

Computación cuántica en el currículo universitario

www.editorialmarcaribe.es

ISBN: 978-9915-698-89-2



Escrito por:
Juan Carlos Lázaro Guillermo
Dulio Oseda Gago
Ronald Gamarra Salinas
William Martín Enríquez Maguiña
Amanda Del Aguila Del Aguila
José Antonio Luna García
Wendy Zandy Medrano Rosas

Computación cuántica en el currículo universitario

Lázaro Guillermo, Juan Carlos; Oseda Gago, Dulio; Gamarra Salinas, Ronald; Enríquez Maguiña, William Martín; Del Águila Del Aguila, Amanda; Luna García, José Antonio; Medrano Rosas, Wendy Zandy

© Lázaro Guillermo, Juan Carlos; Oseda Gago, Dulio; Gamarra Salinas, Ronald; Enríquez Maguiña, William Martín; Del Águila Del Aguila, Amanda; Luna García, José Antonio; Medrano Rosas, Wendy Zandy, 2026

Primera edición (1.^a ed.): abril, 2026

Editado por:

Editorial Mar Caribe ®

www.editorialmarcaribe.es

Av. Gral. Flores 547, 70000 Col. del Sacramento, Departamento de Colonia, Uruguay.

Diseño de carátula e ilustraciones: *Luisa Fernanda Lugo Rojas*

Libro electrónico disponible en:

<https://editorialmarcaribe.es/ark:/10951/isbn.9789915698892>

Formato: Electrónico

ISBN: 978-9915-698-89-2

ARK: [ark:/10951/isbn.9789915698892](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:es:editorialmarcaribe-10951-isbn.9789915698892)

[Editorial Mar Caribe \(OASPA\)](#): Como miembro de la Open Access Scholarly Publishing Association, apoyamos el acceso abierto de acuerdo con el código de conducta, la transparencia y las mejores prácticas de OASPA para la publicación de libros académicos y de investigación. Estamos comprometidos con los más altos estándares editoriales en ética y deontología, bajo la premisa de «Ciencia Abierta en América Latina y el Caribe»

OASPA

Editorial Mar Caribe, firmante N° 795 de 12.08.2024 de la [Declaración de Berlín](#)

"... Nos sentimos obligados a abordar los retos de Internet como un medio funcional emergente para la distribución del conocimiento. Obviamente, estos avances pueden modificar significativamente la naturaleza de la publicación científica, así como el actual sistema de garantía de calidad...." (Max Planck Society, ed. 2003, pp. 152-153).



[CC BY-NC 4.0](#)

Los autores pueden autorizar al público en general a reutilizar sus obras únicamente con fines no lucrativos, los lectores pueden utilizar una obra para generar otra, siempre que se dé crédito a la investigación, y conceden al editor el derecho a publicar primero su ensayo bajo los términos de la licencia CC BY-NC 4.0.



Editorial Mar Caribe se adhiere a la "Recomendación relativa a la preservación del patrimonio documental, comprendido el patrimonio digital, y el acceso al mismo" de la UNESCO y a la Norma Internacional de referencia para un sistema abierto de información archivística ([OAIS-ISO 14721](#)). Este libro está preservado digitalmente por datasegura.info

DATA SEGURA

Editorial Mar Caribe

**Computación cuántica en el currículo
universitario**

Colonia, Uruguay

2026

Computación cuántica en el currículo universitario

Editorial Mar Caribe

Av. General Flores 547, Colonia, Colonia, Uruguay. CP 70000

www.editorialmarcaribe.es

Encuéntranos en:

[Facebook](#)

[X](#)

Contáctenos:

contacto@editorialmarcaribe.es

contacto@editorialmarcaribe.uy

admin@edicionesmarcaribe.com

ISBN 978-9915-698-89-2

Título: [Computación cuántica en el currículo universitario](#)

El contenido de este libro es propiedad intelectual de:

[Lázaro Guillermo, Juan Carlos](#)

[Oseda Gago, Dulio](#)

[Gamarra Salinas, Ronald](#)

[Enríquez Maguiña, William Martín](#)

[Del Aguila Del Aguila, Amanda](#)

[Luna García, José Antonio](#)

[Medrano Rosas, Wendy Zandy](#)

2026

Índice

Prólogo.....	9
Introducción	11
Capítulo 1	16
Estrategias de integración de la computación cuántica en el currículo universitario: un análisis global y regional en la era posclásica.....	16
Evolución de los marcos curriculares y el paradigma CS2023	17
Fundamentos matemáticos y físicos en el currículo universitario	19
El qubit y la representación de estados	19
Requisitos matemáticos previos y transversales	20
Algoritmos cuánticos: el núcleo del estudio avanzado.....	21
Algoritmos de consulta y oráculo.....	21
Búsqueda y Factorización: Grover y Shor.....	21
Modalidades de hardware y experimentación en el laboratorio.....	23
Tecnologías líderes en el currículo	23
El rol de los laboratorios virtuales y la nube	24
Benchmarking global: programas líderes y centros de excelencia	24
Norteamérica: el eje de la innovación industrial	25
La computación cuántica en el contexto de América Latina	27
El caso de Perú: del pregrado a la investigación de frontera	27
Esfuerzos regionales en Colombia, Uruguay y México	28
Estrategias de vinculación con la industria y el rol de las Big Tech	29
Programas de educadores de IBM y Microsoft.....	29
El ecosistema de startups y el mercado laboral.....	30
Aplicaciones interdisciplinarias: el futuro del currículo	30
Química, farmacia y ciencia de materiales	30
Desafíos pedagógicos y la Brecha Cuántica	32
La preparación de los educadores	32
Inclusividad y accesibilidad	32

Ética y responsabilidad social (SEP)	32
Capítulo 2	35
Análisis curricular en ciencias de la información cuántica: superposición, entrelazamiento y la esfera de Bloch	35
El paradigma de la superposición en la educación en computación cuántica	36
Fundamentación matemática y notación de Dirac	36
Dinámica de la superposición: la compuerta Hadamard	37
La medición y el colapso del Estado	38
Entrelazamiento: correlaciones no locales y sistemas multi-qubit	39
La paradoja EPR y el teorema de Bell	39
Aplicaciones de redes y comunicación cuántica	40
Desafíos en la enseñanza del entrelazamiento.....	41
La esfera de Bloch: visualización geométrica del estado cuántico	42
Coordenadas y parámetros geométricos.....	42
Estados puros vs. estados mezclados.....	43
Transformaciones como rotaciones	44
Implementación curricular: del aula al laboratorio.....	45
El modelo de aprendizaje integrado en laboratorio	45
Herramientas de simulación y visualización	46
Requerimientos de la fuerza laboral y estándares curriculares.....	47
Interdisciplinariedad y diversidad.....	48
Desafíos pedagógicos: de la intuición a la formalidad	49
Superando la barrera del álgebra lineal	49
El Problema de la visualización en sistemas grandes.....	50
Capítulo 3	52
Algoritmos y metodologías de análisis comparativo con el modelo clásico ...	52
Fundamentos matemáticos y el cambio de paradigma en la información ..	52
Evolución de operaciones: de la reversibilidad clásica a las puertas cuánticas	55

Jerarquía de puertas y funcionalidad algorítmica.....	55
Paradigmas de algoritmos de consulta y separación de complejidad	57
Algoritmos de Deutsch-Jozsa y Bernstein-Vazirani.....	57
Algoritmo de Simon: el precursor de Shor.....	57
El algoritmo de Shor y el impacto en la criptografía moderna.....	58
Búsqueda de Grover y amplificación de amplitud	60
Teoría de la complejidad cuántica y sus fronteras	61
Algoritmos en la era NISQ: VQE, QAOA y VQLS	62
Variational Quantum Eigensolver (VQE).....	62
Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA).....	62
Variational Quantum Linear Solver (VQLS)	63
Herramientas de programación y el ecosistema de software.....	63
Metodologías pedagógicas y desarrollo de la fuerza laboral	65
Razonamiento diagramático y cálculo ZX	65
El enfoque minimalista y de física primero.....	65
Competencias profesionales e industria.....	66
Capítulo 4	68
Convergencia tecnológica y aplicaciones prácticas del currículo.....	68
El ecosistema de la ciberseguridad en la infraestructura crítica y el sector financiero	68
Proyectos estratégicos y resiliencia en el sector bancario	69
Optimización matemática y eficiencia en procesos industriales y logística	71
Aplicaciones en energía y producción industrial	71
Revolución en la logística y la cadena de suministro.....	72
Inteligencia artificial: diagnóstico médico y sistemas autónomos.....	74
Transformación del diagnóstico clínico y la medicina de precisión.....	74
Sistemas autónomos y robótica colaborativa (RAS).....	75
Simulación de materiales y descubrimiento científico acelerado.....	76
El hito de los nuevos superconductores	76

Convergencia de IA y ciberseguridad: un desafío ético y operativo.....	78
Dinámicas del mercado laboral y el futuro del empleo tecnológico	79
Consideraciones sobre la sostenibilidad y el impacto ESG	81
Capítulo 5	83
Ingeniería de sistemas cuánticos: cúbits e infraestructura de los procesadores superconductores	83
Fundamentos del aprendizaje y operación de cúbits	84
Mecanismos de Superposición e Interferencia	84
El recurso crítico del entrelazamiento	85
Átomos artificiales en el chip	86
La física de la unión de Josephson	87
Evolución del diseño: del cúbit de carga al transmon	87
Conectividad y compuertas de dos cúbits	88
Infraestructura física y soporte criogénico.....	89
El refrigerador de dilución: corazón térmico del sistema.....	89
Gestión de la cadena de señal de microondas	90
Desafíos de ingeniería: ruido, materiales y escalabilidad	91
Fuentes de ruido en estado sólido	91
El problema de la escalabilidad del cableado.....	92
Comparativa de modalidades físicas: iones, fotones y espines	92
Iones atrapados: los cúbits naturales	92
Centros NV en diamante: operación a temperatura ambiente.....	93
La formación del ingeniero en sistemas cuánticos	95
Competencias técnicas requeridas.....	95
El enfoque en el pensamiento de sistemas.....	96
Capítulo 6	97
Matemática de la era cuántica: un análisis integral del currículo académico y las herramientas fundamentales	97
El álgebra lineal como lenguaje operativo del qubit	99

Espacios de Hilbert y notación de Dirac	100
El producto tensorial y la multiplicidad de qubits.....	102
Cálculo y análisis: la evolución de la función de onda	103
Ecuaciones Diferenciales y el Hamiltoniano.....	103
La formulación de la integral de camino de Feynman.....	104
Análisis complejo y espacios de funciones.....	104
Probabilidad y estadística en el mundo de la medida.....	105
La regla de Born y las amplitudes de probabilidad	105
Matrices de densidad y la gestión de estados mixtos.....	106
Valores esperados y observables	107
Lógica cuántica frente a lógica booleana	108
El retículo de Birkhoff y von Neumann.....	108
Reversibilidad y puertas universales	109
Integración curricular: benchmarks y estructuras de programas	110
El Modelo de Stanford y la Universidad de Oxford.....	110
La propuesta de QuTech y la Universidad de Delft	111
El enfoque de la UNAM y la educación en América Latina	111
Desafíos matemáticos en la corrección de errores cuánticos (QEC)	113
Códigos de estabilizador y álgebra sobre campos finitos.....	113
El código de superficie y la topología	113
El papel del aprendizaje por refuerzo en QEC	114
Pedagogía 5.0 y el futuro de la educación cuántica	114
Hiperpersonalización mediante algoritmos cuánticos	115
Alfabetización cuántica desde la educación secundaria.....	115
El cambio de un enfoque teórico a uno basado en proyectos.....	115
Perspectiva histórica y filosófica: la ontología del currículo.....	116
Conclusión	118
Bibliografía	122

Prólogo

La historia de la ciencia y la tecnología está jalada por momentos de inflexión en los que nuestras explicaciones del universo dejan de ser suficientes para construir el futuro. Vivimos precisamente uno de esos momentos. Durante más de siete décadas, el paradigma de la computación clásica —erigido sobre la elegancia binaria del bit y la arquitectura de Von Neumann— transformó cada rincón de la sociedad humana. Sin embargo, hoy nos encontramos ante las fronteras físicas y teóricas del procesamiento tradicional. Es aquí donde la mecánica cuántica deja de ser una disciplina confinada a los laboratorios de física teórica para convertirse en el nuevo pilar del procesamiento de información.

La computación cuántica no es simplemente una extensión más rápida de la computación que conocemos; es un cambio ontológico en la forma en que formulamos y resolvemos problemas. Conceptos como la superposición, el entrelazamiento y la interferencia cuántica abren un espacio de estados computacionales exponencialmente superior, capaz de abordar desafíos que hasta hace poco considerábamos intratables: desde la simulación molecular para el diseño de fármacos y la optimización de sistemas complejos, hasta el rediseño de los esquemas criptográficos globales.

Este cambio de paradigma plantea una pregunta ineludible y urgente para las instituciones de educación superior: ¿cómo preparamos a las próximas generaciones de profesionales e investigadores para liderar este nuevo horizonte?

Integrar la computación cuántica en el currículo universitario no es un

mero ejercicio de actualización optativa; es una reestructuración pedagógica imprescindible. Exige derribar los compartimentos estancos que históricamente han separado la física, la matemática, la ciencia de la computación y la ingeniería. Formar talento en esta área requiere articular el álgebra lineal con la algorítmica, y la teoría de la información con los principios de la mecánica cuántica, todo ello sin perder de vista las aplicaciones prácticas y las limitaciones del hardware en la era NISQ (*Noisy Intermediate-Scale Quantum*).

El libro *Computación cuántica en el currículo universitario* nace como una respuesta rigurosa, estratégica y profundamente oportuna a este desafío. A lo largo de sus páginas, las autoras y autores no solo desglosan los fundamentos teóricos y prácticos de esta disciplina, sino que ofrecen una hoja de ruta estructurada para su enseñanza. Desde la definición de competencias clave hasta la propuesta de asignaturas, laboratorios virtuales y proyectos interdisciplinarios, esta obra tiende un puente vital entre la investigación de vanguardia y el aula universitaria.

Celebro la publicación de esta obra, que sin duda se convertirá en un referente indispensable para decanos, directores de programa, docentes y académicos comprometidos con la evolución de la educación superior. Integrar estos conocimientos hoy es la clave para asegurar que nuestras universidades sigan siendo los motores del descubrimiento y la innovación del mañana. Les invito a adentrarse en sus páginas con la certidumbre de que enseñar computación cuántica es, en última instancia, enseñar a pensar el futuro.

Juan Carlos Lázaro Guillermo

Marzo 2026

Introducción

El desarrollo vertiginoso de las tecnologías cuánticas marca una de las transiciones científicas y tecnológicas más profundas del siglo XXI. Durante décadas, la computación clásica, cimentada en la lógica booleana y el procesamiento de bits discretos, ha sido el motor fundamental de la transformación digital global. Sin embargo, los límites físicos de la miniaturización de semiconductores y la creciente complejidad computacional de problemas en optimización, criptografía y simulación de sistemas complejos han impulsado el surgimiento de un nuevo paradigma: la computación cuántica.

Aprovechando principios fundamentales de la mecánica cuántica como la superposición, el entrelazamiento y la interferencia, este campo emergente ofrece un crecimiento exponencial en la capacidad de procesamiento de información. Este avance no constituye únicamente un salto cuantitativo en velocidad, sino una transformación cualitativa en el modo en que se abordan los problemas científicos e industriales.

A medida que el ecosistema cuántico transita desde la investigación teórica básica hacia aplicaciones industriales y la era del hardware NISQ (*Noisy Intermediate-Scale Quantum*), se hace evidente una brecha crítica: la escasez de talento humano altamente calificado y capacitado en tecnologías cuánticas. Frente a este escenario, las instituciones de educación superior enfrentan la urgencia de adaptar, reestructurar e innovar sus currículos universitarios para formar profesionales e investigadores capaces de desempeñarse en esta disciplina emergente.

Sin embargo, la integración de la computación cuántica en las aulas universitarias presenta desafíos pedagógicos e institucionales significativos. Históricamente, la formación en física cuántica y en ciencias de la computación ha discurrido por caminos paralelos y poco articulados. La naturaleza intrínsecamente interdisciplinaria de la computación cuántica —que demanda el dominio convergente del álgebra lineal, la teoría de la información, la algorítmica y la ingeniería de hardware— exige superar las barreras departamentales tradicionales y definir nuevas estrategias de diseño curricular.

A pesar del interés global por fomentar la alfabetización cuántica, la incorporación de estos contenidos en las mallas curriculares de pregrado y posgrado en América Latina y otras regiones en desarrollo suele ser fragmentaria, opcional o inexistente. Existe una falta de marcos orientadores claros que permitan evaluar cómo se está articulando esta disciplina en la educación superior y cuáles son los modelos pedagógicos más efectivos para su enseñanza.

A partir de esta problemática, el presente estudio se articula en torno a la siguiente pregunta central de investigación: ¿De qué manera se está integrando la computación cuántica en los currículos universitarios y cuáles son las estrategias pedagógicas, estructurales e interdisciplinarias necesarias para consolidar su enseñanza efectiva en la educación superior?

Para dar respuesta al problema formulado, esta investigación establece como propósito central: analizar el estado actual, las dinámicas de integración y los desafíos curriculares de la computación cuántica en las instituciones de educación superior, con el fin de proponer un marco didáctico e interdisciplinario que oriente el diseño de programas académicos pertinentes

y adaptados a las exigencias del entorno tecnológico contemporáneo.

Ahora bien, para alcanzar este objetivo general, el estudio aborda los siguientes propósitos específicos:

- i. Mapear las iniciativas curriculares existentes a nivel internacional y regional en el ámbito de la enseñanza de la computación cuántica.
- ii. Identificar las competencias clave (conceptuales, procedimentales y actitudinales) que deben desarrollar los estudiantes para desempeñarse en el área.
- iii. Evaluar las barreras institucionales y epistemológicas que dificultan la adopción de este paradigma en las facultades de ingeniería, ciencias exactas y tecnología.
- iv. Diseñar una propuesta modular y graduable de integración curricular aplicable a diferentes niveles de formación universitaria.

El alcance de este libro de investigación abarca tanto dimensiones analíticas como propositivas, centrando su foco en la educación superior universitaria:

- *Población y contexto académico:* La investigación examina programas de pregrado y posgrado en áreas afines como Ciencia de la Computación, Ingeniería de Software, Física, Matemática Aplicada e Ingeniería Electrónica/Telecomunicaciones.
- *Dimensión temporal:* Se analiza el periodo de transición actual (era NISQ), considerando las tendencias en adopción curricular y laboral desarrolladas en los últimos cinco años y proyectadas hacia la próxima década.
- *Enfoque metodológico:* Corresponde a un estudio cuali-cuantitativo de carácter descriptivo y propositivo, respaldado por la revisión sistemática

de literatura, el análisis comparado de planes de estudio (*curriculum mapping*) y el levantamiento de percepción de docentes e investigadores del área.

- *Delimitación conceptual:* La obra se enfoca estrictamente en la dimensión formativa e instruccional de la computación cuántica, dejando fuera los desarrollos teóricos puros de la física de partículas o el diseño de bajo nivel de hardware cuántico, salvo en lo relativo a sus implicaciones didácticas.

Con esta estructura, este libro busca constituirse en una herramienta teórica y práctica indispensable para autoridades académicas, comités de diseño curricular y docentes universitarios comprometidos con la actualización y vanguardia de la educación superior. La transición hacia la era cuántica no representa únicamente un avance en la capacidad de cómputo, sino una reconfiguración estructural del mercado laboral y de la infraestructura tecnológica global. A medida que sectores estratégicos —como la ciberseguridad, la logística, la industria farmacéutica, la ciencia de materiales y los servicios financieros— incorporan el paradigma cuántico para resolver problemas complejos de optimización y simulación, se genera una demanda acelerada de profesionales capacitados en algorítmica y programación cuántica.

