

Hoja de ruta para aprender computación cuántica

Facundo Tomatis¹, Facundo Miglierini¹, Ricardo Rosenfeld¹ y Alejandro Fernández^{1,2}

¹ LIFIA, Facultad de Informática, UNLP. Calles 50 y 120 S/N. La Plata, Argentina,

² Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, La Plata, Argentina.

Resumen La computación cuántica surge como un paradigma de procesamiento de información radicalmente distinto al clásico, al apoyarse en fenómenos propios de la mecánica cuántica —como la superposición y el entrelazamiento— para operar con cubits en lugar de bits. Los recientes avances en el desarrollo de computadores cuánticos han despertado un creciente interés entre estudiantes, docentes, investigadores y profesionales de la informática clásica. Estos se enfrentan a desafíos únicos, no solo por la incipiente madurez de la tecnología cuántica, sino también por la necesidad de ampliar su formación en varios frentes. Comprender el álgebra y la física subyacentes, abordar nuevas nociones de complejidad computacional y explorar dominios de aplicación en los que la computación clásica tiene poca presencia son algunos de los principales retos que deben afrontar. En respuesta a estos retos surge una oferta de literatura y de propuestas educativas que, además de dinámica, es muy variada en enfoque y nivel de complejidad. Definir y sostener un recorrido de aprendizaje ajustado a las expectativas y bases de cada individuo constituye un primer desafío, a veces inexpugnable. En este artículo se presentan avances en pos de entender mejor dicho desafío, tomando como base las experiencias de dos estudiantes avanzados de grado de informática que abordaron el tema mediante estrategias y fuentes de consulta distintas. Dicho análisis busca extraer lecciones sobre los métodos de apropiación de conocimientos en este campo emergente de la informática, con especial énfasis en estudiantes provenientes de la computación tradicional.

1. Introducción

Aprender computación cuántica con una formación de base en computación clásica implica enfrentar una serie de desafíos, entre los cuales se destacan la incorporación de las bases matemáticas necesarias para emprender este camino y el cambio de paradigma que se presenta respecto de la programación tradicional. Dichos obstáculos —así como algunos otros— pueden presentar inconvenientes para una gran cantidad de estudiantes de tal rama de la informática, conduciendo a su desmotivación e inclusive al abandono del emprendimiento.

Este trabajo propone una hoja de ruta preparada especialmente para estudiantes de informática que deseen acercarse a la computación cuántica, partiendo

de una base de conocimiento que entendemos apropiada, efectiva, y no menos importante, amena. El camino propuesto consta de diferentes “estaciones” que en conjunto establecen un orden sobre los conceptos a adquirir, aportando recomendaciones bibliográficas y otras sugerencias consideradas relevantes en cada una de ellas. Comienza por los conceptos más básicos, tales como la definición de cubit y sus propiedades, y luego aumenta gradualmente en complejidad. Con el objetivo de abarcar un espectro amplio de conocimiento, las estaciones finales comprenden dos de los algoritmos más famosos: el algoritmo de búsqueda de Grover y el algoritmo de factorización de Shor. La hoja de ruta se materializa en una enciclopedia en español, inspirada en Quantum Katas de Microsoft (M. Quantum, s.f.) y disponible en <https://go.ripaisc.net/qudos>. La misma provee explicaciones sobre los diversos conceptos y definiciones presentados en las estaciones que conforman el camino de aprendizaje, y se encuentra abierta al público a fin de fomentar su crecimiento en forma colaborativa.

A continuación se presenta resumidamente el estado del arte relacionado con el aprendizaje de la computación cuántica. Posteriormente se expone la metodología de trabajo aplicada al desarrollo de la hoja de ruta y Qudos. Luego, se menciona brevemente el estado actual de la primera. Finalmente, se desarrollan las conclusiones derivadas del trabajo realizado y los pasos a seguir.

2. Estado del arte del aprendizaje de la CC

Actualmente se dispone de una gran variedad de fuentes de estudio y consulta a las que cualquier persona que quiera aprender computación cuántica puede acudir. En el ámbito bibliográfico existen numerosos libros. Entre los más conocidos destacamos “*Quantum Computation and Quantum Information*” (Nielsen y Chuang, 2011). Es uno de los más completos. Parte de los conceptos elementales de la computación cuántica, y provee ejercicios en distintas secciones del libro. No obstante, demanda grandes esfuerzos dado que cubre una gran variedad de aspectos (conceptos básicos, algoritmos, complejidad computacional, corrección de errores, etc). Además abunda en demostraciones formales que suelen saltarse muchos pasos.

Otro material bibliográfico reciente que merece la pena analizar es: “*Programming Quantum Computers: Essential Algorithms and Code Samples*” (Johnston et al., 2019), el cual presenta explicaciones breves y concisas, e introduce una notación de círculos para representar los diferentes estados cuánticos, lo que puede resultar de mucha utilidad a la hora de visualizar algunos problemas. Sin embargo, su simplicidad resulta una limitante a medida que uno adquiere mayores conocimientos en la materia. Una situación similar ocurre con “*Introduction to Classical and Quantum Computing*” (Wong, 2022). Este libro se destaca por su claridad y simpleza al momento de explicar los conceptos fundamentales e introductorios de la computación cuántica, proveyendo demostraciones detalladas. Como contrapartida, en algunas explicaciones resulta incompleto si se desea alcanzar mayor conocimiento. También hay muy buenos cursos en línea publicados en diferentes plataformas, ya sea multimedia o únicamente en texto, que

aportan lecciones interesantes sobre computación cuántica. Entre ellos destacamos los publicados en “*IBM Quantum Learning*” (I. Quantum, s.f.), y el canal de YouTube “*Quantum Soar*” (Soar, s.f.).

