

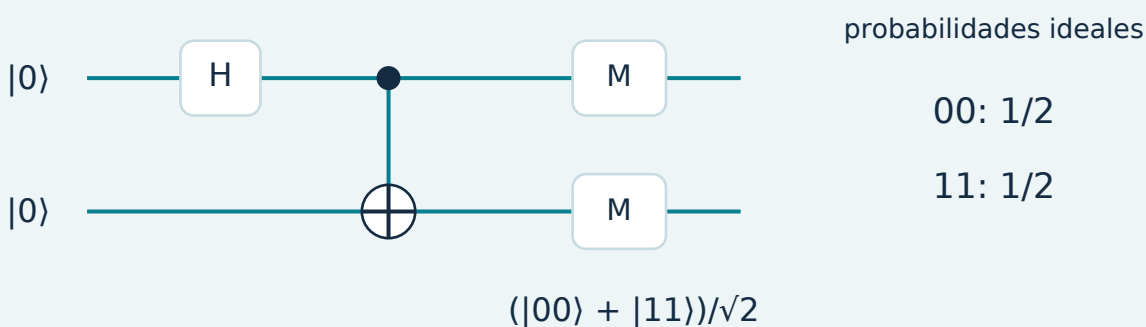
Tecnología cuántica

De los principios físicos a procesadores, redes y sensores

Edición educativa de referencia

26.09.2026 | v1.0 | ES

Una guía original y estructurada para lectores curiosos, estudiantes y equipos tecnológicos. Es una síntesis educativa amplia, no un inventario exhaustivo de cada experimento ni un manual para construir un laboratorio. Las matemáticas se introducen cuando aclaran el mecanismo. Los esquemas son conceptuales y no están a escala. Estado de la investigación verificado el 26 de septiembre de 2026; las fechas de cada evidencia figuran en las referencias.



Índice

01 El panorama de las tecnologías cuánticas	3
02 Un siglo de ideas y experimentos	3
03 Estados, amplitudes y medición	4
04 La superposición no es una bolsa de respuestas	4
05 Entrelazamiento, correlaciones y no clonación	5
06 Puertas, circuitos y primer experimento	5
07 Algoritmos y condiciones de aceleración	6
08 Cómo codifica un cúbit el hardware	6
09 El procesador es solo parte de la máquina	7
10 Electrónica de control, óptica y criogenia	7
11 Ruido y corrección de errores	8
12 Cúbits lógicos y tolerancia a fallos	8
13 Las capas de software cuántico	9
14 Benchmarks que responden preguntas útiles	9
15 Comunicaciones e internet cuántico	10
16 Sensores y medición precisa	10
17 Criptografía poscuántica frente a QKD	11
18 Evidencia en la revisión de 2026	11
19 Futuro condicional, no inevitable	12
20 Ruta de aprendizaje y ejercicios	12
21 Uso responsable de la biblioteca	13
Bibliografía y lecturas adicionales / 14+	

01 El panorama de las tecnologías cuánticas

La tecnología cuántica utiliza sistemas físicos controlados cuyo comportamiento requiere la mecánica cuántica. La computación procesa información; las comunicaciones distribuyen estados o claves; los sensores miden magnitudes físicas. Láseres, transistores y resonancia magnética ya dependen de la física cuántica. Los enfoques recientes emplean sistemas individuales, coherencia y, a veces, entrelazamiento como recursos diseñados.

Un ordenador cuántico suele ser un acelerador conectado a ordenadores clásicos. No sustituye a todos los procesadores ni acelera todas las tareas. Una ventaja útil significa una solución mejor a un coste total aceptable, incluyendo preparación, control, repeticiones y verificación. No existe una tecnología experimentalmente establecida que esté simplemente por encima de todas las tecnologías cuánticas. Distintas arquitecturas resuelven problemas distintos. [R1, R2]

02 Un siglo de ideas y experimentos

Planck introdujo la cuantización de la energía en 1900; Einstein relacionó los cuantos de luz con el efecto fotoeléctrico en 1905. Las mecánicas matricial y ondulatoria surgieron en 1925-1926. El argumento EPR de 1935 y el teorema de Bell de 1964 aclararon la importancia de correlaciones que los modelos clásicos locales no pueden reproducir bajo los supuestos pertinentes.

En los años ochenta, Feynman motivó la simulación cuántica y Deutsch formalizó la computación cuántica universal. BB84 propuso distribuir claves cuánticas en 1984. Los algoritmos de Shor de 1994 y Grover de 1996 establecieron posibilidades importantes; la corrección cuántica de errores surgió en 1995. Después llegaron puertas controladas, procesadores accesibles en la nube, simuladores más capaces y demostraciones de cúbits lógicos. Son logros distintos, no pruebas de que toda aplicación útil ya sea práctica. [R1, R2, R10]