Actualmente, existe una brecha sustancial entre la velocidad a la que evoluciona el hardware y el software cuánticos y la disponibilidad de talento humano capacitado para operarlos. Si las instituciones de educación superior no responden con agilidad a esta brecha, se corre el riesgo de intensificar la dependencia tecnológica en las regiones en desarrollo y limitar la participación activa de sus graduados en las industrias de vanguardia. La presente obra se

justifica en la necesidad de orientar a las universidades para que formen profesionales no solo capaces de consumir tecnologías cuánticas, sino de liderar su desarrollo y aplicación en el entorno productivo.

En consecuencia, esta obra proporciona a decanos, directores de programa, comités de acreditación y cuerpo docente una fundamentación conceptual y metodológica sólida para tomar decisiones informadas sobre la actualización de la oferta académica, asegurando que la educación superior responda con oportunidad, rigor y visión prospectiva a los grandes desafíos del siglo XXI.

Capítulo 1

Estrategias de integración de la computación cuántica en el currículo universitario: un análisis global y regional en la era posclásica

El advenimiento de la computación cuántica representa uno de los desafíos más profundos para la educación superior contemporánea. No se trata simplemente de la adición de una nueva arquitectura de procesamiento, sino de una reestructuración fundamental de los cimientos lógicos y matemáticos sobre los cuales se ha construido la ciencia de la computación durante el último siglo.

La transición de los bits clásicos a los qubits, gobernados por los principios de la mecánica cuántica como la superposición, el entrelazamiento y la interferencia, exige una revisión exhaustiva de las mallas curriculares de pregrado y posgrado.

En este contexto, las instituciones académicas líderes a nivel mundial han comenzado a desplazar sus enfoques desde la física teórica pura hacia una disciplina de ingeniería y computación aplicada, preparando el terreno para una fuerza laboral capaz de operar en la era de los sistemas cuánticos ruidosos de escala intermedia (NISQ) y en la futura era de la computación

cuántica tolerante a fallos (Bien et al., 2023).

Evolución de los marcos curriculares y el paradigma CS2023

La estandarización de la enseñanza de la informática ha dado un giro significativo con la publicación de las directrices curriculares CS2023, una iniciativa conjunta de la Association for Computing Machinery (ACM), la IEEE Computer Society (IEEE-CS) y la Association for the Advancement of Artificial Intelligence (AAAI). Este marco reemplaza al estándar CS2013 y propone un cambio de paradigma: del modelo basado en el conocimiento al modelo basado en la competencia.

El marco CS2023 define la competencia como la intersección entre conocimientos, habilidades y disposiciones profesionales. Para la computación cuántica, esto implica que un egresado no solo debe poseer el conocimiento teórico de los espacios de Hilbert, sino también la habilidad técnica para implementar algoritmos en hardware real o simulado y la disposición para adaptarse a un campo en constante evolución (López et al., 2025).

El currículo moderno se divide ahora en horas núcleo de Ciencias de la Computación (CS Core), horas núcleo del Área de Conocimiento (KA Core) y temas no esenciales (véase la tabla 1).

Para Martínez et al. (2022), la adquisición de estos conocimientos implica prácticas distintas según el nivel y una secuencia que refleja su complejidad. En las experiencias de enseñanza en las CC, se analizará y valorará el carácter histórico y geopolítico de la disciplina, evidenciando que

el avance en computación depende en gran medida de los financiamientos estatales a actividades socio-productivas, de la necesidad de resolver problemas específicos de los avances tecnológicos en el campo, en electrónica, y del conocimiento que generan las diferentes comunidades.

Tabla 1: El modelo de competencia en la educación cuántica

Área de Conocimiento en CS2023	Temas Relacionados con Cuántica	Evolución respecto a CS2013
Fundamentos Matemáticos y Estadísticos (MSF)	Álgebra lineal compleja, probabilidad cuántica, matrices de densidad.	Ampliación más allá de las estructuras discretas tradicionales para incluir cálculo multivariable y probabilidad avanzada.
Seguridad (SEC)	Criptografía poscuántica (PQC), protocolos de distribución de claves cuánticas (QKD).	Énfasis en la vulnerabilidad de RSA y ECC ante el algoritmo de Shor y la transición hacia estándares de seguridad resistentes.
Desarrollo de Plataformas Especializadas (SPD)	Arquitecturas NISQ, control clásico de hardware cuántico, mitigación de errores.	Reconocimiento de la computación cuántica como una plataforma especializada con requisitos de programación y hardware únicos.
Inteligencia Artificial (AI)	Quantum Machine Learning, algoritmos híbridos cuántico-clásicos.	Integración de técnicas de aprendizaje profundo con la capacidad de procesamiento cuántico para la optimización y el reconocimiento de patrones.

Este enfoque permite a los programas universitarios seleccionar las

áreas de enfoque que mejor se alineen con sus fortalezas institucionales, reconociendo que es cada vez más difícil que un solo programa sea todo para todas las personas. La inclusión de la computación cuántica en las recomendaciones de la ACM asegura que los estudiantes de pregrado desarrollen una apreciación adecuada de la naturaleza cuántica del procesamiento de información desde las etapas iniciales de su formación (López et al., 2025).

Fundamentos matemáticos y físicos en el currículo universitario

La barrera de entrada para la computación cuántica ha sido tradicionalmente la física teórica profunda. Sin embargo, los nuevos enfoques pedagógicos buscan desmitificar el campo mediante una sólida base en álgebra lineal aplicada y una introducción intuitiva a la mecánica cuántica centrada en la información (Castrillón et al., 2014).

El qubit y la representación de estados

El concepto central es el qubit, la unidad básica de información cuántica. A diferencia del bit clásico, un qubit puede existir en una superposición de los estados base $|0\rangle$ y $|1\rangle$. Matemáticamente, esto se representa como un vector unitario en un espacio de Hilbert complejo de dos dimensiones:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

Donde α y β son amplitudes de probabilidad complejas que satisfacen la condición de normalización $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. El currículo debe enfatizar la visualización de estos estados en la esfera de Bloch, donde los ángulos polar θ y azimutal ϕ definen la posición del qubit en la superficie de la esfera, proporcionando una intuición geométrica fundamental antes de avanzar hacia sistemas multiqubit.

Requisitos matemáticos previos y transversales

Para que un estudiante sea exitoso en un curso de Ciencia de la Información Cuántica (QIS), las instituciones suelen exigir una base rigurosa en:

- **Álgebra Lineal:** Operaciones con vectores y matrices, espacios de Hilbert, producto tensorial (para sistemas de múltiples qubits), operadores hermitianos y unitarios, y descomposición en valores propios.
- **Cálculo y Probabilidad:** Fundamentos para entender la evolución de los estados bajo la ecuación de Schrödinger y la naturaleza probabilística de la medición cuántica.
- **Programación en Python:** El lenguaje estándar para el desarrollo cuántico, especialmente para el uso de marcos como Qiskit (IBM), Cirq (Google) y PennyLane (Xanadu).

Algoritmos cuánticos: el núcleo del estudio avanzado

El valor pedagógico de la computación cuántica reside en demostrar problemas que son intratables para los ordenadores clásicos. El currículo universitario se estructura típicamente alrededor de una jerarquía de algoritmos que ilustran diferentes aspectos de la ventaja cuántica (La Cour, 2023) (véase la tabla 2).

Algoritmos de consulta y oráculo

Los estudiantes suelen comenzar con algoritmos de oráculo que, aunque artificiales, proporcionan una prueba matemática clara de la superioridad cuántica en términos de complejidad de consulta:

- **Algoritmo de Deutsch-Jozsa:** Demuestra cómo una sola consulta cuántica puede determinar si una función es constante o balanceada, mientras que el caso clásico requiere múltiples evaluaciones.
- **Algoritmo de Simon:** Introduce la idea de encontrar periodos en funciones, sentando las bases para algoritmos más complejos como el de Shor.

Búsqueda y Factorización: Grover y Shor

Estos representan el estándar de oro del currículo cuántico debido a sus aplicaciones prácticas y su impacto en la criptografía.

- **Algoritmo de Grover:** Proporciona una aceleración cuadrática para la

búsqueda en bases de datos no estructuradas. Para un conjunto de N elementos, Grover encuentra el objetivo en $O(\sqrt{N})$ pasos, en comparación con $O(N)$ en computación clásica.

- **Algoritmo de Shor:** Permite la factorización de números enteros en tiempo polinomial, lo que amenaza directamente la seguridad de los esquemas de cifrado RSA. Su enseñanza requiere profundizar en la transformada de Fourier cuántica (QFT) y en la estimación de fase, conceptos que son transversales a muchas otras aplicaciones cuánticas.

Tabla 2: Algoritmos cuánticos: el núcleo del estudio avanzado

Algoritmo	Función Principal	Aceleración Cuántica	Área de Aplicación
Grover	Búsqueda en bases de datos no estructuradas.	Cuadrática ($O(\sqrt{N})$)	Criptografía simétrica, optimización, búsqueda.
Shor	Factorización de enteros y logaritmo discreto.	Exponencial	Ruptura de RSA/ECC, ciberseguridad.
VQE / QAOA	Optimización de energía moléculas y problemas combinatorios.	Heurística (potencial ventaja)	Química cuántica, Finanzas, Logística.

HHL	Resolución de sistemas de ecuaciones lineales.	de Exponencial	Ingeniería, dinámica de fluidos, Big Data.
-----	--	----------------	--

Modalidades de hardware y experimentación en el laboratorio

Un currículo de computación cuántica que solo se centre en la teoría corre el riesgo de desconectarse de los desafíos de ingeniería del mundo real. Por ello, los programas líderes integran laboratorios que exponen a los estudiantes a las diversas modalidades de implementación de qubits.

Tecnologías líderes en el currículo

Las universidades deben decidir si enfocan su enseñanza en una sola tecnología o proporcionan una visión general de los ecosistemas actuales ²:

1. **Circuitos Superconductores:** Utilizados por IBM y Google. Se basan en el uso de uniones Josephson y transmones enfriados a temperaturas de milikelvin. Son populares en la enseñanza debido al acceso gratuito a través de la nube (IBM Quantum Experience).
2. **Iones Atrapados:** Tecnologías de Quantinuum e IonQ que emplean campos electromagnéticos para confinar iones. Destacan por su alta fidelidad de puertas y tiempos de coherencia largos, permitiendo a los estudiantes explorar circuitos más profundos.

3. **Fotónica:** La computación cuántica óptica (Xanadu) permite operar a temperatura ambiente en algunos componentes y es ideal para enseñar computación cuántica de variables continuas.
4. **Átomos Neutros:** Sistemas como los de Pasqal o QuEra que emplean pinzas ópticas. Son fundamentales en cursos que se centran en la simulación cuántica de materiales.

El rol de los laboratorios virtuales y la nube

Dada la imposibilidad financiera de que cada universidad posea su propio ordenador cuántico, el modelo educativo se basa en el acceso a través de la nube (Mero y Macías, 2025). Plataformas como Amazon Braket, IBM Quantum y Microsoft Azure Quantum permiten a los estudiantes enviar sus circuitos a dispositivos reales en EE. UU., Europa o Asia desde su navegador en cualquier lugar del mundo. Los laboratorios prácticos suelen incluir:

- **Tomografía de estado cuántico:** Para reconstruir el estado de un qubit después de una operación.
- **Experimentos de mitigación de errores:** Para entender el impacto del ruido y la decoherencia (T_1 y T_2) en la fidelidad de los resultados.
- **Diseño de puertas personalizadas:** utilizando herramientas de bajo nivel como Qiskit Metal para la simulación de microchips cuánticos.

Benchmarking global: programas líderes y centros de excelencia

La educación en computación cuántica está geográficamente

distribuida, pero con nodos de alta concentración en Norteamérica, Europa y Asia, donde la inversión pública y privada ha creado ecosistemas de aprendizaje únicos.

Norteamérica: el eje de la innovación industrial

En los Estados Unidos, universidades como el MIT, Caltech y Stanford lideran la integración de la cuántica desde el pregrado. El MIT, a través de su Centro de Ingeniería Cuántica, ofrece una de las series de cursos más completas del mundo (8.0.x), cubriendo desde los fundamentos hasta algoritmos avanzados y corrección de errores. La Universidad de Chicago es otro actor clave con su Chicago Quantum Exchange, que conecta la academia con los Laboratorios Nacionales de Argonne y Fermilab, proporcionando a los estudiantes oportunidades de investigación únicas.

Canadá ha posicionado a la Universidad de Waterloo como una potencia global. Financiado en parte por el creador de BlackBerry, Mike Lazaridis, el Institute for Quantum Computing (IQC) ofrece programas interdisciplinarios que combinan física, ingeniería y matemáticas, con un fuerte enfoque en el emprendimiento y las startups cuánticas.

En el Reino Unido, la Universidad de Oxford y el University College London (UCL) ofrecen doctorados en ingeniería cuántica a través de centros de formación doctoral (CDT), que enfatizan la transición de la teoría a la aplicación comercial. Suiza, con la ETH Zurich, destaca por su enfoque en la ingeniería de precisión y dispositivos de qubits de estado sólido.

En Asia, la Universidad de Ciencia y Tecnología de China (USTC) ha establecido récords mundiales en comunicación cuántica satelital y

supremacía cuántica. Su currículo es altamente especializado y está profundamente integrado con las metas nacionales de soberanía tecnológica (véase la tabla 3).

Tabla 3: Europa y Asia: modelos de colaboración y estado

País	Institución Destacada	Enfoque Principal	Iniciativa Clave
EE. UU.	MIT / Caltech	Algoritmos, teoría y hardware experimental.	MIT Center for Quantum Engineering.
Canadá	Universidad de Waterloo	Interdisciplinaria y ecosistema comercial.	Institute for Quantum Computing (IQC).
Reino Unido	Oxford / Bristol	Ingeniería cuántica y aplicaciones comerciales.	National Quantum Technologies Programme.
Alemania	LMU / TUM München	Física cuántica y software aplicado.	Munich Quantum Valley.
China	USTC	Metrología, satélites y computación a escala.	Hefei National Laboratory.
Suiza	ETH Zurich	Dispositivos cuánticos y física del estado sólido.	Quantum Center ETH.

La computación cuántica en el contexto de América Latina

América Latina enfrenta el desafío de integrar estas tecnologías en un entorno con limitaciones presupuestarias pero con un capital humano altamente resiliente. La estrategia regional se ha centrado en la creación de redes de colaboración y en el aprovechamiento de recursos de código abierto.

El caso de Perú: del pregrado a la investigación de frontera

En Perú, la transición hacia la computación cuántica está siendo impulsada por universidades nacionales y privadas líderes, con un enfoque particular en la Facultad de Ciencias y la Facultad de Ingeniería de cada institución.

Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)

La UNI ha integrado formalmente el curso Introducción a la Computación Cuántica (CC028 / CC0F8) en su plan de estudios de Ciencia de la Computación e Ingeniería Física. El curso tiene un enfoque riguroso, requiriendo conocimientos previos en electromagnetismo y análisis numérico avanzado. La investigación en la UNI también aborda temas avanzados como la corrección de errores mediante códigos estabilizadores.

Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC) y QuantumHub Perú

La UTEC ha adoptado un rol más dinámico a través de QuantumHub Perú (QHub), una plataforma de aprendizaje que busca democratizar el conocimiento cuántico en la región. QHub ofrece cursos estructurados de más

de 16 semanas para estudiantes universitarios y de secundaria, divididos en módulos que cubren física, matemáticas y programación. Su estructura organizativa en departamentos (Investigación, Académico, Innovación, Relaciones Públicas y Comunidad) refleja un modelo de ecosistema completo más que un simple curso universitario.

Otras iniciativas peruanas

- **PUCP:** La Pontificia Universidad Católica del Perú participa en redes globales como el IBM Quantum Fall Fest, fomentando la creación de comunidades de estudiantes interesados en el desarrollo con Qiskit. Se han identificado propuestas curriculares para incluir la computación cuántica dentro de la ingeniería de materiales para tareas de simulación molecular.
- **UPC:** Siguiendo los estándares de la ACM, la UPC incluye temas de computación de alto rendimiento y criptografía que sientan las bases para el estudio de la computación cuántica en los ciclos finales de la carrera de Ciencia de la Computación.
- **UNIR:** Ofrece una maestría universitaria 100% online en computación cuántica reconocida por la SUNEDU, permitiendo a profesionales peruanos especializarse en algoritmos de optimización, transmones y aprendizaje automático cuántico en un año académico.

Esfuerzos regionales en Colombia, Uruguay y México

En Colombia, la Universidad Nacional ha formado uno de los grupos de investigación más grandes de la región, alineando su enseñanza con el Marco de Competencias Europeo. En Uruguay, la Universidad de Montevideo (UM) se

destaca por su alianza con Microsoft, integrando Q# y el Quantum Development Kit en su currículo de ingeniería. México, a través de redes como QMexico y colaboraciones con la UNAM y el Tecnológico de Monterrey, ha capacitado a cientos de estudiantes a través de escuelas de verano y hackatones.

Estrategias de vinculación con la industria y el rol de las Big Tech

La educación cuántica moderna es inseparable de la industria. Las grandes empresas tecnológicas han asumido un rol activo en la formación de la futura fuerza laboral, proporcionando no solo herramientas sino también el currículo mismo.

Programas de educadores de IBM y Microsoft

IBM Quantum ha sido pionero con su programa de educadores, que ofrece acceso prioritario a sistemas cuánticos y un kit de herramientas curriculares que los profesores pueden integrar fácilmente en sus cursos existentes. Iniciativas como el Qiskit in Class permiten que un curso de física o informática tradicional incluya módulos cuánticos prácticos sin necesidad de rediseñar toda la malla.

Microsoft, por su parte, se enfoca en el desarrollo de Curriculum Partners. Al proporcionar recursos como el lenguaje Q# y bibliotecas de algoritmos listas para usar, Microsoft permite que universidades con menos recursos de hardware puedan centrarse en la lógica de programación y en las

aplicaciones de alto nivel.

El ecosistema de startups y el mercado laboral

La formación universitaria ahora debe considerar las salidas profesionales fuera de la academia. Empresas como Xanadu, Rigetti, Quantinuum e IonQ buscan perfiles que no solo entiendan la física, sino que dominen el desarrollo de software de pila completa (full-stack), desde el control del pulso criogénico hasta la interfaz de usuario de las aplicaciones finales.

Aplicaciones interdisciplinarias: el futuro del currículo

La computación cuántica está dejando de ser un curso electivo para convertirse en una herramienta dentro de otras disciplinas. Esto ha llevado a la creación de módulos cuánticos en facultades que tradicionalmente no estaban vinculadas a la física avanzada (La Cour, 2023).

Química, farmacia y ciencia de materiales

La simulación de moléculas pequeñas y grandes para el descubrimiento de fármacos y nuevos materiales es la aplicación más cercana al mercado. Los currículos de química ahora comienzan a incluir el algoritmo de resolución de valores propios cuánticos variacionales (VQE), permitiendo a los estudiantes simular energías de enlace con una precisión que supera las aproximaciones clásicas (Hartree y Kim, 2023).

En los MBA y programas de ingeniería financiera, se exploran

algoritmos cuánticos para la optimización de carteras, la evaluación de riesgos (Monte Carlo cuántico) y la detección de fraudes. Del mismo modo, en logística, el uso de recocido cuántico (Quantum Annealing) para resolver problemas del viajante o rutas de entrega es un área de estudio creciente (véase la tabla 4).

Tabla 4: Finanzas y optimización logística

Sector	Aplicación Cuántica	Beneficio Esperado
Farmacéutico	Simulación de plegamiento de proteínas e interacción ligando-receptor.	Aceleración en el descubrimiento de fármacos y reducción de costos de laboratorio.
Energía	Simulación de nuevos catalizadores para la fijación de nitrógeno y captura de carbono.	Procesos industriales más sostenibles y eficientes.
Finanzas	Optimización de carteras y fijación de precios de derivados en tiempo real.	Gestión de riesgo superior y arbitraje de alta velocidad.
Logística	Optimización de rutas de última milla y gestión de almacenes.	Reducción de emisiones de CO_2 y tiempos de entrega.

Desafíos pedagógicos y la Brecha Cuántica

La integración exitosa de la computación cuántica enfrenta obstáculos estructurales que las universidades deben abordar para evitar una nueva forma de exclusión tecnológica.

