



Superconductividad en nanoestructuras mediante matrices por bloques

Germán Emiliano López

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, Departamento de Física, Ciudad de México, México.

ORCID: 0009-0002-4884-7772

Vicenta Sánchez

Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ciencias, Departamento de Física, Ciudad de México, México.

ORCID: 0000-0001-6898-6636

Chumin Wang

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones en Materiales, Ciudad de México, México.

ORCID: 0000-0002-2737-9722

Recepción: 28 de febrero de 2026.

Aceptación: 24 de agosto de 2026.

Agosto 2026 • número de revista 17 • DOI: 10.22201/dgtic.26832968e.2026. 17.155

Superconductividad en nanoestructuras mediante matrices por bloques

Resumen

La superconductividad es un fenómeno cuántico extraordinario en el que millones de electrones se organizan y cooperan para transportar electricidad sin resistencia. Para facilitar su estudio en nanoestructuras, se utiliza la transformación a matrices organizadas por bloques, siendo una herramienta matemática que separa las distintas "partes" del sistema sin sacrificar precisión. Esto podría conducir al diseño cuántico de dispositivos a escala macroscópica, tales como cables y bobinas superconductoras, usando la capacidad de cómputo actual.

Palabras Clave: superconductividad, condensado de pares, formalismo de Bogoliubov-de Gennes, transformación unitaria, nanotecnología.

Superconductivity in nanostructures through blocked matrices

Abstract

Superconductivity is an extraordinary quantum phenomenon in which millions of electrons organize and cooperate to transport electricity without resistance. To facilitate its study in nanostructures, the transformation into block-organized matrices is used, serving as a mathematical tool that separates the different "parts" of the system without sacrificing precision. This could enable the quantum design of macroscopic-scale devices, such as superconducting cables and coils, using current computational capabilities.

Keywords: *Superconductivity, Cooper pair condensate, Bogoliubov-de Gennes formalism, Unitary transformation, Nanotechnology.*

Introducción

Imagina un mundo donde la electricidad fluye sin perder energía, los trenes flotan sobre las vías y los escáneres médicos son increíblemente precisos. Esto puede ser posible gracias a la superconductividad, un fenómeno descubierto hace más de un siglo, mientras se exploraban los secretos del frío extremo. A continuación, descubre la fascinante historia de cómo se llega a comprender este extraño comportamiento de la materia, usando diversas herramientas tales como la mecánica cuántica y el cómputo de alto rendimiento.

Todo comenzó en 1908 en los Países Bajos. Ahí, el físico Heike Kamerlingh Onnes logró licuar helio, el cual es usualmente un gas y se vuelve líquido a una temperatura de -269°C , equivalentemente a 4.2 K. Onnes tenía el refrigerador más potente del mundo y le permitía estudiar lo que pasaba con los materiales cuando se enfrían a temperaturas extremadamente bajas. En aquella época, los científicos debatían si la resistencia eléctrica desaparecía a 0 K o tiende a infinito dado que los electrones se quedan congelados. Onnes eligió mercurio por tener una muestra de alta pureza y observó una desaparición abrupta de la resistencia eléctrica al llegar a los 4.19 K, descubriendo un nuevo estado de la materia que llamó superconductividad. En 1913 recibió el Premio Nobel por este hallazgo. Pronto se dio cuenta de que, si inducía una corriente eléctrica en un anillo superconductor, esta seguía fluyendo sin perder intensidad, creando una especie de "movimiento perpetuo" eléctrico con una cota inferior de 100,000 años [1].

En 1933, el físico alemán Walther Meissner y su colega Robert Ochsenfeld realizaron otro hallazgo clave sobre el estado superconductor, el cual expulsa siempre el campo magnético de su interior. Este fenómeno se conoce como Efecto Meissner y es la razón por la que vemos fotografías de imanes levitando sobre un superconductor, demostrando que la superconductividad es mucho más que "resistencia cero" [2].

