



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

Optimización de un preamplificador para  
la lectura de sensores SQUID

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de  
Ingeniero Eléctrico - Electrónico

P R E S E N T A

Luis Arturo Vélez Quiñonez

ASESOR DE INFORME

Dr. Hoover Mujica Ortega



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023



Jurado asignado

Presidente: Dr. Gerardo René Espinosa Pérez

Secretario: M.I. Daniel Martínez Gutiérrez

Vocal: Dr. Hoover Mujica Ortega

1<sup>er</sup> suplente: Dra. Sofía Magdalena Ávila Becerril

2<sup>do</sup> suplente: Dr. Roberto Giovanni Ramírez Chavarría

Ciudad Universitaria, Departamento de Control y Robótica, Laboratorio de  
Automatización.

Ciudad de México.

Asesor de informe

---

Dr. Hoover Mujica Ortega



## **Dedicatoria**

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Ingeniería.

A mis padres Alicia y Luis.

A mi hermano Alejandro.

A mis amigos.



## Agradecimientos

A mi honorable Universidad Nacional Autónoma de México por abrirme sus puertas y brindarme un gran conocimiento dentro de mi querida Facultad de Ingeniería y por darme el motor para volar a otro continente para formarme profesionalmente.

Al Dr. Hoover Mujica por ayudarme a planear mi vuelo y apoyarme para alcanzar mis metas académicas y profesionales.

A los doctores y profesores que fueron mis mentores del Departamento de Control y Robótica de la UNAM y de la Facultad de Ingeniería.

A mis compañeros de clases y amigos que fueron mi sostén durante todas las dificultades y retos que enfrenté con ellos durante mi formación profesional.

A mis padres, Alicia Quiñonez y Luis Arturo Vélez que gracias a su dedicación, amor y apoyo me dieron alas para alcanzar cualquier destino.

A mi hermano Alejandro Vélez que es ese eterno cómplice, amigo y me inspira a ser el capitán de mi propia vida.

A mi Adrianna Kacprzak, mi novia querida por todo su apoyo emocional.

A mis amigos queridos, Andrés M., Rolando, Andrés O., Miguel, Santiago, Carlos, Axel, Erick, Felipe, Michel, Maximilien, Mathis, Ethan, Nicholas, Simon, Valeria y Montserrat, que son los pasajeros en el vuelo de mi viaje y que siempre me alientan con sus palabras y consejos.

A mis abuelos, que me enseñaron a valorar la educación y educaron a mis padres, sin ellos nada de esto sería posible.





## Resumen

En el presente trabajo, se describen las actividades realizadas en un instituto de desarrollo de micro y nanoelectrónica, donde se fabrican dispositivos superconductores y se desarrollan detectores y sensores que explotan las propiedades superconductoras de materiales como el niobio; dichos dispositivos ofrecen prestaciones que superan a los desarrollados con electrónica convencional.

Si bien la alta sensibilidad y bajo ruido de estos dispositivos superconductores suele ser una ventaja significativa en diversas aplicaciones, también presenta algunos desafíos; como la interferencia electromagnética producida por fuentes externas a la que se desea medir, el atrapamiento de flujo magnético y la dificultad de acoplarlos a sistemas de medición de electrónica convencional; por tal motivo, las actividades desarrolladas se enfocaron en la optimización de un preamplificador empleado en la lectura de dispositivos superconductores de interferencia cuántica (SQUID, por sus siglas en inglés). Estos dispositivos, desempeñan un papel fundamental en la medición de fenómenos que demandan una alta sensibilidad de medición para variables físicas, que son medibles a través de campos magnéticos, los cuales pueden ser del orden de decenas de femtoteslas.

La metodología empleada, para la optimización del preamplificador, se fundamentó en mejorar la constante de acoplamiento inductivo entre la bobina por donde circula la corriente inducida por la señal de entrada y las bobinas que conforman al preamplificador. Dicha mejora permite una transferencia más eficaz de la señal que, en la siguiente sección del dispositivo, es amplificada y digitalizada por electrónica convencional con una impedancia de entrada de  $50 \Omega$ .

La contribución central de este trabajo radica en el diseño y validación de una nueva geometría para las bobinas del preamplificador. La geometría propuesta, aprovecha un área mayor de superposición entre dichas bobinas y permite una mejor disposición de los elementos del preamplificador que conforman al chip. Mediante simulación en un software dedicado a la solución de las ecuaciones de Maxwell por medio del método de elementos finitos, se comprobó que la nueva geometría propuesta mejora en un 8.44 % la constante de acoplamiento inductivo entre la bobina de la señal de entrada y las bobinas que conforman al preamplificador. Posteriormente, se procedió a realizar las pruebas de fabricación empleando diferentes tiempos de revelado de la fotomáscara de cada capa que conforma al chip, para encontrar una metodología que garantice la repetibilidad y calidad de fabricación del dispositivo.

Este trabajo recopila la experiencia adquirida en el rediseño, simulación y manufactura de dispositivos superconductores a escalas microscópicas utilizando técnicas de fotolitografía. Lo cual representa un paso inicial hacia un mejor preamplificador y abre posibilidades futuras para continuar con la exploración de nuevos diseños.

Los resultados obtenidos demuestran que un cambio en la geometría de las bobinas mejora la transferencia de la señal captada, lo que incrementa la sensibilidad del preamplificador.



# Índice general

Índice de figuras	xiii
Índice de tablas	xv
Glosario	xvii
<b>1. Introducción y Objetivo</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Objetivo . . . . .	2
<b>2. Antecedentes</b>	<b>3</b>
2.1. Superconductividad . . . . .	3
2.1.1. Fenómeno de la Superconductividad . . . . .	4
2.1.2. Superconductores tipo I y tipo II . . . . .	7
2.1.3. Atrapamiento de flujo en superconductores tipo II . . . . .	8
2.2. Uniones de Josephson . . . . .	9
2.2.1. Modelo RCSJ para la unión Josephson . . . . .	11
2.2.2. Parámetro de Stewart-McCumber . . . . .	12
2.3. SQUID D.C. . . . .	13
2.4. Aplicaciones de los SQUID D.C. . . . .	16
2.5. Ejemplo de aplicación por necesidad de sensibilidad (Experimento ECHO) . . . . .	16
2.5.1. Posible uso de SQUID como preamplificadores en el experimento ECHO . . . . .	17
<b>3. Definición del Problema</b>	<b>19</b>
3.1. Electrónica de lectura de SQUID . . . . .	20
<b>4. Metodología Implementada</b>	<b>23</b>
4.1. Herramientas de asistencia en el diseño y simulación de circuitos integrados . . . . .	23
4.2. Tecnologías de microfabricación . . . . .	24
4.2.1. Fotolitografía laser . . . . .	25
4.2.2. Técnica de <i>Lift-off</i> . . . . .	25
4.2.3. Técnica de Etching . . . . .	26
4.3. Ecuaciones de inductores espirales planos . . . . .	26
4.4. Limitaciones de fabricación y requisitos de diseño . . . . .	28
4.5. Cálculo de los parámetros de diseño . . . . .	28
4.6. Diseño gradiométrico . . . . .	29

---

4.6.1. Ejemplo de diseño de un SQUID gradiométrico de segundo orden . . . . .	30
4.7. Diseño de componentes para el preamplificador . . . . .	32
4.7.1. Diseño del SQUID <i>washer</i> . . . . .	33
4.7.2. Diseño de los resistores <i>shunt</i> . . . . .	33
4.7.3. Rediseño de los inductores que atenúan resonancias entre celdas del preamplificador	35
4.7.4. Rediseño de interconexión entre elementos y terminales del chip . . . . .	35
<b>5. Resultados</b>	<b>37</b>
5.1. Investigación y experimentación para encontrar los límites de fabricación . . . . .	37
5.2. Geometría del inductor que conforma los SQUID del arreglo . . . . .	39
5.3. Simulaciones numéricas del acoplamiento entre la bobina de entrada y el SQUID . . .	39
5.4. Manufactura de los chips para pruebas . . . . .	40
5.5. Pruebas del chip . . . . .	41
5.6. Manufactura de nuevos chips de prueba . . . . .	43
<b>6. Conclusiones</b>	<b>45</b>
6.1. Comentario final . . . . .	45
<b>Apéndice A. Disposición de los elementos del chip que contiene al preamplificador</b>	<b>47</b>
<b>Referencias</b>	<b>49</b>

# Índice de figuras

2.1.	Gráfico del salto a aproximadamente $T_c \approx 4.2$ K al estado superconductor. . . . .	4
2.2.	Esquemático del comportamiento de un superconductor por encima y por debajo de la temperatura crítica $T_c$ . La distancia $\lambda_L$ corresponde a la profundidad de penetración de London que típicamente corresponde a cientos de nanómetros y es la región donde el campo magnético decae exponencialmente. . . . .	5
2.3.	Dependencia espacial del campo magnético dentro de un superconductor. . . . .	6
2.4.	Curvas que ilustran las diferencias en el comportamiento de los superconductores tipo I y tipo II. . . . .	8
2.5.	Fijación de flujo en un superconductor tipo II. . . . .	9
2.6.	Esquema de una unión de Josephson que consiste de dos superconductores separados por una delgada barrera aislante. . . . .	10
2.7.	Representación esquemática del modelo RCSJ. En este esquema se ha representado en ausencia de ruido térmico. . . . .	12
2.8.	La dinámica de una unión de Josephson puede describirse por una partícula moviéndose a lo largo de una coordenada $\varphi_{\text{ext}}$ dentro de un potencial $U(\varphi_{\text{ext}})$ . En el esquemático se graficaron 5 valores para $\gamma$ . . . . .	13
2.9.	Representación circuital de un D.C. SQUID. Las dos cruces representan las uniones Josephson que interrumpen el <i>loop</i> superconductor. . . . .	14
2.10.	Esquema que muestra la bobina de entrada del SQUID, la geometría del SQUID <i>washer</i> , resistores <i>shunt</i> y uniones de Josephson. . . . .	15
3.1.	Gráfico comparativo entre la intensidad de campo magnético producido por algunas fuentes y la resolución límite de un sensor SQUID. . . . .	19
3.2.	Esquema que muestra el proceso de lectura y manipulación de un sensor SQUID desde el criostato hasta un programa en computadora. . . . .	20
3.3.	Esquemático que muestra un chip preamplificador que consiste de SQUID conectados en serie como parte de la electrónica de lectura de un sensor SQUID localizado en otro chip. . . . .	21
3.4.	Esquemático que el acoplamiento inductivo entre la bobina por donde circula la señal que se desea amplificar y el arreglo de SQUID. . . . .	22
4.1.	Fotorresistencia positiva (izquierda) y negativa (derecha). . . . .	26
4.2.	Diagrama de un inductor espiral plano octagonal. Se muestran los parámetros que definen el valor de la inductancia de acuerdo a la ecuación modificada de Wheeler. . .	27
4.3.	Gradiómetro de primer orden. . . . .	30

---

4.4.	Polígono regular con un hueco en el centro (izquierda) y rendija delgada infinita (derecha).	31
4.5.	Inductor simulado para el ejemplo de diseño. . . . .	32
4.6.	Esquemático que muestra las componentes necesarias para calcular el área de un octágono hueco (izquierda) y la mitad de un octágono hueco (derecha). . . . .	34
5.1.	Defectos de fabricación observados para las geometrías de prueba espirales. Se observa que algunas de las estructuras fueron desprendidas del chip debido a un tiempo de revelado demasiado largo. . . . .	38
5.2.	Defectos de fabricación observados para patrones de ancho y separación de $2 \mu\text{m}$ . En aplicaciones donde se desarrollará un circuito, dichos bordes no definidos pueden generar cortocircuitos entre secciones de cada elemento, así como entre otros elementos. . . . .	38
5.3.	Ejemplo de un buen revelado en una estructura de prueba tras encontrar los parámetros correctos. . . . .	39
5.4.	Fotografía de un <i>dip-stick</i> del sistema de enfriamiento vendido por Bluefors. El <i>dip-stick</i> es la sonda donde se monta el chip al que se le realizaran mediciones. Imagen tomada de <a href="https://bluefors.com/products/ld-dilution-refrigerator/">https://bluefors.com/products/ld-dilution-refrigerator/</a> . . . . .	41
A.1.	Fotografía comparativa entre las dimensiones de un chip y un clip de papel. . . . .	47
A.2.	Disposición de los elementos que conforman un chip. . . . .	48

# Índice de tablas

4.1. Cálculos para obtener el área de un medio octágono hueco. . . . .	34
5.1. Tabla de resultados obtenidos de la simulación del preamplificador con diferentes números de celdas. . . . .	40
5.2. Incremento porcentual de la constante de acoplamiento obtenida en las simulaciones. .	40





# Glosario

- ecuaciones de inductores espirales planos** Son ecuaciones basadas en aproximaciones y simplificaciones que describen el comportamiento de los inductores espirales planos, los cuales son una parte esencial de muchos circuitos y sistemas electrónicos. *Glossary:* ecuaciones de inductores espirales planos, 27
- efecto Meissner-Ochsenfeld** Es un fenómeno que ocurre en los superconductores, donde el campo magnético es expulsado del interior del material. *Glossary:* efecto Meissner-Ochsenfeld, 5
- Fotolitografía láser** Es un método utilizado en la fabricación de microcircuitos que emplea luz para transferir un patrón de una máscara a un material fotosensible en un sustrato. Este proceso permite la creación de estructuras precisas y complejas. *Glossary:* Fotolitografía láser, 25
- InductEx** Es un software de simulación electromagnética utilizado para el análisis de inductores y comportamiento inductivo de los elementos en sistemas electrónicos. *Glossary:* InductEx, 24
- unión de Josephson** Es un elemento conformado por finas barreras entre 2 superconductores interrumpidas por una película aislante. *Glossary:* unión de Josephson, 9
- KLayout** Es un software de diseño de circuitos integrados. Permite la creación de diseños precisos y complejos de circuitos integrados. *Glossary:* KLayout, 23
- modelo RCSJ** Es un modelo empleado para describir el comportamiento de una unión Josephson. *Glossary:* modelo RCSJ, 11
- parámetro de Stewart-McCumber** Se trata de un parámetro utilizado en el modelo RCSJ para caracterizar el comportamiento de una unión Josephson. *Glossary:* parámetro de Stewart-McCumber, 13
- superconductividad** Es un fenómeno físico presente en ciertos materiales, en el cual la resistencia eléctrica en corriente directa desaparece y se logra una completa diamagnetización al enfriar el material por debajo de una temperatura crítica. *Glossary:* superconductividad, 3
- SQUID** Un SQUID es un dispositivo superconductor empleado para medir campos magnéticos extremadamente débiles. *Glossary:* SQUID, 1
- técnica de *etching*** La técnica de Etching se emplea para eliminar material de la superficie de un sustrato. *Glossary:* técnica de *etching*, 26
- técnica de *lift-off*** La técnica de Lift-off se utiliza en la fabricación de micro y nanodispositivos. *Glossary:* técnica de *lift-off*, 25
- Teoría BCS** Esta teoría sugiere que los electrones dentro de un superconductor se unen formando pares o parejas, conocidos como pares de Cooper, y que los movimientos de todos estos pares dentro de un superconductor están interrelacionados. *Glossary:* Teoría BCS



# Capítulo 1

## Introducción y Objetivo

La superconductividad es un fenómeno en el que ciertos materiales presentan una resistencia de corriente continua nula a temperaturas bajas [Pines, 2007], en ocasiones cercanas al cero absoluto. En los últimos años, los avances en el campo de la superconductividad han tenido importantes repercusiones económicas y tecnológicas. Uno de los principales catalizadores de las aplicaciones que utilizan superconductores en los últimos años es la capacidad de producción y almacenamiento del nitrógeno líquido, que se utiliza para enfriar los materiales superconductores a las temperaturas necesarias. Esto ha hecho que la superconductividad sea accesible para un mayor número de aplicaciones. A pesar de estos avances, las aplicaciones del fenómeno de superconductividad siguen estando limitadas por la necesidad de temperaturas bajas para alcanzar el estado de resistencia cero. Se está intentando encontrar un material que presente superconductividad a temperatura ambiente, lo que revolucionaría el campo. Esto eliminaría la necesidad de costosos y complejos sistemas de refrigeración y pondría la superconductividad al alcance de un mayor número de industrias y aplicaciones, lo que conduciría a una nueva era de innovación tecnológica.

### 1.1. Introducción

Una aplicación importante de la superconductividad es el uso de dispositivos superconductores de interferencia cuántica (SQUID, por sus siglas en inglés) para medir pequeñas señales magnéticas. Los SQUID son extremadamente sensibles y pueden detectar campos magnéticos miles de millones de veces más débiles que el campo magnético terrestre, por lo que son ideales para medir cualquier variable que pueda convertirse a una señal magnética [Kempf, *et al.*, 2015]. Esto los convierte en valiosas herramientas para diversas aplicaciones científicas. Dichos sensores funcionan gracias al efecto Josephson, un fenómeno mecánico cuántico que se produce en las interfaces de materiales superconductores y no conductores. La alta sensibilidad de los sensores SQUID y el bajo ruido asociado a sus mediciones, los hace útiles en muchas aplicaciones como la magnetometría, el biomagnetismo y la geofísica, entre otros.

Los arreglos de SQUID son conjuntos de múltiples SQUID que pueden utilizarse, por ejemplo, para preamplificar la señal captada por otro SQUID que actúa como sensor. Al conectarse en serie permiten acondicionar la señal captada y acoplar impedancias.

Una aplicación importante de los arreglos de SQUID es como parte de la electrónica de lectura para otros sensores SQUID. Por ejemplo, el experimento ECHo, abreviatura de *Electron Capture in Holmium-163 Experiment*, en inglés, es un experimento científico diseñado para investigar las propiedades de los neutrinos, unas partículas diminutas y que interactúan muy débilmente con la materia [Hassel y Blaum, 2018]. El experimento se centra en el comportamiento de un isótopo específico llamado holmio-163, que posee propiedades únicas que lo hacen ideal para el estudio de los neutrinos. El experimento ECHo supone un gran reto porque requiere detectores extremadamente sensibles que puedan medir las diminutas señales de energía producidas por las colisiones de neutrinos. Los arreglos de SQUID pueden utilizarse como preamplificadores para leer y acondicionar las señales de los SQUID que actúan como sensores, lo que permite realizar mediciones muy sensibles y precisas de la captura de electrones en del isótopo  $^{163}\text{Ho}$ . Así como este experimento de la comunidad científica para la detección de partículas subatómicas, existen otros experimentos donde se busca medir o descubrir interacciones diminutas entre elementos de la materia, como la detección de materia oscura.