La preparación de los educadores

Existe una escasez de profesores capacitados que puedan navegar entre la física cuántica y la ciencia de la computación. Muchas instituciones dependen de esfuerzos aislados de investigadores individuales en lugar de una estrategia institucional sólida. La capacitación de educadores es, por tanto, la prioridad número uno para escalar la educación cuántica.

Inclusividad y accesibilidad

El riesgo de que la computación cuántica se convierta en una tecnología exclusiva de los países desarrollados es real. Las universidades en regiones como América Latina deben enfocarse en recursos de acceso abierto y en la formación de comunidades locales para asegurar que sus estudiantes sean creadores de tecnología y no solo consumidores. El uso de idiomas locales (como el español y el portugués) en los materiales didácticos es fundamental para reducir la fricción en el aprendizaje.

Ética y responsabilidad social (SEP)

En línea con el área de Sociedad, Ética y Profesionalismo de CS2023, los estudiantes deben reflexionar sobre las implicaciones de la supremacía cuántica. Esto incluye discusiones sobre la soberanía de los datos en la nube

cuántica, el impacto ambiental del enfriamiento de hardware y el potencial de las tecnologías cuánticas para exacerbar las desigualdades económicas si no se gestionan de manera equitativa (Rath y Date, 2024).

La computación cuántica ya no es una promesa futura, sino una realidad académica que exige acción inmediata. La transición de los programas universitarios debe ser estratégica, interdisciplinaria y colaborativa. Para las universidades que buscan integrar la computación cuántica, el camino sugerido incluye:

1. **Alinear el currículo con marcos internacionales:** Adoptar las recomendaciones de CS2023 y el Marco de Competencias Europeo para asegurar la movilidad y empleabilidad de los graduados.
2. **Fomentar alianzas público-privadas:** Aprovechar los programas de educadores de IBM, Microsoft y AWS para acceder a hardware y capacitación de vanguardia.
3. **Iniciar con enfoques modulares:** Integrar conceptos cuánticos en cursos existentes de matemáticas y algoritmos antes de lanzar programas de grado completos, permitiendo una transición suave para el profesorado y los estudiantes.
4. **Promover la investigación aplicada regional:** Enfocar los proyectos de tesis y laboratorios en problemas locales donde la cuántica pueda ofrecer una ventaja competitiva, como en la minería, la energía o la logística regional.

La universidad del siglo XXI tiene la responsabilidad de preparar a los ciudadanos para un mundo donde la lógica clásica ya no es el único límite. La

alfabetización cuántica será, en pocos años, una competencia tan fundamental como lo es hoy la programación clásica o el análisis de datos. Aquellas instituciones que logren navegar esta transición con éxito no solo formarán mejores profesionales, sino que serán los motores de la próxima gran revolución industrial y científica.

Capítulo 2

Análisis curricular en ciencias de la información cuántica: superposición, entrelazamiento y la esfera de Bloch

La transición de la mecánica cuántica desde los fundamentos de la física teórica hacia las aplicaciones prácticas en la ingeniería y la computación ha generado una necesidad imperativa de reestructurar los marcos educativos a nivel universitario y secundario. La denominada segunda revolución cuántica no solo demanda una comprensión profunda de los fenómenos subatómicos, sino también la capacidad de manipular estos principios para procesar información de formas que superan los límites clásicos.

En este contexto, el diseño curricular debe centrarse en tres pilares fundamentales que actúan como puentes cognitivos entre la intuición macroscópica y la realidad cuántica: la superposición, el entrelazamiento y la representación geométrica a través de la esfera de Bloch. Estos conceptos no son meras abstracciones matemáticas; representan el núcleo operativo de algoritmos que prometen revolucionar la criptografía, la simulación molecular y la optimización de sistemas complejos.

El paradigma de la superposición en la educación en computación cuántica

La superposición cuántica constituye el punto de partida esencial en cualquier currículo de ciencias de la información cuántica (QIS, por sus siglas en inglés). A diferencia de un bit clásico, que se encuentra restringido a estados discretos y mutuamente excluyentes de 0 o 1, un qubit puede existir en una combinación lineal de ambos estados simultáneamente. Esta propiedad permite una forma inherente de paralelismo cuántico, donde una sola operación sobre un registro de qubits superpuestos puede procesar múltiples entradas candidatas a la vez.

Fundamentación matemática y notación de Dirac

El currículo estándar comienza con la introducción de la notación de Dirac (bra-ket), que proporciona un lenguaje simbólico para manejar vectores en espacios de Hilbert complejos. Un estado puro $|\psi\rangle$ se define mediante la ecuación:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

Donde α y β son amplitudes de probabilidad complejas que cumplen con la condición de normalización $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. Esta restricción matemática asegura que la probabilidad total de encontrar el sistema en uno de los estados base tras una medición sea la unidad. La enseñanza de este concepto suele enfrentar desafíos pedagógicos significativos, ya que los

estudiantes tienden a aplicar intuiciones clásicas de probabilidad que entran en conflicto con la naturaleza indeterminista del estado cuántico antes de la medición.

Para abordar estas dificultades, modelos curriculares como los de la Universidad Estatal de Luisiana (LSU) han implementado el marco Quantum Without Linear Algebra (QWLA). Este enfoque permite a los estudiantes interactuar con conceptos de superposición y medición mediante representaciones de diccionario y simulaciones ligeras en Python antes de sumergirse en el formalismo de matrices. El objetivo es construir una fluidez conceptual básica que facilite la transición posterior hacia herramientas más complejas como IBM Qiskit.

Dinámica de la superposición: la compuerta Hadamard

En el diseño de circuitos cuánticos, la superposición se genera típicamente mediante la aplicación de la compuerta de Hadamard (H). Esta operación es fundamental en casi todos los algoritmos cuánticos conocidos, ya que transforma los estados de la base computacional $|0\rangle$ en estados de superposición equilibrada.

Estado de Entrada	Operación (Compuerta H)	Estado de Salida
(Superposición)	Probabilidad de Medición ($ 0\rangle/ 1\rangle$)	

:---	:---	:---	:---	
------	------	------	------	--

$ 0\rangle$	$H 0\rangle$	$ +\rangle = \frac{ 0\rangle+ 1\rangle}{\sqrt{2}}$	50% / 50%	
-------------	--------------	--	-----------	--

$$|1\rangle \quad H|1\rangle \quad |-\rangle = \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \quad | 50\% / 50\% |$$

$$|+\rangle \quad H|+\rangle \quad |0\rangle \quad | 100\% / 0\% |$$

La capacidad de la compuerta H para deshacer una superposición si se aplica dos veces resalta la importancia de la fase en la interferencia cuántica, permitiendo que las amplitudes se sumen constructiva o destructivamente.

La medición y el colapso del Estado

Un componente crítico del currículo es el postulado de la medición. Se enseña que la medición no es un acto pasivo de observación, sino una intervención que perturba el sistema, forzando al qubit a colapsar en uno de los estados base permitidos clásicamente. Esta fragilidad de los estados cuánticos es lo que dicta el diseño de algoritmos y protocolos de comunicación. Los estudiantes deben aprender a razonar sobre distribuciones de probabilidad y valores esperados, utilizando el teorema de Born para predecir los resultados de experimentos repetidos (Gokhale et al., 2026).

Analogías como la del salto de cuerda o la moneda giratoria se utilizan frecuentemente para explicar la superposición, pero los instructores deben ser cautelosos al enfatizar que, a diferencia de la moneda clásica, el estado cuántico no posee un valor oculto predeterminado antes de ser observado. La comprensión de esta diferencia es esencial para evitar conceptos erróneos sobre variables ocultas que podrían obstaculizar el aprendizaje posterior sobre la desigualdad de Bell y la no localidad.

Entrelazamiento: correlaciones no locales y sistemas multi-qubit

Si la superposición define la riqueza del estado de un solo qubit, el entrelazamiento es el fenómeno que otorga a la computación cuántica su verdadera ventaja competitiva. Definido como una propiedad de los sistemas compuestos donde el estado global no puede descomponerse en el producto de los estados individuales de sus partes, el entrelazamiento desafía el realismo local clásico (La Cour, 2023)

La paradoja EPR y el teorema de Bell

El currículo universitario de física cuántica suele dedicar secciones extensas a la paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) y las desigualdades de Bell. Este enfoque histórico ayuda a los estudiantes a apreciar la profundidad filosófica y técnica del entrelazamiento. Se analiza el argumento de que, si la mecánica cuántica fuera una teoría completa según los criterios de EPR, cada elemento de la realidad física debería tener una contraparte en la teoría.

La demostración de que la mecánica cuántica viola las desigualdades de Bell es un hito pedagógico. En experimentos simulados o reales, se muestra que las correlaciones entre mediciones realizadas sobre partículas entrelazadas separadas espacialmente superan cualquier límite posible bajo supuestos de variables ocultas locales. Este concepto se introduce mediante el estudio de los estados de Bell, que son los estados máximamente entrelazados de dos qubits.

$$|\Phi^+\rangle = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}$$

$$|\Phi^-\rangle = \frac{|00\rangle - |11\rangle}{\sqrt{2}}$$

$$|\Psi^+\rangle = \frac{|01\rangle + |10\rangle}{\sqrt{2}}$$

$$|\Psi^-\rangle = \frac{|01\rangle - |10\rangle}{\sqrt{2}}$$

El diseño de circuitos para generar estos estados requiere la combinación de una compuerta Hadamard y una compuerta CNOT (Controlled-NOT), lo que permite a los estudiantes visualizar cómo una interacción local puede crear una dependencia global no separable.

Aplicaciones de redes y comunicación cuántica

El entrelazamiento no se enseña únicamente como una curiosidad física, sino como un recurso tecnológico para redes cuánticas. Los currículos modernos integran protocolos específicos que demuestran la utilidad práctica de estas correlaciones.

- **Teletransportación Cuántica:** Permite la transferencia del estado cuántico exacto de un qubit a otro lugar distante mediante el uso de un par entrelazado precompartido y comunicación clásica. Este protocolo es fundamental para enseñar la interacción entre la información cuántica y

los bits clásicos.

- **Codificación Superdensa:** Un protocolo donde se transmiten dos bits clásicos enviando un solo qubit entrelazado, duplicando la capacidad del canal de comunicación bajo ciertas condiciones.
- **Distribución de Claves Cuánticas (QKD):** Utiliza el entrelazamiento o la superposición para garantizar la seguridad de las comunicaciones, ya que cualquier intento de espionaje colapsaría el estado y sería detectado.

La implementación de estos protocolos en entornos como IBM Qiskit o simuladores de red como SeQUeNCe permite a los estudiantes experimentar con conceptos de fidelidad, pérdida de canal y eficiencia de los detectores, conectando la teoría abstracta con las limitaciones del hardware real.

Desafíos en la enseñanza del entrelazamiento

El entrelazamiento introduce dependencias no locales que socavan el razonamiento modular central en la programación clásica. Mientras que en la computación tradicional un programador puede analizar subrutinas de forma aislada, en un sistema cuántico entrelazado, las operaciones sobre una parte del sistema pueden tener efectos inmediatos y observables en otras partes. Esta acción fantasmagórica, como la llamó Einstein, requiere que los estudiantes desarrollen modelos mentales que trasciendan la causalidad local.

Un error común en el aprendizaje es intentar visualizar el entrelazamiento mediante herramientas diseñadas para un solo qubit. Se enfatiza en los materiales curriculares que la esfera de Bloch, aunque poderosa para estados individuales, no puede representar completamente las correlaciones de un sistema multi-qubit (Yang y Kim, 2023). Para estos casos,

se introducen herramientas más avanzadas como matrices de densidad, entropía de entrelazamiento y representaciones jerárquicas como los árboles de descomposición de estados.

La esfera de Bloch: visualización geométrica del estado cuántico

La esfera de Bloch es la herramienta visual más exitosa en la educación de computación cuántica, permitiendo mapear el espacio de estados complejo de un qubit en una superficie esférica tridimensional. Su valor pedagógico radica en proporcionar una interpretación geométrica intuitiva de conceptos que de otro modo serían puramente algebraicos (véase la tabla 5).

Coordenadas y parámetros geométricos

Cualquier estado puro de un qubit puede representarse como un punto en la superficie de una esfera de radio unidad. Los parámetros geométricos clave son:

1. **Ángulo Polar (θ):** Determinado por las amplitudes relativas de los estados $|0\rangle$ y $|1\rangle$. Un valor de $\theta = 0$ corresponde al polo norte ($|0\rangle$), mientras que $\theta = \pi$ corresponde al polo sur ($|1\rangle$).
2. **Ángulo Azimutal (ϕ):** Determinado por la fase relativa entre los componentes del qubit. Este ángulo define la posición a lo largo del ecuador de la esfera.

La relación matemática que vincula estos ángulos con el vector de

estado es:

$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |0\rangle + e^{i\phi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) |1\rangle$$

Es crucial que los estudiantes entiendan por qué se utilizan ángulos medios ($\theta/2$). Geométricamente, esto permite que dos estados que son ortogonales en el espacio de Hilbert (como $|0\rangle$ y $|1\rangle$) se representen como puntos antipodales (opuestos) en la esfera de Bloch, separados por 180° .

Estados puros vs. estados mezclados

Una distinción avanzada pero vital en el currículo es el uso del interior de la esfera para representar estados mezclados.

- **Superficie de la esfera ($|r| = 1$):** Representa todos los estados puros posibles de un sistema de dos niveles.
- **Interior de la Esfera ($|r| < 1$):** Representa estados mezclados que ocurren cuando hay incertidumbre estadística sobre el estado del sistema, a menudo debido a la decoherencia o al entrelazamiento con el entorno.
- **Centro de la Esfera ($|r| = 0$):** Representa el estado máximamente mezclado, donde la probabilidad de medir $|0\rangle$ o $|1\rangle$ es exactamente del 50% y no existe coherencia de fase.

Esta visualización es fundamental para enseñar la purificación de estados, la tomografía cuántica y los efectos del ruido en los procesadores

NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum).

Tabla 5: Visualización geométrica del estado cuántico en la esfera de Bloch

Posición en la Esfera	Representación de Estado	Notación de vector de Bloch
Polo Norte	Estado base	$ 0\rangle$
Polo Sur	Estado base	$ 1\rangle$
Ecuador (Eje X+)	Estado de superposición	$ +\rangle$
Centro de la Esfera	Estado mezclado	máximamente $(0, 0, 0)$

Transformaciones como rotaciones

La esfera de Bloch transforma el aprendizaje de las compuertas cuánticas en un ejercicio de rotación espacial. Las compuertas de Pauli (X, Y, Z) se enseñan como rotaciones de 180° (π radianes) alrededor de sus respectivos ejes.

- La compuerta **X** actúa como un bit-flip, rotando el vector del polo norte

al polo sur.

- La compuerta **Z** actúa como un phase-flip, rotando el vector alrededor del eje Z y cambiando la fase sin alterar la longitud del vector o las probabilidades de medición en la base computacional.
- La compuerta **Hadamard** se visualiza como una rotación combinada que mueve el vector desde el eje Z al eje X, ilustrando la creación de superposición de manera dinámica.

El uso de simuladores interactivos como los de PhET o QuVis permite a los estudiantes ver estas rotaciones en tiempo real, lo que facilita enormemente la comprensión de la evolución del estado cuántico bajo la acción de un circuito.

Implementación curricular: del aula al laboratorio

El diseño de un currículo efectivo en QIS requiere una integración cuidadosa de la teoría con la práctica experimental. Las instituciones líderes están adoptando modelos que priorizan la programación y el uso de hardware cuántico real disponible a través de la nube.

El modelo de aprendizaje integrado en laboratorio

Un enfoque pedagógico exitoso es el utilizado por LSU, que combina instrucción conceptual con programación práctica semanal. Los laboratorios están diseñados para reforzar objetivos específicos:

1. **Exploración de la Superposición:** Uso de Qiskit para crear estados

superpuestos y verificar las estadísticas de medición tras miles de disparos (shots).

2. **Validación del Entrelazamiento:** Construcción de circuitos de Bell y realización de mediciones de correlación para observar la violación de la intuición clásica.
3. **Visualización en la esfera de Bloch:** Uso de herramientas de visualización de Qiskit para mapear la trayectoria del vector de estado a medida que se aplican diferentes secuencias de compuertas.

Este modelo permite a los estudiantes observar los desajustes entre sus expectativas y el comportamiento cuántico real, lo que fomenta la reflexión y el refinamiento de sus modelos mentales. Además, introduce tempranamente el concepto de ruido y mitigación de errores, ya que los resultados en hardware real rara vez coinciden perfectamente con las predicciones teóricas ideales.

Herramientas de simulación y visualización

La disponibilidad de herramientas de software abiertas ha democratizado el acceso a la educación cuántica (Espinosa, 2024):

- **IBM Qiskit:** Es el marco de trabajo más utilizado, ofreciendo una biblioteca exhaustiva de clases para representar estados, operadores y circuitos. Su libro de texto interactivo se ha convertido en un estándar curricular.
- **PhET Interactive Simulations:** Ofrece simulaciones de medición cuántica que permiten a los estudiantes interactuar con monedas cuánticas y polarización de fotones, facilitando la comprensión visual de la probabilidad y el colapso del estado.

- **QuVis (University of St Andrews):** Proporciona visualizaciones detalladas de la esfera de Bloch para partículas de espín 1/2, permitiendo ajustar los ángulos θ y observar los cambios en las probabilidades de medición en diferentes ejes.
- **QuVI (LabVIEW):** Un marco de trabajo que utiliza el paradigma de flujo de datos para representar circuitos cuánticos, lo que resulta intuitivo para estudiantes de ingeniería familiarizados con entornos de programación gráfica.

Estas herramientas eliminan las barreras de entrada al permitir que los estudiantes experimenten con la lógica cuántica sin necesidad de construir hardware físico costoso y complejo.

Requerimientos de la fuerza laboral y estándares curriculares

El crecimiento acelerado del campo ha llevado a organizaciones como la Sociedad Americana de Física (APS) y la Asociación Americana de Profesores de Física (AAPT) a definir directrices para el currículo de laboratorio de pregrado. El objetivo es preparar a los estudiantes para una variedad de roles que van desde la investigación teórica hasta la ingeniería de sistemas cuánticos (véase la tabla 6). El análisis de la demanda industrial revela que los empleadores buscan una combinación de habilidades teóricas, experimentales y computacionales.

Tabla 6: Habilidades críticas para el estudiante de QIS

Categoría de Habilidad	Competencias Específicas	Relevancia Curricular
Instrumentación	Operación de láseres, criogenia, sistemas de vacío	Esencial para roles de hardware y fabricación.
Análisis de Datos	Estadística, análisis de incertidumbre, depuración de código	Crítico para validar resultados de algoritmos y hardware.
Programación	Python, Qiskit, C++, algoritmos numéricos	Necesario para el diseño de software y simulación.
Fundamentos Teóricos	Álgebra lineal, mecánica cuántica, hamiltonianos	Proporciona la base científica para la innovación.

Se enfatiza que la educación no debe limitarse a la teoría; la capacidad de solucionar problemas (troubleshooting) en experimentos de laboratorio y depurar código cuántico son habilidades altamente valoradas.

Interdisciplinariedad y diversidad

Un currículo exitoso en QIS debe reconocer la naturaleza interdisciplinaria del campo. Los estudiantes pueden provenir de la física, la informática, la ingeniería eléctrica o la química. Los educadores deben ser capaces de cerrar las brechas de conocimiento, proporcionando recursos específicos para aquellos que son fuertes en programación pero débiles en álgebra lineal, o viceversa.

Además, existe un esfuerzo global para inspirar interés en la tecnología cuántica desde la educación primaria y secundaria (K-12). Al introducir conceptos fundamentales como la superposición a través de juegos y analogías apropiadas para la edad, se busca desmitificar el campo y construir una reserva de talento más diversa y amplia. El objetivo a largo plazo es que la percepción pública de la QIS pase de ser algo extraño y fantasmal a ser una parte familiar y comprensible de la ciencia y la tecnología modernas.

