El arte de preservar un cúbit, al igual que el de criar y educar a nuestras hijas e hijos, implica encontrar el equilibrio adecuado: protegerlo lo suficiente como para mantener su funcionalidad, pero permitir la interacción necesaria con el mundo exterior para que despliegue todo su potencial.

FOTOGRAFÍA: JAVIER ARIAS*

«Cuida bien al niño / Cuida bien su mente / Dale el sol de Enero / Dale un vientre blanco / Dale tibia leche de tu cuerpo // Todas las hojas son del viento / ya que él las mueve hasta en la muerte / Todas las hojas son del viento / menos la luz del sol”.

Cuando Luis Alberto Spinetta, poeta y figura emblemática del rock argentino, interpretaba estos versos en 1973, dedicados a la “Muchacha de ojos de papel” de otro de sus grandes himnos, probablemente no anticipaba que había escrito, de manera inadvertida, una bella metáfora sobre el desafío central de la computación cuántica al que nos enfrentamos medio siglo después.

Hoja quieta en la rama. Hoja en el viento. Dos formas de estar en el mundo, separadas por un soplo. Un haiku de dos estados: una anclada al árbol, otra danzando en la incertidumbre. Así son los cúbits, la unidad básica de información en computación cuántica. Así es la coherencia cuántica.

El bebé de la canción no es común. Puede ocupar dos habitaciones simultaneamente, manifestar emociones opuestas a la vez y existir en un estado de posibilidades hasta que se observa. Es tan sensible que una mínima variación de temperatura, un rayo de luz o incluso la observación pueden provocar su colapso.

Este bebé es un cúbit. La historia de la computación cuántica es, en esencia, la de quienes buscan preservar estos sistemas el tiempo suficiente para que desplieguen su potencial. Técnicamente, esta propiedad se denomina coherencia cuántica: el intervalo durante el cual el cúbit mantiene su naturaleza cuántica antes de que la decoherencia lo transforme en un bit clásico. Es el momento previo a que la hoja caiga y toque definitivamente el suelo.

Cada laboratorio ha desarrollado su propia “guardería” donde cuidar de estos frágiles bebés: un entorno de protección para los cúbits, con logros y desafíos propios.

Las guarderías de los cúbits son de muchos tipos. Desde el frío extremo de los superconductores hasta el silencio del silicio. Desde los susurros láser de los iones hasta la danza reconfigurable de los átomos neutros. Y por supuesto los cúbits topológicos, casi imposibles de destruir a modo de horrocruxes.

Los bebés nacidos del frío: cúbits superconductores

En Google e IBM, las guarderías adoptan una forma singular: refrigeradores de dilución que descienden del techo como suntuosas lámparas de araña en antiguos palacios. Dentro, a 20 milikelvin, más frío que el espacio interestelar y cercano al cero absoluto, reposan bebés en cunas muy especiales.

Los cúbits superconductores se conservan a 20 milikelvin, más frío que el espacio interestelar y cercano al cero absoluto

Estas cunas superconductoras, basadas en circuitos de aluminio, niobio o tántalo, funcionan como átomos artificiales, con niveles de energía cuantizados bien definidos. Gracias a pioneros como John Clarke, Michel Devoret y John Martinis (galardonados con el Premio Nobel de Física 2025), quienes en los años 80 demostraron que un circuito puede comportarse como un átomo, somos capaces de desdibujar la frontera entre el mundo cuántico microscópico y el mundo clásico macroscópico.

Estos cúbits superconductores son los más veloces. Realizan operaciones lógicas en decenas de nanosegundos. Sin embargo, presentan un inconveniente: son susceptibles al ruido. Al estar compuestos por miles de millones de átomos, cualquier defecto en el material, cualquier fluctuación del campo electromagnético o vibración puede inducir la pérdida de coherencia cuántica. Incluso la radiación infrarroja, las pequeñas trazas radiactivas en los materiales del edificio o los rayos cósmicos que nos atraviesan constantemente impactan contra los cúbits, generando cascadas de partículas que degradan el estado superconductor y hacen que pierdan su coherencia en milisegundos.

En 2019, el procesador Sycamore de Google mantuvo la coherencia de 53 cúbits el tiempo suficiente para lograr la denominada “Supremacía (o ventaja) Cuántica”: completar en 200 segundos una tarea que requeriría 10.000 años en los superordenadores más avanzados. Aunque estos resultados fueron cuestionados posteriormente, ejemplifican la intensa competencia en computación cuántica y su potencial. Actualmente, laboratorios de todo el mundo investigan nuevos materiales, perfeccionan técnicas de nanofabricación y desarrollan filtros más eficaces. Por ahora, la decoherencia sigue siendo el principal obstáculo.