En comparación con otros métodos de lectura de sensores SQUID, el uso de arreglos de SQUID como preamplificadores para la electrónica de lectura ofrece varias ventajas. Tienen bajos niveles de ruido y son muy sensibles, lo que permite realizar mediciones precisas incluso de señales muy débiles. Además, los arreglos de SQUID pueden integrarse fácilmente en los sistemas existentes desarrollados para enfriar y montar al SQUID que actúa como sensor, lo que los convierte en una opción para muchas aplicaciones [Clarke y Braginski, 2004].

## 1.2. Objetivo

El objetivo principal del proyecto consiste en la mejora, implementación y evaluación de un preamplificador compuesto por un arreglo de SQUID con el propósito de incrementar su sensibilidad, mediante el diseño de una nueva geometría, que incremente la constante de acoplamiento inductivo entre las bobinas que conforman al preamplificador. Adicionalmente, el diseño tiene como requisito mantener una impedancia de salida del circuito de  $50\Omega$ .

## Capítulo 2

# Antecedentes

La superconductividad es un fenómeno que presentan ciertos materiales al ser enfriados a temperaturas bajas (en ocasiones cercanas al cero absoluto). Fue descubierta por primera vez en 1911 por el físico holandés Heike Kamerlingh Onnes [H.K. Onnes, 1911]. Desde entonces, los científicos han encontrado varios tipos de superconductores, entre ellos los de alta temperatura en 1986 y los superconductores a temperatura ambiente (bajo presiones extremas) observados recientemente en 2020 [Snider, *et al.*, 2020]. El anhelo de encontrar un material superconductor a temperatura ambiente y presión similar a la atmosférica ha impulsado años de intensa investigación en todo el mundo.

Los materiales superconductores, han tenido un profundo impacto en la ingeniería. Las propiedades de los materiales superconductores los hacen ideales para su uso en aplicaciones de potencia eléctrica, como la generación, transmisión y distribución de electricidad. Los dispositivos superconductores, como los imanes, se usan en aplicaciones como las máquinas de resonancia magnética, aceleradores de partículas y trenes de levitación magnética. Los beneficios potenciales de la superconductividad en estas aplicaciones incluyen una mayor eficiencia, una mayor densidad de corriente y un menor consumo de energía [Tinkham, 1996]. Una aplicación interesante es la fabricación de sensores SQUID, que permiten medir señales tan pequeñas que serían imposibles de detectar de otra manera.

En el presente capítulo, se describirá de forma sucinta algunos de los principios que deben entenderse para entender el funcionamiento y operación de los sensores SQUID.

### 2.1. Superconductividad

En física, múltiples fenómenos son el resultado de la interacción entre el movimiento térmico no correlacionado de los componentes atómicos de la materia y las fuerzas de ordenación entre estos componentes. Al aumentar la temperatura, el movimiento térmico se vuelve suficientemente grande en comparación con algunas energías de interacción de ordenamiento relevantes, establecidas a bajas temperaturas, lo que rompe propiedades únicas de la materia que sólo se dan a bajas temperaturas [Buckel y Kleiner, 2013]. Por lo tanto, muchos comportamientos interesantes de las propiedades de la materia aparecen en condiciones extremas. La superconductividad es un ejemplo de ello. Heike Kamerlingh Onnes, durante su etapa como director del Laboratorio de Bajas Temperaturas de la Universidad de Leiden logró la licuefacción del helio. A presión atmosférica, la temperatura de ebullición de este gas noble es de 4.2 K, sin embargo, este valor puede reducirse mediante el uso de bombeo. En

1911, mientras experimentaba con muestras de mercurio de alta pureza, se topó con el descubrimiento de la superconductividad.

Atestiguó que, en un cambio de temperatura de unas centésimas de grado, la resistencia medida de la muestra de mercurio con la que trabajó, caía bruscamente a un valor inferior a una millonésima parte del valor medido anteriormente. Por lo que supuso que el metal había pasado a un nuevo estado que denominó estado superconductor. En la Figura 2.1, se observa la gráfica esbozada por Kamerlingh Onnes en 1911 [H.K. Onnes, 1911] de la resistencia eléctrica frente a la temperatura de una muestra de mercurio. Estas mediciones marcan el descubrimiento de la superconductividad.

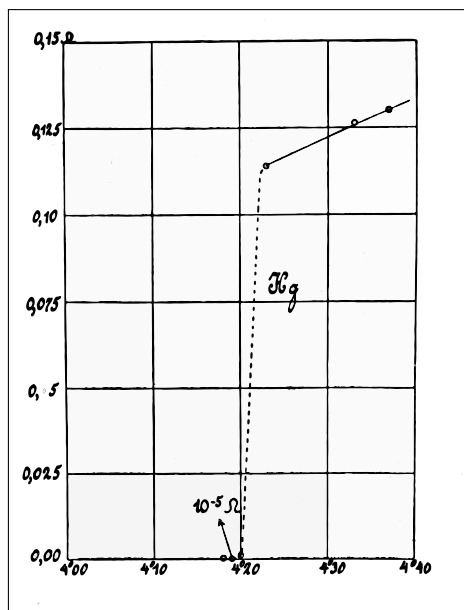
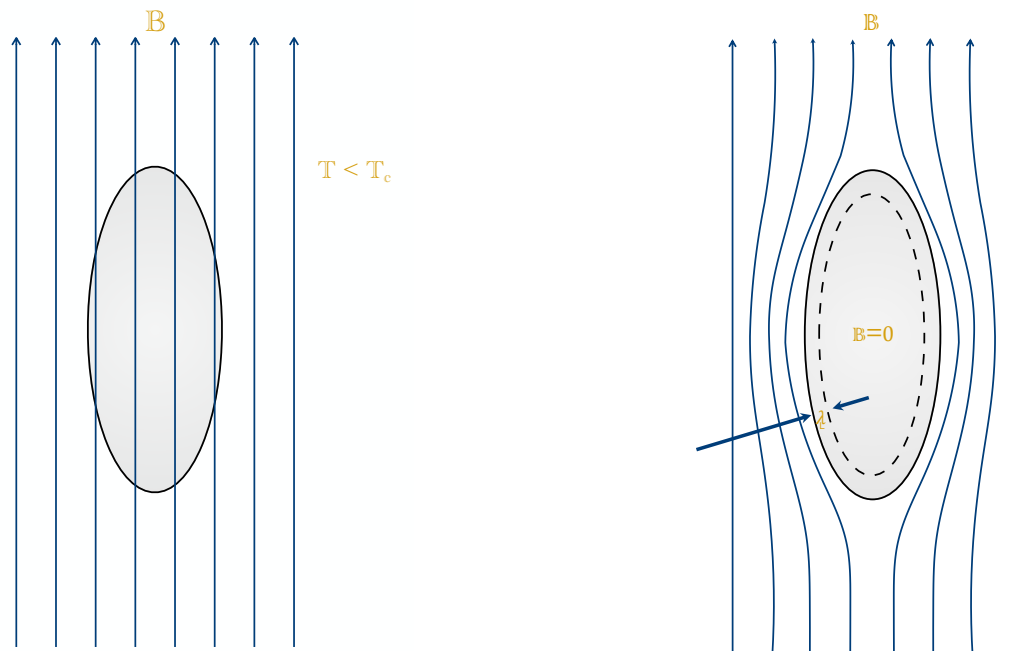


Figura 2.1 Gráfico del salto a aproximadamente  $T_c \approx 4.2$  K al estado superconductor.

### 2.1.1. Fenómeno de la Superconductividad

Entre las interesantes propiedades de los materiales superconductores, hay dos fenómenos que caracterizan el comportamiento del estado superconductor. La primera es la observación de Kamerlingh Onnes de que, en metales como el mercurio, estaño y plomo, la resistencia eléctrica de corriente continua desaparece por completo en un intervalo de temperaturas por debajo de una temperatura crítica  $T_c$ , que depende del material.

Mediante numerosos experimentos, se ha medido la temperatura crítica de diversos elementos de la tabla periódica, así como de compuestos creados para aplicaciones que requieran de superconductores.



(a) El campo magnético en un conductor normal o en un material superconductor con  $T > T_c$ .

(b) Expulsión del campo magnético del interior de un material superconductor con  $T < T_c$ .

Figura 2.2 Esquemático del comportamiento de un superconductor por encima y por debajo de la temperatura crítica  $T_c$ . La distancia  $\lambda_L$  corresponde a la profundidad de penetración de London que típicamente corresponde a cientos de nanómetros y es la región donde el campo magnético decae exponencialmente.

La siguiente propiedad que vuelve únicos a los materiales superconductores es el diamagnetismo perfecto, también conocido como efecto Meissner-Ochsenfeld. En 1933, W. Meissner y R. Ochsenfeld [Meissner y Ochsenfeld, 1933] descubrieron que los superconductores no sólo impiden la entrada de un campo magnético en su interior (comportamiento explicado por la conductividad perfecta), sino que además, los superconductores expulsan cualquier campo magnético presente originalmente en su interior al enfriarse por debajo de  $T_c$ , como se ilustra en la Figura 2.2b. Esto se debe a corrientes que aparecen en la superficie del superconductor e inducen una corriente que cancela el campo magnético al interior del mismo [Tinkham, 1996].

Años más tarde, llegó el primer intento exitoso para explicar la superconductividad con las ecuaciones de London [London y London, 1935], que analizan las propiedades superconductoras desde el enfoque de la electrodinámica. Este conjunto de ecuaciones, describe el comportamiento de los superconductores en función del flujo de corriente eléctrica. Según estas ecuaciones, cuando se aplica un campo magnético a un superconductor, la corriente fluye sin resistencia. Esto se debe a que los electrones superconductores se encuentran todos en el mismo estado cuántico, formando lo que se denomina una función de onda macroscópica [Tinkham, 1996], que se explicará más adelante. Los hermanos F. y H. London encontraron mediante 2 ecuaciones la relación entre el campo eléctrico  $E$ , el campo magnético  $B$  y la densidad de corriente  $J_s$ .

$$\frac{\partial}{\partial t} J_s = \frac{1}{\mu_0 \lambda_L} E \quad (2.1)$$

$$\mu_0 \lambda_L^2 \nabla \times J_s = -B \quad (2.2)$$

donde  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética del vacío con un valor de  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m y

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{m_s}{\mu_0 n_s q_s^2}}$$

es la longitud de penetración de London, con  $m_s$  y  $q_s$  siendo los valores de la masa y carga de los portadores de carga superconductores. La cantidad  $n_s$  se refiere al número de portadores de carga superconductores, que es dependiente de la temperatura y  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética del vacío.

La Ecuación 2.1 describe cómo penetra el campo eléctrico en un material superconductor, y la Ecuación 2.2 describe el comportamiento del campo magnético en el interior del superconductor. Estas ecuaciones muestran que, en un superconductor, el campo magnético es expulsado del material lo que se conoce como efecto Meissner-Ochsenfeld, tal como se muestra en la transición al estado superconductor de los esquemáticos de la Figura 2.2.

El efecto Meissner-Ochsenfeld se describe sustituyendo la ecuación de Maxwell  $\nabla \times B = \mu_0 J_s$  en la primera ecuación de London. Haciéndolo así, se obtiene:

$$\nabla^2 B = \frac{1}{\lambda_L^2} B \quad (2.3)$$

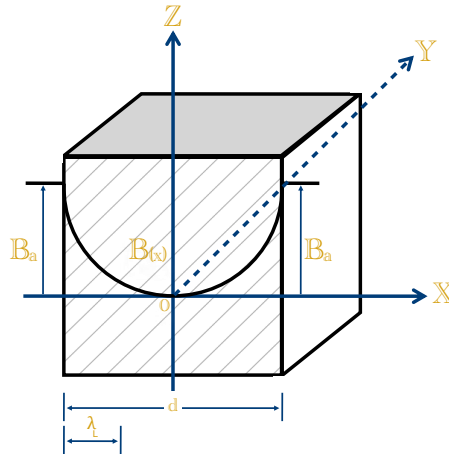


Figura 2.3 Dependencia espacial del campo magnético dentro de un superconductor.

Por la solución de la Ecuación 2.3 cerca de una superficie plana que marca la interfaz de un material superconductor, que se extiende en el plano  $yz$ , un campo magnético perpendicular a dicho plano decae exponencialmente siguiendo la ecuación  $B_z(x) = B_{z,0} \exp(-x/\lambda_L)$ . De este resultado,



se deduce que cualquier campo magnético aplicado, decae exponencialmente en el interior de un superconductor con la longitud de decaimiento característica dada por la profundidad de penetración de London  $\lambda_L$ . Recapitulando los experimentos, cuando un material superconductor se enfría por debajo de  $T_c$  un campo magnético externo sólo puede penetrar en la interfaz de un superconductor hasta  $\lambda_L$  normalmente unos cientos de nanómetros y después se vuelve cero (como se observa en la Figura 2.3).

En 1957 se desarrolló la teoría BCS para comprender mejor los superconductores [Bardeen, *et al.*, 1957]. La teoría BCS introdujo la idea de que los electrones en un superconductor se agrupan en pares, ahora llamados pares de Cooper, y que los movimientos de todos los pares de Cooper dentro de un superconductor están correlacionados y pueden describirse macroscópicamente mediante una única función de onda macroscópica, que corresponde a la ecuación 2.4.

$$\Psi(r, t) = \Psi_0(r, t)e^{i\phi} \quad (2.4)$$

Para entender el significado de la ecuación anterior hay que imaginar el comportamiento de un electrón que se mueve a través del material y que atrae a los iones positivamente cargados hacia él, creando una región de mayor densidad de carga positiva. Este exceso de densidad de carga positiva puede atraer a un segundo electrón, superando la repulsión natural entre los dos electrones, y resultando en la formación de un par de Cooper. Estos pares de Cooper no se comportan como partículas individuales, sino que se mueven a través del superconductor como una entidad colectiva, formando un estado cuántico coherente que se extiende por todo el superconductor. Este estado coherente es inmune a los defectos y las impurezas en el superconductor, lo que permite que los pares de Cooper se muevan sin resistencia.

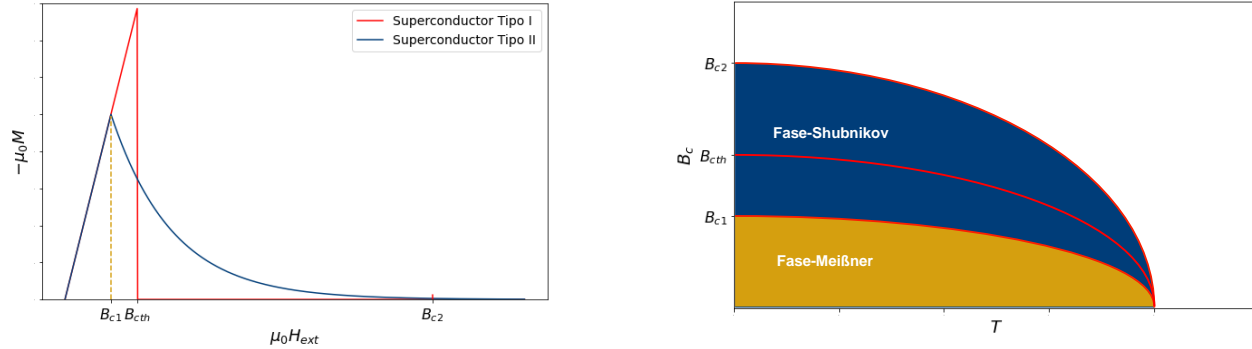
### 2.1.2. Superconductores tipo I y tipo II

Con base en su respuesta a los campos magnéticos externos, los superconductores se clasifican ampliamente en dos categorías: Tipo I y Tipo II.

Los superconductores de Tipo I, a menudo compuestos de metales, muestran un diamagnetismo total a través del efecto Meissner-Ochsenfeld cuando se someten a temperaturas por debajo de su temperatura crítica ( $T_c$ ) [Buckel y Kleiner, 2013]. Esto significa que expulsan todas las líneas campo magnético de su interior. Las propiedades superconductoras de estos materiales persisten, hasta que un campo magnético externo aplicado excede un cierto valor de campo magnético crítico ( $B_c$ ). Más allá de este umbral, el material sufre una transición de fase drástica entre el estado superconductor hasta el estado normal y resistivo, transición que se marca por la desaparición efecto Meissner-Ochsenfeld.

Por otro lado, los superconductores de Tipo II, abarcan una variedad de materiales complejos, incluyendo aleaciones metálicas y óxidos cerámicos. Estos muestran un comportamiento más complejo en presencia de campos magnéticos externos [Buckel y Kleiner, 2013]. Cuando se someten a un valor de campo magnético mayor que un campo crítico inferior ( $B_{c1}$ ), pero menor que un campo crítico superior ( $B_{c2}$ ), estos materiales entran en un estado mixto. En este estado, continúan mostrando resistencia eléctrica cero, mientras permiten que los campos magnéticos penetren a través de vórtices cuantizados a través de pequeñas imperfecciones u inhomogeneidades del material [Tinkham, 1996].

La diferencia de comportamiento es evidente al observar los gráficos de la Figura 2.4. Para el caso del superconductor tipo I, al excederse el campo magnético crítico  $B_{cth}$  se rompe la superconductividad abruptamente y el campo penetra el superconductor, mientras que, para un superconductor tipo II, la repulsión de campo magnético es menor, pero persiste a medida que decae hasta el valor crítico  $B_{c2}$ .



(a) Esquemático que ilustra la diferencia entre la curva de magnetización de superconductores tipo I y tipo II.

(b) Esquemático que ilustra la diferencia entre la dependencia de la temperatura del campo magnético crítico de superconductores tipo I y tipo II.

Figura 2.4 Curvas que ilustran las diferencias en el comportamiento de los superconductores tipo I y tipo II.

Durante la fase Shubnikov, vórtices cuantizados llevan un valor discreto de flujo magnético y el material continúa exhibiendo comportamiento superconductor. El número de vórtices aumenta con la intensidad del campo magnético aplicado, y el material permanece en el estado mixto hasta que el campo magnético supera el valor  $B_{c2}$  [Tinkham, 1996]. Más allá de este campo crítico superior, los superconductores de Tipo II transicionan al estado no superconductor. Este atributo de tolerar campos magnéticos mucho más altos, en comparación con los contrapartes de Tipo I, hace que los superconductores de Tipo II sean útiles para numerosas aplicaciones de altos campos magnéticos.