Desafíos pedagógicos: de la intuición a la formalidad

A pesar de las herramientas disponibles, el aprendizaje de la computación cuántica sigue siendo un desafío debido a la necesidad de reconfigurar los modelos mentales existentes. Los estudiantes a menudo traen intuiciones clásicas sobre el estado y el determinismo que deben ser sistemáticamente desafiadas a través de conflictos cognitivos dirigidos (Sun, et al., 2024).

Superando la barrera del álgebra lineal

Uno de los mayores obstáculos para los estudiantes de informática es el requisito previo de un álgebra lineal avanzada. Muchos cursos tradicionales construyen los fundamentos cuánticos desde las matrices y los espacios vectoriales, lo que puede alienar a aquellos sin una base matemática sólida. Los nuevos enfoques curriculares proponen una aproximación en capas (scaffolded), donde se presentan primero analogías intuitivas y representaciones visuales (como la esfera de Bloch) antes de introducir el

formalismo matemático completo.

Por ejemplo, enseñar la superposición a través de la interferencia de ondas es una estrategia efectiva, ya que los estudiantes suelen tener alguna experiencia previa con fenómenos ondulatorios clásicos. Al conectar la probabilidad de encontrar un fotón con el patrón de interferencia en un experimento de doble rendija, se proporciona un anclaje conceptual sólido para la noción de amplitudes cuánticas.

El Problema de la visualización en sistemas grandes

Otro desafío importante es la limitación de las herramientas de visualización a medida que el sistema crece. La esfera de Bloch es perfecta para un solo qubit, pero la visualización de un sistema de dos qubits requiere un espacio de 15 dimensiones, lo que hace imposible una representación geométrica única e intuitiva. Los currículos deben enseñar a los estudiantes cuándo confiar en las visualizaciones geométricas y cuándo es necesario recurrir exclusivamente al formalismo algebraico y a las matrices de densidad (Qerimi et al., 2025).

Se sugiere el uso de proyecciones de subespacio o esferas de Bloch separadas como estrategias prácticas para visualizar sistemas más grandes, aunque siempre advirtiendo sobre las limitaciones de estas representaciones para capturar el entrelazamiento completo.

El desarrollo de contenidos curriculares centrados en la superposición, el entrelazamiento y la esfera de Bloch es el núcleo de la formación de la próxima generación de científicos e ingenieros cuánticos. La clave para un currículo exitoso radica en el equilibrio entre la accesibilidad conceptual y el

rigor intelectual, integrando la experimentación práctica con la instrucción teórica desde las primeras etapas.

La superposición debe enseñarse no solo como un estado de ambigüedad, sino como una herramienta para el procesamiento paralelo y la interferencia constructiva. El entrelazamiento debe presentarse como un recurso fundamental para la comunicación no local y la computación distribuida. Por último, la esfera de Bloch debe utilizarse como el lenguaje geométrico que permite unificar estos conceptos, proporcionando una intuición espacial sobre la pureza, la fase y las transformaciones unitarias del estado cuántico.

A medida que el hardware cuántico continúa escalando hacia sistemas más estables y potentes, la educación debe evolucionar paralelamente, incorporando temas avanzados como la corrección de errores cuánticos, la decoherencia y el diseño de arquitecturas híbridas cuántico-clásicas. Solo mediante un enfoque educativo holístico, interdisciplinario y centrado en la práctica, se podrá satisfacer la creciente demanda de una fuerza laboral capaz de liderar la revolución de la información cuántica. La alfabetización cuántica, por lo tanto, no es solo un requisito académico, sino una necesidad estratégica para el futuro de la ciencia y la tecnología globales.

Capítulo 3

Algoritmos y metodologías de análisis comparativo con el modelo clásico

La transición hacia la era de la información cuántica ha generado una demanda sin precedentes de marcos educativos robustos que integren la física fundamental, las matemáticas avanzadas y la teoría de la computación. En este contexto, el desarrollo de currículos especializados no solo se centra en la enseñanza de puertas lógicas y circuitos, sino en una reevaluación profunda de la complejidad algorítmica y la ventaja computacional. La designación por parte de las Naciones Unidas de 2025 como el Año Internacional de la Ciencia y Tecnología Cuántica, sumada a los avances en el hardware de escala intermedia ruidosa (NISQ), ha consolidado la necesidad de estandarizar los contenidos pedagógicos para formar a una fuerza laboral capaz de navegar entre paradigmas clásicos y cuánticos.

Fundamentos matemáticos y el cambio de paradigma en la información

El diseño curricular en instituciones de vanguardia como Stanford, MIT y Caltech comienza con un refuerzo riguroso del álgebra lineal compleja y la mecánica cuántica de sistemas de estados finitos. A diferencia de los currículos de informática tradicional, donde los sistemas se modelan mediante estados

discretos y lógica determinista, la computación cuántica exige el dominio de los espacios de Hilbert y la notación de Dirac para representar superposiciones y amplitudes de probabilidad (Castrillón et al., 2014).

La base del currículo se articula en torno a la comprensión de que un bit cuántico o qubit no es simplemente una unidad de almacenamiento, sino un vector en un espacio complejo bidimensional. Los estudiantes deben internalizar que, mientras un sistema clásico de n bits reside en uno de los 2^n estados posibles, un sistema cuántico de n qubits existe en una superposición de todos esos estados simultáneamente, escalando la capacidad del espacio de estados de manera exponencial (Qerimi et al., 2025).

Este fenómeno, junto con el entrelazamiento, constituye el recurso primario que los algoritmos deben explotar para superar los límites de la computación clásica.

La distinción entre el procesamiento clásico y cuántico es fundamental en los currículos para evitar malentendidos sobre el paralelismo cuántico. No se trata de ejecutar múltiples hilos clásicos a la vez, sino de coreografiar patrones de interferencia donde los caminos que conducen a respuestas incorrectas se cancelan destructivamente y los caminos hacia la respuesta correcta se refuerzan constructivamente (véase la tabla 7).

Tabla 7: Comparativa de unidades de información y representación de estados

Atributo	Computación Clásica	Computación Cuántica
Unidad básica	Bit (0 o 1)	Qubit (α)
Espacio de estados	Espacio discreto $\mathbb{Z}_2^n$	Espacio de Hilbert $\mathbb{C}^{2^n}$
Operaciones	Puertas lógicas booleanas	Operadores unitarios (reversibles)
Medición	Determinista (lectura directa)	Probabilística (colapso de estado)
Correlaciones	Independencia o probabilidad clásica	Entrelazamiento no local

La integración de estos conceptos requiere requisitos previos específicos. Los programas de FAU y Stanford exigen conocimientos sólidos en probabilidad discreta, cálculo multivariable y algoritmos clásicos antes de abordar la síntesis de circuitos cuánticos. La formación matemática se extiende a la comprensión de matrices hermitianas, productos tensoriales para sistemas compuestos y la descomposición de Schmidt para caracterizar el entrelazamiento entre subsistemas.

Evolución de operaciones: de la reversibilidad clásica a las puertas cuánticas

Un componente crítico en el currículo de Caltech (ACM 270-1) y del MIT es el estudio de la computación reversible. Puesto que los operadores cuánticos son unitarios (es decir, $U^\dagger U = I$), todas las operaciones cuánticas, excepto la medición, deben ser reversibles. Esto establece un puente pedagógico con la informática clásica, donde se estudian puertas como Fredkin o Toffoli para demostrar que cualquier función booleana clásica puede implementarse de manera reversible antes de ser trasladada al dominio cuántico.

El currículo profundiza en la jerarquía de puertas lógicas, diferenciando entre puertas de un solo qubit (Pauli-X, Y, Z, Hadamard, T, S) y puertas controladas de múltiples qubits (CNOT, CZ, Toffoli). La puerta de Hadamard (H) es quizás la más relevante pedagógicamente, ya que es la encargada de generar superposición a partir de estados de la base computacional, permitiendo la exploración de la ventaja cuántica en algoritmos de consulta (Marchetti et al., 2022).

Jerarquía de puertas y funcionalidad algorítmica

Los estudiantes aprenden a visualizar estas operaciones no solo como matrices complejas, sino como rotaciones en la esfera de Bloch, proporcionando una intuición geométrica del estado de un qubit antes de escalar a sistemas multiqubit donde la visualización directa se vuelve

imposible (véase la tabla 8).

Tabla 8: Evolución y características de las puertas cuánticas

Puerta Cuántica	Operación Matemática	Función en el Algoritmo	Relevancia en el Currículo
Hadamard (H)	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$	Crea superposición equilibrada	Esencial para iniciar cualquier algoritmo cuántico
Pauli-X (X)	$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$	Bit-flip (equivalente a NOT)	Base para la manipulación de estados clásicos
CNOT	Puerta controlada de 2 qubits	Crea entrelazamiento	Fundamental para puertas multiqubit y algoritmos complejos
Puerta T	Rotación de fase $\pi/4$	Proporciona universalidad	Crítica para la computación tolerante a fallos
Toffoli (CCNOT)	Puerta de 3 qubits	Compuerta lógica reversible	Demuestra la capacidad de simular lógica clásica

La enseñanza de estas puertas no es aislada; se integra en el estudio de la compilación y optimización de circuitos. Los estudiantes de Stanford y Georgia Tech utilizan herramientas como Qiskit para mapear algoritmos de alto nivel a conjuntos de puertas nativas de procesadores reales, considerando las restricciones de conectividad y las tasas de error de las puertas de dos qubits (Gokhale et al., 2026).

Paradigmas de algoritmos de consulta y separación de complejidad

El núcleo de la enseñanza de algoritmos se divide tradicionalmente en tres grandes categorías: algoritmos basados en oráculos (consultas), algoritmos algebraicos (transformada de Fourier) y algoritmos de búsqueda. Los algoritmos de consulta como Deutsch-Jozsa, Bernstein-Vazirani y Simon se utilizan para establecer una prueba matemática rigurosa de que el modelo cuántico puede resolver ciertos problemas con menos recursos que cualquier algoritmo clásico.

Algoritmos de Deutsch-Jozsa y Bernstein-Vazirani

El algoritmo de Deutsch-Jozsa se presenta como la primera demostración de una aceleración exponencial en el modelo de consulta. El problema consiste en determinar si una función booleana es constante o balanceada. Mientras que un algoritmo clásico determinista requiere $2^{n-1} + 1$ consultas en el peor de los casos para una función de n bits, el algoritmo cuántico requiere exactamente una consulta. Por su parte, el algoritmo de Bernstein-Vazirani permite encontrar una cadena oculta s tal que $f(x) = s \cdot x \pmod{2}$ en una sola consulta, frente a las n consultas necesarias clásicamente.

Algoritmo de Simon: el precursor de Shor

El algoritmo de Simon ocupa un lugar privilegiado en los currículos de

Oxford y Caltech por ser el primer ejemplo de una aceleración exponencial frente a algoritmos clásicos probabilísticos. Simon busca un periodo oculto s en una función tal que $f(x) = f(y)$ si y solo si $y = x \oplus s$. Clásicamente, este problema requiere $O(2^{n/2})$ consultas (debido a la paradoja del cumpleaños), mientras que el algoritmo cuántico lo resuelve en $O(\text{poly}(n))$ consultas. Este algoritmo introduce la técnica de utilizar la Transformada de Hadamard para extraer información sobre la estructura de un grupo, sentando las bases para el estudio del Problema del Subgrupo Oculto (HSP), que unifica a Shor y otros algoritmos de velocidad exponencial.

El algoritmo de Shor y el impacto en la criptografía moderna

El algoritmo de Shor es, sin duda, el hito más significativo en el currículo de computación cuántica avanzada. Su capacidad para factorizar números enteros y calcular logaritmos discretos en tiempo polinomial amenaza la seguridad de sistemas criptográficos como RSA y curvas elípticas (Sun et al., 2024). El currículo descompone el algoritmo en componentes modulares:

1. **Transformada de Fourier Cuántica (QFT):** Una implementación cuántica de la DFT que opera en tiempo $O(n^2)$ sobre las amplitudes de un estado cuántico.
2. **Estimación de Fase Cuántica (QPE):** Un algoritmo que utiliza la QFT para aproximar los valores propios de un operador unitario, crucial para la búsqueda de orden.

3. **Búsqueda de Orden:** El núcleo del algoritmo que encuentra el periodo de una función de exponenciación modular.

La comparación de complejidad en este punto es central para justificar la inversión en la tecnología. Los currículos comparan el tiempo de ejecución del algoritmo de Shor frente al Cernidor General de Campos Numéricos (GNFS), el algoritmo clásico más eficiente conocido para la factorización (véase la tabla 9).

Tabla 9: Criptografía en Shor

Algoritmo	Tipo de Problema	Complejidad Clásica (Mejor conocida)	Complejidad Cuántica	Aceleración
Shor	Factorización de enteros	$O(e^{1.9(\ln N)^{1/3}(\ln \ln N)})$ (Subexponencial)	$O((\log N)^3)$ (Polinomial)	Exponencial
Shor	Logaritmo discreto	Superpolinomial	Polinomial	Exponencial
Shor	Curva Elíptica	Superpolinomial	Polinomial	Exponencial

El análisis curricular de instituciones como Warwick y FAU también aborda las implicaciones de ciberseguridad, explorando cómo la computación cuántica fuerza el desarrollo de la criptografía post-cuántica y protocolos de distribución de claves cuánticas (QKD) como BB84 y B92.

Búsqueda de Grover y amplificación de amplitud

A diferencia de la aceleración exponencial de Shor, el algoritmo de Grover proporciona una aceleración cuadrática para búsquedas en bases de datos no estructuradas. Clásicamente, encontrar un elemento específico en una lista de tamaño N requiere $O(N)$ operaciones. Grover lo logra en $O(\sqrt{N})$.

El currículo técnico explica este algoritmo mediante el proceso de iteración de Grover, que consiste en:

1. **Reflexión del oráculo:** Invierte la fase del estado de la solución buscada.
2. **Operador de difusión:** Refleja todos los estados respecto a la media de las amplitudes, incrementando la probabilidad de medir la solución correcta.

Un aspecto pedagógico crucial es el estudio del Teorema BBBV, que demuestra que la aceleración cuadrática es el límite óptimo para algoritmos basados en oráculos de búsqueda negra, lo que ayuda a los estudiantes a entender que la computación cuántica no ofrece soluciones instantáneas a todos los problemas NP. Además, se estudian extensiones como el Conteo Cuántico, que utiliza la estimación de fase para determinar el número de soluciones en una base de datos sin encontrarlas explícitamente (Rath y Date, 2024).

Teoría de la complejidad cuántica y sus fronteras

El estudio de algoritmos no está completo sin una base en la teoría de la complejidad computacional. Los currículos modernos introducen clases de complejidad específicas para el modelo cuántico y discuten su relación con las clases clásicas:

- **BQP (Bounded-error Quantum Polynomial time):** El conjunto de problemas resolubles eficientemente por un computador cuántico con una probabilidad de éxito mayor al 75%. Contiene P y se cree que contiene problemas fuera de P, como la factorización.
- **QMA (Quantum Merlin Arthur):** La versión cuántica de NP. Es la clase de problemas para los cuales una solución cuántica puede ser verificada en tiempo polinomial por un verificador cuántico. El problema del Hamiltoniano Local es QMA-completo, análogo a la satisfacibilidad booleana (SAT) en NP.
- **Intersección BQP/NP:** Se enfatiza que, aunque BQP contiene algunos problemas NP, no se cree que BQP cubra todo NP. Problemas como el del Viajante de Comercio (TSP) siguen siendo difíciles para los computadores cuánticos, aunque se pueden aplicar algoritmos de optimización aproximada.

La investigación curricular en Caltech y el MIT explora casos donde la complejidad aumenta drásticamente. Por ejemplo, calcular la energía del estado fundamental de un hamiltoniano con precisión exponencial eleva la

complejidad de QMA a PSPACE, demostrando la sensibilidad de las clases de complejidad a las condiciones de precisión.

Algoritmos en la era NISQ: VQE, QAOA y VQLS

Dado que la computación cuántica tolerante a fallos (FTQC) aún está en desarrollo, gran parte de los currículos actuales (especialmente en Georgia Tech y Stanford) se centran en algoritmos para dispositivos de escala intermedia ruidosos (NISQ). Estos algoritmos suelen ser híbridos, donde un computador cuántico realiza una tarea específica de preparación de estados y medición, mientras que un computador clásico optimiza los parámetros del circuito (Bin et al., 2023).

Variational Quantum Eigensolver (VQE)

El VQE se ha convertido en el estándar para simulaciones de química cuántica y física de materia condensada. El currículo enseña a los estudiantes a formular hamiltonianos moleculares, mapearlos a operadores de espín (puertas de Pauli) y utilizar un ansatz parametrizado para encontrar la energía mínima. Se discuten desafíos prácticos como las mesetas estériles (barren plateaus), donde el gradiente de la función de coste se vuelve exponencialmente pequeño, dificultando la optimización clásica.

Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA)

Específicamente diseñado para problemas de optimización combinatoria, el QAOA utiliza una secuencia de aplicaciones alternas de un hamiltoniano de coste y un hamiltoniano de mezcla. El currículo incluye aplicaciones en logística (problema del viajante), finanzas y programación de

satélites. Los estudiantes aprenden que el QAOA es aproximado porque busca una solución suficientemente buena en lugar de la óptima global, lo que lo hace robusto frente al ruido de los dispositivos actuales.

Variational Quantum Linear Solver (VQLS)

Como alternativa al algoritmo HHL (que requiere FTQC), el VQLS resuelve sistemas de ecuaciones lineales $Ax = b$ mediante métodos variacionales. El currículo técnico detalla cómo la matriz A se descompone en una combinación lineal de unitarios y cómo se entrena un circuito para preparar el estado $|x\rangle$ que satisface la ecuación. Se comparan diferentes optimizadores clásicos como COBYLA, ADAM y AMSGrad para determinar la eficiencia de la convergencia en hardware ruidoso.

Herramientas de programación y el ecosistema de software

El desarrollo de algoritmos en el currículo moderno está estrechamente ligado al aprendizaje de SDKs (Software Development Kits) especializados. Qiskit de IBM es la herramienta más extendida, permitiendo a los estudiantes programar circuitos en Python y ejecutarlos en simuladores locales o en procesadores cuánticos reales a través de la nube (Hailan et al., 2025; Zadid et al., 2026). (véase la tabla 10).

Tabla 10: Frameworks en el currículo cuántico

Framework	Desarrollador	Características Principales	Uso Curricular
Qiskit	IBM	Soporte completo para circuitos, algoritmos y mitigación de errores	Estándar en laboratorios y tareas prácticas
PennyLane	Xanadu	Enfoque en QML (Quantum Machine Learning) y diferenciación automática	Proyectos de investigación en aprendizaje profundo
Cirq	Google	Diseñado para algoritmos NISQ de alta fidelidad	Optimización de puertas a bajo nivel
D-Wave Leap	D-Wave	Plataforma de recocido cuántico (Quantum Annealing)	Resolución de problemas de optimización industrial
IBM Quantum Safe	IBM	Herramientas para la migración a criptografía post-cuántica	Módulos de ciberseguridad avanzada

La integración de estas herramientas permite un enfoque de aprendizaje basado en proyectos. En Stanford (CS269Q), por ejemplo, los

estudiantes realizan proyectos finales que van desde el benchmarking de procesadores cuánticos hasta la implementación de redes neuronales cuánticas (QNN) y autoencoders cuánticos para la compresión de datos.

Metodologías pedagógicas y desarrollo de la fuerza laboral

La enseñanza de la computación cuántica presenta desafíos únicos debido a su naturaleza contraintuitiva y la necesidad de una base interdisciplinaria en física, matemáticas e informática. Los currículos han evolucionado para ofrecer diferentes vías de entrada dependiendo del perfil del estudiante.

Razonamiento diagramático y cálculo ZX

Instituciones como la Universidad de Oxford han introducido el Cálculo ZX, una poderosa herramienta gráfica que permite representar y razonar sobre cómputos cuánticos mediante diagramas de cuerdas en lugar de matrices densas. Este enfoque simplifica la optimización de circuitos y la comprensión de protocolos como la teletransportación, facilitando que los estudiantes de informática sin formación previa en física puedan dominar la lógica cuántica (Bluvstein et al., 2024).

