Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Revisión de los modelos teóricos de la superconductividad

Review of the theoretical models of superconductivity

Juárez-López, J.M.[a], Ponomaryova, I.[b], Castillo-Hernández, G.[c], Romero-Sánchez, M.G.[a], De Moure-Flores, F.J.[a]

[a] Facultad de Química, Materiales-Energía; Universidad Autónoma de Querétaro; C.P. 76010, Querétaro.
[b] Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Culhuacan; Instituto Politécnico Nacional; C.P. 04430, Ciudad de México.
[c] Instituto de Investigación de Materiales; Centro Aeroespacial Alemán; C.P. 51147, Colonia, Alemania.
manueljmjl07@gmail.com; iponomaryova@ipn.mx; gustavo.castillo-hernandez@dlr.de; may_230192@hotmail.com; fcomoure@hotmail.com

Innovación tecnológica: Unificación de teorías de la superconductividad para el análisis de materiales superconductores.

Área de aplicación industrial: Físico – Química, Ingeniería, Ciencia de los materiales y Energía.

Enviado: 04 septiembre 2020
Aceptado: 18 noviembre 2020

Abstract

Superconducting compounds are advanced materials that have revolutionized the last decades due to their applications in electrical and electronic devices, mainly in the railway transport sector. Currently, work is continuing to obtain superconducting compounds that present diamagnetism and zero electrical resistance at a high critical temperature HT_c, close to ambient temperature. The developments and innovations in these materials have been based on the theoretical models that describe the behavior of superconductivity. One of these theoretical models is from the London brothers, which is obtained through the physical analysis of the interaction of an external magnetic field with a superconductor. This allows the formation of currents and surface magnetic fields in the superconductor, through the Maxwell equations. Next, the Ginzburg - Landau methodology is based on the London theory and mentions that each superconductor has its electromagnetic properties defined from the interaction energy of the negative charge carriers and the characteristic penetration length of the external magnetic field that a superconductor manifests. These parameters are important as they allow delimiting the state of superconductivity through its critical field H_c,

characteristic of the superconductor, making it possible to classify the materials. In addition to this, Fröhlich's methodology collaborates with the stipulation that electrons can move in the crystalline structure attracting positive ions at low temperature allowing an interaction with phonons. The above, provided information for the study by J. Bardeen, LN Cooper and JR Schrieffer, establishing that the phonon-electron energetic interaction exists inside the crystal lattice of superconductors, forming supercurrents that in turn form a magnetic field opposite to that applied. Therefore, the objective of this work is to analyze and discuss the compendium of materials theory models that highlight the effects of superconductivity.

Key Words: superconductivity, superconductors, energy, electromagnetic fields, theories.

Resumen

Los superconductores son materiales avanzados que han revolucionado las últimas décadas debido a sus aplicaciones en dispositivos eléctricos y electrónicos, principalmente en el sector de transporte ferroviario. En la actualidad se sigue trabajando en la obtención de compuestos superconductores que presenten diamagnetismo y una resistencia eléctrica nula a una temperatura critica alta HT_c, cercana a la temperatura ambientes. Los desarrollos e innovaciones en estos materiales se han basado en los modelos teóricos que describen el comportamiento de la superconductividad. Uno de estos modelos teórico es de los hermanos London, el cual se obtiene a través del análisis físico de la interacción de un campo magnético externo con un superconductor. Lo cual permite la formación de corrientes y campos magnéticos superficiales en el superconductor, a través de las ecuaciones de Maxwell. Seguidamente, la metodología de Ginzburg – Landau se basa en la teoría London y menciona que cada superconductor tiene sus propiedades electromagnéticas definidas a partir de la energía de interacción de los portadores de carga negativa (electrones) y la longitud característica de penetración del campo magnético externo que manifiesta un superconductor. Estos parámetros son importantes ya que permiten delimitar el estado de superconductividad a través de su campo critico H_c característico de cada material, haciendo posible el clasificar a los superconductores. Aunado a esto, la metodología de Fröhlich colabora con el estipulado de que los electrones se pueden mover en la estructura cristalina atrayendo iones positivos a baja temperatura permitiendo una interacción de fonones. Lo anterior, proporcionó información para el estudio por parte de J. Bardeen, L. N. Cooper y J. R. Schrieffer, estableciendo que existe la interacción energética fonón-electrón en el interior de la red cristalina en los superconductores. Lo cual a su vez forma supercorrientes que generan un campo magnético opuesto al aplicado. Por lo cual el objetivo de este trabajo es analizar y discutir el compendio de los modelos de las teorías de los materiales que destacan los efectos de la superconductividad.

Palabras Clave: superconductividad, superconductores, energía, campos electromagnéticos, teorías.

1. Introducción

Los conductores convencionales permiten un flujo de electrones a partir de la inducción de una diferencia de potencial. Sin embargo, el flujo de electrones interactúa con imperfecciones en la red cristalina del material, provocando colisiones con iones que tienen vibraciones fuera de su posición de equilibrio, ocasionando una resistencia al paso de los electrones. Al presentarse estas interacciones en el conductor, se propicia una

pérdida de energía en forma de calor que es directamente proporcional al incremento de la resistencia eléctrica del material. Al disminuir la temperatura del conductor eléctrico, se experimenta una disminución considerable en la resistencia eléctrica, teniendo el comportamiento similar al de un conductor perfecto [1]. Sin embargo, no se tiene actualmente un conductor perfecto con resistencia cero a temperatura ambiente.

A principios del siglo XX, se comenzó con el análisis de las propiedades eléctricas de los metales a bajas temperaturas. El primero en observar estos cambios en las propiedades eléctricas fue Kamerlingh Onnes, al experimentar la caída de la resistencia eléctrica en el mercurio a una temperatura de 4.2 K, obteniendo una resistencia mínima de ~10^{-5} Ohm, lo que conllevo al descubrimiento de la superconductividad [2–4]. Se denomina temperatura critica (T_c), a la temperatura a la cual ocurre la transición superconductora y su resistencia eléctrica cae a cero [5].

Es posible comparar la disminución de la resistencia eléctrica entre un conductor eléctrico convencional y un superconductor, en función de la temperatura. En la Figura 1 se muestra que un superconductor al llegar a una T_c tendrá un valor de resistencia eléctrica de cero Ohm. El material no superconductor, en contraste, no llegará a este valor, aunque se disminuya aún más el valor de la temperatura y este solamente llegará a un valor cercano a 0 K.