### 2.1.3. Atrapamiento de flujo en superconductores tipo II

En los superconductores tipo II, el atrapamiento de flujo, también conocido como anclaje de flujo, es el fenómeno donde las líneas de flujo magnético, en lugar de ser completamente expulsadas, se confinan en estrechos tubos de material conductor normal, formando una red de vórtices de flujo dentro del superconductor [Abrikosov, 1957]. Dicho fenómeno se ilustra en la Figura 2.5, donde las flechas negras indican el paso de un flujo cuántico (cuyo valor es aproximadamente  $2.067833758 \times 10^{-15}$  Wb). Las flechas circulares amarillas representan la aparición de corrientes inducidas y las flechas rojas la dirección de flujo de la corriente en el superconductor debido al efecto Meissner-Ochsenfeld.

Este comportamiento ocurre cuando el campo magnético aplicado se encuentra entre los campos críticos inferior y superior del superconductor tipo II. Los vórtices de flujo pueden quedar “anclados” o “atrapados” por defectos microscópicos o inhomogeneidades en el material, impidiendo el movimiento de las líneas de flujo magnético dentro del material.

Una consecuencia directa del atrapamiento de flujo magnético es que la densidad de corriente máxima del superconductor disminuye, debido a los vórtices. En la sección 2.2 se explica la dinámica de las uniones de Josephson y en la sección 2.3 se explica el funcionamiento de los SQUID D.C., es importante mencionar que éste atrapamiento de flujo no deseado podría resultar en que la corriente crítica de las uniones de Josephson sea menor de la esperada.

Por otro lado, el desempeño de un sensor SQUID se ve afectado de dos maneras [STAR-Cryoelectronics, 2000].

La primera es que puede desplazar el punto de operación del SQUID. Dada la naturaleza de la salida del SQUID, que es una función periódica dependiente de la magnitud del flujo magnético aplicado, cualquier flujo atrapado que se introduzca puede esencialmente desviar esta señal de salida. Si este desvío no se ajusta o compensa adecuadamente, podría conducir a baja exactitud en las mediciones del sensor.

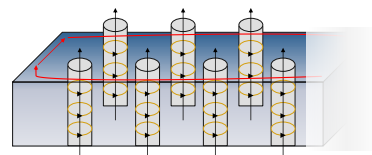


Figura 2.5 Fijación de flujo en un superconductor tipo II.

El segundo problema es que el atrapamiento de flujo puede aumentar el nivel de ruido y, por lo tanto, disminuir la sensibilidad del SQUID. El flujo magnético que queda atrapado puede variar con el tiempo debido a cambios en la temperatura, perturbaciones mecánicas u otros factores en el entorno circundante. Estas variaciones de flujo pueden hacer que la señal de salida del SQUID se desvíe y fluctúe de manera impredecible, amplificando el nivel de ruido.

## 2.2. Uniones de Josephson

Los efectos de Josephson se utilizan en muchas aplicaciones de la superconductividad en electrónica, sensores y dispositivos de alta frecuencia. Dichos efectos se observan cuando dos superconductores están débilmente conectados por un contacto eléctrico.

Dichos efectos se presentan cuando se dispone de una interfaz entre 2 materiales superconductores separados por un material aislante, como se observa en la Figura 2.6. Dicha interfaz permite el flujo de pares de Cooper a través del aislante mediante el fenómeno conocido como efecto túnel. La forma más habitual de obtener este tipo de uniones es usando una fina barrera aislante entre dos electrodos superconductores, lo cual da lugar a una unión de Josephson. Dicha interfaz superconductor-aislante-superconductor se conoce como SIS por sus siglas en inglés [Tinkham, 1996].

Para polarizar las uniones de Josephson existen dos alternativas diferentes. Aplicar un voltaje entre las uniones y medir la corriente o forzar el paso de una corriente a través de la unión y medir la diferencia de voltaje. Estas dos polarizaciones producen fenómenos que se describen mediante las dos ecuaciones de Josephson. La Ecuación 2.5 relaciona la densidad de corriente  $J_s$  con un valor de densidad de corriente crítica  $J_c$  (si se supera dicho valor, los portadores de carga superconductores no son capaces de transportar la corriente total y aparece un efecto resistivo) y la diferencia de fase de la función de onda macroscópica ( $\varphi = \phi_1 - \phi_2$ ) a través de la juntura de Josephson:

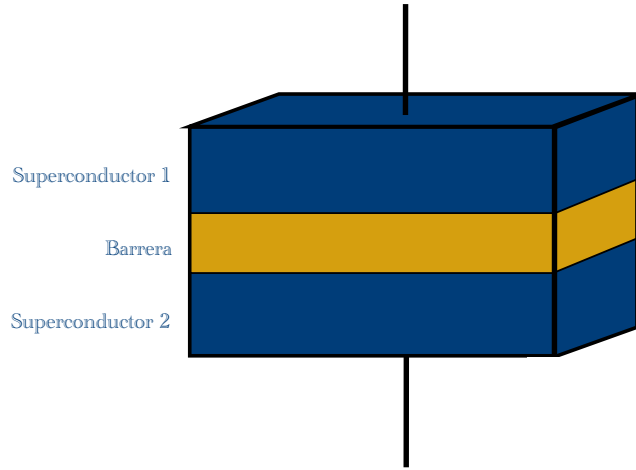


Figura 2.6 Esquema de una unión de Josephson que consiste de dos superconductores separados por una delgada barrera aislante.

$$J_s(\varphi) = J_c \sin \varphi \quad (2.5)$$

Cuando circula una corriente constante externa a través de la unión no habrá caída de voltaje entre las terminales [Tinkham, 1996]. Este efecto se conoce como efecto Josephson D.C., mientras que, cuando se aplica un voltaje constante entre las terminales, se obtiene que la variación de la diferencia  $\phi_1 - \phi_2$  será proporcional al producto de dos veces  $\pi$  dividido entre la cuantificación del flujo magnético  $\Phi_0$  con un valor de  $2.067833758 \times 10^{-15}$  Wb:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{2\pi}{\Phi_0} V \quad (2.6)$$

A partir de la ecuación 2.6 es posible calcular el flujo magnético atravesando el área de la juntura:

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \frac{2\pi}{\Phi_0} V t$$

Lo que permite concluir que una corriente A.C. estará oscilando con frecuencia conocida como la frecuencia de Josephson:

$$f_J = \frac{1}{\Phi_0} V = 483.6 \left[ \frac{\text{GHz}}{\text{mV}} \right] \cdot V$$

Este fenómeno se conoce como efecto Josephson A.C.

Otra propiedad única de las uniones Josephson sale a la luz cuando nos preguntamos cuál es el efecto de las pequeñas variaciones de corriente que atraviesan la juntura. Para analizar este caso, primero multiplicamos las densidades de corriente  $J_s$  y  $J_c$  de la Ecuación 2.5 por el área que abarca la unión  $A_J$ . Al hacerlo se obtiene una relación de corrientes:

$$I_s = I_c \sin \varphi \quad (2.7)$$

Diferenciando la Ecuación 2.7 para contemplar pequeñas fluctuaciones de corriente obtenemos:

$$\frac{dI_s}{dt} = I_c \cos \varphi \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.8)$$

Por último, insertando la Ecuación 2.6 en la Ecuación 2.8 obtenemos:

$$\frac{dI_s}{dt} = I_c \cos \varphi \frac{2\pi}{\phi_0} V \quad (2.9)$$

que se asemeja a la ecuación del inductor  $V = L_J \frac{di}{dt}$ . Permitiendo expresar el voltaje en la inductancia de Josephson como:

$$V = \frac{\phi_0}{2\pi I_c \cos \varphi} \frac{di}{dt} = L_c \frac{1}{\cos \varphi} \frac{di}{dt} \quad (2.10)$$

con la inductancia de Josephson proporcional a la constante normalizada de Planck dividida entre 2 veces el producto de la carga del electrón por la corriente crítica en la unión:

$$L_c = \frac{\hbar}{2eI_c} \quad (2.11)$$

A partir de la Ecuación 2.11 es notorio que para pequeñas variaciones de corriente en torno al valor  $I_s = I_c \sin \varphi$ , la juntura se comporta como un inductor no lineal.

### 2.2.1. Modelo RCSJ para la unión Josephson

Para modelar el comportamiento de una unión Josephson delgada (aquellas uniones en las que el campo magnético generado por la propia corriente de Josephson es despreciable en comparación con el campo magnético aplicado externamente) se utiliza la ecuación del modelo RCSJ (del inglés *Resistively- and Capacitively-shunted Junction model*), desarrollada en 1968 [Scott, 1970, McCumber, 1968], cuya representación gráfica se muestra en la Figura 2.7:

$$I = I_J + I_R + I_{\text{cap}} \quad (2.12)$$

$$I = I_c \sin \varphi + \frac{V}{R} + C \frac{dv}{dt} \quad (2.13)$$

donde la corriente que fluye por cada una de las ramas se sustituye por el modelo matemático de cada elemento. Este modelo<sup>1</sup> considera que una unión Josephson puede modelarse como 3 elementos en paralelo: una capacitancia  $C$  debido a la presencia de la capa aislante que interrumpe al superconductor, un resistor  $R$  que corresponde al paso de electrones normales a través de la unión y un superconductor donde la corriente que fluye sigue la Ecuación 2.5. Sustituyendo la Ecuación 2.2 que es el voltaje a través de la unión en la Ecuación 2.13 se obtiene la Ecuación 2.14 que expresa la corriente suministrada por la fuente  $I$ .

$$I = I_c \sin \varphi + \frac{\Phi_0}{2\pi R} \frac{d\varphi}{dt} + C \frac{\Phi_0}{2\pi} \frac{d^2\varphi}{dt^2} \quad (2.14)$$

---

<sup>1</sup>Se ha despreciado una fuente de corriente que representa el ruido a través de la juntura debido a fluctuaciones térmicas, entre otros fenómenos.

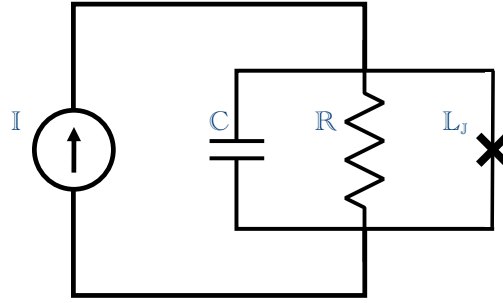


Figura 2.7 Representación esquemática del modelo RCSJ. En este esquema se ha representado en ausencia de ruido térmico.

Observando la ecuación diferencial de segundo grado resultante, normalizando la corriente en términos de la corriente crítica en cada unión ( $\gamma = I/I_c$ ) la Ecuación 2.14 corresponde a un análogo mecánico donde una partícula en un “potencial de tabla de lavado inclinada” (por sus uso en el idioma inglés) con una masa correspondiente  $M = C(\Phi_0/2\pi)^2$  expuesta a un coeficiente de fricción  $\eta = 1/R \cdot (\phi_0/2\pi)^2$  y moviéndose a lo largo de  $\phi$  en un potencial  $U(\phi)$  de modo que la energía de dicha partícula es:

$$M \frac{d^2\phi}{dt^2} + \eta \frac{d\phi}{dt} + \frac{\partial U(\phi)}{\partial \phi} = 0 \quad (2.15)$$

con un potencial:

$$U(\phi) = E_J(1 - \cos\phi - \gamma\phi) \quad (2.16)$$

donde  $\gamma = I/I_c$ , por lo tanto las Ecuaciones 2.15 y 2.16 permiten analizar la dinámica del voltaje y la corriente a través de la unión como una partícula moviéndose en un “potencial de tabla de lavado inclinada”, del inglés *tilted washboard potential*, donde para valores de  $\gamma < 1$  la corriente oscila alrededor de mínimos locales pero permanece atrapada por una barrera de potencial. Para el caso de  $\gamma > 1$ , el potencial tiene suficiente influencia para que la partícula se desplace en bajada libremente a través de la tabla de lavado (ver caso  $\gamma = 1.1$  de la Figura 2.8).

### 2.2.2. Parámetro de Stewart-McCumber

Observando de nuevo el circuito RLC paralelo equivalente de la Figura 2.7. Observamos que el circuito tiene una frecuencia de resonancia denominada frecuencia de plasma y 2 constantes temporales resultantes de la interacción del resistor con el inductor y el capacitor. Según [Gross y Marx, 2005], dichas frecuencias son:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_c C}}, \quad \omega_c = \frac{R}{L_c}, \quad \omega_{RC} = \frac{1}{RC}. \quad (2.17)$$

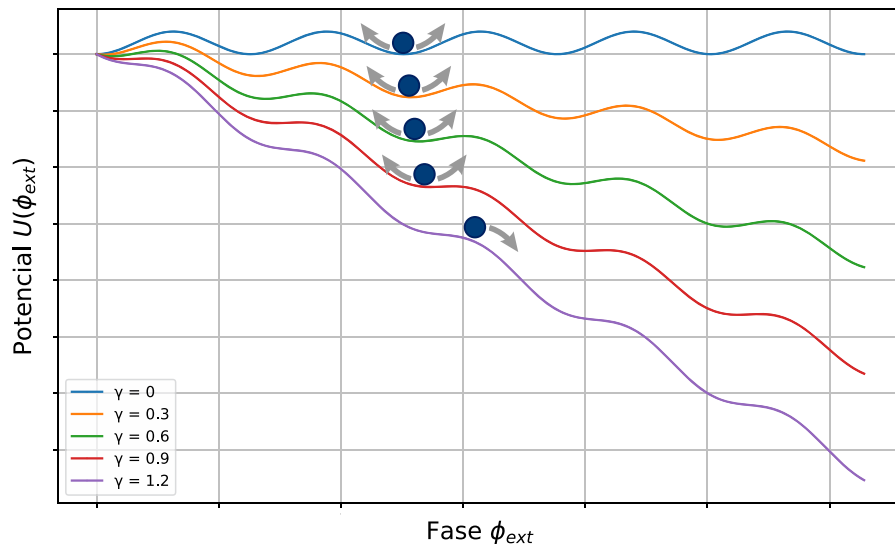


Figura 2.8 La dinámica de una unión de Josephson puede describirse por una partícula moviéndose a lo largo de una coordenada  $\varphi_{\text{ext}}$  dentro de un potencial  $U(\varphi_{\text{ext}})$ . En el esquemático se graficaron 5 valores para  $\gamma$ .

Para caracterizar el efecto de la capacitancia en todas las frecuencias hasta la frecuencia  $\omega_c$  correspondiente al voltaje de unión característico  $V_c = I_c R$ , se puede utilizar el parámetro de Stewart-McCumber.

$$\beta_c = \frac{\omega_c^2}{\omega_p^2} = \frac{\omega_c}{\omega_{RC}} = \frac{2\pi I_c R^2 C}{\phi_0} \quad (2.18)$$

Las uniones con  $\beta_c \ll 1$  tienen una capacitancia pequeña y/o una resistencia pequeña. Estas uniones tienen constantes de tiempo RC pequeñas y, por lo tanto, están muy amortiguadas. Por el contrario, las uniones con  $\beta_c \gg 1$  son aquellas con gran capacitancia y/o gran resistencia y, por lo tanto, tienen una constante de tiempo RC grande.<sup>2</sup>

### 2.3. SQUID D.C.

Un SQUID D.C. (por sus siglas en inglés) es un dispositivo que está formado por un *loop* superconductor cerrado que es interrumpido por dos uniones Josephson, tal como se observa en la Figura 2.9. Suponiendo que las 2 uniones Josephson son idénticas, ambas comparten un mismo valor de corriente crítica  $I_c$ . Por lo tanto, aplicando la ley de Kirchhoff de corrientes, la corriente total fluyendo a través del dispositivo es:

$$I_s = I_c \sin \varphi_1 + I_c \sin \varphi_2 = I_c (\sin \varphi_1 + \sin \varphi_2) \quad (2.19)$$

Aplicando una propiedad trigonométrica, la Ecuación 2.19 se convierte en:

<sup>2</sup>Para una descripción más profunda del comportamiento de las juntas para el caso sobreamortiguado y subamortiguado consulte [García, 2020]

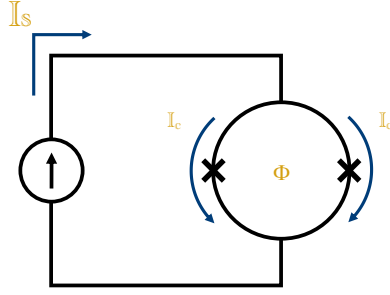


Figura 2.9 Representación circuital de un D.C. SQUID. Las dos cruces representan las uniones Josephson que interrumpen el *loop* superconductor.

$$I_s = 2I_c \cos\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \sin\left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \quad (2.20)$$

Se puede encontrar un análisis riguroso en la fuente [Gross y Marx, 2005] para probar que:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi\Phi}{\Phi_0} \quad (2.21)$$

Por lo tanto, insertando la Ecuación 2.21 en la Ecuación 2.20, la supercorriente a través del SQUID en función del flujo magnético es:

$$I_s = 2I_c \cos\left(\pi \frac{\Phi}{\Phi_0}\right) \sin\left(\phi_1 + \pi \frac{\Phi}{\Phi_0}\right) \quad (2.22)$$

Sin embargo, dado que el *loop* del SQUID tiene una autoinductancia  $L_s$ , el flujo dentro del *loop* no es igual al flujo externo  $\Phi_{\text{ext}}$ . Esto último se debe al flujo magnético inducido por la corriente  $I_{\text{circ}}$  que contribuye al flujo total dentro del *loop* del SQUID, de modo que:

$$\Phi = \Phi_{\text{ext}} - L_s I_{\text{circ}} \quad (2.23)$$

Dado que la corriente a través de las uniones (suponiendo que cada lado de la espira es idéntico) viene dada por:

$$I_c \sin \varphi_1 = I_{s,1} + \frac{I_{\text{circ}}}{2} \quad (2.24)$$

$$I_c \sin \varphi_2 = I_{s,1} - \frac{I_{\text{circ}}}{2} \quad (2.25)$$

Así, el flujo magnético en el interior del *loop* del SQUID es:

$$\Phi = \Phi_{\text{ext}} - \frac{L_s I_c}{2} (\sin \phi_1 - \sin \phi_2) \quad (2.26)$$



Aplicando la misma identidad trigonométrica que a la Ecuación 2.19, obtenemos que el flujo magnético total dentro del *loop* del SQUID está dado por:

$$\Phi = \Phi_{\text{ext}} - L_s I_c \sin\left(\pi \frac{\Phi}{\Phi_0}\right) \cos\left(\phi_1 + \pi \frac{\Phi}{\Phi_0}\right) \quad (2.27)$$

Un parámetro adimensional importante que mide la relación entre el flujo magnético externo en función de la contribución de la inductancia del SQUID es el parámetro de *screening* (por sus uso en inglés) definido en la Ecuación 2.28.

$$\beta_L = \frac{2L_s I_c}{\Phi_0} \quad (2.28)$$

Finalmente, el voltaje entre las terminales de un D.C. SQUID está dado por la ecuación:

$$V = I_c R \sqrt{\left(\frac{I}{2I_c}\right)^2 - \cos^2\left(\pi \frac{\Phi_{\text{ext}}}{\Phi_0}\right)} \quad (2.29)$$

La cual, es la ecuación que permite realizar lecturas para conocer el flujo captado por este sensor.

