

Superconductividad

José Manuel Rodríguez Manjón
Alejandro José Florido Tomé

6/11/2022

1. Objetivo

En esta práctica, hallaremos la temperatura de transición de distintos materiales superconductores ayudándonos del efecto Meissner y del método de Kelvin.

2. Marco Teórico

La superconductividad es un estado de la materia en el cual la resistencia al paso de corriente eléctrica de los materiales cae bruscamente a valores prácticamente nulos. Dicho proceso ocurre a partir de ciertas temperaturas de transición adecuadas para cada material. Sin embargo, los metales alcalinos y los metales nobles no presentan comportamiento superconductor cerca de 0,1 K (el mínimo conseguido).

Además, los estados superconductores se comportan de forma diamagnética por debajo de la transición. En particular, este efecto en relación con los campos magnéticos aplicados al material se conoce como efecto Meissner. Así, su consecuencia más clara es la que se observa en la experiencia de laboratorio, la levitación magnética. Al acercar un imán a un material en estado superconductor, el primero ha de inducir una corriente que no experimenta resistencia en el último. Dicha supercorriente se mantiene incluso después de la aplicación del campo. Debido al efecto Meissner, el interior debe ser perfectamente diamagnético, con lo que el superconductor genera un campo contrario que contrarresta el efecto del primero, produciendo la levitación.

La superconductividad como aspecto teórico se basa en la descripción de los pares de Cooper. Cuando los electrones responsables de la conductividad se mueven en las proximidades de los núcleos atómicos, los atraen hacia su trayectoria. Puesto que los núcleos se mueven mucho más lentamente, este desplazamiento de la carga positiva persiste durante el tiempo suficiente para que pueda atraerse un segundo electrón, formándose así el par.

Conforme el conductor se calienta, la cantidad de pares empieza a decrecer rápidamente. La llamada temperatura de transición es una estimación de la energía necesaria para romper dichas estructuras. De la misma forma, la aparición

de campos y corrientes lo suficientemente fuertes en la superficie del conductor puede llevar también a la desaparición de los pares.

Pueden distinguirse dos tipos de superconductores a este respecto: tipo I (es el caso de la mayoría de los elementos) y tipo II (la mayor parte de los compuestos). En los primeros, la superconductividad se destruye para campos magnéticos mayores que un cierto valor crítico B_c . En los de tipo II, el campo ha de ser superior al campo crítico superior B_{c2} , mientras que por debajo del campo crítico inferior B_{c1} se mantiene el estado superconductor y entre B_{c1} y B_{c2} el campo penetra en el superconductor en forma de vórtices locales de supercorriente que rodean un núcleo.

3. Metodología

La metodología de la práctica se lleva a cabo según las instrucciones indicadas en el manual de laboratorio. La experiencia se compone de dos partes principales: la determinación de la temperatura de transición de dos superconductores a través de la observación del efecto Meissner y la obtención de ésta para un tercer compuesto, también superconductor, haciendo uso de medidas de resistencia y tensión por cuatro terminales.

Así, para el primer caso tenemos que los superconductores utilizados son pastillas de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (llamado superconductor 1-2-3 por la relación) y de $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-SrO-CaO-CuO}$. Para los experimentos de levitación se utilizarán pequeños imanes de neodimio, de alto campo. Las pastillas están embutidas en una funda de bronce que incluye conexiones eléctricas con la pastilla y un termopar. El procedimiento consistía en los siguientes pasos:

1. Una vez enfriado el superconductor con nitrógeno líquido, se deja levitar un imán de neodimio sobre él.
2. La pastilla cae sobre el superconductor cuando este experimenta el cambio de estado. El voltímetro da una medida que se usa como referencia.
3. Repetimos la experiencia varias veces.
4. La regresión estipulada en el manual de laboratorio da una estimación de la temperatura crítica que concuerda con los valores de tensión.
5. Repetimos la experiencia con $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-SrO-CaO-CuO}$.

