

# Ciencia e Investigación

Primera revista argentina de información científica / Fundada en enero de 1945

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi\rangle = \hat{H} |\psi\rangle$$

$|1\rangle$



$|0\rangle$



INTERNATIONAL YEAR OF  
Quantum Science  
and Technology



ASOCIACIÓN  
FÍSICA  
ARGENTINA

LOS PRINCIPIOS BÁSICOS DE UNA  
COMPUTADORA CUÁNTICA

■ Federico Holik y Augusto J. Roncaglia.

EL HARDWARE CUÁNTICO:  
qubits naturales y artificiales

■ Christian Schmiegelow, Cecilia Cormick y  
Leandro Tosi

RESONANCIA MAGNÉTICA: de la versatilidad  
en el control cuántico al sensado y las nuevas  
tecnologías cuánticas

■ Ana Karina Chattah y Gonzalo A. Álvarez

TOPOLOGÍA QUE SE MIDE: de los materiales  
cuánticos a la metrología

■ Mariano Real, Jorge I. Facio y Liliana Arrachea

COMUNICACIÓN CUÁNTICA

■ Laura T. Knoll y Miguel A. Larotonda

PERSPECTIVAS DE ARGENTINA FRENTE A LA SEGUNDA REVOLUCIÓN CUÁNTICA,  
EN EL AÑO INTERNACIONAL DE LA CIENCIA Y LAS  
TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS (IYQ2025)

## Amigos y colaboradores de la AAPC



## Contribuciones de años anteriores

**HEXAGON**



# TOMO 76 N°1 2026

## EDITOR RESPONSABLE

Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias (AAPC)

## COMITÉ EDITORIAL

**Editor:** Luis A. Quesada-Allué

**Editora Adjunta:** Paula Regina Alonso

## Editores asociados

Dr. Gerardo Castro

Dra. Lidia Herrera

Dr. Roberto Mercader

Dra. Alicia Sarce

Dr. Juan R. de Xammar Oro

Dr. Norberto Zwirner

## ASISTENCIA TÉCNICA

Gabriel Martín Gil (diagramación y administración web)

## CIENCIA E

## INVESTIGACIÓN

Primera Revista Argentina de información científica.

Fundada en Enero de 1945.

Es el órgano oficial de difusión de La Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias.

A partir de 2012 se publica en dos series, Ciencia e Investigación y Ciencia e Investigación Reseñas. Está permitida su reproducción total o parcial citando la fuente.

Av. Alvear 1711, 4º piso, (C1014AAE) Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

Teléfono: (+54) (11) 4811-2998

Registro Nacional de la Propiedad Intelectual

N° 82.657. ISSN-0009-6733.

© 2026. Los textos que componen este número gozan de Licencia abierta via Creative Commons CC BY-NC-ND.

© 2026. These works are openly licensed via CC BY-NC-ND.

Lo expresado por los autores o anunciantes, en los artículos o en los avisos publicados es de exclusiva responsabilidad de los mismos.

Ciencia e Investigación se edita on line en la página web de la Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias (AAPC)  
[www.argentinapciencias.org](http://www.argentinapciencias.org)

El Año Internacional de la Ciencia y Tecnologías Cuánticas (IYQ 2025) fue proclamado por la ONU con voto favorable de Argentina. Reconoce los 100 años transcurridos desde el desarrollo inicial de la mecánica cuántica y destaca su importancia así como la necesidad de una mayor concientización sobre su impacto pasado y futuro.

La Asociación Física Argentina (AFA) fue creada en 1944. Entre sus objetivos están fomentar el desarrollo de la investigación científica pura y aplicada en el campo de la física y divulgar su conocimiento.

La ecuación de Schrödinger, establecida en 1926, forma parte de los postulados de la mecánica cuántica. Describe la evolución de la función de onda que representa un sistema físico a nivel cuántico.



# SUMARIO

## EDITORIAL

Perspectivas de Argentina frente a la segunda revolución cuántica, en el Año Internacional de la Ciencia y las Tecnologías Cuánticas (IYQ2025)

**Mariela Portesi, Silvia Ledesma y Leandro Tosi ..... 3**

## ARTÍCULOS

Los principios básicos de una computadora cuántica

**Federico Holik y Augusto J. Roncaglia ..... 6**

El hardware cuántico: qubits naturales y artificiales

**Christian Schmiegelow, Cecilia Cormick y Leandro Tosi ..... 15**

Resonancia Magnética: de la versatilidad en el control cuántico al sensado y las nuevas tecnologías cuánticas

**Ana Karina Chattah y Gonzalo A. Álvarez ..... 30**

Topología que se mide: de los materiales cuánticos a la metrología

**Mariano Real, Jorge I. Facio y Liliana Arrachea .....49**

Comunicación Cuántica

**Laura T. Knoll y Miguel A. Larotonda .....63**

**INSTRUCCIONES PARA AUTORES ..... 78**

*... La revista aspira a ser un vínculo de unión entre los trabajadores científicos que cultivan disciplinas diversas y órgano de expresión de todos aquellos que sientan la inquietud del progreso científico y de su aplicación para el bien.*

**Bernardo A. Houssay**

# Asociación Argentina para el Progreso de las Ciencias

## COLEGIADO DIRECTIVO

Presidente  
Ester Susana Hernández

Vicepresidente  
César Belinco

Secretaria  
Alicia Luisa Sarce

Tesorero  
Liliana Mabel Gassa

Protesorera  
Graciela Noemí Balerio

Miembros Titulares  
Paula Alonso  
Miguel Angel Blesa  
Gabriela Castelleti  
Lidia Herrera  
Mario A.J- Mariscotti  
Ursula María Molter  
Alberto Antonio Pochettino  
Ernesto Podestá  
Luis Alberto Quesada-Allué  
Fernando Stefani

Miembros Institucionales:  
Asociación Argentina de Astronomía (AAA)  
Laura Suad  
Asociación Argentina de Investigación Físicoquímica (AAIFQ)  
Mariano Correa

Asociación Argentina de Investigadores en Historia (AsAIH)  
Miranda Lida

Asociación Física Argentina (AFA)  
Mariela Portesi

Sociedad Argentina de Genética (SAG)  
Angela R. Solano

Miembros Fundadores  
Bernardo A. Houssay – Juan Bacigalupo – Enrique Butty  
Horacio Damianovich – Venancio Deulofeu – Pedro I. Elizalde  
Lorenzo Parodi – Carlos A. Silva – Alfredo Sordelli – Juan C. Vignaux –  
Adolfo T. Williams – Enrique V. Zappi

AAPC  
Avenida Alvear 1711 – 4° Piso  
(C1014AAE) Ciudad Autónoma de Buenos Aires – Argentina  
[www.aargentinapciencias.org](http://www.aargentinapciencias.org)

# PERSPECTIVAS DE ARGENTINA FRENTE A LA SEGUNDA REVOLUCIÓN CUÁNTICA, EN EL AÑO INTERNACIONAL DE LA CIENCIA Y LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS (IYQ2025)

■ **Mariela Portesi<sup>1</sup>, Silvia Ledesma<sup>2</sup> y  
Leandro Tosi<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Vicedirectora del Instituto de Física La Plata (IFLP)  
Investigadora CONICET - Profesora Ordinaria FCEX /  
Universidad Nacional de La Plata.

Tesorera de la Asociación Física Argentina (AFA) - Miembro  
del Colegiado Directivo de AAPC

<sup>2</sup> Profesora Titular Consulta, FCEN, UBA Investigadora  
Principal de CONICET

Secretaria de Investigación, FCEN, UBA

Secretaria de la Red Iberoamericana de Óptica.

<sup>3</sup> Investigador Grupo de Circuitos Cuánticos Bariloche, CAB-  
CNEA. Investigador CONICET. Docente Instituto Balseiro,  
UNCUYO-CNEA.

El presente número ha surgido como un aporte desde la Asociación Física Argentina (AFA) con motivo del **Año Internacional de la Ciencia y las Tecnologías Cuánticas (IYQ2025)**, establecido por la Organización de las Naciones Unidas para reconocer el siglo transcurrido desde el desarrollo inicial de la mecánica cuántica. Esta iniciativa mundial, a la que nuestro país adhirió, ha perseguido proponer actividades a todos los niveles destinadas a aumentar la concientización pública sobre la importancia de la ciencia cuántica y sus aplicaciones.

La física cuántica fue concebida para explicar la interacción entre la radiación electromagnética y los átomos. Gran parte de las tecnologías presentes hoy en el mundo como la electrónica, las comunicaciones y los dispositivos para procesar la información, la óptica (incluyendo los láseres), la mecánica (incluyendo las aleaciones), la ciencia de materiales (incluyendo a los superconductores) y las aplicaciones médicas (como la resonancia magnética nuclear), entre otras, se sustentan fuertemente en la comprensión profunda de los mecanismos de interacción entre la radiación electromagnética y la materia, y de las propiedades de todos los tipos de materiales, obtenida durante el último siglo a partir de la mecánica cuántica. Esa primera "revolución cuántica" ciertamente le ha dado su forma a nuestro mundo moderno. Ha dado lugar, además, a grandes debates vinculados a los fundamentos de la teoría cuántica, que han sido abordados inclusive desde las ciencias sociales. Sin embargo, no estamos extrayendo todo el potencial de la mecánica cuántica.

En efecto, todos los diferentes grados de libertad en los sistemas físicos pueden ser protagonistas en la mecánica cuántica, y pueden comportarse cuánticamente si son puestos en las condiciones adecuadas. Experimentos pioneros en los años '80, galardonados en 2025 con el Premio Nobel de Física, demostraron que circuitos eléctricos realizados por el ser humano, mucho más grandes que los electrones que orbitan alrededor del núcleo de un átomo, pueden en efecto entrar en el régimen cuántico, y ser preparados en un estado cuántico correspondiente a una superposición de corrientes fluyendo en direcciones opuestas en el cable. Más aún, hoy en día pueden fabricarse sistemas macroscópicos cuyo movimiento mecánico está dictado por estos comportamientos anti-intuitivos de la cuántica, y la operación en estos límites ha llevado al desarrollo por ejemplo de sensores (de posición, masa, energía, etc) con sensibilidades impensadas en el pasado e inaccesibles en sistemas clásicos. El diseñar y fabricar dispositivos, y de forma más general máquinas, cuyas variables de estado (como posición y momento, polarización, espín o por ejemplo las corrientes en circuitos eléctricos) se comportan según las leyes de la mecánica cuántica, constituye la gran visión de la "segunda revolución cuántica" de la ciencia y la tecnología, que está hoy en sus albores con iniciativas de máxima prioridad en los países y comunidades más desarrolladas del mundo, e incluso en las empresas globales más poderosas de nuestro planeta (IBM, Intel, Google, Microsoft, etc). Si su alcance llegará a ser tan grande como el de la "primera revolución", con impacto inmenso en áreas originalmente no previstas, es algo que aún no se sabe. Pero de lo que la comunidad científica en el mundo, y quienes toman decisiones políticas respecto a la inversión en ciencia y tecnología, están convencidos, es que posee el potencial para cambiar las reglas del juego en muchas tecnologías al dar lugar a máquinas capaces de realizar tareas más allá de los límites de sus versiones clásicas, independientemente de cualquier progreso que puedan tener estas tecnologías convencionales.

El ejemplo paradigmático de la ciencia y las tecnologías cuánticas es hoy el de las "**computadoras cuánticas**" cuyos **principios básicos (ver Artículo 1)** y **posibles implementaciones físicas (ver Artículo 2)** constituyen actualmente un activo campo de investigación y desarrollo. Efectivamente, un procesador cuántico, incluso con un número moderado de bits cuánticos o qubits, podría dar lugar a una potencia enorme de cálculo gracias a la riqueza de la información cuántica y al carácter intrínsecamente paralelo de la evolución en los sistemas cuánticos. Esto resulta relevante especialmente para algunas tareas específicas para las cuales las máquinas clásicas son limitadas. Si bien una verdadera computadora cuántica es todavía un objetivo no alcanzado, varios laboratorios y empresas en el mundo ya operan, utilizando diversas tecnologías, procesadores con algunas centenas de bits cuánticos. Más aún, las potencialidades de las tecnologías cuánticas no se limitan al caso "modelo" de la computación cuántica. Simuladores cuánticos, sensores operando más allá del límite "estándar" del ruido cuántico, manipulación y propagación de información con estados cuánticos (por ejemplo para la criptografía físicamente inviolable usando fotones individuales), y la riqueza de los procesos y métodos cuánticos, constituyen áreas de oportunidad para nuevas tecnologías, materiales y métodos.

En el marco de la "segunda revolución cuántica", las iniciativas gubernamentales en los países desarrollados (principalmente en Estados Unidos, países de Europa, Canadá, China, Japón y Australia) apuntan entonces a generar nuevos conocimientos y tecnologías que se estima tendrán impacto económico en gran diversidad de áreas incluyendo la energía, la salud, las tecnologías de la información, la salvaguarda, y la seguridad. Además, implementan planes activos para la educación en estas nuevas tecnologías. **Argentina no debe quedar excluida de estas tecnologías del Siglo XXI.** Resulta crítico y oportuno participar de estos avances científicos y tecnológicos identificando áreas de impacto inmediato en el país. Entendemos que la comunidad científico-tecnológica y educativa de nuestro país puede hacerlo apuntando al conocimiento fundamental y al desarrollo experimental. Hay una comunidad fuerte en el estudio de los fundamentos de la mecánica cuántica, en el modelado de sistemas cuánticos con disipación y decoherencia, en el estudio de termodinámica cuántica y sistemas cuánticos forzados, en el estudio de correlaciones cuánticas en el sensado y métodos de procesamiento de información cuántica, y también en el área del software cuántico. Las plataformas experimentales están también avanzadas en el área de los dispositivos eléctricos y ópticos de estado sólido, en las plataformas de iones atrapados, en el área de las comunicaciones cuánticas y en el desarrollo de herramientas electrónicas para procesamiento. **Una de las búsquedas de esta edición es dar cuenta del estado de situación en el país.** Viendo las capacidades actuales y su potencial, la participación de Argentina en el mundo de las ciencias y la tecnologías cuánticas podría hacerse en una instancia de transición entre la primera y segunda revolución cuántica, partiendo de los materiales y tecnologías actuales, para incursionar en aquellos dispositivos, materiales y procedimientos propios de la nueva segunda revolución cuántica. Toda innovación requiere, sin embargo, una inversión continua para permanecer actualizados, extraer el máximo de oportunidades de los recursos

disponibles, y aportar valor con nuevos desarrollos tecnológicos. Si estos desarrollos no se hacen localmente, deberán ser adquiridos implicando transferencia de recursos a terceros. El hacerlos, por otro lado, abre posibilidades de impacto nacional pero también tiene potencialidad en mercados regionales e internacionales.

Las nuevas tecnologías cuánticas, particularmente en lo relacionado a técnicas por resonancia magnética nuclear, encuentran especial campo de aplicación en el desarrollo de biomarcadores específicos y mejora de la resolución espacial para la medicina predictiva, preventiva, personalizada y participativa, que junto a otros desarrollos aportan al nuevo enfoque Una Sola Salud (One Health). En la **resonancia magnética nuclear (ver Artículo 3)** la segunda revolución cuántica encuentra grandes oportunidades de aplicación. Esto es porque los espines nucleares que se detectan representan un arreglo de entidades cuyas propiedades e interacciones responden a procesos cuánticos, y pueden por lo tanto ser manipulados y sondeados utilizando tecnologías basadas en la información cuántica. En este caso se utilizan típicamente espines de núcleos atómicos presentes naturalmente en los tejidos y procesos biológicos (siendo los más abundantes el protón hidrógeno, y el isótopo radioactivo del carbono,  $^{11}\text{C}$ ), y se utiliza como biomarcador por ejemplo su densidad, su difusión, y/o la dinámica temporal, las cuales pueden ser específicas a los diferentes tejidos, y particularmente a las características de estos en diferentes estados fisiológicos y patológicos. En la actualidad los biomarcadores relacionados con procesos y funcionalidades orgánicas se utilizan con una resolución espacial del orden del  $\text{mm}^3$ . La detección temprana, específica y de mayor resolución espacial que se conseguiría con los desarrollos propuestos sería crítica para la prevención y mejor tratamiento de enfermedades, como el diagnóstico temprano de cáncer y su evolución luego de tratamientos con radio-, quimio- y/o inmunoterapia, y para estudios de funcionalidad en particular en temáticas de neurociencias y las consiguientes mejoras en el diagnóstico de enfermedades neurodegenerativas (como por ejemplo la enfermedad de Alzheimer), cuya prevalencia se ve incrementada con el crecimiento vegetativo de la población a nivel mundial.

El desarrollo de **sensores ultrasensibles (ver Artículo 4)** y de gran resolución espacial para detección de partículas o para el acceso metroológico a fenómenos físicos representa otra área accesible y competitiva, de gran impacto potencial a nivel local. En el mundo de los dispositivos de estado sólido, esto va de la mano de la comprensión de los materiales. Hay nuevos materiales que se han comenzado a llamar materiales cuánticos, por sus singulares propiedades, como protección topológica (asociada a las propiedades de las bandas de valencia y conducción y no a la forma del material). Desde el punto de vista metroológico, la ventaja es la trazabilidad. Más en general, el desarrollo local de estas tecnologías trae como beneficios la sustitución de importaciones, así como la posibilidad de ser competitivos en un mercado internacional. Por otro lado, la detección usando sensores de estado sólido de señales débiles como la de fotones únicos, masas o desplazamientos ultrapequeños, requiere la implementación de paradigmas nuevos. El desarrollo de dispositivos basados en sistemas cuánticos permitirá llegar al extremo físico de detección. Un sinnúmero de aplicaciones se verían afectadas por un incremento en la sensibilidad de detección, así mismo habilitaría el desarrollo de nuevos paradigmas de sistemas de detección. Otra aplicación que se visualiza es su utilización en radares "cuánticos", que plantean un método de detección de objetos que es prácticamente indetectable por el blanco observado.

Además, las tecnologías cuánticas aparecen como la única manera posible para **comunicaciones seguras (ver Artículo 5)**, a través del encriptado inviolable de claves mediante manipulación y propagación de fotones únicos en fibras ópticas. El desarrollo de detectores de fotones únicos, y el desarrollo de protocolos y métodos para su propagación en fibras, sería un primer paso en el sentido de aportar a estas tecnologías en la Argentina.

En un mundo en fuerte desarrollo, cada vez más competitivo, para la generación de riqueza y provisión de bienestar a su población, nuestro país necesita evitar el lugar de atraso tecnológico. **Los grupos de investigación en Argentina poseen la capacidad para emprender estos desarrollos, con personal cualificado en las áreas de las ciencias físicas y afines.** Se requiere para esto de la inversión indispensable en adecuaciones edilicias que soporten los requerimientos de estos nuevos laboratorios, la adquisición de equipamiento hoy inaccesible en Argentina, y la consolidación en la formación de recursos humanos especializados en estos nuevos conocimientos y tecnologías. Esperamos que ese sea el camino emprendido por nuestro país en los albores de esta nueva revolución cuántica.

# LOS PRINCIPIOS BÁSICOS DE UNA COMPUTADORA CUÁNTICA

**Palabras clave:** computación cuántica, entrelazamiento.  
**Keywords:** *quantum computation, entanglement.*

**Resumen:** El procesamiento, almacenamiento y transmisión de la información están fundamentalmente limitados por las leyes de la física. En este artículo se introducen los principios básicos de la computación cuántica, un paradigma que reemplaza los bits clásicos por sistemas cuánticos (qubits) capaces de exhibir superposición y entrelazamiento. Se analiza cómo este cambio en la codificación de la información desafía la Tesis de Church-Turing Extendida, habilitando la ejecución de algoritmos cuánticos —como el de Shor— que prometen resolver problemas matemáticos complejos con una eficiencia que se cree inalcanzable para las supercomputadoras clásicas. Asimismo, se discute el estado del arte de la tecnología cuántica actual, caracterizada por la era NISQ (dispositivos ruidosos de escala intermedia). A través de los conceptos de supremacía, ventaja y utilidad cuántica, se ofrece una perspectiva crítica sobre los recientes hitos experimentales, los desafíos inherentes a la corrección de errores y el impacto disruptivo que estas tecnologías tendrán en la sociedad, la industria y la seguridad informática en los próximos años.

■ **Holik, Federico<sup>1,\*</sup>; Roncaglia, Augusto J.<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Física La Plata (IFLP, CONICET-UNLP), 1900 La Plata, Argentina.

<sup>2</sup>Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Física, Ciudad Universitaria, 1428 Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

<sup>3</sup>CONICET - Universidad de Buenos Aires, Instituto de Física de Buenos Aires (IFIBA), Ciudad Universitaria, 1428 Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

\*E-mail: holik@fisica.unlp.edu.ar

## Basic principles of a quantum computer

**Abstract:** The processing, storage, and transmission of information are fundamentally constrained by the laws of physics. This article introduces the basic principles of quantum computing, a paradigm that replaces classical bits with quantum systems (qubits) capable of exhibiting superposition and entanglement. We analyze how this shift in information encoding challenges the Extended Church-Turing Thesis, enabling the execution of quantum algorithms—such as those of Shor and Grover—that promise to solve complex mathematical problems with an efficiency unattainable by classical supercomputers. Furthermore, we discuss the state of the art of current quantum technology, characterized by the NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) era. Through the concepts of quantum supremacy, advantage, and utility, we offer a critical perspective on recent experimental milestones, the inherent challenges of error correction, and the disruptive impact these technologies will have on society, industry, and cybersecurity in the coming years.

## ■ INTRODUCCIÓN

Las tareas de almacenar, procesar y transmitir grandes volúmenes de información, juegan un rol clave en las sociedades del Siglo XXI. El procesamiento de datos se encuentra a menudo en la base de actividades relacionadas a la infraestructura crítica de muchos países.

La teoría de la información tuvo su primera formulación sistemática en los trabajos de Claude E. Shannon, durante los años '40 del siglo pasado (Holik, Federico. 2016). El

carácter distintivo de su abordaje consistió en que logró dar un tratamiento matemático de distintos aspectos relacionados al concepto de información. Este giro metodológico permitió un abordaje cuantitativo a la tarea ingenieril de la transmisión de la información, permitiendo definir cantidades clave, tales como la de flujo de información a través de un canal.

En la práctica, toda tarea de almacenamiento, procesamiento o transmisión de información, se lleva a cabo por medio de algún dispo-

sitivo físico, y esto hace que dichas tareas, en última instancia, queden supeditadas a las leyes de la física. A modo de ejemplo, podemos almacenar información en libros, en nuestros cerebros, o en unidades de almacenamiento digitales, tales como, por ejemplo, *pendrives*. De forma análoga, en la actualidad procesamos, almacenamos y transmitimos información utilizando computadoras programables, tales como *laptops* o *celulares*. Las leyes de la física imponen restricciones a la manera en que podemos manipular la información. Un ejemplo sen-

cillo consiste en el hecho de que, a partir de la teoría de la relatividad especial, no es posible transmitir información a una velocidad mayor a la de la luz. Otro ejemplo no tan evidente se encuentra relacionado con el procesamiento de la información: para ello debemos invertir energía, que, a su vez, se disipa en forma de calor. Para tener una idea de la dimensión de este problema, es importante tener en cuenta que las supercomputadoras –como las que utilizan las grandes empresas tecnológicas en la actualidad– consumen grandes cantidades de energía para realizar sus actividades de procesamiento de datos, y suelen utilizar también grandes volúmenes de agua para su refrigeración. Esto ha despertado debates acerca de la huella de carbono que dejan los servidores que se utilizan para correr algoritmos de inteligencia artificial (Observatorio, 2024).

La teoría de la información cuántica puede definirse como aquella teoría de la información que surge a partir de la hipótesis de que los componentes de los dispositivos que utilizamos para procesar, transmitir y almacenar información, sean sistemas cuánticos. A modo de ejemplo, encontramos sistemas cuánticos cuando estudiamos la naturaleza a escala atómica y subatómica. Los átomos, protones, fotones, electrones, y otras partículas subatómicas, se rigen por leyes físicas que se engloban dentro de la teoría cuántica. Y estas leyes del mundo subatómico difieren en gran medida de las leyes de la física clásica, como veremos a continuación. También es posible producir estados cuánticos de la materia utilizando muchas partículas elementales. Esto ocurre, por ejemplo, ciertos materiales que se conocen como *superconductores*, los cuales, al ser enfriados a temperaturas lo suficientemente bajas –en algunos casos, cercanas al

cero absoluto–, pueden dar lugar a corrientes eléctricas que involucran muchos electrones, y que se comportan colectivamente de acuerdo a las leyes de la física cuántica (Nobel Prize, 2025).

En este artículo nos concentramos en **qué ocurre con el procesamiento de la información si los componentes de los procesadores fueran capaces de utilizar las propiedades peculiares de los sistemas cuánticos**. En otras palabras, nos dedicaremos a delinear los aspectos fundamentales de lo que se conoce como teoría de la computación cuántica, la cual se puede definir como aquella teoría de la computación que surge de suponer que los componentes de las computadoras son sistemas cuánticos. Los resultados de las investigaciones de las últimas décadas en esta área sugieren que, si fuera posible construir computadoras cuánticas lo suficientemente grandes y que tengan protocolos de corrección de errores incorporados, sería posible obtener una aceleración en ciertas tareas que se creen muy costosas para las computadoras comunes o clásicas. Sorprendentemente, ya hay en la actualidad prototipos de computadoras cuánticas disponibles comercialmente, los cuales son utilizados para realizar tareas de investigación y desarrollo.

Comenzaremos primero discutiendo cuáles son las diferencias principales entre la información cuántica y la información clásica, para entender en qué sentido los sistemas cuánticos son diferentes a los clásicos, y qué impacto tiene esto en la codificación de la información. Luego, discutiremos la idea general de lo que sería una computadora cuántica programable, ilustrando las ideas básicas del campo de investigación. A partir de allí, haremos una breve sinopsis de algunos algoritmos

cuánticos que, se cree, presentan ventaja respecto de los algoritmos clásicos conocidos. Finalmente, resumimos el estado del arte de la computación cuántica y sus perspectivas de desarrollo a futuro.

## ■ INFORMACIÓN CLÁSICA VS INFORMACIÓN CUÁNTICA

En los dispositivos estándar, tales como laptops, tablets, y celulares, la información se almacena en bits. Por ejemplo, uno puede codificar un mensaje (escrito en castellano) como una cadena de ceros y unos como la siguiente: “00010101”. Es por eso que nos referimos a estos dispositivos como digitales, en el sentido de que la información se codifica en términos de cadenas de ceros y unos. En estos dispositivos, la medida de información es el bit, y se le suele llamar bit físico al dispositivo físico que se utiliza para almacenar dicha información. Desde el punto de vista lógico, un bit puede tomar dos valores, cero, o uno. Por lo tanto, para instanciar físicamente un bit, necesitamos un sistema físico con dos estados claramente distinguibles, en los cuales representar los estados cero o uno. En las computadoras clásicas modernas, los transistores existen en estados de “encendido” (voltaje alto, 1) o “apagado” (voltaje bajo, 0) con el fin de realizar operaciones lógicas.

En los dispositivos clásicos, la información se procesa aplicando operaciones lógicas. Ejemplos de estas son el “y”, el “o”, y el “no”. A partir de estas operaciones lógicas elementales, es posible realizar operaciones más complejas. En general, es posible describir cualquier función booleana (es decir, cualquier función que mapee cadenas de ceros y unos en cadenas de ceros y unos) en términos de una combinación adecuada de las operaciones lógicas elementales. Por ejemplo,

una función que representa un cálculo matemático, no puede ser otra cosa más que un mapa que asigna cadenas de ceros y unos en cadenas de ceros y unos. En principio, cualquier tarea que realice una computadora clásica se puede reducir a esta descripción. En los dispositivos actuales, lo que se hace es representar estas operaciones lógicas utilizando circuitos electrónicos. En particular, las compuertas lógicas clásicas se implementan utilizando transistores. El chip de una computadora clásica disponible actualmente puede tener del orden de miles de millones de transistores, los cuales, a su vez, tienen un tamaño del orden de unos pocos nanómetros (es importante recordar aquí que un nanómetro es la mil millonésima parte de un metro). De esta forma, combinando muchísimas operaciones elementales sencillas de forma adecuada, las computadoras actuales pueden realizar tareas muy complejas, tales como procesar videos, entrenar y correr modelos de inteligencia artificial (como Chat GPT o Deep Seek), o realizar simulaciones numéricas necesarias para investigaciones científicas. de un bit -es decir, un dispositivo físico con dos estados perfectamente distinguibles- usáramos un sistema cuántico, podríamos tener otros estados que no están disponibles en el caso clásico. **Al equivalente cuántico del bit se lo denomina qubit, una abreviatura de quantum bit.** Un qubit puede estar no sólo en los estados cero y uno, sino que también puede existir en lo que se conocen como estados de superposición. Para ilustrar esta idea, utilizaremos la notación de Dirac de la siguiente forma. Los estados cero y uno del qubit, se representan matemáticamente por los símbolos  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$ , respectivamente. A diferencia del bit clásico, un qubit puede acceder a estados de superposición como:

$$|\Psi\rangle = (1/\sqrt{2})(|0\rangle + |1\rangle) \quad (1)$$

En un estado como el de arriba, si se realizara una medición del estado del qubit, el resultado podría ser cero, o uno, con una probabilidad del cincuenta por ciento cada uno.

Desde el punto de vista formal o matemático, **la teoría cuántica representa a los estados cuánticos por medio de vectores en un espacio vectorial.** Esto permite reflejar adecuadamente la física de estados de superposición como el de la ecuación (1). Si un qubit se encuentra en el estado de arriba, no podemos afirmar que esté en el estado cero, o uno. Diremos que se encuentra en los dos al mismo tiempo, o en una superposición de ambos. Por cómo son las leyes de la física cuántica, en ese caso, sólo podemos afirmar que, en caso de realizar una medición, es decir, en caso de que queramos retribuir la información acerca del qubit, la probabilidad de observar cero es 50% y la probabilidad de observar uno es 50%. De forma análoga, es posible preparar al qubit en estados con 30% de probabilidad de observar cero y 70% de observar uno, 60% y 40%, y todas las combinaciones probabilísticas posibles. En consecuencia, a diferencia del caso clásico en el cual hay solamente dos estados accesibles, en el caso cuántico hay infinitas posibilidades: cero, uno, y todos los posibles estados de superposición que se puedan concebir. El carácter aleatorio de las mediciones cuánticas, hace que el modelo de computación cuántica sea inherentemente probabilístico.

Pero las diferencias no terminan aquí. En la computadora cuántica, es posible producir estados de dos qubits de forma tal que estos queden correlacionados en formas que no tienen análogo clásico. Consideremos el siguiente ejemplo. Con un ordenador cuántico de dos qubits, podríamos preparar al primer qubit en cero, y al segundo en uno, obteniendo así el estado que representa-

mos como  $|01\rangle$ . De forma análoga, también podríamos preparar al primer qubit en uno y al segundo en cero, obteniendo  $|10\rangle$ . Lo distintivo respecto a la computación clásica, es que en el caso cuántico podemos además producir un estado superposición de estos dos:

$$|\psi\rangle = (1/\sqrt{2})(|01\rangle + |10\rangle) \quad (2)$$

En tal estado, si medimos ambos qubits, obtendremos "01" o "10" con la misma probabilidad (cincuenta por ciento). En otras palabras, si medimos el primer qubit y obtenemos un cero, siempre vamos a obtener el valor opuesto en el segundo qubit, es decir, un uno. viceversa. Pero estas opciones aparecen con la misma probabilidad. Estos estados de superposición de múltiples qubits se conocen como *entrelazados*, y representan estados correlacionados de un procesador cuántico. En principio, es posible producir estados entrelazados de tantos qubits como queramos (Bub, Jeffrey. 2017).

Vimos que en las computadoras clásicas la información se codifica en cadenas de ceros y unos, y que las operaciones lógicas se representan por funciones booleanas (AND, OR, XOR, NOR, etc). Una primera diferencia que introduce la computación cuántica es que la información se codifica en términos de vectores en un espacio de Hilbert, los cuales permiten representar estados de superposición y entrelazados. ¿Cómo se representan matemáticamente las operaciones lógicas en la computadora cuántica? Esto se hace usando funciones que transforman vectores en vectores, lo que se conoce en la jerga matemática como *transformaciones lineales*. Dada la necesidad de que se mapeen estados en estados, es necesario que estas transformaciones lineales tengan asociadas también lo que se conoce como *matrices unitarias*.

Más allá de los detalles matemáticos, lo que es relevante para este artículo es que las características descritas arriba hacen que la computación cuántica dé lugar a un modelo de computación que es diferente al clásico. De conjunto, el carácter estocástico de los procesos de medición, junto con la posibilidad de preparar a los qubits en estados de superposición y entrelazarlos entre sí, hacen que la computación cuántica pueda formularse tomando como base una descripción formal basada en un cálculo matricial que da lugar a probabilidades de resultados, en vez de la descripción determinista basada en funciones booleanas del caso clásico.

Pese a ser modelos de computación bastante diferentes entre sí, es importante remarcar que las computadoras cuánticas programables son capaces de computar la misma familia de funciones que las computadoras clásicas. Es decir, si es posible computar una cierta función  $F$  en una computadora clásica, entonces, es posible computarla también en una computadora cuántica, y vice versa. Como explicaremos en la siguiente sección, la diferencia viene dada en términos de eficiencia: se puede probar que existen problemas que pueden ser resueltos de forma eficiente en una computadora cuántica, mientras que se cree que a una supercomputadora clásica le llevarían cientos o miles de años (M. A. Nielsen and I. L. Chuang, 2000).

## ■ SUPREMACÍA CUÁNTICA Y ALGORITMOS CUÁNTICOS

La idea de construir computadoras cuánticas surgió con los trabajos de distintos físicos durante los años '80 del siglo pasado, con autores de la talla de Richard Feynman y Yuri Manin. En particular, Richard Feynman propuso usar computadoras cuánticas para simular la dinámica

de sistemas cuánticos de muchos cuerpos. Este problema no sólo es de interés en el ámbito de la física y de la ciencia básica, sino que es relevante en muchas aplicaciones comerciales. Para fijar ideas, es importante tener en cuenta que, tanto en la industria de medicamentos, así como en toda actividad industrial que requiera del desarrollo de nuevos materiales o compuestos químicos, es necesario hacer simulaciones de moléculas que tienen muchos átomos, o de átomos o moléculas con muchos electrones. La experiencia de décadas de investigación indica que este problema matemático es extremadamente duro para las supercomputadoras convencionales. En este marco, la hipótesis de Feynman sostiene que usar computadoras cuánticas, podría dar lugar a avances sustanciales en distintas aplicaciones industriales, así como en distintas ramas de la medicina.

La propuesta de Feynman está vinculada a lo que hoy se conoce como Tesis de Church Turing Extendida (TCTE), la cual puede formularse de la siguiente forma:

**TCTE: “Toda función que pueda computarse con un dispositivo físicamente construible, puede ser simulada con precisión y de forma eficiente con una máquina de Turing probabilística”.**

En la afirmación de arriba, el concepto de “máquina de Turing probabilística” hace referencia a un modelo de computación clásica no determinista. La palabra “eficiente”, hace referencia a la complejidad de cómputo, es decir, al hecho de que el problema se pueda resolver en una cantidad de pasos que crece polinomialmente con el tamaño de la entrada del problema. En palabras sencillas, decimos que un problema se puede resolver de forma eficiente si dicha resolución puede llevarse a

cabo en un tiempo razonable para un ser humano a medida que el tamaño del problema crece.

Si la TCTE fuera cierta, implicaría que una computadora clásica podría simular de forma eficiente y precisa todo lo que pueda llegar a hacer una computadora cuántica. En la actualidad, la mayor parte de la comunidad científica especializada en este tema cree que la TCTE es falsa. Esto está vinculado al concepto de supremacía cuántica: la existencia de una tarea (o de un conjunto de tareas) que pueda ser realizada de forma eficiente por una computadora cuántica, pero que tenga un costo muy grande para toda supercomputadora clásica físicamente construible. Enumeramos a continuación algunos de los motivos que dan lugar a la afirmación o creencia de que la TCTE es falsa.

Un primer resultado importante está vinculado al problema de la factorización. Decimos, por ejemplo, que el número 7 es un factor del número 21, porque  $21 = 3 \times 7$ . En este ejemplo, 3 y 7 son factores de 21, del mismo modo en que 2 y 5 son factores de 40 ( $40 = 2 \times 2 \times 2 \times 5$ ). Para números pequeños, es fácil encontrar factores mentalmente. Si los números son más grandes, se pueden utilizar computadoras clásicas para resolver el problema de encontrar factores. El desafío matemático consiste en que, pese a los esfuerzos de los matemáticos por décadas, no ha sido posible encontrar ningún algoritmo clásico que permita resolver el problema de la factorización de forma eficiente. En términos sencillos, esto quiere decir que si nos dan un número entero muy grande (y lo suficientemente complejo), a las supercomputadoras de hoy podría tomarles cientos de años resolver el problema. Tan firme es la creencia en que el problema de la factorización es duro para las supercomputado-

ras clásicas, que existen algoritmos para proteger la información que se basan en la idea de que ningún hacker va a poder factorizar de forma eficiente con ninguna computadora disponible actualmente.

Es aquí donde la computación cuántica muestra su potencial revolucionario. Se sabe a ciencia cierta que si se pudiera construir una computadora cuántica lo suficientemente grande y tolerante a errores, sería posible resolver el problema de la factorización de forma eficiente (en tiempo polinomial con respecto al número de bits  $N$  del número en cuestión). Mientras que a una computadora clásica le llevaría mucho más tiempo (subexponencial en  $N$ ) utilizando el mejor algoritmo conocido al momento. Es decir, que con una computadora cuántica, se podría factorizar un número entero muy grande y complejo en minutos o segundos (tarea que, como dijimos arriba, a las supercomputadoras actuales puede llevarles décadas). Esto es exactamente lo que permite hacer el algoritmo cuántico que lleva el nombre del científico de la computación Peter Shor. Utilizando este algoritmo, se podría quebrar el protocolo de encriptación conocido como RSA, el cual es utilizado ampliamente en el sector público y privado. Es decir, la mera posibilidad de que existan computadoras cuánticas podría llegar a poner en riesgo la seguridad informática de muchas instituciones. Este es un ejemplo de por qué la computación cuántica despierta tanto interés, y de por qué se invierten del orden de miles de millones de dólares a nivel mundial en esta área, ya sea para construir computadoras cuánticas, o para saber si los competidores son capaces de desarrollarlas, o no.

Es muy importante mencionar que el hecho de que no se conocen algoritmos clásicos que permitan

resolver el problema de la factorización de forma eficiente, no implica necesariamente que no existan tales algoritmos. Al día de hoy, no existe una prueba matemática de que no existan algoritmos clásicos que permitan factorizar de forma eficiente. Esto quiere decir que, incluso si pudiéramos construir algún día computadoras cuánticas que puedan factorizar de forma eficiente números lo suficientemente grandes como para superar a cualquier supercomputadora clásica corriendo algoritmos clásicos que conocemos hoy, ello no constituía por sí solo una prueba de que la TCTE es falsa. Para demostrar su falsedad, sería necesario, además, demostrar que no existen algoritmos clásicos que permitan factorizar de manera eficiente. Este desafío teórico indica que, hoy por hoy, la falsedad de la TCTE es una hipótesis de trabajo relevante, pero que aún es necesario realizar más investigaciones para poder obtener una prueba de su falsedad.

Además del de Shor, otro algoritmo cuántico interesante es el de Grover. Este permite resolver un problema de búsqueda en una base de datos no estructurada. El aspecto ventajoso respecto es que permite una aceleración respecto del algoritmo clásico óptimo usado para resolver el mismo problema. Es importante mencionar que, a diferencia del algoritmo Shor, en el cual se obtiene una aceleración suprapolinomial respecto a los algoritmos clásicos conocidos, en el caso de Grover, la aceleración es cuadrática<sup>1</sup>. En palabras sencillas, esto quiere decir que, si a una computadora clásica le toman 1.000.000 pasos resolver el problema de búsqueda, a una computadora cuántica aplicando el algoritmo de Grover le tomaría solamente 1000. Es importante remarcar que el algoritmo de Grover tampoco constituye una prueba de que la TCTE sea falsa. El problema

de búsqueda no estructurada tiene un costo exponencial para una computadora clásica. Dado que el algoritmo de Grover sólo permite una aceleración cuadrática, el problema sigue siendo exponencial para las computadoras cuánticas. En ese caso, la solución cuántica no da lugar a una resolución eficiente, la cual exige un costo polinomial.

Además del problema de la simulación, los algoritmos de Shor y Grover, existen también otras áreas en las cuales hay indicios de que las computadoras cuánticas podrían llegar a dar lugar a ventajas significativas respecto de los algoritmos clásicos. Estas investigaciones van desde la resolución de problemas de optimización, hasta la resolución de problemas de aprendizaje automatizado. Abordar estas investigaciones está más allá del alcance de este artículo corto e introductorio. Nos limitaremos a mencionar que, si bien se han obtenido resultados promisorios en los últimos años, es aún necesario que tengan lugar más desarrollos, tanto en materia de algoritmos, como de hardware cuántico, de forma tal de alcanzar el objetivo de obtener aplicaciones comerciales significativas o, más en general, de impacto social más allá de la investigación en física básica. Esta discusión nos lleva al problema de la siguiente sección: ¿Cuál es el estado del arte de la computación cuántica hoy?

## ■ ESTADO DEL ARTE DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA EN LA ACTUALIDAD

Desde el punto de vista tecnológico, vivimos en un momento histórico apasionante en el siguiente sentido: ya existen prototipos de computadoras cuánticas, muchas de las cuales son accesibles al público general (The Quantum Insider, 2025). Estos prototipos son desarrollados por dis-

tintas empresas privadas, así como por universidades e institutos de investigación públicos.

Otro aspecto relevante del momento actual, es que varios laboratorios y empresas han anunciado que sus prototipos pueden resolver tareas que a las supercomputadoras actuales les llevarían cientos o miles de años. En otras palabras, ya hay laboratorios de investigación que afirman que sus prototipos de computadoras cuánticas han alcanzado lo que se conoce como *supremacía cuántica*. Como ejemplos de proclamas de supremacía cuántica, podemos mencionar a la empresa Xanadú, la cual utilizando una arquitectura de computadora cuántica fotónica (aproximadamente 126 fotones) logró resolver el problema de muestreo bosónico Gaussiano (Madsen, 2022); Google, con su procesador Willow, que resolvió la simulación de muestreo de circuitos cuánticos aleatorios con una computadora de qubits superconductores, al mismo tiempo que presentó resultados alentadores en materia de corrección de errores (Google Quantum AI, 2025); la computadora Zuchongzhi 3.0, que resolvió la tarea de muestrear circuitos cuánticos aleatorios con 105 qubits superconductores (Dongxin Gao, 2025).

Sin embargo, es importante introducir algunos conceptos fundamentales, así como tener en cuenta algunas sutilezas, de forma tal de evitar extraer conclusiones apresuradas acerca del estado del arte de la computación cuántica hoy. Por un lado, los prototipos disponibles en la actualidad funcionan de forma imperfecta: tienen errores. Pese a algunos resultados promisorios, no se conoce aún ninguna forma efectiva de implementar algoritmos de corrección de errores en los prototipos de computadoras cuánticas existentes. Por otro lado, el tamaño de las computadoras cuánticas disponibles hoy

es muy pequeño, y van de decenas a unos pocos cientos de qubits. Estos dos efectos combinados, hacen que sea imposible aplicar algoritmos tales como el de Shor o el de Grover, y resolver problemas significativos. Esto implica que, en particular, no es posible quebrar algoritmos de encriptación tales como RSA con los prototipos disponibles actualmente.

Llegado este punto, es importante introducir el concepto de *ventaja cuántica*. Se dice que se ha alcanzado la ventaja cuántica, en caso de que exista alguna tarea relevante desde el punto de vista comercial, o con impacto social, que pueda ser llevada a cabo por una computadora cuántica de forma eficiente, mientras que a cualquier supercomputadora clásica físicamente construíble le resulte muy costoso. Hay acuerdo en la actualidad en que no hemos alcanzado aún la era de la ventaja cuántica, dado que ninguna de las pruebas de principio de aplicaciones comerciales ha dado lugar a una ventaja significativa y convincente respecto de los algoritmos clásicos conocidos. Existen muchas propuestas que van desde simulaciones de materiales complejos hasta la resolución de problemas de optimización de forma híbrida (es decir, combinando computación cuántica con computación de alto rendimiento HPC).

Por otro lado, es importante mencionar que aún las pruebas de supremacía cuántica tienen por delante muchos desafíos. A modo de ejemplo, consideramos el caso de la empresa Google Quantum AI y su computadora cuántica Sycamore. En el 2019, la empresa anunció que había podido resolver el problema que se conoce como muestreo de circuitos cuánticos aleatorios con Sycamore en unos pocos segundos (Arute, 2019). En su publicación, estimaron que la misma tarea le costaría a una supercomputadora clásica

del orden de 10.000 años. Sin embargo, unos meses después, IBM anunció que había podido resolver la misma tarea en tres días con una supercomputadora clásica (Pednault E., 2019). Paralelamente, un equipo de investigadores de China resolvió con un algoritmo clásico el problema en unos pocos segundos (Y. A. Liu, 2021).

El ejemplo de Google con Sycamore es interesante, dado que ilustra la complejidad del problema. Por un lado, los experimentos de supremacía cuántica suelen depender de hipótesis que son difíciles de comprobar. Por otro lado, aún hay muchas cosas que se desconocen en el ámbito de la computación clásica: los algoritmos clásicos y las arquitecturas de computadoras clásicas están también en constante desarrollo, lo cual da lugar a una auténtica competencia entre estos dos tipos de tecnologías. Nuevos desarrollos en el campo de la computación clásica, podrían dar lugar a formas más efectivas de simular los experimentos en computadoras cuánticas en la actualidad.

Sin embargo, más allá de que los experimentos de supremacía cuántica puedan dar lugar a discusiones acaloradas entre los y las especialistas, hay acuerdo en que estamos en una etapa histórica en la que hay prototipos de computadoras cuánticas que realizan tareas que ponen en jaque a las capacidades de las computadoras clásicas más potentes disponibles en la actualidad. Se espera que los próximos años den lugar a nuevos desarrollos, cada vez más interesantes, y con el norte de buscar aplicaciones comerciales que den lugar a una ventaja significativa respecto a los algoritmos clásicos.