Recientemente, AWS ha introducido una variante fascinante: los cat qubits, bautizados así por el famoso gato de Schrödinger, ese felino imaginario que está vivo y muerto a la vez. Estos cúbits están diseñados para suprimir ciertos tipos de errores de forma natural, actuando como si el gato cuántico tuviera una doble vida protegida. Integrados en su nuevo chip Ocelot, los cat qubits reducen hasta en un 90% los recursos necesarios para corregir errores, y por tanto las necesidades de escalado masivo, allanando el camino hacia ordenadores cuánticos tolerantes a fallos que podrían llegar años antes de lo previsto.

La guardería del susurro: iones atrapados

Cambiemos de escenario. En laboratorios repletos de espejos y láseres, los bebés son iones de iterbio, calcio o berilio, suspendidos en el vacío mediante trampas de Paul, campos eléctricos que los mantienen sin contacto con superficies sólidas y que crean lo que denominamos como redes de iones atrapados.

Si los superconductores son velocistas, los iones atrapados son fondistas: mantienen la coherencia durante segundos o incluso minutos. Sin embargo, requieren manipulación extremadamente delicada mediante láseres, con pulsos precisos que alteran su estado sin perturbarlos. Estas técnicas son lentas, operando en escalas de microsegundos, lo que limita ciertas operaciones. El calor puede excitar sus vibraciones colectivas (fonones), destruyendo la coherencia, por lo que se emplea enfriamiento láser en un equilibrio delicado. Además, la alineación de los láseres es compleja y se requieren condiciones de ultraalto vacío.

Estos sistemas presentan fidelidades superiores al 99,9%, lo que los convierte en algunos de los qubits mejor controlados. Sin embargo, el número de qubits en los sistemas más avanzados apenas supera la treintena.

El santuario de silicio: cúbits de espín

En salas blancas de Intel o de Delft, donde los técnicos visten a modo de astronautas, los bebés son de silicio. Son electrones atrapados en puntos cuánticos, pequeñas islas semiconductoras donde electrodos diminutos los controlan. La idea es tan bella como simple: si manipulamos su espín, esa propiedad intrínseca

del electrón que actúa como un pequeño imán, tendremos un cúbit.

La ventaja del silicio es su silencio. Purificándolo para eliminar el isótopo ^{29}Si, cuyos núcleos son pequeños imanes aleatorios que generan ruido magnético, obtenemos un entorno casi perfecto. Y lo extraordinario: estos bebés se fabrican con las mismas técnicas que los microchips de nuestros ordenadores, con lo cual podríamos aprovechar décadas de desarrollo de la industria CMOS para imprimir cúbits de espín en grandes obleas de silicio, con la misma tecnología con la que se fabrican los microprocesadores con billones de transistores que tenemos en nuestros dispositivos. Esta promesa de escalabilidad de cúbits comienza a cosechar sus primeros frutos: recientemente se han demostrado fidelidades superiores al 99% en cúbits fabricados en obleas industriales.

Sin embargo, operar cúbits de silicio presenta desafíos: pequeñas variaciones en el material provocan que cada espín electrónico responda de manera ligeramente distinta, lo que exige calibraciones individuales. Además, el ruido de carga en las interfaces entre el silicio y sus óxidos puede afectar negativamente la coherencia.

La guardería que se reconfigura: átomos neutros

Cambiemos una vez más de escenario. Dejemos las salas blancas del silicio y viajemos a Boston, a los laboratorios de QuEra, o a California, donde Atom Computing y Microsoft están construyendo una nueva guardería.

Aquí los bebés son átomos neutros de rubidio, cesio, iterbio o estroncio, atrapados con pinzas ópticas: láseres tan enfocados que pueden sostener un solo átomo en su punto focal. Como los átomos no tienen carga eléctrica, son aún más tranquilos que los iones. Pueden mantener la coherencia durante segundos.

Pero lo realmente especial es que se pueden reordenar. Usando matrices de pinzas ópticas generadas con moduladores espaciales de luz, es posible mover los átomos como piezas de ajedrez, acercando a los que necesitan interactuar entre sí. Es la única plataforma en la que la conectividad no está dictada por un cableado fijo, sino que puede reprogramarse sobre la marcha. ¿Cómo se logra que interactúen? Los átomos se excitan a estados de Rydberg: estados en los que el electrón se aleja tanto del núcleo que el átomo se hincha como un globo, hasta hacerse mil veces más grande. En ese estado, los átomos se ven y pueden hablar entre sí.

