción; 5-Mesa 3D; 6- Mesa tipo Jack; 7- Recipiente contenedor del superconductor*



*Fig 3.11. Imagen real de la disposición final del sistema de medición.*

### **3.1.9. Sistema de análisis de resultados**

Se emplea el programa informático Adobe Photoshop CS5 para analizar las fotografías tomadas y obtener así resultados precisos del ángulo de equilibrio. El tratado de las imágenes y el procedimiento seguido se concreta en el apartado 3.3.4. Los efectos del cambio de perspectiva para las diferentes posiciones y fotografías, se encontraron despreciables.

### **3.2. Seguridad en el Laboratorio**

El experimento que se describe maneja elementos de riesgo para la seguridad del investigador y de cualquier persona cercana que se pudiese verse afectada por el trabajo realizado en el laboratorio. Por ello se desarrolla una serie de consejos de seguridad que se han seguido durante el transcurso de los ensayos y que se recomienda seguir en futuros experimentos que se realicen empleando los materiales y equipos aquí utilizados.

La información de seguridad se ha recogido en el anexo I del presente proyecto.

### **3.3. Metodología experimental**

La metodología experimental seguida durante la realización del ensayo ha sido, suponiendo que el banco de ensayos está en su posición final y los elementos correctamente situados para empezar el ensayo, la siguiente:

#### **3.3.1. Enfriamiento de la pastilla superconductora**

El proceso de enfriamiento tiene una relevancia importante, puesto que es preciso realizar un enfriamiento progresivo evitando en la medida de lo posible cambios bruscos de temperatura en la pastilla ya que esto pondría provocar la aparición y propagación de fracturas debido a las contracciones del material a las temperaturas manejadas. La temperatura a alcanzar ronda los 195°C bajo cero. Partiendo de una temperatura ambiente aproximada de 20 °C y suponiendo que las pastillas se almacenan sin refrigeración, el salto térmico total es superior a 210 °C.

Por ello se han desarrollado una serie de recomendaciones para el enfriamiento y el almacenamiento de las pastillas que consiste en tres puntos clave:

##### **1. Almacenamiento de las pastillas**

Se recomienda para futuros ensayos almacenar la pastilla en lugar fresco y seco, lejano a fuentes de calor y nunca expuestas a fuentes de radiación, pues un enfriamiento bajo estas condiciones iniciales puede generar un salto térmico excesivo capaz de dañar las pastillas.

Las pastillas se deben almacenar secas, pues durante el calentamiento posterior a los ensayos, se forma una capa de hielo que se funde a la temperatura ambiente del laboratorio. Esta agua favorece la oxidación de las pastillas deteriorando con el paso del tiempo sus propiedades superconductoras.

## 2. Enfriamiento

Se enfriaron las pastillas mediante sucesivas aportaciones de nitrógeno líquido almacenadas en el Dewar (fig. 3.3). Se recomienda para futuros experimentos aprovechar los vapores provenientes del Dewar para realizar un primer enfriamiento, antes de poner en contacto el nitrógeno líquido con las pastillas superconductoras. Se observó, además, que voltear la pastilla superconductora mejoraba y aceleraba el proceso de enfriamiento del superconductor, gracias a un proceso de enfriamiento menos brusco de la pastilla. Este proceso debe realizarse con extremo cuidado para no golpear el superconductor.

## 3. Calentamiento posterior

Se recomienda que el proceso de calentamiento posterior al ensayo se realice a temperatura ambiente. Una vez el nitrógeno líquido se evapora por completo, comienzan a formarse capas de hielo y dióxido de carbono sobre la superficie del superconductor.

Una vez se ha dejado reposar la pastilla unos 15 minutos aproximadamente y se empieza a observar la descongelación de estas capas de hielo, se debe efectuar un lavado de la pastilla con agua fría para retirar los restos de hielo de la pastilla. Una vez la pastilla quede limpia, se debe secar con algún elemento no abrasivo de tela, para evitar su oxidación. (ver punto 2). El secado no debe realizarse con papel pues se ha observado que esto propicia que se adhieran pequeños trozos de papel a la superficie del superconductor que son difíciles de retirar.

Por último se procederá al almacenamiento de la pastilla (ver punto 1).

### 3.3.2. Posicionamiento relativo imán-pastilla superconductora

Para determinación cada posición de medida se debe actuar sobre dos grados de libertad: la altura relativa imán-pastilla ( $z$ ) y su posición relativa longitudinal ( $x$ ) (ver apartado 3.1.5). En cada posición ( $x, z$ ) se toma una fotografía para su posterior tratamiento informático (ver apartado 3.3.4). Con este procedimiento se consiguen medidas del ángulo de equilibrio con una precisión mayor que si se realizase visualmente.

#### 1. Altura relativa ( $z$ ):

Para la ejecución del experimento se han realizado ensayos a alturas ( $z$ ) diferentes. Las alturas empleadas pueden consultarse en la tabla 3.1.

Ensayo	Altura relativa $z$ [mm]
1	10
2	12
3	15
4	18

*Tabla 3.1.. Alturas relativas entre pastilla superconductora e imán para los diferentes experimentos del ensayo de medición del ángulo de equilibrio en efecto Meissner.*

Todas estas alturas corresponden a la distancia entre el centro de la superficie del superconductor hasta el eje de simetría del imán.

La excepción a las posiciones reflejadas en la tabla 3.1 tiene lugar para el imán cúbico. Con este imán sólo se realizará el ensayo para diferentes posiciones a una altura  $z=10$  mm con el fin de comprobar la dependencia de las medidas con la geometría del imán.

## 2. Posicionamiento radial (x) del imán

Posteriormente al punto 1. y para cada ensayo, se realizan sucesivas mediciones del ángulo de equilibrio para las posiciones radiales x entre el imán y el superconductor.

Se desarrolla un ensayo inicial para  $z=15$  mm barriendo el rango [+X,-X]. Las medidas x se reflejan en la tabla 3.2.

Medición número	x [mm]	Medición número	x [mm]
1	34	17	-5
2	32	18	-7
3	30	19	-10
4	28	20	-12
5	26	21	-14
6	24	22	-16
7	22	23	-18
8	20	24	-20
9	18	25	-22
10	16	26	-24
11	14	27	-26
12	12	28	-28
13	10	29	-30
14	7	30	-32
15	5	31	-34
16	0		

Tabla 3.2.. Posición longitudinal x para  $z= 15$  . La posición se mide desde el centro del superconductor al centro de gravedad del imán.

Una vez se obtienen las medidas correspondientes a  $z=15$  para cada posición x, se observa que existe una simetría en las medidas respecto al eje de coordenadas Z (fig. 3.15). Se decide entonces realizar exclusivamente las medidas para el rango [+X] de datos, aprovechando esta simetría.

Sin embargo, no todos los ensayos se realizaron igual, puesto que para la altura de  $z= 10$  mm, fue imposible realizar algunas medidas ya que cuando el imán se encontraba próximo a los extremos del recipiente colisionaba con éste, impidiendo el giro del imán y falseando las medidas.

Por lo tanto para  $z=10$  mm las posiciones  $x$  adoptadas se reflejan en la tabla 3.3.

Medición número	Posición longitudinal X [mm]
1	20
2	18
3	16
4	14
5	12
6	10
7	7
8	5
9	0

Tabla 3.3.. Posición longitudinal  $x$  para las medidas de  $z=10$  mm y  $z=12$  mm. y para imán cúbico  $z=10$  mm.

### 3.3.3. Comprobación de magnetización

Como se explicó en el apartado 2.1.6, el efecto Meissner requiere que la magnetización de la pastilla sea en todo momento nula.

Si esto no fuese así, el superconductor no se encontraría en estado Meissner sino en el estado mixto o de Abrikosov característico de los superconductores tipo II (ver apartado 2.1.4).

Para comprobar que se cumple la magnetización nula, se emplea un magnetómetro basado en el efecto hall (fig 3.12).



Figura 3.12. Magnetómetro basado en efecto hall.

Se utiliza el magnetómetro para comprobar la magnetización del superconductor antes de comenzar y al acabar cada tanda de medidas. Por tandas de medidas se entiende a la serie de mediciones realizadas para una altura determinada ( $z$ ) en un sólo ensayo.

Se comprobó en todos los casos que la magnetización era nula o despreciable y por tanto que los ensayos se desarrollaron en estado Meissner.

### 3.3.4. Tratamiento informático de las fotografías

Para cada medida, se hace una fotografía que se procesa posteriormente con ayuda del programa Adobe Photoshop CS5. En cada fotografía se trazan rectas para poder determinar con exactitud los ángulos marcados por el goniómetro como se muestra a modo de ejemplo en la figura 3.13.

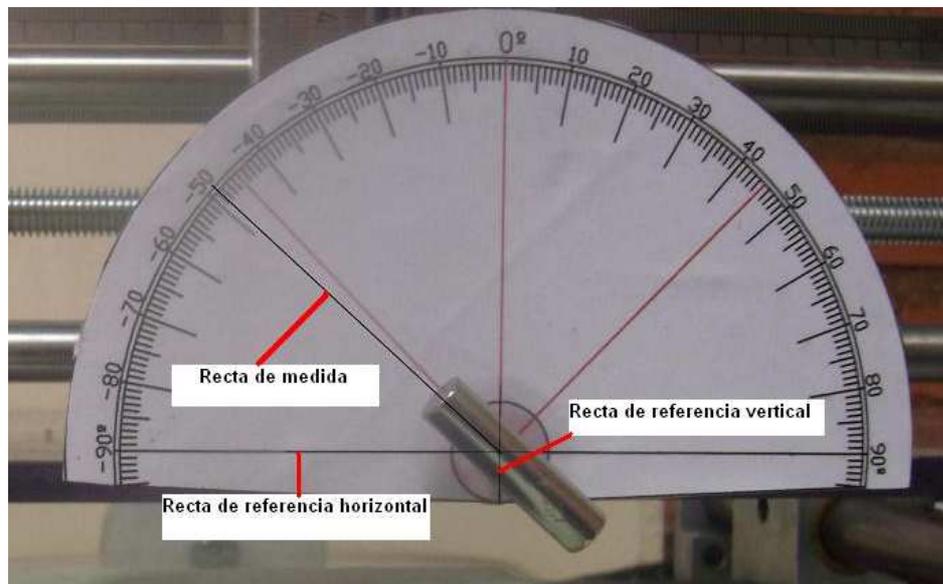


Figura 3.13.. Tratamiento gráfico de las imágenes registradas.

Como se puede observar en la figura anterior, se trazan tres segmentos rectos, dos de ellos denominados rectas de referencia que forman un ángulo de  $90^\circ$  entre si. El último segmento denominado recta de medida tiene su origen en

la intersección de las dos rectas de referencia y su encuentro con las medidas del goniómetro marca un ángulo de medida  $\Phi$ .

Sin embargo, para obtener el ángulo de giro respecto de la horizontal  $\theta$ , es preciso realizar la operación recogida en la ecuación 3.1.

$$\theta = 90^\circ - \Phi \quad (3.1)$$

Siendo:

- $\theta$  el ángulo de giro respecto de la horizontal en grados.
- $\Phi$  el ángulo registrado por el goniómetro en grados.

### Desequilibrio inicial

A todas las imágenes se les aplica una corrección debida al desequilibrio del imán. Esta corrección consiste en comprobar la desviación del imán, cuando este se encuentra en la posición  $x=0$ , respecto de la horizontal, restando o sumando este ángulo a los obtenidos para el conjunto de mediadas en todo el rango de posiciones longitudinales  $x$  estudiadas (fig. 3.14).

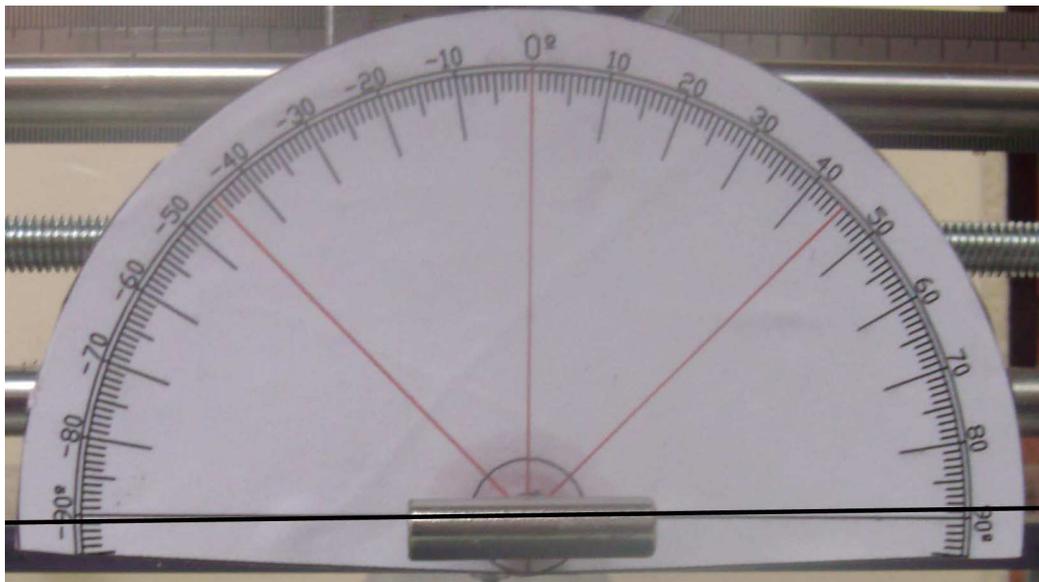


Figura 3.14. Desviación en la posición  $x=0$  respecto de la horizontalidad

En el caso de la figura anterior, el desequilibrio es el ángulo formado en la imagen por la línea de referencia horizontal y la línea de medidas resta para valores de  $+X$  y suma para valores de  $-X$  un ángulo de error  $\alpha$  que en este caso se observa es aproximadamente  $1^\circ$ .