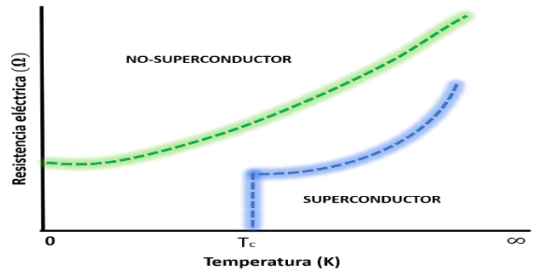


Figura 1. Comparación de la resistencia eléctrica de un no superconductor y superconductor con respecto al cambio en la temperatura.

En el año 1933 Walther Meissner y Robert Oschenfeld llevaron a cabo experimentos en materiales superconductores. Ellos descubrieron que al aplicar campos magnéticos a una T_c, no se formaban campos magnéticos en el interior del superconductor y que el campo magnético no entraba a su interior; a este efecto en los superconductores se le llamo efecto Meissner-Oschenfeld [6–9].

2. Metodologías de la superconductividad

Diversos científicos han desarrollado teorías que explican el fenómeno de la superconductividad y como aprovechar sus propiedades para futuras aplicaciones energéticas, inclusive para el desarrollo de nuevos superconductores.

2.1 Teoría de Fritz y Heinz London

Esta teoría menciona que a partir de la interacción de un superconductor con un campo magnético externo se formarán corrientes superficiales por una cantidad finita de portadores de carga libres por unidad de volumen (n_s). Estas se convierten en supercorrientes debido a que no hay resistencia eléctrica en el material, generando un campo magnético superficial y opuesto al de la interacción inicial; obteniendo un estado diamagnético en el interior del superconductor. Sin embargo, estas supercorrientes y campos magnéticos superficiales solo existirán en un determinado espesor. De tal manera que, al incrementar el campo magnético hacia el superconductor se incrementara la longitud de penetración (λ_L) de las líneas del campo magnético, rompiendo el estado superconductor [10,11].

La obtención de λ_L del campo magnético es a partir de la teoría London, y se determina a partir de la segunda ley de Newton y las

ecuaciones de Maxwell. Si se hace una analogía a partir de la fuerza en función de la masa y la aceleración Ec. (1), con respecto a la fuerza eléctrica Ec. (2).

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad \textbf{(Ec. 1)}$$

$$\vec{F} = q\vec{E} = m\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \quad \textbf{(Ec. 2)}$$

Si consideramos que el campo eléctrico en la Ec. (3).

$$\vec{E} = \Lambda \vec{J} \quad \textbf{(Ec. 3)}$$

Donde $\Lambda = \frac{m}{n_s q^2}$ y m es la masa de los portadores de carga, se desarrolla la Ec. (4).

$$\vec{E} = \frac{m}{n_s q^2}\frac{\partial \vec{J}}{\partial t} \quad \textbf{(Ec. 4)}$$

Desarrollando un análisis de los rotacionales en ambos lados de la igualdad obtenemos la Ec. (5).

$$\nabla \text{ x } \vec{E} = \frac{m}{n_s q^2}\nabla \text{ x}\frac{\partial \vec{J}}{\partial t} \quad \textbf{(Ec. 5)}$$

Aplicando la igualdad con la Ley de Faraday Ec. (6) de la ecuación de Maxwell, se obtiene la Ec. (7). Permitiendo determinar la Ec. (8).

$$\nabla\, x\, \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \textbf{(Ec. 6)}$$

$$\frac{m}{n_s q^2}\nabla \text{ x}\frac{\partial \vec{J}}{\partial t} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \textbf{(Ec. 7)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{m}{n_s q^2}\nabla \text{ x}\,\vec{J} + \vec{B}\right) = 0 \quad \textbf{(Ec. 8)}$$

Considerando que el campo magnético y el flujo eléctrico en el interior son cero, es posible aplicar la Ley de Ampere y la Ley de Gauss para el campo magnético en la Ec. (9) y Ec. (10) respectivamente.

$$\nabla\, x\, \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad \textbf{(Ec. 9)}$$

$$\nabla^2 \cdot \vec{B} = 0 \quad \textbf{(Ec. 10)}$$

Y remplazando ambas ecuaciones dentro la Ec. (8), se obtiene la Ec. (11).

$$-\frac{m}{\mu_0 n_s q^2}\nabla^2 \vec{B} + \vec{B} = 0 \quad \textbf{(Ec. 11)}$$

En esta teoría se indica que la λ_L es dependiente de n_s en estado de superconductividad, como se define en la Ec. (12).

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{m}{\mu_0 n_s q^2}} \quad \textbf{(Ec. 12)}$$

Sustituyendo a λ_L en la Ec. (11), obtenemos la ecuación de la teoría de London Ec. (13), que explica la formación de un campo magnético en la superficie a partir de supercorrientes superficiales que están limitas por λ_L al aplicar un campo magnético al superconductor.

$$\nabla^2 \vec{B} = \frac{\vec{B}}{\lambda_L^2} \quad \textbf{(Ec. 13)}$$

No obstante, esta teoría no explica totalmente el comportamiento de los superconductores.

2.2 Teoría de Ginzburg – Landau

La teoría de Ginzburg – Landau toma como base a la teoría de los hermanos London, agregando la relación de las propiedades de interacción electromagnéticas de un superconductor con respecto a la T_c a partir de la densidad finita de portadores de carga en estado superconductor n_s en forma de función de onda compleja de energía libre en el material $\psi = |\psi|e^{i\phi}$ con modulo $|\psi|$ y en fase ϕ considerando a $|\psi|^2 = n_s$. Considerando la capacidad de generar supercorrientes a partir de la disminución de la temperatura ambiente hasta llegar a la T_c [12,13].

Esta teoría menciona que cada superconductor tiene sus propiedades eléctricas y magnéticas caracterizadas a partir de dos magnitudes, la longitud de coherencia, que es la longitud de interacción entre los portadores carga característica de cada superconductor (ξ) Ec. (14) y la longitud de penetración del campo magnético aplicado (λ) Ec. (15) [14]. Esto se debe, a que a partir de la magnitud del campo magnético aplicado en el superconductor, este puede o no penetrar uniformemente en el material debido a la presencia de imperfecciones estructurales en el mismo, obteniendo una mezcla de regiones normales y superconductoras [15].

$$\xi = \sqrt{\frac{\hbar^2}{2m^*\alpha}} \qquad \textbf{(Ec. 14)}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{m^*}{4\mu_0 q^2 \psi_0^2}} \qquad \textbf{(Ec. 15)}$$

En ξ y λ, (ħ) es constante de Dirac, (m^*) es la masa efectiva y (μ_0) es la permeabilidad magnética en el vacío.