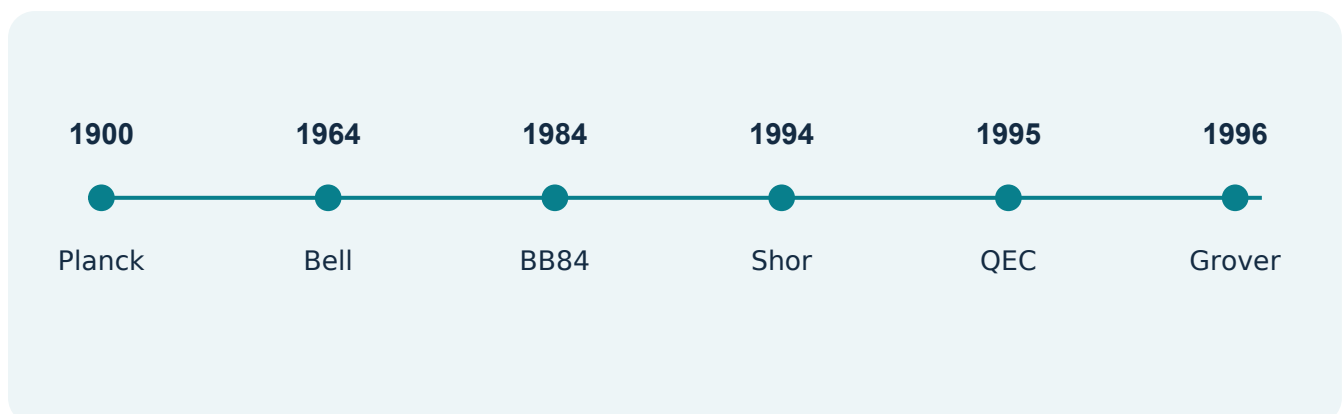


Diagrama educativo original 01. Hitos históricos seleccionados; las fechas indican ideas, no productos disponibles.

03 Estados, amplitudes y medición

Un cúbit es un sistema cuántico controlable de dos niveles. En una base elegida, su estado puro es $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, con amplitudes complejas y $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. La medición devuelve 0 o 1 con esas magnitudes al cuadrado como probabilidades. Una medición no revela ambas amplitudes; estimar el estado exige muchas preparaciones idénticas y varias configuraciones de medida.

La fase relativa modifica la interferencia; una fase global no altera las predicciones. La evolución coherente de un sistema aislado es unitaria; un hamiltoniano describe energía y dinámica. Los estados mixtos representan incertidumbre o entrelazamiento con un entorno no observado y requieren una matriz de densidad. La esfera de Bloch representa estados puros de un cúbit en la superficie y mixtos en el interior, no la trayectoria de un electrón. [R10, R11]

04 La superposición no es una bolsa de respuestas

Los estados $|+\rangle = (|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$ y $|-\rangle = (|0\rangle - |1\rangle)/\sqrt{2}$ dan iguales probabilidades 0/1 en la base computacional. Una puerta Hadamard H antes de medir los distingue: $H|+\rangle = |0\rangle$ y $H|-\rangle = |1\rangle$. La interferencia convierte así la fase en diferencias observables de probabilidad.

Un estado puro de n cúbits tiene 2^n amplitudes, pero su lectura no entrega 2^n respuestas clásicas. Los algoritmos deben organizar la interferencia para favorecer resultados útiles. Ni siquiera el enorme espacio de estados prueba una aceleración: algunos circuitos grandes admiten simulación clásica eficiente. El reto principal es conservar la interferencia adecuada mientras se suprimen las interacciones no deseadas. [R2, R10]

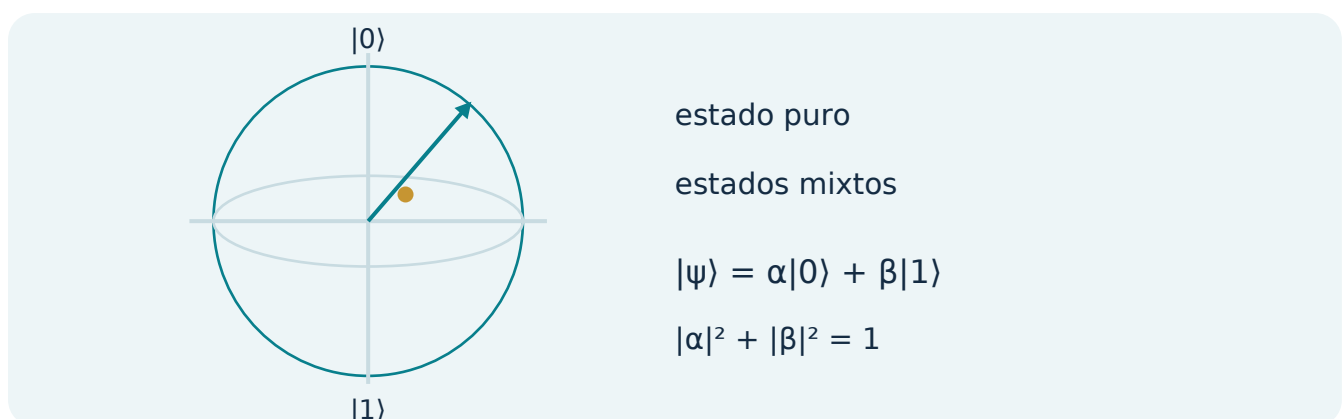


Diagrama educativo original 02. Esfera de Bloch: representación geométrica de un cúbit, no una órbita electrónica.

05 Entrelazamiento, correlaciones y no clonación

Desde $|00\rangle$, aplicamos H al primer cúbit y después CNOT usando ese cúbit como control. El resultado es el estado de Bell $(|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$. En la base computacional, los resultados ideales 00 y 11 son equiprobables. Cada subsistema parece aleatorio. Las correlaciones en una sola base no certifican entrelazamiento: una mezcla clásica de 00 y 11 produce la misma distribución.