Esto no debe confundirse con el error en las medidas pues hay muchos otros factores que inducen error no considerados en esta corrección, como el rozamiento eje-cojinete o la anisotropía en la composición de la pastilla superconductora.

### **3.4. Resultados obtenidos y análisis**

A continuación se detallan las medidas obtenidas para el ángulo de equilibrio para todas las posiciones del experimento (ver apartado 3.3). También se procede al análisis de los resultados obtenidos y se extraen conclusiones de este análisis.

#### **3.4.1. Estimación del error**

En primer lugar, es preciso comentar que el error estimado en las medidas debido a todos los efectos adversos que puedan afectar a la toma de resultados es de  $\pm 3^\circ$ . El error introducido en las medidas tiene su origen, entre otros factores, en el estado de la pastilla superconductora, el rozamiento entre eje de giro y el coeficiente de fricción, pequeñas magnetizaciones del superconductor, errores humanos en la interpretación de los datos, etc... El desequilibrio comentado en el apartado 3.3.4 no se incluye en este error, pues esta desviación ha sido corregida en las medidas aquí representadas.

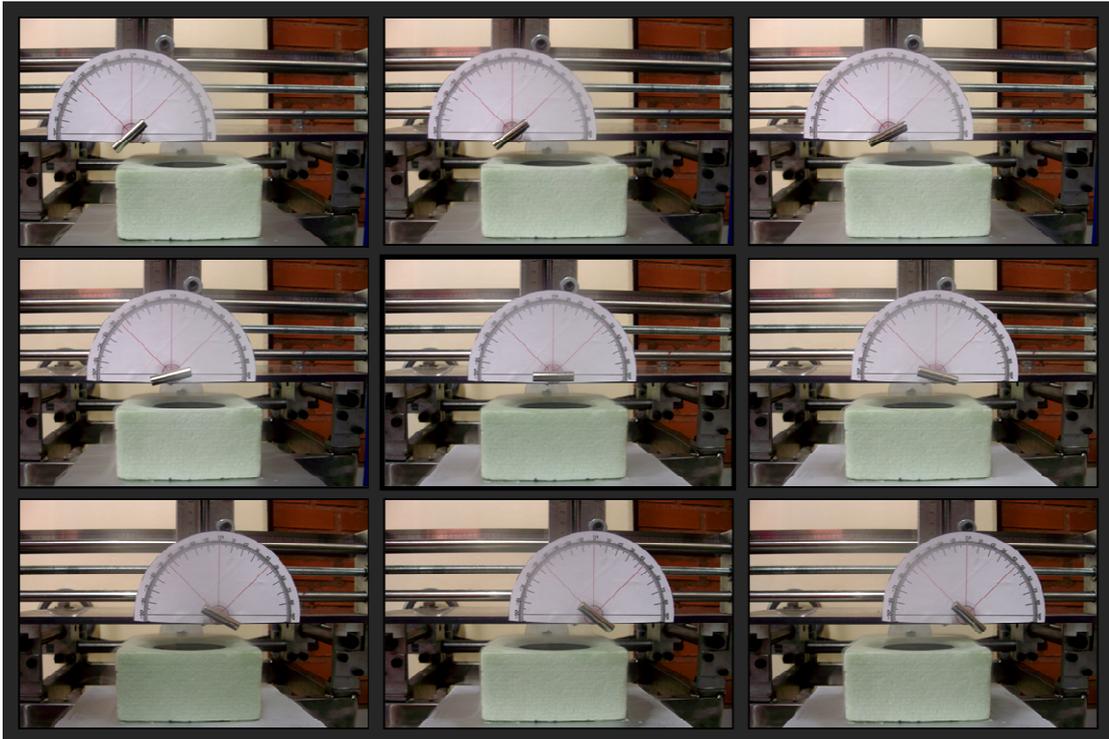
Esta estimación configura las barras de error de los resultados.

#### **3.4.2. Resultados obtenidos**

##### **Simetría en las medidas**

En primer lugar, se realizó una medición completa para todo el recorrido de  $x$  del imán para las alturas  $z = 15$  mm (ver apartado 3.3.2) con el fin de determinar la existencia o no de simetría respecto del eje de coordenadas  $Z$  para este experimento..

En la figura 3.14, se representa una tira de nueve imágenes que fueron tomadas para diferentes posiciones  $x$  a lo largo del recorrido del imán sobre la pastilla superconductora y para una altura  $z = 15$  mm.



*Figura 3.15. Evolución del ángulo de equilibrio para 9 posiciones  $x$  en  $z=15$ .*

Los resultados obtenidos para este ensayo se recogen en la tabla 3.4 y su representación gráfica en la figura 3.15

x [mm]	Ángulo de equilibrio [grados]
34	44,5
32	42
30	41
28	39
26	38
24	35
22	31
20	28
18	24,5
16	21,5
14	18
12	15
10	11
7	8
5	5
0	0
-5	3
-7	6
-10	9
-12	13
-14	16
-16	19
-18	22,5
-20	26
-22	29
-24	31,5
-26	34
-28	35,5
-30	38
-32	39
-34	41

Tabla 3.4 Resultados para el ensayo de imán cilíndrico a  $z=15$ ,  $x=[34,-34]$ .

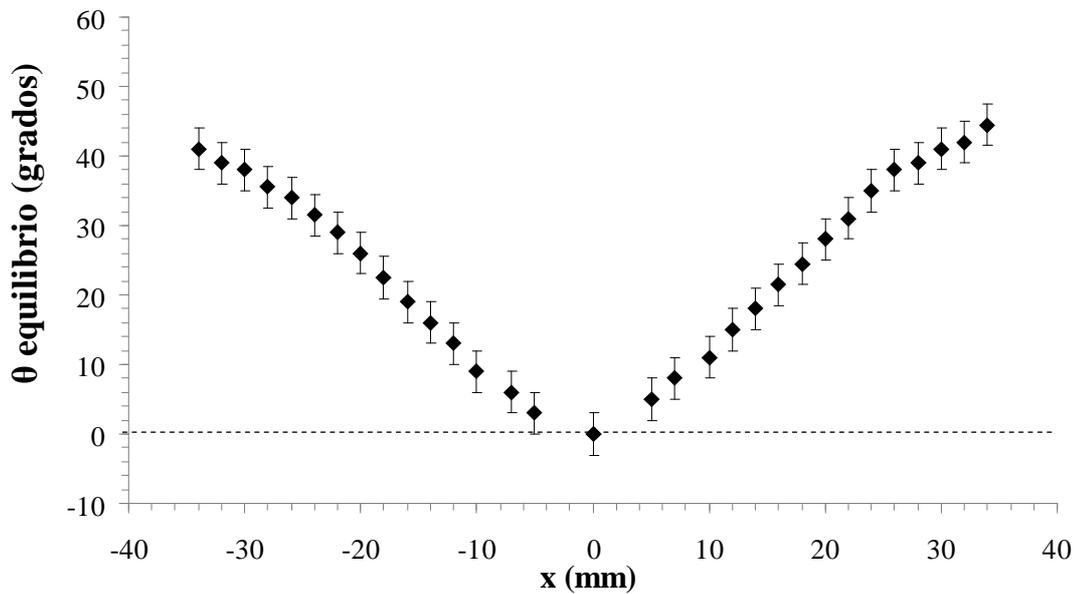


Figura 3.16. Representación de los resultados obtenidos para  $z=15$  mm y  $x:[+34,-34]$ .

Se puede observar en la gráfica anterior y en la tabla 3.4 como claramente sí que existe una tendencia simétrica para las medidas, si bien es cierto que también se aprecia un desequilibrio que favorece que las medidas para valores positivos de  $x$  las medidas del ángulo de equilibrio sean algo mayores. Esto quizás se deba a un desequilibrio del imán o bien a la anisotropía de la pastilla superconductora.

Se concluye que existe simetría respecto del eje de coordenadas  $Z$ , y por tanto de ahora en adelante, sólo se representarán las medidas tomadas para valores positivos de  $x$ .

### Relación del ángulo de equilibrio con la altura relativa $z$

Una vez que todas las imágenes han sido recolectadas y tratadas adecuadamente, se obtienen los ángulos de giro recogidos en la tabla 3.4 para todas las alturas  $z$  y las diferentes posiciones longitudinales  $x$  (ver

apartado 3.3.2). Sólo se reflejan en la siguiente tabla las medidas para X positivo, aprovechando la simetría respecto del eje de coordenadas Z del experimento comentada con anterioridad en este apartado.

x [mm]	z= 10 [mm]	z= 12 [mm]	z= 15 [mm]	z= 18 [mm]
24		37,5	35	32
22		34,5	31	29
20	28	30	28	26,5
18	23	26,5	24,5	24
16	18,5	22,5	21,5	20,5
14	15,5	17,5	18	17,5
12	12	14	15	15
10	8,5	11	11	11
7	5,5	6,5	8	7,5
5	4	4,5	5	5,5
0	0	0	0	0

*Tabla 3.5. Ángulo de equilibrio para el experimento de determinación de la dependencia del ángulo de equilibrio con la posición en efecto Meissner para imán cilíndrico.*

En la tabla anterior se puede observar como para las medidas para  $z=10$  mm existe una zona ciega para  $x=22$  y  $x=24$  mm. Esto se debe a que para estas posiciones, el imán golpeaba el recipiente contenedor del superconductor falseando las medidas, y se decidió desechar éstas.

Representando gráficamente los resultados:

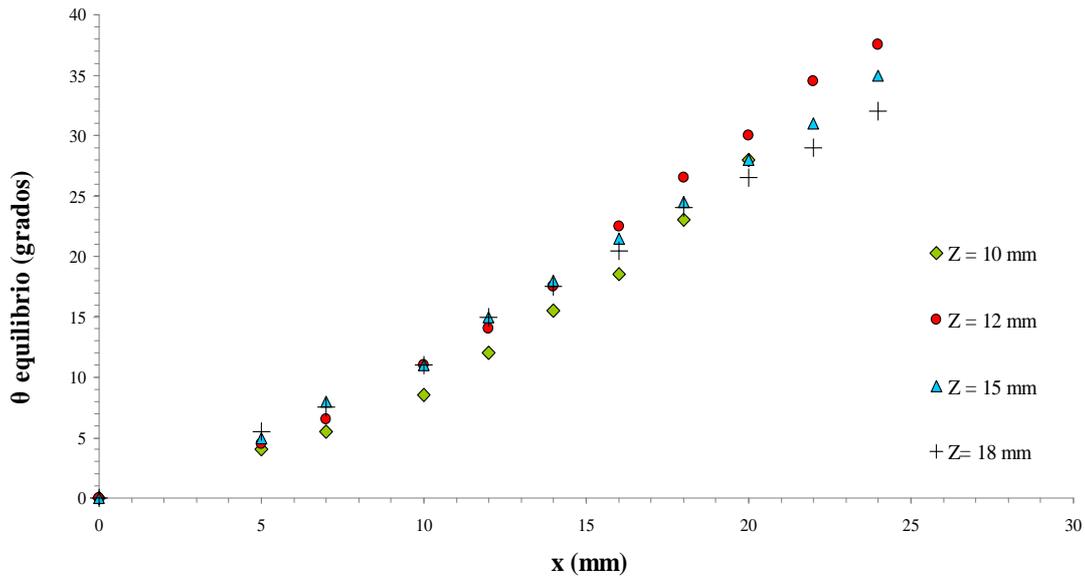


Figura 3.17. Dependencia entre la posición  $x$  y el ángulo de equilibrio para varias alturas  $z$ .

En la figura anterior se puede observar como la diferencia de los datos entre las distintas alturas es mayor conforme aumenta la distancia con respecto de la posición central. Esto se debe a que en la posición central, la interacción de las paredes laterales del superconductor sobre el imán es mínima y teóricamente se compensa para  $x=0$ . Entonces la superficie horizontal es la predominante y esta superficie por sí misma no puede desequilibrar el imán.

Conforme la posición fijada se aleja del centro, las medidas comienzan a separarse debido a la contribución creciente de la pared lateral para las diferentes alturas  $z$  de los ensayos.

Además se puede observar como el ángulo es creciente para valores crecientes de  $z$ . Conforme se aumenta la altura entre imán y superconductor, el ángulo girado por el imán para alcanzar el equilibrio es mayor.

Por último, comentar que a partir de una posición  $x$  de aproximadamente 15 mm, se observa como para alturas superiores a 12 mm existe un decaimiento en la fuerza experimentada por el imán debido al debilitamiento del campo magnético del superconductor apreciado por el imán con la altura.