En este escenario, es también importante mencionar el concepto de utilidad cuántica. Se dice que se ha alcanzado la era de la *utilidad cuántica*.

tica (IBM Quantum, 2023), cuando existan prototipos de computadoras cuánticas capaces de resolver problemas que tengan un interés en la investigación científica, y que sean muy duros para las computadoras clásicas. Es razonable afirmar que algunos experimentos actuales tienen un indudable interés académico. Pero es también importante aclarar que muchas proclamas de utilidad cuántica podrían ser desafiadas por el desarrollo de nuevos algoritmos clásicos en los próximos años.

La existencia de dispositivos imperfectos de escala intermedia, los cuales realizan tareas que representan un desafío para las supercomputadoras clásicas, en combinación con la inexistencia de protocolos de corrección de errores escalables, nos permiten afirmar que estamos en lo que se conoce como era NISQ, las cuales son las siglas en inglés de Noisy Intermediate Scale Quantum, para referirse a la existencia de dispositivos ruidoso de escala intermedia (The Quantum Insider, 2023). Uno de los objetivos principales de las investigaciones en la actualidad es desarrollar protocolos de corrección de errores escalables que den lugar a computadoras cuánticas programables tolerantes a errores, lo suficientemente grandes como para aplicar algoritmos como el de Shor y obtener una ventaja significativa en problemas con relevancia comercial.

## ■ CONCLUSIONES

La computación cuántica es un modelo de computación que se apoya en las propiedades peculiares de los sistemas cuánticos para resolver de forma eficiente problemas que se creen muy costosos para las computadoras clásicas más poderosas. Como tales, constituyen una apuesta tecnológica promisoría, que podría

llegar a dar lugar a un cambio tecnológico disruptivo y con profundo impacto social, en caso de que sea posible que algunas de las propuestas de arquitecturas existentes se desarrollen en su pleno potencial.

Existen en la actualidad prototipos de computadoras cuánticas, los cuales están disponibles comercialmente. Si bien hay experimentos relevantes que muestran el potencial de estos prototipos y que desafían a las supercomputadoras clásicas existentes, aún no se ha alcanzado un estado de desarrollo tal que permita obtener ventajas comerciales significativas. A pesar de ello, los desarrollos de los últimos años sugieren que es razonable esperar que nuevos descubrimientos y avances permitan alcanzar una mejora significativa en la performance de esta tecnología en los próximos años.

En la actualidad, diversos grupos de investigación en Argentina se dedican al estudio de la física cuántica desde múltiples perspectivas. Una lista extensa se puede encontrar en “Mapa de la Cuántica en Argentina” (Mapa de la Cuántica en Argentina, 2025, AFA: [https://gbosyk.github.io/mapa\\_cuantico\\_argentina/](https://gbosyk.github.io/mapa_cuantico_argentina/)), hecho a partir de la información recabada por la Div. de Fundamentos de la Asociación Física Argentina. Destacan aquellos enfocados en la teoría de la información cuántica y sus aplicaciones tecnológicas.

En lo que respecta específicamente a la computación cuántica, el ecosistema local se divide en tres ejes fundamentales:

- **Hardware:** Desarrollo de prototipos de *qubits* y componentes físicos.
- **Teoría:** Investigación en los fundamentos teóricos del campo.

- **Software y Algoritmos:** Un puente vital donde se trabaja tanto en el diseño de algoritmos para dispositivos NISQ —buscando aplicaciones prácticas inmediatas— como en el software de testeo y control de hardware.

A pesar de que la computación cuántica es todavía una disciplina emergente, la inversión sostenida de los sectores público y privado a nivel global asegura un mercado consolidado y en plena expansión. Argentina cuenta con recursos humanos altamente calificados y capacidad instalada en laboratorios para insertarse competitivamente en distintos eslabones de esta cadena de valor. Esto permite no solo monitorear los avances a nivel mundial, sino también dar pasos concretos en materia de soberanía técnica. En relación a esta dirección estratégica, en el año 2022 el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación creó el Programa institucional de Fortalecimiento de la Ciencia y las Tecnologías Cuánticas destinado a promover la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la formación de recursos humanos en el país. Este programa se basó en un Informe del estado de la situación elaborado por investigadores y representantes de distintas instituciones. A finales de 2025 tuvo lugar un acuerdo interuniversitario -que involucró a una decena de universidades nacionales y otras instituciones dedicadas a la investigación científica- diseñado para potenciar la formación de especialistas y la investigación aplicada, facilitando así la integración de estas tecnologías en el sector productivo nacional.

**Agradecimientos:** Los autores agradecen a Ariel Bendersky por las observaciones sobre algunos conceptos fundamentales de complejidad algorítmica abordados en este artículo.

## ■ GLOSARIO

**Algoritmo de Grover:** Algoritmo cuántico que permite buscar en una base de datos no estructurada con una aceleración cuadrática respecto al mejor algoritmo clásico posible.

**Algoritmo de Shor:** Algoritmo cuántico capaz de encontrar los factores primos de un número entero muy grande de forma eficiente, lo que amenaza algunos sistemas de encriptación actuales como RSA. Reduce la complejidad del tiempo subexponencial a polinómico, lo que permite factorizar números grandes en horas o días, en lugar de miles de años.

**Bit:** Unidad básica de la información clásica. Se representa físicamente en sistemas digitales con dos estados mutuamente excluyentes (0 y 1).

**Entrelazamiento cuántico:** Propiedad exclusiva de la mecánica cuántica por la cual dos o más sistemas quedan fuertemente correlacionados, de modo que el estado de uno no puede describirse de forma independiente del estado del otro, sin importar la distancia física que los separe.

**Era NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum):** Término que describe la era actual de la computación cuántica, caracterizada por procesadores de tamaño intermedio (decenas a cientos de qubits) que son ruidosos y carecen de corrección de errores escalable.

**Qubit (Quantum bit):** Análogo cuántico del bit. Es un sistema físico de dos niveles que, gracias a las leyes de la mecánica cuántica, puede encontrarse en el estado 0, en el estado 1, o en cualquier superposición lineal de ambos simultáneamente.

**Superposición:** Principio cuántico que permite a un sistema físico existir en múltiples estados a la vez hasta el momento de ser medido.

**Supremacía cuántica:** El hito de demostrar experimentalmente que una computadora cuántica puede resolver un problema específico (sea o no de utilidad práctica) en un tiempo razonable, mientras que a la supercomputadora clásica más potente le tomaría cientos o miles de años.

**Tesis de Church-Turing Extendida:** Hipótesis fundamental de la informática teórica clásica que postula que cualquier cálculo realizable físicamente puede ser simulado de manera eficiente por una máquina de Turing probabilística clásica. La computación cuántica pone en duda la validez de esta tesis extendida.

## ■ BIBLIOGRAFÍA:

Arute, F., Arya, K., Babbush, R. et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature* 574, 505–510 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>

Bub, Jeffrey. 2017. “Entrelazamiento cuántico e información”. En *Diccionario Interdisciplinar Austral*, editado por Claudia E. Vanney, Ignacio Silva y Juan F. Franck. [http://dia.austral.edu.ar/Entrelazamiento\\_cuántico\\_e\\_información](http://dia.austral.edu.ar/Entrelazamiento_cuántico_e_información)

Dongxin Gao, Daojin Fan, Chen Zha, Jiahao Bei, Guoqing Cai, Jianbin Cai, Sirui Cao, Fusheng Chen, Jiang Chen et al. “Establishing a New Benchmark in Quantum Computational Advantage with 105-qubit Zuchongzhi 3.0 Processor.” *Phys. Rev. Lett.* 134, 090601, 2025. DOI:

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.090601>

Google Quantum AI and Collaborators. Quantum error correction below the surface code threshold. *Nature* 638, 920–926 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41586-024-08449-y>

Holik, Federico. 2016. “Teoría de la información de Claude E. Shannon”. En *Diccionario Interdisciplinar Austral*, editado por Claudia E. Vanney, Ignacio Silva y Juan F. Franck. [http://dia.austral.edu.ar/Teoría\\_de\\_la\\_información\\_de\\_Claude\\_E.\\_Shannon](http://dia.austral.edu.ar/Teoría_de_la_información_de_Claude_E._Shannon)

IBM Quantum (2023) What is quantum utility? IBM Quantum Blog. Recuperado de: <https://www.ibm.com/quantum/blog/what-is-quantum-utility>

Instituto para la Formación de la Educación, Tecnológico de Monterrey, Observatorio, 2024: “El Costo ambiental de la IA” tomado de <https://observatorio.tec.mx/el-costo-ambiental-de-la-ia/>

M. A. Nielsen and I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information* (Cambridge University Press, 2000)

Madsen, L.S., Laudembach, F., Askarani, M.F. et al. Quantum computational advantage with a programmable photonic processor. *Nature* 606, 75–81 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41586-022-04725-x>

NobelPrize.org (2025) The Nobel Prize in Physics 2025. Recuperado de: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2025/summary/>

Pednault E., Gunnels J., Maslov D., Gambetta J. (2019) On "Quantum Supremacy". IBM Research Blog. Recuperado de: <https://web.archive.org/web/20191101012410/https://www.ibm.com/blogs/research/2019/10/on-quantum-supremacy/>

The Quantum Insider (2025) Top Quantum Computing Companies. Recuperado de: <https://thequantuminsider.com/2025/09/23/top-quantum-computing-companies/>

Y. A. Liu et al., Closing the "quantum supremacy" gap: Achieving real-time simulation of a random quantum circuit using a new sunway supercomputer, in Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC '21) (Association for Computing Machinery, 2021) p. 3.

The Quantum Insider (2023) What is NISQ Quantum Computing? Recuperado de: <https://thequantuminsider.com/2023/03/13/what-is-nisq-quantum-computing/>

#### ■ NOTA

<sup>1</sup> La aceleración es cuadrática y óptima en el modelo tipo "oráculo" o "consulta a caja negra", sin embargo, en la práctica, este algoritmo tiene muchas limitaciones. A modo de ejemplo, la construcción del oráculo como un circuito cuántico puede ser complejo, difícil o incluso inviable para algunos problemas del mundo real, ya que puede requerir de un costo extra de procesamiento, anulando la ventaja cuántica.

# EL HARDWARE CUÁNTICO: qubits naturales y artificiales

**Palabras clave:** computación cuántica, qubits, iones atrapados, transmon, fluxonium, decoherencia.

**Keywords:** quantum computing, qubits, trapped ions, transmon, fluxonium, decoherence.

**Resumen:** La construcción de una computadora cuántica requiere identificar sistemas físicos capaces de almacenar y procesar información cuántica de manera controlada. En este artículo se analiza el problema del hardware cuántico desde una perspectiva conceptual, distinguiendo entre qubits naturales —basados en grados de libertad ya presentes en sistemas atómicos, moleculares o fotónicos— y qubits artificiales, diseñados e implementados en plataformas de estado sólido como circuitos superconductores o puntos cuánticos. Como marco orientador se discuten los criterios propuestos en 1996 por David DiVincenzo, que establecen requisitos físicos mínimos para la realización de un procesador cuántico en el modelo de circuitos. Se examinan aspectos como la escalabilidad exponencial del espacio de estados cuánticos, la preparación de estados iniciales puros, el aislamiento frente al entorno, la implementación controlada de transformaciones unitarias y la medición confiable del estado cuántico. Asimismo, se mencionan brevemente modelos alternativos de computación cuántica —como la computación adiabática y la basada en la medición— que imponen requisitos parcialmente diferentes. El objetivo es ofrecer una visión integrada del desafío experimental actual, subrayando las tensiones entre control, aislamiento y escalabilidad que definen el desarrollo del hardware cuántico contemporáneo.

■ **Schmiegelow, Christian T<sup>1,2\*</sup>;  
Cormick, Cecilia<sup>3</sup>;  
Tosi, Leandro<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Universidad de Buenos Aires, FCEyN, Departamento de Física. CABA, Argentina.

<sup>2</sup> CONICET-Universidad de Buenos Aires, IFIBA, CABA, Argentina.

<sup>3</sup> Instituto de Física de la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

<sup>4</sup> Grupo de Circuitos Cuánticos Bariloche, CAB-CNEA, CONICET, Instituto Balseiro, Bariloche, Argentina.

\*E-mail: schmiegelow@df.uba.ar

## Quantum Hardware: Natural and Artificial Qubits

**Abstract:** Building a quantum computer requires identifying physical systems capable of reliably storing and processing quantum information. This article examines quantum hardware from a conceptual perspective, distinguishing between natural qubits—based on intrinsic degrees of freedom of atoms, molecules, or photons—and artificial qubits engineered in solid-state platforms such as superconducting circuits or quantum dots. As a guiding framework, we discuss the criteria proposed in 1996 by David DiVincenzo, which outline the essential physical requirements for implementing a quantum processor within the circuit model. Key issues include the exponential growth of Hilbert space dimension, the preparation of well-defined pure initial states, isolation from environmental noise, the controlled implementation of unitary transformations, and reliable quantum measurements. Alternative models of quantum computation—such as adiabatic and measurement-based approaches—are briefly addressed, highlighting how different paradigms impose distinct physical demands. The aim is to provide an integrated overview of current experimental challenges, emphasizing the fundamental trade-offs between control, isolation, and scalability that shape the development of contemporary quantum hardware.

## ■ INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la computación cuántica ha evolucionado desde una propuesta teórica hacia un campo experimental de intensa actividad. Sin embargo, más allá de los algoritmos y de las promesas de ventaja exponencial, el desafío central sigue siendo físico: construir sistemas capaces de almacenar y manipular información cuántica de manera controlada. Este problema, conocido como el del hardware

cuántico, exige identificar plataformas experimentales que satisfagan una serie de requisitos fundamentales.

En 1996, dos años después de la aparición del algoritmo de Shor, el físico teórico David DiVincenzo formuló cinco criterios destinados a evaluar si una determinada plataforma física podría convertirse en un procesador cuántico. Estos requisitos se transformaron en una guía orientadora para buena parte de la

investigación en hardware cuántico dentro del llamado modelo de circuitos, la estrategia original y más difundida para realizar cómputos cuánticos.

En el modelo de circuitos, un algoritmo cuántico consiste esencialmente en: i) la preparación de un estado inicial simple; ii) una secuencia de transformaciones del estado cuántico mediante operaciones llamadas compuertas, que actúan sobre uno o dos subsistemas por vez;

y iii) la medición final del estado resultante.

Desde entonces se han desarrollado otros dos modelos de computación cuántica, equivalentes en capacidad de cómputo al modelo de circuitos: la computación cuántica adiabática y la computación basada en la medición. Más allá del interés teórico de formular un mismo cómputo de distintas maneras, cada modelo impone requisitos físicos parcialmente distintos, por lo que ciertas plataformas experimentales pueden resultar más adecuadas para uno que para otro.

En la computación cuántica adiabática, el cómputo se realiza mediante una evolución unitaria suave y progresiva del sistema, en lugar de una secuencia discreta de compuertas. La computación basada en la medición, en cambio, parte de un estado inicial altamente entrelazado y procede mediante mediciones locales sucesivas. Cada medición produce un resultado aleatorio, pero la elección de la medición y el resultado obtenido determinan la evolución del resto del registro cuántico, de modo que el cómputo completo emerge de la concatenación apropiada de estas mediciones.

A continuación se discuten los criterios propuestos por DiVincenzo, procurando respetar su formulación original, aunque señalando en qué medida deben adaptarse cuando se consideran modelos alternativos de computación cuántica.

## ■ CRITERIOS DE DIVINCENZO

### 1. EL SISTEMA DEBE ESTAR BIEN CARACTERIZADO Y SU DIMENSIÓN DEBE CRECER EXPONENCIALMENTE

La información cuántica debe ser almacenada y procesada en algún sistema físico. El primer criterio esta-

blece que dicho sistema debe estar bien caracterizado y que la dimensión de su espacio de estados debe crecer exponencialmente al agregar nuevos componentes.

En primer lugar, se trata necesariamente de un sistema cuya evolución esté gobernada por las leyes de la mecánica cuántica y que admita estados de superposición. Pero además, el espacio de estados debe conocerse con precisión. No importa si se trata de qubits (sistemas de dimensión 2), qutrits (dimensión 3) u otros sistemas de dimensión mayor; lo esencial es saber con qué tipo de portadores de información se cuenta. No resulta aceptable disponer de una mezcla mal caracterizada de distintos tipos de sistemas, ni desconocer el número efectivo de elementos que componen el procesador.

Este requisito se vincula con la posibilidad de escalar el sistema. La dimensión del espacio de estados está determinada por el número de estados distinguibles entre sí mediante mediciones ideales; no debe confundirse con la cantidad infinita de estados cuánticos posibles. Equivalentemente, puede entenderse como la cantidad de estados clásicos mutuamente excluyentes que sirven de base para construir superposiciones.

Si cada elemento del procesador es un sistema de dimensión  $d$  y se dispone de  $N$  elementos del mismo tipo, la dimensión del sistema compuesto crece como  $d^N$ . Este crecimiento exponencial es el que permite, al menos en principio, aspirar a una ventaja exponencial de cómputo frente a dispositivos clásicos.

### 2. DEBE SER POSIBLE PREPARAR UN ESTADO INICIAL BIEN DEFINIDO

El segundo criterio exige la posibilidad de preparar el sistema en un

estado inicial conocido y reproducible. No basta con que el estado sea siempre el mismo en promedio; debe tratarse de un estado cuántico lo más puro posible.

Por ejemplo, un estado térmico corresponde a una mezcla estadística de distintos estados energéticos, con probabilidades determinadas por la temperatura. En cambio, en un registro de  $N$  qubits, un estado inicial adecuado podría consistir en preparar todos los qubits en el estado asociado al valor lógico 0. Aunque la dificultad experimental de esta preparación depende de la plataforma considerada, este requisito suele ser más accesible que otros asociados al control dinámico o al aislamiento.

### 3. EL SISTEMA DEBE ESTAR SUFICIENTEMENTE AISLADO DE SU ENTORNO

Durante el cómputo, los estados cuánticos deben preservarse el tiempo suficiente para que las operaciones previstas puedan completarse. Si un elemento del procesador interactúa de manera no controlada con el entorno, su estado puede alterarse y convertirse en fuente de error.

Una consecuencia típica de estas interacciones es el entrelazamiento no deseado entre el sistema y su ambiente. Por ejemplo, cuando un átomo decae espontáneamente emitiendo un fotón, el estado conjunto átomo-campo queda correlacionado. Desde la perspectiva del sistema de interés, este proceso conduce a la llamada decoherencia, es decir, a la degradación de las propiedades cuánticas debida a la acción del entorno.

Cuando DiVincenzo formuló sus criterios, el nivel de error tolerable era aún incierto. Desde entonces se han desarrollado diversas estrategias para enfrentar este problema: códi-

gos de corrección cuántica de errores, subespacios casi libres de decoherencia y técnicas de mitigación y modelado de ruido. También se han propuesto qubits topológicos, que en principio podrían ser intrínsecamente más robustos frente a ciertas perturbaciones. A pesar de estos avances, el control del ruido ambiental continúa siendo uno de los principales desafíos, en particular en las plataformas de estado sólido que implementan lo que aquí denominamos qubits artificiales.

#### 4. DEBE SER POSIBLE IMPLEMENTAR TRANSFORMACIONES UNITARIAS CONTROLADAS

En el modelo de circuitos, el cómputo se realiza mediante una secuencia de transformaciones unitarias aplicadas al registro cuántico. Por lo tanto, la plataforma física debe permitir la implementación controlada de compuertas que actúen sobre uno o dos subsistemas por vez.

Para explotar el crecimiento exponencial del espacio de estados, las compuertas de dos qubits deben ser capaces de generar entrelazamiento. Existen distintos conjuntos de compuertas universales, en el sentido de que combinaciones apropiadas de ellas permiten aproximar cualquier evolución unitaria del sistema completo.

En la práctica, las compuertas de un solo qubit suelen ser relativamente sencillas de implementar, mientras que las interacciones entre subsistemas representan con frecuencia la principal fuente de error. Nuevamente, la cuestión del umbral de errores tolerables resulta central para determinar la viabilidad de una plataforma dada.

#### 5. DEBE SER POSIBLE REALIZAR MEDICIONES DEL ESTADO DEL SISTEMA

Finalmente, una vez ejecutado el algoritmo, es necesario extraer información del sistema mediante mediciones. Estas deben determinar el resultado clásico correspondiente y dejar el registro en un estado consistente con el valor observado, de acuerdo con la regla de Born.

En la descripción tradicional del modelo de circuitos, la medición completa se realiza al final del cómputo, lo que evita la propagación de errores hacia etapas posteriores. Sin embargo, muchos esquemas de corrección de errores requieren mediciones intermedias, cuyos errores sí pueden afectar pasos subsiguientes. En general, un proceso de medición imperfecto puede modelarse como una medición ideal precedida por errores en la memoria o en las compuertas, lo que permite integrar su análisis dentro del marco general de estudio del ruido.

#### ■ QUBITS NATURALES

Un **qubit** es una representación abstracta de un sistema físico que posee dos estados distinguibles de manera inequívoca. De forma análoga, un **qutrit** corresponde a un sistema con tres estados, se ha introducido **ququart** para cuatro estados, y en general un **qudit** refiere a un sistema con  $d$  estados. Pero, ¿qué son exactamente estos estados? La naturaleza nos ofrece múltiples sistemas físicos con una gran variedad de posibles estados que podemos aprovechar. Por ejemplo, dentro de un átomo, uno de sus electrones puede encontrarse en distintos orbitales. O una molécula puede hallarse en diferentes estados de vibración o rotación. De este modo, en un solo átomo o molécula es posible definir un qubit: basta con seleccionar, entre todos sus posibles estados, un par que resulte conveniente.

Los **qubits atómicos** han sido especialmente populares y exitosos en sus distintas realizaciones. Un átomo presenta muchísimas variables que podrían servir como qubits: la velocidad y posición del núcleo, las de cada electrón, o incluso los espines tanto nucleares como electrónicos. La configuración más habitual consiste en codificar el qubit en dos estados electrónicos; es decir, en dos configuraciones distintas de uno de los electrones del átomo. En el lenguaje de los orbitales de Bohr, se trataría de dos órbitas diferentes. Así, el qubit adopta el valor 0 o 1 según se encuentre en una u otra órbita, o, en otras palabras, según posea una u otra energía.

Para contar con un “buen” qubit, es necesario elegir un par de estados que sean estables y controlables. Esto significa que deben estar lo suficientemente aislados del entorno como para conservar la información durante un tiempo relevante, pero, al mismo tiempo, ser susceptibles de manipulación externa para realizar las operaciones lógicas necesarias.

Para empezar, es común elegir **átomos hidrogenoides**. Es decir, átomos que poseen capas electrónicas cerradas y un único electrón en la capa de valencia. Quienes utilizan átomos neutros como plataforma suelen optar por **átomos alcalinos**, que ya son de por sí hidrogenoides. Por otro lado, quienes trabajan con átomos ionizados suelen emplear **átomos alcalinotérreos**, que al ser ionizados una sola vez quedan con un único electrón de valencia, adoptando así la configuración de un átomo hidrogenoide. Estas elecciones simplifican enormemente la estructura atómica y permiten seleccionar y controlar con mayor facilidad un par de estados. Con un solo electrón, los tres qubits más utilizados reciben los nombres de **magnético**, **reloj** y **óptico**. Cada uno presenta ventajas y desafíos propios.

El **qubit magnético**, por ejemplo, se define en los dos estados de espín del electrón en su estado fundamental. Estos estados tienen tiempos de vida extremadamente largos (de horas o incluso días) y son fáciles de controlar tanto con ondas de radio como con láseres. Su principal dificultad radica en que son muy sensibles a fluctuaciones magnéticas, lo que provoca la pérdida de una propiedad denominada coherencia cuántica. Para mitigar este problema, se aplican diversas técnicas de aislamiento y protocolos en **subespacios libres de decoherencia**, lo que permite alcanzar tiempos de coherencia de hasta varios segundos.

El **qubit reloj** también se basa en estados de espín del electrón, pero en átomos cuyo núcleo posee espín. En este caso existen ciertos estados —todavía dentro del subespacio fundamental— que son prácticamente insensibles a los campos magnéticos. Es decir, combinan la larga vida característica de los estados fundamentales, con una gran coherencia. Su nombre proviene de que justamente estos estados se emplean como referencia de frecuencia en los relojes atómicos, como el famoso reloj de cesio-133, o en la nueva generación de **relojes atómico-ópticos**. La dificultad de este tipo de qubits es que, al trabajar con átomos cuyo núcleo tiene espín, la estructura de niveles se vuelve mucho más compleja y el control de todas las operaciones necesarias resulta más difícil. Sin embargo, el progreso del campo ha superado estas limitaciones, y hoy en día los qubits reloj se cuentan entre los más exitosos.

El **qubit óptico**, o **metaestable**, se define propiamente en dos estados orbitales distintos del electrón de valencia. A diferencia de los dos anteriores —donde el qubit se construye con los dos posibles espines de un electrón en un mismo orbital—, en

este caso los estados electrónicos son diferentes: uno fundamental y otro excitado. Para ello, el estado excitado debe ser **metaestable**, es decir, con una vida media suficientemente larga en comparación con el tiempo requerido para las operaciones y el cómputo. En condiciones normales, casi todos los estados excitados decaen en unos pocos nanosegundos, ya que están conectados con niveles inferiores mediante transiciones dipolares eléctricas. Sin embargo, existen algunos átomos con estados metaestables de vidas medias mucho más prolongadas, desde milisegundos hasta segundos o incluso minutos. Ejemplos emblemáticos son los iones de calcio, bario e iterbio. Estos estados han sido empleados como qubits en las primeras generaciones de computadoras cuánticas y también en aplicaciones como relojes atómico-ópticos, gravímetros y experimentos de física fundamental más allá del modelo estándar.

Existe una **infinidad de sistemas naturales** que presentan niveles discretizados de energía y que pueden aprovecharse en diversas aplicaciones de la computación y de otras tecnologías cuánticas. En prácticamente todos ellos, un electrón queda confinado en una región del espacio por la acción de otras cargas eléctricas, lo que genera niveles discretos de energía que luego pueden manipularse mediante ondas electromagnéticas. Desde átomos y moléculas, hasta los llamados centros de color en sólidos cristalinos, se han identificado y desarrollado sistemas cuánticos controlables en múltiples escalas. Tal vez uno de los más conocidos —por su enorme popularidad— merezca una breve discusión: los **centros de vacancia de nitrógeno** en diamante.

Los **centros de vacancia de nitrógeno** (en inglés, *NV centers*) en diamante constituyen un sistema

cuántico particular que surge de la interacción entre un átomo y la red cristalina que lo rodea. En este caso, la red cristalina es la del carbono en su configuración de diamante. Allí, dos sitios de la red se modifican: en uno se sustituye un átomo de carbono por uno de nitrógeno, y en el sitio vecino queda un hueco, es decir, la ausencia de átomo. Debido a la naturaleza del nitrógeno, uno de sus electrones interactúa con los orbitales de los átomos circundantes, formando un sistema atómico efectivo.

Este tipo de configuraciones no es exclusivo del diamante: aparecen en muchos cristales transparentes y reciben el nombre de **centros de color**, ya que confieren color o tinte al material al permitir la absorción y emisión de energía entre distintos estados electrónicos de ese centro. Lo particular del centro NV en diamante es que los estados que constituyen su nivel fundamental están lo suficientemente desacoplados del entorno cristalino como para preservar su coherencia durante varios microsegundos, incluso a temperatura ambiente.

Gracias a estas propiedades, los centros NV han encontrado numerosas aplicaciones y llegaron a ser protagonistas de un hito histórico: la primera verificación experimental de la **desigualdad de Bell libre de loopholes** tanto de causalidad como estadísticas.

## ■ IONES Y ÁTOMOS DE A UNO

Uno de los grandes desarrollos que transformaron el mundo de lo posible en el régimen cuántico fue el **control individual de átomos, electrones y moléculas**. Poder manipular estas partículas una por una no era en absoluto evidente cuando se formuló la mecánica cuántica a principios del siglo XX. Sin embargo, hacia fines de ese siglo ya exis-

tían diversas técnicas que permitían **enfriar, atrapar y controlar átomos individualmente**.

Para atrapar y controlar un átomo es crucial contar con un método de **enfriamiento**, que reduzca o detenga su movimiento. Imaginemos un átomo libre, a temperatura ambiente, formando parte de un gas: se mueve a velocidades de cientos de kilómetros por hora, lo que hace prácticamente imposible confinarlo en una región pequeña del espacio para manipularlo. Durante los años '80, el avance de los láseres y de la electrónica condujo al desarrollo de varias técnicas conocidas como **enfriamiento láser**, que permiten reducir la temperatura de los átomos hasta cercanías del cero absoluto, dejándolos prácticamente inmóviles. La idea básica consiste en ajustar los láseres de manera que los átomos solo absorban fotones cuando, al hacerlo, entreguen parte de su

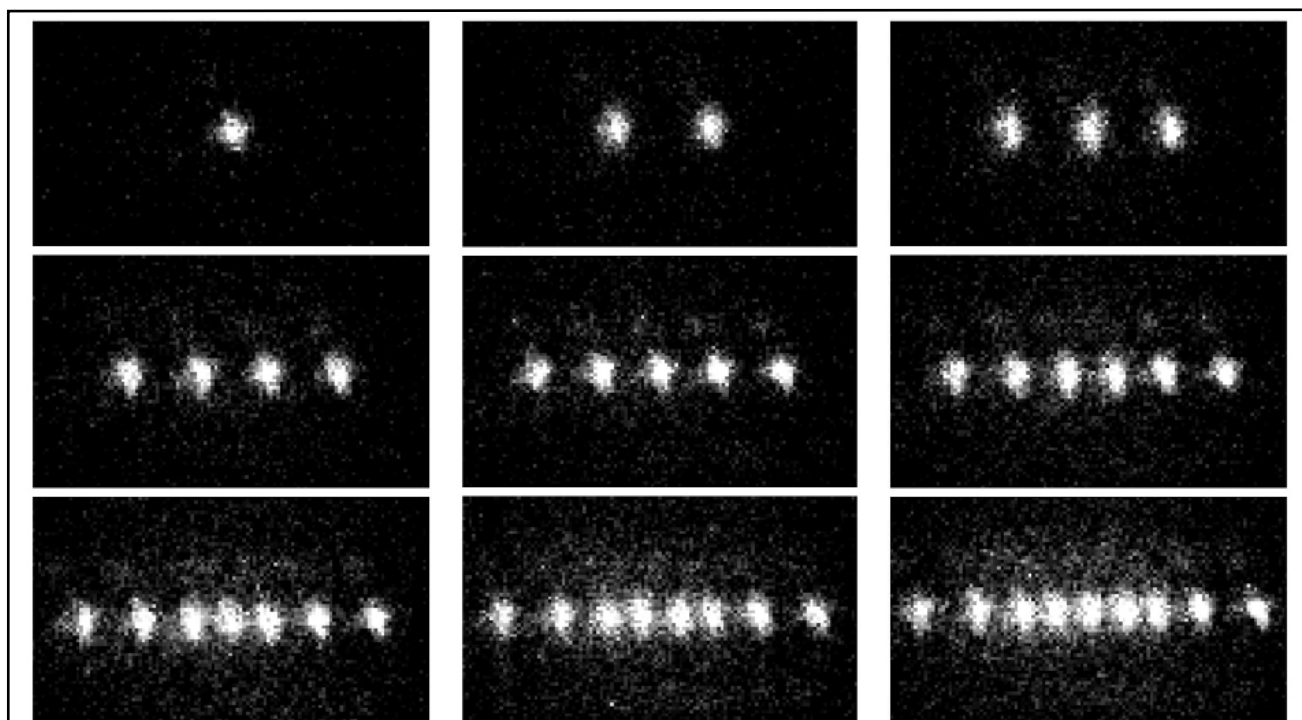
energía cinética. Así, cuando el átomo reemite, lo hace con un fotón de mayor energía, y en consecuencia se enfría.

Las técnicas de enfriamiento láser permiten alcanzar temperaturas del orden de los **mili, micro o incluso nanokelvin**. En esas condiciones, los átomos quedan detenidos en su estado fundamental de movimiento. Este es un primer paso indispensable para poder controlar con precisión tanto su posición como su velocidad, y al mismo tiempo resulta esencial para manipular con exactitud sus estados internos, ya que elimina casi por completo la incertidumbre que introduce el movimiento por efecto Doppler en el control y la medición de las energías de transición.

Además del enfriamiento, se requiere un **mecanismo de confinamiento** que permita atrapar una cantidad controlada de átomos en

una región del espacio. Para partículas cargadas, como iones o electrones, se utilizan **trampas electromagnéticas**, como la de Paul o la de Penning. Para partículas sin carga eléctrica, como los átomos neutros, la técnica más extendida es la de las **pinzas ópticas**.

Una **trampa electromagnética** es un conjunto de electrodos que permiten confinar partículas cargadas en una región del espacio mediante campos eléctricos y magnéticos. La más utilizada hoy en día en experimentos con iones es la **trampa de Paul**, que emplea un cuadrupolo eléctrico oscilante para generar un potencial efectivo en una zona del espacio, permitiendo atrapar las partículas cargadas. Al confinar más de un ion, estos se organizan en **cristales de Coulomb**, cuyas formas dependen de la geometría de los electrodos y de los potenciales aplicados. Por ejemplo, en una trampa



**Figura 1.** Secuencia de fotos captadas en una cámara CCD de la fluorescencia de iones atrapados uno a uno en las trampas electromagnéticas del LIAF, de la UBA.

anular, de dos a catorce iones pueden organizarse en estructuras bidimensionales tipo “panqueque”, mientras que en una trampa lineal forman cadenas, zigzags u otras configuraciones más complejas.

Las imágenes de la **Figura 1** muestran, en todos los casos, la **fluorescencia de iones de calcio**, excitados por un láser resonante en una de sus transiciones atómicas. La separación típica entre iones es de unos pocos micrómetros y sus temperaturas están por debajo de un microkelvin. Las imágenes fueron tomadas en el Laboratorio de Iones y Átomos Fríos (LIAF) de la FCEyN, Universidad de Buenos Aires.

Estos experimentos se llevan a cabo en el interior de **cámaras de vacío**, evacuadas hasta presiones inferiores a  $10^{-11}$  milibar, para evitar que colisiones con átomos de fondo afecten a los iones atrapados. La carga de iones se realiza de manera estocástica, mediante el calentamiento de un crisol y la foto-ionización de los átomos neutros. Controlando la velocidad de este proceso, es posible detener la carga en el momento deseado o descartar iones hasta obtener la cantidad requerida.

En el caso de **átomos neutros**, la técnica más popular es la de las **pinzas ópticas**. Estas funcionan gracias al confinamiento que produce un láser fuertemente enfocado sobre un átomo cuando su frecuencia está desintonizada respecto de una transición atómica. Si el láser tiene menor energía que la transición, el átomo experimenta una fuerza atractiva hacia la región de mayor intensidad, quedando atrapado en el foco. Como estas fuerzas son mucho más débiles que las que actúan sobre partículas cargadas, resulta más difícil cargar y operar estas trampas. Sin embargo, ofrecen una gran versatilidad: permiten reconfigurar di-

námicamente la disposición de los átomos en el espacio, generando múltiples focos mediante técnicas holográficas. Durante muchos años, esta estrategia fue más compleja y quedó relegada frente a las trampas de iones. No obstante, en los últimos tiempos ha mostrado ser igual de poderosa, o incluso más. Tanto es así que, hacia 2025, el **récord de volumen cuántico** en un cómputo lo mantiene un dispositivo basado en átomos neutros atrapados.

### ■ PREPARACIÓN DE QUBITS ATÓMICOS

Una vez que contamos con uno o varios **iones atrapados**, llega el momento de empezar a hacer algo interesante con ellos. Los “soportes” ya están: ahora hay que **controlarlos**. Según el **criterio 2 de DiVincenzo**, debemos ser capaces de preparar los estados elegidos. La técnica más utilizada para ello es el **bombeo óptico**.

Para ilustrar cómo funciona este método de preparación de estados, consideremos un ejemplo sencillo. Tomemos como sistema un **qubit magnético**, es decir, el estado de espín del electrón fundamental en un átomo hidrogenoide. En este caso, el espín puede tomar dos valores, “arriba” o “abajo”, que asignaremos a los estados 0 y 1 del qubit. Para definir de manera precisa qué significa arriba y abajo, se aplica un **campo magnético externo** que fija una dirección en el espacio. Este campo, además, determina la separación en energía entre los dos niveles. Después del atrapado y enfriamiento de los átomos, y una vez apagados los láseres de enfriamiento, el electrón decae aleatoriamente a uno de los dos estados de espín. El objetivo de la preparación del estado inicial es forzar controladamente al electrón a ocupar uno de estos estados de manera inequívoca, y no dejarlo al

azar. Para lograrlo, se utiliza un **láser polarizado circularmente**, propagándose en la misma dirección que el campo magnético. Este láser induce transiciones en las que el espín solo puede aumentar. Si el electrón ya está en el estado de máximo espín, el láser no tiene efecto. En cambio, si está en el estado de mínimo espín, el átomo absorberá y emitirá fotones repetidamente, hasta decaer espontáneamente al estado de máximo espín. Una vez allí, el sistema queda “bloqueado”, sin posibilidad de seguir excitándose. De este modo, tras unos pocos ciclos de absorción y emisión, el átomo queda preparado en un estado fundamental bien definido. Con ello se logra la preparación confiable del estado inicial del qubit.

### ■ COMPUERTAS LÓGICAS

Una vez que uno preparó los estados iniciales, debe poder hacer las operaciones unitarias que constituyan el cálculo requerido. Estas pueden separarse en dos: las de un solo qubit y las de interacción entre qubits. Las primeras son relativamente sencillas y pueden realizarse con gran fidelidad, mientras que las segundas requieren de ingenio y son aún fuente de constante desarrollo.

Para realizar una evolución unitaria de un único qubit, no hace falta más que incidir sobre el átomo con radiación electromagnética sintonizada en la transición adecuada. Si es un qubit magnético, será una onda de radio; si es un qubit reloj, será una onda en el espectro de las microondas; si es un qubit óptico, será un láser. En cualquier caso, el control de la intensidad, la sintonía y la fase de la onda permite implementar cualquier compuerta unitaria de un qubit. Adicionalmente, es necesario poder hacer estas operaciones sobre cada átomo de manera independiente. Para eso, las técnicas

de radiofrecuencia y microondas no suelen ser las más convenientes, ya que estas ondas no pueden enfocarse átomo por átomo. Para resolver esta dificultad existen dos alternativas populares: una es utilizar gradientes de campos que desentonan los qubits y permiten así direccionar el control mediante la sintonía de la onda; la otra consiste en realizar transiciones entre estos niveles de baja energía mediante un proceso Raman estimulado, en el cual se utiliza un par de láseres que están desintonizados entre sí por exactamente la frecuencia del qubit. Este conjunto de técnicas permite hoy en día realizar operaciones de un qubit con fidelidades mejores que una parte en  $10^5$ .

Hacer interactuar átomos o iones entre sí de manera controlada, de modo de generar una evolución unitaria conjunta, es un desafío más complejo. Tanto en el mundo de los iones como en el de los átomos existe una técnica favorita. Para entender la dificultad, hay que recordar que la extensión de un átomo es del orden de un ångström (esto es, 0,1 nanómetro), mientras que la separación típica entre dos átomos o iones en las trampas es de aproximadamente un micrón (1.000 nanómetros). Es decir, en ambos casos, los átomos y los iones están separados entre sí más de 10.000 veces su tamaño. Esto hace que sea prácticamente imposible que uno de ellos sienta la presencia del otro de manera directa; a estas distancias, la interacción natural entre dos átomos es muy débil. La idea de cómo hacer una compuerta entre iones consiste en notar que los iones están atrapados en un potencial conjunto. Su carga eléctrica hace que la posición o el movimiento de uno afecte al del otro. Es decir, a pesar de estar lejos y de que el estado electrónico de uno no influya de manera significativa sobre el del otro, el estado

de movimiento del centro de masa de cada uno sí está fuertemente acoplado al del resto. Así, uno puede pensar en el movimiento conjunto de estos iones como un canal de información para comunicar su estado electrónico. Para hacer una compuerta controlada entre iones, se acopla el estado electrónico con el de movimiento, y así se transmite la información de uno a otro. El protocolo suele comenzar enfriando ambos iones al estado fundamental de movimiento. Luego, se aplica un pulso de luz sobre uno de los iones que transfiere su estado electrónico al de movimiento. Si el átomo estaba en 0, entonces no pasa nada; si estaba en 1, entonces comienza a moverse. Al moverse, arrastra también al otro. Después se aplica un pulso sobre el segundo átomo, que lo llevará a cambiar de estado sólo si estaba en movimiento, y a no hacerlo en caso contrario. Finalmente, se invierte el primer paso para devolver a los iones a su estado de reposo. Este protocolo es una compuerta CNOT (NOT controlada), donde el estado del segundo qubit cambia dependiendo del primero.

La compuerta que acabamos de describir es una versión simplificada de las que se utilizan en la práctica. En los últimos 30 años se han desarrollado diversos algoritmos que mejoran la fidelidad de estas compuertas, llegando a precisiones por debajo de una parte en  $10^4$  para compuertas entre un par de iones. Sin embargo, realizar esas operaciones de modo controlado y repetible para muchos iones requiere de un control detallado que todavía es difícil de conseguir.

En el campo de los átomos neutros, la técnica estrella para hacer que átomos distantes interactúen lleva el nombre de **compuerta de Rydberg**. Esta consiste en excitar al electrón de valencia a un orbital altamente

excitado, con números cuánticos principales entre 30 y 50. Este electrón tiene entonces un radio orbital mucho mayor, que puede acercarse al micrón y así sentir a otro átomo en la cercanía. La dificultad de este método es que el átomo también se vuelve sensible a cualquier campo externo, y por muchos años fue un gran desafío superar fidelidades del 95 %. Sin embargo, el desarrollo de la técnica ha llevado en los últimos diez años a que estas compuertas logren fidelidades comparables a las obtenidas con iones.

## ■ DETECCIÓN DE QUBITS ATÓMICOS

La última de las tareas fundamentales en la computación cuántica con átomos o iones es la **medición del estado de los qubits**. En este caso, la técnica más utilizada es la **fluorescencia dependiente del estado**. La idea básica es simple: si el átomo o ion se encuentra en uno de los dos estados que definen el qubit, responderá a un láser resonante emitiendo muchos fotones que pueden ser detectados; si está en el otro estado, permanecerá en silencio. Así, el problema de distinguir entre los estados 0 y 1 se traduce en observar la presencia o ausencia de fluorescencia.

Sin embargo, en muchos sistemas atómicos los dos estados del qubit tienen la misma respuesta óptica y fluorescen igual. Para resolver esto se recurre a un procedimiento llamado **shelving** (que podríamos traducir como cajoneo, ya que la palabra “estanteo” no existe en castellano). El esquema funciona de la siguiente manera: se elige un **estado auxiliar**, típicamente un estado electrónico de vida larga que no fluoresce bajo la acción del láser de detección. Antes de medir, se aplica una secuencia que transfiere uno de los estados del qubit (por ejemplo, el  $|1\rangle$ ) a este

estado auxiliar. Entonces, cuando se ilumina el átomo con el láser de detección, solo el otro estado del qubit (el  $|0\rangle$ ) produce fluorescencia. De esta forma, la fluorescencia observada indica inequívocamente que el qubit estaba en  $|0\rangle$ , mientras que la ausencia de fluorescencia corresponde a que estaba en  $|1\rangle$ . Como la emisión de cada ion o átomo puede producir cientos o miles de fotones, la señal es muy robusta y puede detectarse con eficiencias cercanas al 100 %. Este mecanismo ha convertido a la fluorescencia dependiente del estado en la técnica estándar de medición en computación cuántica con iones atrapados y también en muchos sistemas de átomos neutros.

### ■ DESAFÍO: COHERENCIA Y FIDELIDAD

Los primeros 20 años del siglo XXI evidenciaron una auténtica carrera por alcanzar altos grados de coherencia y fidelidad en la realización de compuertas lógicas con iones, átomos y otros sistemas cuánticos. Una carrera que, durante varios años, vinieron ganando los sistemas cuánticos naturales. En los primeros años los iones estuvieron a la cabeza, pero hoy los átomos, con sus compuertas de Rydberg, se han puesto codo a codo. Conseguir altos grados de coherencia implica obtener un sistema atómico que preserve los estados cuánticos inalterados por suficiente tiempo, de modo tal que sea posible realizar cálculos, es decir, durante lapsos más largos que los necesarios para efectuar una cierta cantidad de compuertas.

Para lograr mayor coherencia se han utilizado diversas estrategias. Por un lado, la búsqueda del soporte físico ideal: uno que ya por sí mismo conserve bien los estados, como por ejemplo los estados tipo reloj, insensibles a fluctuaciones magnéticas externas. Por otro lado, el de-

sarrollo de técnicas para aislar artificialmente el sistema del entorno, por ejemplo, apantallando campos espurios o diseñando sistemas de estabilización que compensen variaciones externas de temperatura y de campos que afectan a los átomos. Finalmente, se utilizan técnicas dinámicas que permiten deshacer la influencia del ruido externo. Estas últimas, conocidas en general como **desacople dinámico**, fueron inicialmente desarrolladas para resonancia magnética nuclear, y luego adaptadas y ampliadas por la comunidad de la computación cuántica.

Por otra parte, para realizar cómputo cuántico es necesario que las compuertas lógicas se ejecuten con gran precisión. A esta precisión la llamamos **fidelidad**, una medida de qué tan fiables son las operaciones realizadas. La construcción de computadoras cuánticas prácticas requiere operaciones con muy alta fidelidad. ¿Qué tan alta? Es aún una cuestión de debate y depende del protocolo de computación y de corrección de errores empleado, pero es seguro decir que se necesitan fidelidades superiores al 99,9%, es decir, compuertas correctas en más de 999 de cada 1.000 intentos. Difícil, pero no imposible: de hecho, ya se han alcanzado tanto en iones como en átomos neutros.

