



Análisis del Ecosistema Internacional de las Tecnologías Cuánticas

**Un enfoque en perspectiva de impacto y de desarrollo
tecnológico de la computación cuántica**

QUORUM

By QCentroid

Index

Resumen ejecutivo	2
Justificación del enfoque analítico	4
1. Introducción a las tecnologías cuánticas	5
1.1 Comunicación cuántica	5
1.2 Computación cuántica	6
1.3 Sensórica cuántica	8
2. Beneficios socioeconómicos de las tecnologías cuánticas	9
2.1 Aplicaciones comerciales	9
2.1.1 Medicina y salud	9
2.1.2 Ciencia de materiales y manufactura avanzada	10
2.1.3 Energía e industrias extractivas	10
2.1.4 Química	11
2.1.5 Finanzas	12
2.1.6 Transporte y logística	12
2.1.7 Comunicaciones seguras	13
2.2 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible	14
2.2.1 ODS 3: Salud y bienestar & ODS 7: Energía asequible y no contaminante	14
2.2.2 ODS 2: Hambre cero	14
2.2.3 ODS 6: Agua limpia y saneamiento	14
2.2.4 ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles	15
2.2.5 ODS 13: Acción por el clima	16
3. Innovaciones y desarrollos tecnológicos en computación cuántica	17
3.1 Trayectorias tecnológicas y señales de maduración en la computación cuántica	17
3.2 Marco de análisis de las hojas de ruta en computación cuántica: una perspectiva full stack	23

Resumen ejecutivo

El ecosistema internacional de las tecnologías cuánticas está entrando en una fase de transición desde la investigación avanzada hacia una primera etapa de industrialización estratégica. Este cambio no implica una madurez homogénea de todas sus ramas, sino la consolidación progresiva de tres dominios con lógicas distintas: la comunicación cuántica, la computación cuántica y la sensórica cuántica. La comunicación cuántica ofrece ventajas singulares en seguridad, aunque su despliegue seguirá previsiblemente limitado a aplicaciones de alto valor estratégico por sus restricciones de coste, distancia y capacidad. La sensórica cuántica muestra un horizonte de adopción más cercano en nichos donde la precisión extrema aporta valor diferencial. La computación cuántica, por su parte, concentra la mayor atención geopolítica e industrial por su potencial transformador, aunque su utilidad seguirá siendo selectiva y vinculada a clases concretas de problemas, especialmente en simulación, optimización y ciertos ámbitos criptográficos.

Desde una perspectiva de impacto, las tecnologías cuánticas presentan un potencial relevante para generar beneficios socioeconómicos en sectores como salud, ciencia de materiales, energía, química, finanzas, transporte, logística y comunicaciones seguras. Su promesa principal no reside en sustituir de forma generalizada a las tecnologías existentes, sino en ampliar las capacidades disponibles allí donde los métodos clásicos encuentran límites estructurales. En ese sentido, pueden contribuir tanto a nuevas ventajas competitivas industriales como a objetivos públicos más amplios, incluidos varios Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente en salud, energía, agricultura, agua, resiliencia urbana y acción climática. No obstante, este potencial debe leerse con cautela: buena parte de las aplicaciones continúan en fases exploratorias o de prueba de concepto, y su impacto real dependerá de la capacidad de traducir avances científicos en soluciones escalables, económicamente viables y adaptadas a necesidades concretas.

En computación cuántica, la señal más clara de maduración tecnológica es el desplazamiento del foco desde el número de qubits físicos hacia la calidad del cómputo lógico, la corrección de errores y la credibilidad de las hojas de ruta hacia sistemas tolerantes a fallos. Esto indica que la competencia internacional ya no puede interpretarse como una simple carrera por escalar hardware, sino como un proceso de selección tecnológica mucho más complejo, en el que interactúan modalidad física, arquitectura, control, software, corrección de errores y capacidad

de integración. En consecuencia, el análisis del ecosistema internacional exige un enfoque full stack que permita comparar trayectorias tecnológicas heterogéneas, distinguir entre progreso visible y escalabilidad real, e identificar con mayor precisión dónde se concentran los principales cuellos de botella y las oportunidades de liderazgo industrial.

Justificación del enfoque analítico

Este informe adopta un enfoque analítico centrado en impacto, trayectorias de desarrollo tecnológico y lógica de maduración industrial porque esa es la perspectiva desde la que QCentroid observa el sector y participa en él. No se parte, por tanto, de una lectura puramente académica o descriptiva de las tecnologías cuánticas, sino de una visión orientada a entender qué capacidades tienen mayor probabilidad de traducirse en adopción real, qué cuellos de botella limitan su escalado y qué señales permiten distinguir entre promesa tecnológica, utilidad industrial y valor estratégico. Esta aproximación responde también a la necesidad de evaluar el ecosistema cuántico no solo por sus avances científicos, sino por su capacidad de generar aplicaciones concretas, articular cadenas de valor, atraer inversión y contribuir a objetivos económicos e institucionales más amplios.

Este encuadre está además respaldado por la experiencia acumulada por QCentroid en el análisis del sector y, de forma particular, por su participación en los debates europeos recientes sobre política cuántica e industrialización. El enfoque se alinea con las recomendaciones formuladas por el European Quantum Industry Consortium (QuIC) para la estrategia cuántica de la Unión Europea de 2025, proceso en el que participaron el cofundador y CEO de QCentroid, Carlos Kuchkovsky, y su Chief Business Officer, Gregory Shutko. A ello se suma la presencia pública de Carlos Kuchkovsky en foros de referencia sobre adopción e impacto empresarial de la computación cuántica, como el webinar de la Fundación Innovación Bankinter sobre computación cuántica en la empresa y su participación en la agenda de GITEX Europe 2025.

Esa implicación aporta una base especialmente relevante para priorizar en el análisis cuestiones como la transferencia al mercado, la construcción de capacidades industriales, la articulación del ecosistema y la lectura comparada de hojas de ruta tecnológicas. En este sentido, los ejes seleccionados no responden a una elección arbitraria, sino a una posición informada desde dentro del ecosistema europeo, atenta tanto a la evolución técnica de la computación cuántica como a sus implicaciones estratégicas para competitividad, soberanía tecnológica y desarrollo económico.

1. Introducción a las tecnologías cuánticas

Las tecnologías cuánticas no constituyen una única capacidad homogénea, sino un conjunto de campos con lógicas, ventajas y limitaciones diferenciadas. Desde una perspectiva funcional, pueden distinguirse tres dominios principales: comunicación cuántica, computación (y simulación) cuántica y sensorica cuántica. Cada uno ofrece propuestas de valor específicas y, al mismo tiempo, enfrenta restricciones técnicas que acotan su aplicabilidad real.