### Dependencia de los resultados con la geometría del imán

Con el fin de evaluar la dependencia de los resultados con la geometría del imán, se propone un variante del experimento que emplea un imán cúbico de 5 mm de lado cuyas propiedades y características pueden consultarse en el anexo III. Con ello se pretende observar como afecta a las medidas un cambio de estas características.

Este ensayo se realiza a una altura  $z=10$  mm. Las posiciones  $x$  coinciden entonces con los reflejados en la tabla 3.3 para el imán cilíndrico (ver apartado 3.1.2) para una altura  $z=10$  mm.

Los resultados para este ensayo se recogen en la tabla 3.6 y se representan en la figura 3.17.

x [mm]	Ángulo de equilibrio [grados]
20	22,5
18	14
16	10
14	6,5
12	3,5
10	1,5
7	1,5
5	0,5
0	0

Tabla 3.6. Datos recogidos para ensayo de imán cúbico y  $z=10$  mm

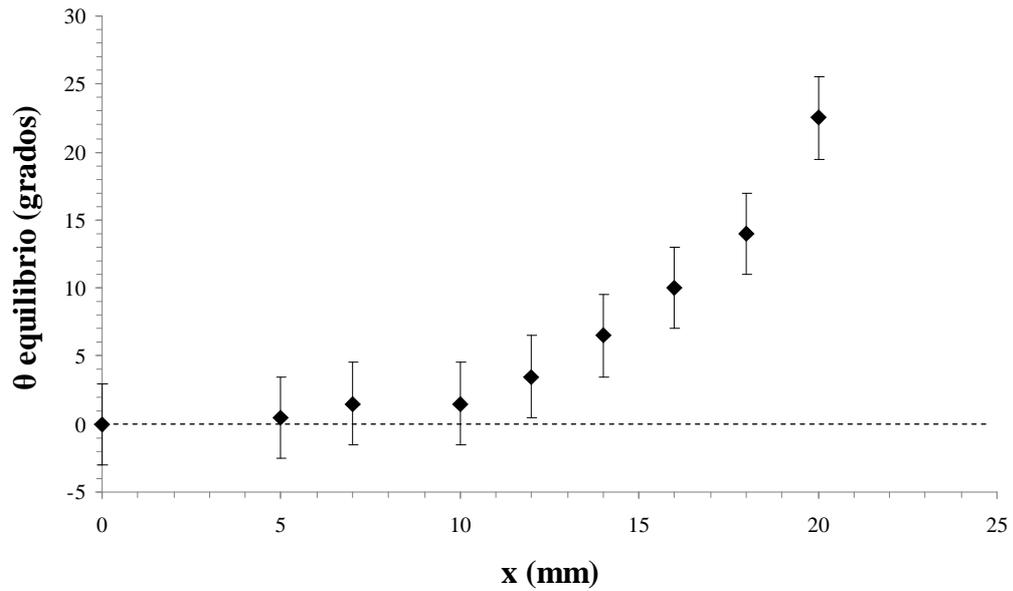


Figura 3.18. Dependencia del ángulo de giro con la posición  $x$  para imán cúbico y  $z=10$  mm.

Si se comparan estos resultados con los obtenidos para el imán cilíndrico a una altura relativa entre el imán y el imán  $z=10$ , se obtiene lo que muestra la figura siguiente:

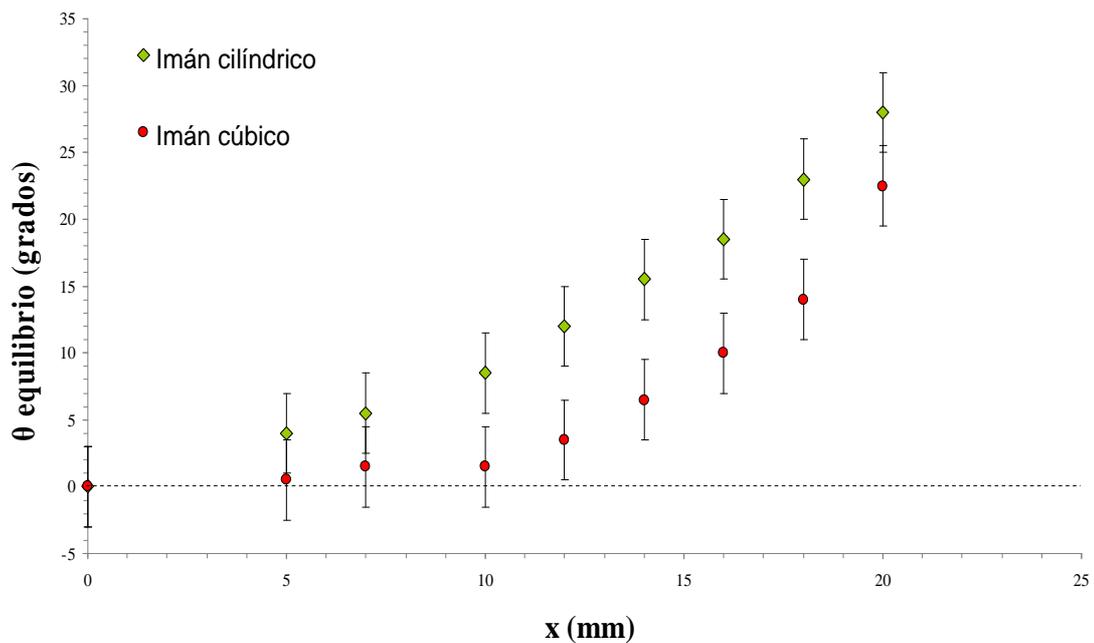


Figura 3.18. Comparación para diferentes imanes del ángulo de equilibrio a  $z=10$  mm.

Puede observarse una clara diferencia entre los efectos experimentados por ambos imanes. Para el imán cúbico, se observan menores variaciones del ángulo de equilibrio cerca del centro de coordenadas. Esto puede explicarse por la posición del dipolo magnético.

Cualquier superficie superconductora tiende a alinear el dipolo magnético con el vector normal de su superficie. De una discretización en una serie muy extensa de dipolos magnéticos del imán cilíndrico se puede deducir claramente que algunos de ellos (los más próximos al extremo del superconductor) estarán más influenciados por la cara lateral (vector normal paralelo a la horizontal) que por la cara superior (vector normal paralelo a la vertical). Esta influencia y la contribución de cada cara, es lo que provoca un desequilibrio en el imán y como consecuencia de esto, que el imán gire, buscando una nueva posición de equilibrio. Cuanto más abarque el imán en el eje radial  $x$ , más se verá afectado por las caras laterales y además lo hará para desplazamientos  $x$  menores. Por esto, se puede ver en la figura 3.18 como para valores cercanos al centro de coordenadas, el imán cilíndrico gira más que el imán cúbico, que incluso puede llegar a considerarse como un dipolo puntual.

Por tanto, se observa que existe una dependencia del ángulo de giro del imán con la geometría de éste.

---

## 4. ANÁLISIS TEÓRICO

## 4. ANÁLISIS TEÓRICO

### 4.1. Modelo

La finalidad de este apartado es obtener los resultados teóricos correspondientes a los ensayos experimentales realizados. Con ello se pretende comprobar la validez del modelo teórico utilizado. Este modelo, ha sido desarrollado por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Leganés.

El modelo que se describe a continuación ha sido utilizado para el desarrollo de este proyecto. Consiste en un modelo local válido para calcular fuerzas y momentos entre un superconductor y un imán cuando tenemos una superficie no simétrica cualquiera [1],[21].

Este modelo, ha sido verificado experimentalmente para fuerzas [22]. Puede emplearse siempre y cuando el campo magnético aplicado sea menor al primer campo crítico, o lo que es lo mismo, el estado Meissner. En este estado, el desplazamiento eléctrico  $D$  es constante a lo largo del tiempo como muestra la ecuación 4.1 basada en las ecuaciones de London y Maxwell .

$$\frac{\partial D}{\partial t} = 0 \quad (4.1)$$

De acuerdo con el modelo, la fuerza ejercida por un imán por unidad de superficie en el superconductor puede escribirse como:

$$\frac{d\vec{F}}{dS} = 2\mu_0 (\vec{n}_s \times \vec{H}^{ap}) \times \vec{H}^{ap} \quad (4.2)$$

Donde:

- $\mu_0$  es la permeabilidad magnética del medio (aire), de valor  $12.5664 \times 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$ .
- $\vec{n}_s$  es el vector normal de la superficie del superconductor.

-  $\dot{H}^{ap}$  es el campo magnético aplicado generado en este caso por el imán permanente.

Para cualquier forma del superconductor, el momento aplicado sobre éste, puede expresarse como:

$$\dot{M} = \oint_{\Omega} \dot{\mathbf{r}} \times (2\mu_0 (\dot{\mathbf{n}}_s \times \dot{H}^{ap}) \times \dot{H}^{ap}) dS \quad (4.3)$$

Donde:

-  $\dot{\mathbf{r}}$  es el vector posición entre el elemento diferencial de superficie del superconductor y el centro de masas del imán permanente.

De acuerdo con las leyes de Newton, la fuerza experimentada por el imán es igual y de sentido contrario a la del superconductor, por lo que el par al que se ve sometido el imán permanente es:

$$\dot{M}_{PM} = - \oint_{\Omega} \dot{\mathbf{r}}_{PM} \times (2\mu_0 (\dot{\mathbf{n}}_s \times \dot{H}^{ap}) \times \dot{H}^{ap}) dS \quad (4.4)$$

Donde:

-  $\dot{\mathbf{r}}_{PM}$  es el vector de posición entre cada elemento del superconductor y el centro de gravedad del imán.

La posición de equilibrio del imán permanente será aquella en la que el momento total aplicado sea nulo. Bajo esta condición el imán permanecerá en reposo y por tanto habrá alcanzado su posición final de equilibrio.

## 4.2. Cálculos teóricos

Para obtener los resultados teóricos se emplea la herramienta informática Ansys, un programa basado en la aplicación de elementos finitos a la resolución de múltiples tipos de problemas ingenieriles.

Se introduce en Ansys un programa propio facilitado por el departamento de Mecánica, concretamente desarrollado por Efrén Díez Jiménez y José Luis Pérez Díaz, con el cual suelen trabajar y que ya estaba desarrollado en el momento de la realización de este proyecto. Este programa se rige por las ecuaciones planteadas con anterioridad en el modelo matemático del apartado 4.1.

### 4.2.1. Funcionamiento del algoritmo

A continuación se resume brevemente el funcionamiento del programa, pues no es objeto del presente proyecto extenderse en explicaciones concretas de su funcionamiento sino mediante breves comentarios, permitir al lector entender el funcionamiento del mismo para que sea capaz de validar el método de estudio.

#### 1. Creación de la geometría

Se definen las dimensiones tanto del imán como de la pastilla superconductora, generándose su geometría en Ansys. También es preciso concretar la posición relativa entre el imán y la pastilla así como el ángulo de equilibrio inicial sobre el que calcular fuerzas, corrientes y momentos.

Por último es necesario generar un volumen de contorno que contenga tanto a la pastilla como al imán y que sea lo suficientemente amplio como para que las líneas de campo magnético más potentes no se vean seccionadas. Todos estos componentes pueden apreciarse en las siguientes figuras:

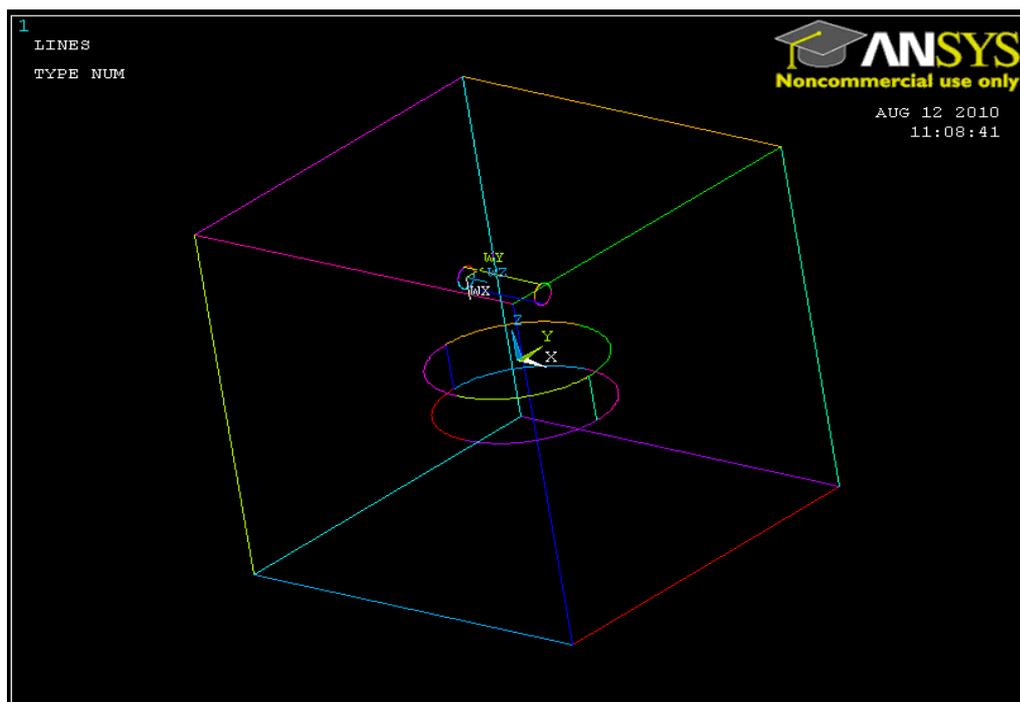


Figura 4.1. Geometría generada para el estudio en Ansys.