Una manera común de construir un SQUID D.C. es mediante la fabricación de finas capas que conformarán los diferentes elementos para poder medir señales de campo magnético. Una forma eficiente y sencilla de diseñar y construir dichos dispositivos, es mediante una geometría denominada *washer-SQUID*, por su nombre en inglés. En la Figura 2.10 se muestra una vista transversal (izquierda) y aérea (derecha) de un *washer-SQUID*.

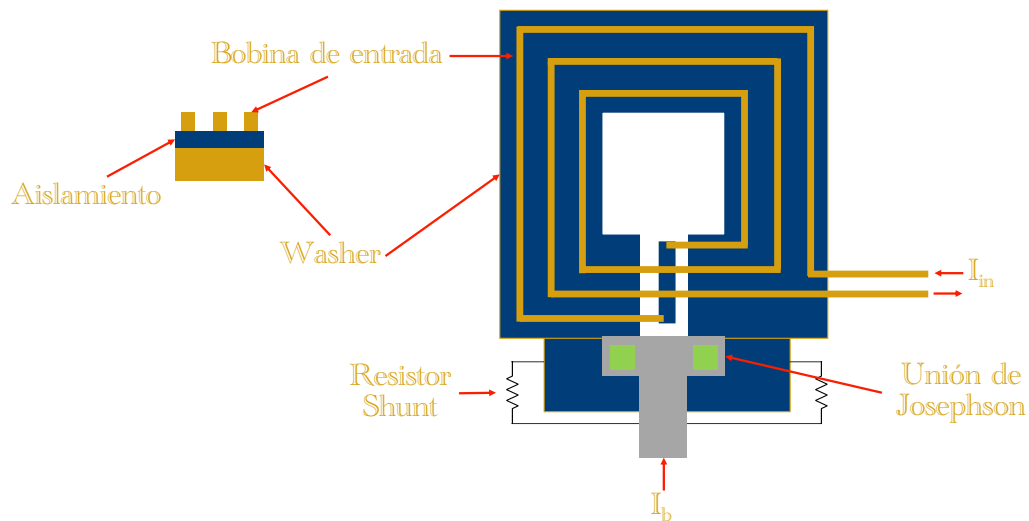


Figura 2.10 Esquema que muestra la bobina de entrada del SQUID, la geometría del SQUID *washer*, resistores *shunt* y uniones de Josephson.

La figura poligonal hueca en azul representa una capa de material aislante depositada sobre una capa de material superconductor. Las estructuras de color amarillo representan a la bobina por donde

entrará la señal que se desea captar, también en color verde se observan las dos uniones de Josephson que completan al SQUID.

## 2.4. Aplicaciones de los SQUID D.C.

Debido a su alta sensibilidad, los SQUID D.C. tienen aplicaciones en diversas ramas como la medicina, la física y la investigación científica [Buckel y Kleiner, 2013], algunos ejemplos son:

1. *Aplicaciones Biomédicas:* Los SQUID de corriente continua desempeñan un papel significativo en la medicina, especialmente en la magnetoencefalografía y la magnetocardiografía [Cohen, *et al.*, 1970], permitiendo diagnosticar y obtener información de órganos de manera no invasiva y con la mayor precisión. Estos dispositivos permiten mediciones extremadamente sensibles de los campos magnéticos producidos por la actividad eléctrica en el cerebro y el corazón, respectivamente.
2. *Geofísica:* Los SQUID D.C. se utilizan en la prospección geofísica para medir variaciones muy pequeñas en el campo magnético terrestre [Campbel, *et al.*, 1975]. Estas mediciones pueden revelar características subterráneas, como depósitos minerales, lo que es útil para la exploración geológica y la detección de recursos naturales.
3. *Astrofísica y Cosmología:* Los SQUID D.C. se utilizan en experimentos que buscan detectar las fluctuaciones minúsculas generadas por fotones y otras partículas subatómicas [Enss, 2010] presentes en el universo, lo que permite conocer mejor sus propiedades fundamentales.

## 2.5. Ejemplo de aplicación por necesidad de sensibilidad (Experimento ECHo)

El experimento de captura de electrones en  $^{163}\text{Ho}$ , o ECHo, es un experimento científico cuyo objetivo es medir la masa de los neutrinos. Este experimento tiene implicaciones que impactarían de forma crucial al modelo estándar de la física de partículas, la naturaleza de los neutrinos y hasta la cosmología [Galeazzi, *et al.*, 2012]. El experimento es fruto de la colaboración entre varias instituciones de investigación, entre ellas el instituto de investigación y microfabricación donde se laboró. La importancia y dificultad de este experimento radica en que los neutrinos están entre las partículas más esquivas del universo y sus propiedades son aún poco conocidas. El experimento ECHo puede aportar valiosa información sobre la naturaleza de los neutrinos y su papel en el universo.

El experimento ECHo consiste en medir el espectro de energía de la desintegración por captura de electrones del  $^{163}\text{Ho}$ , un isótopo radiactivo del holmio. El experimento utiliza una lámina metálica que contiene holmio, que se enfría a temperaturas extremadamente bajas y se coloca dentro de un campo magnético. Cuando el holmio se desintegra, emite electrones cuya energía se mide con detectores superconductores. El experimento requiere una precisión extrema, ya que incluso pequeñas desviaciones en el espectro de energía podrían indicar la presencia de una masa de neutrinos distinta de cero.

La electrónica superconductora desempeña un papel crucial en el éxito del experimento ECHo. La electrónica superconductora ofrece muy bajo ruido, alta velocidad y alta resolución, lo que la hace

ideal para este tipo de experimento.

Los sensores SQUID son un componente fundamental del experimento ECHo. Se utilizan para detectar los campos magnéticos generados por los electrones emitidos durante la desintegración de la captura de electrones. La sensibilidad de los sensores SQUID es fundamental para el éxito del experimento, ya que permite detectar incluso los campos magnéticos más pequeños. El uso de sensores SQUID ha permitido al experimento ECHo alcanzar niveles de sensibilidad sin precedentes, haciendo posible este experimento, con la esperanza de cuantificar cuál sería el valor de la masa de los neutrinos.

### 2.5.1. Posible uso de SQUID como preamplificadores en el experimento ECHo

Los preamplificadores de arreglos de SQUID se pueden utilizar para leer las señales de los sensores SQUID. Estos preamplificadores son cruciales para alcanzar la sensibilidad y resolución necesarias. El uso de preamplificadores superconductores puede permitir al experimento ECHo alcanzar un nivel de precisión que antes se consideraba inalcanzable.

El experimento ECHo es un experimento científico que tiene el potencial de proporcionar valiosos conocimientos sobre la naturaleza de los neutrinos y su papel en el universo. El uso de electrónica superconductora, sensores SQUID y preamplificadores de SQUID permitiría al experimento alcanzar niveles de sensibilidad y precisión sin precedentes. Dicho experimento es también un ejemplo de la importancia que juegan los SQUID en la ciencia y la necesidad de dedicar recursos a la optimización de los componentes que conforman cada etapa para poder realizar mediciones con SQUID.



# Capítulo 3

## Definición del Problema

Si bien la alta sensibilidad y bajo ruido de los SQUID de corriente continua suele ser una ventaja significativa en diversas aplicaciones, también presenta algunos desafíos. Como la interferencia electromagnética producida por fuentes externas a la que se desea medir [Proudfoot, *et al.*, 2014] y el atrapamiento de flujo [Polyakov, *et al.*, 2007]. Otro obstáculo es la dificultad de acoplarlos a sistemas de medición de electrónica convencional, debido a que el ruido presente en dispositivos de silicio es órdenes de magnitud mayor que el ruido en los SQUID. Esta discrepancia puede oscurecer las cualidades del SQUID, limitando la sensibilidad final del sistema. La Figura 3.1 muestra la magnitud de campo magnético producido por diferentes fenómenos así como el límite de resolución de un SQUID.

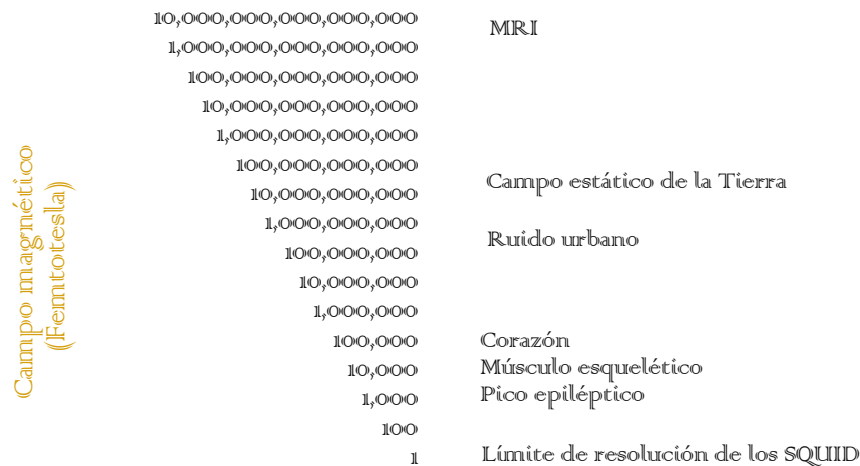


Figura 3.1 Gráfico comparativo entre la intensidad de campo magnético producido por algunas fuentes y la resolución límite de un sensor SQUID.

Para dar una idea de la escala de ruido, un amplificador de instrumentación típico podría tener un nivel de ruido en el rango de unos pocos nanovolts por raíz cuadrada de Hertz ( $nV/\sqrt{Hz}$ ), mientras

que un SQUID de D.C. puede operar con niveles de ruido tan bajos como unos pocos cientos de femtovolts por raíz cuadrada de Hertz ( $fV/\sqrt{Hz}$ ) lo cuál es millones de ordenes de magnitud más bajo [Clarke y Braginski, 2004]. Debido a esto, se debe tener especial cuidado al diseñar e implementar circuitos de lectura para SQUID de corriente continua, a menudo implicando el uso de componentes de bajo ruido y estrategias cuidadosas de blindaje contra campos magnéticos externos y puesta a tierra, para asegurar que la sensibilidad intrínseca del SQUID no se vea comprometida por la electrónica utilizada para leer sus señales.

Los componentes electrónicos de lectura para los sensores SQUID constituyen un elemento esencial para las mediciones que realiza el dispositivo. Su función principal consiste en obtener la información del campo magnético del SQUID y transformarla a un formato que pueda ser interpretado por otros dispositivos electrónicos o software para su procesamiento e interpretación, un esquema de la interconexión de elementos para la lectura de señales captadas por un sensor SQUID se muestra en la Figura 3.2. Entre los componentes de la electrónica de lectura se encuentran el preamplificador, las bobinas de la señal de entrada y la resistencia de retroalimentación, entre otros.

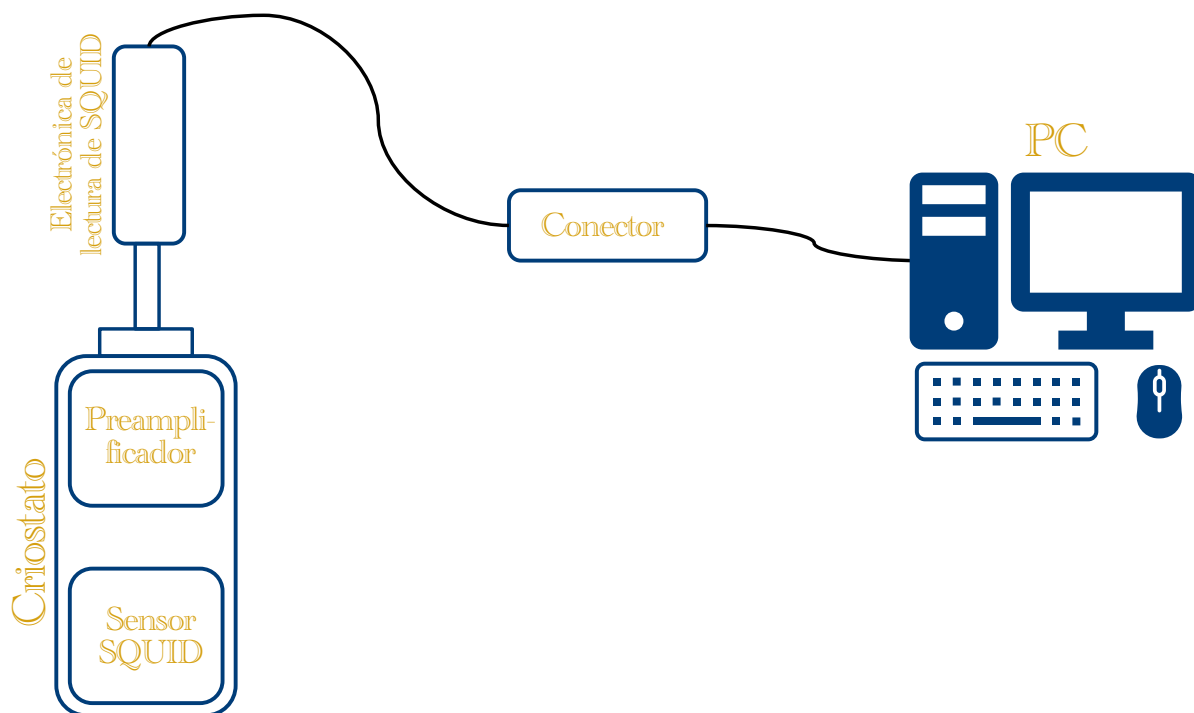


Figura 3.2 Esquema que muestra el proceso de lectura y manipulación de un sensor SQUID desde el criostato hasta un programa en computadora.

### 3.1. Electrónica de lectura de SQUID

Los principales componentes que conforman la electrónica de lectura de SQUID usando un preamplificador son:

- El preamplificador que se utiliza para incrementar la señal procedente del SQUID. Dado que el SQUID está diseñado para detectar campos magnéticos de niveles ínfimos, la señal de salida del SQUID suele ser muy pequeña. Por lo tanto, es necesaria la amplificación para garantizar que la señal sea lo suficientemente fuerte para ser tolerante al ruido de los componentes en las etapas sucesivas de la electrónica de lectura.
- La resistencia de retroalimentación y la bobina de modulación forman parte del bucle de retroalimentación, que es fundamental para mantener la operación del SQUID dentro de su rango de respuesta lineal. Esto se logra ajustando dinámicamente la corriente a través del SQUID, garantizando que el dispositivo no se sature y opere siempre de manera óptima.
- La bobina de realimentación que también mantiene a cada SQUID operando en el rango lineal.

Además, los componentes electrónicos de lectura son responsables de la demodulación de la señal del SQUID. En muchos sistemas SQUID, el dispositivo se opera en una configuración de lazo de bloqueo de flujo [Clarke y Braginski, 2004] (FLL por sus siglas en inglés), donde el flujo magnético a través del SQUID se mantiene constante gracias a una señal de retroalimentación. La señal procedente del SQUID se modula típicamente a una alta frecuencia para mejorar su estabilidad y resistencia al ruido. Los componentes electrónicos de lectura demodulan esta señal, esencialmente extrayendo la información sobre el campo magnético a partir de ella.

En resumen, los componentes electrónicos de lectura de un sensor SQUID son fundamentales teniendo la misma importancia que el sensor SQUID. Garantizan la alta sensibilidad del sensor, su estabilidad y su amplio rango dinámico, y desempeñan un papel crucial en la conversión de la señal bruta procedente del SQUID en datos significativos sobre los campos magnéticos que se están midiendo. Sin un diseño cuidadoso de la electrónica de lectura, las cualidades del sensor SQUID se pierden por completo debido a la incapacidad de transferir las señales captadas a una computadora o algún otro dispositivo de electrónica convencional. En la Figura 3.3 se muestra un esquemático de un chip que contiene un preamplificador de SQUID para acondicionar la señal captada por un sensor SQUID y posteriormente enviar la señal resultante a un componente de electrónica convencional.

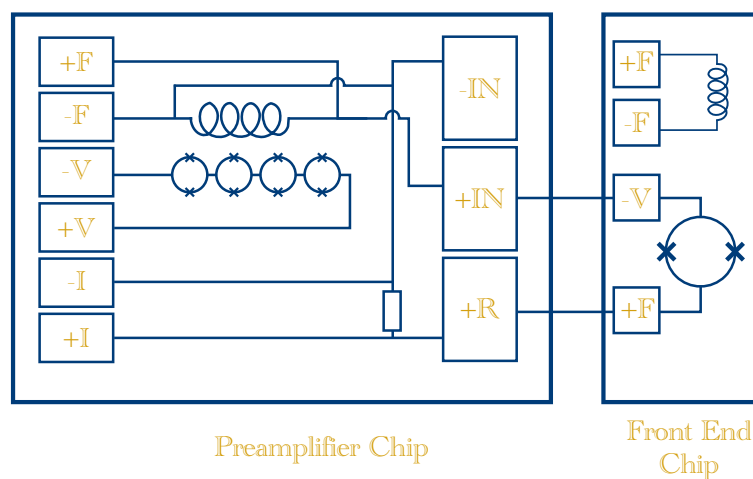


Figura 3.3 Esquemático que muestra un chip preamplificador que consiste de SQUID conectados en serie como parte de la electrónica de lectura de un sensor SQUID localizado en otro chip.