La segunda parte se hace gracias al equipo Leybold. Incluye al superconductor propiamente dicho y una fuente de corriente establece unos 140 mA, que se aplica entre los extremos. La caída de potencial se toma entre dos puntos intermedios; esta diferencia de potencial es proporcional a la resistencia de la muestra. La temperatura se mide mediante la resistencia de platino/iridio adherido al superconductor. La medida se realiza haciendo pasar la corriente y midiendo el potencial en los extremos. La lectura de tensión será entre 0 y 200 mV. La toma de datos se da con un software preinstalado, en el que la rutina representa datos de tensión frente a la temperatura medida. El experimento se realiza con los siguientes pasos:

6. Iniciar la rutina "SUPERCOND"

7. Colocar la muestra en el contenedor de poliuretano y añadir nitrógeno hasta cubrirla no más allá de la mitad de su altura. 8. Iniciar la toma de datos mediante el comando F9.

9. Al cabo de unos 10 min, la temperatura y ddp toman valores estacionarios.

10. Los datos se recogen en un fichero de texto.

11. Para esclarecer el proceso, se toman datos de la misma forma en el proceso de calentamiento.

4. Resultados y Cuestiones

4.1. R.1.

Siguiendo el procedimiento usado en 1-5, se observan, para tres determinaciones de cada conductor y pastilla, diferencias en la tensión observada en la transición. Podemos hallar las temperaturas máximas y mínimas a partir de la tensión en mV con la siguiente ecuación:

$$T(K) = (289,37 \pm 0,18) + (-45,18 \pm 0,25)V + (2,28 \pm 0,09)V^2 + (-0,050 \pm 0,009)V^3 \quad (4.1)$$

Los datos observados de la tensión y los calculados con la ecuación (4.1) son los siguientes:

Tensión ($\pm 0,01$) mV	5,34	5,42	5,09
<i>Temp</i> K	$105,51 \pm 5,45$	$103,41 \pm 5,61$	$111,87 \pm 4,97$
<i>Temp.esperada</i> K	$106,93 \pm 5,34$		

Tabla 1: Temperaturas y tensiones tomadas para el superconductor (1-2-3), YBa2Cu307- δ .

De la misma forma para el siguiente superconductor tenemos:

Tensión ($\pm 0,01$) mV	5,43	5,27	5,20
<i>Temp</i> K	$103,26 \pm 5,63$	$107,40 \pm 5,31$	$108,98 \pm 5,18$
<i>Temp.esperada</i> K	$106,55 \pm 5,37$		

Tabla 2: Temperaturas y tensiones tomadas para el superconductor Bi2O3-SrO-CaO-CuO.

Las temperaturas no se diferencian en gran medida.

4.2. C.1.

El nitrógeno líquido es el estado al que se encuentra dicha sustancia por debajo de la temperatura de ebullición. En particular, el nitrógeno ebulle a -195,8 °C para la presión atmosférica. De tal manera que, al entrar en contacto

con el resto del material del laboratorio, a temperatura ambiente, la diferencia térmica es tal que el nitrógeno se evapora espontáneamente.

4.3. C.2.

El nitrógeno evaporado queda, debido a su densidad, localizado en una zona envolviendo las pastillas del imán. En particular, éste es más denso que el aire, quedando una zona muy fría que permite seguir observando el efecto Meissner. Durante el proceso de cambio de temperatura del gas, el cual se produce de forma lenta, el imán sigue estando en un estado térmico que permite apreciar su superconductividad y la aparición de los campos magnéticos consecuentes.

4.4. R.2.

Usando los datos presentados en R.1., encontramos que en el caso de ambas pastillas:

$$T_C = (106,93 \pm 5,34) K \quad (4.2)$$

$$T_C = (106,55 \pm 5,37) K \quad (4.3)$$

La diferencia relativa es del 0,35 %, con lo que se ve un claro parecido en el comportamiento superconductor de ambas aleaciones.

La regresión establecida entre tensión y temperatura en ambos superconductores ha de ser la misma según la bibliografía, haciendo que sea, en el mismo rango de voltaje, posible obtener medidas térmicas similares.