La dificultad de lograr compuertas de alta fidelidad radica en dos aspectos fundamentales. El primero es la estabilidad de los láseres, ondas o campos de control utilizados: un desafío principalmente tecnológico o ingenieril, pero que llevó años superar y continúa siendo perfeccionado. El segundo es que cada protocolo físico con el que se implementa una compuerta lógica tiene limitaciones propias de la interacción o del mecanismo empleado. La búsqueda y el desarrollo de nuevos protocolos que permitan com-

puertas de mayor fidelidad sigue siendo hoy uno de los frentes más activos. Un ejemplo de esto último son las compuertas lógicas realizadas mediante **transiciones Raman**. En ellas, la transición entre dos niveles se logra mediante la absorción de un fotón de un haz y la emisión en un segundo haz. La diferencia de energía entre estos dos fotones debe coincidir exactamente con la diferencia de energía entre los estados del qubit. Mantener estos láseres estables en frecuencia, potencia y enfoque sobre los átomos o iones constituye parte del desafío técnico. Además, para que estas compuertas funcionen, ambos láseres deben tener frecuencias cercanas, aunque no tanto a otra transición atómica. Cuanto más cerca están, más fuerte es la interacción, pero también mayor la probabilidad de error: si están demasiado sintonizados, en lugar de realizarse el proceso de dos fotones requerido, el átomo puede absorber solo un fotón y cambiar de estado aleatoriamente. Este balance entre sintonía e infidelidad impone un límite fundamental a las compuertas Raman, que depende de cada átomo y de la transición utilizada.

Aun así, se han logrado compuertas con fidelidades aceptables para el cómputo cuántico, y la búsqueda constante de nuevas transiciones atómicas que permitan operaciones cada vez más precisas sigue en pleno desarrollo.

### ■ DESAFÍO: ESCALABILIDAD

Una vez resuelto el desafío de la coherencia y la fidelidad, aparece un nuevo reto: el de la **escalabilidad**. Resulta que el camino para extrapolar lo que se hace con dos, tres o seis qubits hacia decenas o cientos de qubits no es pavimentado por los logros anteriores, sino que requiere ingenio y astucia. Requiere resolver varios desafíos abiertos aún, e

incluso, a veces, visitar los pasos anteriores para poder avanzar mejor. Un claro ejemplo de esto se dio hacia los años cercanos a 2010. Por esa época, un par de plataformas, en particular la de iones atrapados, había sido muy exitosa en realizar cómputo cuántico con 2 y hasta 6 u 8 qubits. Varios grupos de investigación y grandes laboratorios nacionales se embarcaron entonces en el proyecto de escalar estos sistemas a cientos de qubits. En esta dirección, muchos cambiaron sustancialmente sus sistemas de atrapado de iones y átomos por otros que, en principio, podrían atrapar no unos pocos átomos, sino cientos. Todos fracasaron rotundamente. Se vieron frente a la imposibilidad de realizar operaciones básicas que ya habían dominado años atrás.

Este fracaso al intentar integrar y multiplicar todo de golpe llevó a la comunidad a repensar la estrategia y avanzar más despacio: tomar lo conocido y avanzar con pasos incrementales seguros. Un ejemplo interesante de esto es el desarrollo del **CCD cuántico para iones**. La idea era construir trampas de iones que trabajaran de modo similar a los chips CCD (**charge coupled device**) utilizados en cámaras fotográficas. En estos chips, la luz se recibe y se transforma en carga eléctrica en una región separada en forma de cuadrícula. Luego, esta carga es movida por la cuadrícula hasta una zona donde se digitaliza y se transfiere al sistema de almacenamiento. De manera análoga, uno podía mover iones en trampas segmentadas y llevarlos de un lado a otro, trasladando así la memoria cuántica entre lugares de guardado y zonas de procesamiento. Una gran idea. Al querer implementar la idea del CCD cuántico aparecieron varios desafíos insospechados. Hasta entonces, las trampas de iones habían sido construidas

con piezas relativamente grandes, fabricadas en tornerías de precisión, a veces de tamaño milimétrico, pero que, en definitiva, estaban siempre bastante lejos de los iones. Al intentar miniaturizar las trampas, la comunidad experimentó con diversas técnicas de microfabricación, como las utilizadas en la industria de semiconductores, y se encontró con un sinfín de problemas: desde la rotura de materiales por los campos eléctricos fuertes, la carga de los dieléctricos por los láseres utilizados, hasta extrañas interacciones de los iones con las superficies de los metales cercanos. Un problema tan difícil y esquivo de resolver durante años que recibió el nombre de **calentamiento anómalo**, una manera elegante de decir: “no tenemos ni idea de qué está pasando, pero esto no funciona”.

Luego de los primeros fracasos estrepitosos, varios grupos aprendieron la lección y abordaron el problema de la escalabilidad paso a paso, delimitando las dificultades hasta resolverlas. Además, varios de estos desarrollos pasaron de la academia al sector privado o a proyectos nacionales, donde pudieron ser abordados con más paciencia, tiempo y recursos de los que normalmente se dispone en el mundo académico. Hoy día, tanto en iones como en átomos neutros, ya existen dispositivos capaces de realizar cómputo cuántico en un poco más de 100 qubits con gran fidelidad.

Sin duda, el desafío de pasar de 100 a 1.000, o de ahí a 10.000 qubits —en definitiva, a cantidades potencialmente útiles para la computación cuántica— traerá nuevas sorpresas y desconciertos que requerirán de gran ingenio y perseverancia para ser resueltos.

## ■ LA ACTIVIDAD EN EL LABORATORIO DE IONES Y ÁTOMOS FRÍOS DE LA FCEYN, UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

El Laboratorio de Iones y Átomos Fríos, ubicado en el Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires (FCEyN-UBA) y el IFIBA, representa un polo experimental pionero en la física cuántica de Argentina. La actividad central del grupo se enfoca en el confinamiento y enfriamiento de iones individuales, típicamente de calcio, utilizando trampas electromagnéticas de Paul en cámaras de ultra-alto vacío. Mediante la aplicación de técnicas avanzadas de enfriamiento láser, el equipo logra reducir la temperatura de estas partículas a millonésimas de grado por encima del cero absoluto. Al detener su movimiento casi por completo, podemos aislar a los iones de las perturbaciones del entorno y manipular sus estados cuánticos internos con un nivel de precisión asombroso, convirtiéndolos en qubits naturales excepcionales. Una de las líneas de investigación más originales y destacadas del laboratorio es **el estudio de la interacción de estos átomos atrapados con haces de luz estructurada**, como los vórtices ópticos que transportan momento angular orbital. El uso de esta luz “retorcida” abre mecanismos novedosos para excitar transiciones atómicas que normalmente estarían prohibidas, habilitando nuevas vías para el control coherente y la codificación de información cuántica. A través de este dominio sobre sistemas atómicos individuales, en el LIAF no solo abordamos preguntas fundamentales de la óptica cuántica sino que trabajamos directamente en la arquitectura del hardware cuántico. Las plataformas que diseñamos y operamos actúan como procesadores y simuladores cuánticos elementales, capaces de ejecutar compuer-

tas lógicas, explorar la dinámica del entrelazamiento y estudiar la decoherencia en tiempo real.

Más allá de los avances estrictamente científicos, la actividad del LIAF cumple un rol estratégico fundamental: la formación de recursos humanos altamente especializados en tecnologías cuánticas experimentales. El trabajo diario en el laboratorio exige un ecosistema interdisciplinario donde confluyen la óptica de extrema precisión, la electrónica de control rápido, el desarrollo de software instrumental y la física atómica de frontera. Esta labor integral forja a una nueva generación de científicos e ingenieros con capacidades técnicas únicas en la región. Con su trabajo, el grupo demuestra que es factible desarrollar hardware cuántico y realizar investigación experimental de punta en Argentina, consolidando la presencia del país en el mapa global de la segunda revolución cuántica.

■ QUBITS ARTIFICIALES

■ EL DESCUBRIMIENTO

El Premio Nobel de Física 2025 fue otorgado a Michel Devoret, John Clark y John Martinis por la demostración de la cuantización de los niveles de energía de un circuito eléctrico en 1985. Este fue un salto cualitativo en cuanto a probar experimentalmente que objetos macroscópicos (constituidos por miles de millones de átomos) pueden comportarse de acuerdo a las leyes de la mecánica cuántica. De hecho, los grados de libertad que los describen permiten describirlos como átomos artificiales donde aparecen niveles de energía discretos. Estos pueden absorber y emitir fotones en “cuantos” pero además, se pueden usar algunos de estos niveles, dos de ellos, para formar un qubit. Esta unidad de procesamiento cuántica puede ser controlada, generando transiciones de un nivel a otro y superposiciones

entre los dos estados, a partir de señales eléctricas alternas enviadas al circuito. Es difícil describir hasta qué punto este descubrimiento abrió las puertas de un nuevo mundo para la electrónica moderna, el mundo de los circuitos cuánticos. Para dar un ejemplo divertido, es fácil pensar en este átomo artificial accesible a todo momento, en un chip, listo para acoplarse a fotones en cavidades electromagnéticas o a otros átomos artificiales. Comparado con los átomos reales que deben ser atrapados en trampas ópticas, los circuitos cuánticos ofrecen interesantes ventajas. En particular la tuneabilidad de los parámetros que fijan las energías, los acoplamientos, etc, pueden ser elegidas en el momento del diseño y la fabricación.

■ CIRCUITOS CUÁNTICOS SUPERCONDUCTORES

Los circuitos cuánticos combinan componentes electrónicos tradicio-

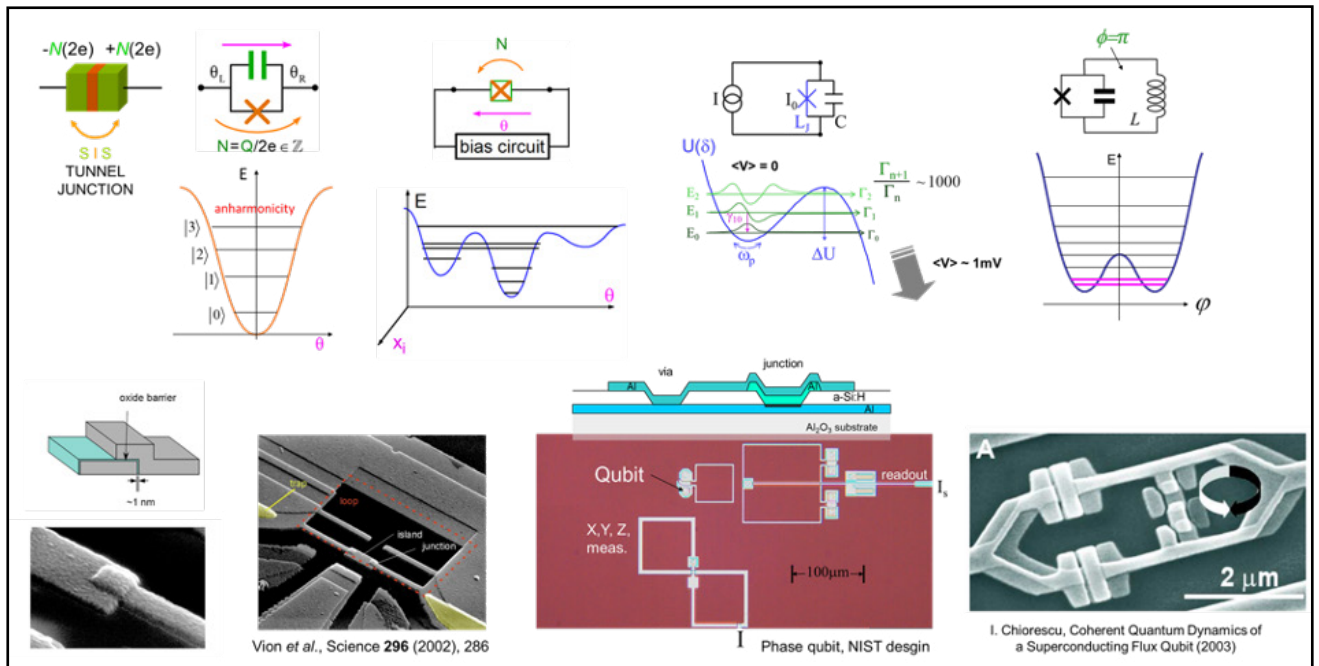


Figura 2. (panel superior) Juntura Josephson y diferentes combinaciones de componentes que dan lugar a niveles de energía característicos. (panel inferior) Fabricación de una juntura Josephson e imágenes de diferentes qubits superconductores de la primera generación: Quantronium, Phase qubit y Flux qubit. Estos evolucionaron en el transmon y el fluxonium.

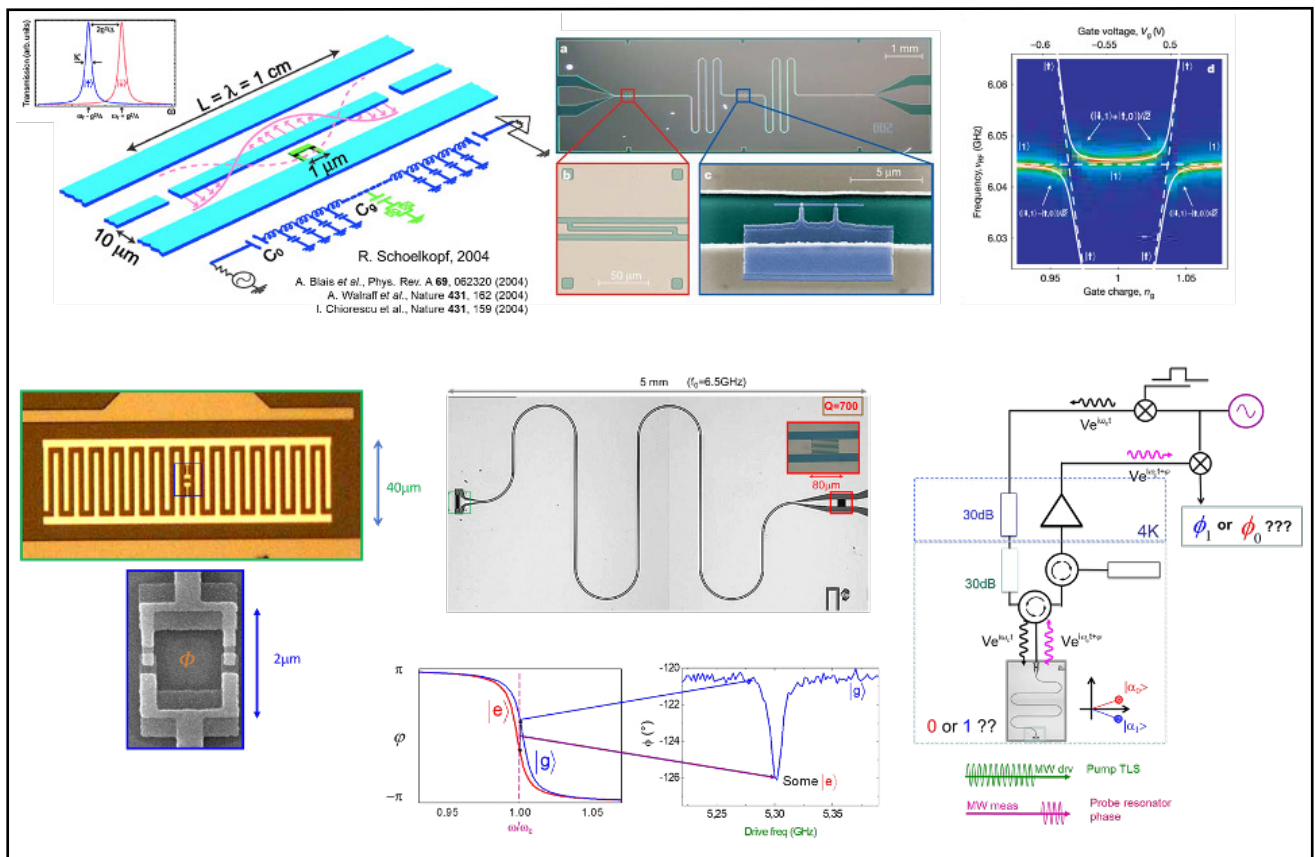
nales como capacitores e inductores con un elemento esencial, que es no-disipativo y no-lineal: la juntura Josephson (ver **Figura 2**). Una juntura Josephson está fabricada a partir de dos materiales superconductores separados por una delgada barrera túnel (típicamente un óxido). Es por esta razón que hablamos de circuitos cuánticos superconductores. Para proteger los niveles de energía, típicamente en el orden de los GHz, los mismos tienen que ser enfriados a muy bajas temperaturas, del orden de los milikelvin en criostatos de dilución. Además, tienen que estar aislados del ruido electromagnético y magnético. Se pueden hacer distintas arquitecturas de circuitos, lo que en los años recientes ha dado

lugar a diferentes “familias” de circuitos superconductores (ver **Figura 2**). Entre ellas, el transmon, es una arquitectura sencilla (una juntura Josephson en paralelo con un gran capacitor) que se ha popularizado como la opción elegida por algunas de las compañías más importantes (Google e IBM) en su carrera por construir una computadora cuántica comercial. El fluxonium es otra de las arquitecturas que está siendo estudiada recientemente como candidata para superar al transmon. Si bien estos circuitos tienen muchos niveles de energía, es común referirse a ellos como qubits en cuanto a que se elige un sweet spot de operación donde los niveles de más baja energía se separan suficiente de los

otros como para poder trabajar con ellos sin involucrar a los demás. Por supuesto, al operar los qubits dentro de procesadores cuánticos, una de las fuentes de error es el “derrame” o leakage fuera del espacio computacional, que significa poblar niveles más allá del  $|1\rangle$  y el  $|0\rangle$  del qubit.

### ■ OPERACIÓN Y LECTURA

Una vez que se fabrica un qubit superconductor, hay que resolver dos puntos importantes, de nuevo de acuerdo a los criterios antes mencionados: definir la estrategia para hacer operaciones, es decir, implementar compuertas y además, leer el estado del sistema, es decir medir la probabilidad de encontrar al sistema



**Figura 3.** (panel superior) Primera realización de acoplamiento fuerte en electrodinámica cuántica de circuitos: un qubit superconductor tipo Quantronium acoplado a un resonador microondas. El cruce evitado es el efecto del intercambio coherente de excitaciones. (panel inferior) Realización de cQED con un transmon acoplado a un resonador microondas. En un régimen dispersivo, la frecuencia del resonador depende del estado del qubit y por lo tanto la fase de la señal reflejada guarda la información del estado del qubit. De esta manera se puede realizar la espectroscopía del mismo.

en  $|1\rangle$  o  $|0\rangle$  luego de una operación o una secuencia de operaciones. Respecto al segundo aspecto, para la lectura del estado del sistema se utilizan hoy en días las herramientas de la electrodinámica cuántica de circuitos (cQED, por circuit quantum electrodynamics) que no es otra cosa que acoplar el qubit en tanto que átomo artificial a una cavidad electromagnética de modo que la frecuencia de la misma se vuelve dependiente del estado del qubit. En este sentido, al mandar una señal para medir la cavidad, la señal reflejada o transmitida da cuenta (su amplitud o su fase) del estado del sistema, como una suerte de puntero al "0" o al "1". Esta aguja se diseña de modo que la discriminación se puede realizar con gran fidelidad. Esta es otra de las grandes ventajas de los circuitos cuánticos como plataforma para la computación cuántica. Ver **Figura 3**.

Respecto al primer punto, en la mayoría de los casos las compuertas se implementan mandando pulsos microondas resonantes con la frecuencia del qubit. La duración de estos pulsos genera rotaciones del qubit pensado como una flecha en el espacio de Hilbert mapeado en una esfera. El polo norte corresponde al  $|0\rangle$  y el polo sur al  $|1\rangle$ . Una rotación de 90 grados, lleva al sistema del  $|0\rangle$  al ecuador, donde se encuentra en un estado superposición ( $|1\rangle+|0\rangle$ ). Estos pulsos son análogos a los que se emplean en resonancia magnética nuclear, y a los que se describieron antes para los qubits "naturales". Las rotaciones a lo largo de diferentes ejes se pueden lograr eligiendo la fase adecuada de los pulsos. Típicamente estos pulsos son de decenas de nanosegundos y hoy en día las compuertas son muy eficientes, se habla de una fidelidad del 99,99%, en el sentido que la evolución de los estados cuánticos dada por la implementación experi-

mental es prácticamente indistinguible de la evolución ideal dada por una matriz unitaria que se puede escribir en el cuaderno. Existe una estrategia alternativa para realizar compuertas utilizando transiciones Landau-Zener, mayormente útiles para el caso en que la frecuencia de los qubits es muy pequeña.

### ■ COMPUERTAS DE DOS QUBITS

La implementación de algoritmos cuánticos útiles requiere de la capacidad de poder realizar compuertas de un qubit y de dos qubits o compuertas entrelazantes. Existen diferentes maneras en la que esto se realiza en la práctica, por ejemplo, dos qubits pueden compartir un capacitor. Esto hace que las fluctuaciones cuánticas de la carga de un qubit A generen fluctuaciones del campo eléctrico en el otro qubit B que modifican su energía y recíprocamente, B sobre A. También pueden acoplarse dos qubits mediante un "acoplador", por ejemplo un circuito resonante que intercambia fotones con cada uno de ellos y los acopla de forma efectiva. Encontrar la mejor arquitectura para compuertas entrelazantes es un problema muy interesante. En particular en un procesador cuántico donde hay que conectar muchos qubits. Uno de los desafíos es que si el acoplamiento es muy fuerte, los niveles de energía individuales de los qubits se ven muy modificados por lo que aparece cross-talk, esto significa que se efectúan rotaciones indeseadas del qubit B aunque se esté enviando la señal al qubit A. Por otro lado, si el acoplamiento es muy débil, las compuertas de entrelazamiento se vuelven muy lentas; el tiempo de intercambiar cuantos de excitación depende de este acoplamiento.

Esto muestra también una de las particularidades de los procesadores de qubits superconductores: los

acoplamientos son de a dos. Hoy en día, la elección de topología de conectividad de los qubits va de la mano del código de corrección de errores que se quiere implementar. Esto quiere decir que se implementan mediciones adicionales en un conjunto de qubits (un estabilizador) que dan información sobre la ocurrencia de un error (un síndrome). Sabiendo que hubo un error, y qué tipo de error, este se puede corregir. El conjunto de síndromes que se miden y los errores que se corrigen forman "un código de corrección de errores". Entre los más populares encontramos al Surface Code, que es el de Google en su último procesador Willow. La corrección de errores permite que la información cuántica de un qubit lógico esté más protegida que la de las unidades físicas independientes.

### ■ COHERENCIA Y FIDELIDAD

Uno de los desafíos de los qubits superconductores (y de cualquier plataforma de tecnologías cuánticas en general) es aumentar la coherencia. Con los grandes progresos que se han hecho, los mejores qubits superconductores tienen tiempos de vida y de coherencia en el rango de 0,5-1,0 ms. Considerando que las compuertas de un qubit son del orden de las decenas de nanosegundos y las de dos qubits de centenas de nanosegundos, se pueden llevar a cabo cientos de compuertas antes de que se pierda la coherencia. Esto ha permitido la demostración de algoritmos cuánticos complejos, la demostración de supremacía cuántica, la implementación de simuladores cuánticos de sistemas de muchos cuerpos. Aunque todavía hay mucho para mejorar, el progreso ha sido alentador. Recientemente, por ejemplo, un cambio en los materiales y el proceso de fabricación de los transmons permitió alargar el tiempo de vida a los milisegundos.

## ■ PERSPECTIVA

Es un momento muy alentador. Desde la perspectiva más modesta, a nivel investigación en el laboratorio hay varias ventanas abiertas:

1. Encontrar otras plataformas de qubits que sean ventajosas: esto se puede hacer usando otras arquitecturas, otros materiales, sistemas híbridos que combinan superconductores y semiconductores.
2. Explorar compuertas alternativas: esto es interesante ya que se pueden buscar métodos no-mainstream para mejorar los tiempos y la fidelidad de las compuertas tanto para un como para dos qubits.
3. Una computadora cuántica se vuelve útil porque hay algoritmos cuánticos que resuelven problemas mejor que una computadora clásica. Pero esto significa que hay que tener una mente cuántica para pensar nuevos algoritmos cuánticos (o sea, hay que pensar como una computadora cuántica, no traducir un algoritmo clásico a una versión cuántica). Y esto nadie sabe hacerlo y es fundamental.
4. Hay mucho trabajo también para probar esos algoritmos en las computadoras cuánticas reales, lo que significa traducir las instrucciones del algoritmo a la acción real (voltajes que se prenden, etc) en la plataforma experimental.

## ■ LA ACTIVIDAD EN EL GRUPO DE TEORÍA DEL SÓLIDO Y EL GRUPO DE CIRCUITOS CUÁNTICOS EN BARILOCHE

En el Centro Atómico Bariloche, el Grupo de Teoría de Sólidos sostiene

una sólida y extensa tradición en el modelado de sistemas cuánticos complejos y dispositivos de materia condensada. En el marco de la segunda revolución cuántica, su labor resulta fundamental para comprender y optimizar los bloques fundamentales del hardware cuántico. Las investigaciones del grupo abarcan desde el diseño conceptual de circuitos cuánticos hasta el estudio de sistemas forzados y con disipación.

En estrecha sinergia con estos desarrollos teóricos, el Grupo de Circuitos Cuánticos asume el enorme desafío de materializar estas propuestas en hardware físico. Este grupo experimental, operando en las instalaciones del Instituto Balseiro y la CNEA, se dedica al diseño, la fabricación y el control de qubits superconductores. Trabajando en regímenes de temperaturas cercanas al cero absoluto mediante criostatos de dilución (ver **Figura 4**), y empleando técnicas avanzadas de electrodinámica cuántica de circuitos, el equipo busca manipular y leer los estados cuánticos a través de pulsos de microondas. Esta capacidad tecnológica para fabricar y medir átomos artificiales es única en la física experimental del país, sentando las bases concretas para el ensamblaje de procesadores cuánticos locales.

La actividad del Grupo de Circuitos Cuánticos de Bariloche incluye también la implementación de detectores de fotones basados en resonadores microondas fabricados con materiales superconductores desordenados como aluminio granular (ver **Figura 4**). Recientemente se demostró un umbral de detección de fotones en banda teleco del orden de 1.000 fotones. Estamos en la carrera hacia el detector de fotón único!.

También hay proyectos para el desarrollo de circuitos cuánticos híbridos, basados en materiales nue-

vos que combinan superconductores y semiconductores.

## ■ A MODO DE CIERRE:

Argentina tiene potencial en el hardware cuántico y en el desarrollo de procesadores cuánticos ya que cuenta con una tradición fuerte en el modelado teórico de qubits superconductores en Bariloche, un reciente y creciente nicho para el desarrollo del software cuántico centrado en La Plata y un grupo experimental para el desarrollo de circuitos cuánticos en Bariloche. Esperemos que todos estos potenciales puedan desarrollarse y expandir las capacidades cuánticas nacionales.

## ■ GLOSARIO

**Qubit:** Unidad básica de información cuántica. Es un sistema físico que posee dos estados distinguibles, cuyos estados cuánticos pueden ser superposiciones lineales de ambos.

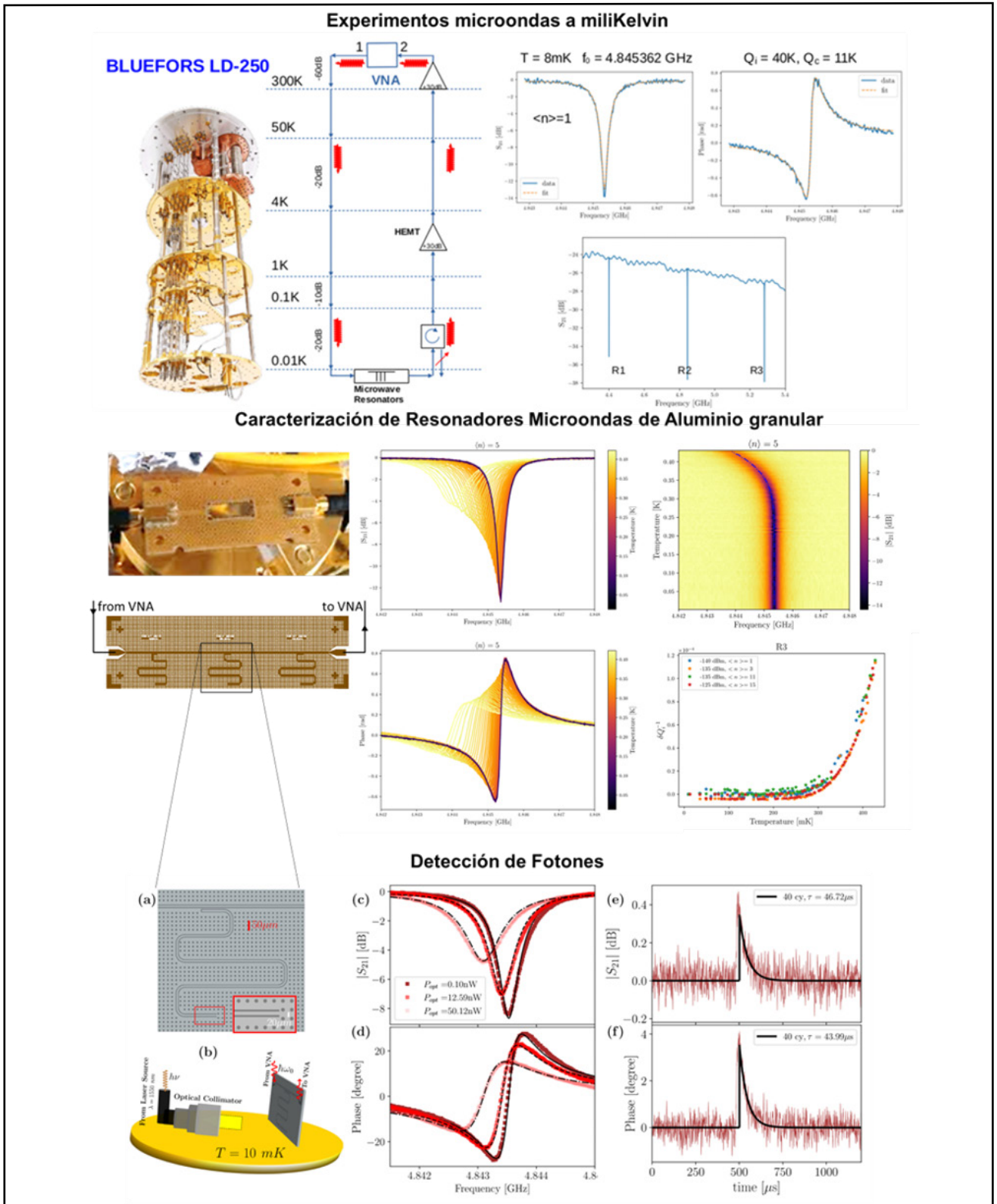
**Qutrit:** Sistema cuántico de tres niveles distinguibles. Generalización natural del qubit.

**Qudit:** Sistema cuántico de dimensión arbitraria  $d$ . Un qubit corresponde al caso  $d=2$ .

**Espacio de estados (espacio de Hilbert):** Estructura matemática que contiene todos los posibles estados cuánticos de un sistema. Su dimensión determina la cantidad de estados distinguibles mediante mediciones ideales.

**Entrelazamiento:** Correlación cuántica entre subsistemas que no puede describirse como una combinación de estados independientes. Según varios autores, es un recurso central para la ventaja cuántica.

**Operador unitario:** Transformación que preserva la norma del estado cuántico y describe la evolución



**Figura 4.** Experimentos microondas a temperaturas de miliKelvin en el Grupo de Circuitos Cuánticos Bariloche: En Bariloche se fabrican y caracterizan resonadores superconductores para diferentes aplicaciones. Por un lado para el read-out de qubits superconductores en cQED. Por otro lado, para la detección de fotones en el NIR. Se ve la respuesta de los resonadores (amplitud y fase del coeficiente de transmisión) en función de la temperatura. De esto se extrae el comportamiento del factor de calidad. En el panel inferior se muestra el primer prototipo de detector de fotones en banda teleco bajo irradiación continua a potencias bajas e irradiación pulsada. Se tiene un umbral de detección de 1.000 fotones.

temporal reversible de sistemas aislados.

**Decoherencia:** Proceso por el cual un sistema cuántico pierde sus propiedades de superposición debido a la interacción no controlada con el entorno.

**Regla de Born:** Postulado de la mecánica cuántica que establece que la probabilidad de obtener un resultado en una medición es igual al cuadrado del módulo del coeficiente correspondiente en la superposición.

**Computación cuántica adiabática:** Modelo en el cual el cómputo se realiza mediante una evolución lenta y controlada del Hamiltoniano del sistema.

**Computación cuántica basada en la medición:** Modelo donde el cómputo se implementa a partir de un estado altamente entrelazado inicial y una secuencia de mediciones locales adaptativas.

**Corrección cuántica de errores:** Conjunto de técnicas que permiten detectar y corregir errores sin destruir la información cuántica codificada.

## ■ BIBLIOGRAFÍA

Arute F., Arya K., Babbush R., et al. (2019) Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature* 574: 505–510.

Blais A., Huang R. S., Wallraff A., Girvin S. M., Schoelkopf R. J. (2004) Cavity quantum electrodynamics for superconducting electrical circuits: An architecture for quantum computation. *Physical Review A* 69: 062320.

Blais A., Grimsom A. L., Girvin S. M., Wallraff A. (2021) Circuit quantum electrodynamics. *Reviews of Modern Physics* 93: 025005.

Bluvstein D., Evered S. J., Geim A. A., et al. (2023) Logical quantum processor based on reconfigurable atom arrays. *Nature* 626: 58–65.

Cirac J. I., Zoller P. (1995) Quantum computations with cold trapped ions. *Physical Review Letters* 74: 4091–4094.

Crowley K. D., McLellan R. A., Dutta A., et al. (2023) Disentangling Losses in Tantalum Superconducting Circuits. *Physical Review X* 13: 041005.

Devoret M. H., Martinis J. M., Clarke J. (1985) Measurements of Macroscopic Quantum Tunneling out of the Zero-Voltage State of a Current-Biased Josephson Junction. *Physical Review Letters* 55: 1908–1911.

Devoret, M. H. (1997) Quantum fluctuations in electrical circuits. Chapter 10 in “Quantum Fluctuations”; Reynaud, S., Giacobino, E., Zinn-Justin, J. eds. Elsevier Science. Amsterdam.

DiVincenzo, D. P. (2000) The Physical Implementation of Quantum Computation. *Fortschritte der Physik* 48: 771–783.

Doherty M. W., Manson N. B., Delaney P., Jelezko F., Wrachtrup J., Hollenberg L. C. (2013) The nitrogen-vacancy colour centre in diamond. *Physics Reports* 528: 1–45.

Fowler A. G., Mariantoni M., Martinis J. M., Cleland A. N. (2012) Surface codes: Towards practical large-scale quantum computation. *Physical Review A* 86: 032324.

Koch J., Yu T. M., Gambetta J., Houck A. A., Schuster D. I., Majer J., Blais A., Devoret M. H., Girvin S. M., Schoelkopf R. J. (2007) Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box. *Physical Review A* 76: 042319.

Krantz P., Kjaergaard M., Yan F., Orlando T. P., Gustavsson S., Oliver W. D. (2019) A quantum engineer’s guide to superconducting qubits. *Applied Physics Reviews* 6: 021318.

Nielsen M. A., Chuang I. L. (2010) “Quantum Computation and Quantum Information”. Cambridge University Press. Cambridge.

Saffman M., Walker T. G., Mølmer K. (2010) Quantum information with Rydberg atoms. *Reviews of Modern Physics* 82: 2313–2363.

# RESONANCIA MAGNÉTICA: de la versatilidad en el control cuántico al sensado y las nuevas tecnologías cuánticas

**Palabras clave:** resonancia magnética, espines nucleares, tecnologías cuánticas, control cuántico, sensado cuántico, dinámica de muchos cuerpos, decoherencia.

**Keywords:** *magnetic resonance, nuclear spins, quantum technologies, quantum control, quantum sensing, many-body dynamics, decoherence.*

**Resumen:** La resonancia magnética fue una de las primeras plataformas en permitir el control preciso y reproducible de sistemas cuánticos. Mucho antes de que se consolidara el concepto de tecnologías cuánticas, la RMN ya manipulaba coherentemente estados de espín mediante el diseño de secuencias de pulsos y la ingeniería efectiva de Hamiltonianos, es decir, procesaba información cuántica de manera controlada. En este sentido, puede considerarse un antecedente sólido —y socialmente exitoso— de la segunda revolución cuántica. Además de su impacto en química, materiales y medicina, la RMN se convirtió en un laboratorio privilegiado para estudiar dinámica cuántica de muchos cuerpos, irreversibilidad, decoherencia y propagación de la información cuántica. En este artículo revisamos desarrollos históricos y contribuciones recientes, con énfasis en trabajos realizados por científicos en Argentina que han desempeñado un papel central en posicionar a la RMN como herramienta clave de la segunda revolución cuántica. A través de ecos de espín y su generalización como eco de Loschmidt, ingeniería de Hamiltonianos y desacoplamiento dinámico, estos aportes permitieron investigar scrambling, termalización y protección de la información en sistemas de espines. Asimismo, analizamos su evolución hacia el sensado cuántico avanzado, donde la decoherencia se convierte en recurso, y su integración con espines electrónicos —como los centros NV en diamante— abre la posibilidad de nano-MRI y exploración de procesos moleculares e intracelulares. En conjunto, la resonancia magnética emerge como una tecnología cuántica madura que ha contribuido activamente a definir el paradigma contemporáneo del control y la explotación de sistemas cuánticos.

■ **Chattah, Ana Karina**<sup>1,2</sup>,  
**Álvarez, Gonzalo A**<sup>3,4,5</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Física Enrique Gaviola (IFEG, CONICET-UNC), Ciudad Universitaria, 5000 Córdoba, Argentina

<sup>2</sup> Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación (FaMAF), Universidad Nacional de Córdoba, 5000 Córdoba, Argentina

<sup>3</sup> Centro Atómico Bariloche, CONICET, CNEA, 8400 San Carlos de Bariloche, Argentina

<sup>4</sup> Instituto de Nanociencia y Nanotecnología, CNEA, CONICET, 8400 San Carlos de Bariloche, Argentina

<sup>5</sup> Instituto Balseiro, CNEA, Universidad Nacional de Cuyo, 8400 San Carlos de Bariloche, Argentina

E-mail: karina.chattah@unc.edu.ar;  
gonzalo.alvarez@conicet.gov.ar

**Magnetic resonance: from versatility in quantum control to sensing and the new quantum technologies**

**Abstract:** Magnetic resonance was one of the first platforms to enable the precise and reproducible control of quantum systems. Long before the concept of quantum technologies was consolidated, NMR was already coherently manipulating spin states through the design of pulse sequences and effective Hamiltonian engineering; that is, it processed quantum information in a controlled manner. In this sense, it can be considered a solid —and socially successful— precedent of the second quantum revolution. In addition to its impact on chemistry, materials science, and medicine, NMR became a privileged laboratory for studying quantum many-body dynamics, irreversibility, decoherence, and the propagation of quantum information. In this article, we review historical developments and recent contributions, emphasizing the work carried out by scientists in Argentina who have played a central role in positioning NMR as a key tool of the second quantum revolution. Through spin echoes and their generalization as the Loschmidt echo, Hamiltonian engineering, and dynamical decoupling, these contributions made it possible to investigate scrambling, thermalization, and information protection in spin systems. Furthermore, we analyze its evolution towards advanced quantum sensing, where decoherence becomes a resource, and its integration with electronic spins —such as NV centers in diamond— which opens up the possibility of nano-MRI and the exploration of molecular and intracellular processes. Altogether, magnetic resonance emerges as a mature quantum technology that has actively contributed to defining the contemporary paradigm for the control and exploitation of quantum systems.

## ■ INTRODUCCIÓN

La Resonancia Magnética Nuclear (RMN) ocupa un lugar central en la historia de las ciencias cuánticas. Desde su aparición hacia la década de 1940, con los experimentos pioneros de I. I. Rabi, F. Bloch y E. M. Purcell, la RMN se convirtió en una de las técnicas más influyentes de la ciencia moderna, reconocida con múltiples Premios Nobel por su impacto en física, química y medicina. Siendo los espines nucleares entidades que responden a la mecánica cuántica, la RMN se transformó en una de las primeras plataformas capaces de controlar y manipular sistemas cuánticos en la práctica. Mucho antes de que existieran las computadoras cuánticas basadas en iones, átomos fríos o circuitos superconductores, la RMN ya permitía poner a prueba ideas fundamentales: la superposición de estados, la coherencia cuántica y la posibilidad de realizar operaciones lógicas sobre sistemas atómicos (Gershenfeld & Chuang 1997, Cory et al. 1997). De hecho, algunos de los primeros algoritmos de la computación cuántica fueron implementados en RMN, demostrando que era posible usar el lenguaje cuántico para procesar información de manera controlada (Nielsen et al. 1998).

Este carácter pionero convirtió a la RMN en una fuente de inspiración para múltiples disciplinas. Las técnicas de control dinámico desarrolladas en el campo —secuencias de pulsos, refocalización de espines, diseño de Hamiltonianos efectivos— sirvieron de modelo para plataformas tan diversas como los iones atrapados, los átomos de Rydberg, las moléculas polares o los centros de color en diamante (Suter & Álvarez 2016). A partir de ellas, surgió un interrogante fundamental que aún hoy guía el desarrollo de las tecnologías cuánticas (Knill & Laflamme

1998, Braunstein et al. 1999): ¿qué aspectos de la información son realmente exclusivos del mundo cuántico y no pueden ser replicados por sistemas clásicos?

Uno de los grandes logros de la RMN fue mostrar que, con estrategias adecuadas de control, es posible prolongar la vida útil de los estados cuánticos, manipularlos y transferirlos entre distintas partes de un sistema (Suter & Álvarez 2016). Estos avances dieron lugar a un repertorio de herramientas hoy esenciales para la computación y la simulación cuántica, pero también para áreas aplicadas de enorme impacto, como la biología, la química y la medicina (Le Bihan 2003, Zwick 2022). En estos campos, los espines nucleares dejaron de ser únicamente objetos de estudio para convertirse en sensores: pequeñas sondas cuánticas capaces de registrar información microscópica sobre su entorno (Álvarez 2022, Zwick & Álvarez 2023).

El desarrollo del sensado cuántico es un claro ejemplo de esta evolución. Allí donde los dispositivos clásicos encuentran límites en su resolución espacial o en su sensibilidad, los sensores cuánticos ofrecen un acceso directo a escalas atómicas y nanométricas. En RMN, el sensor es el propio espín nuclear, que responde a campos magnéticos, eléctricos, variaciones de temperatura o incluso a la presencia de moléculas vecinas. En un extremo del espectro tecnológico, los sensores individuales —como los centros de vacancia nitrógeno en diamante— ya han mostrado la capacidad de detectar campos magnéticos a través de un solo electrón. En el otro extremo, la RMN tradicional, basada en la señal de enormes conjuntos de espines (del orden de  $10^{20}$  en un simple tubo de muestra), ofrece la ventaja de ser un método no invasivo que puede aplicarse, por ejemplo, para

observar el interior del cuerpo humano mediante imágenes de resonancia magnética (MRI por la sigla en inglés de magnetic resonance imaging) (Le Bihan 2003).

Este carácter dual es distintivo: la RMN puede operar tanto en la frontera de la nanoescala como en la escala macroscópica, con aplicaciones clínicas cotidianas. La dificultad, claro, está en extraer la información microscópica escondida en el interior de un ensamble tan grande de espines. Resolver este desafío ha sido uno de los motores de innovación más potentes del campo. En particular, diseñar estrategias de control dinámico de la información cuántica que codifiquen en la señal observable los detalles de los procesos microscópicos —difusión molecular, interacciones entre espines, restricciones geométricas— permite que la RMN funcione como un microscopio cuántico (Zwick & Álvarez 2023).

Un ejemplo paradigmático es la aplicación de la RMN y la MRI al estudio del tejido biológico. El agua, que constituye alrededor del 70% de nuestro organismo, contiene núcleos de hidrógeno cuyos espines actúan como sensores naturales de su entorno. Al analizar cómo se mueven esas moléculas en medios restringidos —como fibras nerviosas, membranas celulares o capilares— es posible obtener imágenes de la microestructura del tejido con una resolución que supera ampliamente la del tamaño de un píxel convencional (Álvarez et al. 2013, Shemesh et al. 2015, Zwick et al. 2020). Esto ha abierto la puerta a una forma de biopsia virtual no invasiva, con implicancias directas para el diagnóstico temprano de enfermedades neurodegenerativas y otras patologías (Le Bihan 2003, Shemesh et al. 2015, Capiglionni et al. 2021).

El otro gran eje que atraviesa la historia de la RMN en las tecnologías cuánticas es el llamado fenómeno de decoherencia. Todos los sistemas cuánticos son extremadamente frágiles frente a su entorno: las fluctuaciones ambientales tienden a destruir las superposiciones cuánticas y a volver “clásico” lo que originalmente era cuántico. Entender, controlar y, en algunos casos, incluso aprovechar la decoherencia se transformó en un campo de investigación en sí mismo. En RMN, el desarrollo de secuencias de pulsos que prolongan la coherencia —como los famosos ecos de espín— fue fundamental para abrir el camino a técnicas más sofisticadas de desacoplamiento dinámico, hoy empleadas en casi todas las plataformas cuánticas (Souza et al. 2012, Suter & Álvarez 2016).

La decoherencia no es solo un obstáculo; también es una fuente de información. La velocidad y la manera en que un espín pierde coherencia dependen íntimamente de las características de su entorno. Mediante la aplicación de secuencias de control apropiadas, ese proceso se convierte en una herramienta de sentido: un “filtro espectral” capaz de revelar qué frecuencias de ruido o qué interacciones dominan en un material, una molécula o un tejido (Álvarez & Suter 2011, Álvarez et al. 2013). En este sentido, la RMN ocupa una posición estratégica como banco de pruebas para nuevas ideas de control cuántico y como plataforma para el sentido cuántico avanzado (Zwick & Álvarez 2023).

A lo largo de su historia, la RMN ha sabido reinventarse para responder a preguntas fundamentales y, al mismo tiempo, abrir aplicaciones inesperadas. Desde las primeras demostraciones de algoritmos cuánticos hasta los estudios actuales de dinámica fuera del equilibrio, desde la caracterización de materiales complejos hasta la obtención de imágenes

biomédicas, su versatilidad es la clave. Mirando hacia adelante, la RMN se perfila no solo como una disciplina consolidada, sino como un actor central en la segunda revolución cuántica: esa etapa en la que el control de sistemas cuánticos deja de ser un experimento aislado y se convierte en la base de tecnologías transformadoras, con impacto en la ciencia, la industria y la sociedad.