Este fenómeno no era exclusivo del mercurio; pronto se descubrió que otros metales puros como el vanadio se vuelve superconductor a 5.4 K o el plomo a 7.2 K, los cuales

también perdían la resistencia en el frío extremo. Décadas después, el niobio metálico puro se convertiría en el campeón de los elementos, con una temperatura crítica (T_c) de 9.2 K. Sin embargo, el verdadero salto hacia las aplicaciones prácticas no vendría de los metales puros, sino de la combinación de varios de ellos en aleaciones metálicas. A principios de la década de 1960, los investigadores descubrieron una aleación de niobio-titanio (NbTi) con T_c de 9.5 K, pero un campo magnético crítico que supera a 10 teslas (T) a una temperatura de 4.2 K. Una década después, en 1973, la carrera por batir récords de T_c llevó al descubrimiento del Nb₃Ge (niobio-germanio), un compuesto con una estructura cristalina A15 que logró alcanzar los 23.2 K, convirtiéndose en el superconductor con la T_c más alta durante más de una década.

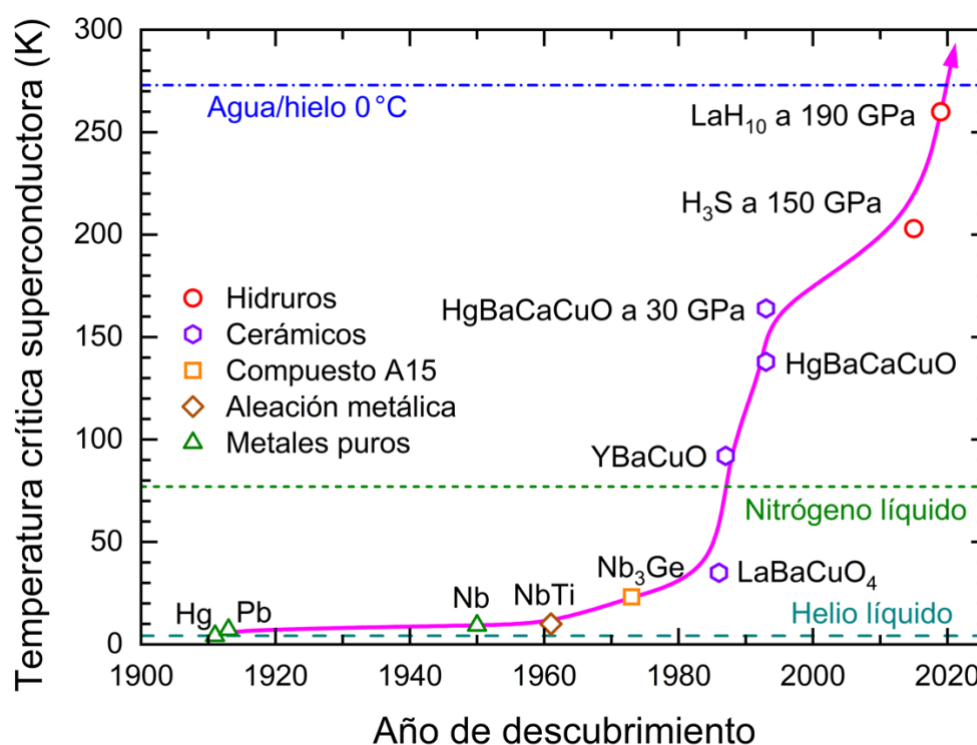


Fig. 1. Año de descubrimiento de diversos materiales superconductores y su correspondiente temperatura crítica.

En 1986, los investigadores de IBM Georg Bednorz y Alex Müller descubrieron un material cerámico LaBaCuO₄ (óxido de lantano-bario-cobre) que se volvía superconductor a 35 K. Lo

revolucionario fue que las cerámicas suelen ser aislantes, es decir, no conducen la electricidad. Este hallazgo fue tan impactante que recibieron el Premio Nobel al año siguiente, en 1987, algo inusualmente rápido.

Unos meses después, un equipo liderado por Paul Chu sustituyó el lantano por itrio y creó el YBaCuO (óxido de itrio-bario-cobre), un material que alcanzó la superconductividad a 92 K (-181°C). Este salto fue crucial, porque permitía usar nitrógeno líquido para enfriarlos, un refrigerante tan barato como la leche, en lugar del carísimo helio líquido. Así, nacieron los superconductores de alta temperatura, un fenómeno que, 40 años después, la comunidad científica aún no tiene una explicación convincente.

