



Recepción: 28 de enero de 2008
Aceptación: 4 de diciembre de 2008

* Centro Universitario Valle de Chalco. Universidad Autónoma del Estado de México, México.

Correo electrónico: manvlk@uaemex.mx.

** Departamento de Computación, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México.

Correo electrónico: gmorales@cs.cinvestav.mx

Hacia una forma geométrica del procesamiento de la información lógica por medio de una computadora cuántica

Manuel Ávila* y Guillermo Morales**

Resumen. Hacemos una breve reseña de los orígenes de la computación cuántica e introducimos la noción de “qubit”. Mencionamos algunos problemas relativos a la construcción de computadoras cuánticas y remarcamos que un problema esencial es el de decoherencia. El enfoque geométrico para resolver ese problema se basa en variar los ángulos de inclinación de campos magnéticos aplicados sobre fotones que codifican qubits. Hemos querido hacer aquí un recuento de tipo histórico sobre el cómputo cuántico y por tanto las referencias remiten a documentos primarios en la literatura especializada.

Palabras clave: cuántica, computadora, procesamiento, lógica, compuertas, geométrica, fase, adiabática, tolerante a errores

A Geometric Way of Processing the Logical Information Through a Quantum Computer

Abstract. The origin of quantum computing is briefly sketched as well as its main notion: the qubit.

We review some problems related to quantum computers construction. One of the most important problems is decoherence treatment. A geometric approach in order to deal with this problem is based on variations of inclination angles of magnetic fields applied to photon fluxes codifying qubits. We follow a chronological survey of the literature and the referred sources are seminal papers.

Key words: quantum, computer, processing, logic, gates, geometric, phase, adiabatic, fault-tolerant.

Introducción

El último tercio del siglo XX fue un parteaguas en el ámbito del procesamiento de la información, conocida como computación cuántica. Uno de los precursores fue Richard Feynman (Feynman, 1982). Este brillante físico del Instituto Tecnológico de California, sugirió en 1982 que se podrían usar las propiedades cuánticas de la materia para construir el procesador de información más potente que se haya

concebido en la historia de la humanidad. Ciertamente, el inmenso poder de la computación cuántica no se apreció en su justa dimensión sino hasta 1985, cuando David Deutsch de la Universidad de Oxford, publicó un artículo teórico fundamental en el que describe una computadora cuántica universal (Deutsch, 1985). Después del texto de Deutsch, los computólogos iniciaron una intensa búsqueda para la aplicación concreta de esas máquinas. Así, en 1994, Peter Shor, de los laboratorios Bell AT&T, en Nueva Jersey,

descubrió el primer algoritmo que sólo una computadora cuántica podría efectuar eficientemente (Shor, 1994). El llamado algoritmo de Shor factoriza un entero N en un tiempo de orden $\approx (\log N)^3$ en unidades de tiempo, que usualmente son ns.¹ Cabe subrayar que una computadora clásica tardaría por lo menos un ciento de miles de años para completar esa factorización si N se escribiera con al menos 23 dígitos decimales (o 72 bits) y probara uno a uno cada uno de los primos menores que N .

En este punto, históricamente surgió una pregunta: ¿qué posibilidad hay de construir una computadora cuántica? A fines de los años noventa del siglo pasado, había optimismo al respecto. La razón de tal entusiasmo es que la tecnología de las computadoras evolucionaba vertiginosamente: de engranes a válvulas; de transistores a circuitos integrados y así sucesivamente. Cabe mencionar que en la actualidad las avanzadas técnicas litográficas permiten depositar compuertas lógicas en una fracción de micrón cuadrado. En poco tiempo, las dimensiones de las compuertas lógicas serán cada vez más y más pequeñas, a tal punto que estarán elaboradas con tan sólo un puñado de átomos. De hecho, si el tamaño de los microchips se reduce a la mitad cada dos años —tal como ha ocurrido en los últimos veinte años—, fenómeno que se conoce como *regla de Moore*, a fines de la segunda década del presente siglo se entrará de lleno en la llamada era de la nanotecnología.

Para ello, paralelamente a la miniaturización de las compuertas lógicas, las leyes de la mecánica cuántica serán cada vez más importantes, hasta que se llegue a hablar de compuertas lógicas cuánticas, las cuales poseen propiedades muy diferentes a las de las compuertas lógicas convencionales.

La nueva tecnología cuántica puede (y debe) ofrecer mucho más que la acumulación de *bits* al silicio y multiplicar la rapidez de los microprocesadores. Ya que aquella tecnología soporta un nuevo tipo de computación, basada en algoritmos que se sustentan en la mecánica cuántica y, por tanto, es cualitativamente diferente a los algoritmos tradicionales.