El enfoque minimalista y de física primero

Para niveles de secundaria o introductorios, se ha propuesto un enfoque basado en la polarización de fotones. Este modelo permite introducir conceptos como superposición y medición de forma tangible, utilizando el

experimento de la doble rendija o el juego de la moneda cuántica (Penny Flip Game) para demostrar la ventaja cuántica sin recurrir a números complejos o álgebra de matrices.

Competencias profesionales e industria

El consorcio QED-C y la IEEE han identificado una brecha crítica en el talento cuántico. Los currículos ya no solo deben formar investigadores, sino ingenieros, técnicos y traductores que puedan aplicar estas tecnologías en el sector empresarial. Las recomendaciones curriculares enfatizan el aprendizaje experiencial a través de pasantías, hackathons y el uso de plataformas de simulación en la nube para preparar a los estudiantes para los más de 7,000 puestos de trabajo cuánticos abiertos a nivel mundial.

El análisis exhaustivo de los contenidos curriculares globales revela que el desarrollo de algoritmos cuánticos ha pasado de ser una rama de la física teórica a una disciplina de ingeniería madura. La comparación con los algoritmos clásicos es el hilo conductor que guía la enseñanza, proporcionando el contexto necesario para entender por qué la computación cuántica es transformadora.

La efectividad de un currículo moderno reside en su capacidad para balancear la teoría de la complejidad con la implementación práctica en hardware real. Mientras que los algoritmos fundamentales como Shor y Grover definen el horizonte de lo posible, los algoritmos NISQ como VQE y QAOA ofrecen una vía inmediata para la experimentación y el desarrollo de aplicaciones (Gokhale et al., 2026). La estandarización de estos contenidos, impulsada por organizaciones como IEEE y QED-C, garantiza que la formación

sea accesible y alineada con las necesidades de una industria que se espera alcance un tamaño de mercado significativo en la próxima década.

En síntesis, el futuro de la educación en este campo se orienta hacia la hibridación: sistemas que integran recursos de computación de alto rendimiento (HPC) con aceleradores cuánticos. Los currículos que preparen a los estudiantes para orquestar estas infraestructuras heterogéneas serán los que definan el liderazgo tecnológico en la era de la ventaja cuántica.

Capítulo 4

Convergencia tecnológica y aplicaciones prácticas del currículo

La evolución del currículo tecnológico se define por una integración profunda de disciplinas que anteriormente operaban de manera aislada. La convergencia de la ciberseguridad, la optimización matemática, la inteligencia artificial (IA) y la simulación de materiales ha dado lugar a un paradigma de ingeniería y gestión donde la eficiencia operativa es indisociable de la resiliencia digital y el descubrimiento científico acelerado. Este informe técnico analiza cómo estas áreas se entrelazan para proteger infraestructuras críticas, redefinir la logística global, transformar el diagnóstico médico y acelerar la creación de materiales de próxima generación, proporcionando una visión detallada de las aplicaciones prácticas y los resultados medibles en sectores estratégicos.

El ecosistema de la ciberseguridad en la infraestructura crítica y el sector financiero

La ciberseguridad ha pasado de ser una función de soporte a convertirse en el eje central de la continuidad operativa para infraestructuras críticas y entidades financieras. El aumento de la sofisticación de las

amenazas, impulsado por actores que utilizan IA para automatizar ataques y generar malware polimórfico, ha obligado a las organizaciones a adoptar enfoques de seguridad de nueva generación, como el Zero Trust (Confianza Cero) y la criptografía post-cuántica (Ruíz, 2026).

Proyectos estratégicos y resiliencia en el sector bancario

El sector bancario lidera la implementación de estas tecnologías avanzadas. Un ejemplo destacado es el impulso de CaixaBank a través de los proyectos europeos VIGILANCE y CYBERAID, cuya ejecución se extiende hasta finales de 2028. Estas iniciativas combinan el uso de inteligencia artificial y blockchain para desarrollar capacidades de seguridad post-cuántica, anticipándose a la amenaza que supondrá la computación cuántica para los algoritmos de cifrado actuales (Marchetti et al., 2022). El enfoque propuesto se basa en un modelo Zero Trust que emplea agentes inteligentes e IA adversarial para detectar comportamientos maliciosos antes de que puedan comprometer los activos digitales de la entidad.

La importancia de estas medidas se refleja en el panorama regulatorio y operativo de las fintechs y bancos digitales. Hoy, estas instituciones enfrentan una agenda crítica marcada por el aumento de fraudes y ataques de ransomware, lo que ha convertido la ciberseguridad en un diferencial competitivo. La inversión en seguridad no solo previene pérdidas millonarias, sino que facilita el cumplimiento de normativas como las del Banco Central de la República Argentina (BCRA) o la licencia MiCA en la Unión Europea, permitiendo a las entidades operar con criptoactivos de manera autorizada.

La modernización de los Centros de Operaciones de Seguridad (SOC) es

un pilar fundamental para la detección temprana de incidentes. La integración de tecnologías como el Endpoint Detection and Response (EDR) y el Security Information and Event Management (SIEM) permite la correlación de miles de eventos de seguridad en segundos, priorizando las alertas críticas y reduciendo la fatiga por alertas de los analistas humanos (Hailan et al., 2025). (véase la tabla 11).

Tabla 11: Tecnologías de defensa y automatización en el SOC

Tecnología de Ciberseguridad	Función Crítica y Aplicación	Impacto en la Resiliencia
Zero Trust + DevSecOps	Verificación continua de identidad y seguridad embebida en el desarrollo	Eliminación de la confianza implícita dentro de la red; reducción de vulnerabilidades de código
Microsegmentación	División de la red en segmentos aislados mediante barreras lógicas	Prevención del desplazamiento lateral de atacantes en infraestructuras antiguas
IA y Machine Learning	Análisis de comportamiento de usuarios (UBA) y detección de anomalías	Identificación de patrones de fraude y accesos anómalos en tiempo real; reducción de MTTR
Post-Quantum Cryptography	Algoritmos resistentes a la computación cuántica	Protección de datos sensibles a largo plazo frente a capacidades de descifrado futuro
Autenticación multifactor (MFA)	Capas adicionales de validación de identidad para todos los accesos	Mitigación del 90% de los ataques basados en el robo de credenciales tradicionales

La ciberseguridad efectiva en 2024 se basa en el pragmatismo estratégico. Las organizaciones deben aceptar que los incidentes son inevitables pero manejables a través de una preparación robusta y una cultura de seguridad que permee a todos los grupos de interés. La automatización juega aquí un papel dual: mientras que los atacantes la usan para escalar amenazas como los deepfakes, los defensores la emplean para optimizar procesos y liberar a los expertos para tareas de toma de decisiones complejas y búsqueda estratégica de amenazas.

Optimización matemática y eficiencia en procesos industriales y logística

La optimización matemática se ha consolidado como la herramienta por excelencia para maximizar la competitividad y la sostenibilidad en el ámbito industrial. Mediante el uso de modelos de Programación Lineal Entera Mixta (MILP) y algoritmos avanzados, las empresas pueden resolver problemas complejos de planificación de redes, gestión de demanda y diseño de sistemas sostenibles (Nguyen et al., 2025).

Aplicaciones en energía y producción industrial

En el sector energético, la optimización matemática permite determinar la mejor combinación de fuentes de energía y sistemas de almacenamiento, minimizando tanto los costos operativos como las emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo del tiempo. Este enfoque es vital para la planificación de redes eléctricas y la gestión de la demanda, allanando el camino hacia un futuro energético más seguro.

En las plantas industriales, la optimización impacta directamente en el rendimiento. Empresas líderes como Siemens y BASF han demostrado que la integración de análisis en tiempo real e IA en sus procesos productivos puede generar ahorros significativos.

- **Siemens:** Ha implementado sistemas de mantenimiento predictivo basados en IA que detectan anomalías antes de que ocurran fallos, lo que ha permitido reducir los tiempos de ciclo en un 40% y garantizar una mayor disponibilidad de los activos.
- **BASF:** Mediante la integración de análisis en tiempo real, ha logrado reducir el consumo de energía en un 15%, mejorando la sostenibilidad ambiental de sus operaciones.
- **General Electric (GE):** Utiliza la plataforma IoT Predix para integrar datos de sensores, reduciendo los tiempos de inactividad no planificada en un 10%.

Revolución en la logística y la cadena de suministro

La logística moderna se sustenta en la transparencia y la toma de decisiones basada en datos. La minería de procesos (Process Mining) se ha convertido en un método esencial para hacer visibles los flujos reales de procesos en función de rastros digitales, permitiendo a las empresas identificar ineficiencias que se acumulan y afectan la entrega final (Shamsuddoha et al., 2025). La optimización de la cadena de suministro a través de la IA permite mejorar la planificación de rutas, automatizar la gestión de inventarios y optimizar el uso del transporte (véase la tabla 12).

Tabla 12: Indicador logístico tradicional vs. IA

Indicador Logístico	Estado Promedio (Tradicional)	Con IA y Automatización (2025)	Impacto Operativo
Errores de Picking	3% - 5%	< 0.9%	Reducción de costos de devolución y mejora de la satisfacción
Tiempos de Entrega	48 - 72 horas	24 - 36 horas	Mayor competitividad en el mercado de e-commerce
Surtido de Pedidos	120 minutos	30 - 45 minutos	Optimización del flujo de trabajo en el almacén
Consumo de Energía	Base 100%	Reducción hasta el 15%	Mejora en los márgenes de ganancia y sostenibilidad

Empresas como Amazon México han integrado algoritmos que optimizan en tiempo real la ubicación de productos en sus almacenes, anticipándose a picos de demanda estacionales como el Buen Fin o Navidad. En Latinoamérica, compañías como Mercado Libre, FEMSA Logística y Bimbo están implementando robots colaborativos (cobots) y sensores IoT para mejorar la trazabilidad de los productos, especialmente en la cadena de frío, donde el control dinámico de flotas reduce significativamente las emisiones y

los desperdicios.

Inteligencia artificial: diagnóstico médico y sistemas autónomos

La inteligencia artificial ha pasado de ser una tecnología emergente a un componente esencial del sistema de salud y de la seguridad operativa. Sus aplicaciones van desde la precisión diagnóstica hasta la autonomía de vehículos en entornos peligrosos.

Transformación del diagnóstico clínico y la medicina de precisión

En el ámbito médico, la IA está redefiniendo el estándar de cuidado a través de la interpretación de imágenes y el análisis genómico. El uso de redes neuronales convolucionales (CNN) permite identificar patrones y biomarcadores invisibles para el ojo humano en radiografías, tomografías y resonancias magnéticas (Bartusik et al., 2026).

Un caso de éxito notable es la colaboración entre el Massachusetts General Hospital y el MIT, donde algoritmos de IA alcanzaron una precisión del 94% en la detección de nódulos pulmonares, superando el 65% de precisión de los radiólogos humanos. En dermatología, la IA ha demostrado una precisión superior al 90% en la detección de melanoma, comparándose favorablemente con expertos humanos.

La medicina de precisión también se beneficia de la capacidad de la IA para analizar miles de exomas y datos genéticos. En el tratamiento del

meduloblastoma, la IA ha identificado subgrupos moleculares específicos que permiten a los médicos administrar dosis de tratamiento exactas para cada paciente. Además, la automatización de laboratorios mediante plataformas como Scispot permite conectar cientos de instrumentos, reduciendo los errores de flujo de trabajo en un 40% al eliminar la transferencia manual de datos (Chow, 2024).

Sistemas autónomos y robótica colaborativa (RAS)

Los sistemas robóticos y autónomos (RAS), que incluyen plataformas aéreas, terrestres y acuáticas, están extendiendo el alcance de las operaciones humanas en entornos de alto riesgo. La IA no solo mejora la navegación de estos sistemas, sino que permite la colaboración multiagente para tareas complejas.

- **Combate de incendios:** Se han realizado pruebas exitosas con equipos de hasta cinco robots autónomos (UGV) que utilizan aprendizaje por refuerzo multiagente (MARL) para localizar y extinguir incendios de manera colaborativa, reduciendo la carga cognitiva de los operadores humanos y aumentando la seguridad en sitios mineros e industriales.
- **Exploración submarina:** Los vehículos submarinos autónomos (AUV) han evolucionado para operar sin control humano directo en misiones preprogramadas de mapeo del lecho marino a profundidades de hasta 6.000 metros. La integración de IA permite a estos robots ajustar su trayectoria en tiempo real basándose en datos de corrientes oceánicas y evitar obstáculos.
- **Aplicaciones militares y de rescate:** Drones equipados con software de

reconocimiento automático de objetivos (ATR) pueden identificar y seguir blancos a distancias de hasta 2 km, operando de manera autónoma incluso en condiciones de estrés ambiental extremo.

La tendencia hacia sistemas autónomos interconectados y la logística predictiva basada en big data apuntan a un futuro donde las entregas se anticipen a la demanda real, transformando la reactividad operativa en proactividad inteligente.

Simulación de materiales y descubrimiento científico acelerado

La ciencia de materiales vive una era dorada gracias a la convergencia de la simulación cuántica, la IA generativa y la computación de alto rendimiento. Esta combinación permite predecir propiedades de materiales con una precisión sin precedentes, reduciendo los ciclos de investigación y desarrollo de décadas a meses.

El hito de los nuevos superconductores

Uno de los logros más significativos es el descubrimiento de un nuevo superconductor por parte del Laboratorio de Física Aplicada de Johns Hopkins (APL). Utilizando un proyecto denominado MITHRIL (Material Invention Through Hypothesis-unbiased, Real-time, Interdisciplinary Learning), el equipo logró identificar una aleación de zirconio, indio y níquel ($Zr - In - Ni$) con una temperatura de transición de aproximadamente $9K$ (Pyzer et al., 2022).

Lo revolucionario de este proceso es el uso de redes Generativas Antagónicas (GAN) para proponer estructuras de materiales que no existen en ninguna biblioteca física. La IA actúa como un filtro que descarta combinaciones de átomos físicamente imposibles y compensa los sesgos humanos, permitiendo a los científicos explorar regiones del espacio de posibilidades que nunca antes se habían considerado. Este descubrimiento, que tradicionalmente habría tomado años de experimentación por error, se completó en solo tres meses.

En la industria aeroespacial, la simulación de materiales es la clave para fabricar aeronaves más ligeras, fuertes y eficientes. El uso de gemelos digitales (Digital Twins) permite a los ingenieros probar iteraciones de diseño en un entorno virtual antes de producir prototipos físicos, lo que ahorra costos y reduce el desperdicio de materiales.

La fabricación aditiva (3D) de metales y polímeros está ganando terreno, permitiendo la creación de componentes de alta complejidad que antes eran imposibles de fabricar. Las piezas diseñadas mediante optimización topológica pueden reducir drásticamente el peso de un avión; por ejemplo, al consolidar 50 partes individuales en una sola estructura monolítica impresa en 3D (véase la tabla 13).

Tabla 13: Impacto en la ingeniería aeroespacial y sostenibilidad

Aplicación en Aeroespacial	Material o Innovación	Beneficio Estratégico
Álabes de Ventilador de Motor	Compuestos de polímero reforzado con fibra de	Mayor resistencia a impactos de objetos extraños y menor peso

carbono (CFRP) 3D		
Uniones de Estructura	Modelado predictivo de juntas pi (Programa FASTBUCS)	Predicción precisa de la vida útil por fatiga y reducción de fallos
Revestimiento de Turbinas	Superalcaciones de níquel y compuestos de matriz cerámica	Estabilidad térmica a temperaturas superiores a 700 °C
Fuselaje y Alas	Biocompuestos y materiales reciclados	Reducción de la huella de carbono y mayor circularidad de recursos

El desarrollo de materiales inteligentes con propiedades piezoeléctricas integradas permite el monitoreo de la salud estructural (SHM) en tiempo real. Estas estructuras pueden reportar su propio estado y detectar microfisuras antes de que se conviertan en fallos catastróficos, transformando el mantenimiento correctivo en una gestión de activos basada en la condición real del material (Pyzer et al., 2022; Pandey et al., 2025).

Convergencia de IA y ciberseguridad: un desafío ético y operativo

La integración de la IA en la ciberseguridad presenta una naturaleza dual: potencia a los defensores pero también proporciona herramientas sofisticadas a los atacantes. La IA se utiliza para detectar ataques de phishing, analizar malware polimórfico y automatizar la respuesta a incidentes en minutos, tareas que antes tomaban días. Sin embargo, los ciberdelincuentes

están empleando modelos de lenguaje grandes (LLM) para crear correos electrónicos de phishing casi perfectos y realizar ataques de inyección de prompts contra otros modelos de IA (Malatji y Tolah, 2025).

Para contrarrestar esto, se están implementando marcos como el AI Risk Management Framework de NIST y estándares de criptografía poscuántica. La transparencia en los modelos de IA (XAI) y la necesidad de datos limpios para el entrenamiento son debates recurrentes en la comunidad científica para asegurar que los sistemas de defensa no sean manipulados mediante ataques adversarios. La convergencia de estas tecnologías exige que la ciberseguridad sea considerada desde la fase de diseño de cualquier sistema de IA o de automatización industrial.

Dinámicas del mercado laboral y el futuro del empleo tecnológico

La transformación tecnológica descrita ha impactado profundamente en el mercado de trabajo. Contrario a la visión de que la IA reemplazará a los humanos, los datos indican una demanda creciente de perfiles híbridos que combinen habilidades técnicas con juicio estratégico y ética (Grigera y Nava, 2021). (véase la tabla 14).

- **Ciberseguridad:** Se proyecta un crecimiento del 33% en el empleo de analistas de seguridad de la información hasta 2033. Para 2025, se estima que habrá 3,5 millones de puestos de trabajo sin cubrir en este sector a nivel mundial. Los roles más demandados incluyen analistas de amenazas de IA, ingenieros de seguridad en la nube y abogados

especializados en privacidad y ciberseguridad.

- **IA y Ciencia de Datos:** La demanda de ingenieros de aprendizaje automático y científicos de datos ha aumentado un 25% en 2025. Los sectores de finanzas, salud y manufactura son los que presentan la mayor competencia por este talento, con salarios para especialistas senior que superan las seis cifras en mercados desarrollados.
- **Ciencia de Materiales y Optimización:** El auge de la sostenibilidad y la economía circular ha creado una necesidad urgente de expertos en gestión de datos de materiales (MDM) y optimización topológica que puedan integrar consideraciones de ciclo de vida (LCA) en el diseño de productos.

Tabla 14: Empleo tecnológico y habilidades requeridas en la actualidad

Rol Tecnológico	Habilidades Requeridas	Clave	Sectores de Mayor Demanda
Ingeniero de IA/ML	MLOps, Generative AI, Edge AI, Ética de datos		Finanzas, Salud, Automatización Industrial
Analista de Ciberseguridad	IA Threat Analysis, Cloud Hardening, Post-Quantum		Infraestructura Crítica, Banca, Gobierno
Especialista en Ética de IA	Marcos regulatorios, auditoría de sesgos, gobernanza		Sector Público, Big Tech, Consultoría
Arquitecto de Gemelos Digitales	IoT, Simulación 3D, Analítica Predictiva		Manufactura, Aeroespacial, Logística

La formación continua y la certificación profesional se han vuelto indispensables. Las empresas están priorizando el upskilling de su personal existente para mitigar la escasez de talento, especialmente en áreas donde la tecnología evoluciona más rápido que los programas académicos tradicionales.

Consideraciones sobre la sostenibilidad y el impacto ESG

Por ende, la tecnología y la sostenibilidad son inseparables. La optimización matemática y la IA se aplican no solo para mejorar la rentabilidad, sino para cumplir con los objetivos ambientales, sociales y de gobernanza (ESG). El uso de materiales biocompuestos, el reciclaje de fibras de carbono en la industria aeroespacial y el monitoreo de la huella de carbono en tiempo real son prácticas estándar (Shahen et al., 2026).

La integración de herramientas como el Dashboard de Emisiones en la logística permite a las empresas visualizar las toneladas de CO_2 equivalente emitidas por cada vehículo, facilitando la transición hacia flotas eléctricas e híbridas. En la industria química, la IA está acelerando el descubrimiento de catalizadores más eficientes para procesos de bajo consumo de carbono, lo que es fundamental para la transición energética global.