Después del descubrimiento de los cupratos en 1986, la siguiente gran revolución llegó de la mano de los hidruros, materiales que combinan hidrógeno con otros elementos formando un sólido cuando se somete a altas presiones. La idea de los hidruros fue propuesta por N. W. Ashcroft en 1968 y el primer hidruro superconductor experimentalmente confirmado fue el sulfuro de hidrógeno (H₃S) en 2015, con una asombrosa T_c de -70°C, eso sí, bajo una presión descomunal. Poco después, en 2019, llegó el decahidruro de lantano (LaH₁₀), que elevó la temperatura crítica hasta los -13°C, acercándose peligrosamente al punto de congelación del agua, aunque siempre dentro de un yunque de diamante.

El salto de los superconductores de laboratorio a la vida cotidiana se encuentra en continuo progreso. Se están fabricando dos tipos de cables superconductores: (I) basados en multifilamentos trenzados, como se ilustra en la Figura 2(a) [3]; y (II) basados en cintas de cupratos mostradas en la Figura 2(b). Por ejemplo, se han instalado decenas de kilómetros de cables superconductores basados en las cintas mencionadas para transmitir electricidad sin pérdida desde las plantas hasta zonas urbanas, los cuales ya se encuentran en funcionamiento en los Estados Unidos, Alemania y China [4].



Fig. 2. Aplicaciones de la superconductividad: (a) Cable de multifilamentos trenzados para la generación de campo magnético; (b) Cable de transmisión de potencia con nitrógeno líquido circulando en el centro; (c) Máquina de resonancia magnética; (d) Fusión nuclear controlada; (e) Tren de levitación magnética.

Asimismo, los ingenieros incrustan cientos de filamentos entrelazados de NbTi dentro de una matriz metálica, para construir electroimanes, los cuales se utilizan en los equipos de resonancia magnética de los hospitales, como se muestra en la Figura 2(c), creando campos magnéticos intensos y estables de 1.5 y 3 T. Estos electroimanes también se usan, por ejemplo, en el gran colisionador de hadrones y en la fusión nuclear controlada para confinar el plasma a 100 millones de grados, creando un “pequeño sol en la Tierra” (ver Figura 2(d)). Por último, los prototipos de trenes de levitación magnética (Maglev), han sido presentados en Japón, China y Brasil, donde sus potentes imanes superconductores los hacen flotar sobre las vías, eliminando el rozamiento y alcanzando velocidades superiores a 600 km/h, como se muestra en la Figura 2(e).

Para entender por qué materiales como los metales puros y los compuestos A15 conducen la electricidad sin resistencia alguna, tenemos que asomarnos a la teoría BCS, desarrollada en 1957 por John Bardeen, Leon Cooper y Robert Schrieffer, la cual descubrió

el "truco" de la superconductividad: los electrones no viajan solos, sino que lo hacen en parejas, formando los llamados pares de Cooper, por ejemplo, atraídos mediante fonones (cuantos de la vibración atómica) [5]. Este proceso de apareamiento puede visualizarse como un electrón moviéndose por dentro de un metal; al pasar, atrae a los iones positivos de la red, creando una pequeña estela de carga positiva justo a su paso. Un segundo electrón es atraído por esa estela, y así ambos avanzan como si bailaran un vals tomándose de las manos. Lo fascinante es que todos estos pares de Cooper se comportan al unísono, como un gran baile coreografiado.

Como una evolución de la teoría BCS, en 1964, se desarrolló el formalismo de Bogoliubov-de Gennes (BdG), el cual permite a los científicos estudiar en el espacio real los superconductores nanoestructurados y con múltiples interfaces entre distintos materiales, a diferencia de la teoría BCS formulada para materiales perfectos y periódicos [6]. Sin embargo, las ecuaciones BdG para las brechas superconductoras locales se resuelven generalmente de manera autoconsistente, es decir, se hace una suposición inicial de la brecha superconductora (Δ) y se calcula mediante las ecuaciones BdG una nueva Δ . Si no coinciden las dos Δ , se ajusta la suposición y se repite el proceso hasta que las dos coincidan. Es bien conocido que el procedimiento autoconsistente es computacionalmente costoso y, en general, no se tiene la garantía de encontrar una solución física.

Método de matriz por bloques

Para entender el método, imaginemos un nanotubo superconductor infinitamente largo cuya sección transversal contiene 9 átomos, como se observa en la parte superior de la Figura 3. En lugar de analizar toda su estructura al mismo tiempo, aplicamos una transformación unitaria que permite "reordenar" la descripción del sistema de modo que la matriz asociada a las ecuaciones de BdG se divide en bloques pequeños e independientes. Como se ilustra en la parte inferior de la Figura 3, el nanotubo puede entonces visualizarse como un conjunto de cadenas efectivas que no interactúan entre sí. Así, un sistema tridimensional se convierte en un conjunto de cadenas unidimensionales, lo que facilita enormemente su análisis y resolución.