Los ejemplos mencionados comprenden un pequeño subconjunto dentro de la totalidad del material existente. Existe una gran cantidad de información que puede ser accedida fácilmente, y que en ocasiones puede abrumar al lector. En primer lugar, esto se debe a que mismos temas se explican de manera diferente, partiendo de distintos enfoques o recurriendo a distintas notaciones. En particular, aún no se han establecido convenciones sobre el diagramado de circuitos cuánticos.

3. Enfoque y metodología

Este trabajo fue desarrollado principalmente por dos de los autores, estudiantes avanzados de grado de informática, para su trabajo final de carrera, sin conocimiento previo alguno sobre el tema. Como estrategia, cada uno efectuó su propio camino, recurriendo a distintas fuentes bibliográficas como punto de partida, a fin de enriquecer el proceso con diferentes puntos de vista. Durante este trayecto se han completado bitácoras indicando los conceptos aprendidos, las dificultades encontradas y las sensaciones experimentadas.

Paralelamente, se puso en marcha el desarrollo de Qudos, que fue completándose de manera iterativa e incremental. Recopila y captura el contenido que, a nuestro entender, constituye el camino crítico de aprendizaje para la formación de una base sólida en la computación cuántica. Una vez alcanzado un nivel de conocimiento acorde a las expectativas, se trazó sobre el material publicado en Qudos una hoja de ruta preliminar para el aprendizaje de computación cuántica. Dicho sitio se piensa como un documento vivo, que evolucionará con los aportes de la comunidad informática. Puede ver el contenido disponible en el sitio accediendo al glosario: <https://go.ripaisc.net/qudos>.

El trabajo colaborativo será gestionado mediante la generación de “Issues” (registro de tareas pendientes) que serán resueltos en ramas nuevas a partir del repositorio GitHub. Los cambios serán evaluados para su adhesión a la rama principal del proyecto a través de peticiones “Pull Request”.

4. Una hoja de ruta dinámica

Al momento de redactar este artículo, se ha implementado una primera versión dinámica de la hoja de ruta, que no exige seguir un orden estricto entre las estaciones, sino que ofrece diversas alternativas para que cada lector explore según sus preferencias, utilizando múltiples fuentes y enfoques para promover distintos caminos de aprendizaje. Las estaciones se dividen en tres niveles según el avance del estudiante: el nivel principiante cubre la base matemática necesaria para comprender la mecánica cuántica, los axiomas básicos de la computación cuántica y las operaciones elementales, con énfasis en manipular un cúbit mediante puertas unarias e identificar su estado en diversas bases y notaciones; el

nivel competente profundiza en sistemas de múltiples cúbits, conceptos clave y algoritmos simples como Deutsch y Deutsch-Jozsa, buscando que el estudiante entienda e implemente la codificación superdensa, la teleportación cuántica y el algoritmo de Deutsch-Jozsa; finalmente, el nivel proficiente aborda subrutinas y algoritmos avanzados como Grover y Shor, con el objetivo de que el estudiante comprenda las primitivas y propiedades fundamentales que sustentan estos algoritmos. Completada la hoja de ruta, consideramos que se alcanza una base sólida en el ámbito de la computación cuántica.

5. Conclusiones y trabajo futuro

De nuestra experiencia en este proceso de aprendizaje desde cero de la computación cuántica, destacamos principalmente el enriquecimiento personal que uno percibe al comprender en profundidad el potencial de tal paradigma en el ámbito de la computación. A pesar de ser una experiencia personal, pensamos que el aporte de este trabajo puede contribuir a los nuevos interesados a facilitar dicho proceso. En el desarrollo de Qudos y la hoja de ruta una gran variedad de conceptos relacionados a la computación cuántica ha sido dejada de lado intencionalmente, a fin de mantener el foco en el objetivo central: el aprendizaje de las bases fundamentales de la materia. No se tratan aspectos de hardware cuántico, técnicas de corrección de errores, lenguajes y frameworks para el diseño e implementación de programas, estrategias de verificación formal, ni consideraciones de complejidad computacional. Esperamos en el futuro ampliar el contenido de Qudos. Correspondientemente, continuar este proceso de estudio, y difundir el conocimiento adquirido mediante cursos y/o libros de contenido académico. También esperamos que otros trabajos de grado como el aquí mencionado enriquezcan este emprendimiento.

Referencias

- Johnston, E., Harrigan, N., & Gimeno-Segovia, M. (2019, agosto). *Programming Quantum Computers: Essential Algorithms and Code Samples* (1st edition). O'Reilly Media.
- Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2011, enero). *Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition* (Anniversary edition). Cambridge University Press.
- Quantum, I. (s.f.). IBM Quantum Learning [Accedido: 2025-04-07]. <https://learning.quantum.ibm.com/>
- Quantum, M. (s.f.). Learn with Microsoft Quantum katas [Accedido: 2025-04-08]. <https://quantum.microsoft.com/en-us/tools/quantum-katas>
- Soar, Q. (s.f.). Quantum Soar YouTube Playlist [Accedido: 2025-04-07]. <https://www.youtube.com/@quantum-soar>
- Wong, T. G. (2022). *Introduction to classical and quantum computing*. Rooted Grove.