



**CURSO DE ACTUALIZACIÓN Y PERFECCIONAMIENTO
RES - 2023 - 20 - CD-EXA # UNNE**

INTRODUCCIÓN A LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

INFORMACIÓN AMPLIADA

Tipo de actividad: Curso de posgrado

Denominación: Introducción a la computación cuántica (Resolución: RES - 2023 - 20 - CD-EXA # UNNE).

Destinatarios: Egresados de carreras universitarias en física, en matemática, en informática, en ingeniería u otras carreras afines que aprovechen el análisis, diseño o aplicación de algoritmos eficientes de procesamiento de información

Carga horaria: 60 horas.

Dictado del curso: desde el 24 de noviembre del 2023.

Inscripción: Abierta hasta el 23 de noviembre del 2023 en SIU GUARANI.

Cupos: Mínimo 3 personas – Máximo 30

Modalidad: Presencial

Fundamentación

La computación cuántica es un área interdisciplinaria, nacida en los últimos años del siglo XX, dedicada al estudio de técnicas, métodos y algoritmos de procesamiento de la información realizables mediante la manipulación de estados cuánticos de sistemas físicos de escala microscópica.

La superposición de estados de la materia a esta escala permite operaciones intrínsecas de paralelización no realizables a escala macroscópica mediante sistemas clásicos. Esta diferencia otorga ventajas potenciales por sobre la computación clásica para la resolución de problemas algorítmicos en tiempo polinómico.

En esta disciplina convergen métodos matemáticos de análisis de complejidad computacional de algoritmos, el interés científico en el aprovechamiento y la verificación de las leyes de la mecánica cuántica en nuevos sistemas físicos usados como plataformas computacionales, el diseño de algoritmos computacionales que aprovechen el paralelismo cuántico para operaciones no tratables mediante la computación clásica, la aplicación tecnológica de sistemas de nuevos materiales para

generar plataformas de bits cuánticos y el desarrollo de nuevas posibilidades de comunicaciones seguras.

En definitiva, la computación cuántica recibe contribuciones de disciplinas diversas, entre otras, de la física, matemática, teoría de la información, informática, ingeniería y ciencia de materiales. En la actualidad, los primeros dispositivos cuánticos de cómputo han sido desarrollados por empresas e instituciones académicas, basados en una igualmente variada lista de plataformas físicas, tales como resonancia magnética nuclear o electrónica, junturas superconductoras, materiales semiconductores o de estado sólido, iones atrapados en trampas ópticas y dispositivos fotónicos. Cada una de ellas presentan ventajas y desventajas y, hasta el momento, continúa el desarrollo de cada uno de estos sistemas para su adopción como plataforma definitiva.

El curso propuesto es una introducción al nuevo paradigma de computación basado en la codificación y procesamiento de la información mediante superposiciones de estados cuánticos de la materia en contraposición con la computación clásica basada en propiedades medibles de la física clásica. Está destinado a físicos, matemáticos, informáticos e ingenieros con conocimientos matemáticos de álgebra lineal y los fenómenos básicos de la física microscópica.

Las motivaciones del esquema didáctico a desarrollar es el siguiente:

Unidad 1: Exposición y aplicación de los fundamentos del formalismo de la mecánica cuántica, restringido a sistemas discretos de dos niveles, utilizables como bits cuánticos, especialmente orientado a matemáticos, informáticos e ingenieros. Revisión de los postulados de la mecánica cuántica y su relación con la medición.

Unidad 2: Identificar las ventajas del uso de la mecánica cuántica para su implementación en dispositivos de cómputo. Relación entre operadores unitarios y compuertas lógicas reversibles.

Unidad 3: Teoría de las operaciones lógicas de computación cuántica, comparada con sus contrapartes clásicas. Cómo utilizar los estados cuánticos de un sistema para almacenar y procesar información. Se analizan las ventajas del control de la superposición cuántica y las nuevas posibilidades que surgen de ella. Discutimos el fenómeno de la medición del resultado de un proceso cuántico y las propiedades de correlación del entrelazamiento cuántico.

