

Guía Docente de Quantum Computing

Descripción

Introducción al nuevo paradigma de computación que plantean los computadores cuánticos que tratan de utilizar los principios de la Mecánica Cuántica con el fin de obtener capacidades de computación exponenciales en determinados problemas para los que los computadores convencionales no son adecuados. El estudio teórico se complementará utilizando el servicio IBM-Q de acceso libre a un computador cuántico real de 5 qubits.

Competencias

Competencias transversales: Análisis y resolución de problemas (CT03), pensamiento crítico (CT09)

Competencias básicas y generales: CB5, G04, B01, B02, R06, R07

Conocimientos recomendados

Algorítmica, Álgebra, Física, Cálculo

Idioma

Inglés

Intensificación

Bloque general

Estructura

1. Quantum world
 - a. Revealing experiments
 - b. Quantum mechanics
 - c. Complex numbers
 - d. Linear algebra of complex vector spaces
2. Qubits
 - a. 1-qubit state space
 - b. 2-qubit state space
 - c. n-qubit systems
3. Measurement
 - a. Extending Dirac Bra|Ket notation
 - b. Projection operator
 - c. Hermitian operator and the measurement postulate
4. Quantum state transformations
 - a. Basic gates
 - b. Unitary transformations as quantum circuits
 - c. Quantum versions of classical computations
 - d. A language for quantum implementations

5. Basic algorithms
 - a. Deutsch - Jozsa problem
 - b. Bernstein - Vazirani problem
 - c. Simon's problem
6. Advanced algorithms
 - a. QFT
 - b. Shor's algorithm
 - c. Grover's algorithm
7. Error correction
8. Quantum computer architecture and implementation
9. Domains where quantum computing can hit

LAB

1. IBM-Q environment
2. Working with one qubit
3. Working with two qubits
4. Testing basic gates and circuits
5. Composing QFT
6. Composing quantum factorization
7. Batching jobs with Python

Evaluación

La teoría se evaluará con dos exámenes parciales que contribuirán en un 40% a la nota final. Las prácticas se evaluarán mediante exámenes e PoliformaT y contribuirán un 40% a la nota final. El 20% restante se obtendrá mediante pequeños proyectos realizados en equipo. La competencia transversal "Análisis y resolución de problemas" se evaluará conjuntamente con las prácticas y la competencia "Pensamiento crítico" mediante el resumen de una lectura sugerida.

Bibliografía

1. Rieffel, Eleanor G.; Polak, Wolfgang H. Quantum Computing: A Gentle Introduction (Scientific and Engineering Computation) (Páginaiii). The MIT Press. 2011
2. Noson S. Yanofsky, Mirco A. Manucci, Quantum Computing for Computer Scientists. Cambridge University Press, 2008
3. Susskind, Leonard; Friedman, Art. Quantum Mechanics: The Theoretical Minimum. Basic Books (Perseus Books Group), 2014
4. IBM Q experience library, Full User Guide, <https://quantumexperience.ng.bluemix.net/qx/user-guide>

Preguntas & Respuestas

Con el fin de presentar la propuesta de Quantum Computing a los alumnos de Ingeniería Informática voy a responder a una serie de preguntas que surgen al aproximarse por primera vez a la computación cuántica, así como a preguntas específicas sobre la asignatura que se propone:

¿Qué es la Computación Cuántica?

La computación cuántica es el tipo de procesamiento de la información que se lleva a cabo en los computadores cuánticos.

Entonces ¿qué son los Computadores Cuánticos?

Los computadores cuánticos son máquinas que se construyen para procesar información utilizando las propiedades que la naturaleza posee en su nivel más íntimo, es decir en la escala de los átomos y de las partículas elementales. El comportamiento de los sistemas a esta escala está regido por la Mecánica Cuántica, por lo tanto la base de la Computación Cuántica es la Mecánica Cuántica, de ahí su nombre.

¿Es necesario pues conocer la Mecánica Cuántica para hacer Computación Cuántica?

Para hacer computación cuántica NO es necesario conocer la mecánica cuántica, únicamente se requiere tener claros unos pocos conceptos básicos, concretamente los conceptos de superposición, entrelazado y medida. Por el contrario quienes diseñan y construyen los computadores cuánticos sí que han de tener un profundo dominio de la mecánica cuántica. Lo cual involucra a la Física y al Cálculo Diferencial.