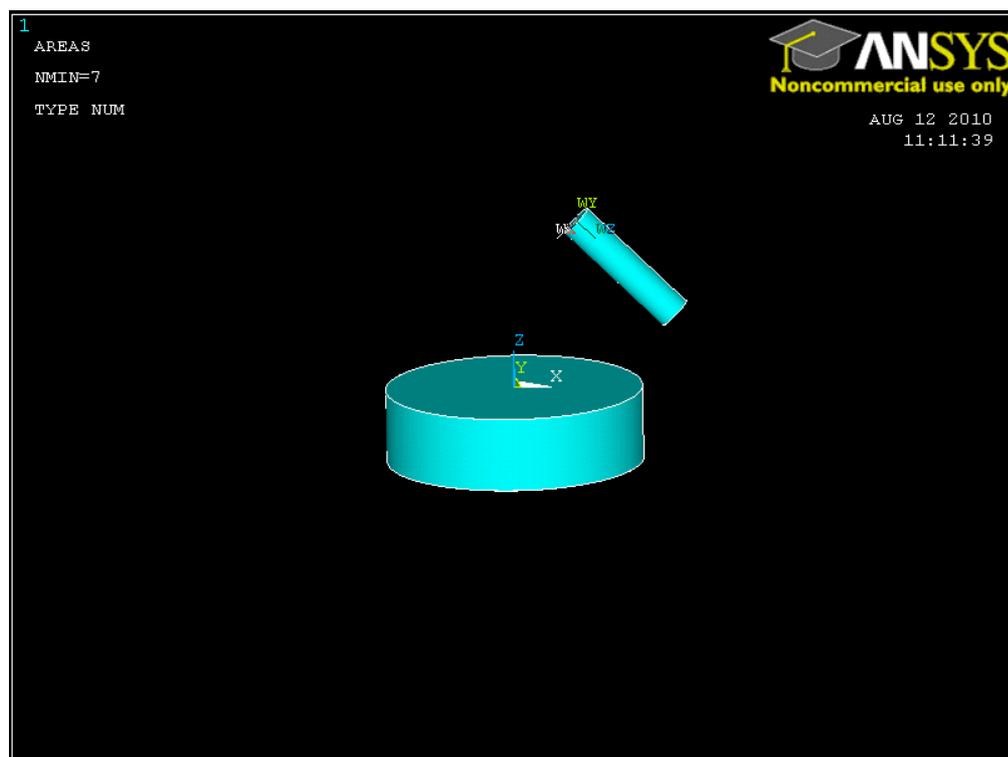


Figura 4.2. Elementos. Superconductor e imán permanente.

## 2. Definir los materiales y sus propiedades

Se introducen las propiedades magnéticas adecuadas al caso de estudio. Se introducen la coercitividad y la remanencia (ver anexo III), así como la permeabilidad magnética del aire de valor  $\mu_0 = 12,5664 \times 10^{-7}$  Wb/Am.

## 3. Discretización por elementos finitos

El programa selecciona una malla (fig.4.3) adecuada para obtener unos resultados satisfactorios [23]. A partir de esta división, el programa Ansys calculará los parámetros solicitados.

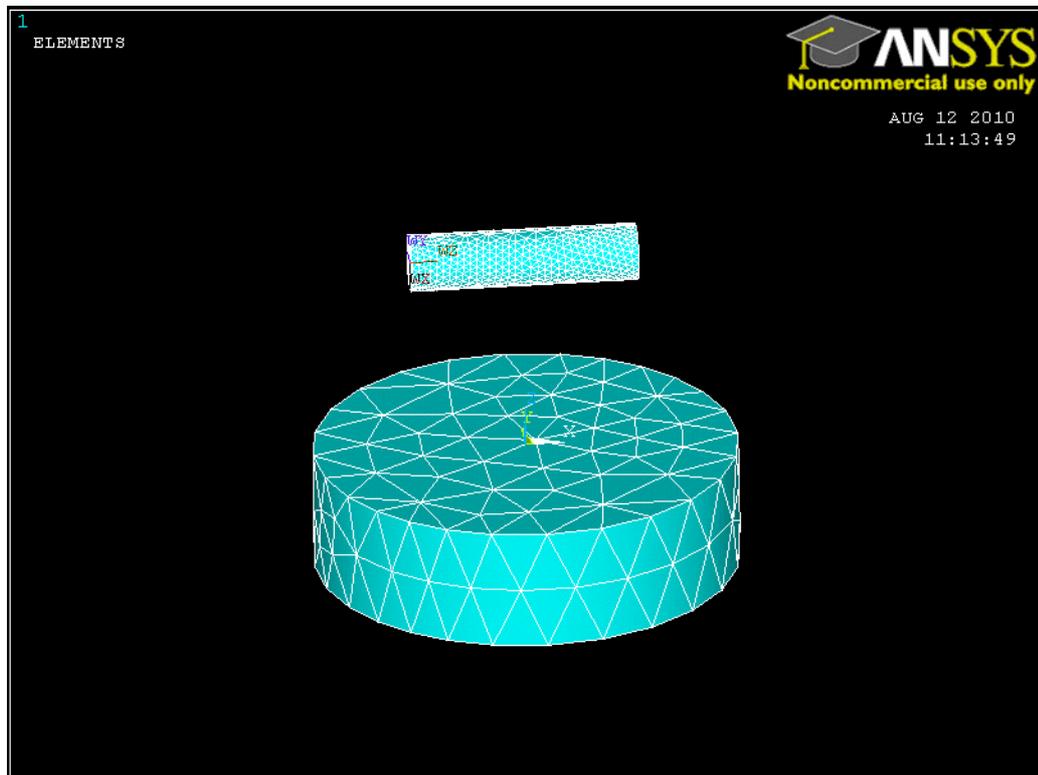
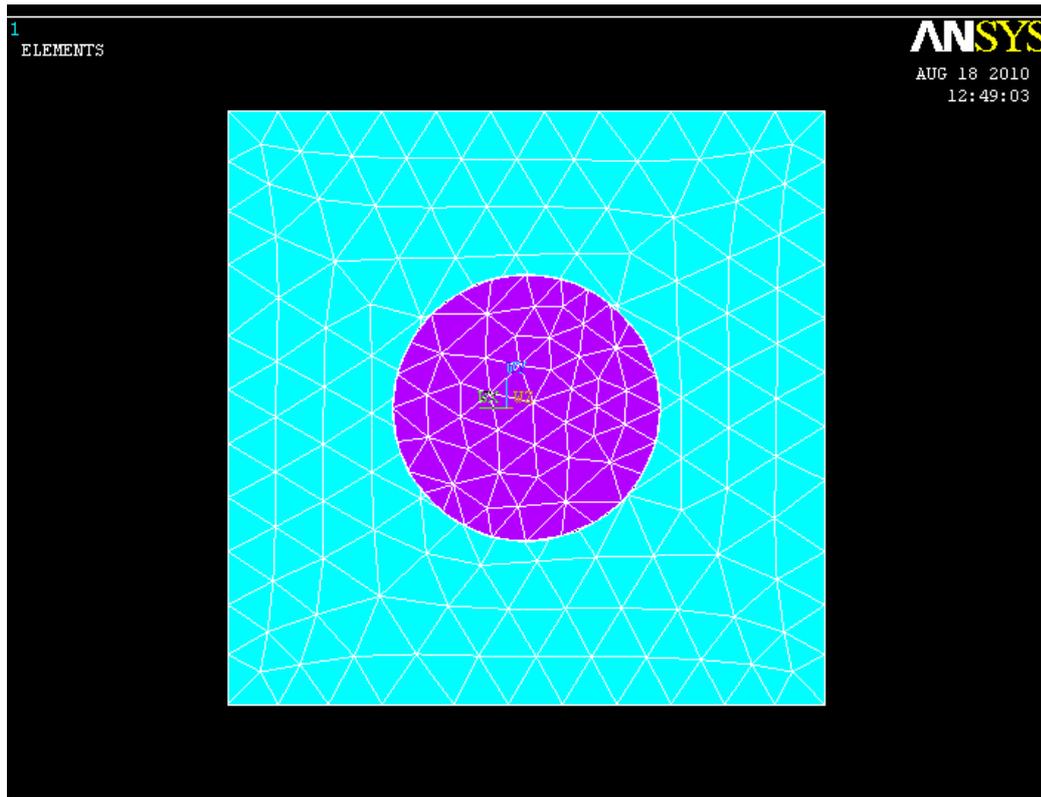


Figura 4.3. Discretización en elementos finitos de los elementos de estudio.



*Figura 4.4. Alzado del mallado del volumen de control y la pastilla superconductora.*

#### 4. Cálculo de resultados

Ansyes genera el campo magnético del imán con los datos de la magnetización facilitados al código del programa. A continuación Ansyes resuelve el problema pudiéndose obtener cualquiera de los resultados del cálculo deseado.

En la figura se observa la representación de la densidad corrientes superconductoras superficiales sobre la pastilla para una posición ( $z=10, x=0$ ) y un ángulo de  $165^\circ$ .

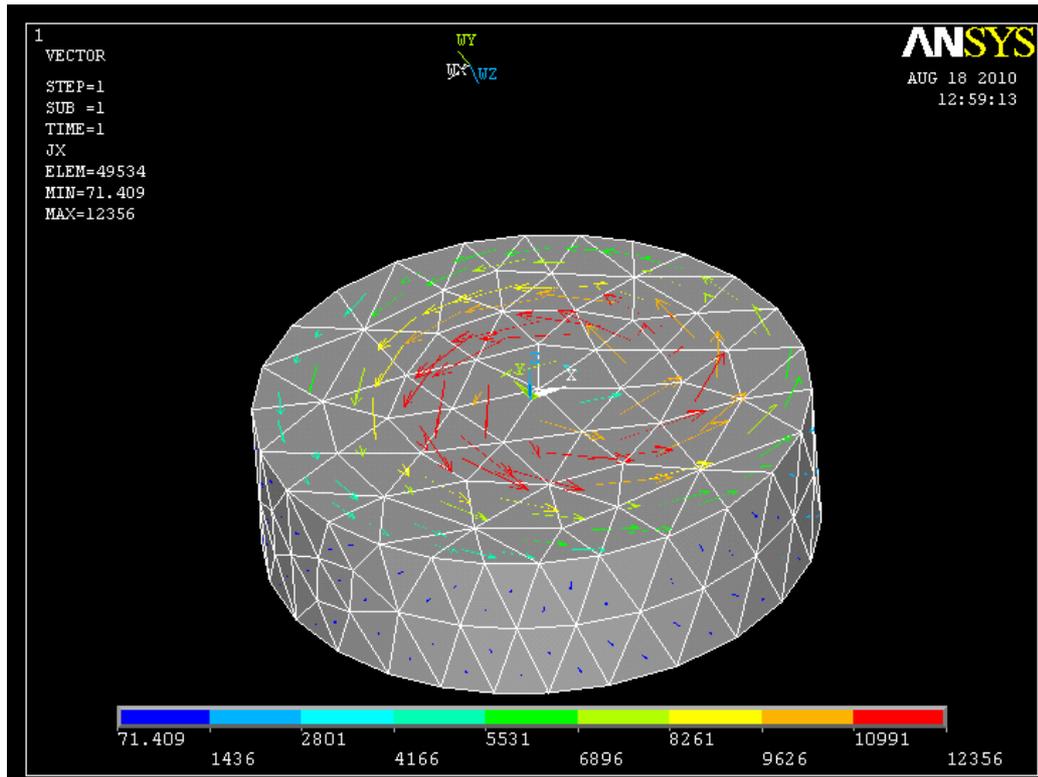


Figura 4.5. Densidad corrientes superconductoras sobre la superficie del SC en A/m.

Estas corrientes generan un campo magnético responsable de la aparición de fuerzas sobre el imán y la pastilla. Estas fuerzas, serán las responsables de establecer el ángulo de equilibrio en el imán.

Se programa un bucle en el código que permite hacer un barrido para diferentes ángulos cuando la posición está determinada en busca del ángulo que minimice los momentos sobre el imán (ángulo de equilibrio).

#### 4.2.2. Error estimado

El error estimado en Ansys se estima en el 3% mientras que se estima una barra de error de  $\pm 3^\circ$  en el caso de las medidas experimentales. Esta estimación se basa en cálculos realizados con anterioridad en el departamento por José Luis Pérez y Efrén Díez y de los cuales se disponía la inicio de este proyecto.

Este error teórico estimado configura las barras de error de los datos teóricos.