Para hablar de compuertas lógicas cuánticas, debemos hablar de sus constituyentes básicos: los *qubits*. Detengámonos un poco para hablar de estos bloques lógicos básicos. Las compuertas lógicas clásicas, se formulan en términos de los *bits* tradicionales, cuya implementación física se da a través de cantidades convencionales —voltaje entre las placas de un capacitor: un capacitor cargado representa el *bit* “1” y un capacitor descargado representa el *bit* “0” —. Por el contrario, la implementación física de los *qubits* ocurre a través de cantidades estrictamente cuánticas, como el componente ‘z’ del espín de partículas subatómicas, o bien los dos diferentes

estados de polarización de la luz. Por ejemplo, el *qubit* $|0\rangle$ se consigue físicamente por medio del espín “arriba” (\uparrow) de una partícula subatómica; mientras que el *qubit* $|1\rangle$, a través del espín “abajo” (\downarrow). La potencia y novedad del enfoque cuántico al procesado de la información es que la superposición coherente de los estados $|0\rangle$ y $|1\rangle$ también es información. En otras palabras, $|q\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ (α y β) son números complejos, $\alpha^2 + \beta^2 = 1$) es un *qubit*.

1. Implementación de las compuertas lógicas cuánticas

Para construir una computadora cuántica, se deben implementar unas compuertas lógicas cuánticas, e integrarlas y adaptarlas en circuitos cuánticos. Así, una sola compuerta lógica cuántica efectúa una operación cuántica elemental, usualmente sobre dos *qubits*, en un determinado periodo (Barenco, 1995). Con la implementación de las compuertas lógicas surgen serios problemas prácticos; es decir, si unimos juntas las compuertas cuánticas, mientras interactúen más intensamente los *qubits*, más aumenta el ruido cuántico que obstaculiza la superposición coherente de estos últimos, esto es entorpecimiento del almacenamiento y procesamiento de la información. Ese fenómeno se conoce como decoherencia, y es uno de los principales obstáculos para la fabricación de una computadora cuántica, de hecho, en nuestros días hay una intensa búsqueda por neutralizar sus efectos. Hoy, el reto para construir una computadora cuántica operativa de estado sólido se ha convertido en preservar los frágiles estados de los *qubits* y, al mismo tiempo, permitir la inicialización, el control y la medición. La energía de los alrededores perturbaría los *qubits*, causando con ello su decoherencia.

Mientras más intensa es la interacción de los *qubits* con los alrededores, menos coherentes son éstos. Mientras más tiempo permanezcan coherentes los *qubits*, más operaciones puede realizar la computadora cuántica. El objetivo de la ingeniería cuántica es diseñar compuertas lógicas cuánticas, en las cuales los *qubits* interactúen consigo mismos, pero no con los alrededores. Una corriente importante de pensamiento de estos tiempos sugiere que la estrategia correcta no es eliminar radicalmente la decoherencia, sino “disminuir sus nocivos efectos” lo más posible. ¿Podemos manipular la naturaleza a nivel de unos cuantos fotones y átomos para hacer esto? La respuesta es sí, pero hasta cierto punto. Por ejemplo, en el denominado “experimento de cavidades cuánticas electrodinámicas”, uno de los primeros experimentos realizado hace ya mucho tiempo por Serge Haroche y colaboradores en la Ecole Normale Supérieure de París, los átomos fueron controlados por unos cuantos fotones atrapados en pequeñas cavidades superconductoras (Domokos, 1995).

1. Un nanosegundo es 10^{-9} s.

Otro experimento notable, acorde con esa línea de razonamiento, lo llevaron a cabo Monroe y colaboradores en el NIST en Boulder, Colorado, con un enfoque diferente al de Haroche y colegas. En el experimento de Monroe y su equipo, se utilizaron iones sitiados en trampas de radiofrecuencias (Monroe, 1995). Los iones interactúan entre sí, intercambiando excitaciones vibracionales y cada ion puede controlarse separadamente por un haz láser polarizado, enfocado apropiadamente.

En este punto sería conveniente aclarar que los dos requisitos principales que debe satisfacer una computadora cuántica son los siguientes:

- Cualquier operación lógica debe ser efectuada por la computadora en un tiempo mucho menor al tiempo de decoherencia.
- Los errores de las operaciones realizadas por compuertas universales deben ser despreciables, de tal manera que la computadora sea tolerante a fallas (Bennet, 1996; Shor, 1995; Steane, 1996).