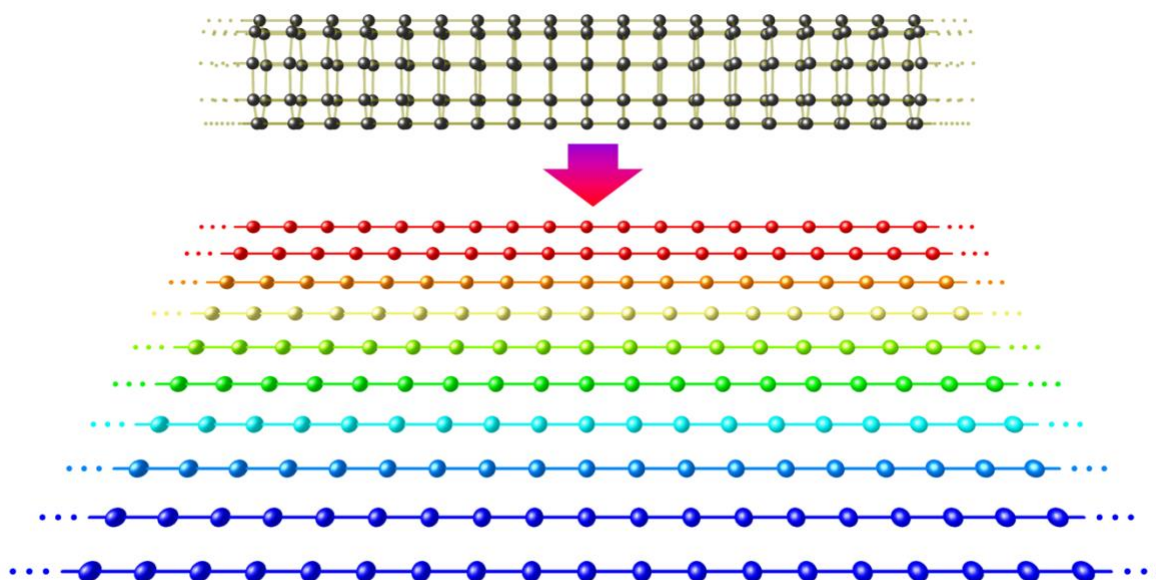


Fig. 3. Esquema de la transformación de un nanotubo en cadenas independientes.

La brecha superconductora del nanotubo se obtiene resolviendo las ecuaciones de BdG. Como se muestra en la parte izquierda de la Figura 4, el procedimiento usual es autoconsistente: primero se propone un valor inicial para la brecha Δ . Con ese valor, se resuelven las ecuaciones de BdG y se obtienen las energías y funciones propias de dichas ecuaciones. A partir de esos resultados, se calcula una nueva Δ , la cual se vuelve a introducir en las ecuaciones y el proceso se repite cíclicamente. El procedimiento termina cuando la diferencia entre las dos brechas consecutivas es suficientemente pequeña, menor que un valor predeterminado.