A partir de los valores de ξ y λ es posible obtener el parámetro de Ginzburg – Landau κ Ec. (16). Este valor clasifica a los tipos de superconductores a partir de su reacción con la interacción de un campo magnético hasta llegar a la magnitud de su propio campo critico (H_c) en donde se pierde el estado superconductor Ec. (17) [11,14,16,17].

$$\kappa = \xi/\lambda \qquad \textbf{(Ec. 16)}$$

$$\kappa = 1/\sqrt{2} \qquad \textbf{(Ec. 17)}$$

Si el valor de $\kappa < 1/\sqrt{2}$ en el superconductor analizado, se clasifica a este como superconductor tipo I, y si el valor de $\kappa > 1/\sqrt{2}$ se le clasifica como superconductor tipo II [14]. La relación de ξ con respecto a λ se observa en la Figura 2 para los tipos de superconductores.

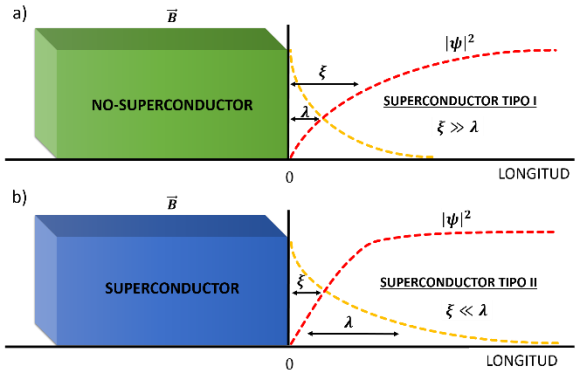


Figura 2. Clasificación de los superconductores a partir del incremento de $|\psi|^2$ y la disminución del $\vec{B}$ en una longitud desde superficie del superconductor. a) Comportamiento físico del superconductor tipo I. b) Comportamiento físico del superconductor tipo II.

2.2.1 Tipos De Superconductores

Los superconductores tipo I exhiben un diamagnetismo perfecto antes de llegar al valor de su propio H_c. Al superar su H_c el material pierde su estado de superconductor transitando al estado normal o no superconductor como se ve en la Figura 3a.

Los superconductores tipo II presentan dos comportamientos diferentes a partir de la aplicación de H_c. El primero es el H_{c1} en el cual se presenta el efecto Meissner. El segundo es el H_{c2} en el cual se pierde el estado superconductor en el material, por lo cual el $H_{c2} > H_{c1}$ como se observa en la Figura 3b. En la Figura 4, se observa que el H_c que soporta un superconductor, también está en función de la temperatura. En el intervalo entre H_{c1} y H_{c2} la magnetización del superconductor disminuye con respecto al incremento del campo magnético externo aplicado y se denomina estado de Shubnikov o mixto [18–21].

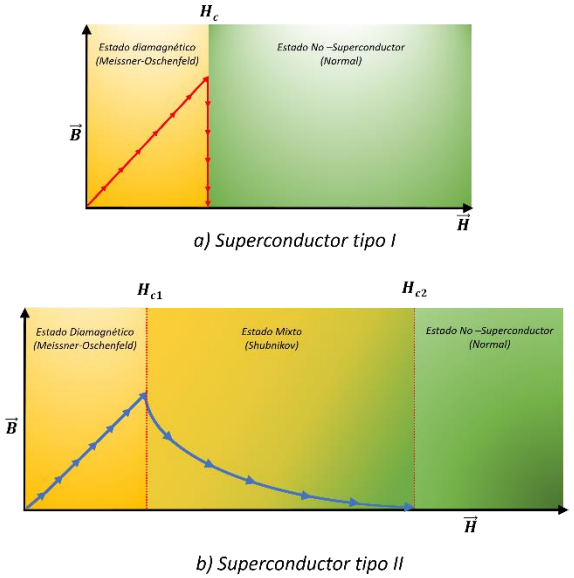


Figura 3. Curvas de los estados en los superconductores Tipo I y Tipo II respecto al incremento del campo magnético externo aplicado vs su campo crítico generado H_c.

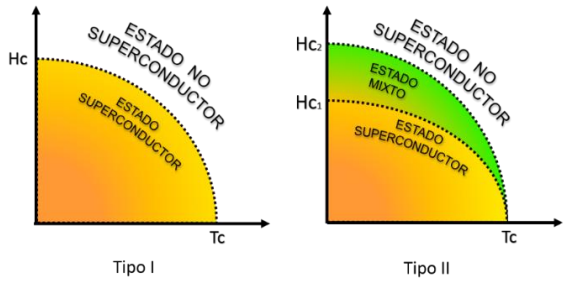


Figura 4. Curvas de los estados en los superconductores Tipo I y Tipo II a partir del incremento del campo magnético externo aplicado H_{c1}, H_{c2} vs T_c.

En la transición del H_{c1} y H_{c2} del estado mixto, se demostró por Abrikosov, que a partir del incremento del campo magnético aplicado se forman vórtices de supercorrientes circulares, debido a que el campo magnético penetra en forma de columnas cilíndricas, generado confinamientos de flujo como se observa en la Figura 5 [22]. El valor de este confinamiento está dado por la Ec. (18), que es la cantidad mínima de un cuanto de flujo necesario para la formación de un vórtice dentro del estado mixto del superconductor.

$$\Phi_0 = \frac{\hbar}{2e} = 2.0678\, x\, 10^{-15} Wb \qquad \textbf{(Ec. 18)}$$

A partir de este valor es posible obtener los H_c de los superconductores tipo II con las ecuaciones Ec. (19) y Ec. (20) [17].

$$H_{c1} = \frac{\Phi_0 \ln \kappa}{4\pi\mu_0 \lambda^2} \qquad \textbf{(Ec. 19)}$$

$$H_{c2} = \frac{\Phi_0}{2\pi\mu_0 \xi^2} \qquad \textbf{(Ec. 20)}$$

El efecto de la superconductividad se fundamenta en las interacciones fonón-electrón en la red cristalina a bajas temperaturas, disminuyendo las vibraciones de los átomos ocasionando una reducción de la resistencia eléctrica en los superconductores (~0 Ohm), permitiendo un libre tránsito de flujo de portadores, además de crear un estado diamagnético [23,24].

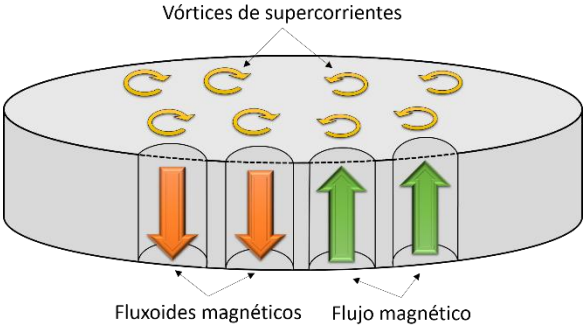


Figura 5. Generación de vórtices en los superconductores.