4.5. R.3.

Las magnitudes representadas se dividen en dos tramos, para apreciar más correctamente el efecto. Así, por una parte, se observa un período de “caída térmica” que lleva desde la temperatura ambiente a la zona superconductor. De la misma manera, el período de subida informa sobre el procedimiento contrario (véase las figuras 1, 2, 3 y 4).

Para observar claramente el valor de la temperatura de transición, la evolución térmica frente a la tensión eléctrica se estudia sin separación en los períodos (figura 5).

Observando las diferentes gráficas podemos estimar la temperatura de transición. En el paso de la zona de comportamiento superconductor al habitual, se observa una inflexión en el voltaje en el segundo 70, que corresponde a una temperatura de $(98,5 \pm 2,5)K$.

Para el proceso de descenso térmico, la misma inflexión se observa para el segundo 240, donde el valor de temperatura es de $(110 \pm 10)K$.

Observando de igual forma la relación entre tensión y temperatura, se observa una zona intermedia entre dos inflexiones de comportamiento similar a la linealidad. En la zona media de dicho intervalo, en $(100,5 \pm 0,5)K$ el comportamiento pasa de una zona superconductor a un comportamiento habitual. Para visualizarlo mejor, se puede mostrar el gráfico a otra escala.

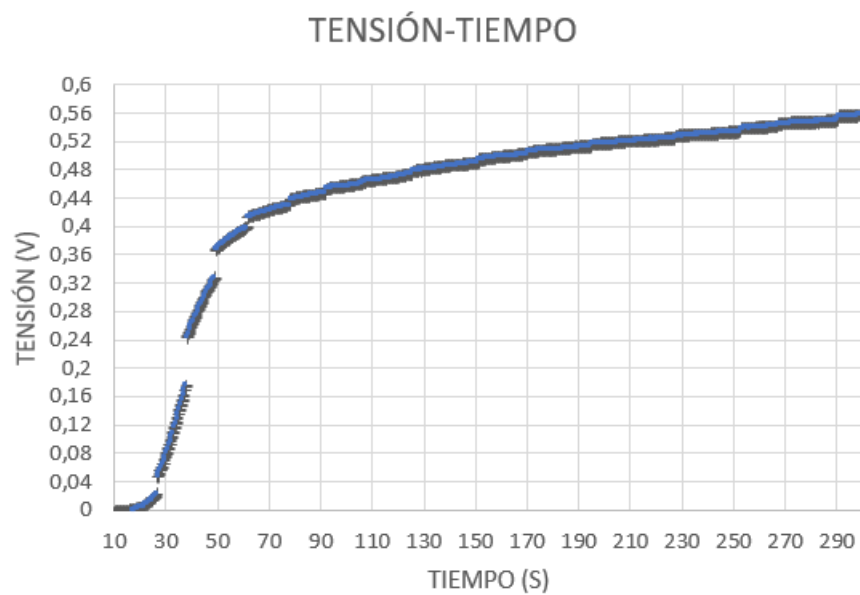


Figura 1: Tensión frente al tiempo en el período de subida, desde una zona de nula resistencia hasta valores propios de la temperatura ambiente.