#### 4.2.3. Obtención de resultados teóricos

Se analiza mediante el programa el comportamiento del imán y las fuerzas y momentos sobre éste generados

A modo de ejemplo de cómo funciona el programa y como se han obtenido los ángulos de equilibrio teórico se exponen y comentan los resultados obtenidos para una altura  $z=15$  mm y para las posiciones relativas entre imán y superconductor  $x=0,5,10,15,20$  y  $25$  mm.

$z=0.015$ m	$x=0.015$ m						
Ángulo [grados]	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$F_z$ (N)	$M_x$ (Nm)	$M_y$ (Nm)	$M_z$ (Nm)	$J_{max}$ (A/m)
85	-5,52E-03	-3,48E-05	-2,80E-02	-6,70E-07	-1,51E-04	2,73E-07	1,19E+04
95	-6,67E-03	-2,20E-05	-2,34E-02	-4,60E-07	-4,88E-05	7,64E-07	1,20E+04
105	-8,89E-03	3,59E-05	-2,24E-02	1,65E-07	5,20E-05	4,39E-07	1,26E+04
115	-1,29E-02	1,82E-04	-2,55E-02	3,67E-06	1,76E-04	1,31E-07	1,55E+04
125	-1,97E-02	-1,82E-04	-3,61E-02	-4,21E-06	3,60E-04	3,43E-08	2,47E+04
135	-3,01E-02	2,61E-04	-5,73E-02	5,83E-06	6,33E-04	-4,47E-07	3,55E+04
145	-4,81E-02	9,06E-04	-8,83E-02	2,13E-05	1,07E-03	-1,17E-06	4,63E+04

Tabla 4.1. Valores para fuerza, momentos y corrientes superficiales en el caso  $x=0.015$  m.

En la tabla 4.1 se observa, que para los valores del momento resultante sobre el imán en el eje Y, el ángulo de equilibrio de aquellos estudiados es  $105^\circ$ . Esto se debe a que es en este caso cuando el momento se minimiza, siendo muy próximo a cero y por tanto es donde el imán permanecerá en una posición estática estable.

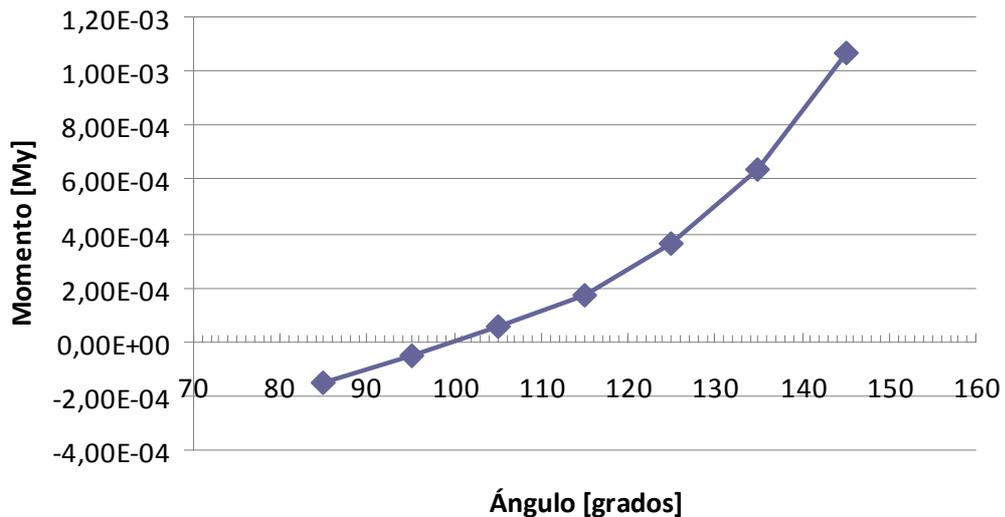


Figura 4.6. Variación del momento  $M_y$  de equilibrio con respecto a diferentes ángulos para la posición  $x=15$  mm.

En la figura anterior se puede observar cómo el ángulo de equilibrio es de aproximadamente  $100^\circ$  respecto del eje X del imán (ver figuras 4.1, 4.2 y 4.3), vertical y hacia abajo, por lo que el ángulo de equilibrio respecto de la horizontal se obtiene restando  $90^\circ$  a esta aproximación. Es decir, el ángulo de equilibrio en este caso sería de  $10^\circ$ . Esta aproximación define el ángulo de equilibrio teórico. Este procedimiento se repite para las diferentes alturas entre imán y pastilla ( $z$ ) y para las distintas posiciones longitudinales ( $x$ ). Los resultados obtenidos para  $z=15$  se recogen en la tabla 4.2.

---

x [mm]	FEA[grados]	Error FEA 5% [grados]
0	0	0
5	3	0,09
10	6	0,18
15	13	0,39
20	22	0,66
25	31	0,93
30	39	1,17
35	45	1,35

Tabla 4.2. Datos teóricos para ángulo de equilibrio para  $z=15$

### 4.3. Comparación con los datos experimentales

En este apartado se analizará la relación entre los datos experimentales medidos y los resultados teóricos obtenidos en Ansys a partir del modelo teórico empleado.

Concretamente se han comparado los resultados teóricos y experimentales para el ensayo realizado para  $z=15$  mm en las posiciones  $x$  reflejadas en la tabla 4.3, donde están recogidos los resultados tanto experimentales como teóricos.

<b>x [mm]</b>	<b>Medida Experimental [grados]</b>	<b>FEA [grados]</b>
0	0	0
5	3	3
10	9	6
15	17	13
20	26	22
25	33	31
30	38	39
35	42	45

Tabla 4.3. Comparación de los resultados experimentales y teóricos para  $z=15$ mm.

Representando gráficamente estos resultados, teniendo en cuenta que las barras de error son de  $\pm 3^\circ$  para los datos experimentales y del 3% para los datos teóricos obtenidos en Ansys, se obtiene la figura 4.7.

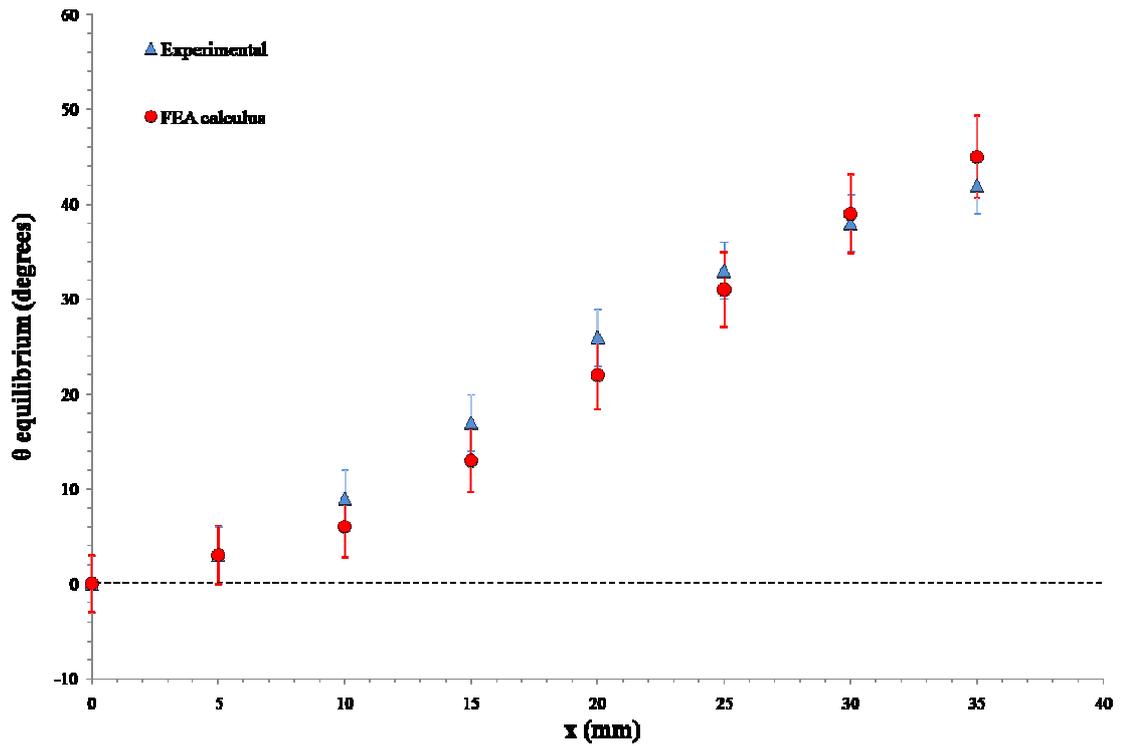


Figura 4.7 Comparación de datos teóricos y resultados experimentales para  $z=15\text{mm}$

En la figura anterior se puede observar como las barras de error de los datos teóricos y experimentales se solapan en todos los casos. Esto parece un indicativo de que el acuerdo entre la realidad del experimento y la teoría empleada es adecuado.

De esta manera, podemos decir que el modelo teórico representa la realidad con precisión.

---

## 5. PLIEGO DE CONDICIONES

---

## 5. PLIEGO DE CONDICIONES

Se necesita un **equipo informático** con cierta capacidad computacional para poder obtener resultados en un tiempo aceptable. El equipo propuesto en este proyecto cumpliría sobradamente con las especificaciones requeridas. Además se requiere la adquisición de un magnetómetro.

También es preciso, según el método de estudio llevado a cabo, una **cámara fotográfica** de resolución media con el fin de capturar las imágenes para su posterior tratado informático. Serán precisos una serie de componentes adicionales como el trípode o la tarjeta de memoria.

Es imprescindible la adquisición de un **equipo completo de protección** para el laboratorio que ha de incluir al menos los siguientes componentes: guantes, bata de algodón y gafas de protección.

Se requiere la adquisición de licencia de **software** para los programas Ansys, Microsoft Office 2007, Autocad 2010 y Adobe Photoshop CS5. Cualquiera de sus versiones (educativa, profesional, etc...) es válida para las exigencias a las que se verán sometidos en este proyecto y por tanto, basándose sólo en lo requerido en estos experimentos, se recomienda la obtención de la licencia más económica y compatible con la legislación actual.

En lo referente al **personal** necesario para el desarrollo del proyecto, se precisa la colaboración de un Investigador para el desarrollo de los experimentos, incluido el diseño del sistema de ensayos y el procesamiento y análisis de los resultados. El Investigador requerirá la ayuda de un Ayudante para la realización de los ensayos y toma de medidas. Además se precisa la colaboración de un programador informático especializado en el uso de Ansys.

En cuanto al **material necesario** para el trabajo, se incluyen las cantidades mínimas necesarias de cada elemento en la tabla 5.1. En esta tabla, también se pueden encontrar los elementos necesarios para el buen desarrollo del proyecto como el material informático, el software requerido o el equipo de protección.

<b>Elemento</b>	<b>Cantidad mínima</b>
Pastilla superconductor	1
Depósito de nitrógeno 30 litros	1
Dewar capacidad 1 litro	1
Nitrógeno líquido	30 [litros]
Imanes	2
Pinzas de plástico termoestable	2
Pie de rey	1
Depósitos de poliuretano	1
Mesa Jack	1
Mesa 3D	1
Magnetómetro	1
PC portátil	1
Cámara fotográfica	1
Trípode	1
Tarjeta de memoria	1
Licencia Ansys v12	1
Licencia MS Office 2007	1
Licencia Autocad 2010	1
Licencia Photoshop CS5	1
Guantes	1
Bata de algodón	1
Gafas protectoras	1

*Tabla 5.1. Elementos mínimos necesarios para el desarrollo del proyecto.*

---

## 6. PRESUPUESTO

---

**6. PRESUPUESTO**

El presente presupuesto pretende establecer un coste total de ejecución material para la realización del proyecto.