2.3 Teoría BCS

Fröhlich menciona en su trabajo de 1950, que el portador de carga negativa de un superconductor a T_c, tiene la capacidad de desplazarse por la red cristalina, con tendencia a atraer a los iones positivos de la red. Este produce, que a su alrededor se genera una aglomeración de iones positivos, alterando la densidad de cargas positivas en la red, ocasionando la interacción de un fonón; y que, al posicionarse en su cercanía otro portador de carga negativa, este sería atraído

por las interacciones de cargas positivas, de modo que los portadores de carga negativa están interrelacionados con el fonón en la red cristalina como se observa en la Figura 6 [25].

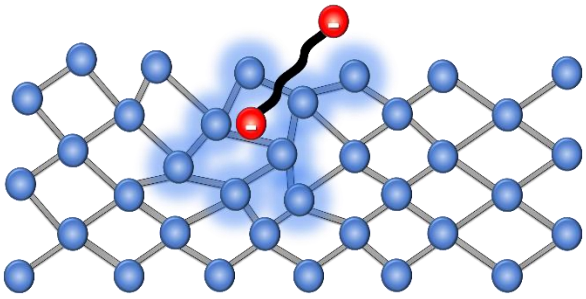


Figura 6. Interacción de los electrones - fonón en la red cristalina de iones positivos (esferas azules) a T_c.

A partir de esta idealización y las teorías anteriores, el equipo conformado por J. Bardeen, L. N. Cooper y J. R. Schrieffer presentaron su teoría de superconductividad.

Esta teoría considera que un par de electrones cercanos al nivel de Fermi, están en movimiento y que, al tener una interacción con un fonón, se supera el estado de repulsión Coulombiana, permitiendo la ligadura de estos electrones. Esta interacción ocasiona un estado de relación de momentos de igual magnitud y opuestos entre sí ($\overrightarrow{k_1} = -\overrightarrow{k_2}$), así como sus espines que de igual manera son opuestos $(k\uparrow, -k\downarrow)$, denominando a este conjunto como par de Cooper como se muestra en la Figura 7 [26].

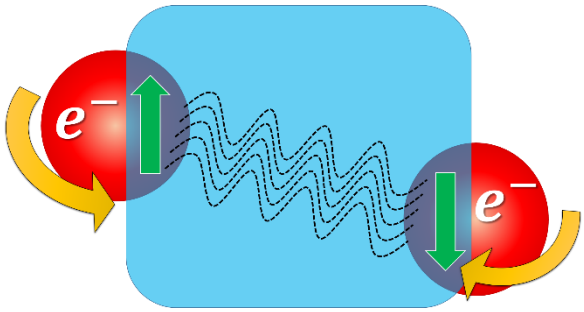


Figura 7. Interacción de electrones con espines invertidos con un fonón.

Un par de Cooper a T_c en un superconductor convencional, se comporta como bosón [27–31], ya que la interacción de los dos electrones unidos por un fonón interactúa como una partícula con espín cero. Esto posibilita a que los electrones que conforman los pares de Cooper, estén en el mismo estado energético, sin seguir el principio de exclusión de Paulli [11,32].

El comportamiento de los pares de Cooper se describe como una función de onda macroscópica en donde se mantiene una coherencia de fase con una distancia con el valor de la longitud de coherencia intrínseca (ξ_0), que es la distancia entre los pares de Cooper. Además, las funciones de onda de los pares de Cooper a T_c, son causas de un defecto colectivo debido a la baja velocidad a la que se desplazan los iones positivos, permitiendo que las funciones de onda se solapen entre sí, formando una coherencia de estado como se observa en la Figura 8.

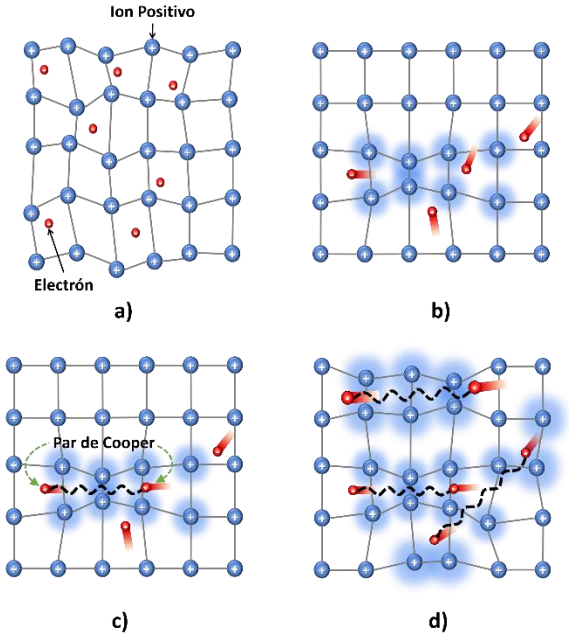


Figura 8. Movimiento electrónico a) Desplazamiento de electrones a temperatura ambiente. b) Formación de la región de carga positiva e interacción de electrones. c) Formación del par de Cooper. d) Interacción de pares de Cooper.

En la teoría BCS, se establece la función de los estados excitados (E_κ) descrita en la Ec. (21) siendo (Δ) el ancho de banda prohibida del superconductor y (ϵ_κ) descrita en la Ec. (22) la energía cinética medida con respecto a E_F.

$$E_\kappa = \sqrt{\Delta^2 + \epsilon_\kappa^2} \quad \textbf{(Ec. 21)}$$

$$\epsilon_\kappa = \frac{\hbar^2 \kappa^2}{2m^*} - E_F \quad \textbf{(Ec. 22)}$$

La energía del sistema se reduce al generarse los pares de Cooper, a una magnitud igual a la energía de enlace entre los electrones (2Δ), que a su vez es el valor de la energía necesaria para estar en el primer estado de excitación del sistema.