Un estado entrelazado no puede escribirse como una mezcla de estados producto. Medidas o testigos adecuados lo distinguen de correlaciones clásicas. No transmite mensajes controlables más rápido que la luz. La no clonación prohíbe copiar de manera universal y perfecta un estado desconocido; sí es compatible con copiar estados clásicos ortogonales conocidos. La teleportación consume entrelazamiento compartido y comunicación clásica. [R3, R10]

06 Puertas, circuitos y primer experimento

X intercambia $|0\rangle$ y $|1\rangle$. Z cambia el signo de la amplitud de $|1\rangle$. H cambia entre las bases computacional y de superposición. S y T introducen fases relativas concretas; las rotaciones continuas ofrecen otra descripción. CNOT invierte el objetivo cuando el control es $|1\rangle$ en la base computacional. Un conjunto universal aproxima cualquier cálculo unitario a la precisión elegida.

Los cables representan cúbits; la dirección horizontal indica orden, no distancia física. Prepare $|00\rangle$, aplique H(0), CNOT(0,1), mida ambos y repita 1.000 veces. Idealmente habrá unos 500 resultados 00 y 500 resultados 11, con fluctuaciones estadísticas. El ruido añade otros resultados. Registre simulador o dispositivo, circuito, orden de bits, repeticiones y momento de calibración. Este ejemplo muestra preparación y correlación, no ventaja computacional. [R10, R11]

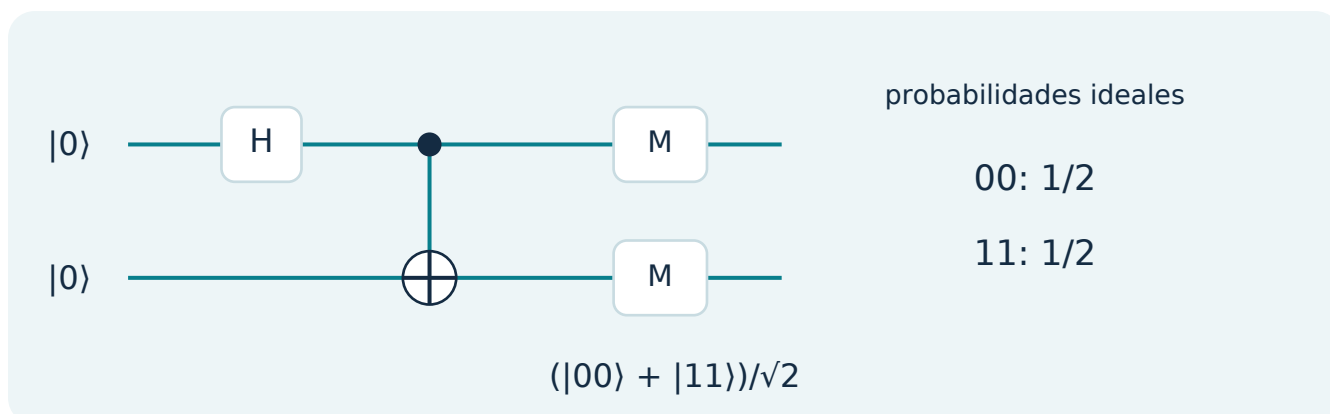


Diagrama educativo original 03. Circuito de Bell: los recuentos ideales en Z no certifican por sí solos el entrelazamiento.

07 Algoritmos y condiciones de aceleración

Shor reduce factorización y logaritmos discretos a cálculos cuánticos relacionados con periodos, amenazando esquemas de clave pública en hardware tolerante a fallos suficientemente capaz. Grover necesita $O(\sqrt{N})$ consultas al oráculo para un elemento marcado entre N candidatos, frente a $O(N)$ consultas clásicas. El oráculo, acceso a datos y corrección de errores también cuestan recursos.

La estimación de fase obtiene información de autovalores cuando se dispone de evoluciones controladas y estados de entrada adecuados. La simulación cuántica aborda dinámica molecular y de materiales. VQE y QAOA combinan circuitos parametrizados con optimización clásica, sin superioridad práctica general demostrada. Propuestas para sistemas lineales y aprendizaje suelen suponer carga eficiente, buen condicionamiento o salidas restringidas. Compare procesos completos con métodos clásicos potentes, no solo subrutinas idealizadas. [R2, R1]

08 Cómo codifica un cúbit el hardware

Los circuitos superconductores emplean osciladores eléctricos no lineales, normalmente transmones, control por microondas y refrigeración a milikelvin. Los iones atrapados utilizan estados atómicos internos confinados electromagnéticamente y puertas ópticas o de microondas. Los átomos neutros se ordenan con pinzas o redes ópticas; las interacciones de Rydberg pueden generar entrelazamiento.

Los cúbits de espín semiconductores usan espines electrónicos o nucleares y prometen fabricación densa; control uniforme e interconexión siguen siendo retos. Las plataformas fotónicas codifican información en luz, por ejemplo modos o polarización; importan pérdidas, fuentes, detección y operaciones entrelazantes. Los centros de color combinan espines sólidos e interfaces ópticas. Los enfoques topológicos buscan codificaciones protegidas, pero requieren verificación independiente y puertas escalables. Contar cúbits no basta para ordenar plataformas. [R3, R8, R21]



Diagrama educativo original 04. Seis enfoques físicos; las cajas son categorías, no una clasificación por rendimiento.

09 El procesador es solo parte de la máquina

Un sistema necesita preparación, direccionamiento, interacciones entrelazantes, lectura, reinicio y calibración. La conectividad determina qué cúbits interactúan directamente. El encaminamiento puede insertar SWAP y aumentar duración y error. La fuga saca al sistema del subespacio previsto de dos niveles; la diafonía hace que una operación perturbe otro cúbit.