1.1 Comunicación cuántica

La comunicación cuántica agrupa aplicaciones con dos ventajas principales: seguridad y capacidad. En la práctica, las implementaciones actuales se concentran sobre todo en sistemas de distribución cuántica de claves o QKD, mientras que otras aplicaciones – como la teleportación cuántica, las redes distribuidas de computación cuántica o los arrays de sensores cuánticos – siguen en fases más experimentales.

La relevancia de QKD se entiende en el contexto de la seguridad de las comunicaciones. Los sistemas clásicos dependen de algoritmos cuya seguridad se basa en la dificultad computacional de ciertos problemas matemáticos, como la factorización de enteros grandes o el cálculo de logaritmos discretos. La eventual llegada de ordenadores cuánticos de gran escala pondría en cuestión este supuesto. Frente a ello, la criptografía poscuántica o PQC se perfila como la principal defensa a gran escala, ya que puede desplegarse sobre infraestructuras existentes y ofrece compatibilidad, escalabilidad y menores costes de adopción.

QKD ofrece una lógica distinta. Su seguridad no descansa en la dificultad matemática, sino en leyes físicas: cualquier intento de interceptar o medir un canal cuántico altera necesariamente el estado transmitido, revelando la posibilidad de espionaje. Sin embargo, QKD no sustituye por sí sola a la criptografía: solo permite acordar secretos de forma segura, como claves de cifrado. La protección efectiva de los datos sigue requiriendo algoritmos clásicos, ya sean teóricamente seguros o computacionalmente seguros.

Su aplicación práctica está limitada por restricciones importantes de distancia, ancho de banda y coste. Mientras las redes clásicas transmiten terabits por segundo a escala continental, las transmisiones cuánticas suelen restringirse a cientos de kilómetros en fibra o a miles vía satélite, sin repetidores cuánticos plenamente funcionales. Además, las tasas de datos son

mucho menores y algunos equipos requieren entornos criogénicos especializados. Por ello, la comunicación cuántica resulta hoy adecuada sobre todo para usos altamente especializados en los que la garantía física de seguridad compensa estas limitaciones, como comunicaciones militares, canales diplomáticos, secretos de Estado o transacciones entre grandes instituciones financieras. Para la mayoría de las comunicaciones cotidianas, la vía más realista seguirá siendo la integración de PQC en sistemas clásicos.

1.2 Computación cuántica

La computación cuántica propone una forma de procesamiento distinta de la computación clásica. Los superordenadores y aceleradores de IA actuales alcanzan un rendimiento extraordinario mediante paralelismo clásico: miles o millones de núcleos procesan distintas partes de un problema de forma simultánea. Sin embargo, cada núcleo opera siempre sobre un valor definido en cada instante. La computación cuántica introduce una lógica diferente, basada en superposición, entrelazamiento e interferencia.

Gracias al fenómeno de la *superposición*, un qubit puede representar simultáneamente 0, 1 o combinaciones intermedias hasta el momento de la medición. El *entrelazamiento* permite además correlacionar qubits de forma no clásica, lo que abre la posibilidad de explorar espacios de solución de manera coordinada. Esto permite representar un número de posibilidades exponencialmente superior al de sistemas clásicos equivalentes.

No obstante, esta ventaja no es universal. La computación cuántica solo ofrece una superioridad potencial en ciertos tipos de problema: factorización de enteros grandes, algunos problemas complejos de optimización, búsqueda en espacios no estructurados, simulación de sistemas cuánticos y ciertos problemas matemáticos especializados. No debe entenderse, por tanto, como una versión generalizada y superior del ordenador clásico, sino como un tipo distinto de máquina. Para la mayoría de las tareas habituales – como entrenamiento de modelos de IA, procesamiento de imágenes o simulaciones generales – la computación clásica seguirá siendo más práctica, fiable y eficiente.

Esta distinción es especialmente visible en criptografía. A día de hoy, romper RSA-2048 sigue estando fuera del alcance tanto de los superordenadores convencionales como de los dispositivos cuánticos NISQ actuales, que cuentan con unos pocos cientos de qubits. Sin embargo, algunas estimaciones recientes sugieren que, si en torno a 2040 existieran máquinas con alrededor de un millón de qubits físicos y corrección de errores efectiva, podrían romper

RSA-2048 en menos de una semana. En contraste, incluso con supercomputadores zettascale, esta tarea seguiría requiriendo miles de años con los mejores algoritmos clásicos conocidos. La implicación es clara: la ventaja cuántica puede ser decisiva, pero solo en dominios muy concretos.

Simulación cuántica

La simulación cuántica constituye una subárea específica y especialmente relevante dentro de la computación cuántica. Su objetivo es abordar sistemas que los métodos clásicos no pueden representar eficientemente, en particular ciertos sistemas cuánticos de muchos cuerpos. Los ordenadores clásicos pueden simular con éxito una gran variedad de fenómenos físicos y químicos, pero encuentran barreras fundamentales cuando las correlaciones cuánticas crecen de forma exponencial con el tamaño del sistema.

El problema central es de escala. La simulación de un sistema cuántico requiere seguir un número de estados que se duplica con cada partícula añadida. Esto hace que algunos sistemas – como materiales con electrones fuertemente correlacionados o ciertos catalizadores complejos – sean intratables incluso para clústeres HPC avanzados. En estos casos, la dificultad no es meramente de potencia disponible, sino de crecimiento exponencial de los recursos necesarios.

La respuesta a este límite es la simulación cuántica, que puede adoptar dos formas: simulación analógica, basada en sistemas cuánticos controlados diseñados para emular materiales o interacciones concretas, y simulación digital, basada en circuitos cuánticos programables. Su ventaja fundamental reside en que representan de manera natural las correlaciones cuánticas que los ordenadores clásicos deben aproximar con estructuras de datos descomunales.

Aun así, esta capacidad sigue estando fuertemente condicionada por restricciones prácticas. Los dispositivos actuales son ruidosos, de escala limitada y requieren un gran número de mediciones repetidas para extraer resultados útiles. Por ello, su uso sigue concentrado en demostraciones de concepto más que en resolución industrial de problemas. Su mayor potencial se sitúa en clases específicas de problema: materiales cuánticos fuertemente correlacionados, catalizadores complejos y sistemas donde los efectos cuánticos dominan el comportamiento macroscópico. Entre las aplicaciones más citadas figuran la modelización de superconductores no convencionales, la comprensión de mecanismos de transferencia

energética en fotosíntesis y la exploración de nuevas fases cuánticas de la materia. Fuera de estos dominios, la simulación clásica continúa siendo superior en coste, robustez y rendimiento.

1.3 Sensórica cuántica

La sensórica cuántica representa otra línea diferenciada. Los sensores clásicos logran altas prestaciones mediante ingeniería avanzada, materiales de precisión y procesamiento sofisticado de señales. Sin embargo, su rendimiento está limitado por fuentes de ruido, fluctuaciones térmicas, deriva de calibración y, en última instancia, por el límite cuántico estándar, que fija el nivel mínimo de incertidumbre en ciertas mediciones.