La densidad de los estados electrónicos en los superconductores $N_s(E_\kappa)$ determina la formación del par de Cooper y la densidad de los estados electrónicos en la fase no superconductora $N_n(\epsilon_\kappa)$ que es cuando se disocia un par de Cooper, se obtiene a partir de Ec. (23) [26].

$$\frac{dN_s(E_\kappa)}{dE_\kappa} = \frac{dN_n(\epsilon_\kappa)}{d\epsilon_\kappa}\left(\frac{d\epsilon_\kappa}{dE_\kappa}\right) \quad \textbf{(Ec. 23)}$$

Al considerar a la energía de Fermi como referencia, y con valores de $\epsilon_\kappa \to 0$, se considera que $N_n(\epsilon_\kappa)$ es constante e igual a $N_n(E_F = 0)$, se obtiene el análisis de la Ec. (24).

$$\frac{N_s(E_\kappa)}{N_n(0)} = \begin{cases} 0 & E_\kappa < \Delta \\ \dfrac{E_\kappa}{\sqrt{E_\kappa^2 - \Delta^2}} & E_\kappa > \Delta \end{cases} \quad \textbf{(Ec. 24)}$$

En 1959, L. P. Gor´kov logro unificar las teorías BCS con la de Ginzburg – Landau, señalando que un superconductor a una T≈T_c, la función de onda compleja ψ de Ginzburg – Landau es la función de los pares de Cooper y es directamente proporcional al ancho de banda prohibida Δ en estado superconductor de BCS [33]. Obteniendo las ecuaciones de las longitudes de penetración, que se muestra en Ec. (25) y coherencia en la Ec. (26) a partir de la temperatura, donde ξ_0 y λ_0 son los valores de la longitud de coherencia y penetración del campo magnético en T=0 K y un valor de $T_c \approx$ T. Se consideran estas temperaturas, debido a la relación que existe del valor de la densidad de corriente eléctrica en estas temperaturas, obtenida por Barden, Cooper y Schrieffer [26] en el análisis teórico y experimental que realizan y se compara con el de Faber [34].

$$\xi(T) = 0.74\xi_0\sqrt{\frac{T_c}{T_c - T}} \quad \textbf{(Ec. 25)}$$

$$\lambda(T) = \frac{\lambda_0}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{T_c}{T_c - T}} \quad \textbf{(Ec. 26)}$$

Sin embargo, estas teorías no explican el comportamiento en todos los superconductores de alta T_c [35,36]. En específico con los materiales a base de cupratos [37], debido a la interacción electrónica que se presenta en su celda unitaria, originado por la cantidad de planos cobre – oxígeno en su interior. Permitiendo desarrollar nuevas teorías que unifiquen los comportamientos físicos para todos los superconductores.

3. Superconductores de alta temperatura critica (HT_c)

Como se mencionó anteriormente, existen dos tipos de superconductores del tipo I que están conformados por elementos puros, y alcanza el estado superconductor en el intervalo de $T_c = [\sim 0.01\,K \to 15\,K]$, y su estado de superconductividad está limitado por su H_c [1]. Sin embargo, los superconductores del tipo II, manifiestan el estado de superconductividad desde valores de $T_c = 0.63\,K$ [38], llegando hasta valores de $T_c = \sim 250\,K$ [17,39]. Dichos superconductores tienen la capacidad de

soportar campos magnéticos de mayor magnitud en comparación con los superconductores del tipo I [5,40,41].

En las últimas décadas, se han desarrollado nuevos materiales compuestos principalmente por cupratos, los cuales son combinaciones de óxido de cobre con otros elementos. Dichos compuestos permiten la formación de planos cristalinos CuO_2 [42], los cuales facilitan a los superconductores el alcanzar el estado superconductor a HT_c.

Se han realizado análisis para relacionar la cantidad de planos cristalinos CuO_2 con los valores más altos obtenidos de la T_c en los superconductores de HT_c [43].

Entre los cuales destacan los superconductores YBaCuO, BiSrCaCuO y HgBaCaCuO por sus propiedades electromagnéticas y su HT_c, permitiendo utilizar medios más económicos para enfriarlos como el nitrógeno líquido [1,17,40,44–49]. No obstante, entre ellos se tienen diferencias muy significativas entre su T_c y H_c en estado superconductor como se observa en la tabla 1.

Tabla 1. Intervalos de temperatura critica (T_c) y campo critico (Hc) máximos reportadas de los superconductores [17,43].

Superconductor	T_c (K)	H_c (T)
YBaCuO	(81-108)	(0.007-674)
BiSrCaCuO	(84-135)	(0.007-542)
HgBaCaCuO	(95-164)	(0.005-1150)

4. Aplicaciones de los superconductores de HT_c

Los superconductores HT_c han demostrado buenas cualidades para su aplicación en el diseño y fabricación de dispositivos y maquinaria eléctrica [50–57]. Estos materiales se han utilizado para minimizar las pérdidas por resistencia eléctrica, lo que permite transportar altas densidades de corriente. Esta es una mejora muy importante en comparación con los materiales conductores tradicionales como el cobre, el aluminio o el acero. Aunque, el desarrollo de cintas o cables superconductores de HT_c es costoso, pero se compensa con la estabilidad energética de los sistemas de transmisión, ya que incrementa la capacidad energética [57]. Además, el uso de superconductores de HT_c en el sector energético, permite la formación de campos magnéticos intensos sin usar imanes permanentes o electroimanes robustos mediante el uso de bajas corrientes, lo que reduce los costos energéticos. Por ejemplo, Kouache, reporta resultados óptimos en relación costo-beneficio en el desarrollo de la propuesta de un sistema energético inteligente de generación distribuida y almacenamiento de energía magnética superconductora, incrementando la calidad de la energía y seguridad del sistema eléctrico [58]. También, las máquinas eléctricas equipadas con superconductores tienen tiempos de operación más largo, así como una vida útil más larga en comparación con las máquinas convencionales [59–63]. Ejemplos de aplicaciones de electroimanes superconductores se observan en el sistema de transporte de ferroviario por levitación magnética (MAGLEV) de Japón *Shinkansen*, Figura 9. Este sistema funciona a través del control automatizado que energiza electroimanes, rodamientos y motores conformados por superconductores permitiendo la levitación y empuje del tren en la dirección deseada a altas velocidades; aprovechando la ausencia de fricción que se ocasiona por los rozamientos mecánicos de los componentes de empuje [64–66].



Figura 9. Shinkansen en Japón.

El superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ en particular, se ha empleado para la construcción de dispositivos eléctricos y electrónicos más eficientes, reduciendo considerablemente su tamaño en comparación con los dispositivos convencionales; comprendiendo el desarrollo de generadores eléctricos y su uso en turbinas eólicas [67–69], sistemas de transmisión, potencia y ondulación de energía [50–54,57,61], componentes e instrumentos de transmisión de microondas [70], sistemas electromecánicos de asistencia de despegue y aterrizaje de aeronaves [71], desarrollo de dispositivos para vehículos de transporte [56,72,73] sistemas de refrigeración magnéticos [55], por decir algunos.