Rendimiento de fabricación, encapsulado, alineación óptica, vacío y cableado pueden importar tanto como una fidelidad récord. Los procesadores modulares requieren enlaces rápidos y fiables y protocolos que contemplen intentos de entrelazamiento fallidos. La simulación analógica y el recocido cuántico usan modelos distintos a los circuitos universales; sus cantidades de cúbits y cifras de rendimiento no son directamente intercambiables. [R1, R3, R8]

10 Electrónica de control, óptica y criogenia

En un procesador superconductor, el software clásico solicita pulsos; generadores de onda y componentes de microondas les dan forma; líneas filtradas y atenuadas los llevan al chip frío. Las señales de lectura vuelven mediante amplificación y digitalización. Un decodificador o controlador de realimentación puede necesitar responder dentro de los plazos de corrección de errores.

Un refrigerador de dilución proporciona etapas térmicas; los milikelvin no son el cero absoluto. Más cables añaden calor, ruido y restricciones de integración. CMOS criogénico y multiplexación buscan reducir esa carga, pero disipación y fidelidad deben medirse. Iones y átomos neutros dependen especialmente de láseres, vacío y óptica, no del mismo enfriamiento. Algunos detectores fotónicos sí necesitan criogenia. Los dibujos explican funciones y no son especificaciones de construcción. [R8, R3, R21]

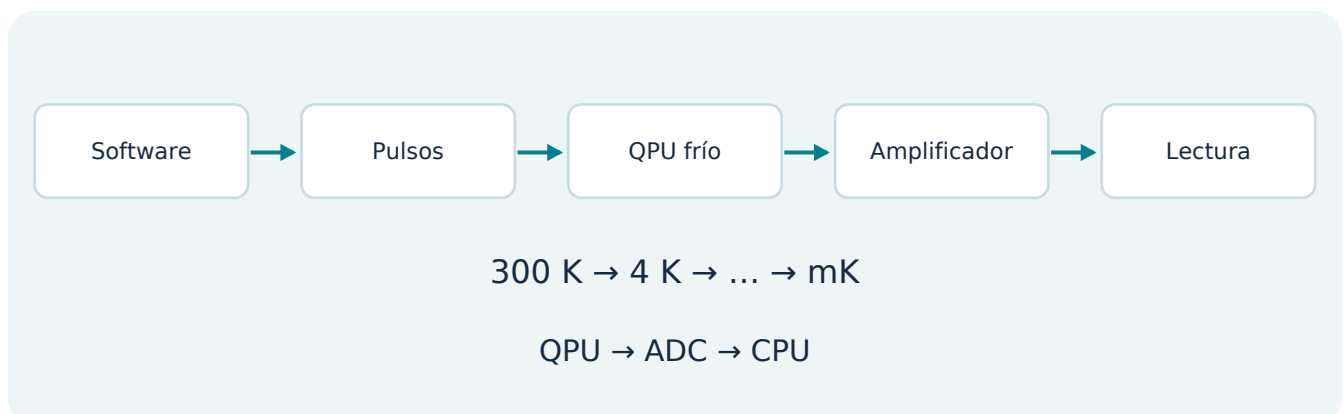


Diagrama educativo original 05. Cadena funcional superconductora; el retorno requiere amplificación y digitalización.

11 Ruido y corrección de errores

La relajación, caracterizada a menudo por T_1 , cambia poblaciones excitadas; el desfase reduce coherencia de fase (T_2). Errores de puertas y medida, pérdidas y perturbaciones correlacionadas actúan de formas distintas. La mitigación estima resultados menos sesgados mediante muestreo o modelos adicionales; generalmente no proporciona tolerancia escalable a fallos.

La corrección cuántica codifica información lógica en varios grados de libertad físicos y mide síndromes sin leer directamente las amplitudes lógicas. Un código de repetición de tres cúbits transforma $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ en $\alpha|000\rangle + \beta|111\rangle$ y corrige una inversión de bit bajo su modelo; no corrige fases arbitrarias. La protección completa requiere códigos más ricos. Las medidas de síndrome también fallan y suelen repetirse. [R4, R12]

12 Cúbits lógicos y tolerancia a fallos

El código de superficie usa comprobaciones locales de paridad en una retícula. La distancia del código determina el menor error lógico indetectable; aumentarla exige más cúbits físicos. Bajo un umbral de ruido adecuado, el error lógico puede disminuir al crecer el código. El umbral depende del modelo, los circuitos y el decodificador, no es una especificación universal.

La tolerancia a fallos también exige puertas lógicas fiables, preparación, medidas y decodificación en tiempo real. Algunas operaciones no Clifford requieren recursos auxiliares costosos, como estados mágicos destilados. Códigos bosónicos y LDPC cuánticos exploran otros compromisos. Una memoria protegida no demuestra un ordenador completo útil. Las estimaciones deben especificar algoritmo, probabilidad objetivo de fallo, ruido físico, duración de ciclo, código y conectividad. [R4, R13]