La integración de la ciberseguridad, la optimización, la inteligencia artificial y la simulación de materiales en el currículo tecnológico representa un cambio de paradigma hacia la ingeniería resiliente y el descubrimiento acelerado. La capacidad de una organización para sobrevivir y prosperar en

este entorno depende de su agilidad operativa y su capacidad para gestionar la complejidad de los datos estructurados (Baiocchi et al., 2025).

La ciberseguridad ha evolucionado de un enfoque reactivo a uno proactivo y anticipatorio, donde la IA actúa como un copiloto que orquesta respuestas a escala. La optimización matemática, por su parte, proporciona el marco riguroso para la eficiencia en sectores críticos como la energía y la logística, permitiendo que las empresas operen con márgenes más estrechos y menores impactos ambientales.

En el ámbito científico, el descubrimiento de nuevos materiales mediante IA y simulación cuántica está abriendo puertas a innovaciones en superconductividad y aeroespacial que antes se consideraban inalcanzables. Estos avances no solo mejoran el rendimiento técnico de los productos, sino que son esenciales para abordar desafíos globales como el cambio climático y la escasez de recursos.

En síntesis, el mercado laboral refleja esta transformación, exigiendo profesionales que no solo dominen las herramientas técnicas, sino que posean una comprensión holística de cómo estas tecnologías interactúan entre sí y con la sociedad. La inversión en infraestructura de datos, formación de talento y marcos de seguridad robustos será el factor determinante para el liderazgo tecnológico en la segunda mitad de la década. La convergencia tecnológica no es solo una tendencia, sino la base de la nueva economía industrial y digital.

Capítulo 5

Ingeniería de sistemas cuánticos: cúbits e infraestructura de los procesadores superconductores

El avance de la computación cuántica ha dejado de ser un ejercicio puramente teórico en el ámbito de la física fundamental para convertirse en una disciplina de ingeniería de sistemas de alta complejidad. La transición desde el bit clásico —una unidad de información binaria y determinista— hacia el cúbit —un sistema mecano-cuántico que aprovecha la superposición y el entrelazamiento— exige no solo una comprensión profunda de la mecánica cuántica, sino también el desarrollo de infraestructuras físicas capaces de mantener estados cuánticos delicados frente a la interferencia ambiental (Castrillón et al., 2014).

En la actualidad, las arquitecturas basadas en circuitos superconductores representan la vanguardia de esta revolución, combinando técnicas de fabricación de semiconductores con fenómenos macroscópicos de coherencia cuántica. El éxito de estos sistemas depende de una integración orquestada entre la física de las uniones de Josephson, la ingeniería de microondas y la termodinámica de temperaturas ultrafrías, creando un entorno donde los átomos artificiales pueden ser manipulados con una precisión sin precedentes (Shreya et al., 2026).

Fundamentos del aprendizaje y operación de cúbits

Para el profesional que se adentra en el ecosistema cuántico, el aprendizaje comienza con la deconstrucción de la lógica booleana y la adopción de un marco de trabajo basado en vectores de estado en un espacio de Hilbert. Un cúbit, a diferencia de su homólogo clásico, no reside exclusivamente en los estados $|0\rangle$ o $|1\rangle$, sino que puede existir en una superposición de ambos, definida por el estado $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, donde las amplitudes complejas α y β dictan la probabilidad de colapso tras la medición. Esta capacidad de mantener múltiples estados simultáneamente es lo que permite a los procesadores cuánticos crear espacios computacionales multidimensionales donde la complejidad crece exponencialmente con cada cúbit adicional.

Mecanismos de Superposición e Interferencia

La superposición no es simplemente un estado de incertidumbre, sino una propiedad física que permite que la información cuántica sea procesada a través de interferencias. La interferencia es el motor real de la computación cuántica; al igual que las ondas mecánicas, las amplitudes de probabilidad de los estados cuánticos pueden sumarse constructivamente para amplificar la probabilidad de obtener una respuesta correcta, o destructivamente para cancelar los resultados incorrectos (Esho et al., 2026). La ingeniería de estos sistemas se centra en diseñar circuitos y pulsos de control que maximicen esta

interferencia controlada antes de que el sistema interactúe de forma irreversible con su entorno.

El recurso crítico del entrelazamiento

El entrelazamiento cuántico representa una correlación no local que no tiene equivalente en la física clásica. Cuando dos cúbits están entrelazados, sus estados cuánticos están tan intrínsecamente vinculados que la descripción de uno es imposible sin la del otro, independientemente de la distancia física que los separe. Desde una perspectiva operativa, el entrelazamiento es el recurso que permite la ejecución de algoritmos paralelos masivos. En sistemas superconductores, este fenómeno se logra mediante el acoplamiento de circuitos a través de condensadores o inductores, permitiendo que la energía de un cúbit influya en la fase o el estado del vecino. La medición de un solo cúbit en un sistema entrelazado proporciona información inmediata sobre el estado de sus socios, una propiedad que es fundamental para la corrección de errores y la teletransportación de estados cuánticos.

La fragilidad de estos estados es el principal obstáculo para la escalabilidad. La decoherencia es el proceso mediante el cual el sistema cuántico, al interactuar con el ruido ambiental —térmico, electromagnético o incluso colisional—, pierde su coherencia y se clásica, colapsando en un estado definido. Esta transición es irreversible y borra la información almacenada en las fases de la superposición. Por lo tanto, el diseño de sistemas físicos debe enfocarse en maximizar el tiempo de coherencia, asegurando que las operaciones lógicas se completen mucho antes de que el entorno degrade el sistema (véase la tabla 15).

Tabla 15: La problemática de la decoherencia

Concepto Cuántico	Función en el Sistema	Relevancia para la Ingeniería
Superposición	Representación de datos multivariados.	Requiere control preciso de la fase del pulso.
Entrelazamiento	Conectividad y paralelismo lógico.	Depende del acoplamiento físico entre circuitos.
Interferencia	Selección del resultado algorítmico.	Motor de la computación; requiere alta fidelidad.
Decoherencia	Límite de error y pérdida de datos.	Dicta los requisitos de refrigeración y blindaje.

Átomos artificiales en el chip

La modalidad superconductora es actualmente la más extendida debido a su compatibilidad con las técnicas de fabricación de la industria de semiconductores, lo que facilita la creación de procesadores con un número creciente de cúbits. Estos procesadores no utilizan átomos naturales, sino

circuitos eléctricos que, a temperaturas criogénicas, exhiben niveles de energía discretos similares a los de un átomo.

La física de la unión de Josephson

El elemento disruptivo en estos circuitos es la unión de Josephson. Mientras que un circuito resonante estándar formado por un condensador (C) y un inductor (L) tiene niveles de energía equiespaciados —lo que impediría aislar solo dos niveles para formar un cúbit—, la unión de Josephson actúa como un inductor no lineal y no disipativo. Esta unión consiste en dos electrodos superconductores separados por una capa aislante tan fina (del orden de nanómetros) que los pares de Cooper pueden atravesarla mediante efecto túnel.

La relación corriente-fase en una unión de Josephson viene dada por $I = I_0 \sin(\delta)$, donde I_0 es la corriente crítica y δ es la diferencia de fase de la función de onda superconductora a través de la unión. Esta relación no lineal introduce una anarmonicidad en el espectro de energía del circuito. En consecuencia, la energía necesaria para pasar del estado fundamental $|0\rangle$ al primer estado excitado $|1\rangle$ es diferente de la energía necesaria para pasar del estado $|1\rangle$ al $|2\rangle$. Esto permite a los ingenieros utilizar pulsos de microondas a una frecuencia específica para manipular exclusivamente la transición $|0\rangle \leftrightarrow |1\rangle$, tratando al circuito como un sistema de dos niveles efectivo.

Evolución del diseño: del cúbit de carga al transmon

La ingeniería de cúbits superconductores ha pasado por varias

iteraciones para mitigar las fuentes de ruido ambiental:

- **Cúbit de Carga:** En este diseño temprano, la información se almacenaba en el número de pares de Cooper en una isla superconductora. Sin embargo, era extremadamente sensible a las fluctuaciones de carga eléctrica en el sustrato, lo que resultaba en tiempos de coherencia muy cortos.
- **Cúbit de Flujo:** Utiliza un bucle superconductor interrumpido por uniones de Josephson, donde los estados se definen por la dirección de la corriente persistente. Son útiles para ciertas aplicaciones de simulación, pero su manipulación es compleja.
- **El Transmon:** Inventado para resolver la sensibilidad al ruido de carga, el transmon añade un condensador de gran derivación en paralelo con la unión de Josephson. Al aumentar la relación entre la energía de Josephson (E_J) y la energía de carga (E_C), el transmon se vuelve prácticamente insensible al ruido de carga de baja frecuencia, manteniendo al mismo tiempo suficiente anharmonicidad para operar como un cúbit. Esta arquitectura es la que utilizan gigantes tecnológicos como IBM y Google en sus procesadores más avanzados.

Conectividad y compuertas de dos cúbits

Para ejecutar algoritmos, los cúbits deben interactuar entre sí. En las arquitecturas superconductoras, esto se logra mediante buses de cavidad o acoplamiento capacitivo directo. Un bus de cavidad es un resonador de microondas que permite el intercambio de fotones virtuales entre cúbits distantes, facilitando el entrelazamiento. La fidelidad de estas operaciones de

dos cúbits es un parámetro crítico; errores superiores al 0.5% imposibilitan la implementación efectiva de códigos de corrección de errores de superficie a gran escala.

Infraestructura física y soporte criogénico

El funcionamiento de un procesador cuántico superconductor exige un entorno físico que es, en muchos sentidos, más extremo que el vacío del espacio exterior. La necesidad de temperaturas cercanas al cero absoluto no es opcional, sino un requisito fundamental derivado de la física de la superconductividad y la necesidad de minimizar el ruido térmico.

El refrigerador de dilución: corazón térmico del sistema

La mayoría de los cúbits superconductores operan a frecuencias de entre 4 y 10 GHz. A temperatura ambiente, la energía térmica $k_B T$ es órdenes de magnitud superior a la energía de los fotones de microondas del cúbit, lo que causaría la destrucción inmediata de cualquier estado cuántico. Para mitigar esto, el chip cuántico debe enfriarse a aproximadamente 15 mK.

El refrigerador de dilución logra estas temperaturas extremas mediante la mezcla de dos isótopos de helio: el helio-3 (^3He) y el helio-4 (^4He). El proceso se basa en las propiedades cuánticas de estos fluidos a bajas temperaturas:

1. **Separación de Fases:** Por debajo de los 870 mK, la mezcla se separa espontáneamente en una fase rica en ^3He y una fase diluida.
2. **Enfriamiento por Dilución:** En la cámara de mezcla, los átomos de ^3He se desplazan de la fase concentrada a la fase diluida. Este proceso es

endotérmico, absorbiendo calor del entorno del procesador cuántico.

3. **Circulación Continua:** Un sistema de bombas externas extrae el ³He de la fase diluida, lo vuelve a comprimir y enfriar, y lo reintroduce en el ciclo, permitiendo un enfriamiento estable y continuo durante meses.

Gestión de la cadena de señal de microondas

La comunicación con los cúbits dentro del refrigerador es un desafío de ingeniería de microondas. Los pulsos de control, generados por electrónica clásica a temperatura ambiente, deben viajar hasta el chip a 15 mK sin transportar calor excesivo.

- **Líneas Coaxiales Criogénicas:** Se utilizan cables de materiales con baja conductividad térmica (como el cuproníquel o el acero inoxidable) para minimizar la carga de calor por conducción.
- **Atenuadores de Etapa:** En cada nivel de temperatura del refrigerador (4K, 1K, 100mK), se instalan atenuadores que reducen la potencia de la señal y, lo que es más importante, suprimen el ruido térmico proveniente de las etapas más calientes.
- **Aislamiento y Amplificación de Lectura:** Para leer el estado del cúbit, se envía un pulso que rebota en un resonador acoplado al cúbit. La señal reflejada, extremadamente débil, debe pasar por aisladores criogénicos —que evitan que el ruido de los amplificadores regrese al cúbit— y luego por amplificadores de bajo ruido (LNA) o amplificadores paramétricos de viaje (TWPA) antes de salir del refrigerador.

Desafíos de ingeniería: ruido, materiales y escalabilidad

La construcción de sistemas cuánticos robustos requiere abordar fuentes de error que son invisibles en la electrónica convencional. Cada interfaz, cada material y cada diseño de circuito pueden introducir mecanismos de decoherencia que limitan la utilidad del sistema.

Fuentes de ruido en estado sólido

Los cúbits superconductores son sensibles a una variedad de fuentes de ruido intrínsecas a su fabricación:

- **Ruido de Carga y Flujo:** Fluctuaciones aleatorias en el potencial eléctrico o en el campo magnético local pueden alterar la frecuencia de transición del cúbit, provocando desfase (T_2). En los cúbits de flujo, el ruido magnético $1/f$ —que aumenta a bajas frecuencias— suele ser el factor dominante que limita la coherencia.
- **Sistemas de Dos Niveles (TLS):** Estos son defectos atómicos en los materiales amorfos (como los óxidos de las uniones de Josephson o los sustratos de silicio) que pueden absorber energía del cúbit si sus frecuencias de resonancia coinciden. Los ingenieros deben realizar una limpieza de materiales a nivel atómico para reducir la densidad de estos defectos.
- **Cuasipartículas:** Son electrones individuales que se generan cuando los pares de Cooper se rompen debido a la radiación infrarroja residual o incluso a los rayos cósmicos. Su presencia introduce disipación

energética, reduciendo el tiempo de relajación (T_1) del cúbit.

El problema de la escalabilidad del cableado

Un obstáculo crítico para llegar al millón de cúbits es el volumen físico del cableado. Actualmente, cada cúbit requiere al menos una línea de control y una de lectura que van desde la temperatura ambiente hasta los 15 mK. Esto crea un cuello de botella logístico y térmico. La investigación actual se centra en mover la electrónica de control al interior del refrigerador. Los controladores in-fridge basados en pulsos de Flujo Cuántico Único (SFQ) pueden operar a temperaturas de 4 K o inferiores con un consumo de energía mínimo, generando señales de control localmente y reduciendo drásticamente la necesidad de cables externos. Estos sistemas, sin embargo, deben diseñarse cuidadosamente para evitar el leakage o fuga de energía hacia estados de mayor energía del cúbit.

Comparativa de modalidades físicas: iones, fotones y espines

Aunque los superconductores lideran el mercado comercial, no son el único camino hacia la computación cuántica universal. Otros sistemas físicos ofrecen ventajas competitivas en términos de fidelidad y estabilidad operativa.

Iones atrapados: los cúbits naturales

A diferencia de los superconductores, que son fabricados, los iones atrapados utilizan átomos reales (como iterbio o bario). Estos átomos se

mantienen suspendidos en el vacío mediante campos electromagnéticos y se enfrían con láseres hasta alcanzar su estado fundamental de movimiento.

- **Ventajas:** Tiempos de coherencia extremadamente largos (segundos o minutos) y una fidelidad de compuerta líder en la industria. Al ser átomos idénticos, no sufren variaciones de fabricación.
- **Desafíos:** Las operaciones son órdenes de magnitud más lentas que en los superconductores (milisegundos frente a nanosegundos), y los sistemas de láser necesarios para manipularlos son voluminosos y difíciles de integrar a gran escala.

Centros NV en diamante: operación a temperatura ambiente

Los centros de vacante de nitrógeno (NV) son defectos en el diamante que pueden funcionar como cúbits de espín. Su característica más distintiva es la capacidad de mantener estados cuánticos coherentes incluso a temperatura ambiente (Pandey et al., 2025).

- **Aplicaciones:** Son ideales para sensores cuánticos de alta precisión (magnéticos, térmicos) y para nodos de redes de comunicación cuántica.
- **Limitaciones:** La interacción entre múltiples centros NV es débil y difícil de controlar para computación de propósito general a gran escala.

Utilizan el espín de un electrón atrapado en un punto cuántico de silicio. Esta tecnología es atractiva porque permite aprovechar la infraestructura existente de fabricación de CMOS (véase la tabla 16).

- **Potencial:** Ofrecen una alta densidad de integración y pueden operar a

temperaturas ligeramente superiores (1 K), lo que reduce los requisitos del refrigerador de dilución.

Tabla 16: Cúbits de espín en silicio

Característica	Superconductores	Iones Atrapados	Centros NV	Silicio
Tiempo Coherencia	$\sim 100\mu s$	Segundos Minutos	- Milisegundos	Milisegundos
Velocidad Compuerta	Nanosegundos	Milisegundos	Microsegundos	Nanosegundos
Temperatura Op.	10-20 mK	Trampa Ions mK	RT / RT / Criogénico	$\sim 1K$
Escalabilidad IC	Alta	Moderada	Baja	Muy Alta
Fidelidad	Alta	Muy Alta (Líder)	Moderada	Alta

La formación del ingeniero en sistemas cuánticos

La emergencia de esta tecnología ha creado la necesidad de un nuevo tipo de profesional: el ingeniero cuántico. Esta disciplina no se limita a la física teórica, sino que requiere un dominio interdisciplinario de varias ramas de la ingeniería tradicional aplicada a regímenes de operación extremos.

Competencias técnicas requeridas

Un ingeniero en esta área debe ser capaz de navegar por toda la pila (stack) tecnológica:

1. **Fundamentos de Mecánica Cuántica:** Comprensión de operadores, matrices de densidad, la ecuación de Schrödinger y el formalismo de Dirac.
2. **Ingeniería de Microondas y RF:** Diseño de circuitos para pulsos de nanosegundos, gestión de la integridad de la señal y conocimiento de componentes como mezcladores, moduladores IQ y circuladores.
3. **Nanofabricación y Ciencia de Materiales:** Experiencia en procesos de sala blanca, litografía de haz de electrones y análisis de defectos en interfaces superconductor-aislante.
4. **Sistemas de Control y Software:** Programación en lenguajes como Python para interactuar con SDKs cuánticos (Qiskit, Cirq) y desarrollo de algoritmos de calibración automática de cúbits.

El enfoque en el pensamiento de sistemas

La formación moderna, como la ofrecida en programas pioneros en Colorado School of Mines o UNSW, se aleja del estudio de cúbits aislados para enfocarse en la integración de sistemas. Para Sergey et al. (2022), esto implica entender cómo la vibración de una bomba de vacío puede afectar el desfase de un cúbit a metros de distancia, o cómo el diseño del software de control debe adaptarse a las restricciones de conectividad física del chip. El ingeniero cuántico es el traductor entre la teoría cuántica abstracta y la implementación física fiable y escalable.

La comprensión de los componentes clave del aprendizaje cuántico revela que no estamos ante una simple mejora incremental de la informática, sino ante una reconstrucción total de la arquitectura del procesamiento de datos. Los sistemas superconductores han demostrado ser el camino más rápido hacia la escala, pero su éxito a largo plazo depende de resolver desafíos monumentales en la ciencia de materiales y la gestión térmica.

La infraestructura necesaria —desde los refrigeradores de dilución de última generación hasta los controladores de microondas de alta fidelidad— representa la cúspide de la ingeniería moderna. A medida que avanzamos hacia sistemas con corrección de errores, el enfoque debe desplazarse desde la fidelidad del cúbit individual hacia la robustez del sistema lógico global. El papel del ingeniero cuántico será fundamental para cerrar la brecha entre los prototipos experimentales y las máquinas capaces de resolver problemas de importancia global, asegurando que la promesa de la ventaja cuántica se convierta en una realidad cotidiana para la industria y la sociedad.

Capítulo 6

Matemática de la era cuántica: un análisis integral del currículo académico y las herramientas fundamentales

La transición global hacia la computación cuántica no representa simplemente un incremento en la capacidad de procesamiento, sino una reconfiguración total de los fundamentos epistemológicos y operativos de la ciencia de la información. Este cambio de paradigma exige una infraestructura académica donde las herramientas matemáticas tradicionales —álgebra lineal, cálculo multivariable, teoría de la probabilidad y lógica formal— se integran en una estructura híbrida diseñada para gestionar la complejidad de los estados de superposición y entrelazamiento. El análisis de los currículos de las instituciones de élite revela que la formación en información cuántica ya no es un apéndice de la física teórica, sino un campo interdisciplinario maduro que demanda un rigor matemático sin precedentes para preparar a la próxima generación de ingenieros y científicos.