El problema que se resolvió en el presente trabajo consistió en la propuesta de una geometría para las bobinas del preamplificador que mejora la constante de acoplamiento inductivo entre la bobina de entrada y las bobinas que conforman al arreglo de SQUID. Tal como se aprecia en el gráfico mostrado en la Figura 3.4. La constante de acoplamiento inductivo entre dichas bobinas está dado por la ecuación:

$$M = k\sqrt{L_{B.E.}L_p}$$

donde  $M$  es la inductancia mutua entre las bobinas,  $k$  es la constante de acoplamiento inductivo,  $L_{B.E.}$  es la inductancia de la bobina de entrada y  $L_p$  la inductancia de las bobinas del arreglo de SQUID.

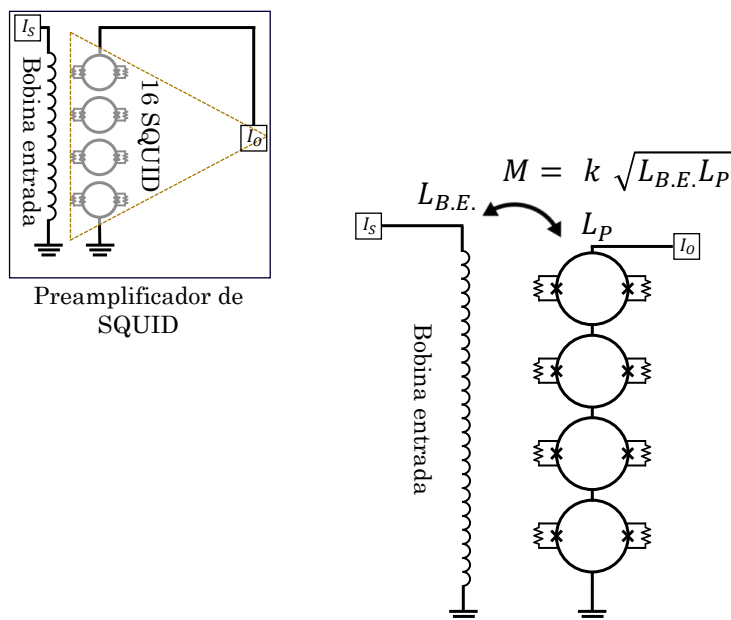


Figura 3.4 Esquemático que el acoplamiento inductivo entre la bobina por donde circula la señal que se desea amplificar y el arreglo de SQUID.

Una geometría que mejora dicha constante de acoplamiento inductivo permite una mejor transferencia de la señal que se desea amplificar.



## Capítulo 4

# Metodología Implementada

Una vez conocido el principio de operación de un SQUID en el Capítulo 2, es pertinente ofrecer una visión general de las herramientas, tecnologías y técnicas utilizadas que intervienen durante el proceso de diseño y manufactura del chip sobre el que debe fabricarse el preamplificador de SQUID diseñado con la nueva geometría propuesta. Dicho chip se construye sobre una oblea de silicio de 1 centímetro cuadrado sobre el cual se fabrica cada elemento capa por capa usando las herramientas y tecnologías descritas en el presente capítulo, como apoyo visual refiérase a la Figura A.1 y la Figura A.2.

### 4.1. Herramientas de asistencia en el diseño y simulación de circuitos integrados

Para el diseño del circuito integrado que conforma la solución, es elemental contar con un software de diseño de circuitos integrados (CI, por sus siglas en inglés), en el caso del lugar donde se laboró se trata de una herramienta de código libre ampliamente utilizada para ámbitos de investigación y su nombre es KLayout. Se basa en la tecnología de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés) y se utiliza para definir capas de diseño que crean los elementos del circuito [Köfferlein, 2023], como inductores, resistencias y capacitores. El software KLayout utiliza diversas herramientas y técnicas para permitir la creación de diseños, lo que permite una mejor comprensión de la estructura del circuito y su funcionamiento.

La herramienta de diseño KLayout es crucial en el diseño de componentes microelectrónicos con superconductores, debido a la necesidad de crear diseños complejos montados en circuitos integrados, además de, permitir guardar los diseños en diferentes tipos de archivo para su posterior simulación y manufactura. El formato de archivo mayormente usado para la simulación y manufactura en el instituto es GDSII.

Los archivos con terminación GDSII son un formato de archivo común utilizado en la industria para la fabricación de circuitos integrados. Estos archivos se utilizan para describir el diseño de un CI y contienen información sobre las capas, los tamaños y las posiciones de los elementos del circuito. KLayout es capaz de leer y escribir archivos GDSII y permite a los diseñadores de circuitos integrados trabajar con este formato de archivo estándar.

Por otro lado, InductEx es un software de simulación electromagnética utilizado para el análisis de inductores y comportamiento inductivo de los elementos en sistemas electrónicos que utilizan materiales superconductores [Fourie, *et al.*, 2011]. Los inductores son elementos fundamentales en los circuitos y se emplean para almacenar energía magnética y proveer estabilidad y filtrado de señales. InductEx se integra con KLayout para permitir la simulación numérica de diseños complejos con el objetivo de encontrar los valores de inductancia de diferentes elementos o de inductancia mutua entre elementos vecinos. Este software utiliza el método de elementos finitos para resolver las ecuaciones de Maxwell en 3D usando un algoritmo de extracción de inductancia llamado *FastHenry* [Fourie, *et al.*, 2011], es una potente herramienta para el tratamiento geométrico, el modelado, la segmentación y la solución de circuitos inductivos. Para el cálculo de inductancias, InductEx utiliza motores numéricos para calcular la distribución de corriente en las estructuras, a partir de la cual se determina la inductancia y la constante de acoplamiento inductivo [SUN-Magnetics, 2023]. Como resultado, se genera un archivo de texto que contiene los datos de simulación detallada del comportamiento inductivo de los componentes del circuito. La simulación electromagnética proporcionada por InductEx permite a los diseñadores de circuitos superconductores analizar y optimizar el comportamiento inductivo de los circuitos y mejorar su rendimiento.

La herramienta permite definir las propiedades del material, la geometría y las condiciones de operación del diseño. Es especialmente relevante en el diseño de componentes microelectrónicos con superconductores, ya que permite simular el comportamiento de los inductores a temperaturas criogénicas y en presencia de campos magnéticos intensos.

Los resultados de la simulación pueden ser utilizados para optimizar la geometría y las propiedades de SQUID, maximizando la inductancia mutua entre el *SQUID washer* y la bobina de entrada; minimizando sus pérdidas. Además, la simulación puede ayudar a predecir el comportamiento inductivo en diferentes condiciones de operación, lo que permite una mejor comprensión de su funcionamiento y una optimización más eficiente del sistema en el que se encuentra integrado.

En resumen, KLayout es una herramienta valiosa para los ingenieros que trabajan en el diseño de componentes microelectrónicos con superconductores. Permite un diseño preciso y una visualización clara de los componentes del IC, y su integración con herramientas como InductEx permite la simulación y optimización del comportamiento inductivo. Esto lleva a diseños más eficientes y componentes de mejor rendimiento.

## 4.2. Tecnologías de microfabricación

Cuando se trata con dispositivos de película delgada, un problema recurrente es dar forma a las estructuras de acuerdo al patrón deseado. Otro aspecto crítico es hacer las estructuras tan pequeñas como sea posible, especialmente cuando se trata de grandes arreglos [Barone y Paternò, 1982]. Las tecnologías de microfabricación son un conjunto de procesos de fabricación que permiten crear dispositivos y estructuras en miniatura con gran precisión y exactitud. En el contexto de los circuitos microelectrónicos, estas tecnologías se utilizan para fabricar circuitos integrados y otros dispositivos

microelectrónicos, como sensores y actuadores a pequeña escala [Madou, 2011].

El concepto de tecnologías de microfabricación de circuitos microelectrónicos engloba una serie de procesos, como la litografía, el grabado, la deposición y la creación de patrones, que se utilizan para crear las distintas capas del circuito integrado. Estos procesos se llevan a cabo sobre un sustrato, que suele ser de silicio. La fabricación de circuitos microelectrónicos requiere una gran exactitud y precisión, ya que el tamaño y el grosor de las características del circuito pueden ser tan pequeños como unos pocos nanómetros. El uso de salas blancas, que son espacios aislados donde las fuentes de contaminación son limitadas y con parámetros ambientales estrictamente controlados, es crucial en este contexto, ya que incluso las partículas no deseadas más pequeñas pueden causar defectos en el circuito [Sze y Ng, 2006].

Una de las técnicas clave de las tecnologías de micro fabricación de circuitos microelectrónicos es la fotolitografía, que utiliza la luz para transferir un patrón de una máscara a un material fotosensible del sustrato. A continuación, el patrón se graba en el material para crear las características deseadas.

#### 4.2.1. Fotolitografía laser

La Fotolitografía láser es una potente metodología en la fabricación de circuitos microelectrónicos, que permite crear estructuras muy precisas y complejas. El haz láser se controla mediante un sistema informático que puede controlar con precisión el movimiento del haz y la intensidad de la exposición.

El proceso consta de los siguientes pasos: en primer lugar, se aplica al sustrato una capa de material fotosensible, denominada fotorresistencia, también llamada fotomáscara. A continuación, se utiliza un láser para exponer directamente el material fotosensible, lo que hace que la fotorresistencia se vuelva más o menos soluble, en función del tipo de fotorresistencia utilizada. A continuación, se revela el sustrato, lo que elimina las zonas de fotorresistencia expuestas a la luz y deja una capa de fotorresistencia sobre el sustrato (fotorresistencia negativa) o viceversa (fotorresistencia positiva) [Schmidt, *et al.*, 1995], en la Figura 4.1 se muestra un esquemático mostrando un corte transversal de ambas fotorresistencias.

#### 4.2.2. Técnica de *Lift-off*

El técnica de *lift-off* (por su nombre en el idioma inglés) es una técnica utilizada en los procesos de microfabricación para crear patrones de capas finas sobre un sustrato [Jaeger y Blalock, 2010]. El proceso consiste en depositar una capa de material, como un metal o un polímero, sobre el sustrato y, a continuación, cubrirla con una capa de fotorresistencia. A continuación, se genera un patrón en la fotorresistencia exponiéndola a la luz ultravioleta a través de una máscara (en el caso del instituto donde se laboró, mediante exposición láser). A continuación, se revela la fotorresistencia y las partes expuestas se eliminan con un disolvente, dejando una capa de material con el patrón sobre el sustrato. Este proceso se conoce como *lift-off* porque el material restante se “levanta” del sustrato cuando se disuelve la fotorresistencia.

### 4.2.3. Técnica de Etching

El técnica de *etching* (por sus uso en inglés) es un proceso que elimina selectivamente material de un sustrato para crear un patrón deseado. El proceso suele consistir en depositar una capa de material sobre el sustrato y recubrirla con una capa fotorresistente.

A continuación, la fotorresistencia se modela mediante fotolitografía y las partes expuestas de la fotorresistencia se revelan con un disolvente. La fotorresistencia estampada sirve de máscara para proteger el material subyacente mientras el sustrato se expone a un agente grabador, que elimina selectivamente el material de las regiones no enmascaradas.

Existen diferentes tipos de *etching*, como el *etching* en seco y el *etching* en húmedo. El *etching* en seco utiliza plasma para retirar el material, mientras que el *etching* en húmedo utiliza productos químicos líquidos. Ambos procesos tienen sus propias ventajas y desventajas, y la elección del método adecuado depende del tipo de material y del diseño del dispositivo.

Una vez finalizado el proceso de grabado, se retira el material fotorresistente, dejando tras de sí el patrón deseado.

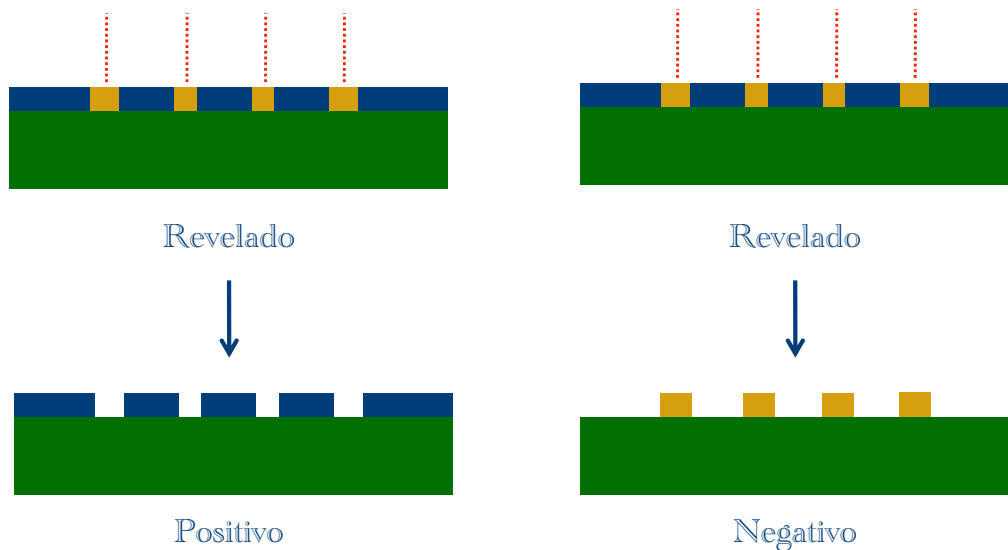


Figura 4.1 Fotorresistencias positiva (izquierda) y negativa (derecha).

### 4.3. Ecuaciones de inductores espirales planos

En la micro fabricación es común requerir de elementos inductivos. Una forma práctica de diseñar dichos elementos es mediante inductores espirales planos. En la Figura 4.2 se muestra un ejemplo de un inductor espiral plano octagonal. El valor de inductancia de dichos inductores puede calcu-

larse mediante expresiones que son una aproximación al valor real de la inductancia de dichos elementos.

Las ecuaciones de inductores espirales planos son una parte integral de muchos circuitos y sistemas electrónicos, contar con expresiones sencillas para el cálculo de sus parámetros es crucial para su diseño y análisis. A continuación, se presentan algunas razones por las cuales las ecuaciones de los inductores planos son relevantes:

- **Diseño de circuitos:** Las ecuaciones de los inductores espirales planos son esenciales para los diseñadores de circuitos, ya que ayudan en la predicción precisa del comportamiento del inductor dentro de un circuito específico. Utilizando estas ecuaciones, los diseñadores pueden optimizar las dimensiones del inductor, las vueltas y otros parámetros para cumplir con las especificaciones deseadas y los requisitos de rendimiento del circuito.
- **Modelado y simulación:** Las ecuaciones de los inductores espirales planos son la base de sus modelos matemáticos, que se utilizan en simuladores de circuitos para predecir su comportamiento en sistemas electrónicos complejos. Estos modelos permiten a los diseñadores simular y analizar con precisión el rendimiento de todo el circuito, incluido el impacto de los inductores planos en el sistema general.
- **Optimización y compensaciones:** Al manipular los parámetros de diseño en las ecuaciones, los diseñadores pueden explorar diferentes compensaciones entre la inductancia, el tamaño, los efectos parásitos y otros factores, lo que finalmente conduce a un diseño optimizado.

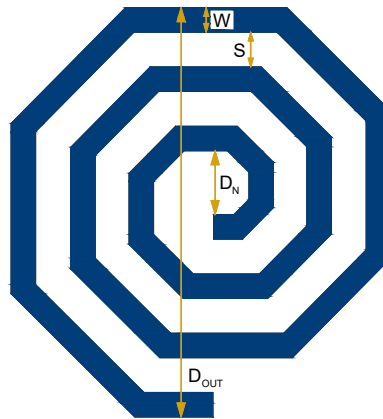


Figura 4.2 Diagrama de un inductor espiral plano octagonal. Se muestran los parámetros que definen el valor de la inductancia de acuerdo a la ecuación modificada de Wheeler.

En resumen, las ecuaciones de los inductores planos son relevantes porque permiten una predicción precisa del valor de inductancia de un inductor espiral plano. Existen múltiples ecuaciones que permiten aproximar mediante expresiones sencillas la inductancia de un inductor de este tipo. Para el trabajo realizado, se utilizó la ecuación de Wheeler modificada [Mohan y Sharma, 1999] la cual permite conocer, con un error típico menor al 3%, el valor de inductancia en función del ancho de las estructuras, la distancia de separación entre las tiras que conforman el espiral, el diámetro interno del espiral y el diámetro externo del mismo. Por facilidad, se hizo uso de la calculadora en línea disponible en el siguiente enlace: [http://www.circuits.dk/calculator\\_planar\\_coil\\_inductor.htm](http://www.circuits.dk/calculator_planar_coil_inductor.htm).

#### 4.4. Limitaciones de fabricación y requisitos de diseño

Para el proceso de diseño y dimensionamiento del arreglos de SQUID, se tienen en cuenta los siguientes requisitos:

- El tamaño del chip es de  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$  y estará dividido en 4 secciones para albergar un total de 8 arreglos de SQUID.
- El arreglo de SQUID funcionará como un preamplificador para acoplar la impedancia de un amplificador electrónico para la lectura de SQUID.
- La resistencia de salida necesaria para el acoplamiento de impedancias es de  $50\ \Omega$ .
- Es necesario un diseño gradiométrico para evitar la captación de campos magnéticos constantes (por ejemplo, el campo magnético de la Tierra).
- El máximo grosor permitido para las líneas de Niobio es de  $7\ \mu\text{m}$  para evitar el atrapamiento de flujo [Bauer, 2022].
- La corriente crítica para las uniones será de  $6\ \mu\text{A}$  para permitir tiempos de fabricación manejables de las uniones.

Además, se parte de los siguientes supuestos:

- Las propiedades de los materiales superconductores, de los conductores y los aislamientos se conocen con una buena precisión según mediciones realizados en el instituto.
- Aún no se conocen con exactitud las limitaciones de fabricación (en cuanto al tamaño más pequeño que se puede manufacturar de forma repetible) de cada proceso para fabricar SQUID.
- No se ha intentado mejorar el diseño actual del arreglo, por lo que no se dispone de datos previos para mejorar el acoplamiento inductivo entre la bobina de entrada y la del SQUID.
- La manera de validar numéricamente el efecto de las modificaciones a las estructuras es mediante simulaciones usando el programa InductEx.

#### 4.5. Cálculo de los parámetros de diseño

Para el diseño se consideraron las siguientes capacidades de fabricación en el instituto.