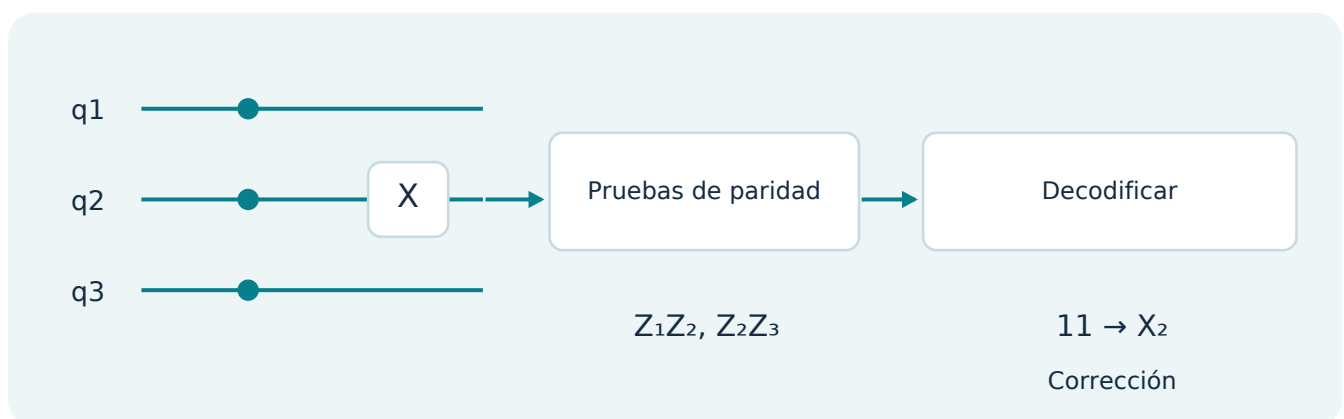


Diagrama educativo original 06. Código de tres cúbits: las paridades identifican una inversión de bit, no errores generales de fase.

13 Las capas de software cuántico

Un flujo comienza con un modelo del problema y una referencia clásica. El algoritmo se convierte en circuito o representación intermedia. La compilación descompone en puertas nativas, elige cúbits físicos y encamina interacciones. Planificación y pulsos conectan programa y dispositivo. Las muestras medidas regresan al procesamiento clásico; los métodos híbridos repiten el ciclo.

Qiskit, Cirq y PennyLane apoyan partes de este flujo; OpenQASM describe programas cuánticos. Las interfaces cambian, por lo que los ejemplos ejecutables deben fijar versiones y citar documentación actual. Un simulador modela estados ideales, canales ruidosos o estructuras especiales. El coste clásico depende de la estructura, no solo del número de cúbits. Conserve código, semillas, decisiones de compilación, calibraciones y resultados brutos para reproducibilidad. [R14, R15]

14 Benchmarks que responden preguntas útiles

Informe por separado cúbits físicos y lógicos. Las métricas incluyen errores de puertas y lectura, coherencia, conectividad, profundidad, rendimiento, error lógico por ciclo y tiempo total hasta la precisión objetivo. El benchmarking aleatorizado estima errores bajo supuestos; la entropía cruzada y las pruebas de aplicación contestan otras preguntas. Un único indicador oculta compromisos.

Una afirmación creíble de ventaja identifica tarea y precisión, incluye preparación, repeticiones y costes clásicos y compara los mejores métodos pertinentes. Verifique resultados o aplique validación estadística adecuada. Distinga una experiencia difícil de simular de una aplicación económicamente útil. Las hojas de ruta comerciales son pronósticos. Un récord de laboratorio en una calibración no es automáticamente capacidad sostenida de producción. [R1, R16, R20]

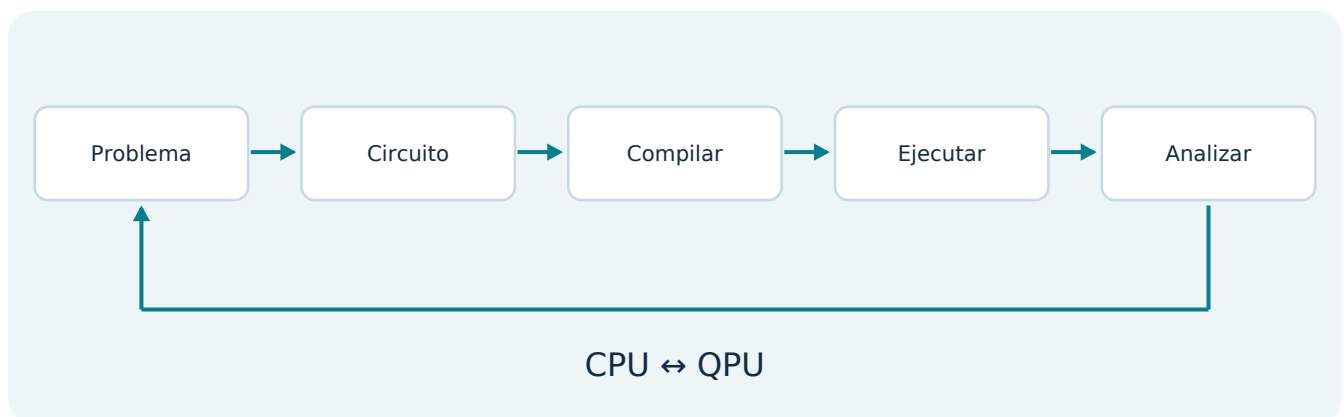


Diagrama educativo original 07. Flujo de software: las medidas vuelven al análisis clásico y pueden iniciar otra ejecución.

15 Comunicaciones e internet cuántico

Los fotones transportan estados por fibra o espacio libre. Las pérdidas crecen con la distancia y un estado desconocido no admite amplificación por copia ordinaria. Los repetidores cuánticos buscan combinar generación de entrelazamiento, memorias e intercambio de entrelazamiento, a veces purificación o corrección, para extender enlaces útiles.