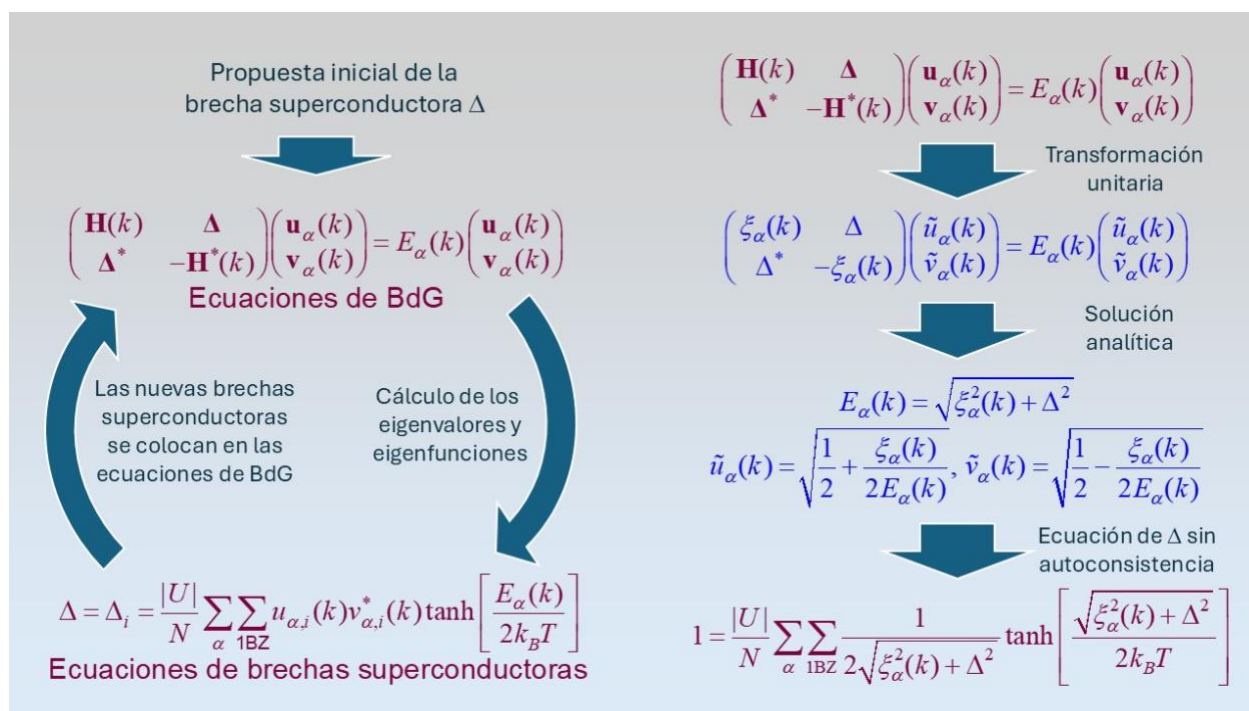


Fig. 4. Solución de las ecuaciones de Bogoliubov-de Gennes (BdG) mediante (Izquierda) el método autoconsistente y (Derecha) el método de matriz por bloques.

Si se aplica la transformación unitaria al nanotubo, como se ilustra en la Figura 3, el problema matemático se simplifica notablemente. La gran matriz de 18×18 asociada a las ecuaciones de BdG se reorganiza en nueve bloques más pequeños de 2×2 , es decir, en lugar de enfrentar una sola matriz grande y complicada, el fenómeno puede analizarse como varios problemas mucho más simples e independientes [7].

Cada uno de estos bloques admite una solución analítica, lo que permite obtener expresiones explícitas para las energías y funciones propias. A partir de ellas, se construye la ecuación que determina la brecha superconductora. Dicha ecuación ya no se resuelve de forma autoconsistente, sino mediante un procedimiento numérico sencillo, como el método de bisección [8], tal como se muestra en la parte derecha de la Figura 4.

En la Figura 5, se compara el tiempo de cómputo necesario para calcular el espectro de la brecha superconductora con 900 puntos, en nanotubos cuya sección transversal va de 3 a 19 átomos. Se muestran dos estrategias: el método autoconsistente tradicional (cuadrados

azules) y el método que utiliza la transformación unitaria para trabajar con matrices por bloques (círculos rojos). La gráfica evidencia que, a medida que aumenta el número de átomos, el tiempo de cálculo crece mucho más rápidamente cuando no se aplica la transformación. En cambio, el enfoque por bloques reduce de forma significativa el costo computacional, permitiendo realizar los mismos cálculos en mucho menos tiempo. Los cálculos se llevaron a cabo en la supercomputadora Mitzli de la UNAM, y los tiempos reportados corresponden al uso equivalente de un solo procesador Intel Xeon E5-2670 v1. Como se observa en los recuadros, la brecha superconductora obtenida por ambos métodos con (izquierda) y sin (derecha) transformación unitaria es la misma, lo cual muestra la exactitud y suficiencia del procedimiento propuesto.