Los sensores cuánticos explotan precisamente fenómenos como la superposición y el entrelazamiento para superar parte de estas limitaciones. El entrelazamiento, por ejemplo, puede permitir cancelar fuentes comunes de ruido y amplificar la señal relevante, haciendo posible sensibilidades superiores a las alcanzables con técnicas clásicas. En determinadas aplicaciones, esta mejora puede ser muy significativa: algunos magnetómetros cuánticos pueden detectar campos magnéticos extremadamente débiles, y los relojes atómicos cuánticos alcanzan niveles de precisión extraordinarios.

Sin embargo, esta ventaja tampoco es general. La sensórica cuántica resulta especialmente valiosa cuando se requieren mediciones extremas o en entornos donde los sensores clásicos fallan por completo: detección de ondas gravitacionales, medición no invasiva de actividad neuronal, navegación en ausencia de GPS o búsqueda de materia oscura. En cambio, para la mayor parte de las aplicaciones cotidianas – como medir temperatura en edificios, velocidad en vehículos o movimiento en dispositivos móviles – los sensores clásicos siguen siendo más robustos, baratos y adecuados.

2. Beneficios socioeconómicos de las tecnologías cuánticas

En las economías digitales, los datos son un activo central para la innovación, la competitividad y la prosperidad económica y social. A medida que las tecnologías cuánticas maduren, sus capacidades de captación, procesamiento y transmisión de información podrán traducirse en mejoras de productividad, nuevas ventajas competitivas e impacto social. Este apartado presenta una tipología sectorial de aplicaciones comerciales potenciales asociadas a los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas basado en la clasificación del report de la OECD *A quantum technologies policy primer* (2024), y las reomendaciones dadas por European Quantum Industry Consortium (QuIC) para la estrategia cuántica de la Unión Europea (2025), trabajo en el que participó el cofundador y CEO de QCentroid Carlos Kuchkovsky.

2.1 Aplicaciones comerciales

2.1.1 Medicina y salud

En medicina y salud, las aplicaciones se concentran en dos grandes ámbitos: sensórica cuántica y computación cuántica.

Por un lado, la sensórica cuántica ya ha demostrado utilidad práctica mediante tecnologías como la resonancia magnética (MRI) y los escáneres PET. La siguiente generación de sensores podría mejorar la resolución de imagen, la sensibilidad diagnóstica y la capacidad de detectar procesos biológicos hoy difíciles de observar. Sus aplicaciones más relevantes incluyen el seguimiento terapéutico en tiempo real a escala celular, la detección temprana y el seguimiento más preciso de patologías complejas como Alzheimer y Parkinson, y la monitorización electromagnética de órganos para apoyar el tratamiento de trastornos neurológicos y cardíacos. En oncología, estos sensores también podrían mejorar la delimitación de márgenes tumorales, favoreciendo intervenciones más focalizadas y con menor afectación de tejido sano. A ello se suma el desarrollo de biosensores portátiles capaces de registrar de forma continua y no invasiva constantes vitales y marcadores bioquímicos, con aplicaciones potenciales en seguimiento clínico, desarrollo farmacológico y medicina personalizada.

Por otro lado, la computación cuántica está ganando relevancia como línea de exploración biomédica. Sus aplicaciones más citadas incluyen la secuenciación rápida de ADN, el diseño de tratamientos adaptados al perfil genético del paciente y la simulación de moléculas e interacciones químicas complejas. Su interés radica, sobre todo, en el potencial para acelerar el descubrimiento de fármacos, mejorar el diagnóstico y anticipar la respuesta terapéutica.

2.1.2 Ciencia de materiales y manufactura avanzada

En este ámbito, las aplicaciones pueden distinguirse entre inspección y control de materiales, diseño computacional de nuevos materiales y optimización de procesos productivos.

En primer lugar, la sensórica cuántica puede detectar defectos mínimos en materiales con una sensibilidad superior a la de muchas técnicas convencionales. Esto permite identificar fatiga material antes de que aparezcan grietas u otros signos visibles de deterioro, lo que resulta especialmente valioso en sectores donde la seguridad es crítica, como el aeroespacial o la automoción. Además, estos sensores podrían reducir tiempos de inspección y ensayo, aumentando la eficiencia de procesos industriales. También se están explorando para optimizar la disipación térmica y la gestión del calor en materiales electrónicos, un reto central en aplicaciones de alta exigencia energética y computacional.

En segundo lugar, la computación cuántica podría permitir la simulación precisa de materiales complejos. Esto facilitaría el diseño de materiales con propiedades específicas – como resistencia, conductividad o comportamiento magnético – y podría impulsar desarrollos como superconductores de alta temperatura, con implicaciones para la eficiencia de redes eléctricas y dispositivos electrónicos. También se investiga su aplicación en materiales avanzados como el grafeno y distintas heteroestructuras.

En tercer lugar, la computación cuántica podría mejorar la identificación y predicción de fallos raros en procesos industriales, especialmente en sectores como la fabricación de semiconductores, donde los errores son poco frecuentes pero muy costosos. Su valor potencial radica en reducir interrupciones y mejorar la estabilidad de la producción.

2.1.3 Energía e industrias extractivas

Las aplicaciones en este ámbito se agrupan en tres frentes: monitorización de infraestructuras energéticas, exploración y extracción de recursos, y optimización de sistemas energéticos.

En infraestructuras energéticas, las tecnologías de sensado cuántico pueden mejorar de forma significativa la eficiencia y la seguridad operativa. Su principal valor reside en la detección temprana de fallos en equipos, lo que permitiría avanzar hacia modelos de mantenimiento predictivo y reducir costes. En energía nuclear, además, podrían facilitar la detección precoz de fugas de radiación y la supervisión remota de instalaciones.

En industrias extractivas, la sensórica cuántica promete mejoras en fiabilidad, eficiencia y sostenibilidad ambiental. Instrumentos como gravímetros y magnetómetros pueden localizar reservas de petróleo, gas o minerales y, potencialmente, estimar con mayor precisión su tamaño, forma y profundidad. Esto podría reducir costes de exploración, optimizar la extracción y disminuir la necesidad de perforaciones extensivas, con beneficios ambientales asociados.

Por último, la computación cuántica también podría contribuir al desarrollo de tecnologías energéticas más eficientes y sostenibles. La simulación cuántica podría acelerar el descubrimiento de materiales y procesos con mejor rendimiento energético, mientras que el aprendizaje automático cuántico podría apoyar la captura de carbono mediante la identificación de materiales con mayor capacidad de absorción de CO₂. Los algoritmos de optimización, por su parte, podrían mejorar la conexión entre generación y consumo, la previsión de demanda y la gestión de redes eléctricas y sistemas renovables.

2.1.4 Química

La química constituye un ámbito específico de aplicación porque la principal promesa de la computación cuántica es la simulación detallada de moléculas y reacciones químicas. Su relevancia no reside solo en la mejora incremental de capacidades existentes, sino en la posibilidad de abordar problemas que hoy son prohibitivos para la computación clásica.