La teleportación transfiere un estado mediante un par entrelazado compartido y dos bits clásicos en el protocolo habitual de cúbit; no mueve materia ni supera la luz. Las redes podrían conectar procesadores, distribuir claves o mejorar medidas colectivas. Los enlaces y pequeñas redes demostrados importan, pero un internet cuántico universal y escalable sigue siendo un objetivo. Las redes de claves con nodos de confianza y las de entrelazamiento con repetidores ofrecen seguridad y funciones distintas. [R3]

16 Sensores y medición precisa

Los sensores cuánticos convierten un campo, aceleración o frecuencia en cambios de un estado controlado. En Ramsey, un primer pulso crea coherencia, la evolución libre acumula fase dependiente de la señal y un segundo pulso convierte fase en población medible. Relojes atómicos, interferómetros atómicos y magnetómetros de espín aplican ideas relacionadas.

Para sondas ideales independientes, la incertidumbre estadística suele disminuir como $1/\sqrt{N}$. Recursos entrelazados pueden mejorar el escalado bajo supuestos adecuados, pero ruido, pérdidas, preparación y lectura pueden borrar el beneficio. Evalúe sensibilidad, ancho de banda, resolución espacial, deriva y entorno conjuntamente. Algunas tecnologías son maduras; muchas aplicaciones biomédicas o distribuidas siguen siendo investigación y no dispositivos diagnósticos validados. [R5, R17]

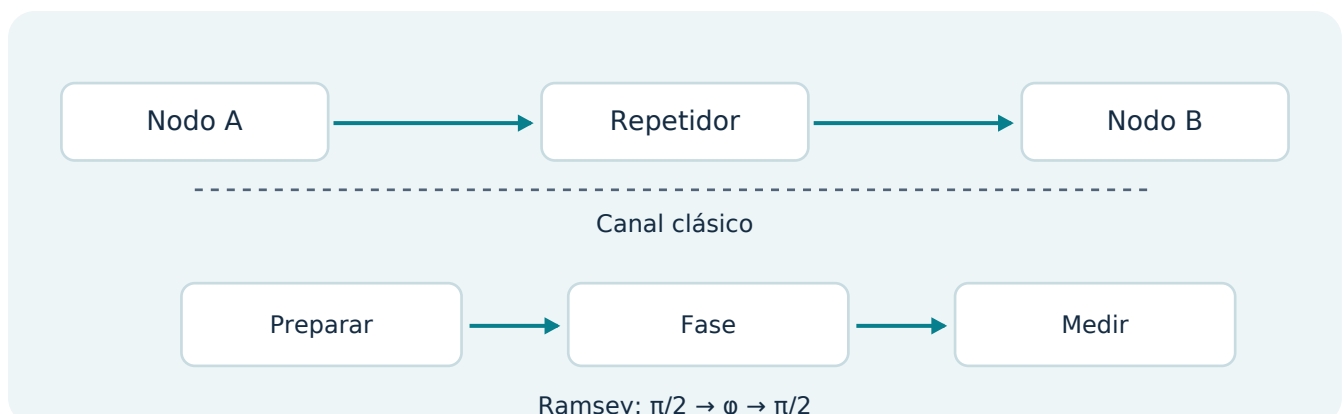


Diagrama educativo original 08. Los enlaces cuánticos necesitan coordinación clásica. Ramsey convierte fase en señal.

17 Criptografía poscuántica frente a QKD

La criptografía poscuántica (PQC) usa algoritmos clásicos diseñados para resistir ataques clásicos y cuánticos conocidos. Funciona en infraestructura clásica. FIPS 203 de NIST, de 2024, especifica ML-KEM para establecer claves; FIPS 204 y 205 especifican firmas ML-DSA y SLH-DSA. Son funciones distintas, no tres métodos intercambiables de cifrado.

La distribución cuántica de claves (QKD) usa señales cuánticas y un canal clásico autenticado bajo supuestos explícitos. No autentica identidades por sí sola, no protege terminales comprometidos ni elimina ataques de implementación. Migrar a PQC exige inventario criptográfico, pruebas de compatibilidad y software mantenido; esta guía no es una especificación de despliegue. Los secretos duraderos motivan el riesgo «recoger ahora, descifrar después». Consulte normas, erratas y orientación vigentes antes de implementar. [R6, R7, R9, R18]

18 Evidencia en la revisión de 2026

Los experimentos publicados establecen procesadores controlables, enlaces cuánticos y progresos en suprimir errores lógicos. El trabajo de Google sobre códigos de superficie, publicado en línea en diciembre de 2024 y en Nature en 2025, informa comportamiento bajo el umbral en un entorno concreto. No demuestra aplicaciones arbitrarias tolerantes a fallos a gran escala. El estudio de control de espín con CMOS a milikelvin de 2025 aborda un obstáculo específico de integración. [R13, R8]

La Quantum Benchmarking Initiative de DARPA investiga si el cálculo industrialmente útil es posible para 2033; la fecha es un objetivo, no una garantía. Ningún ranking cubre todas las plataformas y aplicaciones. Esta edición selecciona hitos verificados en lugar de una tabla exhaustiva de récords; las afirmaciones deben leerse con fecha, supuestos y benchmark. [R16]

