

Quantum Computing Training for Engineering: An Innovative Curricular Approach at UPTC

Gustavo Cáceres-Castellanos¹[0000-0001-9621-3585], Juan-Sebastian González-Sanabria²[0000-0002-1024-6077] and Javier Antonio Ballesteros-Ricaurte³[0000-0001-9164-4597]

¹ Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia
gustavo.caceres@uptc.edu.co

² Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia
juansebastian.gonzalez@uptc.edu.co

³ Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia
javier.ballesteros@uptc.edu.co

Abstract. Quantum computing is transforming strategic areas such as cybersecurity, finance, logistics, the pharmaceutical industry, and materials development, among other key sectors. Given the growing demand for professionals specialized in this field, this paper presents an integrated curriculum for training in quantum computing, aimed at students of the Faculty of Engineering at the Pedagogical and Technological University of Colombia (UPTC). The curriculum design is geared toward engineering programs and includes modules on Fundamentals of Quantum Computing, Quantum Algorithms, and Practical Applications in Engineering. In addition, active teaching-learning strategies are incorporated to ensure a solid assimilation of concepts. This proposal seeks to train engineers capable of leading innovation in the quantum era, promoting technological and social development from an interdisciplinary approach.

Keywords: Quantum Computing, Engineering Education, Curriculum Design, UPTC, Quantum Literacy, Higher Education, Quantum Technologies.

Formación en Computación Cuántica para Ingenierías: Un Enfoque Curricular Innovador en la UPTC

Resumen. La computación cuántica está transformando áreas estratégicas como la ciberseguridad, las finanzas, la logística, la industria farmacéutica y el desarrollo de materiales, entre otros sectores clave. Ante la creciente demanda de profesionales especializados en este campo, esta ponencia presenta un currículo integrado para la formación en computación cuántica, dirigido a estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. El diseño curricular está orientado a los programas de ingeniería e incluye módulos en, Fundamentos de la computación cuántica, Algoritmos cuánticos, Aplicaciones prácticas en ingeniería. Además, se incorporan estrategias de

enseñanza-aprendizaje activo para garantizar una asimilación sólida de los conceptos. Esta propuesta busca formar ingenieros capacitados para liderar la innovación en la era cuántica, fomentando el desarrollo tecnológico y social desde un enfoque interdisciplinario.

Palabras clave: Computación Cuántica, Educación en Ingeniería, Diseño Curricular, Alfabetización Cuántica, Aprendizaje Activo, Tecnologías Cuánticas.

1 Introducción

La computación cuántica es considerada una de las tecnologías más revolucionarias, con capacidad para transformar numerosos sectores estratégicos a escala global (Vermaas & Mans, 2024). Sus aplicaciones se extienden a áreas que van desde el descubrimiento acelerado de fármacos y materiales (Clensy, 2024; Pyzer-Knapp & Curioni, 2024) hasta la optimización de sistemas complejos en finanzas, logística y campos de la ingeniería específicos, como el diseño de parques eólicos (Kagemoto, 2024). La sinergia de esta tecnología con la inteligencia artificial (Klusch et al., 2024), sumada a su potencial para redefinir la ciberseguridad (Vass Foundation, 2024; Vermaas & Mans, 2024), amplía aún más su alcance transformador. Reconociendo este gran potencial mundial, se ha incentivado una significativa inversión tanto pública como privada (Vermaas & Mans, 2024). Tal reconocimiento ha culminado en la declaración por parte de la ONU/UNESCO del 2025 como Año Internacional de la Ciencia y Tecnología Cuántica —vinculado incluso a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (UNESCO, 2025)—, un hecho que realza su importancia global y motiva, a su vez, la exploración activa de este campo por parte de la industria (Pfaendler et al., 2024).

Sin embargo, a pesar de ser una revolución prometedora se presentan desafíos que dificultan su adopción generalizada. La gran brecha existente de talento, la oferta de profesionales es inferior a la demanda actual (Troan & Attorney, 2025) (Computer Society, 2023). La complejidad inherente y los desafíos de usabilidad de las herramientas cuánticas actuales, especialmente para ingenieros y expertos de dominio específico que carecen de formación en mecánica cuántica (Kim et al., 2025). A esto se suma la dificultad de integrar software cuántico en los sistemas computacionales clásicos existentes y la dependencia del hardware específico que limita la portabilidad (Moguel et al., 2022).