- El tamaño de las uniones de Josephson será de  $4.5\ \mu\text{m} \times 4.5\ \mu\text{m}$ .
- La inductancia de las uniones de Josephson es típicamente de  $1\ \text{pH}$ .
- De acuerdo a la mínima resolución de la máquina que realiza el grabado láser sobre las fotorresinas, los aislantes deben ser  $0.5\ \mu\text{m}$  mayores en tamaño por cada lado para garantizar el correcto aislamiento entre capas.

Tomando en consideración los datos proporcionados, para el proceso de diseño, simulación y una posterior validación experimental, se eligió a un valor del parámetro de Stewart-McCumber y un valor del parámetro de screening de 0.7 también, esto con el objetivo de que las uniones no presenten histéresis en caso de que alguno de los valores de diseño resulte mayor que el esperado, manteniendo el valor de ambos coeficientes menores que 1.

$$\beta_c = \frac{2\pi I_c R^2 C}{\phi_0} \approx 0.7 \qquad \beta_L = \frac{2L_s I_c}{\phi_0} \approx 0.7$$

En caso de funcionar correctamente, los valores de ambos parámetros podrán aumentarse para ser cercanos a la unidad, permitiendo la máxima eficiencia y operación de cada SQUID [Wolf, *et al.*, 2017].

A partir del parámetro de screening, se despeja el valor que debe tener la inductancia:

$$\rightarrow L_s \approx 120.62[\text{pH}]$$

A partir del resultado anterior, la resistencia de cada una de las juntas será:

$$\rightarrow R_N \approx 6.20[\Omega]$$

Considerando que las resistencias de cada junta forman un circuito paralelo, la resistencia por SQUID será:

$$R_s = R_N // R_N \approx 3.10[\Omega]$$

El número necesario de SQUID para lograr acoplar la impedancia es:

$$N = \frac{Z_{\text{in}}}{R_s} = \frac{50[\Omega]}{3.10[\Omega]} = 16.12 \approx 16$$

## 4.6. Diseño gradiométrico

Un SQUID con diseño gradiométrico, específicamente un diseño gradiométrico en serie, se refiere a una configuración donde múltiples *loops* que conforman a un solo SQUID se disponen en forma secuencial a lo largo de un eje común. Cada *loop* del SQUID individual mide el campo magnético de forma independiente y sus salidas se conectan en serie, formando una configuración en cadena. Esta disposición permite la cancelación del ruido de modo común y las interferencias externas que afectan ambos *loops* simultáneamente [Clarke y Braginski, 2004].

El diseño gradiométrico en serie amplifica de manera efectiva la detección de variaciones espaciales en el campo magnético o su gradiente al tiempo que minimiza el impacto de fuentes de ruido comunes. En la Figura 4.3 se muestra el flujo de las corrientes inducidas por un campo magnético constante en cada uno de los *loops* que conforman al SQUID.

En resumen, un SQUID con una configuración de gradiómetro en serie es un sensor dispuesto en serie a lo largo de un eje común, lo que permite una mayor sensibilidad a las variaciones espaciales en campos magnéticos o gradientes al tiempo que reduce el ruido de modo común.

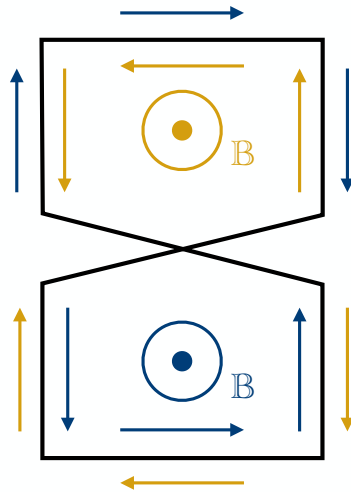


Figura 4.3 Gradiómetro de primer orden.

#### 4.6.1. Ejemplo de diseño de un SQUID gradiométrico de segundo orden

Por motivos de privacidad no se muestran las dimensiones del diseño de las bobinas que conforman al preamplificador, las cuales tienen una configuración gradiométrica de primer orden en serie, sin embargo, se muestra el ejemplo del proceso de diseño para un SQUID gradiométrico de segundo orden. Dicho proceso se muestra para dar una idea de la metodología para encontrar las dimensiones adecuadas de las bobinas. Comenzando con el proceso de diseño, la corriente crítica de las uniones se establece en  $6 \mu\text{A}$  para permitir un tiempo de oxidación de las uniones de aproximadamente siete horas. Teniendo en cuenta que para un buen acoplamiento inductivo entre la bobina de entrada y el SQUID deben cumplirse las siguientes características:

- El flujo de corriente entre la bobina de entrada y el bucle SQUID debe seguir la misma dirección.
- El grosor y la distancia entre las dos bobinas deben ser mínimos para aumentar la inductancia mutua de la bobina de entrada y el bucle SQUID.

Para mantener dichas consideraciones se concibió un diseño consistente en un gradiómetro de segundo orden donde tres espiras se alinean a la bobina de entrada y una espira se aparta para acoplarse a un bucle de realimentación.

Para ayudar en el diseño dimensional de dicha geometría se ha utilizado un planteamiento basado en las ecuaciones de los SQUID planos.

Para estimar las dimensiones de cada *loop* que conforma al SQUID *washer*, se hizo una aproximación suponiendo que la inductancia total de cada *loop* contribuye a una cuarta parte del valor de inductancia total (omitiendo las inductancias parásitas). Para compensar el valor de la inductancia parásita, se asumió un valor de 2 pH de inductancia parásita (de acuerdo a simulaciones numéricas) debida a las conexiones entre las bobinas, reduciendo el tamaño de la arandela SQUID. Para obtener las dimensiones estimadas de un octágono elongado con el valor de la inductancia deseada, se utilizaron las ecuaciones de dos estructuras superconductoras útiles, las cuales se visualizan en la Figura 4.4. Para



un entendimiento físico más profundo, puede revisarse el octavo capítulo del libro [Wolf, *et al.*, 2017] La primera ecuación consiste en la inductancia de un polígono con un hueco en el centro:

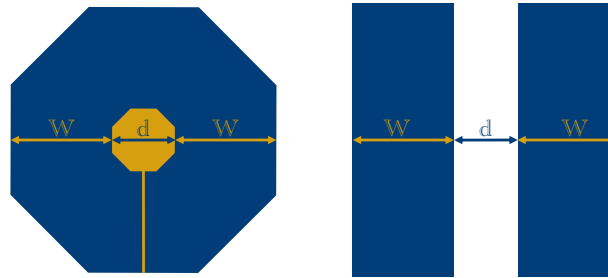


Figura 4.4 Polígono regular con un hueco en el centro (izquierda) y rendija delgada infinita (derecha).

$$L_p = \frac{\gamma_p \mu_0 c}{\pi} \quad (4.1)$$

donde  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética del vacío,  $c$  es el perímetro del hueco y  $\gamma_p$  es el factor de geometría. La inductancia es proporcional al producto del perímetro del agujero y el factor de geometría  $\gamma_p$ . Para un polígono regular de  $N$  lados, con un hueco en su centro cuya distancia entre lados es  $d$ , el perímetro del hueco  $c$  es:

$$c = N \tan\left(\frac{\pi}{N}\right) d \quad (4.2)$$

y el factor de geometría es:

$$\gamma_p = \frac{\ln\left(\frac{d}{w} + 2.08\right) + 0.2 + 2.7\frac{d}{c}}{2.07}$$

Mientras que para una rendija estrecha infinita, la inductancia se calcula como:

$$L_s = \gamma_s \mu_0 l \quad (4.3)$$

donde:

$$\gamma_s = \frac{1}{1.98} \left[ \frac{\ln\left(4\frac{d}{w} + 22\right)}{\ln\left(8\frac{w}{d} + 4.9\right)} \right]$$

donde  $l$  es la longitud de separación de la rendija,  $w$  es el grosor de las tiras que conforman la rendija y  $\mu_0$  la permeabilidad magnética del vacío.

Cuando se tiene una polígono elongado, las ecuaciones 4.1 y 4.3 pueden combinarse para estimar la inductancia de un polígono elongado. La estimación parte de la suposición de que la inductancia de un polígono elongado está compuesto por polígono de lados iguales con un hueco en su interior interrumpido por una rendija delgada. Formando un sistema de ecuaciones, después de resolver ambas ecuaciones, se encontró que las dimensiones requeridas para formar el polígono elongado son:

$$d_{\text{long}} = 18.5[\mu\text{m}]$$

$$d_{\text{short}} = 11[\mu\text{m}]$$

Posteriormente, como primera validación de los resultados se utilizan también la ecuación modificada de Wheeler para inductores espirales planos mediante una calculadora en línea en la cual se introducen los parámetros del diseño y de manera rápida, se obtienen los valores estimados de inductancia para un polígono regular<sup>1</sup>, para ello se define que el inductor tendrá solamente 1 vuelta, la distancia entre vueltas será  $0 \mu\text{m}$ , el ancho será  $6 \mu\text{m}$  y el diámetro externo será de  $24.5 \mu\text{m}$  (el resultado de sumar  $d_{\text{long}} + w$ ).

Al simular el circuito en InductEx, después de introducir los parámetros del material, el resultado obtenido es que la inductancia es de  $28.75 \text{ pH}$  para cada espira que conforma al gradiómetro de segundo orden. Realizando las conexiones (de acuerdo a la distancia mínima que puede fabricarse entre las estructuras) se creó finalmente el diseño a simular en donde las 4 espiras están conectadas en serie, con los puentes para invertir el sentido de la corriente en cada uno de ellos. El valor esperado de inductancia es:

$$L = 4L_{\text{pol}} + 4L_{\text{par}} = [4(28.75) + 4(2)] [\text{pH}] = 123[\text{pH}]$$

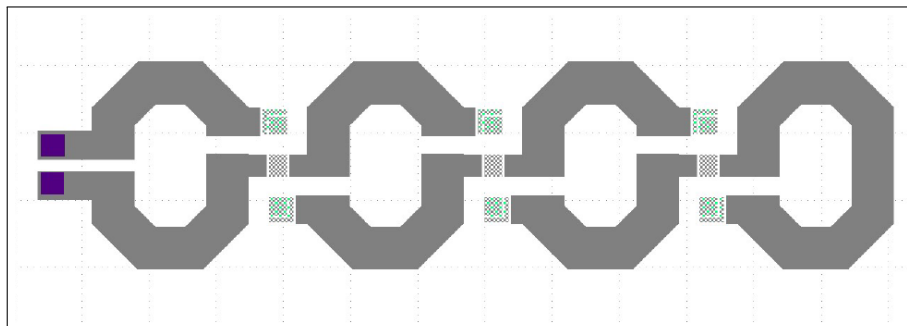


Figura 4.5 Inductor simulado para el ejemplo de diseño.

Simulando el circuito, la inductancia total resulta de  $143 \text{ pH}$ , por lo que el error porcentual respecto al valor deseado es del  $19\%$ . Esto debido a las inductancias parásitas, que se estima contribuyen un total de  $28 \text{ pH}$ . Por lo que, para cada interconexión del gradiómetro se considera que la inductancia parásita es de  $7 \text{ pH}$ . El esquema de la Figura 4.5 muestra la geometría de la bobina que conforma al SQUID gradiométrico de segundo orden. Los cuadrados de color morado indican los puntos entre los cuales se desea calcular la inductancia usando el programa InductEx.

## 4.7. Diseño de componentes para el preamplificador

El objetivo principal para mejorar el desempeño del preamplificador consiste en modificar la geometría del SQUID *washer* y de las bobinas de entrada y de realimentación del chip. Para mejorar el desempeño del preamplificador, no es necesario únicamente acoplar las impedancias, sino también

<sup>1</sup>Como la diferencia de elongación es relativamente pequeña es válido hacer la aproximación.

maximizar el acoplamiento inductivo entre la bobina de entrada y el SQUID *washer*.

Como primera actividad, usando el diseño del preamplificador se hicieron diferentes simulaciones, probando diferentes propuestas de geometrías, donde se varió el grosor de las capas de niobio, así como las distancias y posicionamientos del SQUID *washer* y las bobinas anteriormente mencionadas.

#### 4.7.1. Diseño del SQUID *washer*

A partir de la experiencia obtenida para el diseño del ejemplo anterior, optimizando la geometría para tener la menor cantidad de giros de 90 grados (ya que afectan la capacidad de enfriamiento e inducen inductancias parásitas) y buscando cumplir con el mínimo tamaño de fabricación posible, se encontró una geometría que tiene un valor de inductancia simulado de 120 pH. Por motivos de confidencialidad ni la geometría ni las dimensiones exactas pueden ser reveladas.

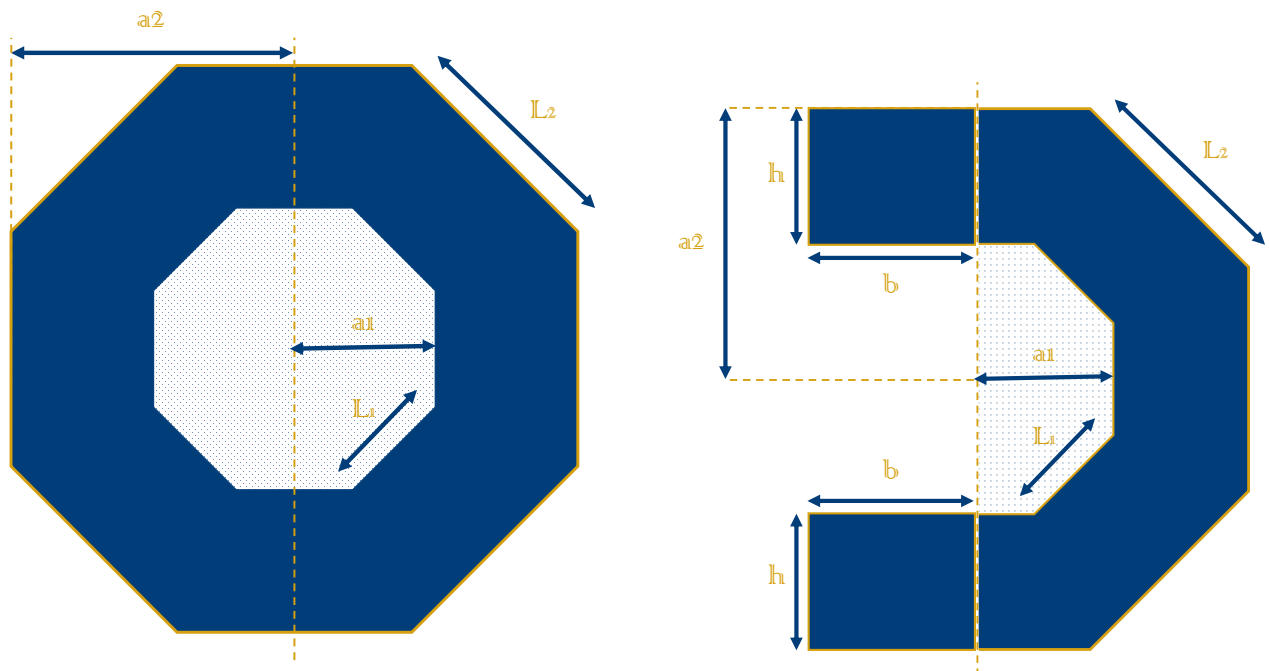
#### 4.7.2. Diseño de los resistores *shunt*

Para el diseño de los resistores shunt se contó con mediciones de la resistividad de la aleación de oro y paladio usada en el instituto para la creación de resistores. Dicha curva relaciona el área en  $\mu\text{m}^2$  cuadrados y el grosor de dicha estructura con una resistencia medida de forma experimental. Para el cálculo de las dimensiones, se partió de una medición de resistividad para una estructura cuadrada cuya área era de  $36 \mu\text{m}^2$ . Aproximando el valor, usando una nueva geometría rectangular con una base de  $3 \mu\text{m}$  y una altura de  $12 \mu\text{m}$ , se obtiene la misma área, con lo cual para la primera iteración de diseño el valor de resistividad será bastante cercano al medido anteriormente de  $6.1 \Omega$

De acuerdo a los datos a los que se tuvo acceso, para dicho rectángulo, teniendo un grosor específico, cuyo valor no puede revelarse, la resistencia medida fue de  $6.1 \Omega$ , lo cual es cercano al valor calculado en la sección 4.5 de  $6.2 \Omega$ . Por tratarse de un prototipo, el efecto de  $0.1 \Omega$  de diferencia se considerará despreciable para seguir el mismo proceso de manufactura que para la medición realizada anteriormente. Posteriormente, para versiones que no sean un prototipo, puede modificarse el grosor para obtener un valor más cercano al calculado.

Se realizó la suposición de que para obtener el mismo valor de resistencia el área de la figura que conforma al resistor debe ser la misma, es decir,  $36 \mu\text{m}^2$ . Siguiendo las buenas prácticas del instituto, es sugerido que los resistores tengan una forma de "C". En la Figura 4.6b se muestra un esquemático con la geometría que se busca.

Para obtener las dimensiones del resistor shunt se asumió que el área puede aproximarse como un octágono grande, con apotema  $a_2$  que tiene inscrito en su interior un octágono de menor tamaño con apotema  $a_1$ , el cual estará hueco. Para conocer el área de la figura resultante basta con restar el área del octágono más pequeño al de mayor tamaño y dividir el resultado entre 2. A partir de los experimentos realizados probando diferentes patrones y espirales con el láser que graba las estructuras en las fotorresinas, la dimensión más pequeña que mantiene bordes limpios después de ser revelado es un octágono hueco, donde, el octágono inscrito en el centro tiene un apotema de  $3 \mu\text{m}$ .



(a) Esquemático que muestra la composición de un octágono hueco. Dicho octágono puede partirse por la mitad para obtener una figura similar a la letra “C”.

(b) Esquemático que muestra la composición de una figura similar a una “C” con los extremos superior e inferior alargados por rectángulos.

Figura 4.6 Esquemático que muestra las componentes necesarias para calcular el área de un octágono hueco (izquierda) y la mitad de un octágono hueco (derecha).

Partiendo del valor del apotema  $a_1$ , se definió que al apotema  $a_2$  tenga un valor de  $4.5 \mu\text{m}$  para que la estructura resultante tenga una altura  $h$  de  $3 \mu\text{m}$ . Las longitudes de cada segmento  $L_1$  y  $L_2$  fueron medidas directamente en KLayout. Los cálculos se muestran en la Tabla 4.1.

Octágono	L $\mu\text{m}$	Apotema $\mu\text{m}$	Perímetro $\mu\text{m}$	Área $\mu\text{m}^2$
Exterior	3.7288281	4.5	22.37297	50.3391794
Interior	1.2421095	1.5	7.452657	5.58949275

Tabla 4.1 Cálculos para obtener el área de un medio octágono hueco.