Escuchemos a Charles Bennett pionero de la computación cuántica:

https://www.youtube.com/watch?time_continue=26&v=9q-qoegVVD0

¿Qué hay que saber para empezar a entender la computación cuántica?

Hay que saber Algorítmica, o sea tener experiencia en analizar y desarrollar algoritmos de cálculo simbólico y de cálculo numérico. El otro aspecto fundamental que hay que conocer es el Algebra Lineal ya que la computación cuántica consiste básicamente en aplicar transformaciones lineales al estado de un sistema cuántico que es en realidad un vector. Finalmente hay que saber calcular con números complejos o sea números de la forma $a+i*b$ o equivalentemente $\rho*e^{i*\alpha}$, ya que las componentes de los vectores son números complejos.

¿Qué es lo que ha motivado la aparición de la computación cuántica? ¿No es suficiente con los computadores convencionales?

La computación cuántica es la única forma, al menos hasta este momento, de abordar PROBLEMAS CON COMPLEJIDAD EXPONENCIAL, o sea problemas que crecen en complejidad muy rápidamente al aumentar la talla del problema. Un ejemplo muy relevante es la simulación de moléculas, cuando los átomos involucrados aumenta en tamaño, o bien cuando aumenta el número de átomos, el número de interacciones a considerar crece exponencialmente. La consecuencia es que los supercomputadores “clásicos” más potentes sólo son capaces de simular moléculas muy simples.

Aquí podemos ver a Talia Gershon del equipo IBM-Q presentando estas ideas:

<https://www.youtube.com/watch?v=S52rxZG-zi0>

Por curiosidad ¿cómo es la CPU de un computador cuántico?

La arquitectura y el funcionamiento de los computadores cuánticos ES TOTALMENTE DIFERENTE de los computadores “clásicos”. El elemento constructivo básico de los computadores cuánticos es el “qubit”. La computación se lleva a cabo de forma “natural” a diferencia de los computadores convencionales que son máquinas “artificiales”.

¿Qué es un “qubit”? ¿Es parecido a un “bit” en un computador convencional?

Un “qubit” es una propiedad cuántica de una entidad física (electrón, fotón, unión superconductora, etc) que tiene DOS ESTADOS MEDIBLES diferenciados, por ejemplo, el spin de un electrón o la polaridad de un fotón. A estos dos estados se les llama $|0\rangle$ y $|1\rangle$. A partir de aquí el qubit ya no tiene nada que ver con el bit clásico.

¿Dónde está el misterio? ¿Por qué los qubits son diferentes?

Esta pregunta me obliga a hacer una pequeña incursión en la Mecánica Cuántica. Los valores de un qubit son en realidad soluciones de la ecuación de Schrödinger. Esta ecuación diferencial es lineal, lo cual significa que dadas dos soluciones de la ecuación (p.ej. $|0\rangle$ y $|1\rangle$) cualquier combinación lineal también es una solución. A esto se le llama “superposición”, o sea que un qubit puede en realidad tener infinitud de valores. Sin embargo cuando se hace una medición sólo se le puede observar en estado $|0\rangle$ o $|1\rangle$.

¿Y de dónde sacan los computadores cuánticos la capacidad para tratar la complejidad exponencial?

Si la superposición es un misterio todavía lo es más lo que ocurre cuando varios qubits se entrelazan (entanglement), entonces lo que ocurre es que las superposiciones que aparecen no son las de cada qubit por separado, sino que aparecen de forma combinada, por lo tanto, con n qubits las superposiciones no son de 2^n estados sino que son de 2^n estados.

Veamos a Krysta Svore de Microsoft experta en computación cuántica:

https://www.youtube.com/watch?v=5p2_moQZJWo

¿Qué lenguaje de programación se utiliza en los computadores cuánticos?

La programación de los computadores cuánticos en estos momentos se parece más al “diseño lógico” que a la programación de alto nivel en C o Java. Sin embargo, paradójicamente, algunos problemas que requerirían centenares de líneas de código en C se resuelven en un computador cuántico con un “diseño lógico” relativamente sencillo. En las prácticas utilizaremos Python, pero sólo con la finalidad de enviar trabajos de computación cuántica a la cola de trabajos, como alternativa al modo interactivo.

¿Existen en la actualidad computadores cuánticos en funcionamiento?