En este escenario, conscientes de esta revolución, la formación de ingenieros con fundamentos sólidos en CC adquiere una importancia estratégica fundamental. La Computación Cuántica, no solo responde a las demandas del contexto y del futuro mercado laboral, dotando a egresados de habilidades de vanguardia altamente valoradas, sino que también posiciona a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) como una institución líder e innovadora en la formación de talento humano capaz de impulsar el desarrollo tecnológico y la competitividad a nivel regional y

nacional. Este enfoque curricular es, por tanto, crucial para asegurar la pertinencia y excelencia de nuestros programas de ingeniería en el mediano y largo plazo.

El resultado de un diseño de un innovador e integrado en Computación Cuántica, como una herramienta para mitigar las barreras de conocimiento y facilitar la adopción por parte de futuros ingenieros. Este diseño articula los fundamentos esenciales con algoritmos y aplicaciones relevantes, empleando estrategias de aprendizaje activo y herramientas de simulación accesibles (Keip et al., 2025; Q SPINQ, 2025), buscando superar los desafíos de usabilidad (Kim et al., 2025) identificados.

El enfoque principal del trabajo presentado es su interdisciplinariedad y visión amplia. Reconociendo que la aplicación real de la CC exige la colaboración entre expertos cuánticos y de dominio (Kim et al., 2025; Pook et al., 2025); y que probablemente el futuro cercano estará dominado por soluciones híbridas cuántico-clásicas (Klusck et al., 2024; Moguel et al., 2022). El minor está orientado a las "Ingenierías" en general. Busca desarrollar las competencias necesarias (Pfaendler et al., 2024) para que estudiantes de diversas ramas de la ingeniería en la UPTC puedan entender los fundamentos, interactuar con herramientas cuánticas (a pesar de sus limitaciones NISQ), colaborar en equipos multidisciplinares e integrarse en los emergentes paradigmas de la "Ingeniería Cuántica" (Lakshman Havish, 2024) y la "Ingeniería de Software Cuántico", superando los retos de integración (Moguel et al., 2022).

El objetivo de este artículo es presentar la estructura, metodología y fundamentación de un diseño curricular que dé una respuesta pragmática y adaptada a los desafíos actuales (NISQ, usabilidad, integración, interdisciplinariedad) de la formación en CC para ingenieros de diversas áreas, destacando su potencial para fomentar las competencias requeridas en la emergente era cuántica híbrida.

Las secciones siguientes describirán el contexto y la fundamentación y la justificación que motivaron el diseño, la metodología empleada para su estructuración, la descripción detallada del microcurrículo y sus componentes, una discusión sobre su implementación y alcance interdisciplinario, y finalmente, se expondrán las conclusiones y recomendaciones principales del estudio.

2 Contexto y Fundamentación

2.1 Fundamentos Esenciales de la Computación Cuántica (CC)

Para comprender el enfoque curricular propuesto, es útil repasar brevemente los conceptos que diferencian la computación cuántica de la clásica. Mientras la computación clásica opera con bits (0 o 1), la CC utiliza qubits. Un qubit, gracias al principio de superposición, puede representar no solo 0 o 1, sino una combinación de ambos estados simultáneamente, lo que permite explorar un espacio de soluciones exponencialmente mayor (Hughes et al., 2021; Teja Marella & Sai Kumar Parisa, 2022; Wong, 2022).

Otro fenómeno clave es el entrelazamiento, una correlación única entre qubits donde el estado de uno está intrínsecamente ligado al de otro(s), sin importar la distancia que los separe. Finalmente, las operaciones sobre qubits se realizan mediante puertas cuánticas, análogas a las puertas lógicas clásicas pero reversibles y capaces de manipular estos estados cuánticos complejos (ej. rotaciones, operaciones controladas). Estos elementos –qubits, superposición, entrelazamiento y puertas– son los pilares sobre los que se construyen los algoritmos cuánticos y definen su potencial (Wong, 2022) (Hughes et al., 2021).

2.2 Panorama de la Computación Cuántica en la Educación Superior

El creciente interés global en la CC se refleja claramente en el ámbito académico. La investigación universitaria ha visto un notable aumento en grupos dedicados a la cuántica, pasando de 91 en 2019 a 181 en 2023 a nivel mundial, con un liderazgo marcado por países como Estados Unidos, Reino Unido y Canadá (Quantum Computing Report, 2023). En cuanto a la formación, si bien prácticamente todas las universidades de alto rango ofrecen cursos introductorios o especializados, la oferta de programas estructurados se concentra mayoritariamente a nivel de posgrado (Cáceres-Castellanos, 2024). Existen numerosas maestrías (~59 programas identificados globalmente) y algunos doctorados específicos, aunque mucha investigación doctoral ocurre dentro de programas de Física o Ciencias de la Computación (Cáceres-Castellanos, 2024).