Uno de los casos más citados es la fijación del nitrógeno por la enzima nitrogenasa, presente en ciertas bacterias y capaz de producir amoníaco en condiciones ambientales. Este caso es especialmente importante porque la producción convencional de amoníaco es altamente intensiva en energía: representa aproximadamente el 2% del consumo final global y depende sobre todo de combustibles fósiles. Su huella de CO₂ equivale al conjunto de emisiones del sector energético sudafricano. Por ello, comprender y replicar mecanismos análogos a la nitrogenasa podría abrir la puerta a métodos de producción de fertilizantes mucho más limpios. Algunas estimaciones sugieren que este proceso podría simularse con cuatro millones de qubits físicos y cuatro días de ejecución, bajo supuestos técnicos exigentes, incluidas tasas de

error del 0,1% o inferiores. Más allá de este caso, las simulaciones cuánticas también podrían mejorar el estudio de interacciones entre moléculas y luz, con implicaciones para la comprensión de procesos biológicos como la fotosíntesis o la visión.

2.1.5 Finanzas

En finanzas, las aplicaciones pueden dividirse entre infraestructuras de precisión temporal y usos computacionales.

En primer lugar, algunas tecnologías cuánticas ya tienen presencia indirecta en los mercados financieros. Los relojes atómicos son esenciales para garantizar una sincronización temporal precisa en operaciones de alta frecuencia. Integrados en los satélites GPS, permiten generar marcas temporales de alta precisión para transacciones financieras. Esta capacidad refuerza la transparencia del mercado, facilita el cumplimiento regulatorio y reduce riesgos asociados a manipulación y volatilidad extrema.

En segundo lugar, la computación cuántica podría abrir múltiples aplicaciones en finanzas. Entre las más citadas se encuentran el análisis de riesgo, el credit scoring, la optimización de carteras y la mejora de procesos de liquidación de transacciones. En particular, los annealers cuánticos se están explorando para problemas como la predicción de crashes, la identificación de trayectorias óptimas de trading, la detección de oportunidades de arbitraje, la selección de variables en modelos de crédito y la gestión de reservas en divisas.

2.1.6 Transporte y logística

Las aplicaciones en transporte y logística se articulan en torno a dos grandes ejes: mantenimiento y diseño de infraestructuras físicas, y optimización de operaciones.

En el primer eje, la sensórica cuántica podría contribuir al desarrollo del vehículo eléctrico mediante una evaluación más precisa del estado de salud de las baterías. Esto permitiría comprender mejor los procesos de degradación, mejorar el diagnóstico y diseñar estrategias de mantenimiento más eficaces, alargando su vida útil y aumentando su fiabilidad. Estas capacidades también podrían ser útiles en grandes proyectos de ingeniería civil, como túneles o líneas ferroviarias, gracias a una caracterización más precisa del terreno.

En el segundo eje, la computación cuántica podría mejorar el diseño de baterías de nueva generación y supercondensadores desde la ciencia de materiales, pero su aplicación más

directa en este sector se encuentra en la optimización de operaciones logísticas. Entre los casos de uso más citados figuran la optimización de rutas multimodales, la planificación de horarios y el diseño integral de operaciones, incorporando variables como demanda, flota, tripulación, vehículos y carga. Su valor potencial radica en gestionar problemas de gran escala y elevada complejidad con mayor eficiencia.

2.1.7 Comunicaciones seguras

El sector de las comunicaciones constituye un ámbito diferenciado porque aquí la principal promesa no es la productividad operativa, sino la seguridad de la información. Las redes cuánticas tienen potencial para reforzar la seguridad de las comunicaciones en determinados sectores, especialmente en la protección de centros de datos y en la transferencia segura de información en finanzas, banca, mercados bursátiles y salud.

Ya existen iniciativas relevantes en este ámbito. En Londres, BT y Toshiba están desarrollando una red metropolitana comercial cuánticamente segura, probada por empresas como HSBC y EY para transacciones financieras y comunicaciones cifradas. También se han realizado demostraciones para proteger transferencias entre centros de datos de Siemens en los Países Bajos y para servicios cloud en compañías como Acronis y Alibaba en China. En Estados Unidos, el Oak Ridge National Laboratory ha demostrado la viabilidad del uso de QKD para reforzar la seguridad de infraestructuras críticas como la red eléctrica.

En Europa, la Comisión Europea impulsa la Infraestructura Europea de Comunicación Cuántica (EuroQCI), desarrollada junto con los 27 Estados miembros y la Agencia Espacial Europea. Esta combinará un segmento terrestre basado en fibra óptica y un segmento espacial apoyado en satélites. Los proyectos nacionales servirán de base para esta red. En España, EuroQCI Spain prevé una arquitectura nacional de comunicaciones cuánticas con nodos iniciales en Madrid y Barcelona, sistemas QKD y una orientación inicial hacia usos públicos, con posible extensión futura al sector privado.

2.2 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

2.2.1 ODS 3: Salud y bienestar & ODS 7: Energía asequible y no contaminante

Varias de las aplicaciones comerciales señaladas pueden contribuir a los objetivos de **salud y bienestar (ODS 3)** y **energía asequible y no contaminante (ODS 7)**. A ello se añaden posibles aportaciones en otros cuatro ámbitos especialmente relevantes: hambre cero, agua limpia y saneamiento, ciudades y comunidades sostenibles, y acción por el clima.

2.2.2 ODS 2: Hambre cero

En este ámbito, la contribución potencial de las tecnologías cuánticas se concentra en la agricultura inteligente, la mejora de insumos agrícolas y la optimización de productividad.

En primer lugar, la computación cuántica podría reforzar la agricultura inteligente al mejorar la optimización de prácticas agrícolas, la asignación de recursos y la productividad del sector. Su valor potencial radica en tratar sistemas complejos con múltiples variables interdependientes, algo especialmente relevante en decisiones sobre uso de agua, fertilizantes, calendarios de cultivo o gestión de explotaciones.

En segundo lugar, estas tecnologías se están explorando para mejorar la monitorización del estado de los cultivos, incluidos indicadores de salud vegetal y niveles de estrés. Esto podría facilitar intervenciones más precisas y una gestión más eficiente de riesgos agrícolas.

En tercer lugar, la computación cuántica podría contribuir al desarrollo de fertilizantes de nueva generación y de alternativas a pesticidas y herbicidas, como soluciones de protección de cultivos basadas en proteínas. Estas opciones podrían resultar más coste-efectivas, más seguras y ambientalmente menos perjudiciales. Asimismo, podría acelerar el análisis genético de cultivos y los procesos de mejora vegetal, con potencial para elevar la productividad agrícola.