Restando el área menor del área mayor y dividiendo entre 2 se obtiene que, el área resultante del medio octágono hueco es:

$$A_{\text{oct}} = 22.3748[\mu\text{m}^2]$$

Por lo que se encontró que el área que cada rectángulo debe aportar es:

$$A_{\text{rect}} = 6.8125[\mu\text{m}^2]$$

Partiendo de la ecuación para calcular el área de un rectángulo, la base  $b$  de cada rectángulo debe ser de aproximadamente 2.27 por una altura  $h$  de  $3 \mu\text{m}$

### 4.7.3. Rediseño de los inductores que atenúan resonancias entre celdas del preamplificador

Una vez validado el diseño del SQUID *washer* y de las bobinas que van montadas sobre el mismo, el siguiente paso consistió en modificar la posición de los demás elementos del arreglo. Entre ellos están las resistencias conectadas en paralelo a las bobinas acopladas sobre el SQUID *washer*. Además, se rediseñó el inductor que forma parte de la conexión entre arreglos para tener el mismo valor de inductancia que para el diseño anterior, pero con una dimensión menor. Para ello, se utilizó la ecuación de Wheeler y una simulación en InductEx, con lo cual se mantuvo encontró una geometría de menor tamaño que mantiene el mismo valor original con una diferencia porcentual menor al 2%.

### 4.7.4. Rediseño de interconexión entre elementos y terminales del chip

Se optimizó la distribución de las pistas por donde circula la corriente para evitar ángulos de 90 grados y recorridos innecesarios que se detectaron en el diseño del preamplificador anterior y que mediante un acomodo mejor de los elementos pueden ser evitados.



## Capítulo 5

# Resultados

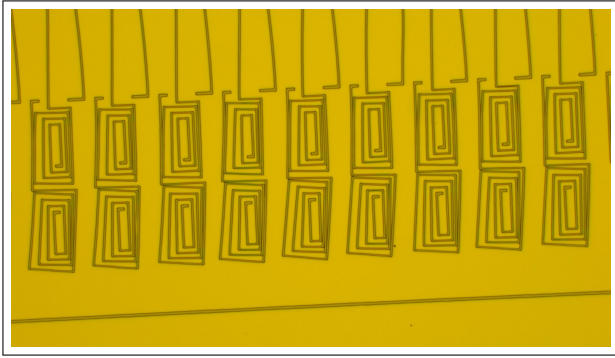
En el proyecto estuve involucrado en el proceso de diseño, simulación y manufactura del chip. El diseño y simulación del mismo fueron exitosos como se verá en la sección 5.3 lográndose un factor de inductancia mutua mayor al del diseño antiguo entre la bobina de entrada y el SQUID *washer*. Lo cual se traduce en una mayor sensibilidad del preamplificador. Desafortunadamente, por falta de tiempo no fue posible realizar las mediciones del conjunto completo de las etapas de amplificación.

Sin embargo, se logró identificar el límite de la tecnología y los procesos de microfabricación, permitiendo adaptar el diseño para contemplar reducir los tamaños de aislamientos, ancho y largo de las pistas de materiales superconductores que conforman los elementos de los SQUID, distancias mínimas que deben dejarse entre elementos, así como la identificación de los patrones y figuras que tienen mayor repetibilidad al llevar los procesos al límite de reducción de tamaño y que son relevantes para el diseño propuesto.

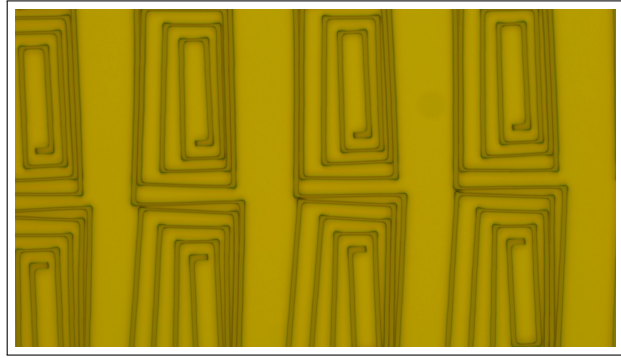
### 5.1. Investigación y experimentación para encontrar los límites de fabricación

Con el objetivo de identificar los límites actuales en el proceso de microfabricación, así como probar con diferentes parámetros los procesos para la elaboración de algunas de las capas que conforman al SQUID, se fabricaron diferentes estructuras de prueba (que solo sirven como guía para encontrar los ajustes y parámetros que maximizan la calidad en el diseño) variando el grosor de las pistas de niobio así como la distancia con pistas aledañas. También se probó modificar los tiempos de revelado del proceso para encontrar la máxima repetibilidad y calidad.

A partir de la información disponible en la fuente [Microchemicals, 2022], el tiempo óptimo para revelar estructuras con la fotorresina nLoF 2020 (usada como resina para el proceso de *lift-off*) es de 20 segundos. Se determinó experimentalmente que el mínimo grosor de las pistas es de  $2\ \mu\text{m}$  con una distancia de separación de  $2\ \mu\text{m}$  entre sí cuando las estructuras no son de forma de espiral. Para estructuras espirales, la mejor geometría es de estructuras de  $3\ \mu\text{m}$  de grosor con una separación de  $3\ \mu\text{m}$ . A continuación se muestra una fotografía tomada con el microscopio de una estructura de prueba. En la Figura 5.2 se muestran defectos observados cuando la distancia de separación entre estructuras es de  $2\ \mu\text{m}$ .



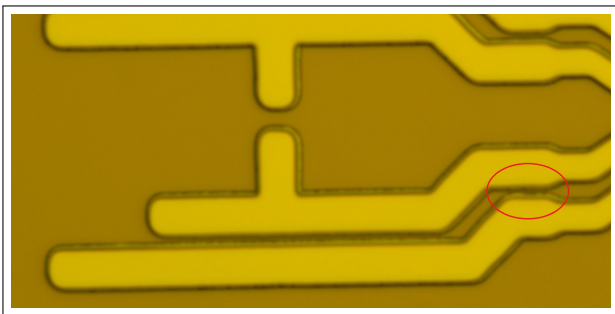
(a) Fotografía de defectos en una prueba de espirales rectangulares con ancho y separación de  $2 \mu\text{m}$ . El aumento del microscopio es de 15x.



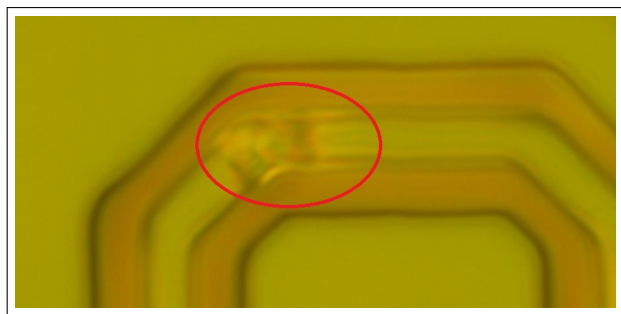
(b) Fotografía de defectos en una prueba de espirales rectangulares con ancho y separación de  $2 \mu\text{m}$ . El aumento del microscopio es de 25x.

Figura 5.1 Defectos de fabricación observados para las geometrías de prueba espirales. Se observa que algunas de las estructuras fueron desprendidas del chip debido a un tiempo de revelado demasiado largo.

El tiempo de revelado de la fotorresina que produjo mejores resultados es de 70 segundos, lo cual garantiza que los bordes no contienen irregularidades ni defectos observables bajo el microscopio para estructuras no espirales, mientras que a la par no se observan desprendimientos. Sin embargo, para las estructuras espirales se encontró la dificultad de que su revelado frecuentemente desprende partes de las estructuras así como estructuras completas y las desalinea. Tras el secado, las estructuras quedan reposando sobre la oblea de silicio como se observa en las Figuras 5.1a y 5.1b.



(a) Fotografía de defectos en una prueba patrones con ancho y separación de  $2 \mu\text{m}$ . El aumento del microscopio es de 25x. El tiempo de revelado es de 60 segundos.



(b) Fotografía de defectos en una prueba patrones con ancho y separación de  $2 \mu\text{m}$ . El aumento del microscopio es de 50x. El tiempo de revelado es de 60 segundos.

Figura 5.2 Defectos de fabricación observados para patrones de ancho y separación de  $2 \mu\text{m}$ . En aplicaciones donde se desarrollará un circuito, dichos bordes no definidos pueden generar cortocircuitos entre secciones de cada elemento, así como entre otros elementos.

Por otro lado en la Figura 5.3, se tiene una estructura de prueba de líneas con un ancho y separación de  $2[\mu\text{m}]$  donde se observa un revelado de alta calidad con un tiempo de revelado de 70 segundos. A continuación, en la Figura 5.3 se observa que las estructuras y los bordes se revelaron de forma limpia y libre de las imperfecciones que se observan en las Subfiguras 5.1a y 5.1b.





Figura 5.3 Ejemplo de un buen revelado en una estructura de prueba tras encontrar los parámetros correctos.

## 5.2. Geometría del inductor que conforma los SQUID del arreglo

Tras varias iteraciones, cuidando mantener una inductancia de 120pH y un diseño gradiométrico de primer orden para el SQUID *washer* que disminuye las distancias entre las bobinas que conforman al SQUID y las bobinas de la señal de entrada y realimentación. Así como también se disminuyó el grosor de las estructuras para permitir un mejor acoplamiento de la señal que llega a cada una de las celdas del preamplificador.

El resultado final entregado al instituto fue el diseño, con una geometría mejorada, así como las instrucciones y tiempos de revelado específicos para garantizar la repetibilidad de la manufactura del circuito. Adicionalmente, se entregó una medición del desempeño del arreglo en el que únicamente fue posible medir la sensibilidad de cada SQUID del preamplificador.

## 5.3. Simulaciones numéricas del acoplamiento entre la bobina de entrada y el SQUID

Mediante simulaciones numéricas realizadas con la herramienta InductEx, fue posible encontrar la inductancia total de las estructuras diseñadas, además de contrastarlas con los valores del preamplificador original.

Una vez optimizada una sola celda (que es uno de los 16 que deben conectarse en serie) para el nuevo diseño propuesto para una celda del preamplificador existente se simuló el comportamiento de ambos diseños para diferentes cantidades de celdas. Los resultados de las simulaciones se resumen en la Tabla 5.1.

Como se puede observar, para todos los casos simulados, el nuevo diseño tiene una constante de acoplamiento inductivo mayor entre el SQUID *washer* y las bobinas de la señal de entrada, lo cual se traduce en que la señal es captada de una mejor manera.

Diseño	Parámetro				
	L	k	M	$I_c$	$\beta_L, \beta_c$
Diseño viejo 1 celda	273	0.49084	180	4	1
Diseño nuevo 1 celda	120	0.54611	90	6	0.7
Diseño viejo 5 celdas	280	0.226	180	4	1
Diseño nuevo 5 celdas	120	0.245	90	6	0.7
Diseño viejo 16 celdas	280	0.1268	180	4	1
Diseño nuevo 16 celdas	120	0.1375	90	6	0.7

Tabla 5.1 Tabla de resultados obtenidos de la simulación del preamplificador con diferentes números de celdas.

Incremento en el acoplamiento	Simulación		
	1 celda	5 celdas	16 celdas
	11.26 %	8.41 %	8.44 %

Tabla 5.2 Incremento porcentual de la constante de acoplamiento obtenida en las simulaciones.

## 5.4. Manufactura de los chips para pruebas

La primera versión del chip fue terminada el día 23 de febrero de 2023. Se elaboraron 2 chips correspondientes al primer lote. Desafortunadamente uno de los dos chips se partió por la diagonal al atornillarlo demasiado montándolo a una de las máquinas de deposición de niobio. Debido a un mal contacto térmico entre el chip y una película de carbono que se coloca debajo para disipar el calor generado durante la deposición. El calor generado durante el proceso hace que el sustrato de silicio se expanda y al no poder liberarse la presión se rompió el chip. Desafortunadamente, con el chip sobreviviente, debido a la poca experiencia de crear un chip, varios defectos fueron encontrados, entre ellos se destacan<sup>1</sup>:

- El arreglo 1 tiene una partícula de polvo de aproximadamente  $7 \mu\text{m}$  de radio. Posiblemente deja en circuito abierto al SQUID-*washer*. Esta partícula, así como las demás observadas son producto de exponer el chip demasiado tiempo al ambiente (fuera de cámaras de vacío o su carcasa de almacenamiento). Otros trabajadores, con gran agilidad exponían al chip al ambiente durante menos de 2 segundos, lo que disminuye la probabilidad de que eso ocurra.
- El arreglo 2 fue dañado durante el proceso de soldadura de las terminales del chip con las terminales del *proto-board* donde se montó para la prueba. Debido a un accionamiento accidental de la soldadora, se cortocircuitó la terminal positiva y negativa donde se lee el voltaje de salida del preamplificador.
- Rayones realizados con las pinzas para colocar el chip en las diferentes máquinas de microfabricación. Dichos rayones dejaron en circuito abierto al arreglo 5.
- Un defecto fue observado en un resistor del arreglo 8 (defecto de mal revelado) lo cual posiblemente cortocircuita al SQUID-*washer*.

<sup>1</sup>Para entender mejor la disposición de elementos de contenidos en el chip ver A.

## 5.5. Pruebas del chip

Para la realización de pruebas, alambré el chip mediante finos cables de aluminio-titanio a un *protoboard*. Los puntos de conexión fueron las terminales del chip que son visibles en el esquemático de la Figura 3.3. Posteriormente, se soldó el *protoboard* a un dispositivo de medición utilizando un cautín. Dicho dispositivo es una estructura metálica alargada donde a un extremo se coloca el chip que se quiere medir, dicha estructura se llama *dip-stick* en inglés. Internamente, la estructura tiene cables que actúan como canales para poder medir las diferentes partes chip, es decir, permite aplicar o medir voltajes entre diferentes terminales, así como enviar y leer valores de corriente. En la Figura 5.4 se muestra una fotografía de una *dip-stick* de un equipo vendido comercialmente para realizar mediciones a temperaturas cercanas al cero absoluto.

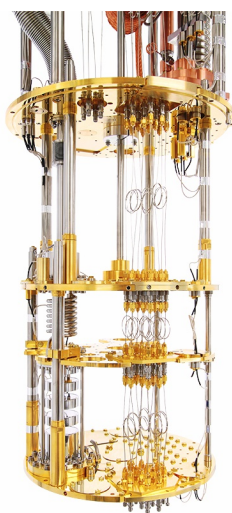


Figura 5.4 Fotografía de un *dip-stick* del sistema de enfriamiento vendido por Bluefors. El *dip-stick* es la sonda donde se monta el chip al que se le realizaran mediciones. Imagen tomada de <https://bluefors.com/products/ld-dilution-refrigerator/>.

Posteriormente, monté el *dip-stick* en un criostato que está conectado a un *cryocooler*<sup>2</sup> de dos etapas, este es un dispositivo que utiliza dos ciclos de enfriamiento para alcanzar temperaturas extremadamente bajas, típicamente en el rango de unos pocos Kelvin o menos. Posteriormente, se conectaron los canales a la electrónica de lectura de SQUID y mediante un adaptador a una computadora con el programa *SQUID Viewer* y a un osciloscopio. Se inicia la secuencia de enfriamiento y cuando la temperatura se estabilizó (alrededor de 6 K) se hicieron las mediciones al chip.

El montaje que coloqué sobre el *dip-stick* es similar al observado en la Figura 3.2, con la diferencia de que no se conectó el chip que contiene al SQUID sensor. Para generar flujos magnéticos en las bobinas que permitieran leer voltajes en las terminales del chip se utilizó *SQUID Viewer* para inyectar corrientes en las diferentes bobinas y así inducir campos magnéticos que pudiesen ser detectados en las otras bobinas.

<sup>2</sup>Nombre del dispositivo de enfriamiento en el idioma inglés.

Para las mediciones, me basé en la observación e inspección bajo el microscopio para identificar los arreglos de mayor calidad y con menor presencia de defectos como partículas de polvo o alteraciones que puedan afectar el funcionamiento<sup>3</sup>. Elegí los arreglos 3, 5 y 6 para hacer las pruebas. El arreglo 3 se conectó al canal 1, el 4 al canal 2 y al 6 al canal 6.

En el caso de los arreglos 3 y 4 no fue posible detectar ninguna señal para ninguna de las bobinas. Posiblemente se debe a la presencia de defectos de fabricación. Medí la resistencia entre cada uno de los canales y obtuve los siguientes valores:

Arreglo	Resistencia entre terminales del SQUID (+/-V)	Resistencia entre terminales de la bobina de entrada (+/- I)	Resistencia entre terminales de la bobina de realimentación (+/-F)
3	5.94 [kΩ]	291 [Ω]	336 [Ω]
4	5.63 [kΩ]	288 [Ω]	330 [Ω]
6	85.5 [Ω]	288 [Ω]	331 [Ω]

Debido a que el *dip-stick* solo cuenta con tres canales, no fue posible probar el arreglo 7 en ese momento. Por cuestiones de utilización del equipo de medición tampoco fue posible realizar otro enfriamiento y caracterizar el arreglo 7.

En el caso del arreglo 6, fue posible detectar una señal de salida del SQUID tras inyectar una corriente de 10  $\mu\text{A}$  en la bobina de entrada. Empero, la señal, a pesar de tener la forma correcta, era de amplitud menor a la esperada (atenuada en vez de amplificada). Con base en lo observado, se estimaron los siguientes parámetros:

$$R_N = \frac{610[\text{mV}]/2000}{10[\mu\text{A}]/0.36} = 84.72[\Omega]$$

$$M_{S,I} = \frac{0.854 * 250[\mu\text{A}]}{9} = 23.7 \left[ \frac{\mu\text{A}}{\phi_0} \right]$$

El error relativo obtenido para el valor de la resistencia fue de 69.44%. Lo más probable es que la partícula de polvo observada sobre la pista hace que parte del SQUID no entre al estado superconductor, por lo que el valor medido corresponde a la suma de una sección que si opera en el estado de superconductividad y otra que no lo hace y presenta una alta resistencia.