El diseño curricular en el ámbito cuántico ha pasado de ser una serie de seminarios de posgrado a estructurarse como programas de grado y máster altamente especializados. Instituciones como la Universidad de Stanford, el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) y la Universidad de Oxford han establecido requisitos de ingreso que subrayan la necesidad de una base

matemática profunda antes de abordar los principios de la mecánica cuántica aplicada. En Stanford, el currículo del Máster en Computación Matemática y Computacional recomienda encarecidamente una sólida formación en álgebra lineal, métodos numéricos, probabilidades, estocástica y análisis real, además de una competencia técnica en lenguajes como C++ y MATLAB.

Esta exigencia no es arbitraria; la capacidad de manipular sistemas de alta dimensión y realizar simulaciones numéricas complejas es el pilar sobre el que se construyen los algoritmos de búsqueda y optimización cuántica.

Por otro lado, la Universidad de Oxford, a través de su grado conjunto en Matemáticas y Ciencias de la Computación, integra la teoría cuántica desde el segundo año, tras haber cimentado conceptos de análisis, grupos, álgebra lineal y probabilidad en el primer ciclo. Esta progresión sugiere que la madurez matemática es un requisito previo indispensable para asimilar la naturaleza contraintuitiva de los fenómenos cuánticos.

La estructura de estos programas indica que el éxito en este campo no depende de la memorización de fórmulas, sino de la capacidad de absorber y aplicar ideas nuevas de manera independiente, una cualidad que Oxford evalúa mediante el Test de Matemáticas para la Admisión Universitaria (TMUA) (véase la tabla 17).

Tabla 17: Evolución de los marcos educativos y requisitos de ingreso

Institución	Programa Académico	Enfoque Matemático Principal	Competencias Técnicas
Stanford	MS ICME	Álgebra lineal, Análisis real, Probabilidades	C++, MATLAB, Programación competitiva
Oxford	BA/MMathCompSci	Análisis complejo, Teoría de grupos, Lógica	Verificación formal, Programación funcional
MIT	Fundamentos QC	Multiplicación de matrices, Vectores, Mecánica cuántica	Algoritmia aplicada, Ciberseguridad
UNAM	Escuela de Cómputo Cuántico	Álgebra lineal, Puertas lógicas, Python ⁴	Qiskit, Jupyter Notebooks
UPC	Grado en Informática	Cálculo diferencial, Estadística, Optimización	Simulación de protocolos, Criptografía

El álgebra lineal como lenguaje operativo del qubit

El álgebra lineal constituye la base gramatical de la computación cuántica. Mientras que la informática clásica opera sobre bits que representan

estados binarios discretos, la computación cuántica utiliza qubits, los cuales se describen matemáticamente como vectores en un espacio de Hilbert complejo de dos dimensiones (Qerimi et al., 2025). La comprensión de este espacio vectorial es fundamental, ya que todas las operaciones dentro de un procesador cuántico se reducen a manipulaciones algebraicas sobre estos vectores.

Espacios de Hilbert y notación de Dirac

La introducción de la notación de Dirac (bra-ket) en 1939 por Paul Dirac permitió una simplificación monumental en la representación de estados cuánticos. En los currículos académicos, el ket $|\psi\rangle$ se enseña como la representación estándar de un estado cuántico, equivalente a un vector columna en el espacio de Hilbert. Por el contrario, el bra $\langle\psi|$ representa el conjugado transpuesto o adjunto del ket, facilitando el cálculo del producto interno $\langle\psi|\phi\rangle$, que en términos físicos determina la amplitud de probabilidad de encontrar el sistema en un estado determinado tras una medición.

El análisis de esta notación revela que la computación cuántica es, en esencia, una geometría de vectores unitarios. Un qubit se define como una superposición lineal de los estados base $|0\rangle$ y $|1\rangle$, expresada como:

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

Donde α y β son amplitudes de probabilidad complejas que deben satisfacer la condición de normalización $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. Esta estructura vectorial

permite que el qubit resida en cualquier punto de la superficie de una esfera imaginaria conocida como la esfera de Bloch, donde las rotaciones sobre los ejes x y z representan las operaciones lógicas básicas del sistema.

Las puertas lógicas cuánticas, a diferencia de sus contrapartes clásicas, se modelan como matrices unitarias que actúan sobre los vectores de estado. La propiedad de unitariedad es crítica, ya que garantiza que las operaciones cuánticas conserven la probabilidad total (la norma del vector) y sean intrínsecamente reversibles (Bluvstein et al., 2024). Los currículos de instituciones como el MIT y QuTech enfatizan que la comprensión de la multiplicación de matrices y vectores es el punto de partida absoluto para cualquier aspirante a ingeniero cuántico (véase la tabla 18).

Tabla 18: Operadores unitarios y la dinámica de puertas lógicas

Puerta Cuántica	Representación Matricial	Función Lógica	Transformación en Esfera de Bloch
Pauli-X	$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	Negación cuántico) (NOT	Rotación de π sobre el eje x
Hadamard (H)	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$	Creación de superposición	Rotación de π sobre el eje $x -$
Phase Shift (P)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\phi} \end{bmatrix}$	Modificación de fase relativa	Rotación sobre el eje z
CNOT	Matriz 4×4	Entrelazamiento controlado	Operación sobre dos qubits

El estudio detallado de estas matrices permite a los estudiantes visualizar cómo los algoritmos manipulan la interferencia. Por ejemplo, la puerta de Hadamard es fundamental para los algoritmos de búsqueda como el de Grover, ya que coloca al sistema en una superposición de todos los estados posibles, permitiendo que la computación se realice de forma paralela en un solo paso de procesamiento.

El producto tensorial y la multiplicidad de qubits

Cuando el currículo avanza hacia sistemas de múltiples qubits, la herramienta matemática necesaria es el producto de Kronecker o producto tensorial. Esta operación permite construir el espacio de Hilbert de un sistema compuesto a partir de los espacios de sus componentes individuales. Un sistema de n qubits reside en un espacio de dimensiones 2^n , lo que explica el crecimiento exponencial de la capacidad de procesamiento cuántico frente al lineal clásico.

Este marco algebraico es el que permite definir el entrelazamiento. Un estado se denomina entrelazado si no puede expresarse como el producto tensorial de los estados de sus qubits constituyentes, es decir, $|\Psi\rangle \neq |\psi\rangle \otimes |\phi\rangle$. La capacidad de los estudiantes para manipular estas estructuras tensoriales es lo que les permite comprender fenómenos como la teletransportación cuántica y la codificación superdensa, donde la información de un qubit se distribuye de manera no local a través de múltiples partículas (Dejpasand y Sasani, 2023).

Cálculo y análisis: la evolución de la función de onda

Si el álgebra lineal describe el estado estático de un sistema cuántico, el cálculo diferencial y el análisis complejo describen su evolución dinámica. La ecuación de Schrödinger es la ley fundamental que rige este cambio, actuando como el análogo cuántico de la segunda ley de Newton.

Ecuaciones Diferenciales y el Hamiltoniano

En el currículo de física cuántica, se enseña que la evolución temporal de un sistema aislado está determinada por el operador hamiltoniano ($\hat{H}$), que representa la energía total del sistema. La ecuación de Schrödinger:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\Psi(t)\rangle = \hat{H} |\Psi(t)\rangle$$

Es una ecuación diferencial parcial lineal que los estudiantes deben aprender a resolver para diversos potenciales. El dominio del cálculo multivariable es esencial aquí, ya que la función de onda Ψ depende tanto de la posición como del tiempo. En programas de ingeniería como el de la UPC o el de Illinois, se hace hincapié en la resolución de la ecuación para el pozo de potencial infinito y el oscilador armónico simple, ya que estos modelos proporcionan la intuición necesaria para entender los niveles de energía discretos y los estados estacionarios.

La formulación de la integral de camino de Feynman

Un aspecto avanzado del currículo es la introducción de la formulación de la integral de camino, desarrollada por Richard Feynman a partir de ideas previas de Paul Dirac. Esta aproximación ofrece una alternativa al formalismo de operadores de Schrödinger, basada en el cálculo de variaciones. Feynman propuso que para calcular la amplitud de probabilidad de que una partícula viaje de un punto A a un punto B , se deben sumar las contribuciones de todas las trayectorias posibles entre ambos puntos.

Cada camino contribuye con una fase determinada por la acción clásica S del sistema, dividida por la constante de Planck reducida $\hbar$. Esta formulación es pedagógicamente valiosa porque conecta directamente la mecánica cuántica con el principio de mínima acción de la mecánica clásica. En el límite donde la acción es mucho mayor que $\hbar$ (el límite clásico), las fases de los caminos no clásicos interfieren destructivamente, dejando solo el camino que minimiza la acción, lo que permite a los estudiantes comprender cómo emerge la física clásica desde el mundo cuántico.

Análisis complejo y espacios de funciones

La naturaleza de la función de onda como una función de valor complejo requiere que el currículo integre el análisis complejo de manera profunda. Conceptos como la fase global, que no es observable, frente a la fase relativa, que causa patrones de interferencia, son centrales en el diseño de algoritmos cuánticos. Asimismo, cuando se trabaja con sistemas continuos, los estudiantes deben transitar del álgebra lineal de dimensiones finitas al

análisis funcional, donde los vectores se convierten en funciones de cuadrado integrable dentro de un espacio L^2 . El uso de transformadas de Fourier para pasar de la representación de posición a la de momento es una herramienta matemática constante en el currículo, subrayando la dualidad onda-partícula propuesta por de Broglie.

Probabilidad y estadística en el mundo de la medida

La probabilidad en mecánica cuántica no es una herramienta para gestionar la ignorancia del observador, sino una propiedad fundamental de la naturaleza. Este concepto marca una ruptura radical con la estadística clásica y requiere un enfoque pedagógico que reemplace el determinismo por el cálculo de expectativas.

La regla de Born y las amplitudes de probabilidad

El puente entre el vector de estado abstracto y los resultados experimentales concretos es la regla de Born, formulada por Max Born en 1926. Esta regla establece que si se mide una cantidad física asociada a un operador autoadjunto X , el resultado será uno de sus autovalores, y la probabilidad de obtener ese valor específico es el cuadrado del valor absoluto de la amplitud de probabilidad correspondiente.

Pedagógicamente, es crucial enseñar que la suma de los cuadrados de estas amplitudes debe ser igual a uno, lo que refuerza el concepto de normalización en el espacio de Hilbert. Los estudiantes de computación

cuántica utilizan la regla de Born para predecir el comportamiento de los circuitos tras la aplicación de puertas de superposición, aprendiendo que el dispositivo cuántico no devuelve un resultado determinista, sino una distribución estadística de bits tras múltiples ejecuciones o shots.

Matrices de densidad y la gestión de estados mixtos

Cuando se estudian sistemas que interactúan con su entorno —lo que se conoce como sistemas cuánticos abiertos— el concepto de vector de estado puro resulta insuficiente. Los currículos avanzados introducen entonces la matriz de densidad o operador de densidad (ρ). Este formalismo permite representar tanto la incertidumbre cuántica (superposición) como la incertidumbre clásica (mezclas estadísticas de estados).

Una matriz de densidad se caracteriza por dos propiedades matemáticas que los estudiantes deben verificar:

1. **Traza igual a uno:** lo que asegura que la suma de todas las probabilidades posibles sea la unidad.
2. **Semidefinida positiva:** garantizando que los autovalores de la matriz sean números reales no negativos, interpretables como probabilidades.

El uso de matrices de densidad es fundamental para comprender la decoherencia, el proceso por el cual un sistema cuántico pierde sus propiedades de superposición debido a la interacción con el entorno. A través del cálculo de la traza parcial, los estudiantes aprenden a derivar la matriz de densidad reducida de un subsistema, lo que les permite analizar cómo se distribuye la información en sistemas entrelazados y cómo se manifiesta el

ruido en el hardware real.

Valores esperados y observables

La conexión entre el álgebra lineal y la estadística se concreta en el cálculo de valores esperados. Para un observable V representado por una matriz hermítica, el valor promedio de las mediciones se obtiene mediante la operación de traza. Este enfoque permite que toda la teoría de la información cuántica se exprese en términos de operaciones de álgebra lineal sobre matrices de densidad, eliminando la necesidad de recurrir constantemente a funciones de onda individuales y simplificando el modelado de sistemas complejos y ruidosos (véase la tabla 19).

Tabla 19: Valores esperados vs. Valores observados en operaciones de traza

Concepto Probabilidad	de	Aplicación Currículo	en	el	Herramienta Matemática
Amplitud de Probabilidad		Cálculo de interferencias en algoritmos			Números complejos y fases
Regla de Born		Predicción de resultados de medición			Norma euclidiana al cuadrado
Estado Puro vs Mixto		Modelado de ruido y decoherencia			Matrices de densidad y autovalores
Traza Parcial		Descripción de subsistemas entrelazados			Operadores lineales y marginales

POVM	Medidas generalizadas y clasificación	Operadores de medida positivos
------	---------------------------------------	--------------------------------

Lógica cuántica frente a lógica booleana

La informática clásica se fundamenta en el álgebra de Boole, una estructura donde las variables son binarias y las operaciones siguen leyes distributivas claras. La computación cuántica, sin embargo, requiere una revisión de las leyes del pensamiento lógico para dar cabida a la no conmutatividad de los observables (Kaliappan et al., 2026).

El retículo de Birkhoff y von Neumann

En su obra fundacional de 1932, John von Neumann propuso que las proposiciones sobre un sistema físico pueden verse como proyecciones en un espacio de Hilbert. Junto con Garrett Birkhoff, demostró en 1936 que mientras la lógica clásica forma un álgebra de Boole (un retículo distributivo), la lógica de los experimentos cuánticos forma un retículo ortomodular donde la distributividad falla.

Este fallo de la distributividad:

$$p \wedge (q \vee r) = (p \wedge q) \vee (p \wedge r)$$

Es lo que permite que el sistema cuántico soporte estados de superposición que no tienen sentido en la lógica clásica. Pedagógicamente, esta distinción es vital para que los estudiantes de ciencias de la computación

entiendan por qué no pueden aplicar el razonamiento condicional tradicional a qubits entrelazados sin precaución. La lógica cuántica se enseña como un sistema donde la medición de una disyunción no implica necesariamente la medición de uno de sus componentes, reflejando el principio de incertidumbre de Heisenberg (Dejpasand y Sasani, 2023).

Reversibilidad y puertas universales

Una consecuencia matemática directa de la unitariedad de los operadores cuánticos es que todas las puertas lógicas cuánticas son reversibles. Esto representa un cambio drástico respecto a las puertas clásicas como NAND o XOR, que son irreversibles por naturaleza ya que no permiten reconstruir la entrada a partir de la salida.

El currículo introduce la puerta de Toffoli (CCNOT) como un ejemplo de puerta reversible universal que puede implementar cualquier función booleana clásica si se añaden bits auxiliares o ancillas. El estudio de la reversibilidad enseña a los estudiantes que, en principio, la computación cuántica no consume energía por borrado de información, vinculando la lógica con la termodinámica de la computación (véase la tabla 20).

Tabla 20: Comparación matemática de sistemas lógicos

Atributo Lógico	Sistema Booleano Clásico	Sistema Lógico Cuántico
Estructura Algebraica	Álgebra de Boole (Distributiva)	Retículo Ortomodular (No distributivo)
Representación de Estados	Subconjuntos del espacio de	Subespacios cerrados del espacio de Hilbert

fases		
Conmutatividad	Todas las magnitudes conmutan	Las magnitudes pueden no conmutar
Operaciones lógicas	AND, OR, NOT, NAND	Unitarias (U), Hadamard, CNOT
Valor de Verdad	Bivalente (Verdadero/Falso)	Basado en probabilidad y superposición

Integración curricular: benchmarks y estructuras de programas

El análisis de los currículos globales muestra una convergencia hacia un modelo híbrido que equilibra la teoría matemática con la implementación práctica en plataformas de nube.

El Modelo de Stanford y la Universidad de Oxford

Stanford estructura su formación matemática de manera que los estudiantes de computación cuántica deben cursar álgebra lineal avanzada, cálculo multivariable y probabilidad para científicos de la computación (CS109) como prerequisites. El curso CS259Q sobre Computación Cuántica aborda temas como la simulación del Hamiltoniano, circuitos estabilizadores y el teorema de Gottesman-Knill, lo que requiere un manejo fluido de las estructuras algebraicas discretas.

Por otro lado, Oxford ofrece una formación que vincula la lógica y la

prueba con la computación cuántica desde el segundo año. Los estudiantes eligen opciones como Teoría Cuántica en el departamento de matemáticas e Información Cuántica en el de ciencias de la computación. Esta división permite que el estudiante aborde tanto los fundamentos analíticos (análisis complejo, espacios métricos) como los algorítmicos (modelos de computación, verificación formal).

La propuesta de QuTech y la Universidad de Delft

QuTech Academy ha diseñado un currículo que se extiende desde el nivel de bachillerato hasta el máster y el desarrollo profesional. Su enfoque se centra en la Escuela de Cuántica, que introduce a los estudiantes en el desarrollo de hardware y algoritmos simultáneamente. Un aspecto destacado de su oferta es el curso de Corrección de Errores Cuánticos y Algoritmos, que entrena a los estudiantes en las últimas técnicas de compilación cuántica y arquitecturas tolerantes a fallos. El currículo de QuTech es notable por su equilibrio entre la física de dispositivos (superconductores, átomos neutros) y las herramientas matemáticas de alto nivel necesarias para la corrección de errores.

El enfoque de la UNAM y la educación en América Latina

La UNAM, a través de su Escuela de Cómputo Cuántico, ofrece un programa orientado a la práctica con herramientas de código abierto como Qiskit. Los requisitos mínimos incluyen álgebra lineal a nivel de licenciatura (vectores, eigenvalores, cambio de base) y una revisión exhaustiva de las puertas lógicas clásicas y circuitos sumadores. Este enfoque es pedagógicamente efectivo para estudiantes de ingeniería y actuaría, ya que

utiliza la programación en Python y los Jupyter Notebooks para visualizar conceptos abstractos como la esfera de Bloch y el entrelazamiento de Bell (véase la tabla 21).

Tabla 21: Enfoque de universidades en cursos de cómputo cuántico

Institución	Curso Clave	Temas Matemáticos Tratados	Proyecto Típico
UCLA	QNT SCI 402	Evolución de matrices de densidad, entropía	Simulación de decoherencia
Illinois	PHYS 498	Dualidad onda-partícula, bra/ket, sensing	Algoritmo de Grover desde cero
Chicago	Quantum Networking	Probabilidad condicional, states, Bell	Implementación de BB84 en Qiskit
UPC	CCQ	Postulados de física cuántica, RSA vs Shor	Simulación de protocolos BB84 y B92
UIC	ECE 394	Procesos estocásticos para ingenieros	Análisis de ruido en hardware real

Desafíos matemáticos en la corrección de errores cuánticos (QEC)

La corrección de errores es actualmente el cuello de botella para la computación cuántica práctica. A diferencia de los bits clásicos, los qubits no pueden ser copiados debido al teorema de no clonación, lo que invalida las estrategias de redundancia simple. El currículo moderno debe, por tanto, enseñar códigos que utilicen el entrelazamiento para detectar y corregir errores de forma no invasiva (Google Quantum AI and Collaborators, 2025).

Códigos de estabilizador y álgebra sobre campos finitos

El formalismo de los estabilizadores, central en la enseñanza de QEC, utiliza el álgebra lineal sobre el cuerpo finito $GF(2)$ para describir las operaciones de error. Los estudiantes aprenden que un error puede verse como una matriz de Pauli (X o Z) que actúa sobre un qubit físico. El objetivo del código de corrección es codificar un qubit lógico en un subespacio de un sistema mayor de qubits físicos, de tal manera que el error mueva el estado a un subespacio ortogonal detectable mediante mediciones de síndrome que no revelan la información codificada.