2.2.3 ODS 6: Agua limpia y saneamiento

Las aplicaciones potenciales en este ámbito pueden agruparse en tres frentes: monitorización de recursos hídricos, gestión eficiente del agua y mejora de la calidad del agua.

En primer lugar, tecnologías como los gravímetros cuánticos podrían mejorar la monitorización de acuíferos y reservas subterráneas de agua. Dado que las aguas subterráneas representan

la mayor parte del agua dulce del planeta, una medición más precisa de estos recursos sería relevante tanto para el abastecimiento humano como para la agricultura.

En segundo lugar, la optimización habilitada por tecnologías cuánticas podría contribuir a una distribución y gestión más eficiente del agua, reduciendo pérdidas, desperdicio y escasez. Su interés se sitúa especialmente en sistemas complejos donde la asignación del recurso debe equilibrar múltiples demandas y restricciones.

En tercer lugar, varias tecnologías cuánticas podrían mejorar la calidad del agua potable y hacer más eficiente su tratamiento. Los sensores cuánticos, por ejemplo, podrían reforzar la detección de sustancias nocivas en concentraciones muy bajas. A su vez, la simulación cuántica podría apoyar el desarrollo de nuevos filtros o materiales capaces de degradar contaminantes tóxicos. También se plantea que, en el futuro, el aprendizaje automático cuántico amplíe las capacidades actuales de análisis de calidad del agua, aportando una comprensión más profunda de cómo se distribuyen determinadas sustancias en medios líquidos. En conjunto, estas aplicaciones podrían reducir costes de monitorización, tratamiento y mejora de calidad.

2.2.4 ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles

En este ámbito, las contribuciones potenciales se organizan en tres áreas: planificación urbana, movilidad sostenible y resiliencia ante riesgos naturales.

En primer lugar, la computación cuántica podría apoyar el desarrollo de nuevos materiales para construcción, orientados a mejorar la resistencia estructural y el rendimiento urbano, así como modelos de planificación más avanzados para mejorar la calidad del aire y reducir el estrés térmico en entornos urbanos. Su aportación potencial no se limita al diseño físico de infraestructuras, sino también a la mejora de modelos complejos de planificación.

En segundo lugar, las tecnologías cuánticas podrían contribuir a sistemas de transporte más sostenibles mediante la monitorización y optimización de flujos de tráfico. Esto permitiría reducir congestión, mejorar la eficiencia del sistema y disminuir la huella de carbono asociada al transporte.

En tercer lugar, la sensórica y la computación cuánticas podrían mejorar la precisión de la predicción meteorológica, climática y de desastres naturales, incluidos sequías, terremotos e

inundaciones. Esta capacidad tendría implicaciones directas para la planificación urbana, la gestión del riesgo y la resiliencia de comunidades expuestas a amenazas ambientales.

2.2.5 ODS 13: Acción por el clima

Las aplicaciones potenciales en este ámbito pueden ordenarse en torno a tres funciones: descarbonización de sistemas energéticos, desarrollo de tecnologías limpias y mejora de capacidades de previsión climática.

En primer lugar, la optimización y simulación cuánticas podrían contribuir a la descarbonización mediante un uso más eficiente de la energía y una reducción de emisiones. Varias de las aplicaciones ya mencionadas en energía e industrias extractivas podrían, en este sentido, apoyar trayectorias hacia objetivos de emisiones netas cero.

En segundo lugar, los algoritmos de simulación cuántica en química y ciencia de materiales podrían acelerar el desarrollo de tecnologías de energía renovable, baterías avanzadas y métodos de eliminación de emisiones de carbono. Su relevancia radica en la posibilidad de acelerar descubrimientos materiales y químicos necesarios para una transición energética más rápida y eficaz.

En tercer lugar, la computación cuántica aplicada a modelos climáticos y meteorológicos podría reforzar la acción climática mediante mejores previsiones de producción eólica y solar, así como una modelización más precisa de variables económicas vinculadas al clima, como los precios del carbono. Esto podría mejorar tanto la planificación energética como la toma de decisiones regulatorias y de mercado.

3. Innovaciones y desarrollos tecnológicos en computación cuántica

3.1 Trayectorias tecnológicas y señales de maduración en la computación cuántica

El análisis del ecosistema global de computación cuántica debe partir de una premisa básica: no todas las arquitecturas compiten en la misma dimensión, ni todos los hitos técnicos tienen el mismo significado. En esta industria, el progreso no puede medirse únicamente por el número de qubits físicos. Lo decisivo es la capacidad de convertir recursos físicos inestables en operaciones lógicas fiables, repetibles y escalables. Por ello, el criterio central de lectura del mercado ya no es solo cuántos qubits tiene un sistema, sino qué nivel de computación útil puede extraerse de ellos, con qué tasa de error, bajo qué esquema de corrección y con qué trayectoria creíble hacia tolerancia a fallos.

Desde esa lógica, el ecosistema está entrando en una nueva fase. La etapa anterior estuvo dominada por la expansión del qubit físico y por anuncios de “ventaja cuántica” formulados con métricas heterogéneas. La etapa actual está marcada por un cambio de foco: la carrera se desplaza desde la escala física bruta hacia la validación de qubits lógicos, supresión de errores, preparación de recursos tolerantes a fallos y hojas de ruta explícitas hacia sistemas universales escalables. Este desplazamiento es importante porque introduce una vara de medida más exigente. Un sistema con menos qubits físicos, pero con mejor capacidad de codificación lógica o de reducción de error, puede estar más cerca de una arquitectura útil que otro con una escala física superior, pero sin una vía clara de corrección.

El punto de partida: qué significa progreso en computación cuántica

En términos fundamentales, una plataforma de computación cuántica solo adquiere relevancia industrial si puede aproximarse a tres condiciones simultáneas: ejecutar operaciones con fidelidad suficientemente alta, mantener esa fidelidad al escalar el sistema y hacerlo con un sobrecoste de corrección de errores que no vuelva inviable la arquitectura. Esto explica por qué el sector se está reorganizando en torno al qubit lógico. El qubit físico sigue siendo la unidad básica de hardware, pero el qubit lógico es la unidad más cercana a computación útil, porque incorpora mecanismos de redundancia y corrección diseñados para reducir el error efectivo.

Esta distinción permite interpretar mejor los anuncios recientes. Cuando una empresa demuestra un qubit lógico con error inferior al de sus qubits físicos, o muestra que el error

disminuye al añadir más qubits a un código de corrección, no está simplemente presentando una mejora incremental. Está demostrando que su arquitectura empieza a comportarse de acuerdo con los principios requeridos para tolerancia a fallos. Ese es hoy el umbral conceptual más importante del sector.

La principal señal de maduración: transición del qubit físico al qubit lógico

Los anuncios más relevantes del mercado confirman este cambio de fase. En superconductores, Google ha comunicado la demostración de 1 qubit lógico con una fidelidad aproximada del 99,86%, equivalente a una tasa de error del 0,143%, utilizando un código de superficie de distancia 7 implementado sobre 105 qubits físicos. El dato importante no es solo la fidelidad en sí, sino el hecho de que la reducción del error se obtiene al aumentar el tamaño del código, lo que apunta a una trayectoria consistente con la teoría de corrección cuántica de errores.