5. Conclusiones

El inicio del desarrollo de los superconductores comenzó con los trabajos de experimentación de Kamerlingh Onnes en la búsqueda de materiales sin resistencia eléctrica a partir del análisis del mercurio en condiciones de bajas temperaturas (~4 K), descubriendo así el primer superconductor. Sin embargo, no se comprendía a que se debía el efecto de la disminución de la resistencia eléctrica en estas condiciones, dando comienzo a las teorías de la superconductividad. El desarrollo de modelados teóricos que explican el efecto físico de la superconductividad, se necesita información de diversos ensayos con casi todos los materiales en su estado puro en condiciones de bajas temperaturas, asociando resultados desconocidos como los efectos del diamagnetismo en los superconductores.

Las hipótesis de las teorías de la superconductividad se fueron enriqueciendo gracias a métodos científicos de prueba y error, hasta conseguir descripciones de los resultados energéticos obtenidos en las pruebas; involucrando la mezcla e impurificación de los materiales, obteniendo una clasificación de los materiales superconductores a partir de sus parámetros energéticos.

Estas teorías apoyaron en la obtención de una gama de nuevos materiales superconductores con características novedosas, como tener el efecto de la superconductividad a HT_c, así como la formación de campos magnéticos intensos, capaces de utilizarse para optimizar sistemas y dispositivos electromecánicos en los sectores de transporte, energética, medicina, etc. Esto a través del análisis cuántico y electrónico, de los elementos químicos con los que se pueden obtener nuevos superconductores. No obstante, así como se sigue trabajando en la investigación y obtención de nuevos materiales superconductores, se deben de desarrollar modelos teóricos que logren explicar el comportamiento del efecto físico de la superconductividad.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del FONDO SECTORIAL CONACyT-SENER-SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA, CONACyT y al DAAD, así como a la Universidad Autónoma de Querétaro y al Instituto Politécnico Nacional por las facilidades brindadas para la realización de este trabajo. También, se agradece el apoyo otorgado de la Ing. Estefanía Roque Valencia

por su contribución en las ilustraciones de este trabajo.

7. Referencias

[1] Magaña Solís, L. F. 2013. *Los superconductores*. México. Fondo de Cultura Económica.

[2] Kamerlingh Onnes, H. “Further Experiments with Liquid Helium G. On the Electrical Resistance of Pure Metals Etc. VI. On the Sudden Change in the Rate at Which the Resistance of Mercury Disappears.” *KNAW, Proceedings*, Vol. 14, No. II, 1912, pp. 818–821.

[3] Delft, D. van. “History and Significance of the Discovery of Superconductivity by Kamerlingh Onnes in 1911.” *Physica C: Superconductivity*, Vol. 479, 2012, pp. 30–35. https://doi.org/10.1016/j.physc.2012.02.046.

[4] Zohuri, B. Chapter 1 - Cryogenic Technologies. In *Physics of Cryogenics*, Elsevier, 2018, pp. 1–51.

[5] Geballe, T. H., Hammond, R. H., and Wu, P. M. “What Tc Tells.” *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 514, 2015, pp. 9–16. https://doi.org/10.1016/j.physc.2015.02.009.

[6] Meissner, W., and Oschsenfeld, R. “Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit.” *Naturwissenschaften*, Vol. 21, No. 44, 1933, pp. 787–788. https://doi.org/10.1007/BF01504252.

[7] Li, M. S. “Paramagnetic Meissner Effect and Related Dynamical Phenomena.” *Physics Reports*, Vol. 376, No. 3, 2003, pp. 133–223. https://doi.org/10.1016/S0370-1573(02)00635-X.

[8] Li, S., Lan, F., Chen, S., Peng, D., Fang, Y., Wang, R.-S., Lou, H., Zhang, X., Zeng, Z., Chen, X.-J., Qian, D., and Zeng, Q. “Bulk Intrinsic Heterogeneity of Metallic Glasses Probed by Meissner Effect.” *Intermetallics*, Vol. 119, 2020, p. 106721. https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106721.

[9] Majewski, P. 2020.*Superconducting Materials*. Australia. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Elsevier.

[10] London, F., London, H., and Lindemann, F. A. “The Electromagnetic Equations of the Supraconductor.” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A - Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 149, No. 866, 1935, pp. 71–88. https://doi.org/10.1098/rspa.1935.0048.

[11] Adriaanse, J.-P. Chapter Nine - High-Tc Superconductors and Magnetic Electron Lenses. In *Advances in Imaging and Electron Physics*, Elsevier, 2019, pp. 215–338.

[12] Ginzburg, L. V. “Some Remarks Concerning the Macroscopic Theory of Supercondiuctivity.” *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, Vol. 3, No. 4, 1955, p. 593.

[13] Ginzburg, V. L. “Ferromagnetic Superconductors.” *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, Vol. 4, No. 2, 1957, p. 202.

[14] Ginzburg, V. L., and Landau, L. D. On the Theory of Superconductivity. In *On Superconductivity and Superfluidity: A Scientific Autobiography*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2009, pp. 113–137.

[15] Hummel, R. E. Electrical Conduction in Metals and Alloys. In *Electronic Properties of Materials*, Springer, New York, USA, 2011, pp. 79–114.

[16] Ginzburg, V. L. “On the Theory of Superconductivity.” *Il Nuovo Cimento (1955-1965)*, Vol. 2, No. 6, 1955, pp. 1234–1250. https://doi.org/10.1007/BF02731579.

[17] Poole, C. P., Prozorov, R., Farach, H. A., and Creswick, R. J. 9 - Type II Superconductivity. In *Superconductivity*, Elsevier, London, 2014, pp. 355–424.

[18] Ketterson, J. B. 2016. *The Physics of Solids*. Oxford, U. K. Oxford University Press.

[19] Luiz, A. M. *Superconductor*. Intech, United Kingdom, 2010.

[20] Rjabinin, J. N., and Shubnikow, L. W. “Magnetic Properties and Critical Currents of Supra-Conducting Alloys.” *Nature*, Vol. 135, No. 3415, 1935, pp. 581–582. https://doi.org/10.1038/135581a0.

[21] Shubnikov, L. “Destruction of Supraconductivity by Electric Current and Magnetic Field.” *Nature*, Vol. 138, No. 3491, 1936, pp. 545–546. https://doi.org/10.1038/138545b0.

[22] Abrikosov, A. A., Gorkov, L. P., and Dzyaloshinski, I. E. 2012. *Methods of Quantum Field Theory in Statistical Physics*. E.U.A., Dover Publications.

[23] Lazarides, N., and Tsironis, G. P. “Superconducting Metamaterials.” *Physics Reports*, Vol. 752, 2018, pp. 1–67. https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.06.005.

[24] Grigorishin, K. V. “The Role of Electron–Vibron Interaction and Local Pairing in Conductivity and Superconductivity of Alkali-Doped Fullerides.” *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 562, 2019, pp. 56–69. https://doi.org/10.1016/j.physc.2018.12.001.