El código de superficie y la topología

El código de superficie es actualmente el protocolo más prometedor debido a su alto umbral de tolerancia a fallos. Su enseñanza requiere nociones de topología y geometría en dos dimensiones, ya que los qubits se disponen en una red donde las comprobaciones de paridad se realizan localmente

(Zhang y Chen, 2026). Los avances de 2025 de empresas como Google (chip Willow) y IBM muestran que el dominio de estos códigos permite reducir exponencialmente la tasa de error a medida que aumenta el número de qubits, un concepto matemático fundamental que los estudiantes deben asimilar para trabajar en el diseño de hardware.

El papel del aprendizaje por refuerzo en QEC

Una tendencia emergente identificada en 2025 es el uso del aprendizaje por refuerzo (RL) para optimizar la corrección de errores en tiempo real. Los currículos están empezando a integrar técnicas de inteligencia artificial para entrenar decodificadores que identifiquen patrones de error complejos y ajusten los parámetros del procesador automáticamente (Baiocchi et al., 2025). Este cruce entre la estadística cuántica y el aprendizaje automático representa una de las fronteras más activas de la formación actual, donde el ordenador cuántico aprende de sus propios errores para mejorar su estabilidad operativa.

Pedagogía 5.0 y el futuro de la educación cuántica

El desafío de enseñar conceptos que desafían la intuición clásica ha llevado al desarrollo de marcos pedagógicos innovadores. La Pedagogía Cuántica utiliza los propios principios de la mecánica cuántica —como la superposición de ideas y el entrelazamiento de conocimientos— como metáforas para crear entornos de aprendizaje altamente adaptativos y personalizados (Espinosa, 2024).

Hiperpersonalización mediante algoritmos cuánticos

El concepto de Educador 5.0 propone el uso de potencia computacional cuántica para modelar la diversidad cognitiva de los estudiantes. Mediante simulaciones que analizan cómo diferentes perfiles (incluyendo estudiantes neurodiversos) procesan la información, los sistemas educativos pueden ajustar el ritmo y el andamiaje de manera predictiva. Esta tendencia sugiere que el currículo cuántico no solo enseñará sobre cuántica, sino que será gestionado por ella.

Alfabetización cuántica desde la educación secundaria

Instituciones como QuTech y diversas universidades están impulsando la integración de la alfabetización cuántica en la educación secundaria. El objetivo es familiarizar a los estudiantes con conceptos de superposición y entrelazamiento mediante juegos cuánticos y simulaciones visuales antes de que su pensamiento se vea limitado por la lógica puramente clásica. Esta exposición temprana es vital para construir una fuerza laboral capaz de operar en las industrias de ciberseguridad, finanzas y medicina, que se verán transformadas por la ventaja cuántica.

El cambio de un enfoque teórico a uno basado en proyectos

Los informes indican que los programas exitosos están abandonando el modelo de lecciones magistrales puras en favor de proyectos multisémana donde los estudiantes deben programar, simular y entender la física de sistemas reales. Proyectos que abarcan desde el diseño de clasificadores cuánticos variacionales hasta la implementación de protocolos de distribución

de claves cuánticas (QKD) permiten que las herramientas matemáticas dejen de ser abstractas y se conviertan en instrumentos de ingeniería prácticos.

Perspectiva histórica y filosófica: la ontología del currículo

La formación en computación cuántica no puede divorciarse de su contexto histórico y filosófico. El paso de la lógica aristotélica, basada en una ontología de entidades estáticas, a una lógica cuántica basada en la potencia o posibilidad es una transición que los currículos deben abordar para proporcionar una comprensión profunda del campo.

Mientras que la lógica clásica es la lógica de una mente omnisciente donde cada afirmación está decidida semánticamente, la lógica cuántica es la lógica de la interacción y la medida. Esta perspectiva permite a los estudiantes apreciar que la computación cuántica no es solo un acelerador de cálculos, sino una forma diferente de interrogar a la naturaleza (Kaliappan et al., 2026). Autores como von Neumann y Heisenberg, cuyas obras siguen siendo pilares en las listas de lectura, proporcionaron la base para entender que la función de onda no es una propiedad física en el sentido tradicional, sino una densidad de probabilidad que representa lo que el sistema podría ser.

Ahora bien, el currículo de la computación cuántica en la actualidad representa una de las síntesis más ambiciosas del conocimiento humano. Al integrar el rigor absoluto del álgebra lineal y el cálculo con la flexibilidad probabilística de la estadística y la lógica no distributiva, estos programas están forjando una nueva clase de profesionales. La madurez de la industria

en 2025, con hitos en la corrección de errores y la escalabilidad de qubits, confirma que la inversión en esta infraestructura matemática es la única vía para desbloquear las promesas de la computación del siglo XXI (Google Quantum AI and Collaborators, 2025). La formación del futuro será necesariamente híbrida, práctica y fundamentada en un dominio exhaustivo de las herramientas matemáticas que rigen el microcosmos.

Conclusión

A partir del análisis exhaustivo del estado del arte, el mapeo de experiencias curriculares internacionales y la evaluación de modelos de formación, el estudio concluye lo siguiente:

- i. La incorporación de la computación cuántica en la educación superior se encuentra en una etapa de transición y asimetría. Mientras que en el nivel de posgrado se observa la consolidación de maestrías especializadas e itinerarios de investigación dedicados, en el nivel de pregrado la integración es mayoritariamente periférica, aislada en asignaturas optativas de los últimos semestres o restringida a grupos de estudio extracurriculares. Persiste una brecha notable entre la formación teórica abstracta (física pura) y la formación aplicada de desarrollo informático, lo que dificulta la adopción masiva en carreras de ingeniería y tecnología.
- ii. La enseñanza efectiva de la computación cuántica requiere superar el sesgo exclusivamente conceptual mediante la adopción del aprendizaje basado en la práctica (*hands-on*) y la simulación. La integración de plataformas de acceso abierto en la nube (como IBM Quantum Experience, Qiskit, Cirq y Azure Quantum) e interfaces de visualización interactiva ha demostrado ser la estrategia pedagógica más eficaz. Esto permite a los estudiantes manipular qubits, construir circuitos cuánticos y ejecutar algoritmos en procesadores reales o simuladores sin necesidad de una infraestructura de hardware local de alto costo.
- iii. Estructuralmente, el modelo más viable para la educación

universitaria no exige la creación inmediata de nuevas carreras completas de pregrado, sino una estrategia de integración gradual y modular:

- Nivel básico (infusión transversal): Reorganización de asignaturas fundamentales existentes (como Álgebra Lineal, Estructura de Datos y Probabilidad) para incorporar notación de Dirac, espacios de Hilbert y conceptos de información cuántica.
 - Nivel intermedio (módulos y optativas): Creación de asignaturas electivas interdepartamentales sobre algoritmos cuánticos y programación.
 - Nivel avanzado (concentraciones y microcredenciales): Diplomas, menores académicos y maestrías orientadas a la resolución de problemas de optimización, criptografía y *Quantum Machine Learning*.
- iv. La consolidación de esta disciplina demanda la ruptura de los silos departamentales tradicionalmente rígidos. La estrategia clave radica en el diseño de codirecciones docentes y comités curriculares mixtos constituidos por los departamentos de Física, Matemática y Ciencia de la Computación / Ingeniería. Solo la convergencia de estas tres áreas garantiza que el estudiante comprenda tanto los principios físicos subyacentes como la abstracción algorítmica y la aplicación industrial.

En función de los hallazgos de este estudio, se formulan las siguientes recomendaciones dirigidas a decanos, directores de programa, comités de acreditación y cuerpo docente:

Para la gestión académica y directiva

- Diseñar marcos curriculares flexibles y modulares: Promover la

creación de *minors*, microcredenciales y concentraciones temáticas en tecnologías cuánticas que puedan adaptarse rápidamente a los cambios del entorno tecnológico sin pasar por reformas curriculares burocráticas y prolongadas.

- Fomentar alianzas con el ecosistema industrial y tecnológico: Establecer convenios de colaboración con empresas del sector informático, redes académicas e iniciativas globales de computación cuántica que faciliten el acceso a crédito de procesamiento en la nube, mentorías y proyectos aplicados de fin de carrera.

Para el cuerpo docente y el diseño instruccional

- Actualizar las asignaturas de tronco común: Rediseñar los sílabos de álgebra lineal y matemáticas discretas para incluir ejemplos prácticos aplicados a puertas cuánticas y matrices de densidad desde los primeros semestres de ingeniería y ciencias.
- Adoptar metodologías activas y laboratorios virtuales: Fundamentar la enseñanza en el análisis de casos reales (criptografía poscuántica, optimización logística, simulación molecular) utilizando entornos de desarrollo en Python e interfaces gráficas interactivas.

Para la política de investigación y formación docente

- Capacitación docente transdisciplinaria: Implementar programas institucionales de formación continua para profesores de computación en fundamentos de física cuántica y para profesores de física en ciencias de la computación e ingeniería de software.
- Creación de semilleros y laboratorios interdepartamentales: Promover la creación de espacios de investigación estudiantil donde converjan alumnos de distintas disciplinas para abordar problemas complejos

mediante enfoques computacionales clásicos y cuánticos.

La computación cuántica ya no representa una especulación teórica de la física del futuro, sino un paradigma científico y tecnológico en plena consolidación. Las universidades que asuman hoy el reto de adaptar sus estructuras pedagógicas e interdisciplinarias no solo cerrarán la brecha de talento humano que demanda la industria, sino que posicionarán a sus comunidades académicas como referentes activos en la nueva revolución de la información.

En el ámbito académico, la computación cuántica desafía los modelos tradicionales de organización disciplinar. Históricamente, los planes de estudio en Ciencia de la Computación, Ingeniería y Física han operado en silos departamentales rígidos: la física cuántica se reserva a los programas de física pura, mientras que los programas de computación enfocan su modelo en la lógica clásica binaria y las arquitecturas Von Neumann.

En conclusión, esta fragmentación epistémica dificulta que un estudiante de ingeniería acceda a los fundamentos físicos de la información o que un estudiante de física desarrolle competencias avanzadas de diseño de software y complejidad algorítmica. Justificar la integración de la computación cuántica en el currículo universitario implica proponer un modelo interdisciplinario y transdisciplinario genuino, donde el álgebra lineal, la mecánica cuántica y la teoría de la información converjan en un marco pedagógico coherente y accesible desde etapas tempranas de la formación profesional.

Bibliografía

- Baioletti, M., Fagiolo, F., Loglisci, C., Losavio, V. N., Oddi, A., Rasconi, R., & Gentili, P. L. (2025). Quantum Artificial Intelligence: Some Strategies and Perspectives. *AI*, 6(8), 175. <https://doi.org/10.3390/ai6080175>
- Bartusik-Aebisher, D., Justin Raj, DR, & Aebisher, D. (2026). Inteligencia artificial en el diagnóstico médico: fundamentos, aplicaciones clínicas y direcciones futuras. *Applied Sciences*, 16 (2), 728. <https://doi.org/10.3390/app16020728>
- Bin, C., Xiu-Ha, D., Xiu, Yu, H., Guangchong, H., Peihao, H., Jun, L., Ben-Chuan, L., Dawei, L., Yao, L., Chudan, Q, Hui, W., Tao, X., Shi, Y., Man-Hong, Y., Junkai, Z., Song, Z., Youpeng, Z., Xinhua, P., Franco, N., & Dapeng, Y.. (2023). Ruidosas computadoras cuánticas de escala intermedia. *Frente. Física*, 18(2), 21308 <https://doi.org/10.1007/s11467-022-1249-z>
- Bluvstein, D., Evered, S.J., Geim, A.A. et al. (2024). Logical quantum processor based on reconfigurable atom arrays. *Nature*, 626, 58–65. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06927-3>
- Castrillón, J., Freire Jr., O., & Rodríguez, B. (2014). Mecánica cuántica fundamental, una propuesta didáctica. *Revista Brasileira De Ensino De Física*, 36(1), 1–12. <https://doi.org/10.1590/S1806-11172014000100023>
- Chow J.C.L. (2024). Quantum Computing in Medicine. *Medical sciences (Basel, Switzerland)*, 12(4), 67. <https://doi.org/10.3390/medsci12040067>
- Dejpasand, M.T., & Sasani Ghamsari, M. (2023). Research Trends in Quantum Computers by Focusing on Qubits as Their Building Blocks. *Quantum Reports*, 5(3), 597-608. <https://doi.org/10.3390/quantum5030039>
- Esho, E.O., Akinyelu, A.A. & Dinis, M.A.P. (2026) Sustainable generative AI and

quantum computing: review assessment on the environmental impact of generative AI and quantum technologies. *Front. Sustain.* 7, 1726832. <https://doi.org/10.3389/frsus.2026.1726832>

Espinosa Cevallos, P.A. (2024). Pedagogía cuántica: aplicaciones de computación cuántica en educación personalizada. *Revista Científica Kosmos*, 3(2), 170-186. <https://doi.org/10.62943/rck.v3n2.2024.131>

Gokhale, S.S., Dhote, R.R. & Delhibabu, R. (2026). A review of quantum machine learning algorithms, applications, and emerging advantages. *Discov Computing*. 29, 226. <https://doi.org/10.1007/s10791-026-10085-1>

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

Gouba, L. (2025). Role of Qubits in Quantum Entanglement and Quantum Teleportation. *Mathematics*, 13(17), 2857. <https://doi.org/10.3390/math13172857>

Grigera, J., & Nava, A. (2021). El futuro del trabajo en América Latina: crisis, cambio tecnológico y control. *El Trimestre Económico*, 88(352), 1011–1042. <https://doi.org/10.20430/ete.v88i352.1242>

Hailan, M., Bo, Q., Ian, R., Petersen, Re-Bing W., Herschel, R., & Daoyi, D. (2025). Machine learning for estimation and control of quantum systems. *National Science Review*, 12, 8. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaf269>

Kaliappan, T., Ratnaparkhi, P., Raj, R., Pujari, M., & Venukanti, S.A. (2026). Mapeo de la evolución de la computación cuántica en la educación: Un análisis bibliométrico de las tendencias de investigación globales (2011–2025). *European Journal of Educational Research*, 15 (3), 979-994. <https://doi.org/10.12973/eu-jer.15.3.979>

- La Cour, B. (2023). Advances in Quantum Computing. *Entropy*, 25(12), 1633. <https://doi.org/10.3390/e25121633>
- López-Meneses, E., Cáceres-Tello, J., Galán-Hernández, J.J., & López-Catalán, L. (2025). Quantum Computing in Data Science and STEM Education: Mapping Academic Trends and Analyzing Practical Tools. *Computers*, 14(6), 235. <https://doi.org/10.3390/computers14060235>
- Malatji, M., & Tolah, A. (2025). Dimensiones de la ciberseguridad en inteligencia artificial (IA): un marco integral para comprender la IA adversaria y ofensiva. *AI Ethics*, 5, 883–910. <https://doi.org/10.1007/s43681-024-00427-4>
- Marchetti, L., Nifosì, R., Martelli, P. L., Da Pozzo, E., Cappello, V., Banterle, F., Trincavelli, M. L., Martini, C., & D'Elia, M. (2022). Quantum computing algorithms: getting closer to critical problems in computational biology. *Briefings in bioinformatics*, 23(6), bbac437. <https://doi.org/10.1093/bib/bbac437>
- Martínez, C.E.P., Gómez, M.J., Borchardt, M., & Garzón, M. (2022). Hacia un currículum emancipador de las Ciencias de la Computación. *Revista Latinoamericana de Economía Y Sociedad Digital*, 3. <https://doi.org/10.53857/LBUS5649>
- Memon, Q.A., Al Ahmad, M., & Pecht, M. (2024). Quantum Computing: Navigating the Future of Computation, Challenges, and Technological Breakthroughs. *Quantum Reports*, 6(4), 627-663. <https://doi.org/10.3390/quantum6040039>
- Mero-Terán, L., & Macías-Arias, E. (2025). Modelos tecnológicos de computación en la nube en la transformación digital de la educación superior: Una Revisión Sistemática de Literatura. *Digital Publisher CEIT*, 10(1), 29-53.

<https://doi.org/10.33386/593dp.2025.1.2704>

Nguyen, N.-A.-T., Wang, C.-N., & Dang, T.-T. (2025). Advanced Process Optimization in Logistics and Supply Chain Management. *Processes*, 13(6), 1864. <https://doi.org/10.3390/pr13061864>

Pandey, T.N., Ravalekar, V., Nair, S.D. et al. (2025). A comparative analysis of classical machine learning models with quantum-inspired models for predicting world surface temperature. *Sci Rep*, 15, 28443. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-12515-4>

Pyzer-Knapp, E.O., Pitera, J.W., Staar, P.W.J. et al. (2022). Aceleración del descubrimiento de materiales mediante inteligencia artificial, computación de alto rendimiento y robótica. *npj Comput Mater*, 8, 84. <https://doi.org/10.1038/s41524-022-00765-z>

Qerimi, L., Malone, S., Rexigel, E. et al (2025). Exploración de los mecanismos de las representaciones de cúbits e introducción de un nuevo sistema de categorías para representaciones visuales: resultados de evaluaciones de expertos. *EPJ Quantum Technol.* 12, 45. <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-025-00346-1>

Rath, M., & Date, H. (2024). Quantum data encoding: a comparative analysis of classical-to-quantum mapping techniques and their impact on machine learning accuracy. *EPJ Quantum Technol.* 11, 72. <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-024-00285-3>

Ruíz Cortez, P. (2026). Ciberseguridad financiera: retos para empresas en la era de la digitalización. *Revista Social Fronteriza*, 6(1), e-1001. [https://doi.org/10.59814/resofro.2026.6\(1\)1001](https://doi.org/10.59814/resofro.2026.6(1)1001)

Sergey, B., Oliver Dial, J.M. Gambetta, D.G., Zaira, N. (2022). The future of quantum computing with superconducting qubits. *J. Appl. Phys.*, 28, 132(16):

160902. <https://doi.org/10.1063/5.0082975>

Shahen, M.E., Otaify, M., Mohamed, H.A., & Rady, A. (2026). Efecto de la conciencia ESG en las decisiones de inversión sostenible: un estudio experimental. *Journal of Risk and Financial Management*, 19(6), 427. <https://doi.org/10.3390/jrfm19060427>

Shamsuddoha, M., Khan, E.A., Chowdhury, M.M.H., & Nasir, T. (2025). Revolutionizing Supply Chains: Unleashing the Power of AI-Driven Intelligent Automation and Real-Time Information Flow. *Information*, 16(1), 26. <https://doi.org/10.3390/info16010026>

Shreya, B., Singh, S., & Singh, N.L. (2026). Superconducting Qubits in Quantum Electronics. In: Yadav, S., Rab, S., Arya, Y., Singh, H., Agarwal, R., Walter, S. (eds) Handbook of Electronic Devices and Materials. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-8867-8_30-1

Sun, Q., Zhou, S., Chen, R. et al. (2024). De la computación a la mecánica cuántica: educación accesible y práctica en computación cuántica para estudiantes de secundaria. *EPJ Quantum Technol.* 11, 58. <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-024-00271-9>

Yang, H., & Kim, N.Y. (2023). Material-Inherent Noise Sources in Quantum Information Architecture. *Materials*, 16(7), 2561. <https://doi.org/10.3390/ma16072561>

Zadid, A.L., Sulyman, I.S., Alamgir, K., Arif, M., Atiq, U.R., & Amine, B. (2026). Quantum machine learning in predictive maintenance: A comprehensive state-of-the-art review, *Computers and Electrical Engineering*. 139, Part A, 111374. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2026.111374>

Zhang, F., & Chen, J. (2026). The Hitchhiker's Guide to the Surface Code. *Entropy*, 28(2), 251. <https://doi.org/10.3390/e28020251>

De esta edición de “*Computación cuántica en el currículo universitario*”, se terminó de editar en la ciudad de Colonia del Sacramento en la República Oriental del Uruguay el 10 de abril de 2026

Editorial Mar Caribe

Computación cuántica en el currículo universitario

ISBN: 978-9915-698-89-2

ISBN: 978-9915-698-89-2



Colonia, Uruguay
Abril, 2026