Estos cúbits enfrentan un desafío fundamental: pueden desaparecer debido a colisiones con gas residual, calentamiento o durante la medición, lo que provoca que un átomo abandone su pinza óptica. Mientras que en otras plataformas la pérdida de un cúbit detendría el cálculo, en la guardería de átomos neutros han aprendido a hacer algo asombroso: reponer los bebés perdidos sin despertar a los demás. En 2025, un equipo de Atom Computing y Microsoft demostró un sistema que detecta qué átomos faltan y los repone desde un reservorio cercano: una especie de cinta transportadora óptica que repone bebés, a modo de escena de dibujos animados, manteniendo la coherencia por encima del 95%.

La guardería de luz: cúbits fotónicos

Existe una guardería radicalmente diferente, donde los bebés son de luz. Fotones que viajan por fibras ópticas a temperatura ambiente, sin necesidad de frío extremo ni de vacío. Son las hojas que el viento no puede tumbar: viajan ligeras, imperturbables y pueden recorrer kilómetros sin perder su coherencia. Pero tienen un problema: los fotones apenas interactúan entre sí. Es como tener hojas que nunca se rozan. ¿Cómo hacer que se comuniquen? La solución tradicional ha sido la interferencia probabilística, pero recientemente se ha dado un paso de gigante con la demostración, por parte de la compañía canadiense Xanadu, de la generación, en un chip fotónico integrado de nitruro de silicio, de estados que distribuyen la información cuántica entre múltiples fotones, con una estructura que permite detectar y corregir errores de forma natural, sin necesidad

de agrupar muchos cúbits físicos. Es como si cada bebé de luz llevara incorporado su propio sistema de protección.

Estos estados, denominados GKP, permiten operaciones lógicas deterministas a temperatura ambiente y son ideales para la interconexión de múltiples chips mediante fibra óptica. Aunque es necesario reducir las pérdidas ópticas para lograr tolerancia a fallos completa, este avance señala un camino claro hacia ordenadores cuánticos fotónicos escalables, modulares y aptos para centros de datos.

La guardería soñada: cúbits topológicos

Y luego está la guardería que algunos llevamos años tratando de entender, incluyendo grandes laboratorios como los de Microsoft: la guardería de los cúbits topológicos. Una idea que parece de novela.

Recordemos a Voldemort, el villano de Harry Potter. Para volverse inmortal, esconde su alma en varios objetos, los horrocruxes, y los dispersa por el mundo. Mientras esos objetos permanezcan intactos, Voldemort no puede morir. Para destruirlo, habría que encontrar y destruir todos y cada uno de ellos.

Los cúbits topológicos funcionan igual. La información no se guarda en un solo lugar, sino troceando un electrón en dos mitades, los modos de Majorana, y separándolas. Cada mitad, por separado, no tiene la información completa; es la relación entre ambas la que codifica el cúbit. Para destruirla, el entorno tendría que afectar ambas mitades simultáneamente. Cualquier perturbación local solo ve una mitad y no puede dañarla.

En los cúbits topológicos, la información no se guarda en un solo lugar, sino troceando un electrón en dos mitades

Pero estos modos no aparecen en un único material. Nacen en la frontera, en la región de contacto entre un semiconductor, como el arseniuro de indio, y un superconductor. Es en esa delgada línea donde el semiconductor se encuentra con el superconductor, donde la física permite que un electrón se parta en dos mitades separadas. Por eso estos cúbits son híbridos por naturaleza, criaturas que no serían posibles sin la combinación de ambos mundos.

Paradójicamente, esta imposibilidad de acceder a la información de forma local ha generado una de las controversias más intensas de la física moderna. Durante años, múltiples experimentos han mostrado señales que podrían interpretarse como modos de Majorana, pero también podrían explicarse por otros fenómenos más mundanos. La comunidad científica ha debatido acaloradamente si esas señales eran los primeros pasos de un bebé topológico o si eran simplemente sombras proyectadas en las paredes de la guardería.

Posiblemente hayamos contribuido a cerrar esta controversia para siempre. En colaboración con QuTech Delft hemos demostrado recientemente que es posible observar el estado de una cuna con Majoranas durante más de un milisegundo. Utilizando una técnica llamada capacitancia cuántica, logramos mecerla y detectar en tiempo real si está «llena» o «vacía», sin destruir la información.

***En el centro de la imagen la réplica a tamaño real del criostato del IBM Q System One, del Barcelona Supercompting Center, expuesta en la muestra *Revolución cuántica*, en Espacio Fundación Telefónica, hasta el 11 de octubre de 2026.**