Otra posibilidad podría ser que los resistores hayan sido manufacturados con defectos o que el grosor no sea el adecuado. Para descartar la posibilidad de que el grosor de los resistores haya resultado mucho menor que el deseado (incrementando la resistividad del material por  $\mu\text{m}$  cuadrado), medí el grosor del resistor usando un profilómetro Dektak XTL en 8 ocasiones y en diferentes resistores. Posteriormente, calculé el promedio para estimar mejor el grosor. Una vez realizado lo anterior, encontré que el grosor promedio es 3.27% menor que el valor deseado, lo cual no justifica un valor de resistencia como el medido.

<sup>3</sup>Sin embargo, en todos los arreglos se observaron partículas de polvo depositadas en estructuras superconductoras

## 5.6. Manufactura de nuevos chips de prueba

Con el objetivo de realizar más mediciones, elabore 4 chips más, 2 pertenecientes al lote 2 y otra pareja perteneciente al lote 3. La diferencia entre los lotes fue una modificación que se hizo a una de las conexiones para hacerla de mayor tamaño (y reducir problemas en caso de defectos por partículas de polvo como los observados para el primer chip que se manufacturó). También se incrementó el tamaño de las pistas de alimentación del lote 3 para aumentar su robustez ante la aparición de partículas de polvo.

Los chips de ambos lotes fueron medidos con el profilómetro para verificar que los grosores de las estructuras correspondieran con los valores de diseño. Lo cual se logró en todos los casos con errores porcentuales menores al 10 % en todos los chips y estructuras. Desafortunadamente, debido a falta de tiempo de contratación no hubo oportunidad de montar los chips y caracterizarlos. Sin embargo, comparándolos cualitativamente, el lote 3 es el que se ve más prometedor.

La experiencia adquirida del manejo de los chips y el desarrollo de los procesos de manufactura produjo que para el lote 3 tuviera una buena habilidad manipulando al chip y montándolo en cada aparato que deposita alguna de las capas del chip. Esto se traduce a que el chip pasó una menor cantidad de tiempo expuesto al aire (que contiene partículas de polvo flotando) por lo cual el resultado final se ve bastante limpio en comparación con el lote 1. Además no se produjeron rayones de ningún tipo al manipularlo con las pinzas.

Adicionalmente, pequeñas áreas de oportunidad detectadas en los lotes 1 y 2 fueron pulidas y el resultado final es visualmente prometedor. Por motivos de discreción no es posible revelar fotografías detalladas donde se aprecien las estructuras fabricadas de ninguno de los chips en el presente documento.



# Capítulo 6

## Conclusiones

La elaboración de dispositivos superconductores de la más alta calidad caracterizan al instituto donde laboré como uno de los mejores a nivel mundial. Su objetivo científico es el desarrollo de nuevos sistemas de detectores y sensores de tecnología cuántica con la máxima resolución temporal y energética, cuyas prestaciones superen con creces los límites de la electrónica clásica.

Las actividades que realicé como ingeniero de desarrollo y diseño, me brindaron un gran acercamiento al proceso de diseño y manufactura de chips que contienen SQUID D.C., específicamente, arreglos de SQUID de corriente directa para usarse como preamplificadores.

Durante el tiempo que colaboré con el instituto, las bases adquiridas en la Facultad de Ingeniería, así como los nuevos conocimientos adquiridos en un semestre de movilidad, me permitieron entender los retos de la microfabricación y de la fabricación de estructuras a escalas menores a  $10\ \mu\text{m}$  en la industria de dispositivos electrónicos superconductores. Así mismo, adquirí experiencia para el diseño, simulación, validación y manufactura de dispositivos usando técnicas de fotolitografía. También tuve un acercamiento con el proceso creativo para llevar parámetros y resultados obtenidos de ecuaciones o estimaciones a un diseño y una geometría tangibles.

Los conocimientos y valores adquiridos a lo largo de mis estudios de licenciatura en la carrera de Ingeniería Eléctrica-Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM fueron determinantes para desempeñar con éxito las mis actividades profesionales en el instituto de manera profesional, ética y multidisciplinaria.

### 6.1. Comentario final

En cuanto al cumplimiento del objetivo que se me impuso, considero que los resultados alcanzados con los prototipos desarrollados son un gran primer paso en la búsqueda de un mejor preamplificador para la lectura de SQUID de corriente directa. A pesar de que no se midieron los prototipos fabricados en los lotes 2 y 3, el esfuerzo produjo resultados que indican, en base a simulaciones que el preamplificador si puede ser mejorado y que la geometría propuesta permite una mejor transmisión de señales desde el amplificador de entrada hasta cada SQUID que compone al preamplificador. Espero que en un futuro cercano, mi trabajo sea retomado y alguien se de a la tarea de caracterizar los 4 chips que se encuentran

almacenados en el instituto y éstos permitan a la nueva persona encontrar nuevas áreas de oportunidad para mejorar aún más la geometría y el diseño que yo propuse, así como optimizar únicamente el valor de corriente crítica del SQUID para tener un preamplificador optimizado para lectura de otros chips.

Igualmente, considero que el conocimiento de los límites de fabricación que encontré mediante la experimentación con patrones, geometrías y parámetros diferentes, es una oportunidad para mejorar diseños de otros chips ya existentes y que son propiedad del instituto, permitiendo a los diseñadores no ser conservadores en cuanto a limitar sus diseño a estructuras muy grandes o alejadas (donde se pierde acoplamiento entre bobinas por ejemplo) por temor a que las estructuras no sean manufacturadas con la calidad suficiente para fabricarlos de forma repetible.



## Apéndice A

# Disposición de los elementos del chip que contiene al preamplificador

El diseño cumple con las especificaciones de que el chip debe medir  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$  y en el interior debe haber 8 *arrays* de SQUID que conforman un preamplificador cada uno. Dichos requisitos son necesarios por redundancia, debido a que durante el proceso de fabricación, pueden presentarse defectos de fabricación debido a impurezas en los materiales o fenómenos aleatorios como la caída de partículas de polvo sobre el chip o la aparición de burbujas en la fotorresistencia durante el proceso de revelado. A continuación en la Figura A.1 se muestra el primer prototipo del chip preamplificador, mientras que en la Figura A.2 se muestra un esquema de la composición del chip.



Figura A.1 Fotografía comparativa entre las dimensiones de un chip y un clip de papel.

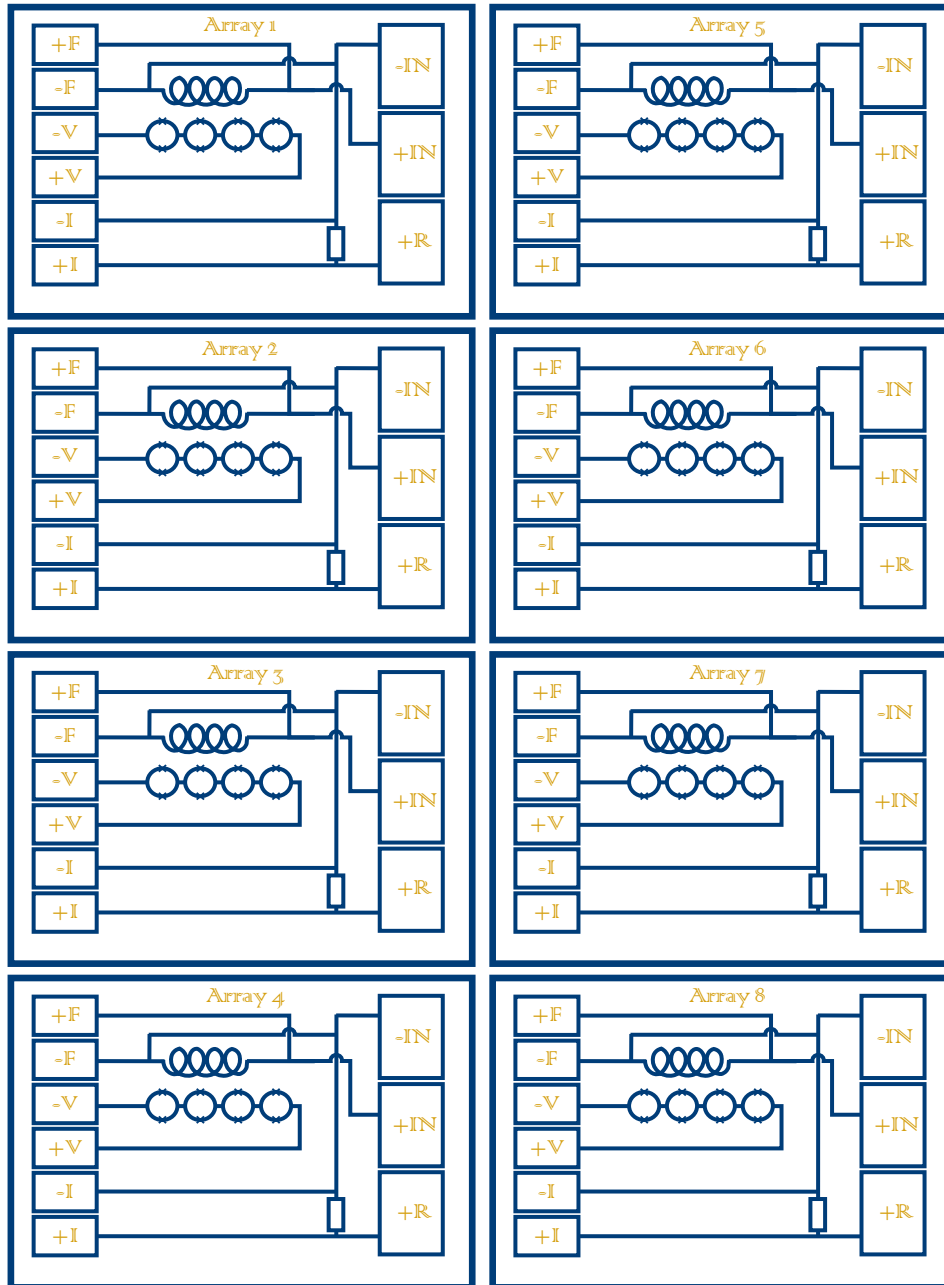


Figura A.2 Disposición de los elementos que conforman un chip.

# Referencias

- [Abrikosov, 1957] Abrikosov, A. A. (1957). Vortices in type-II superconductors. *Soviet Physics JETP*, 5(6), 1174–1182. (Citado en página 8.)
- [Bardeen, *et al.*, 1957] Bardeen, J., Cooper, L. N., & Schrieffer, J. R. (1957). Theory of superconductivity. *Physical Review*, 108(5), 1175–1204, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.108.1175>, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.108.1175>. (Citado en página 7.)
- [Barone y Paternò, 1982] Barone, A. & Paternò, G. (1982). *Front Matter*. John Wiley & Sons, Ltd <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/352760278X.fmatter>. (Citado en página 24.)
- [Bauer, 2022] Bauer, F. (2022). *Rauscharme Stromsensor-dc-SQUIDs mit Impedanzenanpassung für metallische magnetische Kalorimeter*. PhD thesis, Universität Heidelberg. (Citado en página 28.)
- [Buckel y Kleiner, 2013] Buckel, W. & Kleiner, R. (2013). *Supraleitung: Grundlagen und Anwendungen*. John Wiley and Sons. (Citado en páginas 3, 7 y 16.)
- [Campbel, *et al.*, 1975] Campbel, W., Zimmerman, J., & Zimmerman, E. (1975). Tests of cryogenic squid for geomagnetic field measurements. *Geophysics*, 40, 269–284, <https://doi.org/7>. (Citado en página 16.)
- [Clarke y Braginski, 2004] Clarke, J. & Braginski, A. I. (2004). *The SQUID Handbook: Fundamentals and Technology of SQUIDs and SQUID Systems*. Wiley-VCH. (Citado en páginas 2, 20, 21 y 29.)
- [Cohen, *et al.*, 1970] Cohen, D., Edelsack, E., & Zimmerman, E. (1970). Magnetocardiograms taken inside a shielded room with a superconducting point-contact magnetometer. *Applied Physics Letters*, 16, 278–280, <https://doi.org/7>. (Citado en página 16.)
- [Enss, 2010] Enss, C., Ed. (2010). *Cryogenic Particle Detection*. Springer. (Citado en página 16.)
- [Fourie, *et al.*, 2011] Fourie, C., Wetzstein, O., Ortlepp, T., & Kunert, J. (2011). Three-dimensional multi-terminal superconductive integrated circuit inductance extraction. *Superconductor Science and Technology*, 24, 125015, <https://doi.org/10.1088/0953-2048/24/12/125015>. (Citado en página 24.)
- [Galeazzi, *et al.*, 2012] Galeazzi, M., Gatti, F., Lusignoli, M., Nucciotti, A., Ragazzi, S., & Ribeiro Gomes, M. (2012). The electron capture decay of  $^{163}\text{Ho}$  to measure the electron neutrino mass with sub-eV accuracy (and beyond). (Citado en página 16.)
- [Garcia, 2020] Garcia, M. (2020). Design and implementation of a hardware-oriented fpga-based cryptocurrency miner. Bachelor's thesis <https://zaguan.unizar.es/record/97862/files/TAZ-TFG-2020-3658.pdf>. (Citado en página 13.)
- [Gross y Marx, 2005] Gross, R. & Marx, A. (2005). Applied superconductivity: Josephson effect and superconducting electronics. In *Word Sense Disambiguation: Algorithms and Applications*. Walther-Meißner-Strasse 8 D-85748 Garching, Germany: Walther-Meißner-Institut Bayerische Akademie der Wissenschaften and Lehrstuhl für Technische Physik (E23) Technische Universität München. (Citado en páginas 12 y 14.)

- [Hassel y Blaum, 2018] Hassel, C. & Blaum, K. t. (2018). The electron capture in 163ho experiment-echo. *The European Physical Journal C*, 78(10), 1–11. (Citado en página 2.)
- [H.K. Onnes, 1911] H.K. Onnes (1911). Comm. leiden. [Online; accessed February, 2023] <http://smirc.stanford.edu/papers/JSSC99OCT-mohan.pdf>. (Citado en páginas 3 y 4.)
- [Jaeger y Blalock, 2010] Jaeger, R. C. & Blalock, T. N. (2010). *Microelectronic Circuit Design*. McGraw-Hill, 4 edition. (Citado en página 25.)
- [Kempf, *et al.*, 2015] Kempf, S., Ferring, A., Fleischmann, A., & Enss, C. (2015). Direct-current superconducting quantum interference devices for the readout of metallic magnetic calorimeters. *Superconductor Science and Technology*, 28. (Citado en página 1.)
- [Köfferlein, 2023] Köfferlein, M. (2023). *KLayout 0.28.9 Documentation*. System manual, KLayout. Edition 09/2022. (Citado en página 23.)
- [London y London, 1935] London, F. & London, H. (1935). The electromagnetic equations of the supraconductor. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 149(866), 71–88, <https://doi.org/10.1098/rspa.1935.0083> <https://doi.org/10.1098/rspa.1935.0083>. (Citado en página 5.)
- [Madou, 2011] Madou, M. J. (2011). *Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization*. CRC Press, 2 edition. (Citado en página 25.)
- [McCumber, 1968] McCumber, D. E. (1968). Effect of ac impedance on dc voltage-current characteristics of superconductor weak-link junctions. *Journal of Applied Physics*, 39, 3113–3118. (Citado en página 11.)
- [Meissner y Ochsenfeld, 1933] Meissner, W. & Ochsenfeld, R. (1933). Ein neuer effekt bei eintritt der supraleitfähigkeit. *Naturwissenschaften*, 21, 787–788, <https://doi.org/10.1007/BF01504252> <https://doi.org/10.1007/BF01504252>. (Citado en página 5.)
- [Microchemicals, 2022] Microchemicals (2022). *Products section*. Manual, Microchemicals GmBh. Edition 09/2022. (Citado en página 37.)
- [Mohan y Sharma, 1999] Mohan, P. & Sharma, R. (1999). Simple accurate expressions for planar spiral inductances. *Journal of Solid-State Circuits*, 34(10), 1419–1424 <http://smirc.stanford.edu/papers/JSSC99OCT-mohan.pdf>. (Citado en página 27.)
- [Pines, 2007] Pines, D. (2007). David pines. *Nature*, 450, xv, <https://doi.org/10.1038/7173xiiiia> <https://doi.org/10.1038/7173xiiiia>. (Citado en página 1.)
- [Polyakov, *et al.*, 2007] Polyakov, Y., Narayana, S., & Semenov, V. K. (2007). Flux trapping in superconducting circuits. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 17(2), 520–525, <https://doi.org/10.1109/TASC.2007.898707>. (Citado en página 19.)
- [Proudfoot, *et al.*, 2014] Proudfoot, M., Woolrich, M. W., Nobre, A. C., & Turner, M. R. (2014). Magnetoencephalography. *Practical Neurology*, 14(5), 383–388, <https://doi.org/10.1136/practneurol-2013-000768>. (Citado en página 19.)
- [Schmidt, *et al.*, 1995] Schmidt, M. A., Allen, R., Hirlimann, C., & Patel, R. (1995). Laser microfabrication in microelectronics and photonics. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 31(12), 2197–2206. (Citado en página 25.)
- [Scott, 1970] Scott, W. C. (1970). Hysteresis in the dc switching characteristics of josephson junctions. *Applied Physics Letters*, 17, 166–169. (Citado en página 11.)
- [Snider, *et al.*, 2020] Snider, E., Dasenbrock-Gammon, N., McBride, R., Debessai, M., & Dias, R. P. (2020). Room-temperature superconductivity in a carbonaceous sulfur hydride. *Nature*, 586(7827), 373–377. (Citado en página 3.)

- [STAR-Cryoelectronics, 2000] STAR-Cryoelectronics (2000). *Mr. SQUID User's Guide*. System manual, STAR Cryoelectronics, LLC. (Citado en página 9.)
- [SUN-Magnetics, 2023] SUN-Magnetics (2023). *InductEx 7.0 User Manual*. System manual, SUN Magnetics. Edition 09/2022. (Citado en página 24.)
- [Sze y Ng, 2006] Sze, S. M. & Ng, K. K. (2006). *Physics of semiconductor devices*. John Wiley and Sons. (Citado en página 25.)
- [Tinkham, 1996] Tinkham, M. (1996). *Introduction to Superconductivity*. Dover Publications. (Citado en páginas 3, 5, 7, 8, 9 y 10.)
- [Wolf, *et al.*, 2017] Wolf, E., Arnold, G., Gurtvith, M., & Zasadzinski, J., Eds. (2017). *Josephson Junctions: History, Devices, and Applications*. Pan Stanford Publishing. (Citado en páginas 29 y 31.)