[25] Fröhlich, H. “Theory of the Superconducting State. I. The Ground State at the Absolute Zero of Temperature.” *Physical Review*, Vol. 79, No. 5, 1950, pp. 845–856. https://doi.org/10.1103/PhysRev.79.845.

[26] Bardeen, J., Cooper, L. N., and Schrieffer, J. R. “Theory of Superconductivity.” *Physical Review*, Vol. 108, No. 5, 1957, pp. 1175–1204. https://doi.org/10.1103/PhysRev.108.1175.

[27] Blencowe, M. “Quantum Electromechanical Systems.” *Physics Reports*, Vol. 395, No. 3, 2004, pp. 159–222. https://doi.org/10.1016/j.physrep.2003.12.005.

[28] Dattagupta, S. “Generalized Spin-Boson Analysis of c-Axis Transport in Layered Superconductors.” *Chemical Physics*, Vol. 296, No. 2, 2004, pp. 267–272. https://doi.org/10.1016/j.chemphys.2003.10.005.

[29] Gabovich, A. M., Voitenko, A. I., and Ausloos, M. “Charge- and Spin-Density Waves in Existing Superconductors: Competition between Cooper Pairing and Peierls or Excitonic Instabilities.” *Physics Reports*, Vol. 367, No. 6, 2002, pp. 583–709. https://doi.org/10.1016/S0370-1573(02)00029-7.

[30] Heinrich, B. W., Pascual, J. I., and Franke, K. J. “Single Magnetic Adsorbates on S-Wave Superconductors.” *Progress in Surface Science*, Vol. 93, No. 1, 2018, pp. 1–19. https://doi.org/10.1016/j.progsurf.2018.01.001.

[31] Salas, P., Fortes, M., Solís, M. A., and Sevilla, F. J. “Specific Heat of Underdoped Cuprate Superconductors

from a Phenomenological Layered Boson–Fermion Model." *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 524, 2016, pp. 37–43. https://doi.org/10.1016/j.physc.2016.03.002.

[32] Wang, F., and Lee, D.-H. "The Electron-Pairing Mechanism of Iron-Based Superconductors." *Science*, Vol. 332, No. 6026, 2011, pp. 200–204. https://doi.org/10.1126/science.1200182.

[33] Gor'kov, L. P. "Microscopic Derivation of the Ginzburg-Landau Equations in the Theory of Superconductivity." *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, Vol. 36, No. 6, 1959, p. 1918.

[34] Faber, T. E., and Pippard, A. B. Chapter IX Kinetics of the Phase Transition in Superconductors. In *Progress in Low Temperature Physics*, Elsevier, 1955, pp. 159–183.

[35] Behnia, K. "The Fragility of Distant Cooper Pairs." *Science*, Vol. 355, No. 6320, 2017, pp. 26–27. https://doi.org/10.1126/science.aal2516.

[36] Prakash, O., Kumar, A., Thamizhavel, A., and Ramakrishnan, S. "Evidence for Bulk Superconductivity in Pure Bismuth Single Crystals at Ambient Pressure." *Science*, Vol. 355, No. 6320, 2017, pp. 52–55. https://doi.org/10.1126/science.aaf8227.

[37] Singh, N. "Leading Theories of the Cuprate Superconductivity: A Critique." *arXiv:2006.06335 [cond-mat]*, 2020.

[38] Assmus, W., Herrmann, M., Rauchschwalbe, U., Riegel, S., Lieke, W., Spille, H., Horn, S., Weber, G., Steglich, F., and Cordier, G. "Superconductivity in CeCu2Si2 Single Crystals." *Physical Review Letters*, Vol. 52, No. 6, 1984, pp. 469–472. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.52.469.

[39] Snider, E., Dasenbrock-Gammon, N., McBride, R., Debessai, M., Vindana, H., Vencatasamy, K., Lawler, K. V., Salamat, A., and Dias, R. P. "Room-Temperature Superconductivity in a Carbonaceous Sulfur Hydride." *Nature*, Vol. 586, No. 7829, 2020, pp. 373–377. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2801-z.

[40] Changkang, C. "Phase Diagram and Its Application to the Crystal Growth of High Tc Oxide Superconductors." *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, Vol. 36, No. 1, 1998, pp. 1–97. https://doi.org/10.1016/S0960-8974(98)00008-4.

[41] Waldram, J. R. 2017. *Superconductivity of Metals and Cuprates*. London, UK. CRC Press, pp. 1-410

[42] Poole, C. P., Prozorov, R., Farach, H. A., and Creswick, R. J. 16 - Cuprate High-Tc Superconductors. In *Superconductivity*, Elsevier, London, 2014, pp. 677–726.

[43] Chu, C. W., Deng, L. Z., and Lv, B. "Hole-Doped Cuprate High Temperature Superconductors." *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 514, 2015, pp. 290–313. https://doi.org/10.1016/j.physc.2015.02.047.

[44] Kalta, B., Pattanaik, A., Nayak, P., and Nanda, K. K. "A Note on Magnetization of High Temperature Superconductors (YBCO, BSCCO) in Mixed State." *Physica C: Superconductivity*, Vol. 471, No. 23,

2011, pp. 1664–1668. https://doi.org/10.1016/j.physc.2011.09.002.

[45] Melhem, Z. 2011. *High Temperature Superconductors (HTS) for Energy Applications*. UK. Woodhead Publishing, Cornwall.

[46] Dai, S., Ma, T., Xue, C., Zhao, L., Huang, Y., Hu, L., Wang, B., Zhang, T., Xu, X., Cai, L., and Chen, H. "Development and Test of a 220 KV/1.5 KA Resistive Type Superconducting Fault Current Limiter." *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 565, 2019, p. 1253501. https://doi.org/10.1016/j.physc.2019.06.004.

[47] Padam, G. K., Arora, M., Kaushik, S. D., and Ekbote, S. N. "Enhanced Critical Current Density (Jc) and Fractural Strength of Low and High Eu Level Doped Bare Bulk (Bi, Pb)-2223 Rods for Cryogenic Applications." *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 562, 2019, pp. 78–84. https://doi.org/10.1016/j.physc.2019.03.013.

[48] Thadela, S., Rao, V. V., Agarwal, R., and Dondapati, R. S. "Computational Investigation on Thermohydraulic Characteristics of High-Temperature Superconducting (HTS) Power Cables." *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 559, 2019, pp. 25–31. https://doi.org/10.1016/j.physc.2019.02.003.

[49] Vyas, G., and Dondapati, R. S. "AC Losses in the Development of Superconducting Magnetic Energy Storage Devices." *Journal of Energy Storage*, Vol. 27, 2020, p. 101073. https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101073.