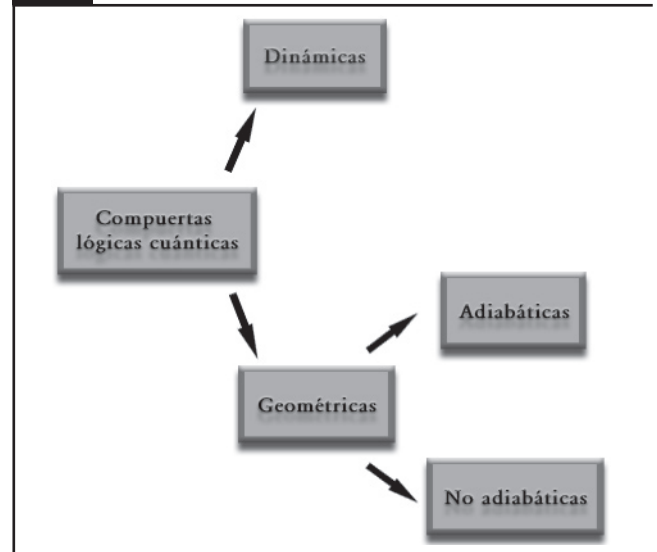
Para satisfacer estos dos requisitos, se han sugerido diferentes experimentos con estrategias propias, los cuales se agrupan en dos clases bien definidas: control dinámico y control geométrico de las compuertas lógicas cuánticas. En la figura 1 se muestra un diagrama de clasificación de las compuertas lógicas cuánticas. Como se observa en dicha figura, aquéllas se clasifican en dos tipos: dinámicas y geométricas. Y las segundas a su vez se dividen en adiabáticas y no adiabáticas.

2. Instrumentación dinámica de las compuertas lógicas cuánticas

Para instrumentar de manera consistente una compuerta lógica cuántica, es necesario contrarrestar los nocivos efectos de la decoherencia de los *qubits* que componen el procesador. Una de las dos estrategias más importantes ensayadas hasta ahora para disminuir estos efectos, es el de métodos de interacciones dinámicas externas con el procesador cuántico.

Así, los *qubits* activos que componen las compuertas lógicas cuánticas se someten a interacciones externas, como los campos magnéticos externos; o pulsos en radiofrecuencias, o bien los baños térmicos de bosones (Duan *et al.*, 1997; 1998). Como resultado de esto, se genera un espacio de estados “efectivos”, libres de decoherencia. Dichos estados coherentes, se argumenta, son los *qubits* “lógicos”, y ya no los *qubits* “físicos”, siendo estos últimos los que experimentan las inclemencias de la decoherencia.

Figura 1. Clasificación de las compuertas lógicas cuánticas.



El problema del enfoque dinámico es que no satisface el segundo requisito de robustez ante la decoherencia mencionada líneas arriba (Bennet, 1996; Shor, 1995; Steane, 1996). Es decir, la fracción del error de una compuerta dinámica es mayor que 10^{-4} (Bennet, 1996; Shor, 1995; Steane, 1996) y, por ende, no resiste las fallas.

2.1. Instrumentación geométrica de las compuertas lógicas cuánticas

En un intento por diseñar una computadora cuántica resistente a cierto tipo de errores, se han ensayado métodos geométricos para ejecutar las compuertas cuánticas. La idea de la implementación geométrica o fase geométrica controlada entre los *qubits*, surgió en el 2000, propuesta casi simultáneamente por diversos autores (Jones *et al.*, 2000; Falci *et al.*, 2000; Fuentes-Guridi *et al.*, 2000). La idea del enfoque geométrico es bastante ingeniosa y simple, ya que se basa en la fase global² φ , la cual lleva la amplitud de probabilidad de tránsito entre los estados inicial i y final f de los *qubits*: $e^{i\varphi}$. Por cierto, el nombre de geometría controlada proviene del ajuste del ángulo de inclinación θ del campo magnético rotante alrededor del eje Z (véase la figura 2), el cual aparece en la expresión para φ . La velocidad de rotación angular ω del campo magnético \vec{B} puede ser muy lenta, en cuyo caso se usa una aproximación adiabática, o bien sería muy rápida, lo cual es equivalente a emplear una aproximación no adiabática.

En el siguiente apartado explicaremos con más detalle lo que se entiende por adiabática en este contexto.