Unidad 4: se estudia la descripción matemática de los algoritmos más conocidos de aplicación de las compuertas lógicas cuánticas y sus ventajas sobre los algoritmos clásicos. En particular, se analizan las ventajas sobre la factorización de números enteros, de importancia para la criptografía, y el uso del paralelismo y la interferencia cuántica en la obtención de propiedades globales de un estado.

Unidad 5: Se estudian algunos de los sistemas físicos usados actualmente como dispositivos de cómputo: espines nucleares y electrónicos en campos magnéticos, electrones en dispositivos semiconductores de estado sólido, excitaciones magnéticas en superconductores y iones confinados en trampas ópticas. Se analiza la física de estos sistemas y las dificultades de pérdida de coherencia de los estados cuánticos debido a la interacción con su entorno.

Unidad 6: Estudiar y aplicar un lenguaje de programación de alto nivel para operar sobre un computador cuántico real y simuladores de acceso gratuito. Analizar las operaciones reales en comparación con la expectativa teórica. Identificar las fuentes de error y posibilidades de corrección en dispositivos reales.

Contenidos

Unidad 1: Postulados de la mecánica cuántica. Espacios de Hilbert de estados cuánticos. El espín. Sistemas de dos niveles. Computación con estados cuánticos.

Unidad 2: computación clásica y cuántica. Bits y qubits. Compuertas lógicas reversibles e irreversibles. Compuertas cuánticas lógicas y operaciones unitarias. Qubits y entrelazamiento. Teleportación cuántica.

Unidad 3: Compuertas cuánticas. Modelo de circuito de compuertas de uno y dos qubits. Computación universal. Paralelismo cuántico para las operaciones computacionales.

Unidad 4: Algoritmos cuánticos. Transformada cuántica de Fourier. Algoritmos de Deutsch, Deutsch-Jozsa, Bernstein-Vazirani. Búsqueda de Grover y factorización de Shor.

Unidad 5: Plataformas. Criterios de DiVincenzo para las plataformas físicas de implementación. Plataformas: resonancia magnética nuclear, qubits de estado sólido, iones atrapados, qubits superconductores

Unidad 6: Qiskit. Software de código abierto para computación cuántica basada en la nube. Programación en dispositivos cuánticos y simuladores clásicos. Corrección cuántica de errores.

Objetivos

- Conocer el paradigma de manipulación de la información basado en las leyes de la mecánica cuántica
- Identificar ventajas computacionales de la lógica cuántica en comparación con la computación clásica
- Aplicar algoritmos simples de búsqueda y factorización de números usando circuitos lógicos cuánticos
- Aplicar software de alto nivel sobre dispositivos cuánticos basados en la nube para resolver problemas de búsqueda, factorización o simulación.
- Conocer las plataformas físicas actuales sobre las que se implementan sistemas de manipulación de bits cuánticos, sus ventajas y limitaciones comparativas.

Metodología de enseñanza

Dictado de 10 hs semanales durante 6 semanas.

La carga horaria semanal se distribuirá en exposiciones presenciales de 7 hs distribuidas en dos clases teórico-prácticas semanales sobre los fundamentos y aplicaciones de la computación cuántica y desarrollo grupal en clase de trabajos prácticos de aplicación, y 3 hs virtuales asincrónicas destinadas a resolución individual de tareas asignadas para evaluación.

El seguimiento, entrega y evaluación de los trabajos prácticos se llevará a cabo a través de la plataforma Moodle del SIED de la UNNE.

Instancias de evaluación y aprobación

Una instancia de evaluación al finalizar cada módulo, consistente en la resolución de trabajos prácticos propuestos para cada unidad del curso a entregar durante la semana posterior a la finalización del módulo correspondiente.

Una instancia de recuperación de cada módulo, en caso de desaprobación de la evaluación correspondiente, a entregar en la semana posterior a la evaluación.

Para la aprobación del curso, el cursante deberá entregar y aprobar la totalidad de los trabajos prácticos en las fechas establecidas.