### **Nota Editorial 1: ¿Qué es exactamente “manipular un espín”?**

Para comprender cómo la resonancia magnética nuclear (RMN) funciona como tecnología cuántica, resulta útil imaginar el “espín” de los núcleos atómicos como minúsculas brújulas o pequeños imanes. Cuando colocamos una muestra (o a un paciente) dentro de un campo magnético fuerte, estas brújulas tienden a alinearse. Cuando los científicos envían ondas de radio (secuencias de pulsos): estos pulsos actúan como “dedos invisibles” que empujan y giran estas brújulas a voluntad, obligándolas a adoptar estados de superposición (apuntando a varios lados a la vez). Al “captar” el eco magnético que devuelven estas brújulas cuando intentan volver a su posición original, los investigadores pueden mapear el entorno molecular con una precisión asombrosa.

### **■ RESONANCIA MAGNÉTICA EN SÓLIDOS EN ARGENTINA: HISTORIA Y DESARROLLOS**

Más allá de los inicios como herramienta espectroscópica y de su consolidación como técnica de imágenes con múltiples aplicaciones, la RMN abrió un camino menos visible pero igual de revolucionario: el estudio experimental de la dinámica cuántica de muchos cuerpos. En este terreno, grupos de investigación en

Argentina jugaron un papel destacado, transformando la RMN de sólidos en una plataforma privilegiada para explorar fenómenos fundamentales de la física cuántica contemporánea (Pastawski et al. 1995, Levstein et al. 1998, Pastawski et al 2000).

Entre los hitos internacionales se encuentra el trabajo de Richard R. Ernst, galardonado con el Premio Nobel de Química en 1991, cuyas técnicas de polarización localizada permitieron observar la difusión cuántica de excitaciones de espín en cristales (Muller et al. 1974, Zhang et al. 1992). Estos experimentos revelaron comportamientos sorprendentes, como recurrencias, ecos e interferencias cuánticas, que desafiaban las explicaciones estadísticas clásicas y abrían la puerta a nuevas preguntas sobre la reversibilidad del tiempo en sistemas cuánticos.

En Argentina, a mediados de los años '90, un grupo de investigación en Córdoba comenzó a articular teoría, experimentación y simulaciones numéricas para estudiar la decoherencia y la irreversibilidad cuántica. Su herramienta central fueron los ecos de Loschmidt, señales que se obtienen bajo reversión de las interacciones en el sistema, permitiendo medir su sensibilidad frente a perturbaciones internas y externas. Estos ecos —en sus variantes mágicos, de polarización o mesoscópicos— se convirtieron en verdaderos “detectores” de decoherencia (Pastawski et al. 1995, Levstein et al. 1998, Pastawski et al 2000).

El trabajo en RMN de sólidos en Argentina no se limitó a medir la pérdida de coherencia, sino que también innovó en el diseño de dinámicas efectivas mediante la teoría del Hamiltoniano promedio. Gracias a ello fue posible imitar distintos modelos de interacción —como los Hamiltonianos XY o truncamientos de interacciones dipolares— y observar cómo decaen los ecos bajo

esas condiciones (Álvarez & Suter 2010, Álvarez et al. 2015b). De esta forma, la RMN se transformó en un simulador cuántico analógico capaz de recrear fenómenos colectivos en sistemas de hasta 10.000 qubits naturales, algo inalcanzable para otras plataformas experimentales (Álvarez & Suter 2010, Álvarez et al. 2015b, Sánchez 2023).

Con el cambio de siglo, esta línea de trabajo se enlazó con cuestiones de frontera en la física teórica. La conjetura holográfica de Maldacena y el modelo SYK de Kitaev, que conectan la dinámica de espines con problemas de agujeros negros y caos cuántico, ofrecieron un nuevo marco conceptual. En este contexto, los ecos de Loschmidt estudiados en Córdoba resultaron ser equivalentes, en ciertos límites, a los correladores fuera de orden temporal (OTOCs por la sigla en inglés de out-of-time-ordered correlators), considerados hoy un indicador clave de scrambling cuántico y pérdida de información (Álvarez et al. 2015b, Sánchez et al. 2020, Domínguez et al. 2021). La RMN argentina ya venía explorando esos conceptos mucho antes de que se popularizaran en el ámbito de la teoría de altas energías, aportando evidencia experimental única en el límite termodinámico (Álvarez & Suter 2010, Sánchez 2020, Lozano-Negro 2024).

Entre los hallazgos más originales se destacó la formulación de la hipótesis central de irreversibilidad (CHI por la sigla en inglés de central hypothesis of irreversibility), que vincula la escala de decoherencia intrínseca con la conectividad de las interacciones del sistema (Pastawski et al 2000, Jalabert & Pastawski 2001). Asimismo, los experimentos permitieron observar transiciones dinámicas colectivas, como la oscilatoria-sobremortiguada en ecos mesoscópicos, y fenómenos de localización en sistemas desordenados (Álvarez et al.

2006, Álvarez et al. 2015b). Estos resultados mostraron que la RMN no solo servía para entender materiales, sino también para responder preguntas abiertas sobre la emergencia del caos y la termalización en sistemas cuánticos complejos.

La versatilidad experimental se puso a prueba en una gran variedad de materiales —desde adamantano e hidroxiapatita hasta cristales líquidos y fulerenos—, que funcionaron como bancos de prueba para estudiar conectividades espaciales, crecimiento de correlaciones y la aparición de fases dinámicas (Álvarez et al. 2015b, Domínguez et al. 2021). Más allá de lo específico de cada sistema, lo central fue que la RMN de sólidos ofreció un entorno natural para observar directamente cómo emerge la complejidad cuántica en la práctica.

De este modo, la RMN desarrollada en Argentina trascendió su rol como técnica espectroscópica tradicional para convertirse en un verdadero simulador cuántico analógico, capaz de dialogar con los problemas más profundos de la física actual. Sus logros hasta el presente no solo generaron conocimiento fundamental, sino que también se tradujeron en aplicaciones prácticas para la caracterización de materiales, tejidos biológicos, fármacos y polímeros. A la par, contribuyeron a la formación de una generación de jóvenes investigadores con sólida formación teórica y experimental, que hoy continúan expandiendo estas líneas en diálogo con la comunidad internacional.

## ■ CONTRIBUCIONES ACTUALES DESDE LA RMN AL DESARROLLO CUÁNTICO

### DINÁMICA CUÁNTICA FUERA DEL EQUILIBRIO

La resonancia magnética nuclear en sólidos es mucho más que una téc-

nica para estudiar materiales: es un laboratorio natural de física cuántica. A diferencia de plataformas más controladas y reducidas, como los iones atrapados o los circuitos superconductores, los experimentos de RMN en sólidos involucran hasta  $10^{23}$  espines nucleares que interactúan colectivamente. Esto la convierte en un escenario natural para explorar preguntas profundas:

- ¿Cómo evoluciona un sistema cuántico fuera del equilibrio?
- ¿Qué mecanismos llevan a la pérdida de información cuántica?
- ¿Cómo aparece la irreversibilidad en un mundo gobernado por leyes reversibles?

### Nota Editorial 2: Rebobinando la película cuántica

El concepto del “Eco de Loschmidt” puede entenderse como un intento de viajar hacia atrás en el tiempo a nivel microscópico. Imagine dejar caer una gota de tinta en un vaso de agua: la tinta se dispersa rápida e irremediablemente. Sin embargo, si tuviéramos el poder de invertir de forma exacta el movimiento y la dirección de cada molécula de agua y de tinta, la mancha volvería a contraerse hasta formar nuevamente una gota perfecta. En el mundo cuántico, los físicos logran esta proeza aplicando pulsos electromagnéticos que obligan a los espines a “desandar su camino”. Si al intentar rebobinar la película la gota no se forma perfectamente, ese pequeño error revela información valiosa sobre las perturbaciones ocultas en el entorno del material.

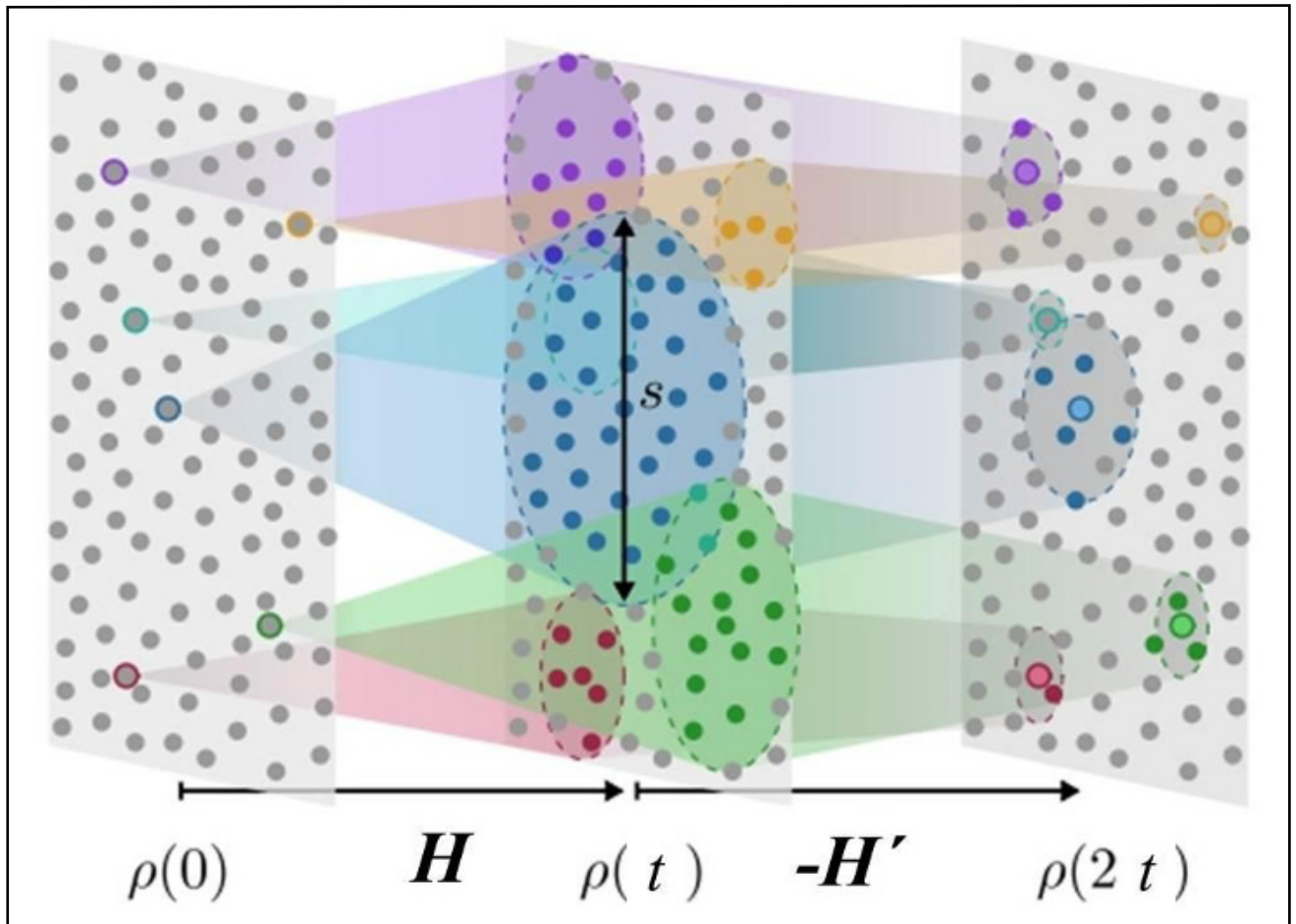
Ecos de Loschmidt y la irreversibilidad cuántica: El concepto de eco

de Loschmidt surge directamente de esta tensión entre reversibilidad e irreversibilidad. Ludwig Boltzmann, en el siglo XIX, había introducido el principio de entropía creciente para describir la flecha del tiempo en la física estadística. Su contemporáneo, Johann Loschmidt, cuestionó cómo podía surgir una evolución

irreversible a partir de leyes microscópicas que son simétricas en el tiempo. La RMN dio la primera respuesta experimental a esta paradoja: mediante secuencias de pulsos es posible invertir efectivamente el signo de la evolución en el Hamiltoniano y observar cómo un sistema de espines “regresa” a su estado

inicial, generando un eco de señal macroscópica (Pastawski et al 2000, Goussev 2012) (ver **Figura 1**).

En sistemas reales, la inversión nunca es perfecta, lo que permite cuantificar la fragilidad de la dinámica frente a pequeñas perturbaciones. En este sentido, los ecos de



**Figura 1.** Esquema conceptual del scrambling de una excitación local y su reversión temporal mediante un eco generalizado de Loschmidt. En el panel izquierdo, una excitación de espín inicialmente localizada (puntos coloreados) codifica información cuántica en un subconjunto reducido del sistema. Bajo la evolución directa gobernada por el Hamiltoniano  $H$ , esta información se dispersa coherentemente entre un número creciente de espines, generando correlaciones de muchos cuerpos y estados “scrambled” caracterizados por clusters de tamaño creciente  $s$  (panel central). Este proceso describe el scrambling: la transformación de información inicialmente local en correlaciones altamente no locales. El panel derecho ilustra la inversión temporal implementada como un eco generalizado de Loschmidt, donde se intenta revertir la dinámica aplicando una evolución bajo  $-H'$ . Si la reversión fuera perfecta ( $H' = H$ ), el sistema retornaría al estado inicial. Sin embargo, cuando  $H' \neq H$ , incluso pequeñas imperfecciones impiden la reconstrucción completa: la información, ahora distribuida de manera compleja en muchos cuerpos, no puede re-enfocarse totalmente. Esta sensibilidad a perturbaciones constituye una firma del scrambling y permite acceder experimentalmente a correladores fuera de orden temporal (OTOCs) y coherencias múltiples (MQC), que cuantifican la distribución de clusters en el tiempo  $t$ . Figura adaptada de Sequeiros et al. (2025), *Physical Review A* 112, 022617.

Loschmidt se convirtieron en una herramienta para medir la estabilidad y la decoherencia en sistemas cuánticos de muchos cuerpos. Experimentos realizados en Argentina y en colaboración internacional demostraron que la atenuación del eco no solo depende de defectos experimentales, sino que refleja propiedades intrínsecas del sistema, como la complejidad de sus interacciones y la proximidad a regímenes caóticos. (Álvarez & Suter 2010, Álvarez et al. 2015b, Sanchez 2016)

De ecos a OTOCs: cuando la información se mezcla (“scrambling”): En la última década, el interés en comprender cómo se dispersa la información cuántica en sistemas de muchos cuerpos llevó al desarrollo de nuevas métricas, en particular las OTOCs. Estas correlaciones fuera de orden temporal miden cuán rápido una perturbación local se propaga, afectando a todo el sistema, un fenómeno conocido como scrambling!. El scrambling no implica simplemente decoherencia o pérdida de coherencia cuántica, sino la redistribución de la información de un modo tal que se vuelve prácticamente inaccesible a observables locales. En la teoría de agujeros negros, por ejemplo, las OTOCs se han utilizado para cuantificar la rapidez con la que la información se “mezcla” en el horizonte de sucesos (ver Fig. 1).

En el laboratorio, la RMN permitió llevar estos conceptos a la práctica, poniéndolos a prueba en sistemas materiales reales. Mediante técnicas de control cuántico — como los Hamiltonianos promedio, la dinámica de Floquet y la medición estroboscópica— se diseñaron evoluciones experimentales donde las OTOCs y los ecos generalizados pueden medirse en forma efectiva (Álvarez & Suter 2010, Álvarez et al. 2010a, Álvarez et al. 2015b). Es-

tos experimentos mostraron cómo, partiendo de espines individuales, surgen clusters de espines correlacionados cuyo tamaño crece con el tiempo. En las mediciones, el tamaño de los clusters está determinado por la distribución de la señal en múltiples coherencias cuánticas, o MQC en inglés. Lo más fascinante: los ecos de Loschmidt generalizados pueden (re)interpretarse como un caso particular de OTOCs, haciendo de la RMN un puente entre la teoría de la información cuántica, la física estadística y la cosmología cuántica (Sanchez 2020, Domínguez et al. 2021, Sanchez 2022) (ver **Figura 1**).

### Nota Editorial 3: La paradoja de los huevos revueltos

El término *scrambling* proviene del inglés *scrambled eggs* (huevos revueltos) y es una de las analogías más gráficas de la física moderna. Describe cómo la información cuántica de una sola partícula se dispersa y se “mezcla” a lo largo de todo un sistema complejo. Pensemos en romper un huevo y batirlo en una sartén: la información original (la yema y la clara separadas) no ha desaparecido del universo, sigue ahí, pero se ha vuelto imposible de leer o recuperar si observamos solo una pequeña porción de la mezcla. Medir la velocidad de este nivel de “mezcla cuántica” ayuda a los físicos a entender desde la dinámica interna de nuevos materiales superconductores hasta el comportamiento límite de la información cayendo en un agujero negro.

Termalización y dinámica fuera del equilibrio: Otra pregunta clave que puede responderse con estas herramientas es la de la termalización cuántica. En la física clásica, sistemas con muchas partículas tien-

den a un estado de equilibrio caracterizado por la maximización de la entropía. En los sistemas cuánticos, en cambio, el asunto es más sutil: la evolución es unitaria y, en principio, reversible. ¿Cómo emerge entonces el comportamiento térmico?

Experimentos de RMN permitieron explorar esta cuestión observando cómo subsistemas pequeños (por ejemplo, un espín o un grupo reducido de espines) alcanzan un comportamiento compatible con la termodinámica, aun cuando el sistema global permanece en un estado puro gobernado por la mecánica cuántica. Los ecos de Loschmidt y las OTOCs son en este contexto herramientas para rastrear cómo la información sobre las condiciones iniciales se dispersa y se vuelve inobservable localmente, dando la apariencia de termalización (Swin-gle 2018, Lewis-Swan 2019).

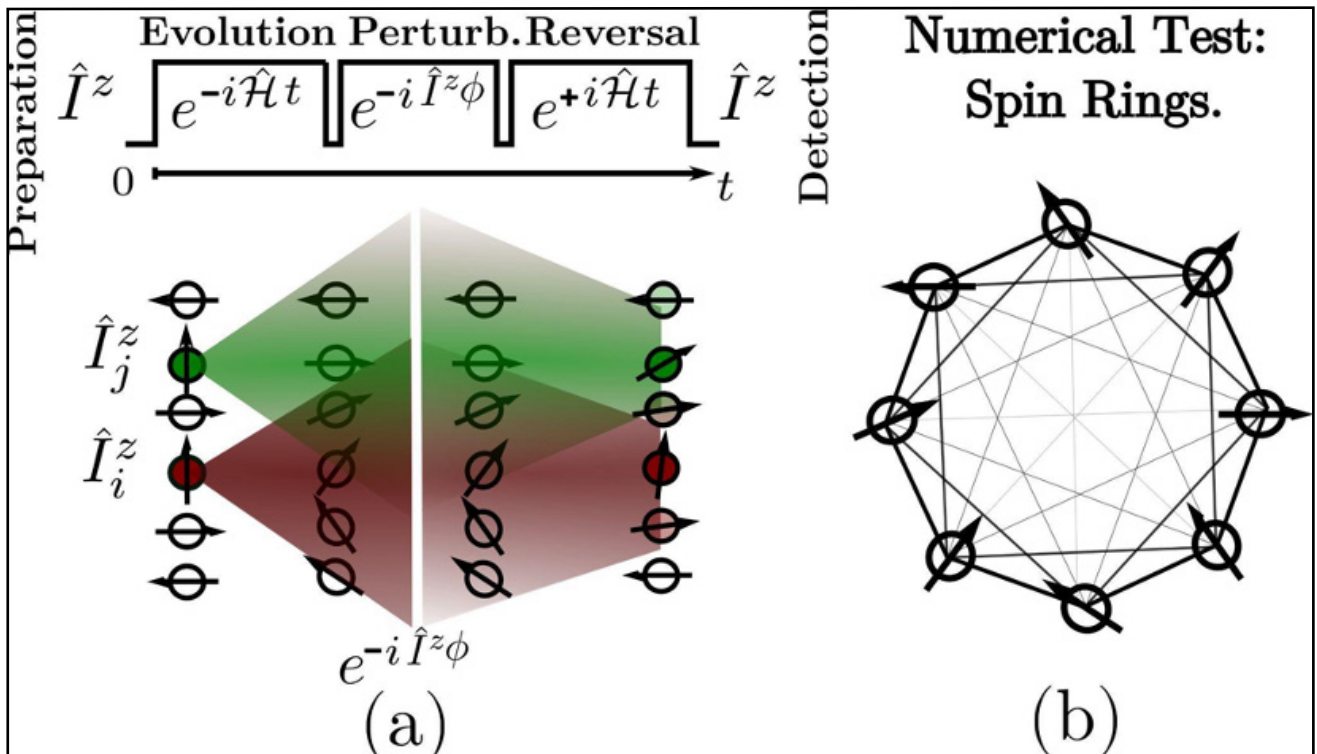
En particular, en estudios realizados en sólidos se observó que la velocidad de scrambling puede estar vinculada con propiedades de transporte cuántico, como la difusión de correlaciones o la propagación balística de excitaciones. Estos resultados conectan la física de la RMN con campos tan diversos como la teoría del caos cuántico y los límites de velocidad de propagación de información. De esa forma, la dispersión de la información y el crecimiento de los clusters de espines sugieren la existencia de una velocidad efectiva de propagación, compatible con las cotas de Lieb–Robinson, que imponen un límite fundamental a la rapidez con la que las correlaciones cuánticas pueden expandirse en el sistema (Sánchez 2023, Zwick & Álvarez 2023).

Relevancia y aportes de Argentina: Argentina ha jugado un rol destacado en esta área. Desde los años noventa, grupos locales exploraron

la irreversibilidad cuántica a través de experimentos de eco en sistemas de espines nucleares, introduciendo protocolos que luego fueron adoptados internacionalmente (Pastawski et al. 1995, Levstein et al. 1998, Pastawski et al. 2000, Jalabert & Pastawski 2001). Posteriormente, se contribuyó a la generalización de estas ideas al lenguaje de OTOCs y scrambling, posicionando a la RMN como una de las pocas plataformas capaces de explorar de manera experimental problemas que, en principio, parecían confinados a la teoría (Álvarez & Suter 2010, Álvarez

et al. 2015b, Sánchez et al. 2016, Sánchez et al. 2020, Domínguez et al. 2021, Sánchez 2022, Lozano-Negro et al. 2024). Estos avances no solo tienen interés fundamental, sino que también son cruciales para el desarrollo de tecnologías cuánticas. Entender los mecanismos de scrambling y termalización ayuda a identificar qué procesos limitan la coherencia en dispositivos cuánticos y qué estrategias pueden usarse para proteger o incluso aprovechar la dinámica de muchos cuerpos en tareas de simulación y sensado (Kuffer et al. 2025, Rosenberg et al. 2026).

Hamiltonianos escaleados: ralentizar, invertir y controlar la dinámica: Una de las formas experimentales más exitosas desarrolladas en Argentina ha sido el uso de Hamiltonianos escaleados, con interacciones internas ajustadas controladamente, permitiendo explorar nuevos regímenes. Se puede entonces acelerar las dinámicas, ralentizarlas o incluso invertir su dirección, creando evoluciones “hacia adelante” o “hacia atrás” en el tiempo. Este enfoque permitió acceder a escalas de tiempo más cortas, imposibles de resolver con el Hamiltoniano original



**Figura 2.** (a) Secuencia de pulsos de un experimento de coherencias cuánticas múltiples (MQC) y representación esquemática de la equivalencia entre el eco de Loschmidt global y la suma de ecos locales. Se muestran dos contribuciones a la magnetización total, asociadas a los sitios  $i$  (verde) y  $j$  (bordó). Tras la evolución bajo  $H$ , una perturbación y la reversión temporal, cada contribución tiende a re-enfocarse en su sitio de origen. Cuando una contribución verde alcanza el sitio  $j$ , o una bordó alcanza  $i$ , ambas se superponen y se cancelan (regiones con mezcla verde–bordó), ilustrando interferencia destructiva. Como resultado, sólo las componentes que retornan coherentemente a su sitio original sobreviven en la suma total. La magnetización global ( $I_z$ ) medida experimentalmente equivale, en sistemas homogéneos y grandes, al promedio de ecos locales. (b) Modelo de anillos de espines utilizado en simulaciones numéricas para imitar los experimentos. La conectividad y el alcance de los acoplamientos —que decrecen con la distancia de enlace— permiten analizar cómo la estructura del sistema favorece la cancelación de contribuciones cruzadas y, en consecuencia, la equivalencia entre observables globales y locales. Figura adaptada de Lozano-Negro et al. (2024), *Physical Review A* 110, 042410.

no escaleado, estudiando la irreversibilidad en función del factor de escala (Sánchez 2020, Sánchez 2022). Gracias a esto, es posible separar con precisión los efectos debidos a errores experimentales de aquellos que provienen de la complejidad intrínseca del sistema, lo que es esencial para poner a prueba la llamada hipótesis central de irreversibilidad (Sanchez 2020). Uno de los resultados más prometedores fue observar que existe un régimen independiente de perturbaciones (Pastawski et al 2000, Jalabert & Pastawski 2001), en donde la irreversibilidad está ligada completamente a la complejidad del sistema, es decir el conjunto de espines provee su propio “sistema + baño”. A esto llamamos decoherencia intrínseca que está gobernada por la propia dinámica colectiva del sistema. A su vez el scrambling de la información se vio reflejado en el crecimiento de los clusters de espines, revelando un comportamiento tipo balístico para geometría 3D, con una ley proporcional a  $t^3$  para el tamaño de cluster (Álvarez & Suter 2010, Álvarez et al. 2015b, Sánchez 2023). En experimentos recientes, se observaron clusters de hasta 10000 espines correlacionados, incluso en momentos en los que el eco de señal casi ha desaparecido: la magnetización inicial se desparrama por grados de libertad ocultos (Álvarez & Suter 2010, Álvarez et al. 2015b).

¿Puede un observable global revelar dinámica local?

Una de las limitaciones más desafiantes de RMN en sólidos, reside en la dificultad de excitar y detectar espines individuales, ya que la mayoría de los experimentos se basan en observables globales, como la magnetización total. En contraste, muchas predicciones teóricas relevantes —incluidos los correladores fuera de orden temporal— se formulan en términos de operadores loca-

les. Esta aparente brecha entre teoría y experimento plantea una pregunta fundamental: ¿puede un observable global capturar información genuinamente local?

Resultados recientes ofrecen una respuesta alentadora. Simulaciones numéricas en sistemas homogéneos de muchos espines muestran que, en el límite de sistemas grandes, los OTOCs globales medidos experimentalmente reflejan con bastante fidelidad el promedio de los OTOCs locales, ver **Figura 2**. La razón es que, tras el protocolo de evolución, perturbación y reversión temporal, las contribuciones cruzadas provenientes de distintos sitios interfieren destructivamente, mientras que las componentes coherentes asociadas a cada sitio se refocalizan predominantemente en su origen.

Esta equivalencia efectiva entre ecos globales y dinámicas locales permite conectar directamente los experimentos de RMN como plataforma para estudiar fenómenos fundamentales de la dinámica cuántica de muchos cuerpos (Lozano-Negro et al. 2024).

## ■ COMUNICACIÓN CUÁNTICA CON CADENAS DE ESPINES

Las cadenas de espines constituyen un modelo natural para explorar la comunicación cuántica: un estado preparado en un extremo de la cadena puede propagarse, gracias a las interacciones internas, hasta el otro extremo sin necesidad de intervención externa. La RMN ha sido una de las primeras plataformas experimentales en las que se puso a prueba esta idea, ofreciendo un marco tangible para estudiar cómo la información cuántica puede transferirse a través de materiales reales (Stolze et al. 2014, Sec. 5.4). El ejemplo más simple de este fenómeno se observa en un par de espi-

nes acoplados, donde la excitación inicial localizada en uno de ellos se transfiere periódicamente al otro. Este proceso, conocido como operación SWAP, constituye uno de los bloques elementales de un canal de comunicación cuántica. En RMN, estas oscilaciones de intercambio de energía y coherencia entre dos núcleos se detectaron directamente, mostrando que la dinámica prevista por los modelos de cadenas podía materializarse en sistemas físicos reales (Álvarez et al. 2006). Cuando el número de espines aumenta, las dinámicas se vuelven más complejas, pero también emergen fenómenos colectivos de gran interés. Uno de los más llamativos es el de los ecos mesoscópicos, que aparecen cuando una excitación inicial se propaga por toda la red de espines y, tras cierto tiempo, se recombina de manera coherente generando un eco observable en el sistema. Estos ecos, detectados en experimentos de RMN en sólidos, constituyen evidencia clara de que las cadenas de espines pueden actuar como canales de almacenamiento y recuperación de información cuántica (Pastawski et al. 1995).

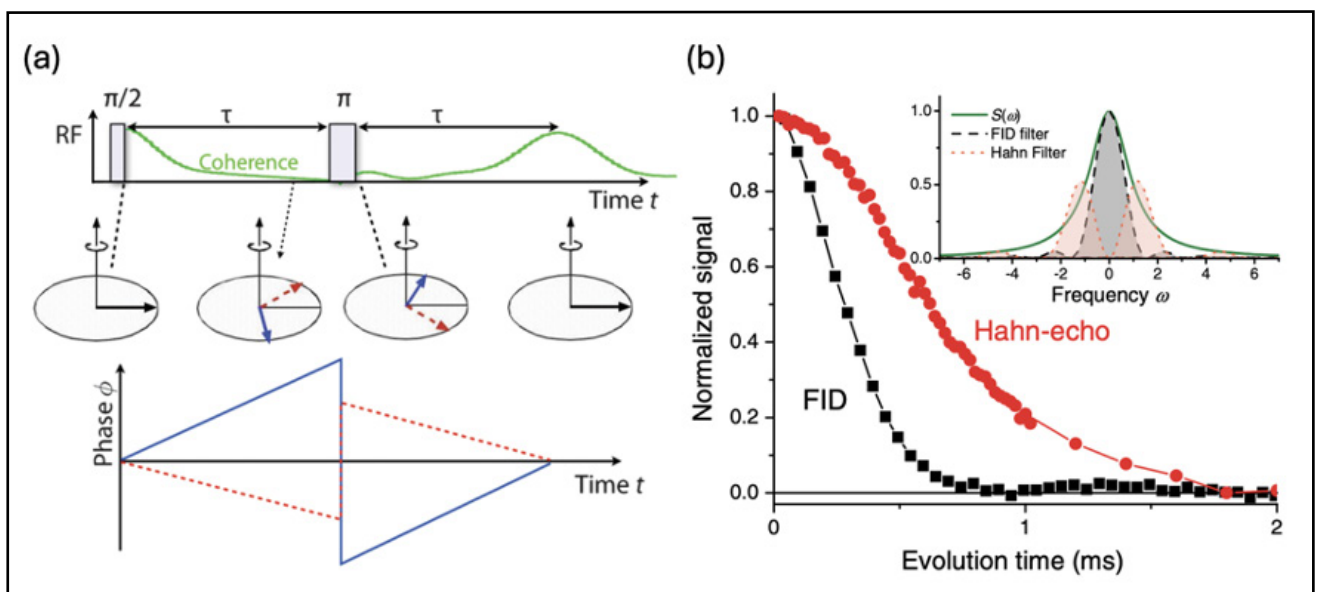
Los trabajos realizados en Argentina y en colaboración internacional mostraron que estas dinámicas no sólo podían observarse, sino que también era posible diseñar secuencias de control que robustecieran frente a imperfecciones y decoherencia (Álvarez et al. 2010b, Zwick et al. 2011, Stolze et al. 2014). Así, la RMN se consolidó como un banco de pruebas privilegiado para validar las predicciones teóricas sobre transferencia de información en cadenas de espines, explorar su estabilidad bajo condiciones experimentales reales y, sobre todo, descubrir nuevas manifestaciones colectivas que no estaban previstas originalmente en los modelos más simples. Más allá de su interés fun-

damental, estas investigaciones tienen una clara proyección hacia el futuro de las tecnologías cuánticas. Las cadenas de espines podrían convertirse en canales intra-dispositivo para transferir información dentro de un procesador cuántico, conectando distintas partes de un chip sin necesidad de recurrir a interfaces externas. En este sentido, las observaciones experimentales en RMN — desde el SWAP elemental hasta los ecos mesoscópicos— proporcionan tanto validación conceptual como inspiración práctica para el diseño de redes de comunicación cuántica en la materia condensada.

### ■ PROTECCIÓN DE LA INFORMACIÓN CUÁNTICA

Uno de los grandes desafíos de la ciencia cuántica es que la información cuántica es extremadamente frágil. A diferencia de la información clásica, los estados cuánticos no pueden copiarse libremente (teorema de no clonación) y son altamente sensibles a cualquier perturbación del entorno. Como consecuencia, los sistemas tienden a perder rápidamente sus propiedades cuánticas a través del proceso de decoherencia, que borra las superposiciones y correlaciones que distinguen lo cuántico de lo clásico.

Desde sus orígenes, la resonancia magnética nuclear ha sido pionera en el desarrollo de herramientas para enfrentar este problema. El descubrimiento del eco de espín por Erwin L. Hahn en 1950 fue la primera demostración de que la pérdida de coherencia no es necesariamente irreversible: aplicando pulsos de radiofrecuencia de forma adecuada, es posible refocalizar la señal de los espines y recuperar la información que parecía perdida (Hahn 1950, ver **Figura 3**). Este hallazgo marcó el inicio de una larga tradición de secuencias de pulsos destinadas a proteger los estados cuánticos de la decoherencia (Suter & Álvarez 2016).

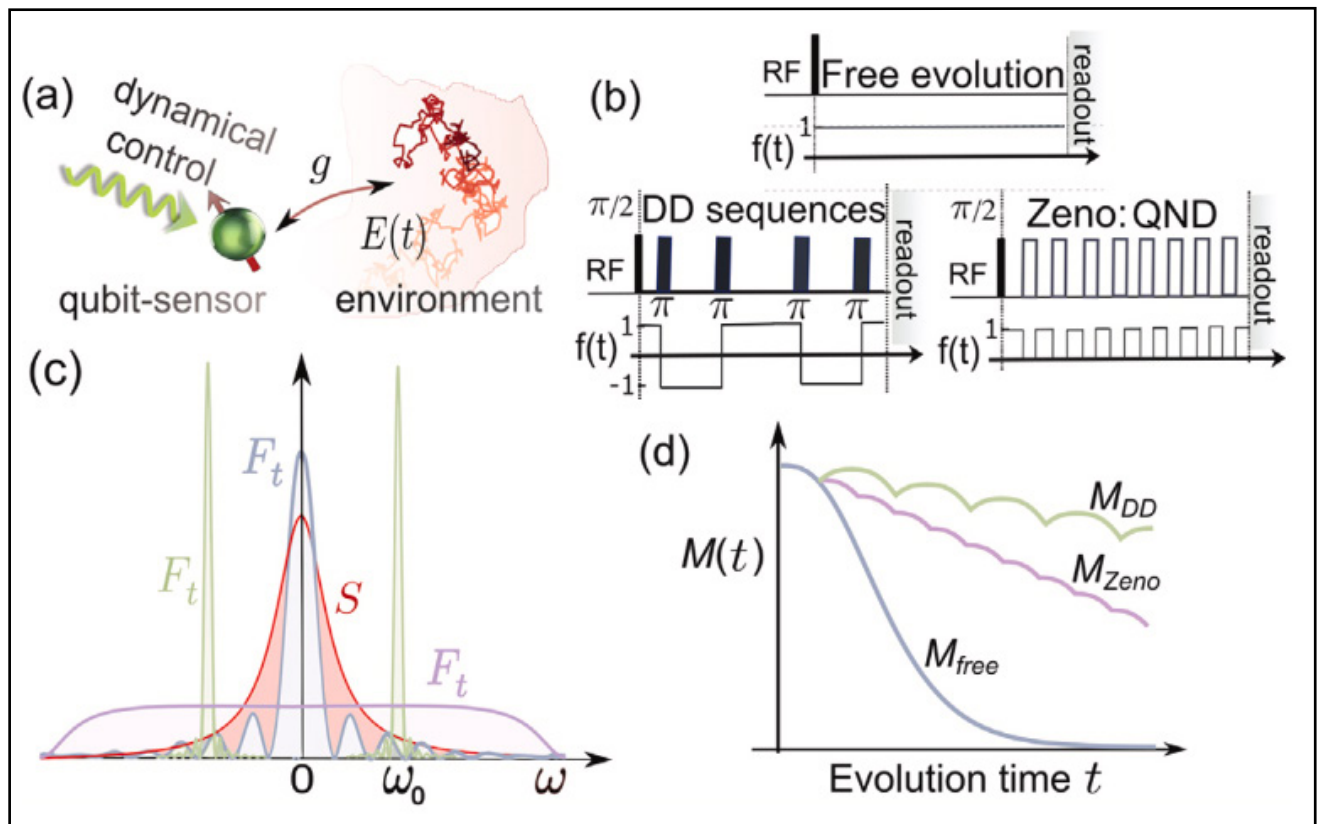


**Figura 3.** Secuencia de Hahn y principio de desacoplamiento dinámico como mecanismo de protección de la información cuántica. (a) Formación de un eco mediante un pulso de inversión  $\pi$ . La traza superior muestra la secuencia de pulsos (rectángulos) y la señal promedio del ensamble de espines (línea verde). Debido a inhomogeneidades estáticas del entorno, los espines acumulan fases distintas y la magnetización se desfasa, perdiendo coherencia. El pulso  $\pi$  invierte la evolución relativa de fases y permite que, en el tiempo  $2\tau$ , las trayectorias de fase se reencuentren, produciendo un eco. El panel central ilustra la orientación de dos espines individuales, mientras que el inferior muestra su evolución de fase (líneas roja y azul), evidenciando la reversión de la dispersión de fases. (b) Comparación entre el decaimiento de la magnetización en precesión libre y bajo control mediante el eco de Hahn. Ambas señales son proporcionales a la coherencia de un estado cuántico. En evolución libre, la coherencia decae rápidamente por desfásaje; en cambio, el eco compensa las contribuciones estáticas del entorno y recupera coherencia. El decaimiento residual del eco indica que el entorno presenta fluctuaciones dinámicas. El recuadro muestra el espectro de ruido ambiental  $S(\omega)$  (verde) y las funciones de filtro asociadas a la evolución libre (gris) y al eco de Hahn (rojo). A diferencia de la evolución libre, la función de filtro del Hahn se anula en  $\omega = 0$ , suprimiendo el ruido de baja frecuencia. Este principio constituye la base del desacoplamiento dinámico y de las estrategias modernas de protección de coherencia en tecnologías cuánticas. Figura adaptada de Suter & Álvarez (2016) *Review of Modern Physics* 88, 041001.

Con el tiempo, estas técnicas se sofisticaron enormemente. Secuencias como las de Carr–Purcell–Meiboom–Gill (CPMG) aplican trenes de pulsos periódicos que corrigen las fluctuaciones del entorno. Estas ideas, originalmente desarrolladas en el ámbito de la RMN, se generalizaron en lo que hoy se conoce como

desacoplamiento dinámico (dynamical decoupling, DD): un conjunto de estrategias que utilizan pulsos o campos externos para promediar las interacciones indeseadas y preservar la coherencia cuántica (Suter & Álvarez 2016). El impacto de estas técnicas trascendió rápidamente a la RMN. Actualmente, variantes de DD

se emplean en múltiples plataformas de la segunda revolución cuántica, incluyendo iones atrapados, átomos ultrafríos, centros de vacancia-nitrógeno en diamante y circuitos superconductores. El concepto central sigue siendo el mismo: mediante secuencias cuidadosamente diseñadas, es posible extender la



**Figura 4.** Control de la decoherencia de un sensor cuántico y diseño de su sensibilidad espectral. (a) El espín nuclear —un qubit sensor— puede controlarse dinámicamente para maximizar la información relevante sobre su entorno, con el cual interactúa mediante un acoplamiento de intensidad  $g$ . La información sobre las fluctuaciones ambientales  $E(t)$  se infiere a partir de la decoherencia inducida en el qubit. (b) Secuencias de control que modulan la interacción sensor–entorno mediante una función de modulación  $f(t)$ : (i) Evolución libre, con  $f(t) = 1$ . (ii) Secuencias de eco de espín o desacoplamiento dinámico (DD), que alternan el signo de la modulación entre  $f(t) = \pm 1$ . (iii) Evolución libre interrumpida por mediciones proyectivas no demolitorias (QND), que reinician el estado del qubit. Para mediciones suficientemente frecuentes se observa el efecto Zeno cuántico (QZE). Todas las secuencias comienzan con un pulso de excitación  $\pi/2$  y finalizan con la lectura de la señal. (c) Representación espectral del desfase. Se muestra una densidad espectral ambiental típica  $S(\omega)$  (rojo) y las funciones de filtro  $F(\omega)$  asociadas a cada protocolo (azul: evolución libre; verde: DD; violeta: QND). Cada secuencia define una ventana espectral distinta: la evolución libre es sensible principalmente a ruido de baja frecuencia; el desacoplamiento dinámico desplaza la sensibilidad hacia frecuencias seleccionadas  $\pm\omega_0$ ; y las mediciones frecuentes generan un filtro amplio asociado al QZE. (d) Comportamiento esquemático del decaimiento de la magnetización  $M(t)$  bajo las tres estrategias de control. En conjunto, estas técnicas permiten diseñar la respuesta espectral del sensor y convertir la decoherencia en un recurso para extraer información selectiva sobre el entorno, fundamento del sentido cuántico moderno. Figura adaptada de Zwick & Álvarez (2023) *Journal of Magnetic Resonance Open*, 16-17, 100113.

vida útil de la información cuántica y, con ello, ampliar el horizonte de aplicaciones prácticas. Más allá del desacoplamiento, la RMN también aportó al diseño de pulsos compuestos y control robusto, que corrigen errores sistemáticos de calibración y aseguran que pequeñas imperfecciones no se acumulen sino que se compensen entre sí (Souza et al. 2011). Estas técnicas se integran con otras estrategias desarrolladas en la teoría de la información cuántica, como los códigos de corrección de errores y los subespacios libres de decoherencia, que introducen redundancia y simetrías para blindar la información contra ciertas clases de perturbaciones (Souza et al. 2012, Suter & Álvarez 2016).

En Argentina, varios grupos han contribuido de forma significativa a este campo. Por un lado, mediante estudios experimentales en sistemas sólidos y líquidos, se exploró la irreversibilidad cuántica y la forma en que las interacciones de muchos cuerpos aceleran la pérdida de coherencia, proporcionando modelos realistas para comprender cómo se degrada la información en condiciones experimentales (Álvarez & Suter 2010, Álvarez et al. 2015b, Domínguez et al. 2021). Por otro lado, se diseñaron e implementaron estrategias de desacople dinámico robusto, capaces de mantener la coherencia incluso bajo fluctuaciones intensas y entornos complejos (Souza et al. 2011, Souza et al. 2012). Estas contribuciones se destacaron tanto en el plano conceptual como en el experimental, y han tenido impacto internacional.

Un aspecto especialmente interesante que surgió de estas investigaciones es que proteger la información cuántica no siempre significa eliminar la decoherencia por completo. En algunos casos, las mismas herramientas que se utilizan para

suprimir el ruido pueden configurarse de manera tal que “filtren selectivamente” el entorno, revelando información sobre él (Álvarez & Suter 2011, Álvarez et al. 2013). De esta manera, la frontera entre proteger contra la decoherencia y explotarla como recurso se vuelve difusa (ver **Figura 4**). Este cambio de perspectiva dio lugar a un área de gran desarrollo en los últimos años: el sentido cuántico (quantum sensing), donde la decoherencia deja de ser un enemigo para convertirse en una fuente de información útil (Zwick et al. 2016, Zwick & Álvarez 2023).

En síntesis, la protección de la información cuántica tiene sus raíces en la RMN, desde los primeros ecos de Hahn hasta las modernas secuencias de desacoplamiento dinámico y los protocolos de control robusto. Estas técnicas se consolidaron como herramientas centrales en la segunda revolución cuántica y siguen siendo perfeccionadas con aportes clave desde Argentina. El siguiente paso, que exploramos en la próxima sección, es cómo esas mismas herramientas pueden invertirse: en lugar de simplemente proteger a los sistemas de su entorno, utilizarlas para convertir al entorno en una fuente de información valiosa mediante estrategias avanzadas de sentido cuántico.

## ■ SENSADO CUÁNTICO

El desarrollo de técnicas para proteger la información cuántica condujo, casi de manera natural, a un cambio de perspectiva: si la decoherencia es inevitable, ¿por qué no aprovecharla como un recurso? De esta idea surge el concepto de quantum sensing, donde los propios procesos de interacción con el entorno, lejos de ser un obstáculo, se convierten en una ventana privilegiada para observarlo. En este marco, un espín nuclear puede pensarse como un sensor cuántico elemental. Su estado responde a los campos magnéticos locales, a las fluctuaciones ambientales o al movimiento de las moléculas que lo rodean. Mediante técnicas de control dinámico, es posible diseñar la forma en que ese espín “escucha” al entorno: los pulsos de radiofrecuencia actúan como filtros espectrales que seleccionan qué frecuencias de ruido o qué procesos dinámicos afectan más fuertemente a la coherencia del sensor (Zwick & Álvarez 2023, ver **Figura 4**). De esta manera, la decoherencia de un espín deja de ser un síntoma indeseado y pasa a convertirse en una medición indirecta del entorno. La pregunta ya no es cómo evitar que el espín pierda coherencia, sino cómo hacer que esa pérdida revele de manera óptima la información que buscamos.

### Nota Editorial 4: Convertir al enemigo en aliado

A lo largo del desarrollo de las tecnologías cuánticas, la “decoherencia”—la pérdida de las delicadas propiedades cuánticas debido al ruido e interferencia del ambiente— siempre ha sido considerada el mayor enemigo a vencer, ya que destruye la información almacenada en los qubits. Sin embargo, el “sentido cuántico” propone un cambio de paradigma clave: darle la vuelta al problema. Si el ruido de una célula, una molécula o un tejido es lo que destruye el estado cuántico de nuestro espín, entonces medir *cuán rápido y de qué manera* se destruye nos da una radiografía ultra-precisa de ese mismo entorno. El espín se “sacrifica” a propósito para leer lo que hay a su alrededor, convirtiéndose en el sensor más sensible permitido por las leyes de la física.