[50] Byrd, J. M., Shea, T. J., Denes, P., Siddons, P., Attwood, D., Kaertner, F., Moog, L., Li, Y., Sakdinawat, A., and Schlueter, R. "Enabling Instrumentation and Technology for 21st Century Light Sources." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 623, No. 3, 2010, pp. 910–920. https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.06.244.

[51] Jin, J. X. Emerging SMES Technology into Energy Storage Systems and Smart Grid Applications. In *Large Scale Renewable Power Generation: Advances in Technologies for Generation, Transmission and Storage* (J. Hossain and A. Mahmud, eds.), Springer, Singapore, 2014, pp. 77–125.

[52] Aly, M. M., Abdel-Akher, M., Said, S. M., and Senjyu, T. "A Developed Control Strategy for Mitigating Wind Power Generation Transients Using Superconducting Magnetic Energy Storage with Reactive Power Support." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 83, 2016, pp. 485–494. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.04.037.

[53] Thomas, H., Marian, A., Chervyakov, A., Stückrad, S., and Rubbia, C. "Efficiency of Superconducting Transmission Lines: An Analysis with Respect to the Load Factor and Capacity Rating." *Electric Power Systems Research*, Vol. 141, 2016, pp. 381–391. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.07.007.

[54] Shi, Y., Liu, H. J., Liu, F., Tan, Y. F., Jin, H., Yu, M., Lei, L., Guo, L., and

Hong, Z. Y. “Development of an YBCO Coil with SSTC Conductors for High Field Application.” *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 550, 2018, pp. 10–13. https://doi.org/10.1016/j.physc.2018.04.001.

[55] Gimaev, R., Spichkin, Y., Kovalev, B., Kamilov, K., Zverev, V., and Tishin, A. “Review on Magnetic Refrigeration Devices Based on HTSC Materials.” *International Journal of Refrigeration*, Vol. 100, 2019, pp. 1–12. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.01.024.

[56] Machura, P., and Li, Q. “A Critical Review on Wireless Charging for Electric Vehicles.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 104, 2019, pp. 209–234. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.027.

[57] Mukherjee, P., and Rao, V. V. “Design and Development of High Temperature Superconducting Magnetic Energy Storage for Power Applications - A Review.” *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 563, 2019, pp. 67–73. https://doi.org/10.1016/j.physc.2019.05.001.

[58] Kouache, I., Sebaa, M., Bey, M., Allaoui, T., and Denai, M. “A New Approach to Demand Response in a Microgrid Based on Coordination Control between Smart Meter and Distributed Superconducting Magnetic Energy Storage Unit.” *Journal of Energy Storage*, Vol. 32, 2020, p. 101748. https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101748.

[59] Fujiwara, N., Hayashi, H., Nagaya, S., and Shiohara, Y. “Development of YBCO Power Devices in Japan.” *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 470, No. 20, 2010, pp. 980–985. https://doi.org/10.1016/j.physc.2010.05.015.

[60] Tixador, P. “Development of Superconducting Power Devices in Europe.” *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 470, No. 20, 2010, pp. 971–979. https://doi.org/10.1016/j.physc.2010.05.014.

[61] Thomas, H., Marian, A., Chervyakov, A., Stückrad, S., Salmieri, D., and Rubbia, C. “Superconducting Transmission Lines – Sustainable Electric Energy Transfer with Higher Public Acceptance?” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 55, 2016, pp. 59–72. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.041.

[62] Han, T., Ko, S., and Lim, S. “Fault Current Limiting Characteristics of Transformer-Type Superconducting Fault Current Limiter Due to Winding Direction of Additional Circuit.” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 28, No. 3, 2018, pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/TASC.2018.2793236.

[63] Yazdani-Asrami, M., Gholamian, S. A., Mirimani, S. M., and Adabi, J. “Experimental Investigation for Power Loss Measurement of Superconducting Coils under Harmonic Supply Current.” *Measurement*, Vol. 132, 2019, pp. 324–329. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.03.042.

[64] Ozeki, M. - Development of the Superconducting Maglev System in Japan. In *Proceedings of the Sixteenth*

International Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference, Elsevier Science, Oxford, 1997, pp. 13–18.

[65] Savaskan, B., Guner, S. B., Yamamoto, A., and Ozturk, K. "Trapped Magnetic Field and Levitation Force Properties of Multi-Seeded YBCO Superconductors with Different Seed Distance." *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 829, 2020, p. 154400. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154400.

[66] Zhang, P., Li, J., Guo, Q., Zhu, Y., Yan, K., Wang, R., Zhang, K., Liu, X., and Feng, Y. Chapter 15 - NbTi Superconducting Wires and Applications. In *Titanium for Consumer Applications* (F. Froes, M. Qian, and M. Niinomi, eds.), Elsevier, 2019, pp. 279–296.

[67] Abrahamsen, A. B., Magnusson, N., Jensen, B. B., and Runde, M. "Large Superconducting Wind Turbine Generators." *Energy Procedia*, Vol. 24, 2012, pp. 60–67. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.06.087.

[68] Keysan, O., and Mueller, M. A. "A Transverse Flux High-Temperature Superconducting Generator Topology for Large Direct Drive Wind Turbines." *Physics Procedia*, Vol. 36, 2012, pp. 759–764. https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.06.039.

[69] Lloberas, J., Sumper, A., Sanmarti, M., and Granados, X. "A Review of High Temperature Superconductors for Offshore Wind Power Synchronous Generators." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 38, 2014, pp. 404–414. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.003.

[70] Faisal, W. M. "High Tc Superconducting Fabrication of Loop Antenna." *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 51, No. 3, 2012, pp. 171–183. https://doi.org/10.1016/j.aej.2012.02.004.

[71] Rohacs, D., and Rohacs, J. "Magnetic Levitation Assisted Aircraft Take-off and Landing (Feasibility Study – GABRIEL Concept)." *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 85, 2016, pp. 33–50. https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.06.001.

[72] Tomita, M., Nagashima, K., Herai, T., and Murakami, M. "Resin-Impregnated Bulk RE–Ba–Cu–O Current Leads for the Superconducting Magnet on Maglev Train." *Physica C: Superconductivity*, Vols. 372–376, 2002, pp. 1216–1220. https://doi.org/10.1016/S0921-4534(02)00976-0.

[73] Floegel-Delor, U., Schirrmeister, P., Riedel, T., Koenig, R., Kantarbar, V., Liebmann, M., and Werfel, F. N. "Mobile HTS Bulk Devices as Enabling Ton-Force Technology for Maglev Trains." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 29, No. 5, 2019, pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/TASC.2019.2897216.