AWS ha seguido una vía distinta dentro de superconductores. Su arquitectura combinó 5 cat qubits físicos para codificar datos y 4 qubits ancilla para detección de síndromes, es decir, 9 qubits físicos en total, logrando una fidelidad aproximada del 98,35% para un código de distancia 5. La comparación con su propio código de distancia 3 – 98,25%, con error del 1,75% – sugiere una mejora modesta pero relevante. La tesis técnica aquí no es maximizar escala bruta, sino reducir el número de qubits físicos requeridos para construir memoria lógica.

IBM, también en superconductores, ha puesto el foco en otro recurso crítico: los magic states, esenciales para computación universal tolerante a fallos. Su anuncio se refiere a la preparación de un magic state lógico con 4 qubits físicos sobre un chip Falcon de 27 qubits, con fidelidad por encima del punto de equilibrio, es decir, superior a la de un qubit físico individual. Aunque la escala es pequeña, el avance es significativo porque ataca uno de los principales cuellos de botella de la computación cuántica universal.

En átomos neutros, QuEra ha anunciado la demostración de 2 qubits lógicos de alta fidelidad en un array reconfigurable de hasta 280 qubits físicos, mejorando el código de superficie de distancia 3 a distancia 7. Atom Computing, por su parte, ha comunicado un estado lógico entrelazado de 24 qubits codificado en 48 qubits dentro de un procesador de 256 átomos de iterbio, y ha ejecutado un algoritmo de Bernstein–Vazirani de 28 qubits lógicos con tasas de error mejores que las obtenidas usando 28 qubits físicos sin codificación lógica. Este tipo de

resultados es especialmente relevante porque muestra no solo codificación, sino ya una primera superioridad funcional del nivel lógico frente al físico.

En iones atrapados, Quantinuum ha comunicado la teleportación tolerante a fallos de 1 qubit lógico con una fidelidad del proceso lógico del 97,5%, codificado con 7 qubits de datos y 3 ancilla dentro de un sistema de 30 iones. El valor técnico de este resultado no reside tanto en el número absoluto de qubits como en la demostración de transferencia lógica fiable, algo especialmente importante para arquitecturas modulares y distribuidas.

En modalidades más exploratorias, Microsoft ha reivindicado una nueva arquitectura topológica basada en su chip Majorana 1. A diferencia de los casos anteriores, aquí no se anuncia una escala lógica comparable ni una métrica de fidelidad del mismo tipo, sino una tesis arquitectónica: que una base topológica podría reducir radicalmente la carga futura de corrección de errores. Desde el punto de vista del ecosistema, esto sitúa a la plataforma en una categoría distinta: alta ambición potencial, pero menor evidencia experimental comparable en el corto plazo.

En conjunto, estos datos permiten una inferencia clara: el ecosistema ha dejado atrás una fase centrada casi exclusivamente en cantidad de qubits físicos y entra en una fase donde el criterio competitivo dominante es la calidad lógica del cómputo.

El segundo nivel de análisis: las modalidades siguen siendo estructuralmente distintas

A pesar de esta convergencia hacia el qubit lógico, el sector sigue organizado en modalidades físicas claramente diferenciadas. Las principales son redes fotónicas, circuitos superconductores, spin qubits, átomos neutros e iones atrapados. La razón por la que esta diversidad importa es que cada modalidad combina de forma distinta cuatro variables fundamentales: densidad física de qubits, fidelidad operativa, complejidad de control y viabilidad de escalado.

En términos de escala física visible, los superconductores y los átomos neutros son hoy las modalidades con cifras públicas más altas. Entre superconductores, IBM ha publicado sistemas de 1.121 qubits físicos, Google de 105, Rigetti de 84, Fujitsu de 64 y Alice & Bob de 16. En átomos neutros, Atom Computing ha comunicado 1.180 qubits físicos, Infleqtion 1.600, Pasqal 1.110 y QuEra 256. En iones atrapados, las cifras públicas son inferiores: 56 para Quantinuum,

36 para IonQ y 20 para Alpine Quantum Technologies. En spin qubits, Intel figura con 12. En fotónica, Xanadu ha comunicado 216.

Sin embargo, estas cifras no son directamente comparables. Un procesador superconductor de más de mil qubits físicos no implica automáticamente una ventaja sobre una arquitectura de 56 iones atrapados si esta última mantiene mayor fidelidad, mejor conectividad o una relación más favorable entre recurso físico y recurso lógico. Del mismo modo, una plataforma de átomos neutros con más de mil qubits no puede evaluarse solo por escala si aún debe resolver cuellos de botella importantes en lectura, corrección de errores o control óptico.

La conclusión deductiva es que la escala física importa, pero solo como una variable dentro de una estructura más amplia. La métrica verdaderamente informativa es la combinación entre escala, fidelidad, conectividad y sobrecoste de corrección.

Las hojas de ruta existen, pero expresan tipos de progreso diferentes

La tercera señal de maduración del mercado es que varias compañías ya no se limitan a describir capacidades actuales, sino que comunican trayectorias explícitas hacia computación universal escalable. Aun así, estas hojas de ruta no deben leerse como equivalentes.

IBM proyecta una trayectoria que combina qubits físicos y lógicos. En la información disponible, aparece una progresión desde 1.000+ qubits físicos en 2026, hacia 200 qubits lógicos en 2029 y 2.000 qubits lógicos en 2033+, junto con una meta de 100.000 qubits físicos en ese horizonte ampliado. Google presenta una secuencia que parte de 1 qubit lógico y 105 qubits físicos en 2024, pasa a 1–10 qubits lógicos y 1.000 físicos en 2026, y después a 10 qubits lógicos y 10.000 físicos en 2027, 100 lógicos y 100.000 físicos en 2028, hasta 1.000 qubits lógicos y 1.000.000 físicos en 2029. QuEra proyecta una secuencia desde 10 qubits lógicos en 2024 con más de 256 físicos, hacia 30 qubits lógicos en 2025 con más de 3.000 físicos, y 100 qubits lógicos en 2026 con más de 10.000 físicos. IonQ comunica una hoja de ruta ascendente de 36 a 64, 256, 384 y 1.024 qubits entre 2024 y 2028, aunque en este caso la métrica utilizada es la de algorithmic qubits, que no es estrictamente equivalente a qubits lógicos.

De estos datos se desprenden dos conclusiones. La primera es positiva: el sector ya formula trayectorias técnicas explícitas y cuantificadas, lo que sugiere una mayor disciplina industrial. La segunda es metodológica: las hojas de ruta no son todavía plenamente comparables porque no todas usan la misma unidad de progreso. Por ello, cualquier análisis serio del ecosistema

debe distinguir entre qubit físico, qubit lógico, *algorithmic qubit* y otros indicadores intermedios. Mezclarlos conduce a conclusiones engañosas.