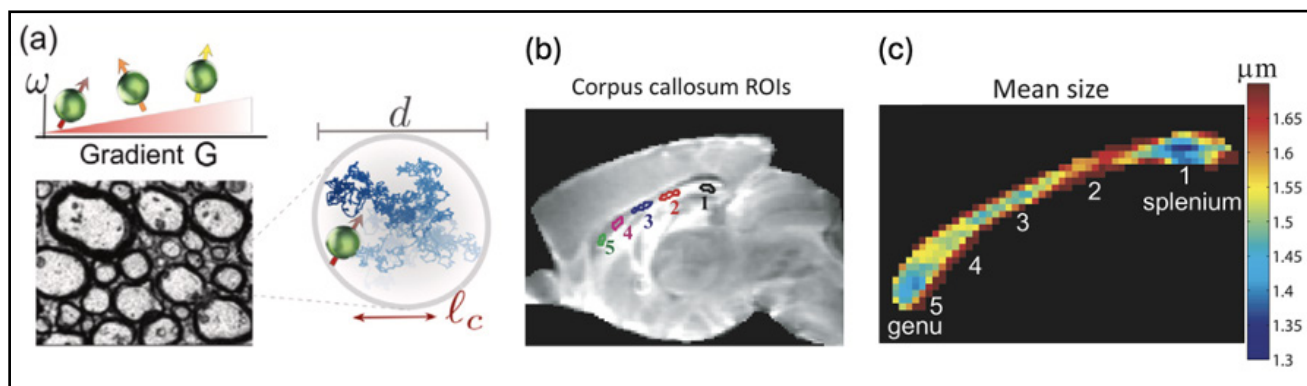
Este principio dio lugar a un repertorio de métodos que reinterpretan técnicas clásicas de la RMN en términos de sentido cuántico. Experimentos basados en ecos de Hahn, secuencias CPMG o variantes de desacoplamiento dinámico se reformularon como herramientas para filtrar selectivamente el ruido ambiental y extraer información sobre sus propiedades espectrales (Álvarez & Suter 2011, Álvarez et al. 2013, Zwick et al. 2016). En paralelo, se desarrollaron enfoques inspirados en el efecto Zeno cuántico, donde la decoherencia inducida de manera controlada congela o modula la dinámica del sensor, y técnicas híbridas que combinan pulsos coherentes con proyecciones efectivas (Álvarez et al. 2010a, Bretschneider et al. 2012, Zwick & Álvarez 2023, Ronchi 2024). Las aplicaciones de este enfoque son diversas y abarcan desde la física fundamental hasta la

biomedicina. En imágenes de resonancia magnética ponderadas en difusión, los núcleos de hidrógeno del agua funcionan como sensores naturales del microentorno tisular (Figura 5). Al diseñar secuencias de gradientes y pulsos que codifican la difusión molecular en la señal, se obtiene información sobre la microestructura del tejido a escalas mucho menores que el tamaño del vóxel (pixel volumétrico), lo que abre la posibilidad de realizar una “biopsia virtual no invasiva” con relevancia directa en el diagnóstico temprano de enfermedades neurodegenerativas (Shemesh et al. 2015, Capiglionni et al. 2021).

En la física de muchos cuerpos fuera del equilibrio, los mismos protocolos que permiten medir la decoherencia de un espín se adaptaron para estimar correlaciones complejas en sistemas sólidos, incluyendo los

correladores fuera de orden temporal, que cuantifican cómo una perturbación local se propaga y se disemina por todo el sistema (Domínguez et al. 2021, Zwick & Álvarez 2023, Kuffer et al. 2025). En química y biología molecular, por su parte, se han utilizado protocolos de estimación selectiva de acoplamientos espín–espín para inferir la topología de redes de interacciones, proporcionando información estructural de moléculas complejas (Bretschneider et al. 2012, Ronchi 2024). Incluso se han propuesto esquemas de aprendizaje adaptativo en tiempo real, donde el control se ajusta dinámicamente en función de los resultados experimentales, optimizando la eficiencia del sentido (Zwick et al. 2016).

Una característica distintiva de la RMN como plataforma de quantum sensing es que trabaja con conjuntos muy grandes de espines, del



**Figura 5.** Concepto de codificación de tamaños microestructurales tisulares en la señal de un espín sensor. (a) Esquema de axones en la sustancia blanca cerebral, rodeados por la vaina de mielina. En presencia de un gradiente de campo magnético, los espines nucleares precesan con frecuencias dependientes de su posición. El movimiento browniano de las moléculas de agua les permite explorar el entorno microscópico y “sentir” las restricciones geométricas impuestas por la microestructura. Esta exploración codifica en la señal una longitud de correlación característica  $l_c$ , relacionada con el tamaño de los compartimentos (por ejemplo, en geometrías cilíndricas  $l_c$  es proporcional al diámetro axonal). Adaptado de Zwick & Álvarez (2023) *Journal of Magnetic Resonance Open*, 16-17, 100113. (b) Regiones de interés (ROIs) definidas en distintas áreas anatómicas del cuerpo calloso del cerebro de un ratón, superpuestas a una imagen de referencia por MRI. Estas regiones permiten comparar cuantitativamente propiedades microestructurales en diferentes zonas del tejido. (c) Mapas paramétricos obtenidos a partir del diseño de secuencias de control cuántico que permiten codificar en la coherencia del sensor información sobre la distribución de tamaños microestructurales tisulares  $l_c$  (valor medio, pico y ancho). El contraste observado entre distintas regiones del cuerpo calloso refleja diferencias en la organización y tamaño de la microestructura axonal. (b,c) Adaptados de Shemesh et al. (2015) *PLoS ONE* 10, e0133201.

orden de  $10^{20}$  en una muestra macroscópica. Esto contrasta con otras tecnologías de sensores cuánticos que se basan en qubits individuales. La señal de la RMN, aunque más débil a nivel de cada espín, puede detectarse de manera no invasiva y en condiciones de temperatura ambiente, lo que la convierte en una herramienta única para aplicaciones biomédicas. En Argentina, varios desarrollos recientes han puesto especial énfasis en esta fortaleza, con el diseño de secuencias capaces de extraer información microscópica a partir de ensamblajes y optimizar la relación entre decoherencia y sensibilidad (Álvarez et al. 2013, Zwick et al. 2020). Estos trabajos muestran que la RMN no solo compete con otras plataformas de sensado cuántico, sino que además ofrece ventajas complementarias, en particular en la interfaz entre física fundamental, materiales y aplicaciones médicas (Zwick & Álvarez 2023).

### ■ PURIFICACIÓN E HIPERPOLARIZACIÓN DE ESTADOS CUÁNTICOS

Uno de los grandes retos para la implementación de tecnologías cuánticas es la preparación de estados cuánticos puros. La mayoría de los sistemas disponibles en condiciones experimentales corrientes presentan mezclas térmicas con muy bajo grado de orden, lo que limita seriamente su utilidad para el cómputo, el almacenamiento y el sensado cuántico. En este contexto, la resonancia magnética nuclear y los sistemas de espines en sólidos han sido terreno fértil para el diseño de protocolos de purificación, orientados a incrementar la polarización y crear estados mucho más cercanos a la pureza ideal.

Un enfoque particularmente prometedor es la hiperpolarización

de núcleos a partir de defectos en diamante, como los centros de vacancia-nitrógeno (NV). Estos sistemas permiten polarizar de manera muy eficiente el espín electrónico del defecto a temperatura ambiente y transferir esa polarización a los núcleos de  $^{13}\text{C}$  del entorno. A través de procesos de difusión de espín, la polarización se propaga y alcanza un número creciente de núcleos, de modo que un ensamble inicialmente desordenado puede transformarse en un conjunto con un grado de pureza muy superior al natural. Los desarrollos recientes han demostrado que, al combinar bombeo óptico, excitación coherente por microondas y secuencias de control dinámico, es posible implementar protocolos robustos de transferencia de polarización que funcionan en condiciones realistas y sin necesidad de recurrir a temperaturas criogénicas. Esto permitió lograr niveles apreciables de orden nuclear no solo en las proximidades inmediatas de los centros NV, sino también en regiones macroscópicas del cristal. La importancia de este avance radica en mostrar que es posible alcanzar estados cuánticos purificados en materiales y condiciones que antes se consideraban fuera del alcance.

Miembros de grupos en Argentina han realizado contribuciones significativas en esta dirección, proponiendo y validando esquemas de purificación que explotan tanto la interacción controlada con defectos electrónicos como la propagación de la polarización en redes nucleares (Álvarez et al. 2015a, Ajoy et al. 2018). Estos trabajos han ayudado a consolidar la idea de que la interacción con el entorno, habitualmente vista como fuente de decoherencia, puede aprovecharse también para inducir procesos de enfriamiento y purificación controlada. Más allá de su interés conceptual, la purificación de

estados cuánticos tiene un claro valor práctico. Por un lado, permite preparar condiciones iniciales bien definidas para estudiar fenómenos colectivos en dinámica cuántica fuera del equilibrio. Por el otro, abre la puerta a aplicaciones como las memorias cuánticas basadas en espines nucleares, capaces de preservar información durante tiempos prolongados, y a la preparación de estados hiperpolarizados que potencien experimentos de sensado e imagen cuántica. En conjunto, estos resultados confirman que la RMN y los sistemas híbridos de espines en sólidos constituyen plataformas sólidas para la purificación de estados cuánticos. El camino recorrido, con aportes destacados de grupos en Argentina, demuestra la viabilidad de estas estrategias y refuerza su papel dentro del repertorio de herramientas clave de la segunda revolución cuántica. (Álvarez et al. 2015a, Ajoy et al. 2018)

### ■ PERSPECTIVAS HACIA LA SEGUNDA REVOLUCIÓN CUÁNTICA

La resonancia magnética nuclear ha demostrado ser una plataforma fundamental para el desarrollo de la información y las tecnologías cuánticas. Su madurez experimental y la versatilidad de sus técnicas de control han permitido estudiar y manipular sistemas cuánticos de muchos cuerpos, diseñar secuencias para proteger la coherencia y explorar el sensado cuántico en escalas microscópicas. Sin embargo, el horizonte de la disciplina se extiende más allá de la RMN convencional: la combinación con espines electrónicos en sólidos, en particular los centros de vacancia-nitrógeno en diamante, abre nuevas posibilidades de exploración en la nanoescala que proyectan a la resonancia magnética hacia dominios completamente nuevos (Rosenberg et al. 2026).

Uno de los campos donde la RMN seguirá desempeñando un papel decisivo es el de las memorias cuánticas. Los espines nucleares son candidatos naturales para almacenar información cuántica gracias a sus largos tiempos de coherencia. En combinación con protocolos avanzados de control dinámico y con hiperpolarización inducida por defectos electrónicos, pueden convertirse en registros colectivos estables que complementen arquitecturas de computación cuántica basadas en otros tipos de qubits. Este potencial de memoria se vuelve aún más prometedor en sistemas híbridos, donde la información se transfiere desde un espín electrónico, fácilmente accesible y manipulable, hacia un conjunto de espines nucleares que actúa como depósito de larga duración.

El campo del quantum sensing también ofrece un panorama de gran proyección. En la escala macroscópica, la RMN con ensamblajes nucleares ya se consolidó como una técnica no invasiva para obtener información microestructural, con aplicaciones directas en medicina y ciencia de materiales. La optimización de secuencias de control permitirá mejorar la resolución y la especificidad, potenciando su uso como “microscopio cuántico” para caracterizar entornos complejos. Al mismo tiempo, los espines electrónicos en defectos en sólidos representan una vía complementaria para acceder a escalas aún menores. Los centros NV en diamante, en particular, actúan como sensores cuánticos de alta sensibilidad capaces de detectar campos magnéticos débiles a nivel nanométrico. En este terreno se vislumbra el desarrollo de tecnologías de nano-MRI, capaces de generar imágenes de moléculas individuales, proteínas o incluso procesos intracelulares en tiempo real. Estos avances abrirán la posibilidad de estudiar directamente la organización

molecular de la vida, con implicancias profundas para la biología y la medicina.

En el área de la comunicación intra-dispositivo, las cadenas de espines exploradas en RMN ofrecen un modelo viable para la transferencia de información dentro de procesadores cuánticos. La posibilidad de transmitir estados cuánticos a través de redes de espines sin recurrir a interfaces externas constituye un recurso estratégico para la escalabilidad de la computación cuántica. Los resultados experimentales obtenidos en sistemas de RMN, incluyendo observaciones de procesos de intercambio elemental y ecos mesoscópicos, demuestran que estas dinámicas pueden aprovecharse en arquitecturas cuánticas integradas. El futuro de la comunicación cuántica a escala local probablemente combine estos conceptos con tecnologías de espines electrónicos en sólidos, dando lugar a dispositivos híbridos donde la transferencia de información se realice de manera eficiente y robusta.

La simulación cuántica es otro campo en el que la RMN ya mostró su potencial y donde se esperan desarrollos aún más ambiciosos. Mediante la ingeniería de Hamiltonianos promedio, es posible emular dinámicas de modelos de muchos cuerpos y explorar fenómenos fuera del equilibrio. Los experimentos de RMN han permitido implementar correladores fuera de orden temporal y estudiar el scrambling de la información, aportando evidencia experimental a cuestiones que parecían reservadas a la teoría. El avance en la RMN impulsa nuevas estrategias experimentales y tecnologías de adquisición de datos que transforman la forma de estudiar sistemas cuánticos complejos. Un ejemplo clave es el Floquet driving, una técnica que aplica pulsos periódicos muy

rápidos para “domar” la evolución cuántica de sistemas fuera del equilibrio. Este control permite acceder a un régimen “pretérmico”, donde la dinámica se vuelve más predecible y las señales se refuerzan hasta mil veces, logrando observar fenómenos que antes quedaban enterrados en el ruido. Un aspecto curioso es la observación de una ruptura de simetría temporal, algo conocido como “time crystal” o cristales temporales, característicos de sistemas de no-equilibrio forzados periódicamente.

Gracias a esta sensibilidad mejorada que se ha podido lograr en base a la comprensión profunda de los procesos mecánico-cuánticos del sistema de espines, hoy es posible estudiar y analizar de nuevas maneras, cómo se forman y crecen los clusters de espines correlacionados. La combinación con nuevos métodos de tratamiento de datos —como algoritmos de inversión numérica extremadamente sensibles— abre la puerta a modelar con precisión la distribución y evolución de estas correlaciones, enriqueciendo nuestro entendimiento de la dinámica cuántica fuera del equilibrio, y al mismo tiempo ofreciendo herramientas potenciales para otras tecnologías emergentes, como la simulación cuántica, la computación tolerante a errores y el sensado de ultra alta precisión.

En el futuro, la integración con defectos electrónicos y materiales híbridos permitirá diseñar simuladores cuánticos combinando la robustez de los núcleos con la sensibilidad y el acceso directo de los electrones, abriendo nuevas oportunidades para modelar materiales cuánticos, fases exóticas y procesos críticos.

En el ámbito biomédico, la resonancia magnética sigue siendo una de las aplicaciones más relevantes y socialmente impactantes. El avance

de las secuencias basadas en difusión y control dinámico promete ampliar las capacidades diagnósticas de la imagen por resonancia magnética, permitiendo una caracterización microestructural del tejido vivo con un nivel de detalle sin precedentes. Esta perspectiva apunta hacia la realización de una biopsia virtual no invasiva, con la capacidad de detectar alteraciones en estadios tempranos de enfermedades neurodegenerativas o metabólicas. En paralelo, la emergencia de técnicas basadas en espines electrónicos, como los centros NV, proyecta la posibilidad de desarrollar nano-MRI biomolecular, capaz de obtener imágenes con resolución nanométrica de estructuras intracelulares (Rosenberg et al. 2026). La combinación de estas dos aproximaciones —la imagen macroscópica no invasiva y la microscopía cuántica en la nanoescala— configura un panorama en el que la resonancia magnética se transforma en una herramienta transversal, desde el organismo completo hasta la molécula individual.

Los centros NV y otros defectos electrónicos en sólidos serán protagonistas en esta transición. Su capacidad para ser polarizados ópticamente y leídos con alta fidelidad a temperatura ambiente, sumada a su interacción con redes de espines nucleares, los convierte en nodos privilegiados para construir sistemas híbridos. Estos materiales permiten combinar la sensibilidad extrema de los electrones con la estabilidad de los núcleos, habilitando dispositivos que integran sensado, memoria y simulación en una misma arquitectura. A partir de estos avances, se vislumbra un camino hacia tecnologías de diagnóstico molecular, plataformas de simulación híbrida y herramientas de biología cuántica orientadas a entender procesos intracelulares con una resolución sin precedentes.

La proyección del rol de la RMN y de los espines electrónicos en las próximas décadas muestra un horizonte amplio y diversificado. Ambas plataformas, lejos de ser excluyentes, se complementan y potencian mutuamente. Mientras la RMN aprovecha la fuerza del ensamble y su carácter no invasivo para aplicaciones macroscópicas, los espines electrónicos y los sistemas híbridos expanden el alcance hacia la nanoescala y las aplicaciones moleculares. Esta dualidad convierte a la resonancia magnética, en su acepción más amplia, en un pilar de la segunda revolución cuántica.

En conjunto, estas líneas de desarrollo —memorias híbridas, comunicación en redes de espines, simulación fuera del equilibrio, nano-MRI biomolecular— delinean un programa de investigación donde la resonancia magnética no sólo amplía sus aplicaciones, sino que redefine su papel dentro de la arquitectura de las tecnologías cuánticas emergentes.

## ■ COMENTARIOS FINALES

La resonancia magnética ha sido, de manera natural, una de las primeras plataformas en las que se exploró el control cuántico de la información. Su base conceptual consiste en manipular estados de espín para codificar y procesar información, lo que facilitó la evolución, cada vez más sofisticada, hacia el control dinámico, protección y sensado. Este recorrido convirtió a la RMN en la técnica de información cuántica más madura en cuanto a aplicaciones concretas, con un impacto directo y comprobado en áreas como la medicina, la biología y la ciencia de materiales.

Sin embargo, esta madurez se alcanzó en un marco particular: la mayoría de sus aplicaciones prác-

ticas funcionan en ensambles macroscópicos de espines, donde la señal colectiva permite acceder a información útil pero al mismo tiempo dificulta la observación directa de fenómenos locales o de entrelazamiento. En estos sistemas se han identificado correlaciones cuánticas de muchos cuerpos que trascienden lo clásico, aunque todavía no existe una medida clara que permita caracterizar inequívocamente el entanglement en ensambles de gran tamaño. Este es un desafío abierto de enorme interés conceptual, que conecta la RMN con preguntas fundamentales sobre la naturaleza de la información cuántica en sistemas complejos. En este escenario, las técnicas de RMN y el diseño de secuencias de pulsos tampoco son ajenos al impacto de la inteligencia artificial: el uso de algoritmos avanzados permitiría optimizar secuencias para implementar Hamiltonianos específicos, que luego podrían probarse experimentalmente, y también desarrollar nuevas estrategias de corrección de errores para evitar la pérdida de señal en estos sistemas cuánticos macroscópicos.

La resonancia magnética, tanto en su versión macroscópica como en su evolución hacia plataformas híbridas que integran espines nucleares y electrónicos, constituyendo así una técnica establecida con aplicaciones concretas que ya benefician a la sociedad y, al mismo tiempo, abierta a transformaciones profundas que la proyectan hacia nuevas escalas y arquitecturas de control cuántico. Esta convergencia entre estabilidad nuclear y sensibilidad electrónica amplía su alcance desde ensambles colectivos hasta dispositivos de interrogación local, configurando un marco experimental donde memoria, sensado y simulación pueden coexistir dentro de un mismo sistema físico. Grupos en Argentina han contribuido de forma

significativa a este recorrido, desde el diseño de protocolos de control robusto hasta el desarrollo de estrategias de sensado y purificación en sistemas híbridos. El futuro de la resonancia magnética cuántica, en todas sus escalas, seguirá ofreciendo oportunidades para generar conocimiento fundamental y aplicaciones con impacto directo en la Ciencia, la Tecnología y la Sociedad.

## ■ AGRADECIMIENTOS

Durante los últimos años hemos tenido la fortuna de trabajar en estos temas con numerosos estudiantes e investigadores talentosos y dedicados, entre ellos A. Ajoy, R.H. Acosta, C. Bretshneider, L. Buljubasich, M. Capiglioni, E. P. Danieli, F. D. Domínguez, R. Fischer, A. Finkler, L. Frydman, P. Jiménez, R. Kaiser, G. Kurizki, M. Kuffer, P. R. Levstein, P. London, F. S. Lozano-Negro, H. M. Pastawski, D. D. Bhaktavatsala Rao, M. C. Rodríguez, B. Ronchi, W. Rosenberg, C.M. Sánchez, G. Sequeros, N. Shemesh, J. Stolze, D. Suter, A. M. Souza, A. Zwick y O. Osenda. G.A.A. agradece el apoyo de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), del Instituto Balseiro, de la Fundación Balseiro y de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT-FONCyT), a través de los proyectos PICT-2017-3156, PICT-2017-3699, PICT-2018-4333, PICT-2021-GRFTI-00134 y PICT-2021-I-A-00070, así como de los Proyectos de Investigación Plurianuales (PIP-CONICET) N.º 11220170100486CO y 11220220100531CO, y del programa PIBAA 2022–2023. Asimismo, se agradece el financiamiento de la Universidad Nacional de Cuyo (SIIP Tipo I 2019-C028, 2022-C002 y 2022-C030) y de los programas de colaboración internacional entre el MINCyT (Argentina) y MAECI (Italia), y entre el MINCyT y MOST

(Israel). A.K.C. agradece el apoyo de CONICET y de la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional de Córdoba (SECyT-UNC), a través de los programas CONSOLIDAR 2018–2022 y PIDTA 33620230100054CB. A.K.C. agradece al CCAD (Centro de Supercómputo de la Universidad Nacional de Córdoba) por los recursos brindados para realizar cálculos computacionales en los trabajos citados.

## ■ GLOSARIO

**Caos cuántico:** Estudio de sistemas cuánticos cuyo comportamiento es muy sensible a perturbaciones, similar al caos clásico pero con rasgos cuánticos.

**Centros NV** (Vacancias de nitrógeno en diamante): Defectos en la estructura del diamante que actúan como qubits altamente sensibles y controlables, utilizados en sensado cuántico y computación.

**Cluster de espines:** Grupo de partículas cuyos espines están correlacionados cuánticamente. Se caracterizan por su tamaño.

**Coherencias cuánticas múltiples:** Estados en los que varios espines están correlacionados y evolucionan colectivamente, generando señales características en RMN.

**Computación cuántica:** Campo de estudio y desarrollo de tecnologías que aprovechan las propiedades cuánticas para procesar información de manera diferente a la computación clásica.

**Decoherencia:** Pérdida de las propiedades cuánticas debido a la interacción con el entorno, lo que lleva a un comportamiento más clásico.

**Eco de Loschmidt:** Señal que se obtiene al revertir la evolución temporal de un sistema cuántico y com-

pararla con la condición inicial. Permite medir la dificultad de revertir una evolución en el tiempo ante perturbaciones.

**Espín:** Propiedad cuántica de las partículas subatómicas, similar a un pequeño imán, que puede manipularse para obtener información del sistema.

**Estado cuántico:** Descripción completa del estado físico de un sistema cuántico, que incluye información sobre sus posibles resultados de medición.

**Hamiltoniano (cuántico):** Función matemática que describe la energía total de un sistema cuántico y su evolución en el tiempo.

**OTOC (Out-of-Time-Ordered Correlator):** Herramienta para estudiar la velocidad de propagación de la información cuántica, relacionada con el caos cuántico.

**RMN (Resonancia Magnética Nuclear):** Técnica experimental que permite estudiar la estructura y dinámica de materiales observando el comportamiento cuántico de los espines de los núcleos atómicos, en presencia de un campo magnético.

**Scrambling:** Proceso por el cual la información cuántica se dispersa entre muchas partículas en un sistema de muchos cuerpos y deja de ser accesible a una observación local.

**Secuencias de pulsos:** Series de pulsos de radiofrecuencia diseñadas para manipular el estado de los espines y controlar la dinámica cuántica en experimentos de RMN, para el diseño de aplicaciones de en general de caracterización de moléculas, materiales, procesos físicos, químicos y biológicos.

**Simulación cuántica:** Uso de sistemas cuánticos controlables, como

los espines nucleares en RMN, para imitar otros sistemas cuánticos complejos.

**Termalización:** Proceso mediante el cual un sistema cuántico de muchos cuerpos evoluciona hacia un estado en el que sus subsistemas pequeños exhiben propiedades compatibles con la termodinámica, aun cuando el sistema global permanece en un estado puro.

## ■ REFERENCIAS

- Ajoy, A., Liu, K., Nazaryan, R., Lv, X., Zangara, P. R., Safvati, B., Wang, G. et al. (2018) Orientation-Independent Room Temperature Optical  $^{13}\text{C}$  Hyperpolarization in Powdered Diamond. *Science Advances* 4, eaar5492.
- Álvarez, G. A., Danieli, E. P., Levstein, P. R. & Pastawski, H. M. (2006) Environmentally induced Quantum Dynamical Phase Transition in the spin swapping operation. *Journal of Chemical Physics* 124, 194507.
- Álvarez, G. A. & Suter, D. (2010) NMR quantum simulation of localization effects induced by decoherence. *Physical Review Letters* 104, 230403.
- Álvarez, G. A., Bhaktavatsala Rao, D. D., Frydman, L. & Kurizki, G. (2010a) Zeno and anti-Zeno polarization control of spin-ensembles by induced dephasing. *Physical Review Letters* 105, 160401.
- Álvarez, G. A., Mishkovsky, M., Danieli, E. P., Levstein, P. R., Pastawski, H. M. & Frydman, L. (2010b) Perfect state transfers based on selective quantum interferences within a complex spin network. *Physical Review A (Rapid Communication)* 81, 060302.
- Álvarez, G. A. & Suter, D. (2011) Measuring the spectrum of colored noise by dynamical decoupling. *Physical Review Letters* 107, 230501.
- Álvarez, G. A., Shemesh, N. & Frydman, L. (2013) Coherent dynamical recoupling of diffusion-driven decoherence in magnetic resonance. *Physical Review Letters* 111, 080404.
- Álvarez, G. A., Bretschneider, C. O., Fischer, R., London, P., Kanda, H., Onoda, S., Isoya, J., Gershoni, D. & Frydman, L. (2015a). Local and bulk  $^{13}\text{C}$  hyperpolarization in nitrogen-vacancy-centred diamonds at variable fields and orientations. *Nature Communications*, 6, 8456.
- Álvarez, G. A., Suter, D. & Kaiser, R. (2015b). Localization-delocalization transition in the dynamics of dipolar-coupled nuclear spins. *Science* 349, 846.
- Álvarez, G. A. (2022) Una mirada a las tecnologías cuánticas y la medicina. in Serie: hojitas de conocimiento, No 51 CIENCIA (Comisión Nacional de Energía Atómica - Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable, Argentina, (2022), pp. 455–456. ISBN: 978-987-1323-12-8.
- Braunstein, S. L., Caves, C. M., Jozsa, R., Linden, N., Popescu, S. & Schack, R. 1999 Separability of Very Noisy Mixed States and Implications for NMR Quantum Computing. *Physical Review Letters* 83, 1054–57.
- Bretschneider, C. O., Álvarez, G. A., Kurizki, G. & Frydman, L. (2012) Controlling spin-spin network dynamics by repeated projective measurements. *Physical Review Letters* 108, 140403.
- Capiglion, M., Jiménez, P., Zwick, A. & Álvarez, G. A. (2021) Noninvasive Quantitative Imaging of Selective Microstructure Sizes via Magnetic Resonance. *Physical Review Applied* 15, 014045.
- Cory, D. G., Fahmy, A. F. & Havel, T. F. (1997) Ensemble Quantum Computing by NMR Spectroscopy. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 94, 1634–39.
- Domínguez, F. D., Rodríguez, M. C., Kaiser, R., Suter, D. & Álvarez, G. A. (2021) Decoherence scaling transition in the dynamics of quantum information scrambling. *Physical Review A* 104, 012402.
- Gershenfeld, N. A. & Chuang, I. L. 1997 Bulk Spin-Resonance Quantum Computation. *Science* 275, 350–56.
- Goussev, A., Jalabert, R. A., Pastawski, H. M. & Wisniacki, D. A. (2012). Loschmidt echo. *Scholarpedia*, 7, 11687.
- Hahn, E. L. (1950). Spin echoes. *Physical Review* 80, 580-594.
- Jalabert, R. A. & Pastawski, H. M. (2001) Environment-Independent Decoherence Rate in Classically Chaotic Systems. *Physical Review Letters* 86, 2490.
- Knill, E. & Laflamme, R. (1998) Power of One Bit of Quantum Information. *Physical Review Letters* 81, 5672-5675.
- Kuffer, M., Zwick, A. & Álvarez, G. A. (2025). Sensing out-of-equilibrium and quantum non-Gaussian environments via induced time-reversal symmetry breaking on the quantum-probe dynamics. *PRX Quantum* 6, 020320.

- Le Bihan, D. (2003). Looking into the Functional Architecture of the Brain with Diffusion MRI. *Nature Reviews Neuroscience* 4, 469–80.
- Levstein, P. R., Usaj, G. & Pastawski, H. M. (1998) Attenuation of Polarization Echoes in Nuclear Magnetic Resonance: A Study of the Emergence of Dynamical Irreversibility in Many-Body Quantum Systems. *The Journal of Chemical Physics* 108, 2718.
- Lewis-Swan, R. J., Safavi-Naini, A., Kaufman, A. M. & Rey, A. M. (2019) Dynamics of Quantum Information. *Nature Reviews Physics* 1, 627–34.
- Lozano-Negro, F. S., Sánchez, C. M., Chattah, A. K., Álvarez, G. A. & Pastawski, H. M. (2024). Global out-of-time-order correlators as a signature of scrambling dynamics of local observables. *Physical Review A* 110, 042410.
- Muller, L., Kumar, A., Baumann, T. & Ernst, R. R. (1974) Transient Oscillations in NMR Cross-Polarization Experiments in Solids. *Physical Review Letters* 32, 1402.
- Nielsen, M. A., Knill, E. & Laflamme, R. (1998) Complete Quantum Teleportation Using Nuclear Magnetic Resonance. *Nature* 396, 52–55.
- Pastawski, H. M., Levstein, P. R. & Usaj, G. (1995) Quantum Dynamical Echoes in the Spin Diffusion in Mesoscopic Systems. *Physical Review Letters* 75, 4310.
- Pastawski, H. M., Levstein, P. R., Usaj, G., Raya, J. & Hirschinger, J. (2000) A Nuclear Magnetic Resonance Answer to the Boltzmann-Loschmidt Controversy?. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 283, 166–170.
- Ronchi, B., Zwick, A. & Álvarez, G. A. (2024). Maximizing information obtainable by quantum sensors through the quantum Zeno effect. *Physical Review Applied* 22, 034058.
- Rosenberg, J. W., Kuffer, M. Zohar, I., Stöhr, R., Denisenko, A., Zwick, A., Álvarez, G. A. & Finkler, A. (2026) Witnessing non-stationary and non-Markovian environments with a quantum sensor. *Physical Review Applied* 25, 014049
- Sánchez, C. M., Levstein, P. R., Buljubasich, L., Pastawski, H. M. & Chattah, A. K. (2016). Quantum dynamics of excitations and decoherence in many-spin systems detected with Loschmidt echoes: Its relation to their spreading through the Hilbert space. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 374.
- Sánchez, C. M., Chattah, A. K., Wei, K. X., Buljubasich, L., Cappellaro, P. & Pastawski, H. M. (2020). Perturbation independent decay of the Loschmidt echo in a many-body system. *Physical Review Letters* 124, 030601.
- Sánchez, C. M., Chattah A. K., Pastawski H. M., (2022). Emergent decoherence induced by quantum chaos in a many-body system: A Loschmidt echo observation through NMR, *Physical Review A* 105, 052232.
- Sánchez, C. M., Pastawski, H. M. & Chattah, A. K. (2023). Low perturbation limit decoherence analyzed by scaling the double quantum Hamiltonian. *Journal of Magnetic Resonance Open*, 16–17, 100104.
- Sequeiros, G., Sánchez, C. M., Buljubasich, L., Chattah, A. K., Pastawski, H. M. & Acosta, R. H. (2025). Multiple quantum many-body clustering probed by dynamical decoupling. *Physical Review A* 112, 022617.
- Shemesh, N., Álvarez, G. A. & Frydman, L. (2015) Size distribution imaging by Non-Uniform Oscillating-Gradient Spin Echo (NOGSE) MRI. *PLoS ONE* 10, e0133201.
- Souza, A. M., Álvarez, G. A. & Suter, D. (2012). Robust dynamical decoupling. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 370, 4748–4769.
- Stolze, J., Álvarez, G. A., Osenda, O. & Zwick, A. (2014) Robustness of spin-chain state-transfer schemes in Quantum State Transfer and Network Engineering, edited by G. M. Nikolopoulos and I. Jex (Springer Berlin Heidelberg), pp. 149–182. Partly published in arXiv:1502.04879.
- Suter, D. & Álvarez, G. A. (2016). Protecting quantum information against environmental noise. *Review of Modern Physics* 88, 041001.
- Swingle, B. (2018). Unscrambling the physics of out-of-time-order correlators. *Nature Physics*, 14, 988–990.
- Zhang, S., Meier, B. H. & Ernst, R. R. (1992) Polarization Echoes in NMR. *Physical Review Letters* 69, 2149.
- Zwick, A., Álvarez, G. A., Stolze, J. & Osenda, O. (2011) Robustness

- of spin-coupling distributions for perfect quantum state transfer. *Physical Review A* 84, 022311.
- Zwick, A., Álvarez, G. A., and Kurizki, G. (2016) Maximizing information on the environment by dynamically controlled qubit probes. *Physical Review Applied* 5, 014007.
- Zwick, A., Suter, D., Kurizki, G. & Álvarez, G. A. (2020) Precision limits of tissue microstructure characterization by Magnetic Resonance Imaging. *Physical Review Applied* 14, 024088.
- Zwick, A. (2022) Una mirada a la resonancia magnética nuclear y la física cuántica, en Serie: hojitas de conocimiento, No 50 CIENCIA (Comisión Nacional de Energía Atómica - Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable, Argentina), 453–454. ISBN: 978-987-1323-12-8
- Zwick, A. & Álvarez, G. A. (2023). Quantum sensing tools to characterize physical, chemical and biological processes with magnetic resonance. *Journal of Magnetic Resonance Open* 16-17, 100113.

■ **NOTA**

1 Hace referencia a scrambled eggs (huevos revueltos), que a su vez está relacionado con el efecto mariposa cuántico (Swingle 2018, Lewis-Swan 2019)

# TOPOLOGÍA QUE SE MIDE: de los materiales cuánticos a la metrología

**Palabras clave:** topología, metrología, materiales cuánticos.

**Keywords:** *topology, metrology, quantum materials.*

**Resumen:** En las últimas décadas, distintas nociones de topología han pasado de la matemática al laboratorio, transformando nuestra comprensión de los electrones en sólidos y llegando a impactar la manera en que medimos magnitudes eléctricas. En este artículo presentamos cómo ciertos materiales cuánticos —superconductores, aisladores topológicos, semimetales de Weyl— exhiben propiedades robustas frente a perturbaciones que se capturan mediante invariantes topológicos. Estas propiedades no sólo son de interés fundamental: habilitan patrones de voltaje y resistencia de precisión cuántica, basados en el efecto Josephson y el efecto Hall cuántico, que hoy sustentan al Sistema Internacional de Unidades. Explicamos cómo estos avances han hecho posible calibraciones con incertidumbres de partes en  $10^{10}$ – $10^{11}$ . Asimismo, discutimos el impacto de estas ideas en la exploración y el diseño de nuevos materiales. Por último, delineamos líneas de desarrollo tecnológico —como fuentes Josephson programables y arbitrarias, y comparadores criogénicos de corriente— y señalamos perspectivas en las que Argentina participa activamente, desde la implementación de patrones cuánticos hasta la investigación en materiales. La topología, lejos de ser una abstracción, se ha convertido en una herramienta concreta para concebir materiales y dispositivos cuánticos de próxima generación.

**Measuring topology: from quantum materials to metrology**

**Abstract:** In recent decades, various topological concepts have moved from mathematics to the laboratory, transforming our understanding of electrons in solids and impacting how we measure electrical quantities. In this article, we present how certain quantum materials—superconductors, topological insulators, and Weyl semimetals—exhibit robust properties against perturbations captured by topological invariants. These properties are not only of fundamental interest: they enable quantum-precision voltage and resistance standards, based on the Josephson and quantum Hall effects, which underpin the International System of Units. We explain how these advances enabled calibrations having uncertainties of parts in  $10^{10}$  –  $10^{11}$  possible. We also discuss the impact of these ideas on the exploration and design of new materials. Finally, we outline lines of technological development—such as programmable and arbitrary Josephson sources and cryogenic current comparators—and highlight areas in which Argentina is actively involved, from the implementation of quantum standards to materials research. Topology, far from being an abstraction, has become a concrete tool for conceiving next-generation quantum materials and devices.

## ■ INTRODUCCIÓN

Comenzamos presentando dos definiciones: qué es la topología y qué es la metrología. En el presente artículo presentamos la evolución de un puente que se viene construyendo desde hace algunos años conectando estos dos conceptos: los materiales cuánticos. El resultado de esta unión juega un rol fundamental en el desarrollo de las nuevas tecnologías cuánticas.

La **topología** es una rama de la matemática que se enfoca en la ca-

racterización de propiedades de los cuerpos que no se ven modificadas frente a deformaciones continuas de los mismos. El ejemplo paradigmático es clasificar a los cuerpos según el número de agujeros. Esto permite identificar una taza a una rosca como cuerpos topológicamente equivalentes debido a que ambos tienen un agujero, de la misma manera que una esfera es topológicamente equivalente a un huevo, una manzana o una copa, como se ilustra en la **Figura 1**.

La **metrología** es la ciencia dedicada a las mediciones. Incluye las definiciones de las unidades de medida para las diversas propiedades físicas, así como la calibración de los instrumentos de medición tomando como base patrones de referencia confiables.

## ■ EL PUENTE: MATERIALES CUÁNTICOS

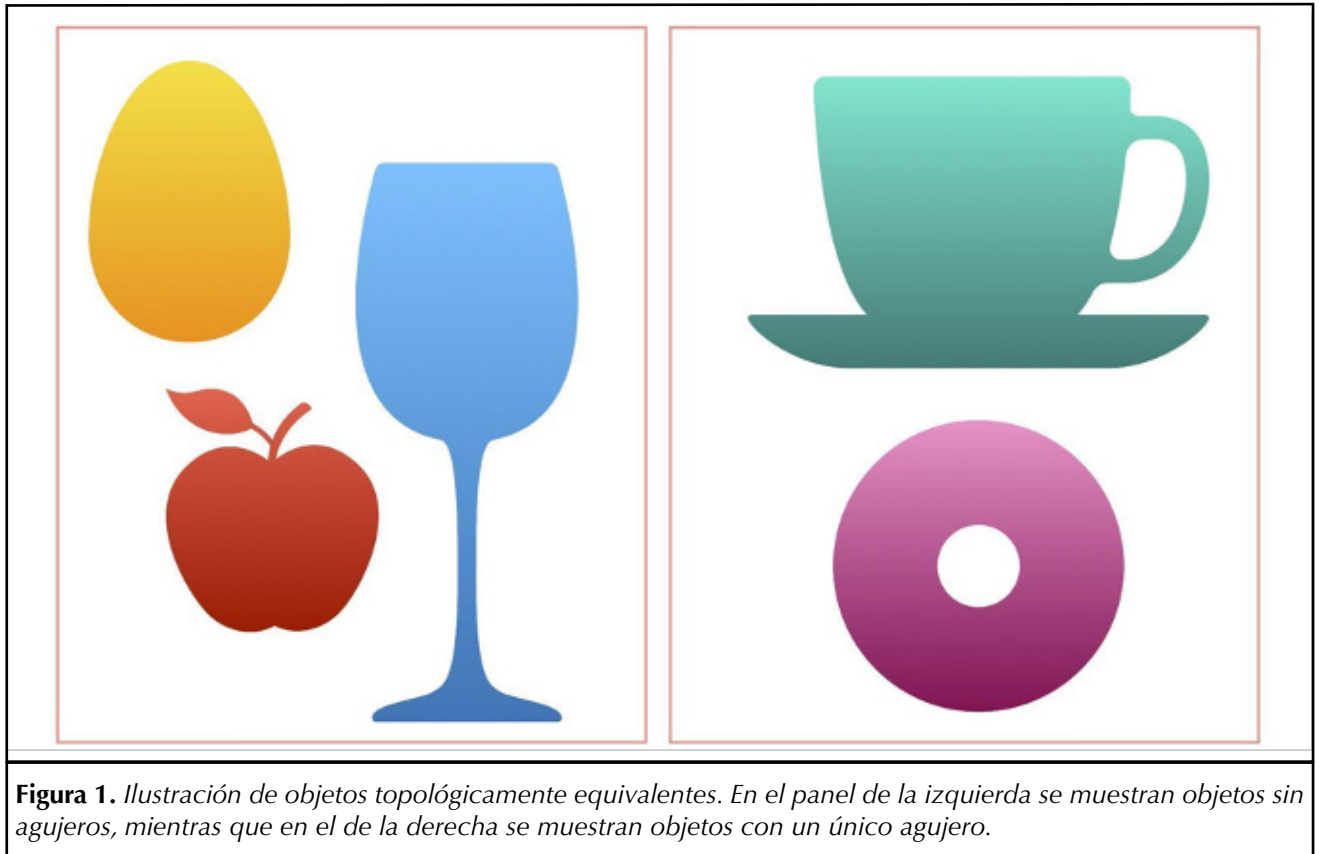
Este término se acuñó recientemente para identificar estructuras de estado sólido cuyas propiedades ma-

■ **Real, Mariano<sup>1</sup>; Facio, Jorge J<sup>2</sup>; Arrachea, Liliana<sup>2\*</sup>**

<sup>1</sup> Departamento de Metrología Cuántica, INTI, Gral. San Martín, Prov. de Buenos Aires, Argentina.

<sup>2</sup> División de Materiales Cuánticos y Sistemas Desordenados, Centro Atómico Bariloche, Instituto de Nanociencias y Nanotecnología e Instituto Balseiro, 8400 San Carlos de Bariloche, Argentina

\*E-mail: liliana.arrachea@ib.edu.ar



**Figura 1.** Ilustración de objetos topológicamente equivalentes. En el panel de la izquierda se muestran objetos sin agujeros, mientras que en el de la derecha se muestran objetos con un único agujero.

croscópicas derivan directamente de aspectos cuánticos tales como la **coherencia de fase**, el **entrelazamiento** y la **topología electrónica**. Describimos a continuación algunos de ellos:

**Superconductores:** Se caracterizan por conducir la electricidad sin resistencia y así generar super-corrientes capaces de producir campos magnéticos muy intensos. La existencia de este fenómeno a muy bajas temperaturas (de unos pocos K) fue observada por primera vez por H. K. Onnes en 1911 en Hg y luego en varios metales como Li, Ti, Cd, Al, Nb, entre otros. Su explicación teórica se consolidó en los años '50, primero en la teoría fenomenológica de Ginzburg-Landau y luego en la teoría microscópica presentada por Bardeen, Cooper y Schrieffer (BCS) en 1957<sup>1</sup>. En 1986 Bednorz y Müller observaron superconductividad en

una familia de materiales cerámicos que contiene  $\text{CuO}_2$  a temperaturas más altas (cercasas a los 100 K) y recibieron el Premio Nobel de Física al año siguiente. Dichos materiales se denominan “superconductores de alta temperatura crítica ( $T_c$ )”. Luego se observaron otros compuestos de esta familia. Presentan una fenomenología muy diferente a la de otros superconductores y, al día de la fecha, la explicación teórica de la superconductividad de alta  $T_c$  es uno de los grandes problemas abiertos de la física.

La superconductividad es un estado cuántico macroscópico, descrito por una función de onda de electrones entrelazados formando “pares de Cooper” que se mueven de forma coherente. Esto explica la ausencia de colisiones entre partículas y, por lo tanto, la ausencia de resistencia. La posibilidad de indu-

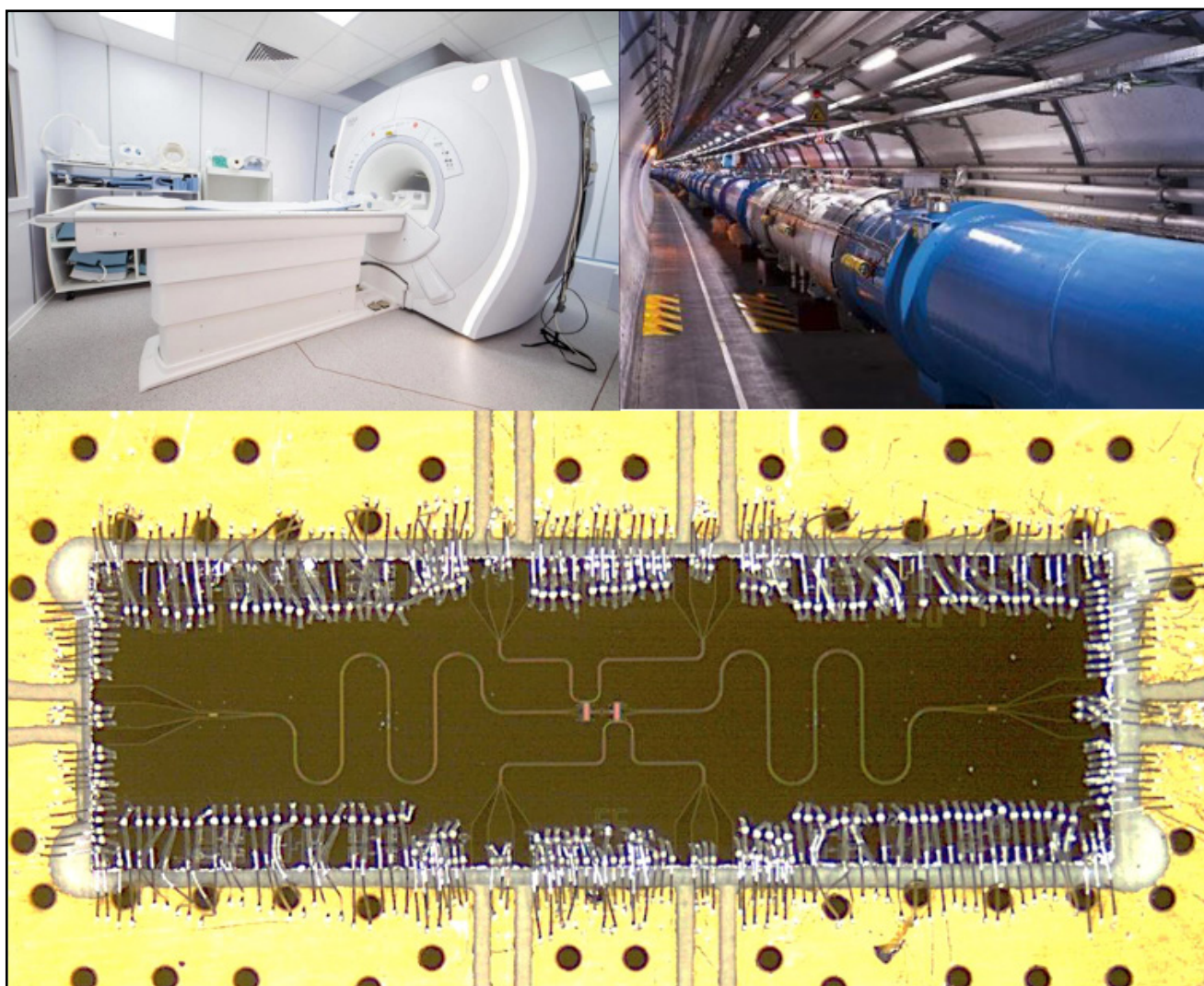
cir corrientes muy intensas permite generar altos campos magnéticos, que en la actualidad se utilizan en escenarios diversos. Por ejemplo, en los equipos de resonancia magnética nuclear (RMN, ver en este mismo volumen el artículo de los autores Ana Karina Chattah y Gonzalo A. Álvarez, “Resonancia Magnética: de la versatilidad en el control cuántico al sentido y las nuevas tecnologías cuánticas”) utilizados en medicina y en los aceleradores de partículas como el LHC, ver la **Figura 2**. Las teorías de Ginzburg-Landau y BCS de la superconductividad también han jugado un rol conceptual importante en la comprensión del mecanismo que explica la existencia del bosón de Higgs<sup>2</sup>.