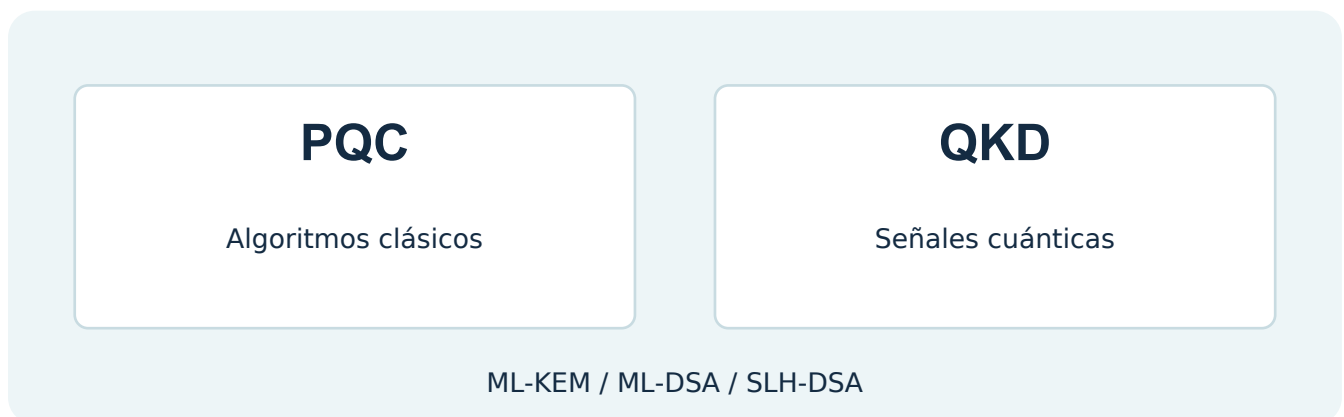


Diagrama educativo original 09. PQC usa hardware clásico; QKD exige señales cuánticas y comunicación clásica autenticada.

19 Futuro condicional, no inevitable

Las líneas principales son operaciones lógicas más fiables, códigos menos costosos, mejores decodificadores, enlaces modulares, fabricación y control integrados. Sistemas heterogéneos podrían asignar memoria, cálculo y comunicación a plataformas diferentes. DARPA HARQ estudia esa integración, sin demostrar superioridad universal de esas máquinas. [R19]

Aprendizaje cuántico, propuestas neuromórficas, codificaciones topológicas y detección distribuida siguen activos con distintos grados de evidencia. Aceleración exponencial universal, respuestas paralelas ilimitadas y tecnología más allá de la física cuántica carecen de respaldo. Una hoja de ruta útil define hitos comprobables: precisión lógica, duración estable, tasa de éxito de enlaces o beneficio completo. Las proyecciones necesitan supuestos y revisión al cambiar la evidencia. [R1, R2, R16]

20 Ruta de aprendizaje y ejercicios

Empiece con vectores, números complejos, probabilidad y circuitos pequeños. Calcule H, X y CNOT en papel y luego en simulador ideal. Añada ruido sencillo y compare distribuciones. Estudie una plataforma, después extracción de síndromes y operaciones lógicas. El manifiesto lleva desde introducciones hasta revisiones y experimentos originales.

Ejercicio 1: si $\alpha = \sqrt{3}/2$ y $\beta = 1/2$, ¿cuánto vale $P(1)$? Respuesta: $1/4$. Ejercicio 2: ¿por qué los recuentos 00/11 no prueban entrelazamiento? Una mezcla clásica los reproduce. Ejercicio 3: para 1.000 ensayos independientes con $p = 1/2$, la desviación estándar del recuento es $\sqrt{(1000 \times 1/2 \times 1/2)}$, aproximadamente 15,8. Ejercicio 4: ¿el código de repetición corrige todo error? El de tres cúbits para inversión de bit no corrige errores generales de fase.

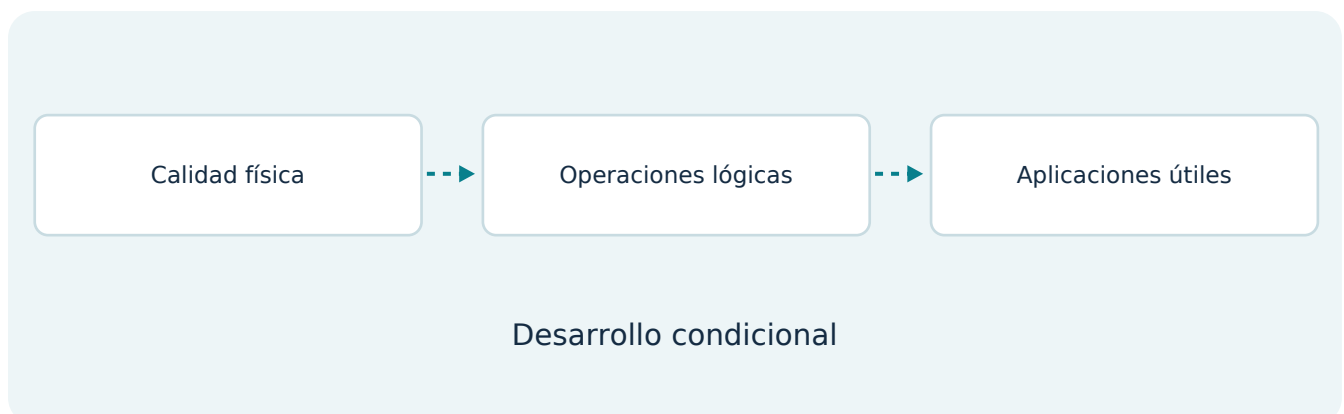


Diagrama educativo original 10. Los hitos son condicionales; las flechas no prometen fechas de entrega.