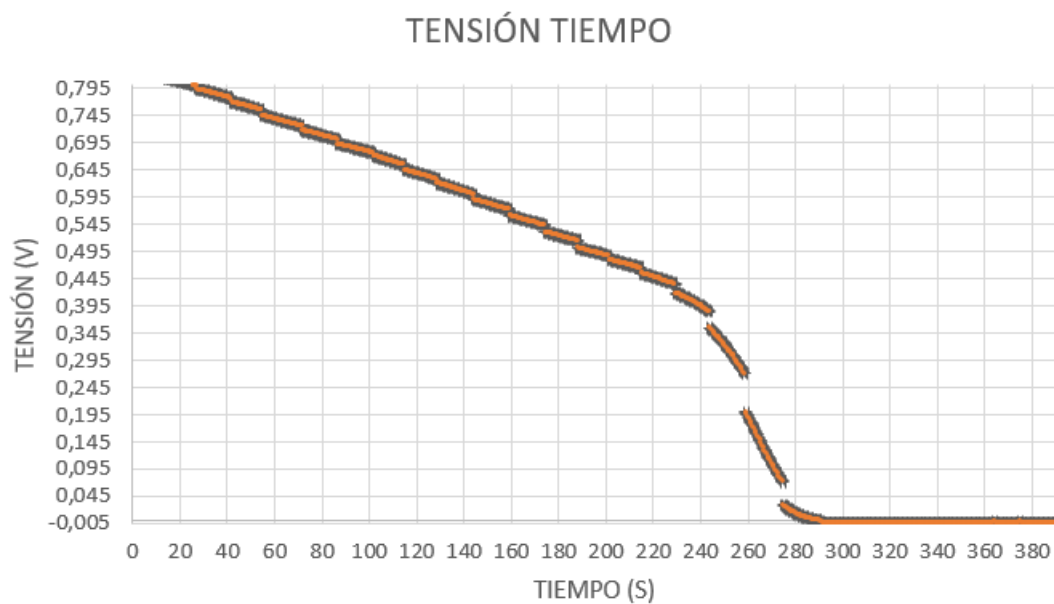


Figura 2: Tensión frente al tiempo en el período de bajada, donde en los últimos segundos se aprecia un valor de voltaje prácticamente nulo al no ofrecer resistencia.

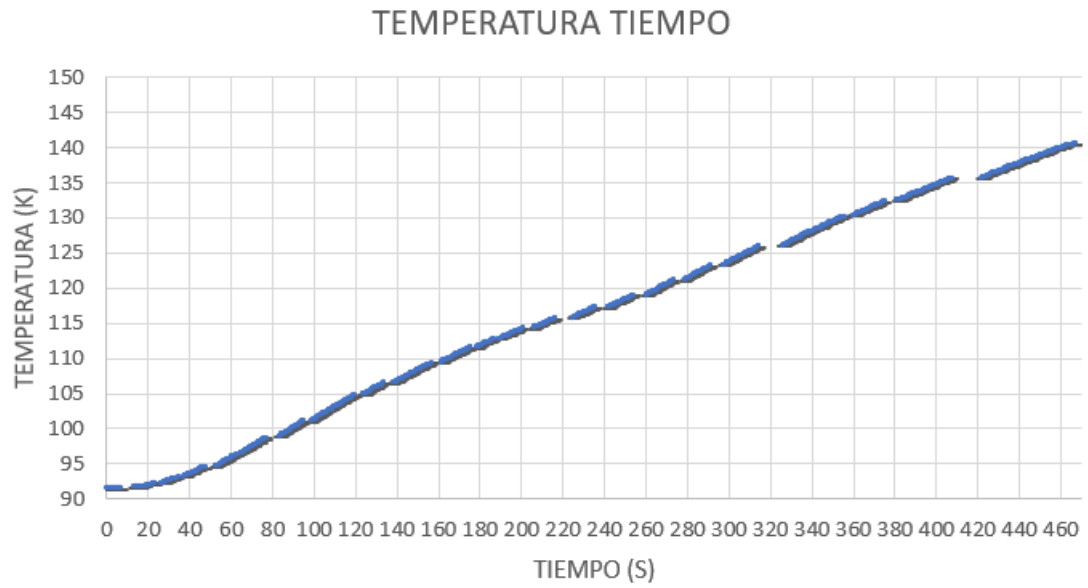


Figura 3: Evolución temporal de la temperatura de subida en ambos períodos que se estabiliza en valores en torno a los 90 K.