Los superconductores juegan un rol fundamental en el desarrollo de las nuevas tecnologías cuánticas. Por un lado, son la base de una de

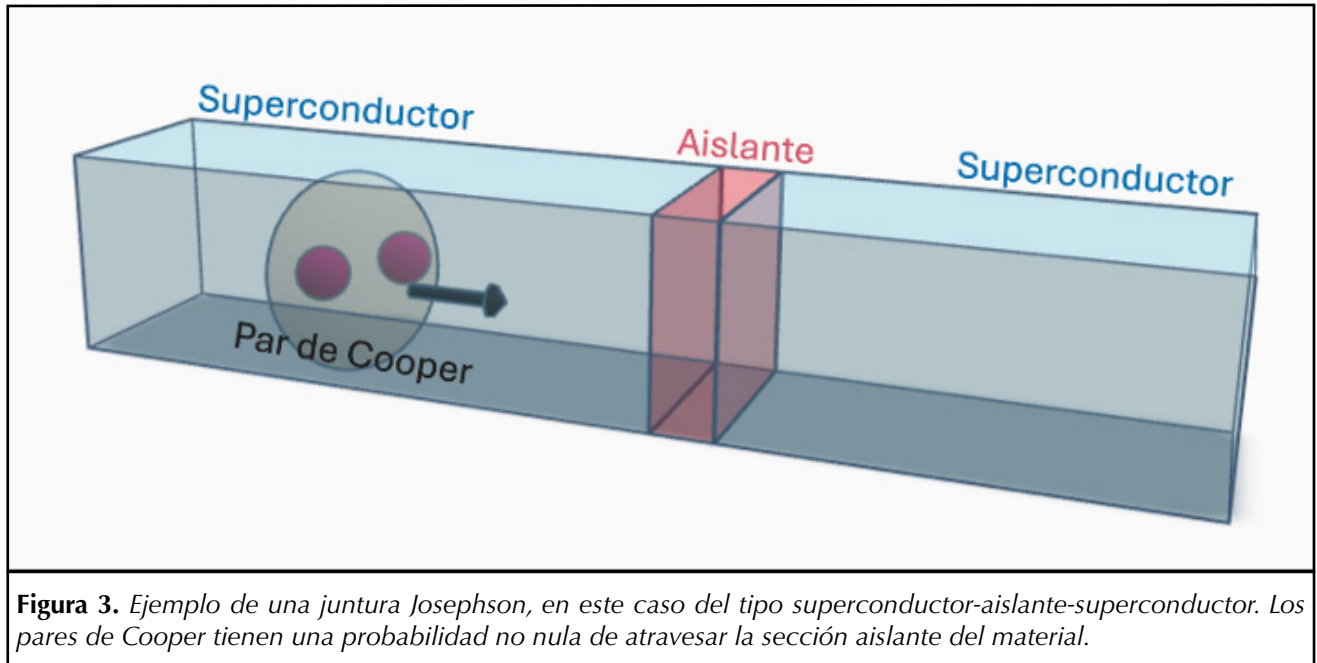
las realizaciones más prominentes de qubits, tal como se discute en este mismo volumen en el artículo de C. Schmiegelow, C. Cormick y L. Tosi, "El hardware cuántico: qubits naturales y artificiales". Por otro lado, son centrales en metrología eléctrica, para definir el patrón del voltaje eléctrico o realizar mediciones de precisión de resistencia eléctrica utilizando SQUIDS, como se detalla más adelante. La propiedad clave de los superconductores en

estas aplicaciones es el "efecto Josephson", por cuyo descubrimiento B. Josephson ganó el Premio Nobel de Física en 1973 (Brian D. Josephson, 1973). En su versión continua (DC) el efecto Josephson consiste en la generación de super-corrientes de equilibrio a través de un anillo superconductor con juntura superconductor-aislante-superconductor SIS (**Figura 3**) cuando un campo magnético atraviesa el agujero del anillo. La contraparte alterna (AC)

corresponde a la inducción de una corriente alterna cuando se aplica una diferencia de voltaje  $V$  a través de la juntura. En este último caso, la peculiaridad es la frecuencia  $\nu = eV/h$  en la oscilación de dicha corriente, donde  $e$  representa la carga del electrón y  $h$  es la constante de Planck. Debido a esta característica, el efecto Josephson AC es de fundamental importancia en metrología, como se discutirá más adelante.



**Figura 2.** Usos de la superconductividad. Arriba (izquierda): resonador magnético nuclear (RMN) utilizado en medicina. Arriba (derecha): acelerador de partículas large hadron collider (LHC). Ambos funcionan con altos campos magnéticos generados por superconductores. Abajo: imagen de un qubit superconductor. Cortesía Quantronics (ver en este volumen el artículo de los autores Schmiegelow, Christian T; Cormick, Cecilia; Tosi, Leandro: "El hardware cuántico: qubits naturales y artificiales").



**Figura 3.** Ejemplo de una junta Josephson, en este caso del tipo superconductor-aislante-superconductor. Los pares de Cooper tienen una probabilidad no nula de atravesar la sección aislante del material.

**Gases bidimensionales de electrones y el efecto Hall cuántico:** El efecto Hall clásico consiste en la generación de un voltaje transversal  $V_H$  en respuesta a una corriente  $I$  aplicada longitudinalmente en la muestra, en presencia de un campo magnético perpendicular a la misma. El cociente  $R_H = V_H / I$  se denomina resistencia Hall.

El efecto Hall cuántico se observa en nano-heteroestructuras de dos semiconductores, por ejemplo GaAs y AlGaAs, fabricadas de manera tal que confinan en su interfase un gas bidimensional de electrones (ver **Figura 4**). Los dispositivos suelen fabricarse en la geometría conocida como barra Hall. La **Figura 4** muestra dispositivos procesados en laboratorios nacionales. El efecto Hall cuántico se observa a temperaturas inferiores a 1 K cuando se aplican altos campos magnéticos (entre 1 y 8 Tesla) perpendiculares al gas bidimensional. En el caso clásico la resistencia Hall observa un comportamiento lineal como función del campo magnético. En el caso cuántico, esta resistencia

está cuantizada y presenta valores  $R_H = (h/e^2) / \nu$ , donde en el “efecto Hall cuántico entero” (ver **Figura 4**) y  $\nu = 1/3, 2/5, 3/7, 2/3, 3/5, 1/5, \dots$  en el caso del “efecto Hall cuántico fraccionario”.

El efecto Hall cuántico entero fue observado por primera vez en 1980 por K. von Klitzing en muestras fabricadas con *Molecular Beam Epitaxy* (MBE) por M. Pepper y G. Dorda. Estos tres investigadores recibieron el Premio Nobel de Física en 1985. Luego, H. Störmer y D. Tsui observaron el efecto Hall cuántico fraccionario, Laughlin propuso su explicación teórica y los tres compartieron el Premio Nobel de Física de 1998.

**El efecto Hall cuántico de spin y los aisladores topológicos:** Poco tiempo después del descubrimiento del efecto Hall cuántico, se comprendió que este sistema físico es un aislador topológico. Esto significa, por un lado, que el gas bidimensional de electrones en presencia de campos magnéticos intensos se comporta como un aislador eléctrico. Lo mismo se explica por el espectro

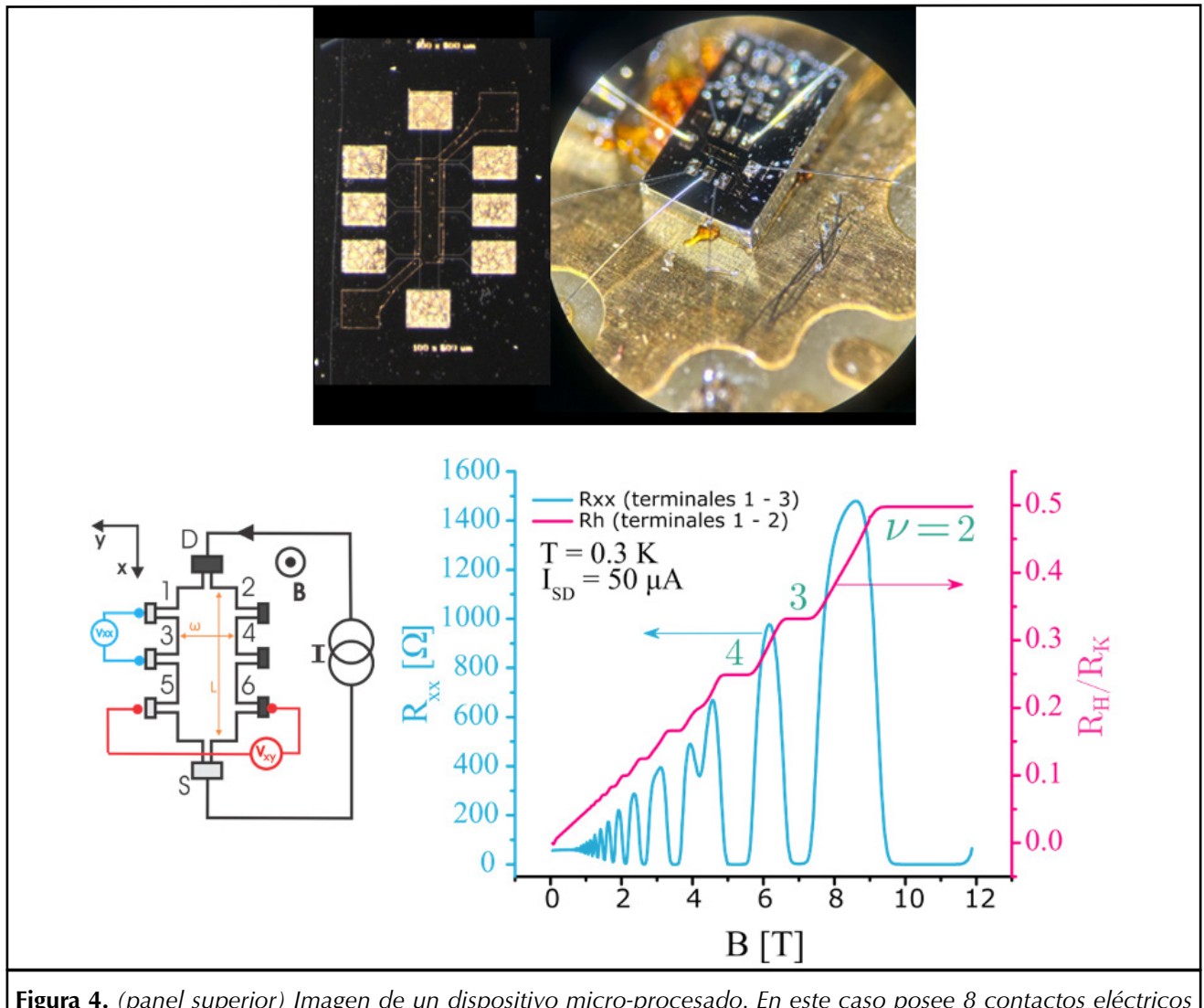
de energías organizadas en “niveles de Landau”, separados por *gaps* (brechas) de energía de valor  $heB / (2\pi m)$ , siendo  $e$  y  $m$ , respectivamente, la carga y la masa del electrón y  $B$  el campo magnético aplicado. Por otro lado, el mismo puede caracterizarse por un invariante topológico llamado “número de Chern”, de manera análoga a la empleada en geometría cuando se caracterizan objetos por el número de agujeros, tal como fue demostrado por Thouless, Kohmoto, Nightingale y den Nijs (Thouless, David J., 1982). La consecuencia física de esta propiedad es la existencia de “estados de borde quirales topológicamente protegidos”, que constituyen canales perfectos de conducción confinados en el borde de la muestra. A través de los mismos, los electrones pueden moverse en una única dirección sin resistencia, tal como se indica en los esquemas de la **Figura 5**.

Todo esto resulta en una característica única y sorprendente del efecto Hall cuántico: la combinación de ser aislador en su volumen y, a la vez, un conductor quiral perfecto a través

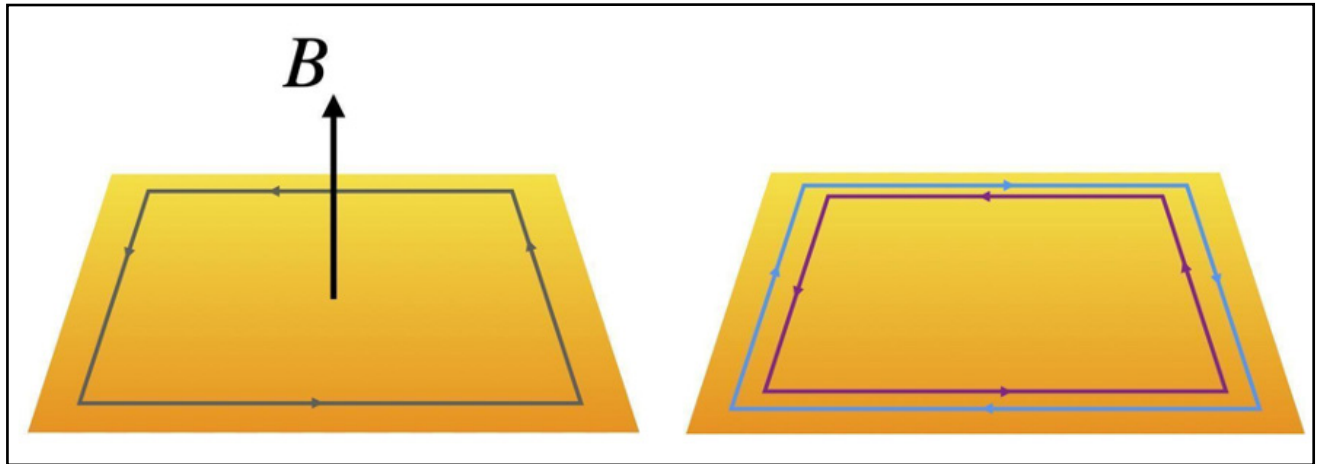
de canales localizados en los bordes. La dirección de circulación de la corriente está definida por el campo magnético (ver Fig. 5, izquierda) y cada uno de estos canales soporta un cuanto de conductancia de valor

$e^2/h$ . El número de canales cambia cada vez que el campo magnético es consistente con un cambio en el número de niveles de Landau intervinientes, lo cual explica los saltos en  $e^2/h$  de la conductancia Hall.

En 1988 Haldane propuso un modelo "de juguete" (puramente matemático pero inspirado en una red de grafeno) (Haldane, F. Duncan, 1988), a partir del cual demostró que las mismas propiedades del



**Figura 4.** (panel superior) Imagen de un dispositivo micro-procesado. En este caso posee 8 contactos eléctricos y también una estructura superior para controlar por tensión el dispositivo. A la derecha se muestra una imagen del dispositivo montado en un zócalo con los cables de interconexión realizados. (panel inferior) A la izquierda se muestra el esquema de un dispositivo típico para calibración de resistencias como el de la imagen. En celeste se indica la medición de la respuesta longitudinal  $V_{xx}$ , mientras que transversalmente al dispositivo (en rojo) se indica la medición de la respuesta Hall ( $V_{xy}$ ). A la derecha el resultado de medición de un dispositivo: en celeste la resistencia longitudinal y en rosa la resistencia normalizada Hall (transversal), en este caso a una temperatura de 300 mK y con una corriente de 50  $\mu A$ . El eje de la derecha (rosa) está normalizado a la constante de von Klitzing  $R_K = h / e^2 \approx 25\,812,807\,45... \Omega$ . Los picos que se ven en la curva celeste ( $R_{xx}$ ) son el resultado de la existencia de los niveles de Landau, entre ellos y a medida que aumenta el campo magnético, tienden a anularse, se dice entonces que el sistema está en estado Hall cuántico. La cuantización del sistema se manifiesta también en la existencia de los plateaux (mesetas donde la resistencia no cambia) de la curva rosa. Se indican órdenes de estos plateaux, por ejemplo el plateau que corresponde a  $\nu = 2$ , donde la resistencia transversal resulta ser la mitad de la constante de von Klitzing.



**Figura 5.** A la izquierda el esquema de los estados de borde quirales de un gas de electrones bidimensional atravesado por un campo magnético intenso  $B$  en el estado de Hall cuántico. A la derecha: Esquema de los estados de borde helicoidales de un aislador topológico en el estado de spin Hall cuántico

efecto Hall cuántico pueden generarse sin necesidad de aplicar un campo magnético. Esto constituye un salto conceptual importante, en el que se demuestra la existencia de una familia de aisladores topológicos mucho más amplia. En 2005 Kane y Mele (Kane, Charles L., 2005) propusieron una variante del modelo de Haldane que respeta la simetría de inversión temporal. El aislador topológico que resulta contiene estados de borde que existen de a pares “helicoidales”, de manera que las componentes del par tienen quiralidades y polarizaciones magnéticas opuestas (ver **Figura 5**, derecha). A este nuevo aislador topológico se lo identificó bajo el nombre “spin-Hall cuántico”. En 2006 Bernevig, Hughes y S-C. Zhang (Bernevig, B. Andrei, Taylor L. Hughes, 2006) propusieron un modelo realista de un aislador topológico para generar el estado de spin-Hall cuántico en un material susceptible de ser fabricado y medido en experimentos. En 2007, el grupo de Molenkamp fabrica dicho aislador con Molecular Beam Epitaxy en un compuesto que combina HgTe y Cd y lo caracteriza experimentalmente, demostrando la existencia de los estados de borde

topológicamente protegidos (Konig, Markus, 2007). Desde entonces, se registra una proliferación de aisladores topológicos en sistemas tridimensionales que son aisladores en el volumen pero conductores perfectos en las paredes. En 2016 Kosterlitz, Thouless y Haldane recibieron el Premio Nobel de Física (The Nobel Prize, 2016), en reconocimiento por haber dado los primeros pasos de esta revolución topológica.

#### Los superconductores topológicos:

Otro campo sumamente activo en la actualidad es la búsqueda de materiales superconductores topológicos. Los superconductores se caracterizan por la existencia de un gap de energía entre el estado fundamental, consistente en una superposición coherente de pares de Cooper, y las excitaciones fermiónicas correspondientes a la ruptura de dichos pares. Los superconductores topológicos tienen asociado un invariante topológico y contienen excitaciones de baja energía adicionales, que corresponden a estados espacialmente localizados en el borde del material. La peculiaridad de estos estados de borde es que se describen en términos de fermiones de Majorana. Los

mismos fueron originalmente propuestos por E. Majorana en el contexto de la teoría cuántica relativista y se caracterizan por describir simultáneamente partícula y antipartícula. Tienen características especiales que los hace muy promisorios para implementar qubits topológicamente protegidos sumamente robustos. La evidencia experimental de la superconductividad topológica está aún en discusión. Se han reportado observaciones consistentes con la existencia de fermiones de Majorana en cables superconductores fabricados con AlInAs, aunque no existe consenso sobre la naturaleza de las mismas.

**El grafeno:** El grafeno es un material puramente bidimensional y consiste en una monocapa de átomos de carbono dispuestos en una red en forma de panal de abejas. Fue sintetizado por Geim y Novoselov en el año 2004, quienes recibieron el Premio Nobel de Física en 2010 por este descubrimiento (The Nobel Prize, 2010). Su estructura electrónica corresponde a la de un “semimetal”, caracterizada por la presencia de conos de Dirac en los llamados puntos K de la zona de Brillouin, lo

que hace que los electrones se comporten como fermiones de Dirac sin masa. Desde el punto de vista fundamental, el grafeno exhibe una serie de propiedades notables. Entre ellas se destacan la altísima movilidad electrónica (Novoselov, Kostya, 2005), la resistencia mecánica excepcional (Lee, Changgu, 2008) o el efecto Hall cuántico a temperatura ambiente (Novoselov, Konstantin S., 2007).

Más allá de su interés fundamental, el grafeno se consolidó como un material paradigmático para múltiples áreas de investigación. Su versatilidad ha inspirado la exploración de familias de materiales que también admiten un límite bidimensional, como los dicalcogenuros de metales de transición. Más recientemente, ha generado renovado interés la ingeniería de fases cuánticas mediante el apilamiento controlado de capas con diferentes ángulos de giro (“twistrónica”). En este sentido, el grafeno no solo inauguró un nuevo campo de investigación, sino que también transformó la manera en que se conciben y diseñan fases cuánticas de la materia en dos dimensiones.

**Otros materiales cuánticos:** Si bien la noción de fase topológica en la materia condensada emergió en sistemas bidimensionales, como en el caso del efecto Hall cuántico, pronto se comprendió que estos conceptos ofrecían un marco generalizable a materiales tridimensionales. La primera generalización en este sentido fue la predicción y posterior verificación de los aisladores topológicos tridimensionales (Fu, Liang, Charles L. Kane, 2007 // Moore, Joel E., 2007), caracterizados por un volumen eléctricamente aislante y superficies metálicas con estados protegidos por la simetría de inversión temporal. Ejemplos paradigmáticos incluyen los compuestos de la fami-

lia  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ , en los que se observaron experimentalmente conos de Dirac en la superficie mediante espectroscopía de fotoemisión (Xia, Yuqi, 2009 // Hsieh, David, 2009).

Poco después, se identificó que simetrías cristalinas puntuales también podían proteger estados electrónicos topológicos de superficie. Este hallazgo condujo a la definición de los aisladores topológicos cristalinos (Fu, Liang, 2011), cuya topología no depende de la simetría ante inversión temporal, sino de simetrías espaciales como reflexiones o rotaciones. Materiales como  $\text{SnTe}$  se convirtieron en ejemplos representativos de esta clase (Tanaka, Y., 2012), ampliando de manera significativa el conjunto de sistemas susceptibles de albergar fases topológicas.

Otra extensión relevante surgió del estudio de las transiciones entre fases aislantes topológicas y triviales. En este contexto, en 2007 Murakami (Murakami, Shuichi, 2007) demostró que al analizar la evolución continua entre un aislante trivial y un aislante topológico tridimensional, podían aparecer fases intermedias caracterizadas por la existencia de cruces de bandas en el nivel de Fermi. Estos cruces, en general posibles en ausencia de inversión espacial y/o temporal, son denominados nodos de Weyl pues corresponden a excitaciones electrónicas efectivas que se identifican con las propiedades de los fermiones de Weyl, concebidos en la física de altas energías. En particular, se entendió en base a argumentos muy generales asociados a las características del espectro de energía de un sistema cuando la degeneración de espín se rompe, que los materiales aisladores topológicos sin simetría de inversión espacial podían naturalmente encontrarse experimentalmente cerca de la fase de semimetal de Weyl.

Los semimetales de Weyl constituyen un ejemplo de una fase topológica *gapless* en la que la robustez ante perturbaciones no surge de las propiedades topológicas del conjunto total de estados ocupados en un aislante, sino de la estabilidad intrínseca asociada a cruces de dos bandas en tres dimensiones. Una consecuencia distintiva de estos materiales es la aparición de arcos de Fermi en la superficie, que conectan proyecciones de nodos de Weyl de carga topológica opuesta. Estos estados fueron confirmados experimentalmente en 2015 en compuestos como TaAs (Lv, B. Q., 2015 // Xu, Su-Yang, 2015).

La generalización de la topología a tres dimensiones no solo permitió comprender mejor los aisladores topológicos, sino que también abrió el camino hacia nuevas familias de materiales cuánticos. Entre ellas se incluyen los semimetales de líneas nodales (Burkov, A. A., M. D. Hook, 2011), en los que los puntos degenerados forman líneas cerradas en el espacio recíproco; y los llamados fermiones múltiplemente degenerados, donde la simetría cristalina estabiliza cruces de bandas con multiplicidades mayores que dos (Bradlyn, Barry, 2016). Estas fases, hoy intensamente estudiadas, refuerzan la idea de que la topología y la geometría se han convertido en un principio organizador de las propiedades electrónicas de los materiales, en un sentido amplio.

Esta extensión de los conceptos topológicos al vasto conjunto formado por materiales cristalinos en tres dimensiones naturalmente se ve aún más enriquecida al considerar las posibilidades que surgen en **presencia de orden magnético de largo alcance**. Por ejemplo, en los semimetales de Weyl magnéticos, la ruptura espontánea de la simetría de inversión temporal por el orden magné-

tico permite el control de nodos de Weyl vía el acoplamiento de los grados de libertad magnéticos con un campo magnético externo. Además, aquellas propiedades que efectivamente estén asociadas con el orden son pasibles de ser controladas con la temperatura. Un caso interesante en este sentido lo ofrecen sistemas basados en aislantes topológicos en 3D donde existe orden de largo alcance antiferromagnético. En este caso, la combinación de simetrías cristalinas y de inversión temporal protege fases topológicas que tienen consecuencias diferentes en distintas superficies del material de acuerdo a cómo se disponen estas respecto del vector de Néel que caracteriza el orden magnético. Ejemplos notables son los compuestos de la familia  $\text{MnBi}_2\text{Te}_4$  (Otrokov, Mikhail M., 2019). Estos desarrollos no solo amplían el panorama de materiales cuánticos, sino que también establecen un puente con la física de fases magnéticas correlacionadas, abriendo nuevas posibilidades tanto para aplicaciones en espintrónica como para la exploración de respuestas topológicas controladas por el orden magnético.

Un aspecto crucial en el desarrollo del campo ha sido el papel de los cálculos de primeros principios en la predicción y caracterización de fases topológicas. Estos son cálculos que bajo ciertas aproximaciones permiten estudiar teóricamente la estructura electrónica de un material a partir de su estructura cristalina. En particular, a partir de la teoría funcional de la densidad (DFT por la sigla en inglés de *Density Functional Theory*) ha sido posible identificar de manera sistemática materiales candidatos y predecir características específicas asociadas a los estados de superficie en un dado material. Este tipo de cálculo detallado no solo ha guiado la selección de compuestos a estudiar sino que

se ha vuelto una herramienta esencial para establecer en los distintos experimentos la observación de los estados topológicos de superficie. La estrecha interacción entre experimentos y cálculos de DFT ha sido, por lo tanto, un factor determinante en la rápida expansión del campo de los materiales topológicos.

Más recientemente, desarrollos teóricos como la teoría de *Topological Quantum Chemistry* (TQC) (Bradlyn, Barry, et al., 2017 // Vergniory, M. G., 2019) han contribuido a forjar un marco unificado para clasificar las fases electrónicas no interactuantes a partir de las representaciones de simetría de las bandas en el espacio recíproco. Esta estrategia permite establecer de forma algorítmica si una estructura de bandas corresponde a una combinación

trivial de representaciones atómicas o si, por el contrario, presenta una obstrucción topológica. Este enfoque, aplicado de modo sistemático en base a cálculos de DFT a grandes bases de datos cristalográficos, ha llevado a la conclusión de que una fracción significativa de los materiales en tres dimensiones alberga propiedades geométricas y topológicas de interés, tales como aisladores topológicos o semimetales protegidos por simetrías. Todos estos hallazgos han contribuido, en relativamente pocos años, a pasar de un proceso de descubrimiento caso por caso, guiado por intuiciones teóricas en modelos simplificados, a un esquema de exploración sistemática a escala de cientos de compuestos, en fuerte comunión con distintas disciplinas de la ciencia de materiales.

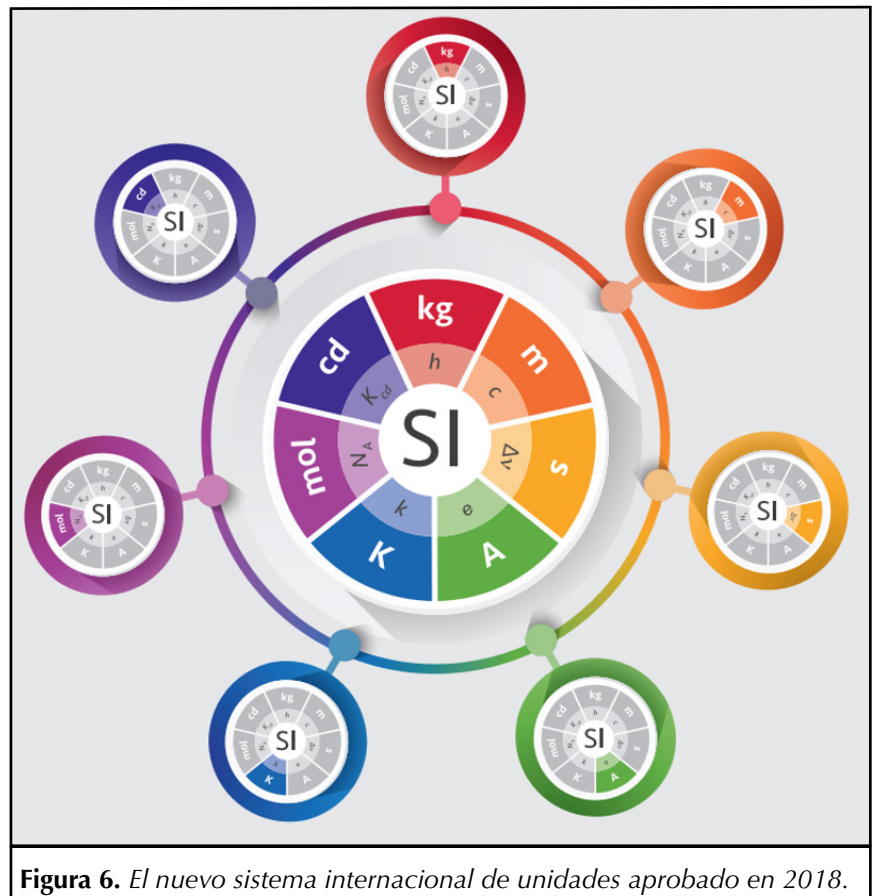


Figura 6. El nuevo sistema internacional de unidades aprobado en 2018.

## ■ EL NUEVO SISTEMA DE UNIDADES Y METROLOGÍA ELÉCTRICA

Los avances que se describieron —y muchos otros no abarcados en este artículo— permitieron acordar una modificación profunda del Sistema Internacional de Unidades (SI), que finalmente se implementó en 2019 (Göbel, Ernst O., and Uwe Siegner, 2019). En el nuevo sistema, las siete unidades básicas se definieron a partir de siete constantes de referencia (constantes universales con valores numéricos fijados). En Argentina el INTI es el organismo que, por ley, debe llevar a cabo la tarea de realizar estas unidades bajo un sistema nacional de calidad (Ley 19511 junto a su reglamentación y Decreto 1066/2018)

La estructura de todas las definiciones es análoga, por ejemplo, la definición del ampere establece: “El ampere, cuyo símbolo es A, es la unidad de corriente eléctrica del SI. Se define fijando el valor numérico de la carga elemental,  $e = 1,602176634 \times 10^{-19}$ , cuando se expresa en la unidad C, equivalente a A-s, donde el segundo se define a partir de la frecuencia de transición hiperfina del cesio  $\Delta\nu_{Cs}$ ”. De este modo, basta con seleccionar experimentos que relacionen dichas constantes con mediciones para realizar (materializar) la unidad correspondiente.

En el caso del ampere, la realización práctica de la unidad no se efectúa, por el momento, contando cargas por unidad de tiempo, sino a partir de la realización de otras dos unidades: el volt y el ohm. Esto se logra mediante el efecto Hall cuántico y el efecto Josephson, aplicando la ley de Ohm ( $V = R I$ ) para relacionar la caída de voltaje  $V$  con la resistencia eléctrica  $R$  y la corriente  $I$  (SI Brochure, 2019). Actualmente, la incertidumbre alcanzada median-

te estos efectos es varios órdenes de magnitud menor que la obtenida por otros métodos, llegando a valores del orden de  $10^{-11}$  V/V y  $10^{-10}$   $\Omega/\Omega$  (Götz, Martin, 2018 // Janssen, T. J. B. M., 2012 // Hartland, A., 2007).

Uno de los aspectos más complejos en la redefinición del SI fue alcanzar un acuerdo internacional y un funcionamiento confiable en dos tipos de experimentos fundamentales: las balanzas de Kibble (antes llamadas balanzas de watt) y los experimentos de densidad cristalina por rayos X. Ambos permitieron redefinir el kilogramo vinculándolo a la constante de Planck  $h$ . La balanza de Kibble permite comparar potencias mecánica y eléctrica, siendo esta última determinada mediante los efectos cuánticos eléctricos. Los experimentos cuánticos mesoscópicos desempeñaron un papel central tanto en la medición de masa como en la de magnitudes eléctricas. La fabricación de esferas de silicio representa una síntesis de las capacidades técnicas alcanzadas, no solo en los sistemas de medición, sino también en el desarrollo de la tecnología de semiconductores durante el último siglo. Las exigencias técnicas necesarias para su elaboración y la posterior determinación de la constante de Avogadro implicaron el uso de tecnología de vanguardia. Un ejemplo notable fue la determinación precisa de la capa más externa de la esfera, uno de los aspectos críticos que permitió avanzar en el cambio del Sistema Internacional. El desarrollo de la balanza de Kibble llevó varios años y generó una intensa cooperación internacional durante la década de 2010. El objetivo fue optimizar su desempeño hasta lograr que las realizaciones en distintos laboratorios del mundo convergieran en resultados consistentes. En este proceso, los patrones eléctricos cuánticos mesoscópicos fueron fundamentales, ya que per-

mitieron determinar con precisión las variables eléctricas involucradas en la balanza.

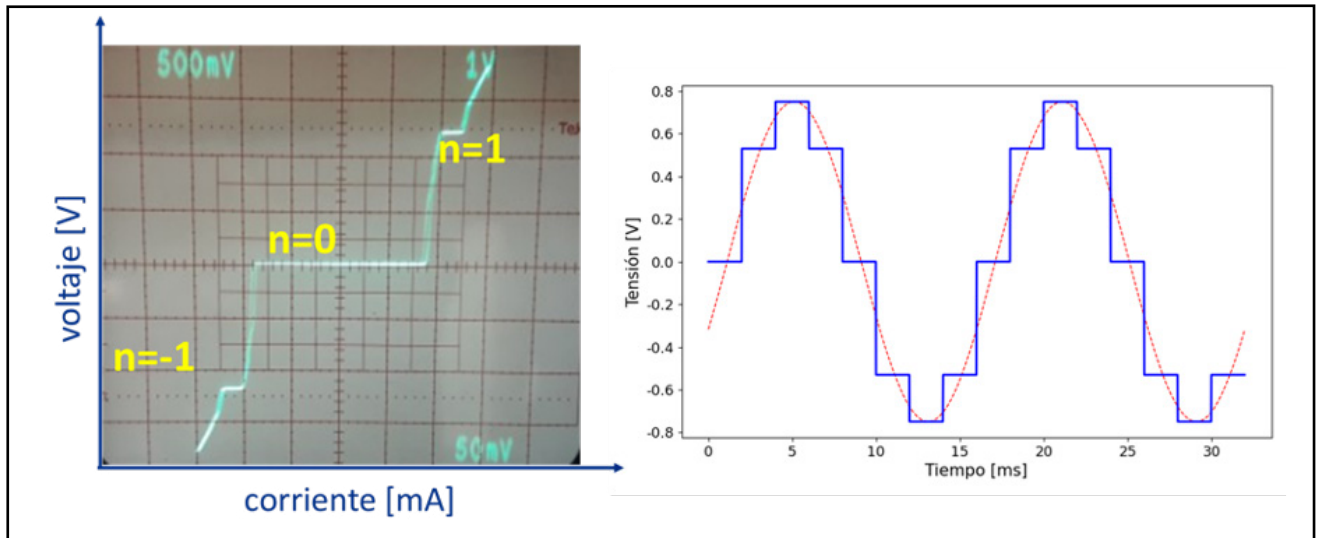
## ■ EL PATRÓN DE VOLTAJE Y EL EFECTO JOSEPHSON

El efecto Josephson se utiliza desde hace varias décadas como patrón de voltaje o tensión eléctrica. Los primeros trabajos que utilizaban algunas juntas solo permitían reproducir diferencias de potencial de algunos milivolt. El voltaje Josephson responde a

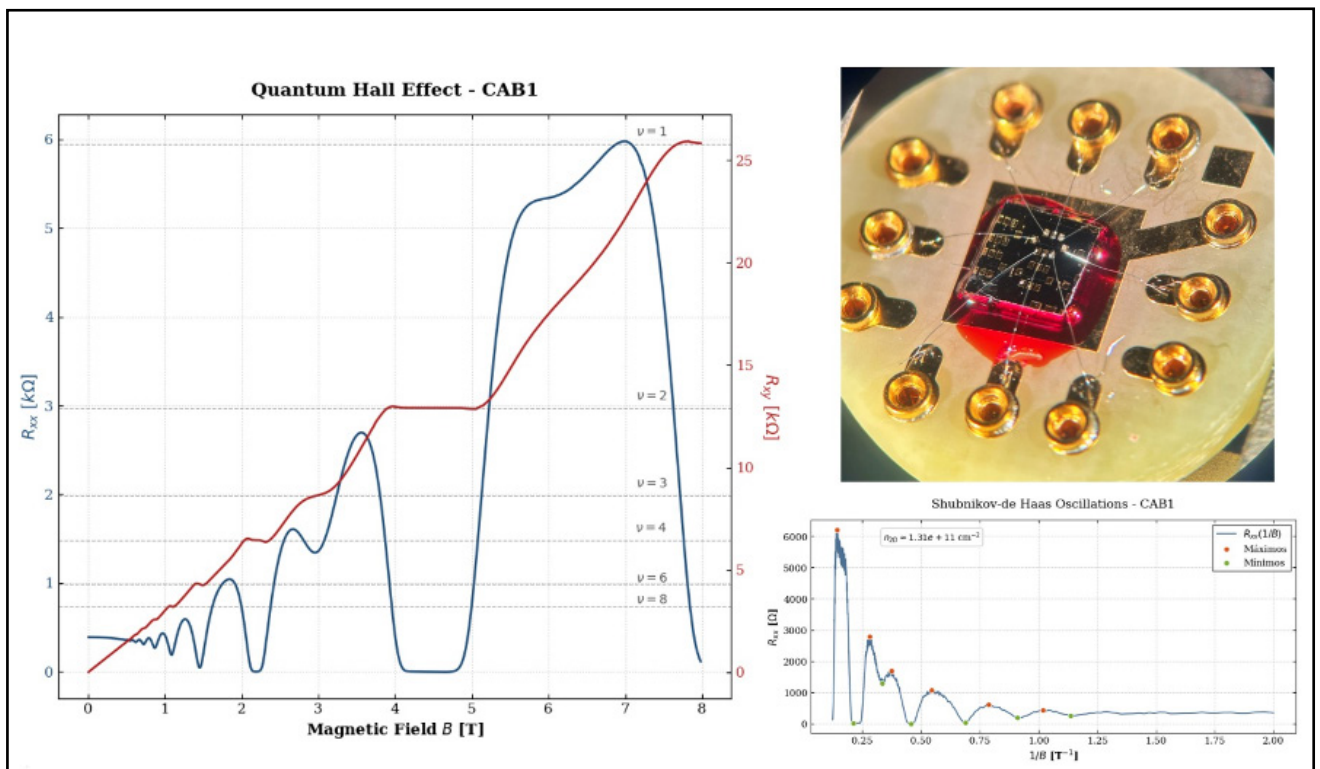
$$V_J = n \frac{h}{2e} f = n \Phi_0 f = n f / K_J$$

Una frecuencia típica de trabajo de dispositivos Josephson es 70 GHz, que resulta en diferencia de potencial eléctrico de unos 145  $\mu$ V por junta. Los avances en el desarrollo de juntas y técnicas electrónicas permitieron obtener hacia 1990 dispositivos de unas 69.000 juntas que logran alcanzar hasta 10 V DC, voltajes típicos deseables para caracterizar instrumental. En este caso los dispositivos utilizados suelen ser tipo superconductor-aislante-superconductor, juntas de efecto túnel, y cuyas curvas de corriente y potencial son como las mostradas en la **Figura 7**.

Los avances en técnicas de microelectrónica basada en superconductores y de sistemas de control alcanzaron un desarrollo lo suficientemente maduro para dar un salto cualitativo a los denominados sistemas Josephson programables (PJVS) y pulsados (JAWS). En el caso de los PJVS los dispositivos utilizan alrededor de 20000 juntas tipo superconductor-barrera metálica-superconductor, arregladas en segmentos binarios de juntas. A diferencia del caso anterior, el estado cuántico de estas juntas depende de la corriente aplicada, dando un método para controlar el estado del



**Figura 7.** A la izquierda se muestra la respuesta de un dispositivo en un típico gráfico de tensión-corriente. En este caso corresponde a un dispositivo sin histéresis, que permite establecer el estado cuántico ( $n$ ) por medio de la corriente aplicada. Utilizando un arreglo de este tipo de junturas y controlando temporalmente la corriente es posible programar señales como la que se muestra en el gráfico de la derecha, donde cada escalón azul corresponde a un estado cuántico del sistema. Esto permite aproximar la señal deseada (punteada roja) por medio de una serie de escalones que solo dependen de constantes universales y de una frecuencia.



**Figura 8.** Hacia un patrón Hall "Hecho en Argentina": un gas bidimensional crecido en el MBE del Centro Atómico Bariloche (CAB), una barra Hall fabricada en el Centro Atómico Constituyentes (CAC), mediciones realizadas en el Grupo de Circuitos Cuánticos de Bariloche por investigadores de INTI, CAC y CAB. Plateaus del Efecto Hall Cuántico de gran calidad.

sistema en el tiempo. Se utilizan fuentes sincrónicas que seleccionan el estado del sistema en cada instante. Realizando un control preciso de estas corrientes es posible generar diferentes formas de onda aproximadas por escalones, cuyo valor depende nuevamente solo del flujo  $(h/2e)$ , de un número entero y de la frecuencia de microondas aplicada al dispositivo, como se muestra en la **Figura 7**. Con estos sistemas es posible calibrar fuentes y medir señales periódicas incluso multitonos.

Finalmente los sistemas de sintetización Josephson arbitrarios (JAWS) son fuentes programables que generan señales arbitrarias cuyo valor eficaz (RMS) está definido cuánticamente. En este esquema, la señal deseada se obtiene modulando las microondas que se aplican al dispositivo por medio de pulsos, programados de forma tal que el dispositivo los integra a la señal que se desee generar. El inconveniente por el momento son los voltajes de salida, que para un único dispositivo no superan los 200 mV. Estos sistemas ya se han utilizado en la generación de fuentes de referencia aplicadas a puentes de medición, así como en dispositivos superconductores sensibles como los SQUID, empleados en detección de partículas y magnetometría de ultra-alta sensibilidad.

Argentina cuenta con las tres versiones de los sistemas descritos, al momento de escribir estas líneas, el sistema PJVS es utilizado para calibraciones DC, pero resta finalizar su aplicación a dispositivos y fuentes AC. Respecto al JAWS, aún se encuentra en desarrollo, habiendo realizado los primeros ensayos de generación y medición.

### ■ EL PATRÓN DE RESISTENCIA Y EL EFECTO HALL CUÁNTICO

Desde su descubrimiento los sistemas basados en el efecto Hall

cuántico se han extendido como referencias absolutas de resistencia en numerosos institutos de metrología en el mundo. En América Latina, Argentina (ver **Figura 8**), Brasil y México disponen de este tipo de sistemas, mientras que otros países como Colombia están en proceso de incorporarlos. La cuantización de resistencia ya mencionada permitió extender este sistema como realización de la unidad de resistencia utilizando principalmente dispositivos basados en heteroestructuras de GaAs/AlGaAs.

Si bien el grafeno despertó un gran interés para estas aplicaciones, su utilización como patrón de resistencia presenta desafíos. En particular, estabilizar el sistema demostró ser un problema complejo y ha limitado su despliegue generalizado. Diversos institutos investigan técnicas para superar estas limitaciones con el fin de obtener sistemas “de mesa”, basados en criogeneradores e imanes superconductores de menor porte.

Como se discutió, en la última década el auge del desarrollo de aislantes topológicos abrió la posibilidad de pensarlos como posibles candidatos para patrones de resistencia, pensando en este caso en su capacidad de cuantización de resistencia sin la necesidad de grandes campos magnéticos. Por ejemplo, mediciones de precisión en compuestos basados en V-dopado  $(\text{Bi,Sb})_2\text{Te}_3$ , alcanzando partes en  $10^9$  (Patel, D. K., 2024), demostraron la universalidad del efecto Hall cuántico en este tipo de sistemas, consolidando el potencial de esta nueva clase de materiales.