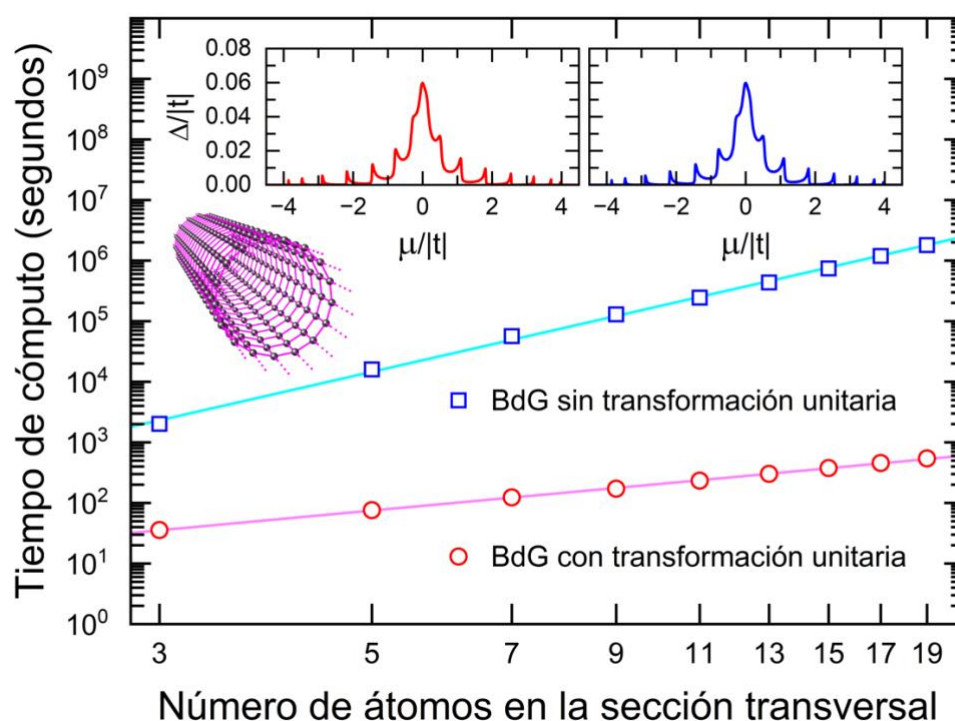


Fig. 5. Comparación del tiempo de cómputo para resolver las ecuaciones de Bogoliubov-de Gennes (BdG) con (círculos rojos) y sin (cuadrados azules) la aplicación de la transformación unitaria, en función del número de átomos en la sección transversal del nanotubo. En los recuadros superiores, se muestran ejemplos del espectro de la brecha superconductora obtenido con cada método (línea roja: con transformación; línea azul: sin transformación), correspondientes al nanotubo ilustrado en el recuadro izquierdo.

La Figura 5 muestra una diferencia notable en los tiempos de cálculo para un nanotubo con 19 átomos en su sección transversal: mientras que el método tradicional (autoconsistente) requería tres semanas de procesamiento continuo, la nueva técnica de matriz por bloques lo resuelve en apenas nueve minutos, usando el mismo procesador. Esta reducción de más de tres mil veces no sólo supone un ahorro de tiempo espectacular, sino que abre la posibilidad de estudiar sistemas mucho más complejos que antes resultaban inabordables.

Conclusiones

La superconductividad ha dejado de ser una curiosidad exclusiva de los laboratorios para convertirse en una tecnología con impacto real en la sociedad. Lo que antes sólo podía observarse en condiciones extremas, hoy forma parte de aplicaciones concretas que mejoran la calidad de vida, tal es el caso de los equipos de resonancia magnética de alta resolución en hospitales.

De cara al futuro, su importancia será aún mayor. La superconductividad es un componente esencial en el desarrollo de reactores de fusión nuclear [9], una posible fuente de energía limpia y prácticamente inagotable. También impulsa avances en transporte, como los trenes de levitación magnética [10], que prometen desplazamientos más rápidos y eficientes. En conjunto, esta tecnología no sólo representa un logro científico, sino una pieza clave en la construcción de sistemas energéticos y de transporte más sostenibles para las próximas décadas.

Para que este futuro tecnológico se concrete, no basta con descubrir nuevos materiales superconductores; también es fundamental desarrollar herramientas matemáticas y computacionales más eficientes que permitan diseñar y estudiar dispositivos reales. En este contexto, el método de matriz por bloques aplicado a las ecuaciones de BdG representa un avance importante.