Sin embargo, a nivel de pregrado, las opciones formales son escasas, limitándose a certificados, minors o programas completos, principalmente en EE.UU. y Europa. Esto evidencia un **vacío significativo en la formación cuántica accesible y estructurada desde el pregrado**, especialmente con un enfoque aplicado a disciplinas como la **ingeniería** y en contextos regionales como el latinoamericano.

2.3 Panorama de la Formación en Computación Cuántica en Colombia

Debido a las políticas públicas y al compromiso de las universidades, Colombia está despertando su interés por la computación cuántica. El Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) ha reconocido estas tecnologías como prioritarias para el país. A través de programas como 'Colombia Inteligente', se está fomentando la investigación práctica y la innovación en áreas clave, creando alianzas donde universidades y empresas trabajan juntas (Minciencias, 2025).

La Universidad de los Andes ha implementado un enfoque integral para el desarrollo de la computación cuántica. En el ámbito académico, su oferta incluye cursos de educación continua, una electiva de pregrado en Matemáticas titulada "Introducción a la Computación Cuántica" (UniAndes, 2025) y una materia de posgrado en Ingeniería sobre "Computación Cuántica y Criptografía" (Quiroga Becerra & UniAndes, 2025). De manera complementaria, la universidad ha fortalecido su infraestructura con la adquisición del primer computador cuántico del país, destinado principalmente a fines pedagógicos (Laguna Cardozo, 2025).

La Universidad Nacional de Colombia (UNAL) se ha posicionado como líder en el desarrollo de la computación cuántica en el país, con un enfoque estratégico en dos áreas clave. En el ámbito de la investigación y los estudios de posgrado, la sede Bogotá ofrece una línea de investigación oficial en “Computación Cuántica” para sus programas de Maestría y Doctorado en Ciencias – Física, a través de su grupo de Óptica e Información Cuántica (UNAL- Bogotá, 2025). Complementariamente, la sede Medellín alberga el Centro de Excelencia en Computación Cuántica e Inteligencia Artificial (UNAL-Medellín & Facultad de Ciencias, 2022).

En paralelo, la UNAL impulsa la divulgación y el acceso abierto al conocimiento mediante dos estrategias principales: un curso virtual masivo y gratuito titulado «Computación cuántica: de qubits a qudits» (UNAL-Medellín, 2024), transmitido desde Medellín por Twitch y YouTube; y la Cátedra Nacional de Tecnologías Cuánticas, un foro de alto nivel con expertos nacionales e internacionales para discutir los avances del sector (Quantum Colombia & UNAL-Bogotá, 2025).

La UPTC ha expandido su oferta académica en computación cuántica a través de una secuencia de cursos especializados. En el primer semestre de 2024, el programa de Ingeniería de Sistemas y Computación introdujo la electiva "Introducción a la Computación Cuántica". Para el segundo semestre del mismo año, el programa de Física ofreció "Fundamentos de Computación Cuántica", un curso que congregó a estudiantes de Física, Ingeniería de Sistemas y Computación, así como de la Maestría y el Doctorado en Física. La progresión continuó en el primer semestre de 2025 con la impartición de la electiva "Introducción a los Algoritmos Cuánticos" en el programa de Física.

La universidad de Antioquia (UdeA) se enfoca en la formación a través de la investigación, integrando estudiantes en grupos que trabajan en la frontera del conocimiento y que tienen como objetivo explícito la formación de capital humano avanzado (Universidad de Antioquia, 2025) .

La universidad Eafit optó por un modelo pragmático de alianza industrial con IBM para adoptar su currículo de la "Skills Academy", capacitando primero a sus docentes para luego masificar la formación (Cubillos Murcia, 2020).

El modelo de semilleros de investigación es también una estrategia popular, implementada por la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) desde su Facultad de Ingenierías y por la Universidad del Valle (Univalle) con un enfoque extracurricular e interdisciplinario (UTP-Comunicaciones, 2019); (Univalle, 2024).

Finalmente, la Universidad Distrital Francisco José de Caldas muestra interés en el campo con el ofrecimiento de un diplomado para estudiantes, personal administrativo y egresados y el desarrollo de trabajos de grado (UDistrital, 2025) en el campo de la computación cuántica, que sientan las bases para futuras ofertas.

Se evidencia una ausencia de programas curriculares estructurados y secuenciales (como un minor) diseñados específicamente para estudiantes de pregrado de las ingenierías. Es aquí donde la propuesta de la UPTC se hace relevante, y complementa los modelos existentes avanzando hacia la formación sistemática de fuerza laboral de ingenieros con alfabetización cuántica.