Un punto no menor es cómo vincular la resistencia cuántica a los patrones secundarios que se emplean en laboratorios de calibración. La técnica más precisa disponible es el uso de comparadores criogénicos

de corriente (CCC). Estos dispositivos realizan comparaciones en corriente continua entre el patrón Hall cuántico y resistores de trabajo, para lo cual utilizan el efecto Meissner para medir la diferencia de corriente entre dos ramas de un puente de medición. Estas diferencias se miden mediante una bobina de pick-up acoplada a un SQUID, un dispositivo basado en dos junturas superconductoras con la capacidad de medir cuantos de flujo magnético.

### ■ LOS MATERIALES CUÁNTICOS Y LAS TECNOLOGÍAS CUÁNTICAS DE SEGUNDA GENERACIÓN

Si el entendimiento de la estructura electrónica de los sólidos permitió el desarrollo de la primera generación de tecnologías cuánticas —asociadas, por ejemplo, al transistor y a la electrónica basada en semiconductores— muchas de las líneas de investigación actuales en materiales cuánticos y fenómenos topológicos se perfilan como parte de una posible segunda generación de tecnologías cuánticas.

En este contexto, aquí presentamos un breve resumen y comentamos algunas perspectivas futuras. Entre ellas se encuentran: el uso del efecto Hall cuántico anómalo en aisladores topológicos dopados magnéticamente para aplicaciones metrológicas, lo que permitiría definir estándares de resistencia sin necesidad de emplear campos magnéticos intensos; la utilización del efecto Hall cuántico en grafeno para establecer estándares de resistencia operables a temperaturas más elevadas; el aprovechamiento de fenómenos mesoscópicos como la reflexión de Andreev para implementar qubits superconductores híbridos; el estudio de qubits topológicos basados en estados de borde de Majorana, con el objetivo de explotar la robustez de los estados topológicos; y el desarrollo de dispositivos basa-

dos en materiales topológicos para computación cuántica, sensado y metrología, incluyendo la fabricación de chips capaces de integrar en un único dispositivo la medición de distintas magnitudes físicas como frecuencias, voltajes, corrientes y temperaturas.

Cabe destacar que en Argentina ya se desarrollan varias líneas de investigación relacionadas con estos temas, tanto en grupos teóricos como experimentales. En particular, ver **Figura 8**, existen esfuerzos vinculados al estudio de sistemas bidimensionales de electrones y fenómenos de transporte cuántico, incluyendo colaboraciones entre el INTI y centros atómicos de la CNEA, el crecimiento de heteroestructuras mediante técnicas de epitaxia de haces moleculares, la fabricación de geometrías tipo Corbino, y la caracterización de nuevos materiales cuánticos en distintos laboratorios del país, entre otros.

## ■ GLOSARIO

**Aislador topológico:** Material que se comporta como un aislante eléctrico en su interior (volumen), pero que conduce la electricidad de manera perfecta y sin resistencia en su superficie o bordes, cualidad que está protegida por propiedades topológicas de la estructura electrónica.

**Balanza de Kibble (antes balanza de Watt):** Instrumento electromecánico que mide el peso de una masa con altísima precisión comparando la potencia mecánica con la potencia eléctrica. Fue fundamental para la redefinición del kilogramo en el Sistema Internacional de Unidades.

**Conos de Dirac / Nodos de Weyl:** Estados electrónicos de ciertos materiales (como el grafeno o los semimetales de Weyl) donde las bandas de conducción y valencia se tocan

en un punto. En estos nodos, los electrones se comportan como partículas sin masa que viajan a velocidades cercanas a la de la luz en el material.

**Efecto Hall cuántico:** Fenómeno físico que ocurre en gases de electrones bidimensionales sometidos a muy bajas temperaturas y altos campos magnéticos. Su característica principal es que la resistencia transversal se cuantiza en escalones exactos, proporcionales a constantes fundamentales de la naturaleza ( $h/e^2$ ).

**Efecto Josephson:** Fenómeno cuántico macroscópico que ocurre cuando dos superconductores están separados por una barrera aislante extremadamente delgada (juntura Josephson). Permite el paso de supercorrientes sin aplicar voltaje o genera oscilaciones de alta frecuencia si se aplica un voltaje, siendo esta última propiedad la base del patrón de voltaje actual.

**Estados de borde quirales / helicoidales:** Canales de conducción en los límites de ciertos materiales topológicos por donde los electrones viajan en una sola dirección (quirales) o con direcciones acopladas a su espín (helicoidales). Esta "restricción de tránsito" evita que choquen y retrocedan, permitiendo una conducción sin resistencia.

**Fermiones de Majorana:** Partículas que son simultáneamente su propia antipartícula. En materia condensada, hay distintos escenarios teóricos donde emergen como cuasipartículas en los bordes de superconductores topológicos y son altamente codiciadas para el diseño de computadoras cuánticas tolerantes a fallos.

**Materiales cuánticos:** Sistemas de estado sólido cuyas propiedades macroscópicas y funcionalidades no

pueden explicarse con la física clásica, sino que derivan directamente de efectos cuánticos como el entrelazamiento, la coherencia de fase o la topología.

**Metrología:** Ciencia dedicada al estudio de las mediciones, la definición de las unidades de medida (como el volt, el ohm o el kilogramo) y la calibración de instrumentos para garantizar precisión y trazabilidad a nivel mundial.

**Pares de Cooper:** Parejas de electrones que, a temperaturas muy bajas, vencen su repulsión eléctrica natural y se atraen mutuamente gracias a su interacción con la red atómica del material. Son los portadores de carga responsables de la superconductividad.

**SQUID (Superconducting Quantum Interference Device):** Dispositivo superconductor de interferencia cuántica. Es un magnetómetro extremadamente sensible, basado en anillos con juntas Josephson, capaz de medir cambios minúsculos en campos magnéticos.

**Superconductor:** Material que, al ser enfriado por debajo de una temperatura crítica ( $T_c$ ), pierde totalmente su resistencia eléctrica y expulsa perfectamente los campos magnéticos de su interior (efecto Meissner).

**Topología (en física de la materia condensada):** Propiedad matemática de la estructura electrónica de ciertos materiales que permanece invariable ante deformaciones, defectos o perturbaciones continuas. Funciona como un "escudo" matemático que garantiza la robustez de fenómenos en bordes del sistema, como la conducción perfecta o la presencia de ciertas excitaciones electrónicas.

## ■ BIBLIOGRAFÍA

- Asianometry 2024, "The first transistors" [https://youtu.be/Pzy\\_KOBddRA?si=9aTpKdz7mbBjMsYE](https://youtu.be/Pzy_KOBddRA?si=9aTpKdz7mbBjMsYE)
- Bernevig, B. Andrei, Taylor L. Hughes, and Shou-Cheng Zhang. "Quantum spin Hall effect and topological phase transition in HgTe quantum wells." *Science* 314.5806 (2006): 1757-1761.
- Bradlyn, Barry, et al. "Beyond Dirac and Weyl fermions: Unconventional quasiparticles in conventional crystals." *Science* 353.6299 (2016): aaf5037.
- Bradlyn, Barry, et al. "Topological quantum chemistry." *Nature* 547.7663 (2017): 298-305.
- Brian D. Josephson – Nobel Lecture, 1973. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1973/josephson/lecture/>
- Burkov, A. A., M. D. Hook, and Leon Balents. "Topological nodal semimetals." *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics* 84.23 (2011): 235126.
- Fu, Liang, Charles L. Kane, and Eugene J. Mele. "Topological insulators in three dimensions." *Physical Review Letters* 98.10 (2007): 106803.
- Fu, Liang. "Topological crystalline insulators." *Physical Review Letters* 106.10 (2011): 106802.
- Göbel, Ernst O., and Uwe Siegrner. *The New International System of Units (SI): quantum metrology and quantum standards*. John Wiley & Sons, 2019.
- Götz, Martin, et al. "Precision measurement of the quantized anomalous Hall resistance at zero magnetic field." *Applied Physics Letters* 112.7 (2018).
- Haldane, F. Duncan M. "Model for a quantum Hall effect without Landau levels: Condensed-matter realization of the 'parity anomaly'." *Physical Review Letters* 61.18 (1988): 2015.
- Hartland, A., et al. "An international direct comparison of two Josephson-effect voltage standards." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 27.4 (2007): 470-474.
- Higgs, Peter, Nobel Lecture 2013. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2013/higgs/lecture/>
- Hsieh, David, et al. "Observation of unconventional quantum spin textures in topological insulators." *Science* 323.5916 (2009): 919-922.
- Janssen, T. J. B. M., et al. "Precision comparison of the quantum Hall effect in graphene and gallium arsenide." *Metrologia* 49.3 (2012): 294.
- Kane, Charles L., and Eugene J. Mele. " $Z_2$  topological order and the quantum spin Hall effect." *Physical Review Letters* 95.14 (2005): 146802.
- König, Markus, et al. "Quantum spin Hall insulator state in HgTe quantum wells." *Science* 318.5851 (2007): 766-770.
- Lee, Changgu, et al. "Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene." *Science* 321.5887 (2008): 385-388.
- Lu, B. Q., et al. "Observation of Weyl nodes in TaAs." *Nature Physics* 11.9 (2015): 724-727.
- Moore, Joel E., and Leon Balents. "Topological invariants of time-reversal-invariant band structures." *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics* 75.12 (2007): 121306.
- Murakami, Shuichi. "Phase transition between the quantum spin Hall and insulator phases in 3D: emergence of a topological gapless phase." *New Journal of Physics* 9.9 (2007): 356.
- Novoselov, Konstantin S., et al. "Room-temperature quantum Hall effect in graphene." *Science* 315.5817 (2007): 1379-1379.
- Novoselov, Kostya S., et al. "Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene." *Nature* 438.7065 (2005): 197-200.
- Otrokov, Mikhail M., et al. "Prediction and observation of an antiferromagnetic topological insulator." *Nature* 576.7787 (2019): 416-422.
- Patel, D. K., Fijalkowski, K. M., Kruskopf, M., Liu, N., Götz, M., Pesel, E., Jaime, M., Klement, M., Schreyeck, S., Brunner, K., Gould, C., Molenkamp, L. W. y Scherer, H. (2024). "A zero external magnetic field quantum standard of resistance at the  $10^{-9}$  level". *Nature Electronics*, 7, 1111–1116. <https://doi.org/10.1038/s41928-024-01295-w>
- SI Brochure, 9th edition (2019), Appendix 2 <https://www.bipm.org/documents/20126/41489676/SI-App2-ampere.pdf>

- Tanaka, Y., et al. "Experimental realization of a topological crystalline insulator in SnTe." *Nature Physics* 8.11 (2012): 800-803.
- The Nobel Prize in Physics 2016. NobelPrize.org., <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2016/summary/>
- The Nobel Prize in Physics 2010. NobelPrize.org. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2010/summary/>
- Thouless, David J., et al. "Quantized Hall conductance in a two-dimensional periodic potential." *Physical Review Letters* 49.6 (1982): 405.
- Vergniory, M. G., et al. "A complete catalogue of high-quality topological materials." *Nature* 566.7745 (2019): 480-485.
- Xia, Yuqi, et al. "Observation of a large-gap topological-insulator class with a single Dirac cone on the surface." *Nature Physics* 5.6 (2009): 398-402.
- Xu, Su-Yang, et al. "Experimental discovery of a topological Weyl semimetal state in TaP." *Science Advances* 1.10 (2015): e1501092.

## ■ NOTAS

1 Bardeen es el único doble Premio Nobel de Física, en 1956 por el transistor (Asianometry, 2024) y en 1972 por la teoría BCS.

2 En su conferencia Nobel, P. Higgs reconoce haberse basado en el análisis de P.W. Anderson de superconductores (P. Higgs, 2013).

# COMUNICACIÓN CUÁNTICA

**Palabras clave:** Comunicación cuántica, Distribución cuántica de claves, Metrología cuántica, Tecnologías cuánticas.

**Keywords:** Quantum Communication, Quantum Key Distribution, Quantum Metrology, Quantum Technology.

**Resumen:** Los fotones son los sistemas cuánticos fundamentales que describen el campo electromagnético (la luz) a nivel microscópico. Dicho de otra forma, la cuantificación del campo electromagnético implica que éste sea tratado como una colección de paquetes de energía discretos, que se denominan fotones. A lo largo de este artículo vamos a discutir las aplicaciones de estas “partículas de luz”, fundamentalmente en el campo de las comunicaciones. Adicionalmente, las tecnologías actualmente en desarrollo basadas en el uso de fotones exceden a las aplicaciones en comunicaciones y se enfocan también en la metrología ultrasensible, la formación de imágenes y el sensado. Estos temas se repasan brevemente al final del artículo.

## Quantum Communication

**Abstract:** Photons are the fundamental quantum systems that describe the electromagnetic field (light) at the microscopic level. In other words, the quantization of the electromagnetic field implies that it is treated as a collection of discrete energy packets, called photons. Throughout this article, we will discuss the applications of these “particles of light”, primarily in the field of communications. Additionally, state-of-the-art technologies that exploit the quantum nature of the photons exceed the applications in communications, and are also focused in ultra-sensitive metrology, imaging and sensing. These topics are briefly reviewed at the end of this article.

## ■ EL ORIGEN DE LAS “COMUNICACIONES CUÁNTICAS”. LA FOTÓNICA CUÁNTICA COMO TECNOLOGÍA DISRUPTIVA

Los principios y el formalismo de la mecánica cuántica fueron establecidos a principios del siglo XX, y surgieron para explicar el comportamiento de la materia y la energía a niveles atómico y subatómico. A este hito se lo denomina la **primera revolución cuántica**, y en general entendemos que se extiende desde 1900 hasta la década del '70. En este período aparecieron tecnologías como los láseres, los dispositivos semiconductores y, en general, la capacidad de manipular *ensembles* de sistemas cuánticos. Casi un siglo después, y gracias a los desarrollos anteriores, se pudo obtener la capacidad de manipular y controlar sistemas cuánticos individuales, como átomos, moléculas y fotones, para desarrollar nuevas tecnologías como computadoras cuánticas, sensores y sistemas de comunicaciones cuánticas. A este período actual de

avances rápidos en aplicaciones prácticas de la mecánica cuántica se lo denomina **segunda revolución cuántica**.

Las comunicaciones cuánticas aparecen como concepto alrededor de 1970, en un trabajo de Stephen Wiesner llamado “*Conjugate Coding*” (“Codificación conjugada”), que se mantuvo inédito hasta 1983, en el que el autor explicaba cómo la física cuántica podría permitir que una entidad bancaria genere notas de pago que fueran imposibles de falsificar (Wiesner, 1983). Estas ideas se revisaron a principios de los '80, pero los incipientes posibles protocolos requerían tareas tecnológicamente imposibles, incluso para el estado del arte actual. Poco tiempo después Charles Bennett y Gilles Brassard realizaron una propuesta revolucionaria: al decir de los propios autores, el avance principal ocurrió cuando se percataron de que los fotones nunca estuvieron destinados a almacenar informa-

ción, sino más bien a transmitirla (Bennett, 1989). En el año 1984, Bennett y Brassard publicaron el trabajo que da origen al famoso protocolo BB84 de **Distribución Cuántica de Claves** criptográficas (QKD por sus siglas en inglés, Quantum Key Distribution) (Bennett, 1984). A partir de ese momento QKD se transforma en algo realizable, y de hecho es una de las primeras tecnologías cuánticas que prepara y mide sistemas cuánticos a nivel individual llevadas a la práctica en el mundo real, es decir fuera del laboratorio.

En este artículo describimos con cierto grado de profundidad los aspectos teóricos de los protocolos de distribución cuántica de claves, así como algunas de sus posibles implementaciones y limitaciones. Finalmente, presentamos un repaso de otras aplicaciones tecnológicas que explotan las propiedades no clásicas y contraintuitivas de los fotones individuales. Estas aplicaciones se apoyan en desarrollos tec-

■ **Laura T. Knoll<sup>1,2\*</sup>, Miguel A. Larotonda<sup>1,2\*\*</sup>**

1 División Óptica Cuántica - DEILAP (UNIDEF-CITEDEF), J.B. de Lasalle 4397, (B1603ALO) Villa Martelli, Buenos Aires, Argentina.

2 Departamento de Física, Facultad de Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Universitaria, 1428, Buenos Aires, Argentina.

E-mail: \*lknoll@citedef.gob.ar

\*\*mlarotonda@citedef.gob.ar

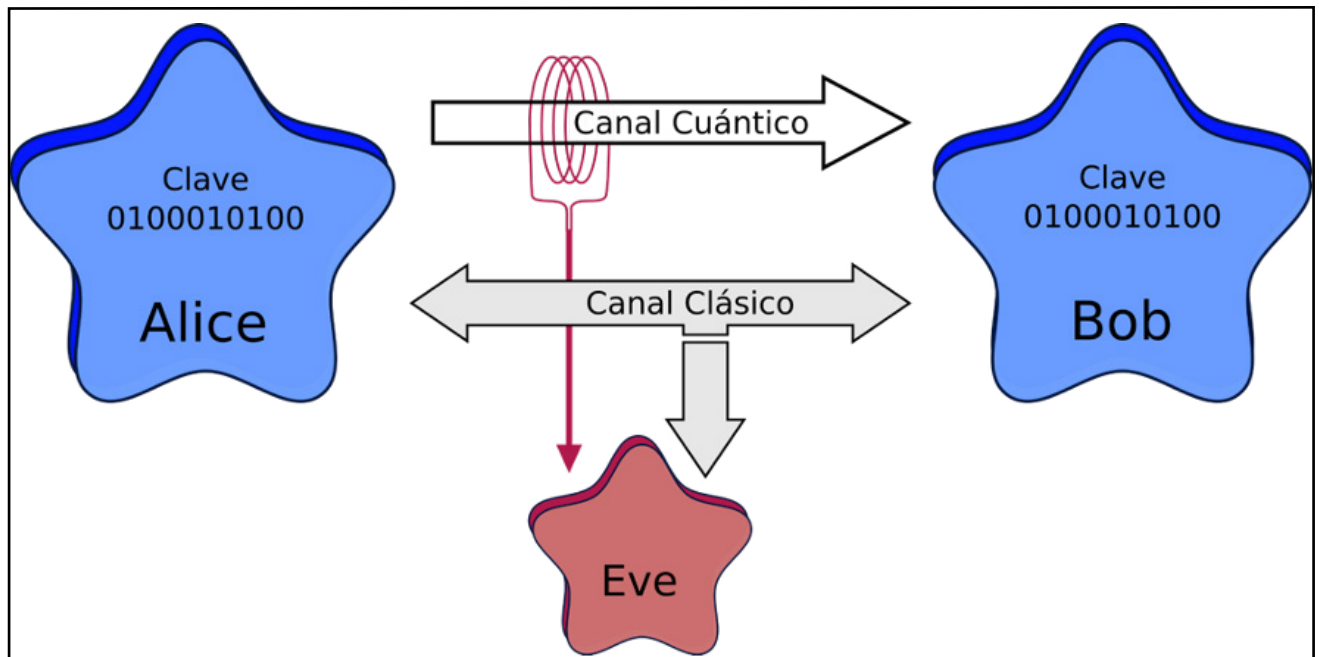
nológicos originalmente concebidos para la preparación y detección de fotones únicos, los cuales habilitaron a su vez nuevos esquemas de medición. En este marco, diversas tareas tradicionalmente realizadas con luz clásica resultan más eficientes cuando se implementan en un escenario cuántico (Barreto Lemos, 2022; Chen, 2022; Couteau, 2023; Defienne, 2024), entre ellas la determinación de fases interferométricas, la obtención de imágenes y la calibración de detectores de intensidad en regímenes de iluminación extremadamente baja.

### ■ EL PROBLEMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE CLAVES CRIPTOGRÁFICAS.

Antes de enfocarnos en los detalles de la distribución cuántica de claves, conviene empezar mencionando qué problema resuelve. La

distribución de claves criptográficas es el proceso de proveer claves en forma segura a dos o más partes de una red, con el fin de asegurar fundamentalmente tareas de autenticación (ser quien uno dice ser), integridad (conservar el mensaje inalterado) y privacidad, en una sesión de comunicación. Los protocolos criptográficos actuales de uso más difundido en comunicaciones seguras son los denominados asimétricos o de clave pública (por ejemplo el protocolo RSA), o los simétricos o de clave privada (por ejemplo el sistema AES). Ambas familias de protocolos se basan en la complejidad de algún problema matemático: factorización de números grandes en RSA y cifrado por bloques en AES (Katz, 2007). Estos problemas son, en principio, difíciles de resolver con una computadora clásica, pero fácilmente resolubles con una computadora cuántica (Ladd, 2010;

Rieffel, 2000; ver también el artículo “Los principios básicos de una computadora cuántica”, de Federico Holik y Augusto J Roncaglia, en este volumen). Por esta razón están actualmente amenazados por la inevitable aparición de computadoras cuánticas reales y la aplicación de algoritmos cuánticos de Shor (factorización de números grandes) y Grover (búsqueda no estructurada), respectivamente (Nielsen, 2010). Aún con el desarrollo de algoritmos post-cuánticos, que se basan en problemas matemáticos conocidos por su dificultad y son resistentes a ataques de computadoras clásicas y cuánticas, como por ejemplo AES-256, se requiere una instancia de distribución de la clave compartida. La mecánica cuántica, además del problema de la vulnerabilidad de protocolos clásicos, también aporta la solución a la distribución de la clave, a través de protocolos de



**Figura 1.** La Distribución Cuántica de Claves es un método a partir del cual Alice y Bob, dos usuarios genuinos, buscan establecer una clave secreta compartida usando un canal de comunicación clásico y uno cuántico. El espía Eve intenta interceptar y obtener información que fluye entre Alice y Bob. La suposición es que Eve puede interferir de cualquier manera en el canal cuántico, mientras que el canal clásico debe ser autenticado (es decir, puede ser observado pero no modificado).

QKD. En las siguientes secciones vamos a repasar algunos conceptos muy básicos de la mecánica cuántica relevantes para el procesamiento cuántico de la información y específicamente para la ejecución de un protocolo de QKD, y describiremos el protocolo de comunicación cuántica más famoso, BB84, usando una codificación particular de bits cuánticos (o ‘qubits’) mediante fotones.

**■ CODIFICACIÓN DE QUBITS CON FOTONES**

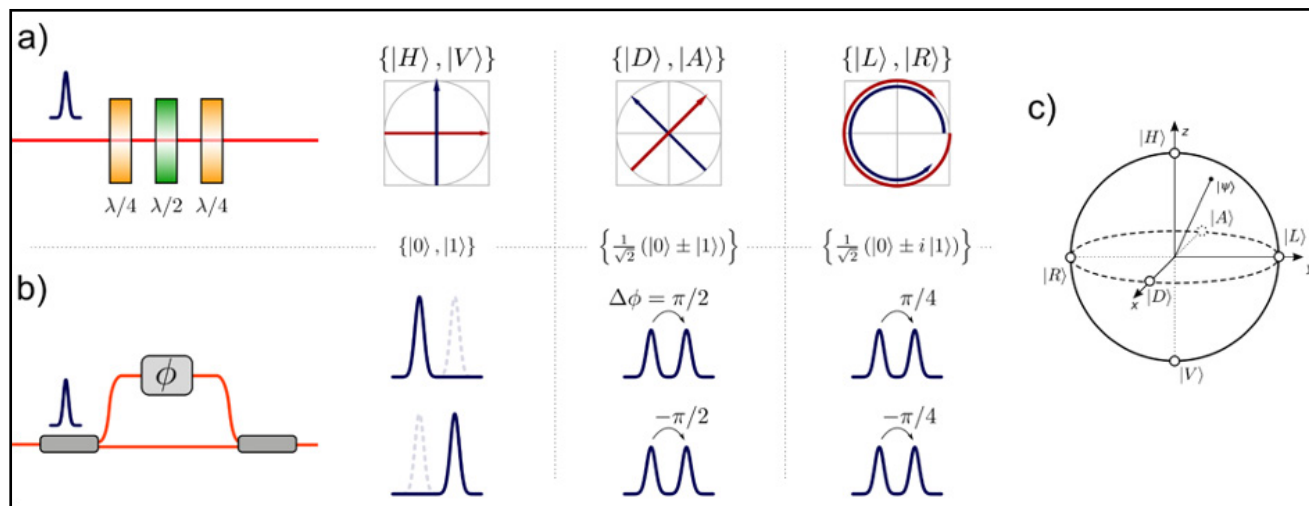
Seguidamente veremos cómo es que usando un tipo de protocolo particular de preparación, transmisión y medición de estados de fotones únicos, al final del día dos interlocutores A y B (históricamente llamados Alice y Bob) pueden compartir una clave de unos y ceros aleatoria, segura y sólo conocida por ellos.

La comunicación entre Alice y Bob requiere un canal cuántico (que transmite qubits) y un canal clásico (que transmite bits) y un canal clásico autenticado (para realizar las tareas de tamizado, corrección de errores y amplificación de la privacidad). El, la o los potenciales espías se denominan Eve (por *eavesdropper*). Eve tiene acceso irrestricto al canal cuántico, y puede observar, pero no modificar, el canal clásico (Fig. 1).

Los bits cuánticos se codificarán en el llamado ‘estado de polarización’ de los fotones, que puede ser representado como un sistema cuántico de dos niveles. Otras codificaciones en distintos grados de libertad del fotón son posibles, pero eso lo discutiremos más adelante.

Antes de describir el protocolo, repasemos la notación que vamos a utilizar para describir los qubits:

el estado de polarización de un fotón puede ser modelado por un vector que apunta en la dirección apropiada. Los posibles estados de qubits pueden representarse geométricamente mediante vectores en la llamada esfera de Bloch (Fig.2c). Cualquier estado de polarización arbitraria se puede expresar como una combinación lineal  $|\psi\rangle = a |H\rangle + b |V\rangle$  de los dos vectores de la base *computacional*:  $|H\rangle$  (polarización horizontal, también denotado  $|0\rangle$ ) y  $|V\rangle$  (polarización vertical, también denotado  $|1\rangle$ ). En particular, los vectores de la base *diagonal* se pueden escribir como combinación lineal de los vectores de la base *computacional*:  $|D\rangle = 1/\sqrt{2} (|H\rangle + |V\rangle)$ ,  $|A\rangle = 1/\sqrt{2} (|H\rangle - |V\rangle)$  y viceversa:  $|H\rangle = 1/\sqrt{2} (|D\rangle + |A\rangle)$ ,  $|V\rangle = 1/\sqrt{2} (|D\rangle - |A\rangle)$ . Estas dos bases de representación de estados de polarización son conjugadas, o “máximamente com-



**Figura 2.** Qubits codificados en grados de libertad del fotón: a) Codificación en polarización. Izquierda: la preparación del estado se puede realizar con un conjunto de láminas retardadoras cuyos ejes se puede rotar alrededor del eje de propagación; a la derecha, en tres columnas se representan los estados de tres bases mutuamente no sesgadas del qubit de polarización, usualmente llamadas computacional, diagonal y circular. b) Codificación en time-bin; se conforma con un par de pulsos que mantienen la coherencia. Izquierda: la preparación del estado se realiza apagando uno u otro pulso para la base computacional o modificando la fase relativa  $\Delta\Phi$  entre ambos pulsos en las otras dos bases; en las tres columnas de la derecha del panel se representa la amplitud de los símbolos para cada una de las bases, análogas a las de polarización. c) Representación geométrica de qubits en la llamada esfera de Bloch. La superficie de esta esfera representa a todos los posibles estados puros de dos niveles  $|\psi\rangle$ . En particular, los estados de la base computacional se ubican en los polos de la esfera, y los de las otras dos bases sobre el ecuador.

plementarias", en el sentido que conocer el estado de polarización en una de las bases aporta la mínima información posible sobre el estado del sistema en la otra base (la conjugada). Este concepto es crucial para entender el origen de la seguridad en protocolos de QKD. Los vectores de la base *circular* también pueden construirse como combinaciones lineales balanceadas de la base *computacional*, o de la base *diagonal*:  $|R\rangle = 1/\sqrt{2} (|H\rangle + i|V\rangle)$ ,  $|L\rangle = 1/\sqrt{2} (|H\rangle - i|V\rangle)$ . Estas tres bases, conjugadas entre sí, forman lo que se denomina un conjunto de bases mutuamente no sesgadas en el espacio de Hilbert de dimensión  $d=2$  de los qubits: si un sistema (estado de polarización de un fotón) es preparado en un autestado de alguna de las bases, la probabilidad de obtener cualquier resultado en una medición respecto de las otras bases es igual a  $1/2$  para qubits (y es  $1/d$  en general): si intento medir un estado  $|D\rangle$  en la base computacional (medición cuyos resultados o proyecciones posibles son  $|H\rangle$  o  $|V\rangle$ ), aproximadamente la mitad de las veces obtendré  $|H\rangle$  y las otras veces  $|V\rangle$  (Fig. 2a).

En el párrafo anterior introdujimos disimuladamente (o no tanto) una notación específica: el concepto del espacio de Hilbert proyectado por los vectores de alguna de las bases. No es la idea transformar este texto en un curso acelerado de Física Cuántica, por lo que simplemente vamos a mencionar que el espacio de estados de un sistema cuántico, que consta de la posición, momento (o cantidad de movimiento), polarización, spin, etc. de las distintas partículas, se modela mediante un espacio de Hilbert de funciones de onda. Ignoraremos los detalles de estas funciones de onda. Los espacios de estados cuánticos y las transformaciones que actúan sobre ellos pueden describirse en términos de vectores y matrices o en

la notación *bra/ket* más compacta inventada por Dirac (Dirac, 1981). Los *kets* como  $|X\rangle$  denotan vectores columna y se utilizan normalmente para describir estados cuánticos. El *bra* complementario,  $\langle X|$ , denota el elemento transpuesto conjugado de  $|X\rangle$ . Para entender el funcionamiento de protocolos cuánticos simples sólo necesitamos tratar con sistemas cuánticos finitos y basta con considerar espacios vectoriales complejos de dimensión finita con un producto interno, que están abarcados por funciones de onda abstractas, como  $|H\rangle$ , o  $|D\rangle$  en el caso de los estados de polarización de un fotón.

### ■ OTROS GRADOS DE LIBERTAD

Además de la polarización, se pueden codificar bits cuánticos en distintos grados de libertad del fotón, como el camino o momento lineal, o los modos transversales del campo electromagnético. Dado que la aplicación de QKD requiere propagar estos estados a distancias de varios kilómetros, el grado de libertad elegido debe ser robusto frente a perturbaciones del medio. Para enlaces por aire, la polarización es bastante poco sensible a distorsiones de fase producidas en la atmósfera, por lo que es la codificación usada por excelencia. Para propagación en fibra, sin embargo, los efectos de birrefringencia residual del núcleo, y sobre todo la birrefringencia inducida térmica o mecánicamente, que es variable, alteran el estado de polarización a la salida de la fibra de forma errática, de manera que para codificar qubits en polarización, el canal de fibra debe contar con un control activo de la polarización. La alternativa es usar lo que se denomina modos de *time-bin*: los qubits se codifican en un par de pulsos desplazados temporalmente algunos nanosegundos o incluso menos. Ambos viajan juntos, por lo que las perturbaciones que modifican el ín-

dice de refracción y por ende la fase óptica de la fibra afectan a ambos pulsos simultáneamente, agregando una fase global irrelevante. Apagando el primero o el segundo pulso se obtienen los estados de la base computacional, y modificando la fase relativa entre ambos pulsos se generan los estados de las otras dos bases mutuamente no sesgadas de la codificación *time-bin* (Fig. 2b).

### ■ DISTRIBUCIÓN CUÁNTICA DE CLAVES. EL PROTOCOLO BB84.

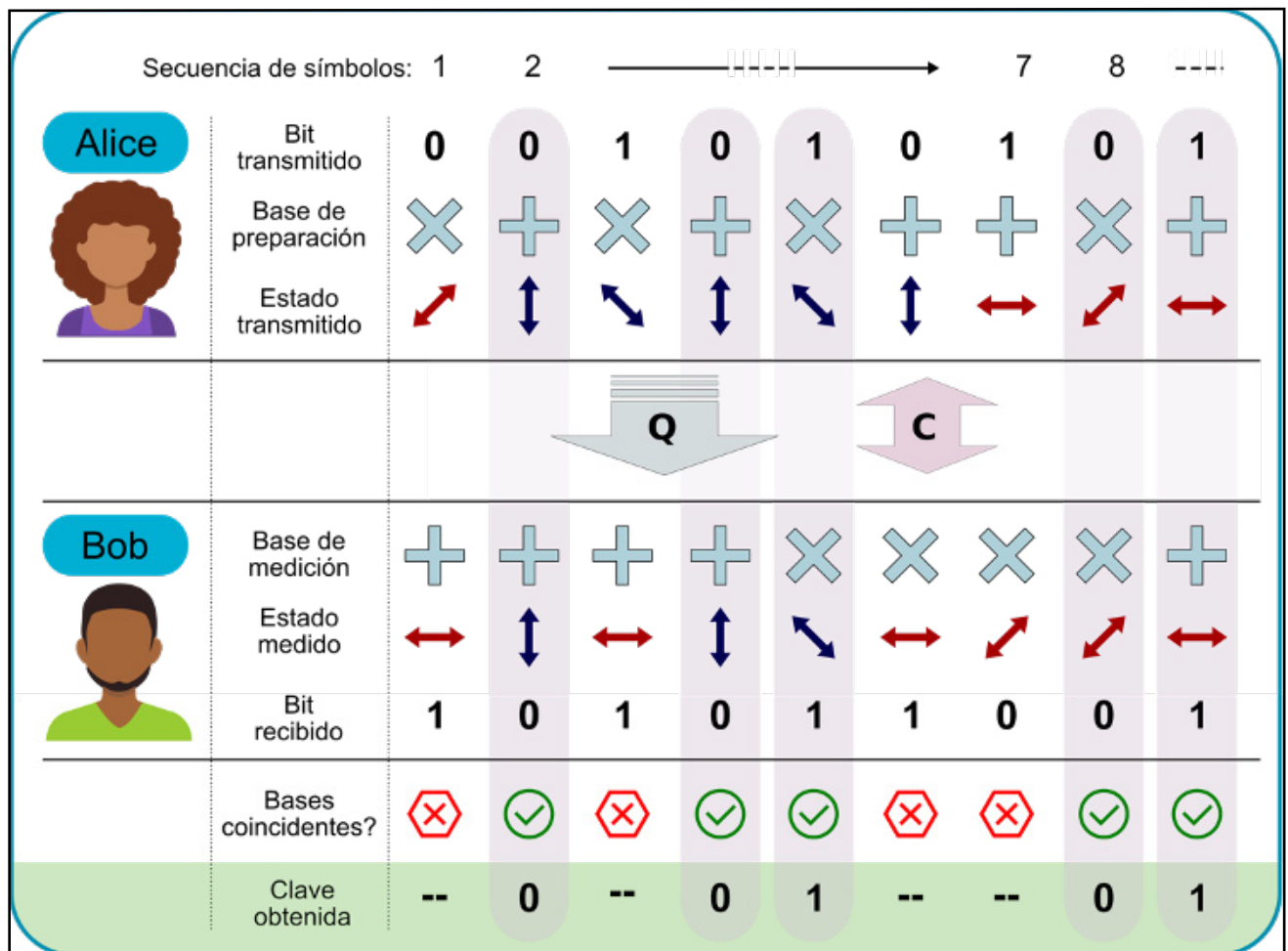
Para comenzar el proceso de establecer una clave secreta entre Alice y Bob (personajes ficticios que participan de un sistema de comunicación), Alice envía una secuencia de bits (cada bit puede tomar el valor 0 o 1) a Bob, codificando cada bit en el estado cuántico de (la polarización de) un fotón de la siguiente manera. Alice utiliza aleatoriamente una de dos bases conjugadas para codificar cada bit:  $0 \rightarrow |H\rangle$ ;  $1 \rightarrow |V\rangle$ , o  $0 \rightarrow |D\rangle$ ;  $1 \rightarrow |A\rangle$ . En este caso Alice y Bob están usando las bases *computacional* y *diagonal*, pero el protocolo podría funcionar con cualquier par de bases mutuamente no sesgadas.

Bob, a su turno, mide el estado de polarización de los fotones que recibe, eligiendo cualquiera de las bases al azar. Una vez transmitidos los bits (y no antes), Alice y Bob usan el canal clásico autenticado para comunicar la base que utilizaron para preparar y medir, respectivamente, cada bit. Con esta información, ambos pueden determinar qué bits se han transmitido correctamente, identificando aquellos bits en los que están de acuerdo las bases emisora y receptora: en el caso de que las bases de preparación y de medición coinciden, el resultado es determinístico y sólo está alterado por eventuales errores de implementación. Utilizarán estos bits como clave y descartarán todos los demás. En

promedio, Alice y Bob estarán de acuerdo en el 50% de todos los bits transmitidos. Esta tarea es parte de las operaciones de post-procesado clásico de la clave cruda. Notemos que hay tres elecciones aleatorias durante el proceso: la de la base en la cual preparar el bit, la del bit a enviar y la de la base en la que se mide (Fig. 3).

Este procedimiento permite a Alice y Bob obtener una lista única de bits aleatorios (la clave cruda), pero ¿cómo es que este procedimiento da seguridad? Supongamos que un espía (Eve, en la jerga del criptólogo) mide el estado de los fotones transmitidos por Alice y reenvía nuevos fotones a Bob con el estado medido. Las bases de preparación y detec-

ción se intercambian al final del protocolo, por lo que Eve las desconoce durante el mismo, y debe “adivinar”. En este proceso Eve utilizará la base incorrecta aproximadamente el 50% de las veces, en cuyo caso enviará a Bob un bit preparado en la base incorrecta. Entonces, cuando Bob mida (con la base correcta) un qubit reenviado, preparado en la base in-



**Figura 3.** En el protocolo BB84 los bits a preparar y medir se codifican en dos posibles bases; en la figura se usan la base computacional (+) y la diagonal (X). El intercambio comienza cuando Alice elige aleatoriamente un bit de la clave y una base en la cual prepararlo y lo envía a Bob a través del canal cuántico (Q); el estado transmitido puede ser uno entre cuatro posibles estados. Bob a su vez elige una base en la cual medir el estado recibido y obtiene como resultado un 0 o un 1. Posteriormente, a través de un canal clásico (C), público y autenticado, intercambian las bases usadas por el canal clásico y descartan los eventos en los cuales las bases no coincidieron. Con los bits conservados de las instancias de bases coincidentes se arma la clave cruda. Parte de esta clave se sacrifica para determinar la tasa de error (Quantum Bit Error Rate, QBER) intrínseca del sistema, y el resto se post-procesa para eliminar errores y amplificar la privacidad. La presencia de un espía Eve se manifiesta cuando éste interrumpe el canal, mide el estado preparado por Alice y lo reenvía a Bob. Como Eve desconoce la base de preparación, en promedio la mitad de las veces prepara un estado en la base incorrecta, incrementando el QBER.

correcta, habrá un 25% de probabilidad de que mida el valor incorrecto. Por lo tanto, cualquier espía en el canal cuántico indefectiblemente introduce una alta tasa de error, que Alice y Bob pueden detectar comunicando un número suficiente de bits de paridad de sus claves a través del canal clásico abierto. Entonces, no sólo es probable que la versión de la clave de Eve sea 25% incorrecta, sino que el hecho de que alguien esté "pinchando" el canal a escondidas será evidente para Alice y Bob.

Una vez finalizada la sesión, y después de realizar otras tareas de post-procesamiento clásicas como corrección de errores, y amplificación de la privacidad, Alice y Bob cuentan con una clave aleatoria, sólo compartida entre ellos. Con esta clave podrán por ejemplo, encriptar un mensaje usando un protocolo de clave simétrica teóricamente seguro como One Time Pad.

Con algunas variaciones, lo expuesto anteriormente es la esencia de todos los protocolos de QKD: se basa en el uso de bases conjugadas para introducir aleatoriedad en los resultados de las mediciones, y en la emisión y detección de un único fotón (un sistema cuántico individual). Esta última condición es crítica, porque la seguridad está garantizada por la imposibilidad de clonar (copiar fielmente) un estado cuántico (Wooters, 1982). En la medida que el bit de la clave esté codificado en un ensamble de estados (muchas copias, como en el caso de un pulso de luz intenso), un espía podría tomar una muestra de ese ensamble, por ejemplo con un separador de haz, para separar algunos de estos fotones y obtener información sin alterar el estado de los fotones remanentes. Si la información está codificada en un único fotón, esta operación no es posible.

El protocolo BB84 es conceptualmente bastante simple, y asume que

el estado usado para codificar cada símbolo es el de un fotón único. Esto es, un estado de Fock, con número de fotones  $N$  bien definido (en este caso,  $N=1$ ), sin dispersión. Esta condición es difícil de implementar experimentalmente, por lo que se recurre a aproximaciones físicamente realizables. La más simple (y la más usada) es utilizar los llamados estados coherentes atenuados. Las fluctuaciones de intensidad de un estado coherente con valor medio  $\mu$  de fotones definen su estadística, que obedece a una distribución  $P(x=n)$  de Poisson. Por lo tanto la varianza del número de fotones de un estado coherente es igual al valor medio. Al usar estados coherentes atenuados se reduce la probabilidad de tener estados multifotónicos (que atentan contra la seguridad del protocolo), pero también aumenta la probabilidad de tener estados vacíos: por ejemplo para  $\mu=0.1$  la probabilidad de que se codifique un símbolo en un estado con  $n=0$  es  $P(x=0)=0.905$ , al tiempo que la probabilidad de codificar un símbolo en un estado multifotónico es  $P(x>1)=0.005$ .

Pero eso no es todo; los estados coherentes tienen una fase global bien definida, que un espía podría explotar para realizar ataques coherentes y ganar información, por lo que además es necesario realizar una aleatorización de la fase, para transformar cada estado coherente en una mezcla estadística de estados de Fock (Lo, 2005). Todos los protocolos que usan estados coherentes atenuados como aproximación a fotones únicos deben implementar esta aleatorización de la fase. Estas son deficiencias no del protocolo en sí, sino de las particularidades de la implementación.

## ■ OTROS PROTOCOLOS

Desde que Bennett y Brassard presentaron su protocolo, se han propuesto varios otros protocolos,

usando distintos tipos de fuentes de luz y/o de configuraciones del canal cuántico. La idea aquí no es hacer un listado completo de ellos sino mencionar los que proponen variaciones relevantes o implican alguna mejora sustancial.

En 1991 Arthur Ekert propuso un protocolo basado no en fotones individuales, sino en estados con una propiedad particular, el entrelazamiento: Alice y Bob deben compartir un par de estados entrelazados como recurso previo, por ejemplo usando un aparato que cada vez que se quiere generar un símbolo, prepara el estado  $|\psi\rangle = 1/\sqrt{2} (|H\rangle_A |H\rangle_B + |V\rangle_A |V\rangle_B)$  (Ekert, 1991). Para generar la clave Alice y Bob eligen aleatoriamente las bases en las que medirán localmente la polarización. Para monitorear la seguridad, miden las correlaciones obtenidas, que deben ser compatibles con las prescritas por las desigualdades de Bell (Bell, 1966), ver "Test de Bell" en el glosario.

En el año 2003 se propuso una variación al protocolo BB84 que solucionaba el problema de ataques sobre el número de fotones, al que son susceptibles todos los protocolos que usan estados coherentes atenuados: el protocolo de estados señuelo (*Decoy State* QKD) agrega una variación en la intensidad de los estados emitidos, a partir de la cual se puede detectar a un espía sofisticado que esté explotando la vulnerabilidad de los estados multifotónicos. Es actualmente el protocolo de QKD más ampliamente implementado.

*Device-Independent* QKD (DI-QKD) es una estrategia de diseño e implementación de protocolos de QKD a partir de la cual la seguridad no se basa en la confianza que se tiene sobre los dispositivos (cuánticos), sino en la violación de una desigualdad de Bell, sin la necesi-

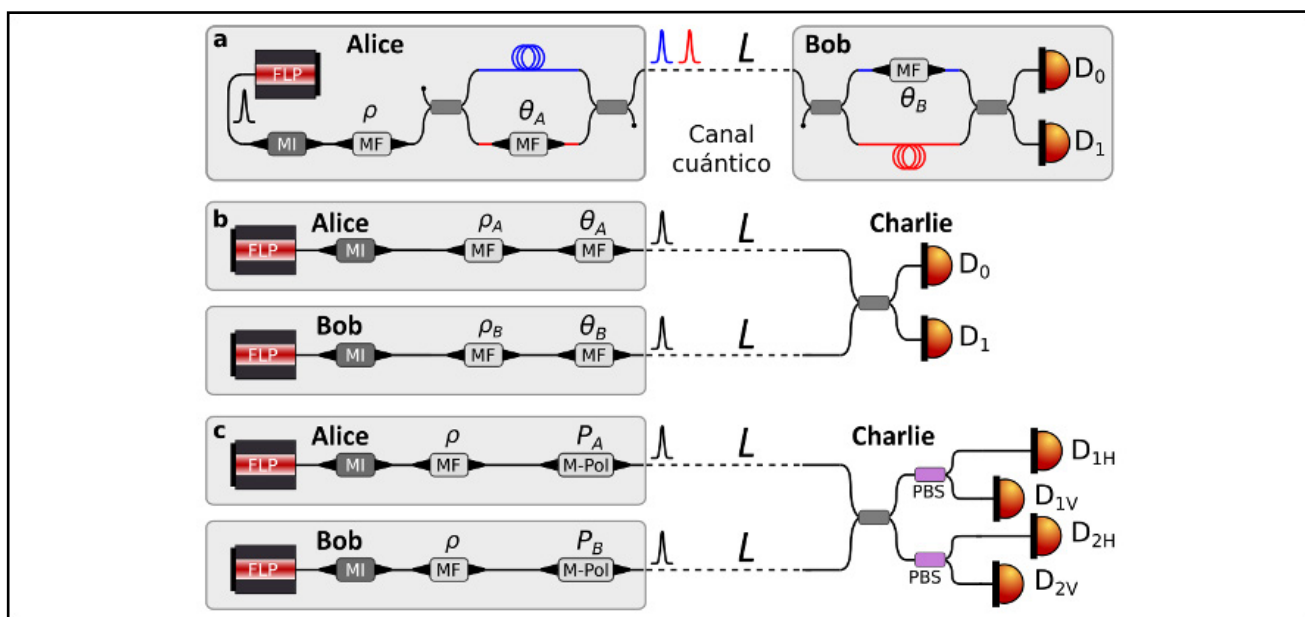
dad de conocer el funcionamiento interno de los dispositivos, ni los de preparación de estados ni los de medición. Sin embargo DI-QKD es poco práctico y difícil de implementar experimentalmente con la tecnología actual especialmente para distancias largas (Zapatero, 2019): requiere poder realizar mediciones de Bell *loophole-free*, separación entre estaciones sin conexión causal y detectores de alta eficiencia.