La corrección de errores es el principal campo de selección tecnológica

Si se parte del objetivo último – computación universal tolerante a fallos – el principal filtro competitivo del sector ya no es la mera construcción de qubits, sino la capacidad de integrarlos en esquemas eficientes de corrección de errores. Esto obliga a observar no solo qué arquitectura tiene mejor desempeño actual, sino qué arquitectura tiene una relación más favorable entre recursos físicos y recursos lógicos.

Los datos disponibles ya apuntan a estrategias divergentes. Google necesitó 105 qubits físicos para 1 qubit lógico de distancia 7. AWS comunica un enfoque más compacto, con 9 qubits físicos para memoria lógica basada en cat qubits. IBM avanza en recursos lógicos críticos con 4 qubits físicos para un magic state lógico. QuEra escala a 280 qubits físicos para 2 qubits lógicos. Atom Computing demuestra codificación de 24 qubits lógicos en 48 físicos, es decir, una ratio de 2 a 1 en el experimento comunicado, aunque en un contexto muy concreto. Quantinuum utiliza 10 qubits físicos principales – 7 de datos más 3 ancilla – dentro de un sistema mayor de 30 iones para teleportación lógica.

La lección no es que una modalidad “gane” hoy, sino que cada modalidad está explorando una combinación distinta entre sobrecoste de codificación, fidelidad alcanzable y tipo de operación lógica demostrada. En términos de ecosistema, esta es la frontera competitiva más importante, porque determinará el coste real del escalado.

La capa de control está emergiendo como restricción estructural

Desde un punto de vista fundamental, ningún sistema cuántico puede escalar si la capa de control no escala con él. Esta es una de las conclusiones más sólidas del estado actual del ecosistema. El problema no es solo construir mejores qubits, sino controlarlos, leerlos, sincronizarlos y caracterizarlos con suficiente precisión y a suficiente densidad.

Las exigencias varían fuertemente por modalidad. En fotónica, el desafío principal está en manipular trayectorias ópticas, polarización y fase, además de detectar fotones individuales. En superconductores, el control depende de pulsos de microondas y de la integración de electrónica de control dentro del criostato, lo que añade complejidad térmica, de cableado y de calibración. En spin qubits, también se requieren pulsos de microondas, pero aplicados a

dispositivos mucho más pequeños, con ayuda frecuente de nanoimanes y campos localizados. En átomos neutros, la clave está en manipular y atrapar átomos con pinzas ópticas, así como en capturar luz emitida para lectura. En iones atrapados, el reto es combinar control por microondas y fotónica dentro de cámaras de vacío donde un número creciente de qubits debe seguir siendo accesible individualmente.

Este punto tiene una traducción económica e industrial importante: el control cuántico ya no debe verse como un subsistema auxiliar, sino como una capa estratégica del mercado. De hecho, buena parte de los proveedores especializados se concentran todavía en superconductores y spin qubits, con intención de extenderse después a otras modalidades. Esto sugiere que una parte de la cadena de valor del ecosistema puede desplazarse desde el qubit como componente físico hacia la electrónica, el software de control y la integración sistema-a-sistema.

Cada modalidad enfrenta un perfil de riesgo distinto

Si se razona desde lo más fundamental, las modalidades no difieren solo en resultados actuales, sino en la naturaleza de sus restricciones de escalado.

En superconductores, el reto central parece estar en la integración criogénica, el empaquetado, la reducción de cableado y la construcción de arquitecturas de control escalables. En spin qubits, la dificultad reside en llevar control de alta precisión a dispositivos de escala mucho menor, manteniendo reproducibilidad y manufactura compatible con integración avanzada. En átomos neutros, el cuello de botella se desplaza hacia la óptica: láseres más potentes, menor pérdida de fotones y mayor paralelización del control. En iones atrapados, la restricción aparece en el espacio físico disponible y en la complejidad de mantener un gran número de iones individualmente controlables dentro de la cámara. En fotónica, el desafío es escalar precisión óptica y estabilidad minimizando el uso de componentes activos y sin perder calidad de señal.

La consecuencia analítica es importante: dos plataformas con hitos aparentemente comparables pueden presentar riesgos completamente distintos. Por ello, el análisis del ecosistema no puede limitarse a métricas de rendimiento presentes; debe incorporar la **naturaleza del problema todavía no resuelto**.

Deducción estratégica: qué está cambiando realmente en el ecosistema

A partir de todos estos elementos, pueden extraerse cinco conclusiones de orden superior.

La primera es que el sector está pasando de una fase de exploración física a una fase de validación lógica. La evidencia más clara es el aumento de anuncios centrados en qubits lógicos, códigos de distancia mayores, teleportación tolerante a fallos y estados mágicos por encima del punto de equilibrio.

La segunda es que la arquitectura dominante aún no existe. Superconductores y átomos neutros lideran en escala física visible; iones atrapados conservan posiciones fuertes en calidad y conectividad; spin qubits y topológicos mantienen tesis de largo plazo con diferentes grados de madurez; y fotónica ocupa un espacio propio más vinculado a redes y control óptico.

La tercera es que las hojas de ruta son cada vez más cuantificadas, pero aún no plenamente comparables. Esto obliga a tratar con cuidado cualquier ranking simplificado del sector.

La cuarta es que la corrección de errores y la capa de control se están convirtiendo en los verdaderos criterios de selección tecnológica. En otras palabras, el liderazgo futuro no lo definirá necesariamente quien acumule primero más qubits físicos, sino quien integre mejor física, control, lectura y lógica corregida.

La quinta es que el ecosistema ya no puede analizarse solo como una carrera científica. Empieza a comportarse como una industria emergente en la que coevolucionan hardware, control, software, arquitecturas de corrección y modelos de integración.

3.2 Marco de análisis de las hojas de ruta en computación cuántica: una perspectiva full stack

La evaluación de las hojas de ruta en computación cuántica exige un marco de análisis que vaya más allá de métricas aisladas como número de qubits, fidelidad o hitos comerciales anunciados. Aunque estas métricas son relevantes, resultan insuficientes para comparar plataformas heterogéneas, estimar trayectorias de escalado o valorar la credibilidad de los planes hacia computación cuántica tolerante a fallos. En un contexto marcado por la ausencia de estándares plenamente consolidados y por el uso desigual de conceptos como *quantum*

advantage o *fault tolerance*, la prioridad analítica no es solo identificar quién avanza más rápido, sino entender qué está avanzando exactamente, en qué capa del sistema y con qué perfil de riesgo tecnológico.