2.4 Tendencias en la Enseñanza de la CC y Enfoque UPTC

La enseñanza de la computación cuántica representa desafíos pedagógicos únicos debido a su naturaleza contraintuitiva y sus prerequisites matemáticos y físicos. La investigación sobre metodologías didácticas revela varias tendencias principales (Cáceres-Castellanos, 2024) :

- **Enfoque centrado en la Programación:** Utiliza lenguajes (Qiskit, Q#, Pyquil) y plataformas en la nube (IBM Quantum) para enseñar algoritmos y conceptos mediante la práctica de codificación, a menudo reduciendo la barrera de la física teórica.
- **Enfoque centrado en Herramientas:** Emplea simuladores, tutoriales interactivos (QuILTs), laboratorios virtuales (VR) y otros *frameworks* para facilitar la visualización y experimentación.
- **Enfoque centrado en Juegos (Ludificación):** Usa juegos de mesa, cartas, puzzles o videojuegos para introducir conceptos cuánticos de forma intuitiva y atractiva.

Considerando estas tendencias y las necesidades de los estudiantes de ingeniería, nuestro enfoque curricular en la UPTC adopta decididamente **metodologías de aprendizaje activo**. Priorizamos el aprendizaje basado en problemas y proyectos, las prácticas computacionales intensivas con simuladores y plataformas cuánticas reales accesibles en la nube, y el trabajo colaborativo. Creemos que este enfoque activo es fundamental para: (1) Hacer tangibles los conceptos abstractos de la CC para una audiencia de ingeniería, (2) Desarrollar habilidades prácticas de programación y resolución de problemas cuánticos en paralelo a la comprensión teórica, y (3) Fomentar el pensamiento crítico y la capacidad de innovación, alineándose con las competencias clave demandadas en la formación universitaria actual y los objetivos de la reforma académica UPTC (UPTC, 2019).

3 Metodología (Diseño Curricular):

El diseño del microcurrículo en Computación Cuántica (CC) presentado en esta ponencia, se abordó mediante una metodología sistemática orientada a garantizar su relevancia y efectividad para la formación en ingenierías dentro de la UPTC. Este proceso comprendió las siguientes fases clave:

- **Revisión Exhaustiva de la Literatura:**

Se realizó un estudio detallado del estado del arte, abarcando los fundamentos teóricos de la CC, sus aplicaciones emergentes en diversos campos, el panorama global de la enseñanza de la CC en la educación superior, y un análisis de las tendencias y metodologías pedagógicas utilizadas actualmente para su enseñanza.

- **Análisis de Necesidades:**

Se identificó y analizó la creciente demanda de profesionales con competencias cuánticas a nivel global e industrial, contrastándola con el vacío formativo existente, particularmente a nivel de pregrado y con un enfoque específico para estudiantes de ingeniería. Este análisis también consideró las dificultades pedagógicas inherentes a la enseñanza de la CC, subrayando la necesidad de enfoques innovadores y accesibles.

- **Enfoque por Competencias y Resultados de Aprendizaje:**

Siguiendo las directrices curriculares modernas y los lineamientos institucionales (UPTC, 2019)], se adoptó un enfoque centrado en el estudiante. Se definieron primero las competencias clave que los futuros ingenieros deberían adquirir en el ámbito de la CC. Posteriormente, estas competencias se tradujeron en Resultados de Aprendizaje (RA) específicos, claros y medibles, los cuales se convirtieron en la columna vertebral del diseño.

- **Diseño de Actividades Curriculares:**

Finalmente, los RA definidos guiaron la selección de contenidos temáticos esenciales y la estructuración de las tres actividades curriculares (cursos) que conforman el microcurrículo propuesto. Se buscó una progresión lógica desde los fundamentos hasta la programación y las aplicaciones, asegurando la coherencia y la alineación con los objetivos formativos establecidos.

Este proceso metodológico permitió construir una propuesta curricular fundamentada, pertinente y orientada a dotar a los estudiantes de ingeniería de la UPTC con las bases necesarias para afrontar los desafíos y oportunidades de la emergente era cuántica.

4 Resultados: Propuesta del Microcurrículo Innovador en la UPTC:

El resultado central del trabajo desarrollado es la propuesta de un microcurrículo innovador diseñado específicamente para introducir la Computación Cuántica (CC) en la formación de los estudiantes de ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). Este microcurrículo se estructura siguiendo un enfoque basado en competencias y resultados de aprendizaje, buscando una formación sólida y pertinente.

4.1 Objetivos, Competencias y Resultados de Aprendizaje

El **objetivo general** del microcurrículo es brindar a los estudiantes una comprensión robusta de los principios fundamentales de la CC, sus vastas aplicaciones potenciales y su impacto proyectado en la ciencia, la tecnología y la sociedad. Los **objetivos específicos** se centran en impartir dichos principios, desarrollar habilidades prácticas en el diseño e implementación de algoritmos cuánticos y explorar las aplicaciones más relevantes en áreas como criptografía, optimización y simulación.