21 Uso responsable de la biblioteca

Cada entrada externa registra autor, tema, fuente, licencia, fecha de verificación y recomendación. Solo se incluyen copias locales cuando las condiciones comprobadas permiten este uso. Acceso gratuito sin permiso de redistribución significa solo enlace. No se presupone que NonCommercial sea compatible con un sitio empresarial. Los originales externos permanecen intactos y no se presentan como publicaciones de LIGHT BRIDGE GROUP.

La guía y sus figuras conceptuales son material original creado para LIGHT BRIDGE GROUP. Las referencias respaldan hechos, sin implicar el aval de las instituciones citadas. Los títulos bibliográficos conservan su idioma original para facilitar su búsqueda. Revise periódicamente enlaces y erratas, especialmente los estándares criptográficos.

01 → 06 → 11 → 17

R10 Introduction to Classical and Quantum Computing, 1st edition, 4th printing

R1 Quantum Computing in the NISQ era and beyond

R2 Quantum algorithms: an overview

R4 A Short Introduction to Quantum Error Correction

R3 Quantum networks with neutral atom processing nodes

R5 Quantum sensing

R21 A Quantum Engineer's Guide to Superconducting Qubits

R6 FIPS 203: Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard

Bibliografía y lecturas adicionales

R1 John Preskill / Caltech (2018). Quantum Computing in the NISQ era and beyond.

<https://quantum-journal.org/papers/q-2018-08-06-79/>

R2 Ashley Montanaro / University of Bristol (2016). Quantum algorithms: an overview.

<https://www.nature.com/articles/npjqi201523>

R3 Jacob P. Covey; Harald Weinfurter; Hannes Bernien (2023). Quantum networks with neutral atom processing nodes.

<https://www.nature.com/articles/s41534-023-00759-9>

R4 Thiago Lucena de Macedo Guedes (2026). A Short Introduction to Quantum Error Correction.

<https://link.springer.com/article/10.1007/s13538-026-02007-9>

R5 C. L. Degen; F. Reinhard; P. Cappellaro (2017). Quantum sensing.

<https://arxiv.org/abs/1611.02427>

R6 National Institute of Standards and Technology (NIST) (2024). FIPS 203: Module-Lattice-Based Key-Encapsulation Mechanism Standard.

<https://csrc.nist.gov/pubs/fips/203/final>

R7 National Institute of Standards and Technology (NIST) (2024). FIPS 204: Module-Lattice-Based Digital Signature Standard.

<https://csrc.nist.gov/pubs/fips/204/final>

R8 Bartee, Samuel K. et al. (2025). Spin-qubit control with a milli-kelvin CMOS chip.

<https://www.nature.com/articles/s41586-025-09157-x>

R9 National Institute of Standards and Technology (NIST) (2024). FIPS 205: Stateless Hash-Based Digital Signature Standard.

<https://csrc.nist.gov/pubs/fips/205/final>

R10 Thomas G. Wong / Creighton University (2023). Introduction to Classical and Quantum Computing, 1st edition, 4th printing.

<https://www.thomaswong.net/>

R11 John Preskill / Caltech (updated chapters). Lecture Notes for Physics 219: Quantum Computation.

<https://www.preskill.caltech.edu/ph219/index.html>

R12 Joschka Roffe (2019). Quantum Error Correction: An Introductory Guide.

<https://arxiv.org/abs/1907.11157>

R13 Google Quantum AI and Collaborators (2024 online / 2025 volume). Quantum error correction below the surface code threshold.

<https://www.nature.com/articles/s41586-024-08449-y>

R14 IBM Quantum (2026). IBM Quantum documentation and learning.

<https://quantum.cloud.ibm.com/docs/en/guides>

R15 OpenQASM contributors (2026). OpenQASM Live Specification.

<https://openqasm.com/>

R16 DARPA (2026). Quantum Benchmarking Initiative (QBI).

<https://www.darpa.mil/research/programs/quantum-benchmarking-initiative>

R17 Daniele Faccio / University of Glasgow (2024). The future of quantum technologies for brain imaging.

<https://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.3002824>

R18 Valerio Scarani; Helle Bechmann-Pasquinucci; Nicolas J. Cerf; Miloslav Dusek; Norbert Lutkenhaus; Momtchil Peev (2009). The Security of Practical Quantum Key Distribution.

<https://arxiv.org/abs/0802.4155>

R19 DARPA (2025-2026). Heterogeneous Architectures for Quantum (HARQ).

<https://www.darpa.mil/research/programs/heterogeneous-architectures-for-quantum>

R20 Akel Hashim et al. (2025). Practical Introduction to Benchmarking and Characterization of Quantum Computers.

<https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.6.030202>

R21 Philip Krantz; Morten Kjaergaard; Fei Yan; Terry P. Orlando; Simon Gustavsson; William D. Oliver (2019). A Quantum Engineer's Guide to Superconducting Qubits.

<https://arxiv.org/abs/1904.06560>

Documento creado por LIGHT BRIDGE GROUP | lbgroup.rs. Versión 1.0, 26 de septiembre de 2026. Texto original, traducciones y diagramas preparados para LIGHT BRIDGE GROUP. Esta edición no ha pasado una revisión científica independiente. Las publicaciones externas conservan su autoría y sus propias licencias. Las ediciones inglesa y serbia tienen el mismo alcance; las traducciones mantienen las distinciones científicas.