Equipo y materiales						
Elemento	Unidad	Cantidad	Referencia	Empresa <i>Ref. Interna</i>	Coste unitario[€]	Coste de partida [€]
Pastilla Superconductora: Disco de YBaCuO 45 mm de diámetro, 12 mm de altura (tolerancia 1 mm) Melt textured, estabilizada)		1	V01	THEVA	400,00	400,00
Nitrógeno líquido*	litros	32	V02	Air Liquide	3,00	96,00
Imán cilíndrico 6,35x25,4		5	V03	Supermagnete S-06-25-N	0,80	4,00
Imán cúbico l=5 mm		10	V04	Supermagnete W-05-N50-G	0,28	2,80
Tanque secundario: Capacidad 32l, MVE insulation. Evaporation rate 0,22 l/día		1	V05	MVE MVE Lab 30	650,00	650,00
Dewar: Capacidad 1l		1	V06	Pobel	115,00	115,00
Mesa Jack		1	V07	Labtable S.A.	25,00	25,00
Magnetómetro: Efecto Hall, Range 5μT to 0,5T. Phywe		1	V08	Phywe	400,00	400,00
Mesa 3D		1	V09	Labtable S.A	120,00	120,00
				Total equipos y materiales €		1.812,80

Equipo de seguridad						
Elemento	Unidad	Cantidad	Referencia	Empresa Ref. Interna	Coste unitario [€]	Coste de partida [€]
Guantes hidrófugos siliconados con aislamiento específico para aplicaciones criogénicas		1	S01	MaxFit	55,00	55,00
Bata de algodón		1	S02	MaxFit	6,00	6,00
Pinzas de plástico termoestable.		4	S03	MaxFit	4,00	4,00
Gafas de protección		1	S04	Proglas	15,00	15,00
Total equipo de seguridad €						80,00
Equipo informático						
<b>Ordenador Portátil:</b> LENOVO G550 2958 equipado con procesador Intel® Pentium T4400 2.2 GHz, 3GB DDR3, 500GB disco duro, t. gráfica Intel® GMA 4500M, pantalla 15.6", Windows 7 Home Premium y Microsoft Office 2007 Home edition. Drivers, lector de tarjetas 5 en 1 y programas instalados incluidos en el precio.		1	I01	PCCITY NTD2WSP	444,00	444,00
Cámara fotográfica Samsung PL10 de resolución 10 megapíxeles		1	I02	Samsung PL10	110,00	110,00
Trípode para cámara. Accesorio Samsung modelo PL10		1	I03	Samsung PL10	23,00	23,00
Tarjeta Memoria SD 8 Gb de capacidad.		1	I04	ScanDisk	20,00	20,00
Total equipo informático €						597,00
Software						
Ansys 12.0* <sup>2</sup>	días	5	S01	Ansys	51,95	237,15
Autocad 2010* <sup>3</sup>	días	1	S02	Autodesk	21,65	21,65
Photoshop CS5* <sup>4</sup>	horas	4	S03	Adobe	10,83	43,29
Office 2007 Home edition* <sup>5</sup>	horas	-	S04	Microsoft	0,00	0,00
Total software €						302,44

**Personal:**

Los resultados expuestos a continuación son coherentes con lo expuesto en el Pliego de Condiciones (apartado 5).

Personal					
Elemento	Unidad	Cantidad	Referencia	Coste unitario [€/hora]	Coste de partida [€]
Investigador	hora	42	P01	35,00	1470,00
Ayudante Investigador	hora	22	P01	25,00	550,00
Programador experto en Ansys	hora	12	P02	30,00	360,00
Total personal €					2.380,00

**El montante total asciende a:**

<b>Total [€]</b>	<b>5.172,24</b>
------------------	-----------------

**“ El presupuesto total de ejecución material de este proyecto asciende a cinco mil ciento setenta y dos euros con veinticuatro céntimos ( 5.172,24 euros) ”**

*No incluye IVA.*

\* Incluye gastos de almacenamiento y distribución.

\*<sup>2</sup> Coste unitario calculado en base a amortización en 231 días laborables. Coste de licencia 12.000

€. Costes de instalación y mantenimientos prorrateados.

\*<sup>3</sup> Coste unitario calculado en base a amortización en 231 días laborables. Precio de licencia 5.000

€. Costes de instalación y mantenimientos prorrateados.

\*<sup>4</sup> Coste unitario calculado en base a amortización en 231 días laborables. Precio de licencia 2.500

€. Costes de instalación y mantenimientos prorrateados.

\*<sup>5</sup> Licencia incluida con la adquisición del portátil.

## 7. CONCLUSIONES

---

## **7. CONCLUSIONES**

1. Se ha conseguido desarrollar un proceso experimental de investigación de forma completa. Se seleccionaron los materiales, se emplearon los instrumentos de medida (incluso en algunos casos se fabricaron) y se llevaron a cabo las mediciones de los diferentes ensayos que han tenido lugar durante el desarrollo del proyecto de forma completamente satisfactoria y con la rigurosidad requerida por un proceso de investigación respetable.
2. Se ha comprendido la dependencia de este ángulo de equilibrio con parámetros tales como la posición relativa imán-superconductor o la geometría del imán. A su vez se ha demostrado la posibilidad de medir indirectamente las fuerzas y momentos a las que se ve sometido un imán en efecto Meissner mediante la medición del ángulo de equilibrio para diferentes posiciones, una posibilidad que a fecha de finalización de este proyecto, el autor y sus tutores consideran innovadora.
3. Se ha desarrollado con éxito la verificación del modelo teórico empleado y se ha observado una concordancia entre los datos obtenidos con este modelo implementado en Ansys y los datos experimentales.

Finalizado el desarrollo de este proyecto, se considera que los objetivos por los cuales se inició han sido cubiertos.

---

## 8. REFERENCIAS

---

---

**8. REFERENCIAS\***

- [1]. Pérez-Díaz JL, García-Prada JC, Díaz-García JA. "Universal Model for Superconductor-Magnet Forces in the Static Limit". *I.R.E.M.E.* 2008;2(2).
- [2]. M.Tinkham and G.McKay. "Introduction to superconductivity" Ed. McGraw Hill 1996, second edition.
- [3]. Kent D. Irwin. "Ver con superconductores" *Investigación y ciencia* N°364, pag. 54-61, Enero de 2007.
- [4]. <http://www.o-keating.com/hsr/maglev.htm> [2010].
- [5]. [http://six\\_dot.tripod.com/ciencias/gpb.html](http://six_dot.tripod.com/ciencias/gpb.html) [2010].
- [6]. <http://www.nexan.com> [2010].
- [7]. [http://electronicosonline.com/noticias/notas.php?id=A2823\\_0\\_1\\_0\\_M](http://electronicosonline.com/noticias/notas.php?id=A2823_0_1_0_M) [2010].
- [8]. W Yang, Y Liu, X Chen, Z Wen, Y Duan, and M Qiu, *Physica C* **455**, 13–18 (2007).
- [9]. J R Hull, *Supercond. Sci. Technol.* **13**, R1-R15. (2000).
- [10] J Yon and Y Rhim, *IEEE transactions on magnetics* **35**, 4028-4030 (1999)
- [11] T Hamasaki, *IEEE transactions on applied superconductivity* **11**, 1677-1680 (2001).
- [12] N Del-Valle, A Sanchez, C Navau, and D X Chen, *IEEE Transactions On Applied Superconductivity* **19**, 2070–2073 (2009).
- [13] J R Clem, *Physical Review B* **77**, 134506 (2008).
- [14] F M Araujo-Moreira, C Navau, and A Sanchez, *Physical Review B* **61**, 634-639 (2000).
- [15] W M Yang, *Physica C* **448**, 347-352 (2006).
- [16] T Suzuki, *Physica C* **463-465**, 383-386 (2007)
- [17] W M Yang, X X Chao, X B Bian, P Liu, Y Feng, P X Zhang, and L Zhou, *Supercond. Sci. Technol.* **16**, 789-792 (2003).
- [18] Z Sun, H Zhang, S Zhang, and B Shen, *Physica C* **305**, 127-134 (2001).
- [19] Y V Postrekhin, K Ma, H Ye, and W Chu, *Journal of Applied Physics* **91**, 8507-8510 (2002).
- [20] <http://www.theva.com/prod/hts> [2010].
- [21] J L Perez-Diaz and J C Garcia-Prada, *Applied Physics Letters* **91**, 142503 (2007).

- 
- [22] E Diez-Jiménez, J L Pérez-Díaz, and J C García-Prada, in *XXII Bienal De Física, R.S.E.F* (Ciudad Real (Spain), 2009).
- [23] Efrén Diez-Jiménez, José-Luis Pérez-Díaz, Juan-Carlos García-Prada. “A mechanical method for experimental determination of the effective lower critical field in high-temperature superconductors”. ICEC 23 ICMC 2010.
- [24] <http://www.aga.com/international/web/lg/aga/like35agacom.nsf/docbyalias/homepage> [2010].
- [25] <http://www.ar.airliquide.com/es/productos-y-servicios/gases/fichas-de-seguridad-de-gases.html> [2010].
- [26] <http://www.inframedica.com/> [2010].

\* Las referencias han sido numeradas por orden de aparición en el texto.

---

# ANEXOS

---

## **ANEXO I. MANUAL DE SEGURIDAD**

El presente anexo pretende servir de referencia como protocolo de seguridad para su utilización en el laboratorio en experimentos futuros en los que se emplee nitrógeno líquido o se manipulen imanes.

### **0. Personal al que va dirigido.**

Toda persona que pueda tener contacto con el nitrógeno líquido y/o con imanes permanentes y que participe de alguna manera en su transporte, almacenamiento o manipulación incluido especialmente el personal investigador que lo utilice en futuros ensayos.

### **1. Utilización de Nitrógeno Líquido**

El nitrógeno líquido es un compuesto que puede resultar peligroso para la seguridad de los usuarios e incluso bajo determinadas condiciones, puede provocar la muerte. Por lo tanto, es imprescindible conocer los riesgos que presenta:

- **Riesgo de inhalación:** El nitrógeno molecular en estado gaseoso se produce por el calentamiento del nitrógeno líquido en contacto con una fuente de calor como puede ser la atmósfera. Puede causar asfixia por desplazamiento de oxígeno ya sea en espacios abiertos o cerrados. En concentraciones importantes pueden causar la muerte con sólo dos inhalaciones. En humanos este desplazamiento de oxígeno puede causar los síntomas recogidos en la figura AI.1.

---

<b>Concentración</b>	<b>Síntomas de exposición</b>
12-16% Oxígeno:	Respiración y grados del pulso aumenta, coordinación muscular es ligeramente alterada.
10-14% Oxígeno:	Efectos emocionales, fatiga anormal, respiración perturbada.
6-10% Oxígeno:	Nausea y vómito, colapso o pérdida de la conciencia.
Abajo 6%:	Movimientos convulsivos, colapso respiratorio y posible muerte.

*Figura AI.1. Efectos de la carencia de oxígeno en el ser humano.*

- **Riesgo de contacto:** En contacto con la piel o los ojos puede producir quemaduras por congelación de diferente grado y el contacto prolongado con grandes cantidades de nitrógeno puede provocar la congelación completa de miembros provocado su amputación.

Es un gas inodoro e incoloro, por lo cual es difícil su identificación. Este gas es muy estable y no presenta riesgos de reacción con otros elementos ni riesgos de combustión.

### **Consejos de seguridad**

Teniendo en cuenta los riesgos que presenta la utilización de nitrógeno líquido durante el experimento, se plantean los siguientes consejos de seguridad:

#### **1. Ventilación**

Cuando se trabaje en recintos cerrados, es preciso que exista una ventilación adecuada que permita la evacuación del gas producido en la evaporación del nitrógeno líquido. Nunca se debe trabajar con nitrógeno líquido en atmósferas con concentraciones de oxígeno menores al 19,5% sin emplear

---

equipos de respiración autónomo [24-25]. En el escenario en el cual se desarrolló el presente proyecto se recomienda abrir la ventana de la fachada que da al exterior y que la puerta del laboratorio permanezca abierta para facilitar la ventilación natural del recinto.

## **2. Zona de trabajo**

La zona de trabajo debe permanecer libre de obstáculos que pudiesen provocar colisiones accidentales, provocando el derramamiento del nitrógeno líquido durante su manipulación o transporte.

Por tanto se recomienda encarecidamente, con vista a futuros experimentos similares, mantener el orden y la limpieza del laboratorio evitando la presencia de herramientas u objetos cercanos a la zona de trabajo o en el suelo de la zona de trabajo y en el recorrido de transporte del nitrógeno.

## **3. Equipo de protección y manipulación**

Para la manipulación del nitrógeno se recomienda encarecidamente emplear:

- a. Guantes impermeables y aislantes como los que se muestran en la figura AI.2 para evitar quemaduras en manos y antebrazos por derramamiento del líquido durante su trasvase entre depósitos o del Dewar al recipiente de ensayo, así como durante el desarrollo del experimento si se trabaja con nitrógeno.



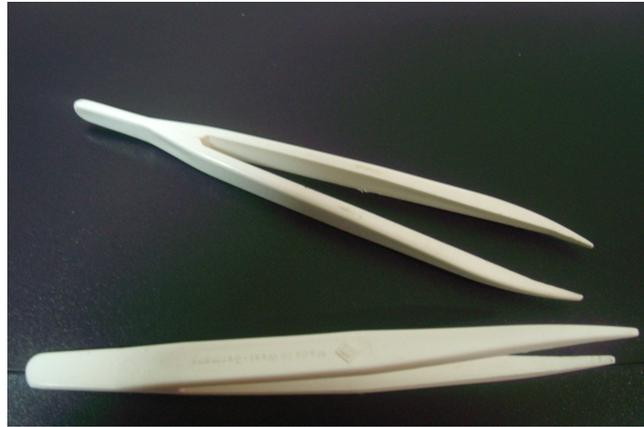
*Figura AI.2 Guantes aislantes.*

- b. Bata de algodón. Tejidos textiles de este tipo no absorben el nitrógeno líquido que pasa a través de las fibras sin humedecerlas. Sin embargo, puede proteger del contacto con objetos en temperaturas criogénicas o de los vapores emanados.
  
- c. Gafas de protección. Evitar riesgos de quemaduras en los ojos debido a salpicaduras accidentales o a causa de los vapores. El contacto directo del nitrógeno líquido con los ojos es extremadamente peligroso ya que las probabilidades de provocar quemaduras graves son muy elevadas.



*Figura AI.3. Gafas de protección.*

- d. Pinzas de plástico termoestable para manipular las pastillas superconductoras, los imanes y cualquier otro objeto equipo que durante el experimento pueda entrar en contacto con el nitrógeno líquido.