El enfoque de *Measurement Device-Independent QKD* (MDI-QKD) se basa en la misma filosofía pero

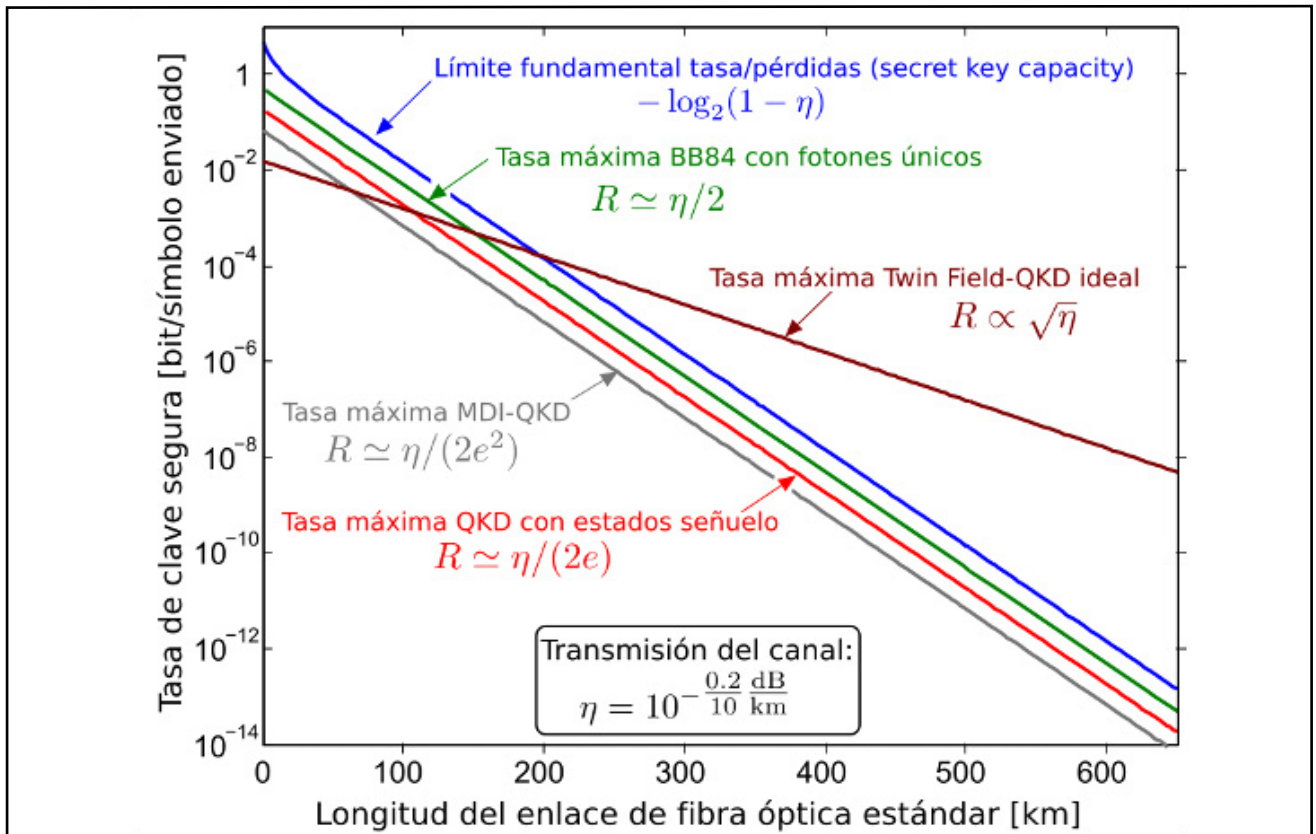
relaja condiciones sobre la preparación de estados (que asume casi perfecta) y en esa situación elimina todas las vulnerabilidades generadas en la implementación de la detección de estados cuánticos (pero no las de preparación), para así simplificar el montaje y obtener tasas de generación de clave de uso práctico (Lo, 2012). A pesar de ser realizables en forma práctica, los protocolos de MDI-QKD requieren la interferencia entre dos fotones (indistinguibles) generados independientemente, uno por Alice y otro por Bob, y el proceso de interferencia (la medición) se

realiza en un nodo intermedio que puede no ser confiable. Este sigue siendo un requerimiento un tanto demandante (Fig. 4).

En 2018 una variación ingeniosa de la arquitectura de sistemas MDI-QKD dio lugar a los llamados protocolos de *Twin-Field QKD* (TF-QKD), en los cuales la interferencia que ocurre en el nodo intermedio no es de dos fotones sino de uno. De ahí el nombre del protocolo: Alice y Bob no envían “fotones” indistinguibles, sino campos indistinguibles (gemelos). Existen distintas variantes



**Figura 4.** Diagrama de algunos protocolos mencionados. a) *Decoy state-QKD* con codificación de fase: Una fuente de luz pulsada (FLP) genera pulsos con estados coherentes y un primer modulador de fase (MF) aplica una fase aleatoria  $\rho$  para randomizar la fase. Un segundo modulador dentro de un interferómetro desbalanceado codifica cada estado aplicando una fase  $\theta_A$ . Los estados se transmiten una distancia  $L$  y Bob detecta usando un interferómetro desbalanceado equivalente, y una base de detección seleccionada definiendo  $\theta_B$ . b) *Twin-field QKD*: Alice y Bob transmiten ambos, usando FLPs que emiten estados indistinguibles. Cada uno de ellos se constituye en el brazo de un interferómetro. Alice (Bob) prepara un pulso óptico con fase aleatoria discreta  $\rho_A$  ( $\rho_B$ ) y una fase de codificación de base y bit  $\theta_A$  ( $\theta_B$ ) y lo transmite. Charlie superpone ambos pulsos en un separador de haz y mide. Luego de anunciar cuál detector disparó, los usuarios revelan los valores de bases usadas en  $\theta_A$  ( $\theta_B$ ) (pero no la fase de codificación del bit), y las fases  $\rho_A$  ( $\rho_B$ ). La clave se construye con las ejecuciones en las que las fases  $\rho_A$  y  $\rho_B$  coinciden. c) *MDI-QKD* con codificación en polarización. Alice (Bob) prepara su estado de polarización  $P_A$  ( $P_B$ ) usando moduladores de polarización (M-Pol). Charlie superpone ambos pulsos en un separador de haz por polarización (PBS) en cada salida. Se usan cuatro detectores para obtener en cada evento una medición de Bell (esto sucede cuando dos detectores en polarizaciones ortogonales se disparan). Todos los otros eventos se descartan. El modulador de intensidad (MI) genera estados señuelo en todos los casos. Figura inspirada en (Lucamarini, 2018).



**Figura 5.** Cotas teóricas del límite tasa-distancia para sistemas QKD basados en fibra óptica. El límite fundamental o Secret Key Capacity corresponde al de un canal cuántico de pérdidas (erasure channel). Para altas pérdidas ( $\eta \simeq 0$ ) este límite escala como  $1.44\eta$ . La transmisión del canal está dada por la atenuación del largo del enlace de fibra óptica. Los protocolos Twin-Field, al ubicar el nodo de medición en el medio de las dos estaciones, escalan como  $\sqrt{\eta}$ . El protocolo MDI también ubica el nodo en un punto intermedio pero requiere interferencia de dos fotones, con lo que logra una ley de escala similar a los protocolos convencionales. Gráfico adaptado de (Lucamari, 2018; Pirandola, 2017).

de estos protocolos, y debido a que la medición se realiza en el punto intermedio entre Alice y Bob, y que es un proceso de interferencia de un único fotón, estos protocolos permiten duplicar el límite de distancia entre estaciones para una tasa de clave segura fija, respecto de los protocolos tradicionales (Lucamari, 2018; Rusca, 2024). Técnicamente es un protocolo más complejo de implementar que MDI, debido a que es necesario mantener un control preciso de la fase óptica entre Alice y Bob sobre toda la longitud del enlace, pero la tasa de clave segura extraíble escala mucho mejor con la atenuación (longitud) del enlace (Fig. 5).

Por último, hay que mencionar que los protocolos descritos se basan en estados cuánticos de variable discreta. También existen protocolos de QKD basados en estados de variable continua (típicamente las cuadraturas del campo electromagnético): *Continuous-variable* QKD (CV-QKD) aparecen actualmente como una alternativa floreciente, debido a su compatibilidad con la industria de las telecomunicaciones, por ejemplo usando láseres continuos y receptores coherentes para preparación y medición respectivamente. Un compendio de protocolos, avances actuales y perspectivas de CV-QKD se puede leer en (Zhang, 2024).

## ■ ESTADO DEL ARTE INTERNACIONAL Y LOCAL

En la actualidad existen dos escenarios principales en los cuales se implementan protocolos de QKD: entre estaciones vinculadas por línea de visión en enlaces Tierra-satélite (y con el mismo esquema de trabajo se planean comunicaciones entre satélites) donde el canal cuántico se constituye principalmente en el espacio exterior, y en enlaces de telecomunicaciones por fibra óptica.

Las implementaciones de QKD en fibra óptica son las que han tenido mayor desarrollo durante los últimos 15 años. La codificación

elegida mayoritariamente es la de time-bin, debido a que es robusta frente a perturbaciones térmicas y mecánicas de la fibra óptica. Con protocolos tradicionales como BB84 o de estados señuelo se han logrado tasas de intercambio de clave segura de hasta 1 Mbit/s sobre un enlace de 20 km de fibra óptica (Dixon, 2008). Para una longitud de fibra de 310 km la mejor tasa de distribución es de 12.7 kbit/s (Korzh, 2015). Y el récord de longitud para esta clase de protocolos es de 405 km, pero con una tasa de generación de clave de sólo 6.5 bit/s (Boaron, 2018). Al no admitir amplificación de la señal (que destruye la coherencia de los estados preparados), existe un compromiso insalvable entre longitud del enlace (atenuación) y tasa máxima extraíble de clave segura. La aparición de la propuesta de TF-QKD significó la realización de varias implementaciones de este protocolo, que al disponer de la etapa de medición en un punto intermedio entre ambos extremos, permite duplicar la distancia del enlace. Entre los experimentos más destacables de este enfoque a la distribución de claves están el realizado en el *Key Laboratory of Quantum Information* dependiente de la Academia China de Ciencias, en el que se pudo distribuir clave se-

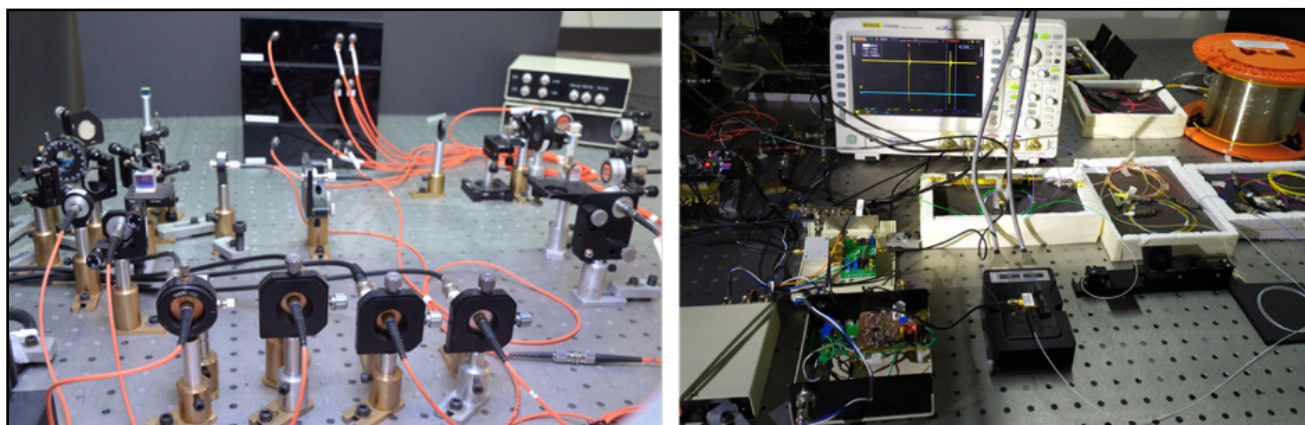
gura a una tasa de 44 bit/s sobre un canal de 610 km, y tolerar pérdidas en distancias de hasta 830 km (140 dB de pérdidas) (Wang, 2022) y el de un grupo liderado por investigadores del Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM, Torino, Italia) en el que usando técnicas interferométricas derivadas de la metrología de frecuencias pudieron simultáneamente distribuir clave y controlar la fase global del canal completo a lo largo de una fibra desplegada en campo de 206 km de longitud y 65 dB de pérdidas (Clivati, 2022).

Por otro lado, en el año 2017, como parte del programa *Quantum Experiments at Space Scale* un grupo de investigadores liderados por Jian-Wei Pan de la Universidad de Ciencia y Tecnología de China pudo implementar en forma exitosa un protocolo BB84 con estados de polarización entre el satélite de investigación de baja órbita Micius y estaciones terrenas en China y en Austria (Liao, 2017). A la fecha es el único satélite operativo declarado dedicado a demostrar tecnologías cuánticas. El 28 de junio de 2025 la empresa Seal SQ lanzó el satélite WiSeSat 3, con el objetivo de habilitar comunicaciones satelitales con seguridad post-cuántica.

En Argentina, el laboratorio de Óptica Cuántica de CITEDEF (ubicado en Villa Martelli, provincia de Buenos Aires) trabaja desde el año 2011 en la implementación de protocolos de QKD, primero en enlaces horizontales por aire, y a partir de 2013 en enlaces por fibra óptica (Magnoni, 2017; López Grande, 2018; Morales, 2023). (Fig. 6)

#### ■ OTRAS APLICACIONES DE FOTONES COMO SISTEMAS CUÁNTICOS. INTERFEROMETRÍA, FORMACIÓN DE IMÁGENES, RADIODIETRÍA

La fotónica cuántica no sólo tiene aplicaciones tecnológicas en el campo de las comunicaciones. En los últimos años, la metrología cuántica emergió como un enfoque poderoso para obtener mediciones con precisión que supera a la de estrategias clásicas. El manejo y detección de fotones a nivel individual ha alcanzado un estadio de desarrollo sin precedentes. Estos logros tecnológicos, junto con el diseño de protocolos que explotan en forma efectiva el recurso cuántico, permiten la estimación mejorada de parámetros ópticos como fase e intensidad, empujando la sensibilidad de las mediciones por encima de los límites



**Figura 6.** Realizaciones de protocolos de QKD en el laboratorio de Óptica Cuántica del DEILAP (CITEDEF-CONICET). Izquierda: detalle del arreglo de detección (Bob) de un experimento con propagación por aire. Derecha: implementación en canal de fibra óptica con codificación en time-bin.

clásicos. Las aplicaciones de la metrología cuántica con fotones es diversa, abarcando desde la detección de ondas gravitatorias (LIGO, 2011) a la formación de imágenes de muestras biológicas; ver por ejemplo (Couteau, 2023). La metrología cuántica fotónica manipula estados cuánticos de la luz para sensar sistemas físicos (Polino, 2020).

### ■ ESTIMACIÓN DE LA FASE ÓPTICA

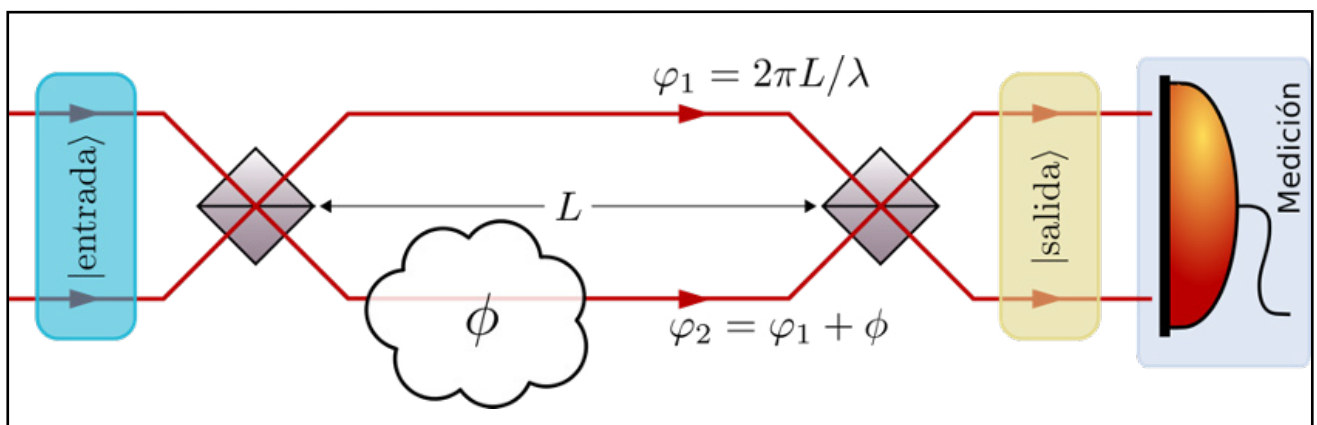
Los fotones son portadores ideales de información cuántica: son robustos, se los puede manipular fácilmente, y se los puede generar y detectar con alta precisión usando las tecnologías actuales. Una de las tareas más relevantes del sensado cuántico con fotones es la de la estimación de una fase óptica. Para detectar un corrimiento de fase se requiere el uso de un interferómetro: el parámetro de interés se codifica durante la evolución del estado sonda, y la información se extrae mediante alguna medición adecuada a la salida del interferómetro. El interferómetro óptico más básico es un dispositivo de dos modos, cuya di-

ferencia relativa de fase es desconocida (Fig. 7). Esta fase desconocida puede diseñarse para codificar información sobre diferentes cantidades de interés en diferentes contextos. Por ejemplo, puede estar relacionada con la distancia, birrefringencia, ángulos, o concentración de alguna muestra (KAGRA, 2013; Rozema, 2014).

Sin correlaciones cuánticas, la mínima incerteza de fase  $\Delta\phi$  alcanzable usando  $N$  fotones está dada por el **Límite de Shot-Noise** (SNL):  $\Delta\phi \sim 1/\sqrt{N}$ . La metrología cuántica, sin embargo, permite mejorar la sensibilidad: haciendo uso de fenómenos como el entrelazamiento, es posible alcanzar el **Límite de Heisenberg**:  $\Delta\phi \sim 1/N$  (Giovannetti, 2004). De esta manera, utilizando fotones entrelazados se puede alcanzar súper-sensibilidad en la estimación de fase, es decir, mediciones de fase con una incerteza por debajo del SNL. Los estados entrelazados multifotónicos, como los estados  $N00N$ , pueden alcanzar esta súper-sensibilidad y, en principio, pueden saturar el límite de Heisenberg.

### ■ MEDICIONES DE INTENSIDAD

Otra de las aplicaciones intensamente estudiada es la mejora en la precisión para la estimación de la absorción óptica de una muestra, comparada con una medición usando luz clásica. La incerteza de esta medición está dada por una combinación de las fluctuaciones aleatorias inherentes al haz de prueba (que en un haz de luz clásico están caracterizadas por una distribución de Poisson), y por la naturaleza estocástica de la interacción entre la luz y la materia en el objeto de estudio. Esquemas para estimar la transmisión de una muestra generalmente consisten en medir la atenuación de la intensidad de un haz de luz que se propaga a través de la misma. Con una fuente de pares de fotones correlacionados, se puede usar uno de los fotones para incidir sobre la muestra, y su par correlacionado para registrar (y eliminar) las fluctuaciones de intensidad del haz, para obtener medidas con ruido por debajo del denominado *shot-noise*. La aplicación de esta técnica y otras equivalentes en el área de las ciencias biológicas permite sobrepasar



**Figura 7.** Representación esquemática de un interferómetro de Mach-Zehnder para la estimación de una fase interferométrica. Un estado sonda es enviado al dispositivo a través de las entradas de un separador de haz, donde se crea un estado de superposición de dos modos. Ambos modos acumulan una fase proporcional al largo  $L$  del camino recorrido. Además, el estado interactúa con un mecanismo donde se codifica una diferencia de fase relativa  $\phi$  entre ambos modos. Esta fase puede estimarse a partir de mediciones de un observable específico a la salida, después de la recombinación coherente de los dos modos en el divisor de haz de salida.

los límites clásicos de precisión por unidad de intensidad (Taylor, 2016; Berchera, 2019; Moreau, 2019).

## ■ FUENTES DE LUZ NO CLÁSICA

Finalmente, comentamos que una tecnología asociada a las aplicaciones fotónicas en comunicaciones y metrología, y necesaria para alguna de estas aplicaciones es la ingeniería de fuentes de fotones únicos. Las fuentes de fotones únicos a demanda pasan a ser un activo valioso para dispositivos basados en óptica cuántica, ya que de por sí exhiben una estadística de emisión sub-Poissoniana, una característica clave en aplicaciones de metrología cuántica (Berchera, 2019). Además, estos estados son de importancia crítica para la seguridad de protocolos de QKD, a menos que se apliquen técnicas de estados señuelo. Por estos motivos, hay un gran esfuerzo global destinado a desarrollar y caracterizar fuentes cuasi-óptimas de fotones únicos. Los dos enfoques más relevantes para estas realizaciones se clasifican en fuentes determinísticas (emisores de fotones individuales, como átomos, iones o moléculas, *quantum dots* o centros de nitrógeno-vacancia (Tomm, 2021)) y fuentes probabilísticas (generación de pares de fotones mediante procesos no lineales como conversión paramétrica espontánea o *four-wave mixing*) (Adam, 2014; Meyer-Scott, 2020).

El Laboratorio de Óptica y Fotónica junto con el Laboratorio de Detectores de Bajo Umbral y sus Aplicaciones, ambos del Departamento de Física, de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires, usando detectores de imagen de tecnología skipper-CCD, con resolución de número de fotones y ruido de lectura por debajo de los  $0.2e^-$ , realizaron experimentos sobre obtención de imá-

genes y reconstrucción de frentes de onda con resolución por encima del shot-noise en condiciones de baja iluminación (Pears Stefano, 2023; Pears Stefano, 2024). El laboratorio de Óptica Cuántica de CITEDEF, además de su trabajo en comunicaciones cuánticas, viene desarrollando desde 2019 investigaciones en metrología cuántica, abordando tanto cuestiones fundamentales como posibles aplicaciones. Se han realizado estudios teóricos y experimentales sobre el rol de la indistinguibilidad en la estimación de una fase interferométrica (Knoll, 2019; Knoll, 2023); se trabajó en el desarrollo y caracterización de una fuente de pares de fotones múltiples para aplicaciones de interferometría (Ma, 2025); y en el análisis y desarrollo de una fuente de fotones multiplexada para medidas de absorción con sensibilidad mejorada (Magnoni, 2021; Magnoni, 2024).

## ■ CONSIDERACIONES FINALES

La fotónica cuántica, que se basa en el uso de fotones individuales como sistemas cuánticos, desempeña un papel fundamental en el avance de las tecnologías cuánticas. Aun cuando los fotones no son los sistemas más adecuados para tareas de computación cuántica, resultan ser especialmente idóneos para aplicaciones en comunicaciones seguras, y también para metrología de precisión.

Como hemos visto, las comunicaciones cuánticas seguras aprovechan las leyes de la mecánica cuántica para generar claves criptográficas y transmitir información de manera teóricamente inviolable. En estas aplicaciones, los fotones, debido a su interacción débil con el entorno, su facilidad de preparación y su carácter de sistemas en movimiento, dominan el escenario. La posible llegada del “Q-Day”, cuando las computadoras cuánticas

puedan romper los protocolos de encriptación actuales (clásicos) y las infraestructuras digitales críticas, representa un cambio de paradigma en la seguridad de la información. Estados y empresas deberán reinventar sus estrategias de protección, posiblemente adoptando enfoques orientados a la comunicación cuántica. Los protocolos de QKD evolucionaron en forma muy dinámica desde sus primeras implementaciones prácticas a principios del milenio, hasta llegar a cubrir distancias superiores a los 500 km en fibra óptica y a cuadruplicar esta distancia para enlaces satelitales.

Por otro lado, el sensado óptico es una herramienta fundamental en muchas disciplinas, debido a su capacidad para detectar y medir luz sin contacto directo, su inmunidad a interferencias electromagnéticas y la facilidad para preparar y leer los estados de las sondas. Estas ventajas, combinadas con las propiedades únicas de los fotones —como la coherencia, la interferencia cuántica y el entrelazamiento— abren nuevas posibilidades para realizar mediciones ultrasensibles de parámetros físicos, superando los límites impuestos por la física clásica.

Una tecnología emergente que acompaña esta tendencia es la de los chips ópticos cuánticos, que integran componentes como guías de onda, divisores de haz y detectores para manipular fotones individuales. Su desarrollo resulta crucial para impulsar tanto las comunicaciones seguras como las aplicaciones de sensado de alta precisión (Katiyi, 2025).

En los últimos años, a nivel mundial, se puede observar una transición del desarrollo a la implementación de tecnologías cuánticas en general, y en particular en las que usan fotones como recurso cuántico. Innovaciones recientes apuntan

hacia la construcción de sistemas cuánticos más seguros y confiables. Aunque las instituciones académicas siguen siendo las principales incubadoras de avances, en estos años varias de las transformaciones más decisivas han sido impulsadas por empresas tecnológicas, más que por acciones gubernamentales. Según la consultora McKinsey & Company, se estima que para 2035 el mercado global de comunicaciones cuánticas podría alcanzar entre 11.000 y 15.000 millones de dólares, mientras que el de sensado cuántico, que abarca distintas plataformas más allá de los fotones, oscilaría entre 7.000 y 10.000 millones (Soller, 2025).

A modo de conclusión, podríamos decir que “esto recién empieza”. Efectivamente, estamos en un momento crucial donde la evolución de las tecnologías cuánticas, impulsada por sectores tanto académicos como industriales, promete transformar radicalmente nuestra forma de comunicarnos, medir y proteger (¡y procesar!) la información. La frontera cuántica nos invita a seguir explorando y preparando a la sociedad para un futuro cada vez más dependiente de estas innovaciones. En este contexto, para un país como Argentina con una economía en desarrollo, pero aún con una valiosa base de conocimiento científico y tecnológico, resulta estratégico promover desarrollos de escala contenida pero de alto impacto. Estos esfuerzos permiten -al menos- sostener capacidades críticas, ofrecer valor agregado en la cadena tecnológica global y preservar una mínima soberanía tecnológica, y autonomía en la gestión de datos sensibles y los sistemas que los procesan.

## ■ GLOSARIO

**AES:** *Advanced Encryption System*; sistema de encriptación usado habitualmente para proteger redes inalámbricas, encriptar archivos y

dispositivos de almacenamiento, proteger aplicaciones de mensajería como Whatsapp, y asegurar transacciones bancarias entre varias otras aplicaciones.

**Amplificación de privacidad:** Proceso que transforma una clave criptográfica inicial, que podría ser parcialmente conocida por un espía, en una clave final que es segura y completamente desconocida para cualquier adversario.

**Autenticación:** Proceso de verificar la identidad de un usuario, dispositivo, o fuente de datos para asegurar que es lo que pretende ser. Es una parte crucial de la seguridad de la información, que construye confianza en el proceso específico de comunicación. Éste confirma no sólo el origen de los datos sino además si han sido alterados o no durante la transmisión o el almacenamiento.

**Base vectorial:** Conjunto de vectores linealmente independientes que puede generar cualquier otro vector del espacio vectorial.

**Clave criptográfica:** Lista de caracteres o símbolos, usualmente generados en forma aleatoria, usada junto con un algoritmo apropiado para encriptar o desencriptar datos.

**Coherencia óptica:** Medida de la correlación de fase de distintas ondas de luz, que permite que ocurra el fenómeno de interferencia.

**Conversión paramétrica espontánea:** SPDC por sus siglas en inglés (*Spontaneous Parametric Down-Conversion*) es un proceso no lineal instantáneo que convierte un fotón de energía mayor (llamado bombeo) en un par de fotones (llamados *signal* e *idler*) de menor energía, respetando las leyes de conservación de energía y momento. Es un proceso importante en óptica cuántica, que

permite generar pares de fotones correlacionados en uno o más grados de libertad (energía, polarización, momento lineal), o incluso pares de fotones en estados entrelazados.

**Ensamble:** Número grande de copias de un sistema, consideradas en conjunto, que usualmente se usa para representar el desconocimiento completo del sistema, asignando probabilidades a los distintos posibles estados en que éste se pueda encontrar.

**Espacio de Hilbert:** En el marco de la mecánica cuántica, un espacio de Hilbert es una estructura matemática usada para representar todos los posibles estados de un sistema cuántico, y las manipulaciones (operaciones) que pueden ser realizadas sobre esos estados.

**Estados coherentes:** Estados cuánticos específicos, o soluciones, del oscilador armónico cuántico, que replican el comportamiento oscilatorio de un oscilador armónico clásico. A menudo se describen como los estados cuánticos “más parecidos” a un estado clásico, porque su comportamiento es similar al de las ondas electromagnéticas clásicas. Se caracterizan por tener una mínima incerteza en posición y momento. En un estado coherente fotónico, el número (cantidad) de fotones del estado tiene una distribución de Poisson  $P(x=n)=e^{-\mu}/n!$ , por lo que la dispersión o incerteza en el número de fotones es igual a la raíz cuadrada del valor medio  $m$  de fotones del estado.

**Estados de Fock:** Un estado fotónico de Fock representa un estado cuántico de la luz con un número definido de fotones. Estos estados son fundamentales en óptica cuántica y tienen funciones críticas en tareas de procesamiento cuántico de la información, metrología cuántica y otras tecnologías cuánticas.

**Estado entrelazado:** Estado cuántico específico en el que dos o más partículas están correlacionadas entre sí de forma tal que el estado cuántico de cada partícula constituyente no puede ser descrito en forma independiente del resto de las partículas del sistema, aún cuando las mismas estén arbitrariamente distanciadas. Matemáticamente, los estados entrelazados no pueden ser expresados como un producto simple de estados de partículas individuales.

**Factorización:** El proceso de reducir un número o una expresión al producto de sus factores.

**Fase óptica:** Propiedad de la luz o en general de una onda electromagnética que describe la posición de una onda respecto de su ciclo ondulatorio a un determinado tiempo.

**Four-wave mixing:** Fenómeno de intermodulación no lineal entre cuatro ondas que permite obtener suma de frecuencias, resta de frecuencias o dos ondas de frecuencias distintas al excitar al sistema no lineal con dos ondas de la misma frecuencia. En óptica cuántica es de interés al permitir obtener pares de fotones en sistemas en los que la conversión paramétrica no es posible debido a la simetría del material.

**Función de onda:** Descripción matemática del estado cuántico de un sistema. Es una función a valores complejos que da información sobre la probabilidad de encontrar un sistema cuántico en alguna posición particular o con un momento particular.

**Indistinguibilidad:** En el marco de la mecánica cuántica, partículas indistinguibles son las que no pueden ser distinguidas entre sí, aún en principio. Las partículas pueden ser distinguibles debido a diferencias inherentes como masa, frecuencia, carga eléctrica, spin, etc, pero aún

cuando las partículas tuvieran las mismas propiedades físicas, existe posibilidad de incluir distinguibilidad a partir de sus trayectorias, o cualquier otra "etiqueta" que permita saber de qué camino proviene cada una, o con qué retardo llegan a un cierto punto.

**Láser:** Dispositivo que emite luz mediante el proceso de amplificación óptica basada en la emisión estimulada de radiación electromagnética; generalmente emite en una región muy estrecha del espectro electromagnético, y con un haz colimado y de baja divergencia.

**Modos transversales (de la radiación electromagnética):** También conocidos como Modos Electromagnéticos Transversos (TEM), describen los patrones del campo eléctrico en una onda perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. Son relevantes para entender el comportamiento de las ondas con condiciones de contorno definidas, como guías de onda, fibras ópticas o cavidades resonantes como la de un láser.

**Polarización:** Propiedad de las ondas electromagnéticas (en particular de la luz) de oscilar en un plano específico, transversal a la dirección de propagación. La polarización es una propiedad cuántica de la luz, que se manifiesta en los 'cuantos' o partículas indivisibles de la misma, es decir en los fotones.

**QBER (Quantum Bit Error Rate):** Magnitud que cuantifica la tasa de error presente en un sistema de distribución cuántica de claves. Específicamente, mide la 'descorrelación' entre estados cuánticos transmitidos y recibidos, es decir, cuán a menudo Bob recibe un bit diferente del que Alice envió. El QBER es una medida crucial para evaluar la seguridad de un protocolo de QKD.

**QKD (Quantum Key Distribution):** Método de comunicación segura que emplea propiedades de los sistemas cuánticos para crear y distribuir claves criptográficas.

**Qubit:** bit cuántico, es la unidad básica de información en la computación cuántica, equivalente a un bit binario en el marco de la computación clásica. A diferencia de un bit clásico que sólo puede valer 0 o 1, un qubit puede existir en una superposición de estados cuánticos.

**RSA:** Protocolo de encriptación de clave pública desarrollado en 1973 por Rivest, Shamir y Adleman, que se usa actualmente -entre otras aplicaciones- para garantizar la seguridad en el protocolo de navegación segura por internet HTTPS, y en firmas digitales.

**Shot noise:** aleatoriedad inherente en la emisión y detección de luz debido a su naturaleza cuántica. Proviene del comportamiento discreto de los fotones y la subsecuente aleatoriedad de la llegada de esos fotones al detector. El *shot noise* aparece cuando las detecciones son independientes y aleatorias, con varianza igual a la media, lo que usualmente se asocia a un proceso de Poisson. Fuentes de luz con distinta estadística tendrán ruidos asociados menores o mayores, según su varianza.

**Test de Bell (o test de desigualdad de Bell, o experimento de Bell):** Es una clase de experimentos de física diseñados para poner a prueba los principios de la mecánica cuántica contra teorías de realismo local. Esencialmente, buscan mostrar si el universo está mejor descrito por la mecánica cuántica o por alguna teoría basada en variables ocultas locales. Un test de Bell *loophole-free* trata de eliminar la mayor cantidad de suposiciones que podrían ser

explotadas por teorías de variables locales. Entre estas suposiciones o “*loopholes*” se destacan el de detección, el de localidad, el de memoria y el de impredecibilidad. Hasta ahora, todos los tests de Bell realizados, incluso los más sofisticados (es decir, los que se aproximan a un experimento completamente *loophole-free*), han mostrado que la naturaleza se comporta como predice la mecánica cuántica, descartando en forma efectiva la posibilidad de que variables ocultas locales puedan explicar en forma completa los fenómenos cuánticos.

**Transpuesto conjugado:** El transpuesto conjugado de un vector escrito en forma matricial es el resultado de intercambiar filas por columnas y de reemplazar cada elemento por su complejo conjugado.

## ■ REFERENCIAS

- Adam, P., et al. (2014) Optimization of periodic single-photon sources. *Physical Review A* **90**, 053834.
- Barreto Lemos, G., et al. (2022) Quantum imaging and metrology with undetected photons: tutorial. *Journal of the Optical Society of America B* **39**, 2200.
- Bell, J.S. (1966) On the problem of hidden variables in quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics* **38**, 447.
- Bennett, C.H., Brassard G. (1984) Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing. *Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems, and Signal Processing*, Bangalore, India, December 1984, 175.
- Bennett, C.H., Brassard G. (1989) Experimental quantum cryptography: the dawn of a new era for quantum cryptography: the experimental prototype is working. *ACM Sigact News* **20**, 78.
- Berchera, I.R., Degiovanni, I.P. (2019) Quantum imaging with sub-Poissonian light: challenges and perspectives in optical metrology. *Metrologia* **56**, 024001.
- Boaron, A., et al. (2018) Secure quantum key distribution over 421 km of optical fiber. *Physical Review Letters* **121**, 190502.
- Chen, Y., et al. (2022) Quantum interferometric metrology with entangled photons. *Frontiers in Physics* **10**, 892519.
- Clivati, C., et al. (2022) Coherent phase transfer for real-world twin-field quantum key distribution. *Nature Communications* **13**, 157.
- Couteau, C., et al. (2023) Applications of single photons in quantum metrology, biology and the foundations of quantum physics. *Nature Reviews Physics* **5**, 354.
- Defienne, H., et al. (2024) Advances in quantum imaging. *Nature Photonics* **18**, 1024.
- Dirac, P.A.M. (1981) “The Principles of Quantum Mechanics” . Oxford University Press.
- Dixon, A.R., et al. (2008) Gigahertz decoy quantum key distribution with 1 Mbit/s secure key rate. *Optics Express* **16**, 18790.
- Ekert A.K. (1991) Quantum cryptography based on Bell’s theorem. *Physical Review Letters* **67**, 661.
- Giovannetti, V., et al. (2004) Quantum-enhanced measurements: beating the standard quantum limit. *Science* **306**, 1330.
- KAGRA Collaboration (2013) Interferometer design of the KAGRA gravitational wave detector. *Physical Review D—Particles, Fields, Gravitation, and Cosmology* **88**, 043007.
- Katiyi, A., Karabchevsky, A. (2025) Quantum photonics on a chip. *APL Quantum* **2**, 020901.
- Katz, J., Lindell, Y. (2007) “Introduction to modern cryptography: principles and protocols”. Chapman and Hall/CRC .
- Knoll, L.T., Bosyk, G.M. (2023) Simultaneous quantum estimation of phase and indistinguishability in a two-photon interferometer. *Journal of the Optical Society of America B* **40**, C67.
- L. T. Knoll, G. M. Bosyk, I. H. López Grande, and M. A. Larotonda (2019) Role of indistinguishability in interferometric phase estimation. *Physical Review A* **100**, 062125.
- Korzh, B., et al. (2015) Provably secure and practical quantum key distribution over 307 km of optical fibre. *Nature Photonics* **9**, 163.
- Ladd, T.D., et al. (2010) Quantum computers. *Nature* **464**, 45.
- Liao, S., et al. (2017) Satellite-to-ground quantum key distribution. *Nature* **549**, 43.
- LIGO Scientific Collaboration (2011) A gravitational wave observatory operating beyond the quantum shot-noise limit. *Nature Physics* **7**, 962.
- Lo, H.K., Preskill, J (2005) Phase randomization improves the security of quantum key distribution. arXiv preprint quant-ph/0504209.

- Lo, H.K. et al. (2012) Measurement-device-independent quantum key distribution. *Physical Review Letters* **108**, 130503.
- López Grande, I.H., Larotonda, M.A. (2018) Implementation of a hybrid scheme for coherent plug-and-play quantum key distribution. *Quantum Information Processing* **17**, 176.
- Lucamarini, M., et al. (2018) Overcoming the rate–distance limit of quantum key distribution without quantum repeaters. *Nature* **557**, 400.
- Ma, A., et al. (2025) Unraveling quantum phase estimation: exploring the impact of multi-photon interference on the quantum Fisher information. *Quantum Science and Technology* **10**, 035021.
- Magnoni, A.G., Lopez Grande, I.H., and Larotonda, M.A. (2017) Free Space Decoy-state Quantum Key Distribution Implementation. *Óptica Pura y Aplicada* **50**, 187.
- Magnoni, A.G., Knoll, L.T., and Larotonda, M.A. (2021) Scheme for sub-shot-noise transmission measurement using a time-multiplexed single-photon source. *Journal of the Optical Society of America B* **38**, 2502.
- A.G. Magnoni, L.T. Knoll, L. Wölcken, J. Defant, J. Morales, and M.A. Larotonda. (2024) Toward an optical-fiber-based temporally multiplexed single-photon source. *Physical Review A* **110**, 033712.
- Meyer-Scott, E., et al. (2020) Single-photon sources: Approaching the ideal through multiplexing. *Review of Scientific Instruments* **91**, 041101.
- J. Morales, M.G. Aparicio, C.F. Longo, C.L. Arrieta, and M.A. Larotonda (2023) Optical transmitter for time-bin encoding quantum key distribution. *Journal of the Optical Society of America B* **40**, C15.
- Moreau P.A., et al. (2019) Imaging with quantum states of light. *Nature Reviews Physics* **1**, 367.
- Nielsen, M.A., Chuang, I.L. (2010) “Quantum computation and quantum information”. Cambridge University Press.
- Q. Pears Stefano, A.G. Magnoni, J. Estrada, C. Lemmi, D. Rodrigues, and J. Tiffenberg (2023) Infrared Photon-Number-Resolving Imager Using a Skipper Charge-Coupled Device. *Physical Review Applied* **19**, 064044.
- Q. Pears Stefano, A.G. Magnoni, D. Rodrigues, J. Tiffenberg, and C. Lemmi (2024) Interferometry with few photons. *Physical Review Applied* **21**, 064050.
- Pirandola, S., et al. (2017) Fundamental limits of repeaterless quantum communications. *Nature Communications* **8**, 15043.
- Polino, E., et al. (2020) Photonic quantum metrology. *AVS Quantum Science* **2**, 024703.
- Rieffel, E., Polak, W. (2000) An introduction to quantum computing for non-physicists. *ACM Computing Surveys (CSUR)* **32**, 300.
- Rozema, L.A., et al. (2014) Scalable spatial superresolution using entangled photons. *Physical Review Letters* **112**, 223602.
- Rusca, D., Gisin, N. (2024) Quantum cryptography: An overview of quantum key distribution. arXiv preprint arXiv:2411.04044.
- Soller, H., et al. (2025) “The Year of Quantum: From concept to reality in 2025”. McKinsey annual quantum technology report.
- Taylor, M.A, Bowen, W.P. (2016) Quantum metrology and its application in biology. *Physics Reports* **615**, 1.
- Tomm, N., et al. (2021) A bright and fast source of coherent single photons. *Nature Nanotechnology* **16**, 399.
- Wang, S. et al. (2022) Twin-field quantum key distribution over 830-km fibre. *Nature Photonics* **16**, 154.
- Wiesner, S. (1983) Conjugate Coding. *ACM Sigact News* **15**, 78.
- Wootters, W.K., Zurek, W.H. (1982) A single quantum cannot be cloned. *Nature* **299**, 802.
- Zapatero, V., Curty, M. (2019) Long-distance device-independent quantum key distribution. *Scientific Reports* **9**, 17749.
- Zhang, Y., et al. (2024) Continuous-variable quantum key distribution system: Past, present, and future. *Applied Physics Reviews* **11**, 011318.

# INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

## Revista CIENCIA E INVESTIGACION

El tenor de la revista Ciencia e Investigación es de divulgación a nivel superior, para investigadores, docentes, estudiantes, profesionales colegiados y otros, así como estudiosos e interesados de áreas muy diversas, periodistas, políticos, etc. O sea un nivel intermedio entre la Revisión formal para especialistas y la divulgación para el gran público.

Todos los artículos serán arbitrados y una vez aprobados, los autores enviarán la versión final teniendo en cuenta las sugerencias de los árbitros y de los editores. El artículo se presentará vía correo electrónico, como documento adjunto, escrito en Word (extensión «doc») en castellano, en hoja tamaño A4, a doble espacio, con márgenes de por lo menos 2,5 cm en cada lado y letra Times New Roman tamaño 12. Por tratarse de artículos de divulgación científica aconsejamos incluir en el trabajo un glosario, para los lectores no especialistas en el tema.

Salvo excepciones, la extensión de los artículos no excederá las 10.000 palabras, (incluyendo título, autores, resumen, glosario y bibliografía) y las notas breves no deberían excederse de 4.000 palabras. La cantidad de figuras (deseables) y tablas no se limita. Las páginas deben numerarse (arriba a la derecha) en forma corrida, incluyendo el texto, glosario, bibliografía y leyendas de las figuras. Colocar las ilustraciones (figuras y tablas) al final, en páginas sin numerar.

La primera página (VER EJEMPLO) deberá contener: Título del trabajo, nombre de los autores, institución a la que pertenecen indicada con superíndices, correo electrónico de un solo autor correspondiente (indicado con asterisco); y al menos tres palabras clave en castellano y key words en inglés.

## EJEMPLO/MODELO de primer página

### Título en castellano.

Autor, AS <sup>1</sup>, Autor, DE <sup>2</sup>, Autor, TY <sup>1\*</sup>

1 Instituto Universidad (IUC), Try 451, CPA:C1033AAP, Córdoba, Prov. Córdoba, Argentina.

2 Facultad (FE), Gal 451, CPA: B1902DGF, La Plata, Prov. Buenos Aires, Argentina.

\*tyautor@iuc.gov.ar

*Palabras clave:* nanotecnología, suelos, arcillas.

*Key words:* nanotechnology, soils, clays

La segunda página incluirá un resumen en castellano y un Título y Abstract en inglés; con un máximo de 250 palabras para cada idioma.

El texto del trabajo finalizará con el posible glosario, la bibliografía y las leyendas de las figuras. La lista bibliográfica de trabajos citados (Bibliografía, o Citaciones y/o Referencias, deberá ordenarse alfabéticamente de acuerdo con el apellido del primer autor de acuerdo a los siguientes formatos:

Benin L. W., Hurste J. A., Eigenel P. (2008) The non Lineal Hypercycle. Nature 277: 108 – 115.

Lonychamp, P. (1998) “The Theory Of Everything”. Longmans Ltd. London

Shortchamp, K. (2024) Theoretical Assumptions. Chapter 2 in “Evolution of cockroaches”; Cockie, P. and Longie, K. E eds. Crazymans Ltd. London

---

El material gráfico se presentará como: a) Figuras (dibujos e imágenes en formato JPG) que se numerarán correlativamente y b) Tablas, numeradas en forma correlativa independiente de las figuras. En el caso de las ilustraciones que no sean propias u originales, deberá aclararse en la leyenda correspondiente el origen (cita bibliográfica o de página web) y mención de permiso concedido si fuera necesario). Indicar en el texto el lugar tentativo donde el autor desea ubicar cada figura y cada tabla.

#### **PUBLICACIONES NO SOLICITADAS POR LOS EDITORES**

Se deberán acompañar con una nota dirigida indistintamente a los Editores de la revista Ciencia e Investigación o a la presidencia de AAPC o a cualquiera de los miembros del Colegiado Directivo. Dirigirla a [secretaria@aargentinapciencias.org](mailto:secretaria@aargentinapciencias.org), solicitando su posible publicación (conteniendo correo electrónico y teléfono celular). La solicitud se elevará al Comité Editorial que evaluará las posibilidades de publicación.