La idea central es reorganizar el problema mediante transformaciones unitarias que dividen un cálculo grande y complejo en varios más pequeños y manejables. Con ello, se reduce drásticamente el tiempo de cómputo en comparación con el método autoconsistente tradicional. En términos prácticos, esto significa que se pueden analizar nanotubos y otras

nanoestructuras con mayor rapidez y menor costo computacional, facilitando la interpretación de resultados experimentales y la predicción de nuevas propiedades superconductoras [7]. Este tipo de herramientas acerca el diseño cuántico a la aplicación tecnológica, acelerando el desarrollo de dispositivos superconductores más eficientes.

Aunque la técnica de matriz por bloques es una herramienta bien conocida en el álgebra lineal, aplicarla a las ecuaciones de BdG tiene un impacto especial en el estudio de nanotubos superconductores. La combinación de esta técnica con el supercómputo puede contribuir al desarrollo de tecnologías basadas en la superconductividad durante las próximas décadas, en un contexto marcado por el avance de la inteligencia artificial. Esta relación puede visualizarse a través del siguiente ciclo.

La integración del método de matriz por bloques, el cómputo de alto rendimiento y la inteligencia artificial podría formar un ecosistema tecnológico sin precedentes, es decir, el método actúa como el cerebro matemático, simplificando los cálculos cuánticos complejos a problemas manejables, mientras que el supercómputo aporta los músculos, ejecutando esos cálculos simplificados a velocidades vertiginosas y en paralelo, permitiendo explorar simultáneamente miles de candidatos. Por otro lado, la inteligencia artificial cierra el círculo como el gran estratega: aprende de los resultados obtenidos, identifica patrones ocultos en los datos y predice qué compuestos tienen más probabilidades de convertirse en superconductores revolucionarios, así como nuevos dispositivos superconductores. Esta sinergia está transformando radicalmente la investigación. Lo que antes era un proceso lento de prueba y error en el laboratorio, con décadas entre descubrimientos, se ha convertido en un ciclo virtuoso y acelerado.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por los proyectos CF-2023-I-830, PAPIIT-IN116625, PAPIIT-IN116126, LANCAD-UNAM-DGTIC-039 y LANCAD-UNAM-DGTIC-182. G.E.L. agradece su estancia posdoctoral realizada gracias al Programa de Becas Posdoctorales en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Referencias

- [1] M. Tinkham, *Introduction to superconductivity*, 2nd ed., New York, USA: McGraw-Hill, 1996, pp. 1-2.
- [2] O. Navarro and R. Baquero, *Ideas Fundamentales de la Superconductividad*, Ciudad de México, México: Editorial UNAM, 2007.
- [3] T. Akachi, T. Ogasawara, R. Gomez, and C. Wang, "Stability limit field in superconductors. Part 2 multifilamentary composites", *Cryogenics*, vol. 26, no. 6, pp. 358-364, Jun. 1986, doi: [10.1016/0011-2275\(86\)90066-4](https://doi.org/10.1016/0011-2275(86)90066-4)
- [4] M. Noe, *et al.*, "Superconducting high-power cables and lines-development status and technology roadmap", *Supercond. Sci. Technol.* vol. 39, no. 2, p. 023501, Feb. 2026, doi: [10.1088/1361-6668/ae15c2](https://doi.org/10.1088/1361-6668/ae15c2)
- [5] P. G. de Gennes, *Superconductivity of Metals and Alloys*, Boca Raton, FL, USA: Westview Press, 1999, pp. 137-141.
- [6] J.-X. Zhu, *Bogoliubov-de Gennes Method and its Applications*, Cham, Switzerland: Springer Int. Pub., 2016, pp. 37-64.
- [7] G. E. López and C. Wang, "Superconductivity in correlated carbon nanotubes under pressure: A Bogoliubov-de Gennes study", *Physica B: Condensed Matter*, vol. 675, p. 415602, Feb. 2024, doi: [10.1016/j.physb.2023.415602](https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.415602)
- [8] R. L. Burden, J. D. Faires and A. M. Burden, *Análisis numérico*, 10th ed. Ciudad de México, México: Cengage Learning, 2017, pp. 36-40.
- [9] H. Liu, S. Gao, W. Hong and F. Liu, "Overview of China's fusion magnet technology based on the superconducting Tokamak strategy", *Cryo*, vol. 2, no. 1, p. 3, Feb. 2026, doi: [10.3390/cryo2010003](https://doi.org/10.3390/cryo2010003)
- [10] J.-S. Wang and S.-Y. Wang, *High temperature superconducting magnetic levitation*, Berlin, Germany: Walter de Gruyter, 2018.