Se espera que, al completar el microcurrículo, los estudiantes desarrollen **competencias** clave, tales como: dominio de los fundamentos para distinguir la CC de la clásica e identificar sus aplicaciones; capacidad para desarrollar, implementar y aplicar algoritmos cuánticos usando herramientas específicas; habilidad para mantenerse actualizados en el campo; y criterio para evaluar el impacto ético y social de esta tecnología. Estos se traducen en **Resultados de Aprendizaje (RA)** concretos, donde el estudiante: comprende los principios fundamentales, desarrolla e implementa algoritmos para resolver problemas, aplica la CC en diversos campos aprovechando sus ventajas, se actualiza sobre los avances y discute los desafíos éticos y sociales asociados.

4.2 Estructura del Microcurrículo

La propuesta se articula en torno a **tres actividades curriculares (cursos) secuenciales e integradas**, diseñadas para ofrecer una progresión lógica desde los conceptos básicos hasta las aplicaciones avanzadas:

- **Curso 1: Introducción a la Computación Cuántica (3 créditos, Teórico-Práctico):**
 - **Enfoque:** Establecer una base conceptual sólida.
 - **Contenido Principal:** Se abordan los orígenes de la CC, las diferencias fundamentales con la computación clásica (introduciendo qubits, superposición, entrelazamiento, notación de Dirac, esfera de Bloch), las puertas cuánticas como operaciones básicas, un panorama de las tecnologías de qubits existentes (iones atrapados, superconductores, etc.) y una introducción a los modelos de circuitos cuánticos y herramientas de simulación como IBM Quantum Composer.
- **Curso 2: Programación de Computadores Cuánticos (4 créditos, Práctico):**
 - **Enfoque:** Desarrollar habilidades prácticas de implementación algorítmica.
 - **Contenido Principal:** Este curso se centra en la programación cuántica utilizando frameworks como Qiskit. Los estudiantes implementan algoritmos cuánticos fundamentales y conocidos (ej. Grover, Shor, Bernstein-Vazirani, QAOA) y exploran su ejecución en simuladores y plataformas de hardware cuántico-reales accesibles a través de la nube, con un fuerte énfasis en la ejercitación práctica.

- **Curso 3: Aplicaciones de la Computación Cuántica (3 créditos, Teórico-Práctico):**
 - **Enfoque:** Explorar el impacto y los casos de uso de la CC en dominios específicos.
 - **Contenido Principal:** Se examinan las aplicaciones prácticas de la CC en áreas de alta relevancia para la ingeniería y la ciencia, como la optimización cuántica (recocido cuántico, QAOA), el aprendizaje automático cuántico (QSVM, clustering cuántico), la simulación cuántica (especialmente en química y materiales), y la criptografía (algoritmo de Shor, criptografía post-cuántica). Se discute también el estado actual de la tecnología y sus desafíos éticos y sociales.

Esta estructura trimodal busca ofrecer una ruta de aprendizaje integrada que permita a los estudiantes de ingeniería de la UPTC no solo comprender los fundamentos de la CC, sino también adquirir experiencia práctica en su programación y visualizar su potencial transformador en diversos campos de aplicación.

5 Discusión:

La propuesta de un microcurrículo en Computación Cuántica (CC) para ingenierías en la UPTC representa una iniciativa estratégica con implicaciones significativas para la formación de los estudiantes y el posicionamiento de la universidad. A continuación, se analizan sus aspectos clave:

5.1 Innovación y Adecuación del Enfoque Curricular

El carácter innovador de este microcurrículo reside en varios factores. **Primero**, introduce la formación estructurada en CC a nivel de pregrado y específicamente orientada a estudiantes de ingeniería, un enfoque aún poco común en el panorama educativo global y regional, que tiende a concentrar la CC en posgrados o departamentos de física. **Segundo**, aprovecha la flexibilidad brindada por la reforma académica de la UPTC (UPTC, 2019) para implementarse bajo la modalidad de minor, facilitando el acceso a estudiantes de diversos programas. **Tercero**, adopta metodologías de aprendizaje activo (basado en problemas, proyectos, uso intensivo de simuladores y plataformas en la nube), distanciándose de enfoques puramente teóricos y haciéndolo más adecuado y atractivo para el perfil del ingeniero, enfocado en la aplicación y la resolución de problemas.

La innovación de esta propuesta se acentúa al contrastarla con el panorama nacional existente. A diferencia de los modelos centrados en la investigación fundamental en física, como el de la Universidad de Antioquia, o las alianzas industriales de alto nivel como la de Eafit con IBM, la propuesta de la UPTC se distingue por su enfoque en la **formación curricular estructurada y secuencial a nivel de pregrado en ingeniería**.