*Figura AI.4. Pinzas de plástico.*

#### 4. Trasvase y traslado del nitrógeno líquido

- a. El **depósito principal** es un depósito a alta presión y se encuentra ubicado en las instalaciones de la universidad. Dispone de una manguera para el trasvase al tanque secundario y una válvula de apertura manual como se muestra en la figura AI.5.



*Figura AI.5. Depósito principal de nitrógeno líquido de la Universidad Carlos III de Madrid.*

Durante el proceso de recarga se debe introducir la manguera dentro del depósito secundario lo suficiente para que no se pueda salir.

A continuación se abre la válvula manual al máximo y el operario debe entonces apartarse una **distancia de seguridad** ( $d$ ) de aproximadamente 2 metros (fig. AI.6) para evitar la inhalación de los vapores que se producen. Evitase entrar en contacto con esta nube de vapor.

Una vez la nube se retira y el tanque se llena, se procederá a cerrar la válvula, verificando que está completamente cerrada y se extraerá la manguera.

Toda la operación de carga debe hacerse con el **equipo de protección** (ver consejo de seguridad 3).

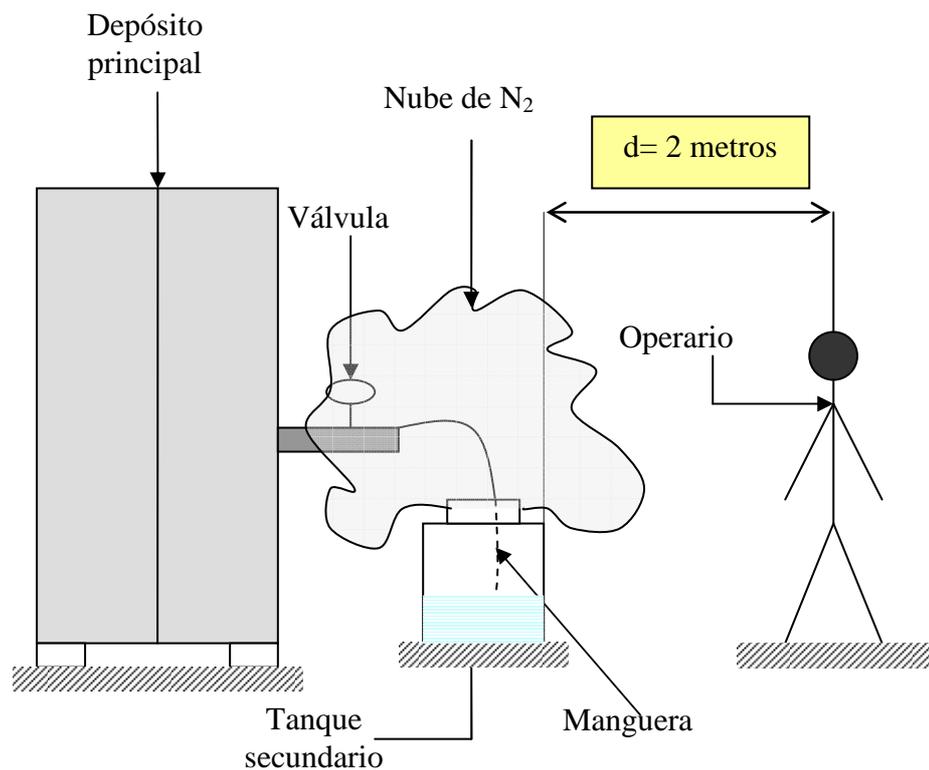
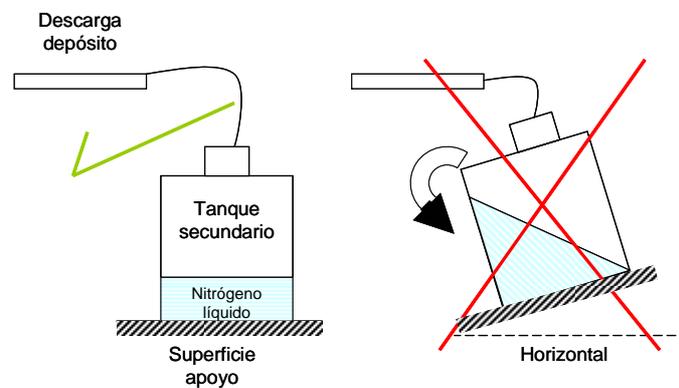


Figura AI.6. Distancia de seguridad ( $d$ ) durante la recarga del tanque secundario.

- b. Durante el **proceso de recarga**, el tanque y el Dewar o tanque secundario deben situarse sobre una **superficie perfectamente estable y plana**, preferiblemente el suelo, en **posición completamente vertical**.

Si el desplazamiento del tanque secundario hasta el laboratorio se hace sobre una plataforma móvil, se recomienda poner el freno durante la recarga o en caso de que la plataforma careciese de freno, calzar las ruedas para evita desplazamientos accidentales.



*Figura AI.7. Posición de recarga segura del tanque.*

- c. Para el **traslado del tanque** secundario desde el depósito principal hasta el laboratorio (fig. AI8), esto debe hacerse bien entre dos personas portando el depósito conjuntamente o empleando una plataforma móvil pues el tanque lleno pesa aproximadamente 32 kg. **Bajo ninguna circunstancia trasladar solo el tanque hasta el laboratorio sin plataforma móvil.**

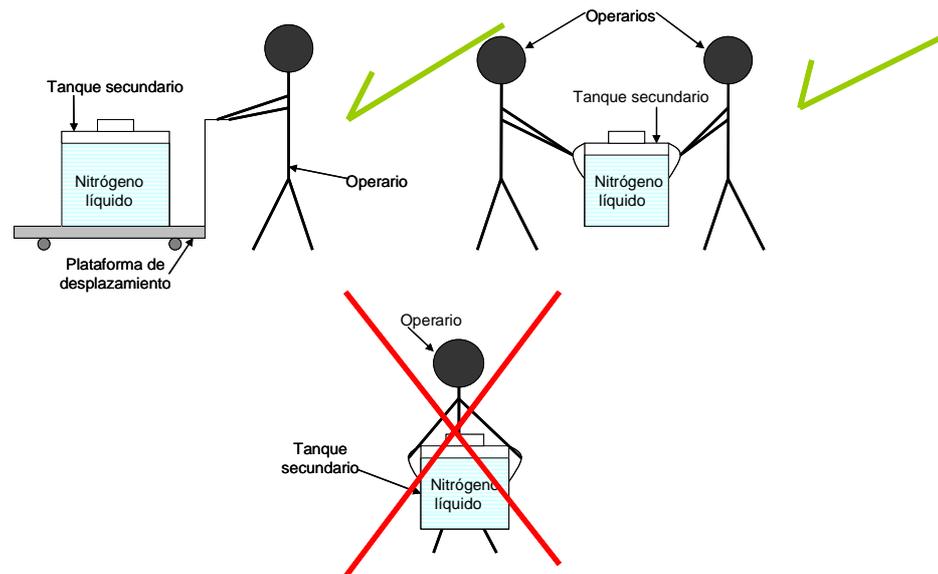


Figura A1.8. Maniobras seguras del desplazamiento del tanque hasta el laboratorio.

- d. Tanto el tanque secundario como el Dewar deben permanecer en posición vertical siempre que contengan nitrógeno líquido, no solamente en su carga y se **deben situar en zonas donde no entorpezcan el paso** de otros usuarios de la nave o del propio investigador, en una **zona visible y segura**, señalizando debidamente el contenido criogénico del tanque secundario.
- e. Si tras finalizar el trabajo, existe nitrógeno sobrante en el Dewar, este debe ser almacenado de nuevo en el tanque secundario, **nunca debe dejarse nitrógeno sobrante en el Dewar** y abandonar las instalaciones.

### 5. Medidas en caso de vertido accidental.

En caso de vertido accidental se debe **evacuar al personal** a zonas seguras y ventiladas. Impedir nuevos escapes o derrames si no se pone en riesgo la seguridad propia de la persona que lo hace y esperar hasta que se restablezca una **atmósfera segura**. Si la concentración de oxígeno descendiese demasiado (ver apartado 1 de este anexo) no se debe acceder a la zona sin equipo de **respiración auxiliar**.

### 6. Medidas en caso de inhalación o entrada en contacto

Se proponen las siguientes medidas:

- **En caso de inhalación:** Retirar a la víctima de la zona afectada y trasladarla a un lugar ventilado tan pronto como sea posible; mantener a la víctima caliente y en reposo. **Ponerse en contacto con personal sanitario de inmediato**. En caso de producirse una parada respiratoria, **personal cualificado** debe aplicar la reanimación cardio pulmonar o RCP [25].
- **En caso de contacto:** Si el líquido criogénico o el gas vaporizado hacen contacto con la piel o los ojos del operario, los tejidos congelados deben **lavarse abundantemente con agua tibia (25-30°C)**. **No use agua caliente**. Calentar progresivamente la zona afectada con otras partes del cuerpo. Las quemaduras criogénicas que produzcan ampollas o la congelación profunda de los tejidos deben ser atendidas de inmediato por un médico [26]

## 7. Materiales

Todos aquellos materiales, objetos o herramientas que se pongan en contacto durante el experimento con el nitrógeno líquido deben resistir temperaturas criogénicas que pueden producir contracciones importantes en algunos tipos de materiales, provocando su degradación o rotura.

## 2. Empleo de imanes

Algunos de los imanes empleados en este proyecto son de elevada potencia (ver **anexo III**) por lo cual se recomienda para futuras investigaciones del Departamento que incluyan la utilización de imanes, sigan las siguientes sugerencias:

1. Manipular imanes **lejos de aparatos electrónicos** que pudieran verse afectados por los campos magnéticos tales como móviles, tarjetas de crédito o de acceso al laboratorio y en cualquier elemento magnéticamente sensible.
  
2. Almacenar los imanes en lugar seguro **aislados de componentes ferromagnéticos** que pudieran verse atraídos por los mismos. Los imanes o los objetos atraídos por ellos pueden salir **despedidos provocando colisiones** entre estos u otros objetos que pueden producir que alguno de los objetos implicados resulte dañado o las personas que los estén manipulando.

El impacto entre dos imanes, puede provocar la pérdida y **astillamiento del recubrimiento** de los imanes, lo que resulta peligroso pues son elementos punzantes de muy reducidas dimensiones que pueden causar lesiones en la piel.

3. Por las mismas razones que en el punto 2, cuando se trabaje con imanes, se debe tener precaución en dónde los situamos durante el desarrollo del experimento.

También es preciso tener en cuenta que la presencia de **elementos ferromagnéticos** en las cercanías **puede afectar a las medidas falseando los resultados**, por lo que se recomienda analizar la zona de trabajo en busca de estos elementos para cerciorarse de la seguridad y fiabilidad del experimento.

## ANEXO II. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LAS PASTILLAS SUPERCONDUCTORAS

La fabricación de materiales superconductores de alta temperatura o HTS de sus siglas en ingles, se inicia a partir de polvos de óxido de alta pureza. La empresa THEVA trabaja con composiciones estándar de REBCO -123 o-211 que contiene diversas tierras raras elementales tales que RE = Y, Sm, Nd, Tb, Dy.

También se facilitan con polvos ultra finos de dopaje como compuestos en base de Zn, Ag y otros que están disponibles bajo petición.

Las características con las que han sido fabricadas las pastillas superconductoras empleadas en el proyecto son:

Forma	Diámetro [mm]	Altura [mm]	Tolerancia [mm]	Otras características
Disco	45	12-13	0,1	Melt textured, estabilizada

*Tabla AII.1. Dimensiones y características de las pastillas superconductoras.*

Las características físicas propias del superconductor son las siguientes:

- **Fórmula química:**  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$
- **Campo crítico:**
  - o Perpendicular a los planos de  $\text{CuO}_2$ : 800 Oe.
  - o Paralelo a los planos de  $\text{CuO}_2$ : 500 Oe.
- **Temperatura crítica:** Variable con la composición. Máxima para  $x= 0,07$   $T_c=92$  K (según fabricante). Consúltese figura AII.1

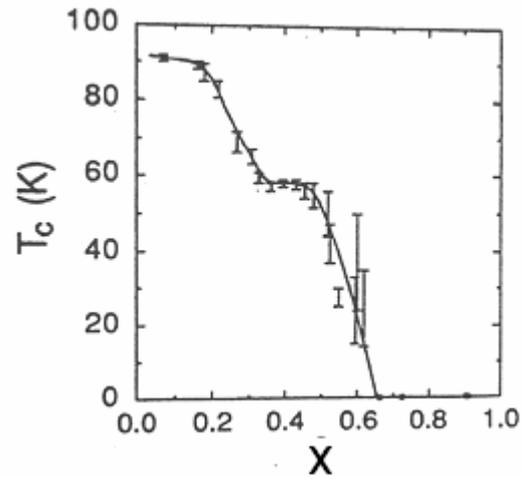


Figura AII.1. Temperatura crítica de las  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  según su concentración de oxígeno  $X$ .

- **Longitud de penetración:** 120 nm en los planos ab y 800 nm en el eje c.
- **Longitud de coherencia:** 2 nm en los planos ab y 0,4 nm en el eje c (fig. 2.6).