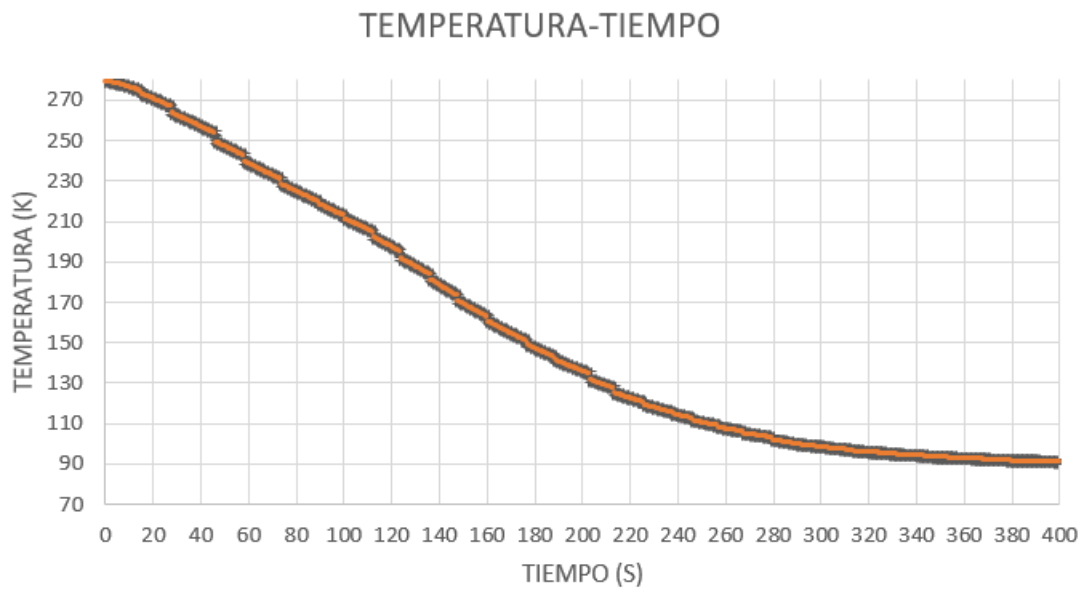


Figura 4: Evolución temporal de la temperatura de bajada en ambos períodos que se estabiliza en valores en torno a los 90 K.

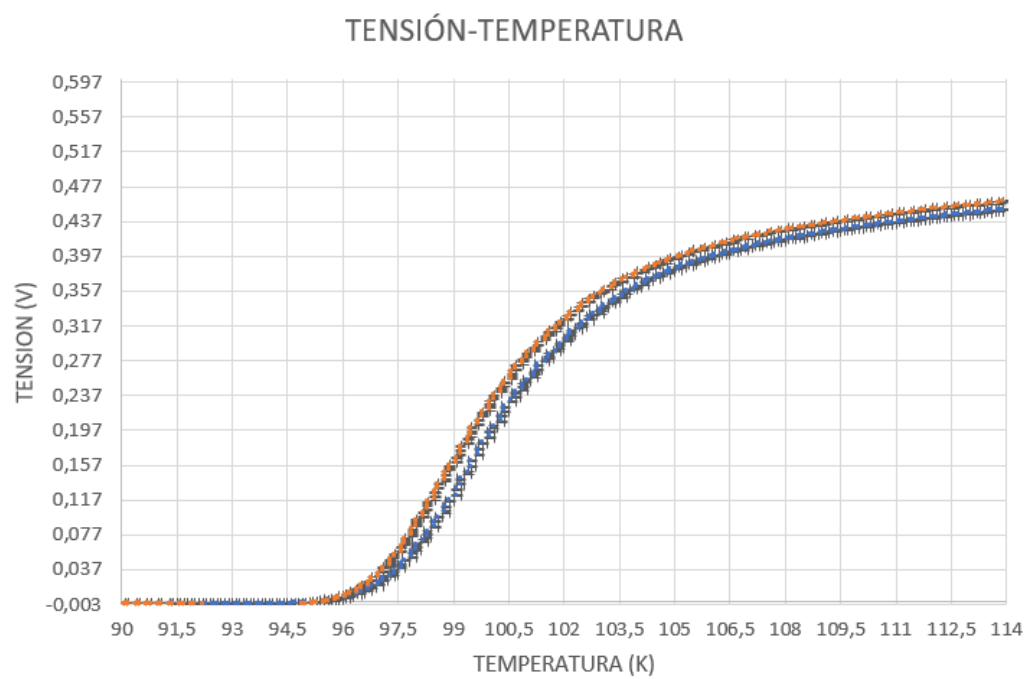


Figura 5: Tensión frente a temperatura. (Subida, azul) (Bajada, naranja).