Mientras que los semilleros de investigación en instituciones como la UTP o Univalle cumplen un rol vital en la incubación de talento, el microcurrículo de la UPTC representa el siguiente paso evolutivo: formalizar y escalar la formación de ingenieros con competencias cuánticas, respondiendo así a una brecha claramente identificada en el ecosistema educativo del país.

Este enfoque responde directamente a los **problemas planteados en la introducción**: la brecha entre el potencial de la CC y la disponibilidad de talento capacitado la necesidad de formación accesible más allá de los especialistas en física, y el imperativo de preparar a los futuros profesionales para una tecnología disruptiva que impactará profundamente en sus campos de acción.

5.2 Viabilidad de Implementación en la UPTC

La implementación de este microcurrículo en la UPTC se considera viable, apoyada por factores institucionales y tecnológicos. La reforma académica vigente, que contempla estructuras flexibles como los minors, proporciona el marco normativo y administrativo ideal. Tecnológicamente, la propuesta se apoya fuertemente en el uso de simuladores y plataformas cuánticas en la nube (como IBM Quantum, Microsoft Azure Quantum, entre otros), las cuales son accesibles y mitigan la necesidad inicial de costosa infraestructura física cuántica local. El principal desafío reside en asegurar y desarrollar la experticia docente necesaria para impartir los cursos con la calidad requerida, lo cual demandará un plan estratégico de capacitación o contratación por parte de la universidad. Sin embargo, con la planificación adecuada y la inversión en capital humano, la puesta en marcha es factible.

5.3 Impacto Potencial

El impacto potencial de este microcurrículo es doble. Para los estudiantes de ingeniería, representa una oportunidad única de adquirir competencias de vanguardia en un campo de alta demanda, mejorando significativamente su perfil profesional, su empleabilidad futura y sus capacidades para la innovación y la resolución de problemas complejos. Les abre puertas hacia estudios de posgrado especializados y los posiciona como agentes activos en la adopción de tecnologías cuánticas.

Para la UPTC, la implementación de este minor fortalecerá su oferta académica, proyectándola como una institución innovadora y a la vanguardia tecnológica. Aumentará su competitividad para atraer talento estudiantil y docente, potenciará las capacidades de investigación en áreas interdisciplinarias y reforzará su pertinencia al responder a las necesidades estratégicas del país y la región en la formación de capital humano avanzado, alineándose con los objetivos de calidad y desarrollo institucional.

5.4 Extensión a otras Ingenierías: Un Imperativo Interdisciplinar

Si bien el trabajo original se enfocó en Ingeniería de Sistemas y Computación, la presente propuesta amplía su alcance a toda la Facultad de Ingeniería, y se argumenta firmemente la **validez y necesidad de esta extensión**. La Computación Cuántica **no es un dominio exclusivo** de una sola disciplina; su naturaleza es fundamentalmente **interdisciplinaria**, bebiendo de la física, las matemáticas, la ciencia de la computación y aplicando sus herramientas a una vasta gama de problemas ingenieriles.

Áreas como la optimización (Ing. Industrial, Transporte y Vías), simulación de materiales y procesos (Ing. Metalúrgica, Minas, Geológica), diseño de fármacos (conexión con Ing. Química/Biotecnología), análisis de sistemas complejos (Ing. de Sistemas, Eléctrica, Electrónica) y el futuro de la seguridad de la información (todas las ingenierías) se verán profundamente impactadas por la CC. Ofrecer este minor de forma transversal dentro de la Facultad maximiza el retorno estratégico para la UPTC, fomenta la colaboración inter-programas y prepara a un espectro más amplio de ingenieros para los desafíos y oportunidades del futuro cuántico, tal como se recomendó en las conclusiones del trabajo base. Es una apuesta por una formación ingenieril verdaderamente integral y adaptada al siglo XXI.

6 Conclusiones y Trabajo Futuro:

6.1 Conclusiones

La principal contribución de este trabajo es el diseño detallado y fundamentado de un microcurrículo innovador para la enseñanza de la Computación Cuántica (CC), específicamente concebido para estudiantes de pregrado de ingeniería en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). Esta propuesta, basada en una revisión exhaustiva de la literatura, un análisis de las necesidades formativas actuales y un enfoque estructurado por competencias y resultados de aprendizaje ofrece una ruta pedagógica coherente y accesible para introducir a los futuros ingenieros en este campo.