## **ANEXO III. PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LOS IMANES PERMANENTES**

*Nota: Todos los imanes empleados en los experimentos fueron adquiridos a la empresa alemana Supermagnete, de cuya página web se extrae la información contenida en este anexo.*

### **1. Nomenclatura y propiedades físicas**

Los imanes empleados en los experimentos son imanes permanentes compuestos de una aleación de neodimio-hierro-boro, el material magnético más potente. Se emplean tres geometrías diferentes de imanes permanentes para los experimentos realizados:

#### **Imán cilíndrico 6,35x25,4**

Las propiedades de este imán, empleado para el experimento relativo al análisis de la posición del imán respecto del ángulo de equilibrio en efecto Meissner (ver apartado), reúne las propiedades de la tabla AIII.1. El significado de algunas de las propiedades físicas y las dudas más comunes al trabajar con imanes se explica en el apartado segundo de este anexo.



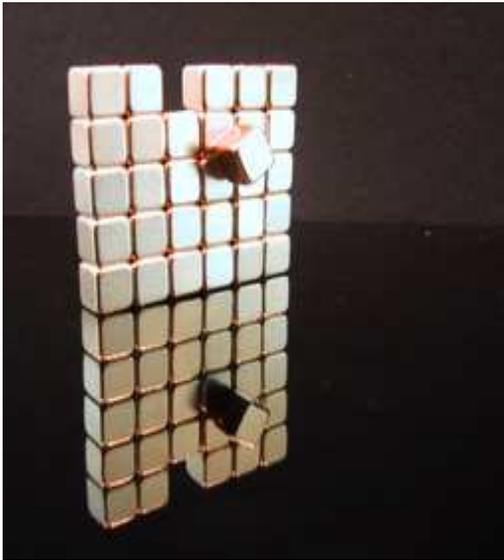
*Figura AIII.1. Imanes 6,3x25,4.*

<b>Código artículo</b>	S-06-25-N
<b>Forma</b>	Barra
<b>Diámetro</b>	6,35 mm
<b>Longitud</b>	25,4 mm
<b>Tolerancia</b>	+/- 0.1 mm
<b>Peso</b>	6,1 gr
<b>Recubrimiento</b>	níquelado (Ni-Cu-Ni)
<b>Magnetización</b>	N42
<b>Tª máxima</b>	80°C
<b>Frza. Sujeción</b>	aprox. 1,6 kg

*Tabla AIII.1. Propiedades imán 6,3x25,4mm*

### Imán cúbico $l=5\text{mm}$

Otro imán empleado en los experimentos de este proyecto, ha sido el imán cúbico de lado 5 mm cuyas características y propiedades físicas se recogen en la tabla AIII.2.



<b>Código artículo</b>	W-05-N50-G
<b>Forma</b>	Cubo
<b>Longitud del lado</b>	5 mm
<b>Tolerancia</b>	+/- 0.1 mm
<b>Peso</b>	0,95 gr
<b>Recubrimiento</b>	dorado (Ni-Cu-Ni-Au)
<b>Magnetización</b>	N50
<b>Tª máxima</b>	80°C
<b>Frza. Sujección</b>	Aprox 1,2 kg

Figura AIII.2. Imanes cúbicos  $l=5\text{ mm}$ . Tabla AIII.2. Propiedades de imán cúbico  $l=5\text{ mm}$

### Magnetización

La denominación NXX es una medida para la calidad del material empleado para la fabricación del imán. De ella pueden deducirse dos cosas:

- La energía magnética por unidad de volumen del material.
- La temperatura máxima a la que puede ser expuesto el imán.

El número que en este caso acompaña a la N, se corresponde aproximadamente con el producto energético del imán expresado en MGOe. Los datos físicos de los imanes se recogen en la tabla AIII.3.

### **Temperatura máxima de trabajo**

Por otra parte, la letra contiene información acerca de la temperatura máxima de servicio. Para la categoría de los imanes empleados en este proyecto, la temperatura máxima de exposición es de 80 °C.

Calidad	Remanencia		Coercitividad				Producto energético		Temperatura máxima de empleo
	Br		bHc		iHc		(BxH)max		
	kG	T	kOe	kA/m	kOe	kA/m	MGOe	kJ/m <sup>3</sup>	
N42	12.9-13.2	1.29-1.32	10.8-12.0	860-955	≥12	≥955	40-42	318-334	≤80
N50	14.0-14.6	1.40-1.46	10.8-12.5	860-995	≥12	≥955	47-51	374-406	≤80

*Tabla AIII.3. Propiedades físicas correspondientes a los imanes de calidad N42 y N50 de la empresa Supermagnete.*

## 2. Dudas más comunes

### ¿Qué es la remanencia?

La remanencia (Br) es una medida para la inducción magnética o densidad de flujo que permanece en el imán tras su magnetización. Dicho más fácil: cuanto mayor sea este valor más "fuerte" será el imán.

Como unidad de medición para la inducción magnética o densidad de flujo se emplea el Tesla (T). En el pasado la unidad utilizada era el G (Gauss), siendo 1 Tesla = 10000 Gauss.

### ¿Qué significa coercitividad?

La coercitividad  $H_c$  define la intensidad del campo que es necesaria para volver a desmagnetizar completamente un imán. Dicho más fácil: cuanto mayor sea este número, tanto mejor mantendrá un imán su magnetización al ser expuesto a un campo magnético opuesto.

Se diferencia entre la coercitividad  $bH_c$  de densidad de flujo y la coercitividad  $jH_c$  de polarización. Si un imán queda expuesto a un campo desmagnetizador de intensidad  $bH_c$ , la densidad de flujo en el imán desaparece. El imán, sin embargo, continúa siendo magnético, pero el flujo generado por él queda neutralizado por el flujo opuesto del campo desmagnetizador. Solamente cuando la intensidad del campo desmagnetizador alcanza el valor  $jH_c$  el imán pierde su polarización y con ella su magnetización completamente.

La unidad SI para la intensidad del campo magnético es A/m (Amperio por metro). También es posible encontrar la unidad empleada en el pasado Oe (Oersted).

---

**¿Qué significa producto energético máximo?**

El producto energético máximo define la máxima energía magnética almacenada en un imán. Se trata del producto máximo alcanzable de densidad de flujo B e intensidad del campo H.

Como unidad se emplea el kJ/m<sup>3</sup> (kilojulio por metro cúbico) o bien el MGOe (Mega-Gauss-Oersted).

Para la misma aplicación se puede usar un imán pequeño con un elevado producto energético o un imán grande con un producto energético bajo.

**¿Cómo puedo saber cuál es el polo norte de un imán?**

El polo norte de un imán es el polo - siempre que el imán pueda girarse - que señala hacia el norte. Esto es posible de demostrar por ejemplo juntando varios S-05-25-N y colgándolos de un cordón. Ya que los polos opuestos se atraen, se deduce que el polo norte en realidad es un polo sur magnético y así es.

Además es posible encontrar el polo norte de un imán con ayuda de una brújula: La punta de la aguja que normalmente señala el sur es atraída por el polo norte del imán.

**¿Cuál es la fuerza de sujeción de este imán?**

La fuerza de sujeción aproximada en gramos o kilogramos se puede consultar en las tablas AIII1 y AIII2 para los imanes empleados en este proyecto. Téngase en cuenta, que se trata siempre de valores máximos teóricamente alcanzables bajo condiciones óptimas. La fuerza efectiva depende de los siguientes factores:

- **Distancia entre el imán y el cuerpo de sujeción**

En caso de no existir un contacto directo, la fuerza de sujeción disminuye rápidamente al aumentar la distancia. Un pequeño espacio de alrededor de medio milímetro puede en algunos casos disminuir la fuerza de sujeción a la mitad. Una fina capa de pintura en el cuerpo de sujeción contribuye también a una reducción de la fuerza.

- **Material del cuerpo de sujeción**

La fuerza de sujeción teórica es válida cuando el cuerpo de sujeción está compuesto solamente de hierro blando. En acero de construcción del tipo ST37 deberá Vd. reducir el valor en aprox. 5%; en el caso de ST70 la reducción será aprox. del 30%.

- **Superficie del cuerpo de sujeción**

Cuanto más lisa sea la superficie del cuerpo de sujeción tanto mayor será la fuerza de sujeción. En superficies ásperas se deberá contar con una reducción considerable de la fuerza de sujeción.

- **Dirección de la fuerza**

El valor teórico de la fuerza de sujeción es válido, cuando la fuerza ejercida es perpendicular a la superficie de contacto, o sea, cuando el cuerpo de sujeción, por ejemplo, es atraído perpendicularmente bajo el imán.

- **Ancho del cuerpo de sujeción**

El cuerpo de sujeción no debe ser demasiado delgado, dado que éste alcanzaría un punto de saturación magnética y una parte del campo magnético sería desperdiciado.

Como norma general usted no deberá ceñirse nunca para una aplicación concreta a estas indicaciones sobre fuerzas de sujeción, sino realizar un ensayo propio.

**¿Se debilitan los imanes con el tiempo?**

Los imanes de neodimio conservan su magnetismo bajo circunstancias normales casi de manera ilimitada. En este punto se diferencian de los imanes de ferrita comunes que con el tiempo y sin necesidad de influencias externas pierden su magnetismo.

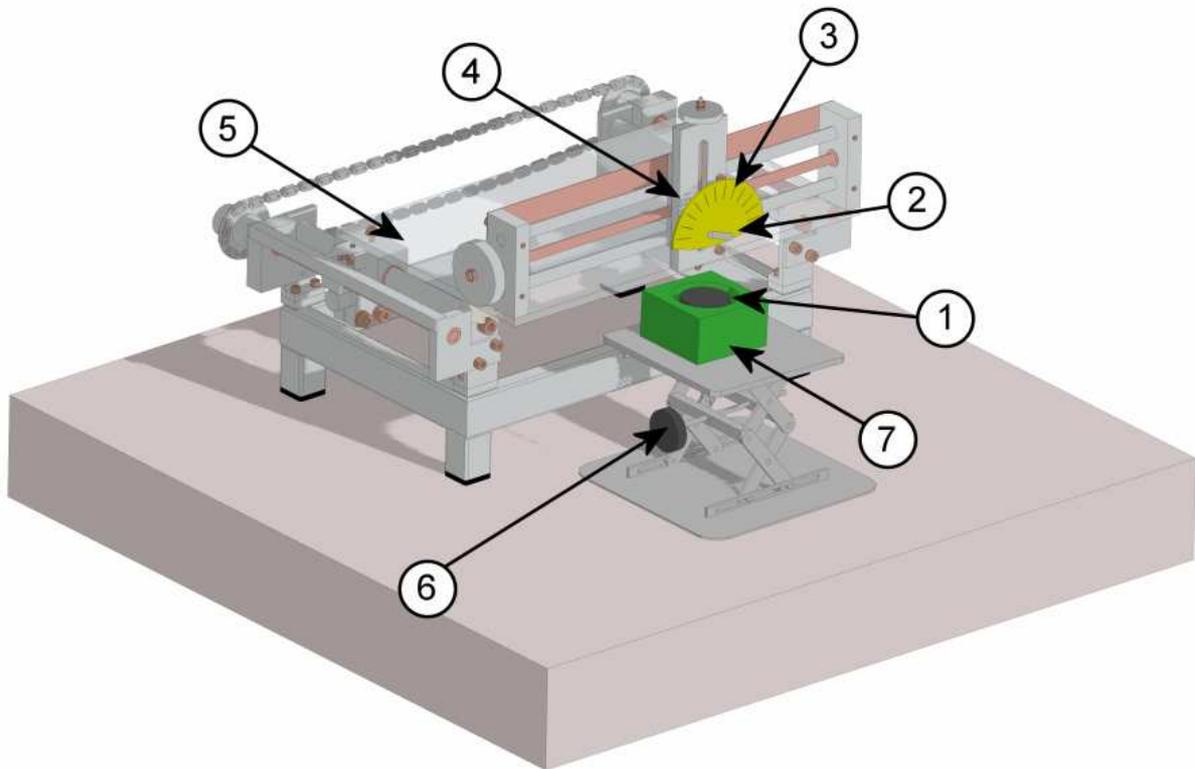
Factores que pueden llevar a la pérdida de fuerza magnética en imanes de neodimio son:

- Calor: La mayoría de los imanes no deberían ser expuestos a más de 80 °C
- Otros campos magnéticos potentes.

---

# PLANOS

---



**LEYENDA**

- 1- Pastilla superconductora.
- 2- Imán y eje de giro.
- 3- Goniómetro.
- 4- Cojinete de fricción.
- 5- Mesa 3D.
- 6- Mesa tipo Jack.
- 7- Recipiente contenedor del superconductor.

DIBUJADO	Fecha	Realizado por	RAZON SOCIAL
	23/09/2010	Ignacio Valiente Blanco	Universidad Carlos III de Madrid 
ESCALA	Sistema experimental para la medición del ángulo de equilibrio entre imanes y superconductores.		NÚMERO DE PLANO
	DISPOSICIÓN FINAL DE ELEMENTOS. BANCO DE ENSAYOS		1