Desde esta perspectiva, el enfoque más útil para un informe sobre el ecosistema cuántico global es un enfoque full stack. La premisa central es que un sistema cuántico no debe analizarse únicamente a partir del qubit o de la modalidad física, sino como una arquitectura multicapa en la que el rendimiento final depende de la interacción entre hardware, control, arquitectura, corrección de errores, software, aplicaciones y adopción. Este marco permite comparar plataformas de forma más rigurosa, distinguir entre progreso visible y escalabilidad real, e identificar mejor dónde se concentran los principales cuellos de botella.

Por qué las hojas de ruta son difíciles de comparar

Las empresas de computación cuántica suelen presentar hojas de ruta con formatos, hitos y propuestas de valor diferentes. Algunas priorizan el crecimiento en número de qubits; otras enfatizan fidelidad, corrección de errores, modularidad, manufactura o aplicaciones. Esta diversidad responde a diferencias reales entre arquitecturas, pero también genera un problema de comparabilidad. Dos plataformas pueden parecer similares en términos narrativos y, sin embargo, encontrarse en situaciones tecnológicas muy distintas.

Por ello, una lectura útil de las hojas de ruta no debe basarse en la aceptación de los indicadores definidos por cada proveedor, sino en su traducción a un marco común de evaluación. La pregunta clave no es solo qué empresa ha anunciado más, sino cómo se distribuye su progreso a lo largo del sistema tecnológico y qué implicaciones tiene para el escalado hacia computación cuántica tolerante a fallos.

El principio full stack: evaluar el sistema completo

Un enfoque full stack parte de la idea de que el desempeño de un ordenador cuántico depende del conjunto del sistema, no solo del plano físico donde residen los qubits. Esto obliga a analizar la computación cuántica como una pila tecnológica compuesta por varias capas interdependientes.

En la base se sitúa el quantum plane, que incluye qubits, acopladores e interconexiones. Sobre esta capa operan el control plane y la control logic, donde se localizan elementos como cableado, integración óptica, sincronización, electrónica de control, conversión analógico-digital

y protocolos de caracterización. A continuación aparece una capa intermedia o midstack, que incorpora arquitectura, abstracción, virtualización, compilación, encaminamiento, lectura y corrección de errores. En la parte superior se encuentran los algoritmos, las aplicaciones y la comunidad usuaria, es decir, el nivel en el que la capacidad técnica se traduce en casos de uso concretos y adopción.

Este marco permite desplazar la atención desde una visión reducida del “qubit race” hacia una evaluación sistémica. Una plataforma puede mostrar avances sólidos en el plano físico y, al mismo tiempo, mantener vulnerabilidades importantes en empaquetado, control criogénico, lectura, decodificación o compatibilidad con su estrategia de corrección de errores. Del mismo modo, una empresa puede proyectar un posicionamiento fuerte en aplicaciones, pero no haber resuelto aún las dependencias técnicas necesarias para escalar con fiabilidad.

Cómo comparar modalidades dentro de un marco común

Una vez adoptado un enfoque full stack, la comparación entre modalidades puede realizarse de forma más precisa. El punto de partida es distinguir entre comparaciones **intermodales** e **intramodales**. Comparar superconductores con fotónica, átomos neutros o iones atrapados no equivale a comparar dos empresas dentro de una misma modalidad. En el primer caso, cambian simultáneamente física, arquitectura, control, estrategias de escalado y compatibilidad con corrección de errores. En el segundo, el análisis puede centrarse con mayor detalle en ejecución, integración o posicionamiento tecnológico.

Lo relevante no es solo qué modalidad presenta más qubits o mejor fidelidad en un momento dado, sino cómo se comporta a lo largo de distintas capas del stack. Para ello, conviene examinar, entre otros elementos, el ciclo lógico, la estrategia de QEC, la lectura, la direccionabilidad, las interfaces de red, la conectividad nativa, la fidelidad de puertas, el sustrato físico y los límites previsibles de manufactura y escalado.

Esta aproximación resulta especialmente importante porque muchas decisiones críticas no son independientes. La elección de una modalidad física condiciona la viabilidad de ciertos códigos de corrección de errores, la complejidad de la electrónica de control, la carga térmica, el empaquetado y la densidad de interconexión. En consecuencia, el análisis de plataformas no debe reducirse a métricas de capa única, sino identificar la coherencia del conjunto.

Hojas de ruta como trayectorias de resolución de desafíos

Bajo un enfoque full stack, una hoja de ruta puede entenderse como una trayectoria de resolución progresiva de desafíos tecnológicos. Esta perspectiva es más útil que una lectura lineal de hitos, ya que permite distinguir entre avances incrementales y cuellos de botella estructurales.

A efectos analíticos, los desafíos pueden agruparse en tres categorías. La primera corresponde a desafíos incrementales, es decir, problemas de bajo riesgo relativo cuya resolución depende sobre todo de integración, mejora gradual o disponibilidad de capacidades de ingeniería. La segunda agrupa desafíos de ingeniería, que exigen recursos, ejecución técnica y coordinación, pero no necesariamente investigación fundamental. La tercera comprende desafíos científicos, esto es, problemas abiertos asociados a límites físicos, escalado, disipación térmica, estabilidad o control, para los que todavía no existe una solución madura y validada a nivel industrial.

Esta clasificación es relevante porque las hojas de ruta no distribuyen los riesgos de la misma manera. Algunas plataformas pueden mostrar progresos tempranos más visibles y beneficiarse de “quick wins” en etapas iniciales. Otras pueden enfrentar obstáculos significativos en fases tempranas, pero presentar una trayectoria de escalado más favorable en el medio plazo. Desde el punto de vista del ecosistema, esto implica que el estado actual de una plataforma no siempre predice su posición futura si no se analiza qué tipo de desafíos ha resuelto ya y cuáles permanecen por delante.

Implicaciones para inversión, adopción y evaluación pública

El valor del enfoque full stack no se limita al análisis tecnológico. También ofrece una base más sólida para la toma de decisiones por parte de inversores, empresas usuarias y administraciones públicas.

Para los inversores, el marco permite distinguir entre plataformas con ventajas de corto plazo y plataformas con potencial de escalado más robusto, aunque menos visible en el presente. La cuestión central no es simplemente qué empresa parece más avanzada hoy, sino qué perfil de riesgo tecnológico y temporal presenta cada hoja de ruta.

Para los adoptantes industriales, el enfoque ayuda a evaluar si una plataforma está madura en las capas que importan para su caso de uso. Una empresa puede tener una narrativa fuerte en

hardware, pero carecer todavía de herramientas, bibliotecas, workflows o fiabilidad operativa suficiente en capas superiores del stack.

Para gobiernos y centros de testeo, la principal implicación es que la evaluación no debería limitarse a medir outputs agregados. Resulta más útil identificar qué capas del stack conviene examinar, en qué momento del desarrollo y con qué tipo de indicadores. Una estrategia nacional de evaluación tecnológica en computación cuántica debería, por tanto, estructurarse por capas y por trayectorias de maduración, no solo por métricas visibles de rendimiento.