La importancia y el potencial de este microcurrículo radican en su capacidad para: (1) Abordar la creciente brecha de talento calificado en CC a nivel global y regional; (2) Dotar a los ingenieros UPTC de competencias de vanguardia, mejorando su competitividad y preparación para los desafíos tecnológicos del futuro; y (3) Posicionar a la UPTC como una institución pionera y relevante en la formación cuántica en el país, mediante un enfoque pedagógico activo y adaptado a las necesidades de la ingeniería.

6.2 Trabajo Futuro

La culminación de este diseño curricular abre la puerta a una serie de pasos cruciales para su materialización y consolidación. El trabajo futuro inmediato contempla:

Implementación Piloto: Poner en marcha el microcurrículo, comenzando idealmente con los cursos dentro de la Facultad de Ingeniería de la UPTC, aprovechando el marco de la reforma académica.

Evaluación y Ajuste: Realizar un seguimiento riguroso de la implementación inicial, recopilando datos cuantitativos y cualitativos sobre la experiencia de aprendizaje de los estudiantes, el logro de los resultados de aprendizaje propuestos y la retroalimentación de los docentes. Esta evaluación será fundamental para refinar y ajustar los contenidos y metodologías.

Desarrollo de Recursos y Cursos Avanzados: Complementar la propuesta con el desarrollo de laboratorios prácticos más específicos y, a mediano plazo, explorar la creación de cursos electivos más avanzados para aquellos estudiantes que deseen profundizar en áreas particulares de la CC (ej. algoritmos específicos, hardware cuántico, QML avanzado, nuevos materiales).

Formalización como Minor Transversal: Impulsar activamente la recomendación clave de este trabajo: establecer formalmente este microcurrículo como un "Minor en Computación Cuántica". Esto permitiría su oferta no solo a todos los programas de ingeniería, sino también considerarlo para estudiantes de ciencias básicas (Física, Matemáticas) e incluso otras facultades con afinidad temática (ej. Ciencias Económicas para finanzas cuánticas), maximizando así su impacto interdisciplinario y el alcance estratégico para la UPTC.

Vinculación Externa: Establecer y fortalecer vínculos con empresas e instituciones de investigación en CC para facilitar prácticas profesionales, proyectos de grado conjuntos y mantener el currículo alineado con las demandas del sector.

La consolidación de este microcurrículo y su extensión como minor representa una oportunidad valiosa para que la UPTC lidere la formación de la próxima generación de profesionales preparados para la revolución cuántica en Colombia.

References

- Cáceres-Castellanos, G. (2024). *Diseño de un micro currículo por resultados de aprendizaje para la enseñanza de computación cuántica para el programa de Ingeniería de Sistemas y Computación de la UPTC*.
- Computer Society, I. (2023). *Quantum Computing: Demand for Talent in an Emerging Field*.
- Cubillos Murcia, N. (2020, August 11). *IBM y Eafit se unen por la computación cuántica*. <https://www.elcolombiano.com/negocios/empresas/ibm-y-eafit-lanzan-curso-de-computacion-cuantica-FC13440533>