Requisitos de aprobación del curso

- Asistencia al 80% o más de las clases
- Entrega puntual y aprobación de los trabajos prácticos.
- Pago del arancel

Equipo Docente:

Coordinador del curso: Rodolfo H. Romero, Dr. en Física

Docentes dictantes, pertenecientes al departamento de física de FaCENA-UNNE:

- Rodolfo H. Romero, Dr. en Física
- Sergio S. Gomez, Dr. en Física
- Diego S. Acosta Coden, Dr. en Física

Bibliografía General

- Ray LaPierre, Introduction to Quantum Computing, Springer (2021).
- Ivan B. Djordjevic, Quantum Information Processing, Quantum Computing, and Quantum Error Correction. An Engineering Approach, 2nd Ed., Academic Press, London (2021)
- Nielsen, M., Chuang, I.: Quantum Computation and Information. Second edn. Cambridge University Press (2000)
- G. Benenti, G. Casti and G. Strini, Principles of quantum computation and information. World Scientific (2007).
- John Preskill's Lecture notes. <http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/ph229/>.

Bibliografía Específica

- Xin Zhang, Hai-Ou, Gang Cao, Ming Xiao, Guang-Can Guo and Guo-Ping Guo, National Science Review 6, 32 (2019). Semiconductor quantum computation. doi: 10.1093/nsr/nwy153

- Wasi Uddin, Biswajit Khan, Sheetal Dewan and Samaresh Das, Bull. Mater. Sci. 45:46 (2022). Silicon-based qubit technology: progress and future prospect. <https://doi.org/10.1007/s12034-021-02621-0>
- Shannon P. Harvey, arXiv: 2204.04261. Oxford Research Encyclopedias (2022). Quantum Dots/Spin Qubits. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190871994.013.83>
- Morten Kjaergaard, Mollie E. Schwartz, Jochen Braumüller, Philip Krantz, Joel I.-J. Wang, Simon Gustavsson, and William D. Oliver. Annual Review of Condensed Matter Physics 11, 369 (2020). Superconducting Qubits: Current State of Play
- P. Krantz, M. Kjaergaard, F. Yan, T. P. Orlando, S. Gustavsson, and W. D. Oliver, Appl. Phys. Rev. 6, 021318 (2019). A quantum engineer's guide to superconducting qubits <https://doi.org/10.1063/1.5089550>
- G. Burkard, Thaddeus D. Ladd, Andrew Pan, John M. Nichol and J. Petta, Rev. Mod. Phys. 95, 025003 (2023). Semiconductor Spin Qubits. arXiv: 2112.08863.
- Thaddeus D. Ladd, Malcolm S. Carroll, Encyclopedia of Modern Optics (2017). Silicon Qubits.
- J. Abhijith et al., ACM Transactions on Quantum Computing, 3(4), 18 (2022). Quantum Algorithm Implementations for Beginners. ArXiv: 1804.03719 <https://doi.org/10.1145/3517340>
- Devitt SJ. Performing quantum computing experiments in the cloud. Phys Rev A. 2016; 94(3):032329.
- Deffner, Sebastian (23 September 2016). "Demonstration of entanglement assisted invariance on IBM's Quantum Experience". Heliyon. 3 (11): e00444. arXiv:1609.07459. doi:10.1016/j.heliyon.2017.e00444. PMC 5683883. PMID 29159322.
- Duc M. Tran, Duy V. Nguyen, Bin Ho Le, and Hung Q. Nguyen, EPJ Quantum Technol. 9 6 (2022). Experimenting quantum phenomena on NISQ computers using high level quantum programming
- M. Hebenstreit, D. Alsina, J. I. Latorre, and B. Kraus, Phys. Rev. A 95 052339 (2017). Compressed quantum computation using a remote five-qubit quantum computer
- Pivoluska, M., Plesch, M. Implementation of quantum compression on IBM quantum computers. Sci Rep 12, 5841 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09881-8>
- Aritra Das and Barry C. Sanders, Phys. Rev. A 106 012421 (2022). Blind quantum factorization of 21

- Skosana, U., Tame, M. Demonstration of Shor's factoring algorithm for $N = 21$ on IBM quantum processors. Sci Rep 11, 16599 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95973-w>