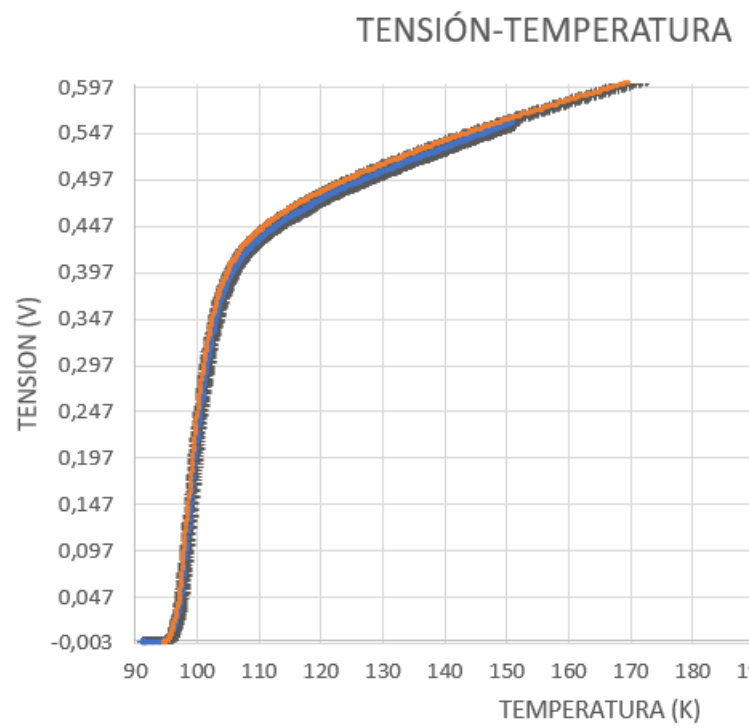


Figura 6: Tensión frente a temperatura (subida, azul) (bajada, naranja) a otra escala de temperaturas respecto de la figura 5.

Como se aprecia en la figura 6, aquí la pendiente parece escalar rápidamente hasta ser vertical de forma casi total. El valor en torno al cual se articula dicha zona es precisamente $(100 \pm 5)K$, con un grado de precisión menor al anterior por factores de escala.

Por obtener un resultado confiable, usamos una media de las estimaciones dadas anteriormente, con lo que obtenemos una temperatura de transición de:

$$T_c = (102, 25 \pm 4, 5) \text{ K} \quad (4.4)$$

4.6. C.3.

El llamado método de Kelvin o medición a cuatro puntas nos sirve para medir resistencias pequeñas que presenta el platino/iridio adherido al superconductor con ayuda de un voltímetro y un amperímetro, con las que mediremos la corriente que hacemos pasar, y el potencial en los extremos de la resistencia. Se usa este método porque la resistencia y la temperatura están íntimamente relacionadas, con un factor en medio llamado coeficiente de temperatura de la resistencia eléctrica. Es interesante el método para los superconductores ya que estos presentan una resistencia casi nula, lo que lleva asociado una temperaturas bajas, que es lo que se ve experimentalmente (100 K son temperaturas bajas comparada con la temperatura ambiente de 300K).

4.7. C.4.

Las temperaturas críticas son las siguientes
Efecto Meissner:

- YBa₂Cu₃O_{7-δ}

$$T_C = (106, 93 \pm 5, 34) \text{ K} \quad (4.5)$$

- Bi₂O₃-SrO-CaO-CuO

$$T_C = (106, 55 \pm 5, 37) \text{ K} \quad (4.6)$$

- YbaCuO:

$$T_c = (102, 25 \pm 4, 5) \text{ K} \quad (4.7)$$

La diferencia relativa máxima, es decir, tomando el valor mínimo esperado para la temperatura de YBaCuO respecto a los demás es de 8,5 % para el superconductor (1-2-3) y del 8,3 % respecto al Bi₂O₃-SrO-CaO-CuO, de tal forma que observamos una diferencia muy poco significativa. El hecho lleva a pensar que todos los materiales muestran un comportamiento similar en lo que a su superconductividad se refiere. No hay diferencias apreciables en la transición entre estados, con lo que la experiencia es similar con independencia del material.