- Hughes, C., Isaacson, J., Perry, A., Ranbel, ., Sun, F., & Turner, J. (2021). *Quantum Computing for the Quantum Curious*. Springer.
- Keip, S., Camps, D., & Van Beeumen, R. (2025). *QCLAB: A Matlab Toolbox for Quantum Computing*. <http://arxiv.org/abs/2503.03016>
- Kim, H., Jeng, M. J., & Smith, K. N. (2025). *Toward Human-Quantum Computer Interaction: Interface Techniques for Usable Quantum Computing*. <https://doi.org/10.1145/3706598.3713370>
- Klusch, M., Lässig, J., & Wilhelm, F. K. (2024). Quantum Computing and AI. *KI - Künstliche Intelligenz*, 38(4), 251–255. <https://doi.org/10.1007/s13218-024-00872-7>
- Laguna Cardozo, M. (2025). *El primer computador cuántico llega a Colombia / Universidad de los Andes*. <https://www.uniandes.edu.co/es/noticias/ciencias-aplicadas/el-primer-computador-cuantico-llega-a-colombia>
- Lakshman Havish, Er. K. (2024, November 19). Explained: Why Quantum Engineering is the next frontier in Education. *India Today*. <https://bestcolleges.indiatoday.in/news-detail/explained-why-quantum-engineering-is-the-next-frontier-in-education>
- Minciencias. (2025). *Convocatoria Colombia Inteligente: Ciencia y Tecnologías Cuánticas e Inteligencia Artificial para los territorios / Convocatoria 966 / Minciencias*. <https://minciencias.gov.co/convocatorias/convocatoria-colombia-inteligente-ciencia-y-tecnologias-cuanticas-e-inteligencia>
- Moguel, E., Rojo, J., Valencia, D., Berrocal, J., Garcia-Alonso, J., & Murillo, J. M. (2022). Quantum service-oriented computing: current landscape and challenges. *Software Quality Journal*, 30(4), 983–1002. <https://doi.org/10.1007/s11219-022-09589-y>
- Pfaendler, S. M.-L., Konson, K., & Greinert, F. (2024). Advancements in Quantum Computing—Viewpoint: Building Adoption and Competency in Industry. *Datenbank-Spektrum*, 24(1), 5–20. <https://doi.org/10.1007/s13222-024-00467-4>
- Pook, T., Vandenplas, J., Boschero, J. C., Aguilera, E., Leijnse, K., Chauhan, A., Bouzembrak, Y., Knapen, R., & Aldridge, M. (2025). Assessing the potential of quantum computing in agriculture. In *Computers and Electronics in Agriculture* (Vol. 235). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110332>
- Q SPINQ. (2025). *How Quantum Computers Are Revolutionizing Education*. <https://www.spinquanta.com/news-detail/how-quantum-computers-are-revolutionizing-education20250123035442>
- Quantum Colombia, & UNAL-Bogotá. (2025). *Catedra_QuantumUNAL - Quantum Colombia*. https://quantumcolombia.net/catedra_quantumunal/
- Quantum Computing Report. (2023). *Universities With Research Groups*. <https://quantumcomputingreport.com/universities/>
- Quiroga Becerra, M. E., & UniAndes. (2025). *Computación cuántica y criptografía - Nodo de Innovación*. <https://nodo.uniandes.edu.co/cursos/computacion-cuantica-y-criptografia/>
- Teja Marella, S., & Sai Kumar Parisa, H. (2022). Introduction to Quantum Computing. In *Quantum Computing and Communications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94103>

- Troan, B., & Attorney, P. (2025, April 10). *Quantum Computing Job Market: Salaries, Demand, and Hiring Trends* | PatentPC. <https://patentpc.com/blog/quantum-computing-job-market-salaries-demand-and-hiring-trends>
- UDistrital. (2025). *Repositorio*. <https://repository.udistrital.edu.co/search?query=Computaci%C3%B3n%20Cu%C3%A1ntica>
- UNAL- Bogotá. (2025). *Grupo de Óptica e Información Cuántica*. <http://www.hermes.unal.edu.co/pages/Consultas/Grupo.jsf?idGrupo=1031#planes>
- UNAL-Medellín. (2024). *VRI - Medellín / Curso computación cuántica 2024-2*. <https://laboratorios.unal.edu.co/investigaci%C3%B3n/apoyo-a-la-investigaci%C3%B3n/bolet%C3%ADn-siun/687/medell%C3%ADn-curso-computaci%C3%B3n-cu%C3%A1ntica-2024-2>
- UNAL-Medellín, & Facultad de Ciencias. (2022). *Centro de Excelencia en Computación Cuántica e Inteligencia Artificial*. <http://www.hermes.unal.edu.co/pages/Consultas/Proyecto.xhtml?idProyecto=52893>
- UniAndes. (2025). *Universidad de los Andes - MATE2182*. <https://uniandes.smartcatalogiq.com/en/catalogo-general-2022/catalogo/cursos/mate/2000/mate-2182/>
- Univalle. (2024). *Información del semillero* | UV. <https://univalle.danalytics-education.com/semillero/catalogo/detalle/33>
- Universidad de Antioquia. (2025). *Grupo de Física Atómica - Gfam*. https://www.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/generales/interina!/ut/p/z0/fY7BD0IwEER_pRw4t4JBPDbEmBBOm-hjoxatxSq0QIvBv7fgycR42GRfZndmMMMIzhqeqganjI-bGc8WSc7rNohVdk2J_yDNCK4zuNsdTEaURzjH7f-Ad1L3vGcWMG-3k5HDZmcFBMwoJIQH7TTfTys-u9FNa57twFfA4uMQ6JPUwdsYiIdEvlSu-puQKLNLhxEZa9EJyAu7A-t8rtHPCUkMrYexMwr-sAh4VmxY_hSwPcPVj1BnaPsJ4!/
- UPTC. (2019). *REFORMA ACADÉMICA UPTC*.
- UTP-Comunicaciones. (2019, July 9). *UTP presenta Semillero de Investigación Computación Cuántica - Gestión de la Comunicación y la Promoción Institucional*. <https://comunicaciones.utp.edu.co/42809/noticias/utp-presenta-semillero-de-investigacion-computacion-cuantica/>
- Wong, T. G. (2022). *Introduction to classical and quantum computing*. Rooted Grove.