Sí, estamos precisamente en estos momentos en el tránsito de la computación cuántica desde un planteamiento teórico a una REALIDAD PRÁCTICA que previsiblemente se convertirá en algo cotidiano en menos de una década. Concretamente, IBM ha elaborado un sitio web, denominado IBM-Q, en el que se ofrece acceso libre a un computador cuántico de 5 qubits.

<https://www.research.ibm.com/ibm-q/>

¿Qué empresas están actualmente interesadas en la computación cuántica?

Entre otras, están MUY interesadas en la computación cuántica: IBM, Google y Microsoft. De hecho Google ha anunciado recientemente de que va a disponer pronto de un computador cuántico que SOBREPASARÁ CONSIDERABLEMENTE la capacidad de cómputo del supercomputador más potente disponible actualmente.

<https://spectrum.ieee.org/computing/hardware/google-plans-to-demonstrate-the-supremacy-of-quantum-computing>

Entonces ¿van a reemplazar los computadores cuánticos a los computadores convencionales?

Los computadores cuánticos NO reemplazan a los computadores convencionales, sino que actúan como COPROCESADORES, con la función de resolver aquellos problemas para los que los computadores convencionales no son adecuados.

En cuanto a la asignatura ¿por qué se propone para ser impartida en inglés?

Todo lo relacionado con la computación cuántica está en inglés, por lo tanto se requiere dominar este idioma para poder hacer progresos. Además la impartición en castellano

requeriría invertir muchas horas en traducir las fuentes, creo que es mucho mejor invertir ese tiempo en trabajar la computación cuántica.

¿Cómo está organizada la impartición de los contenidos?

Empezaremos con una introducción sobre cómo surgió al principio del siglo XX la Mecánica Cuántica haciendo énfasis en los conceptos que son relevantes para la Computación Cuántica, incluyendo un repaso del cálculo con números complejos y del algebra lineal en espacios vectoriales complejos. A continuación se estudiarán los espacios de estado asociados a uno, dos y n qubits. Entender bien esto es fundamental ya que la computación cuántica consiste en hacer transformaciones lineales en esos espacios. Para obtener información acerca del estado hay que realizar una medida. En este contexto medir tiene un carácter muy singular, en comparación con el concepto clásico de medida, por lo que hay que estudiar cómo se formaliza. Seguidamente se presentarán las transformaciones o pasos de computación que se pueden realizar basándonos en el modelo de circuitos. Con esta base abordaremos el estudio de los algoritmos cuánticos, primero algoritmos simples y después algoritmos más complejos. Seguiremos con una introducción al problema de tratamiento del error que actualmente es relevante en los computadores cuánticos. Terminaremos con una aproximación a la arquitectura de los computadores cuánticos y con un repaso a los dominios donde se prevé que la computación cuántica va a tener un gran impacto.

¿Tiene prácticas la asignatura?

Tal y como se muestra en la guía docente se proponen 7 prácticas que se realizarán sobre el computador real de 5 qubits ofrecido por IBM desde el sitio web de IBM-Q. Las prácticas consistirán en probar sobre este computador cuántico REAL todo lo visto en teoría. Veamos un ejemplo de utilización de esta máquina:

https://www.youtube.com/watch?v=pYD6bvKLI_c

¿Puede describir brevemente un algoritmo cuántico sencillo?

Dado que la forma de resolver los problemas con computación cuántica es TOTALMENTE DIFERENTE a como se abordan en un computador convencional, no es posible entender los algoritmos cuánticos sin trabajar previamente los conceptos en los que se fundamenta la computación cuántica. El algoritmo cuántico más simple es el algoritmo de Deutsch. Este algoritmo no tiene ninguna utilidad práctica, pero pone de manifiesto de forma muy sencilla como, basándose en la superposición, un algoritmo cuántico es más eficiente que la mejor implementación clásica. El algoritmo de Deutsch posteriormente se generalizó al de Deutsch-Jozsa. Estos algoritmos están excelentemente descritos en la Wikipedia:

https://en.wikipedia.org/wiki/Deutsch%E2%80%93Jozsa_algorithm

Si el estudiante se siente desconcertado al leer este artículo, pero a pesar de ello mantiene el interés, yo le animo a que VOTE por esta asignatura y que posteriormente SE MATRICULE en ella. Poco a poco se irá haciendo la luz. ÁNIMO ☺