2. Se denomina global porque no depende de los estados intermedios por los que pasa el sistema de qubits.

3. La computación cuántica por medio de una fase geométrica adiabática

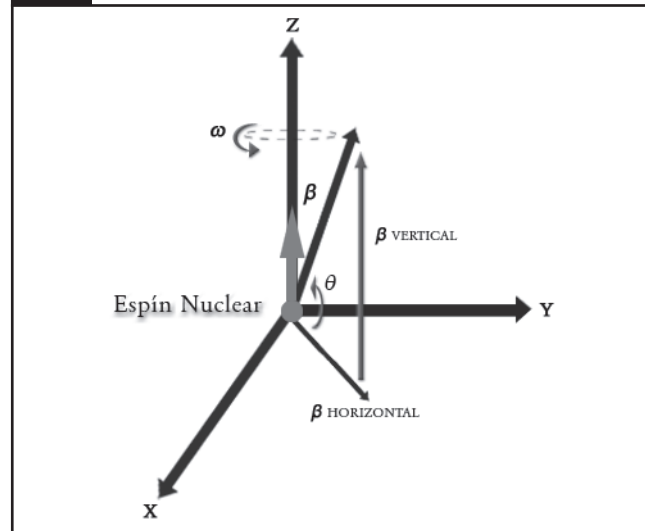
Para una computadora cuántica cuya energía depende del tiempo, el cómputo cuántico adiabático consiste en suponer que esta energía cambia lentamente y linealmente respecto del tiempo (Farhi *et al.*, 2001). El tiempo total que dura esta variación lineal, se suele llamar “factor de retardo” de la transición adiabática. El valor típico de esta cantidad es aproximadamente el recíproco de la frecuencia de Rabi (Liu y Fu, 2007) por lo que su valor aproximado es 0.00001 segundos.

La aplicación de la compuerta cuántica universal, únicamente por medio del uso de las fases adiabáticas puramente geométricas, las cuales dependen de la geometría de la trayectoria ejecutada, posibilitan operaciones lógicas resistentes a errores. Por tal razón, en el pasado se realizaron experimentos dentro de la aproximación adiabática, usando técnicas diferentes, por ejemplo: resonancia magnética nuclear (NMR) (Jones *et al.*, 2000), nanocircuitos superconductores (Falci *et al.*, 2000) e iones atrapados (Duan *et al.*, 2001). El problema de la compuerta cuántica universal (basada en la fase geométrica con aproximación adiabática) es que el tiempo de evolución del sistema debe ser mayor que el propio tiempo de operación de los qubits y, a la vez, debe ser menor que el tiempo de decoherencia. Esto constituye una limitación intrínseca en la operación de la compuerta (Zhu y Wang 2003). Lo que significa que demandar rapidez y precisión simultáneamente a la compuerta causa severa distorsión de los resultados (Jones *et al.*, 2000). La condición adiabática propicia que la rapidez y alta precisión del procesamiento se conflictúen mutuamente.

4. La computación cuántica por medio de una fase geométrica no adiabática

Debido a que con la condición adiabática no se reducía el tiempo de operación de la compuerta y que también era difícil preservar la coherencia, hace seis años, Wang y Keiji (2002) propusieron un experimento basado en compuertas geométricas no adiabáticas. La idea de estos autores resultaba simple: ajustar la geometría de un campo magnético “vertical” adicional, lo cual permitiría que la evolución en el tiempo del momento angular intrínseco (espín) de un núcleo (*qubit*) sea sumamente rápida. Al cambiar vertiginosamente en el tiempo la orientación del qubit, la operación lógica resultante efectuada por la compuerta cuántica es menor que el tiempo de decoherencia. El problema de este enfoque es que, paralelo a la rapidez de procesamiento, hay imperfecciones en las mediciones, fenómeno conocido como ruido cuántico. A principios

Figura 2. Geometría del campo magnético actuando sobre el qubit (espín nuclear).



de 2003, Zhu y Wang (2003) demostraron que si se introduce adicionalmente un componente “horizontal” controlado del campo magnético, se amortiguaba considerablemente el ruido cuántico, sin importar su magnitud, aunque el ruido persistía. Las necesidades tecnológicas para construir una computadora cuántica operativa y eficiente demandan mayor precisión de procesamiento y ejecución de la operación lógica. A fines de 2003, Oshima y Azuma (2003) propusieron un experimento sensacional para la aplicación de una compuerta lógica cuántica geométrica no adiabática, la cual conjuntaba rapidez y precisión para las operaciones lógicas. Su logro consistió en el hallazgo de los valores precisos de las magnitudes de los campos “vertical” y “horizontal”. Podemos afirmar, sin lugar a dudas, que el experimento de Oshima y Azuma sentó las bases para la construcción de una computadora cuántica de estado sólido comercial. Con dicho experimento se completó una prometedora investigación cuyo desarrollo duró muchos años y que culminó en una implementación más de la computación cuántica de tipo geométrico.

Comentarios finales

El procesamiento geométrico de la información cuántica es un tema de actualidad del cómputo cuántico. Hasta donde nos fue posible, lo presentamos sin abusar de los tecnicismos, ya que por ser un trabajo de divulgación, queremos acercar este complejo tema a un público no especializado en la materia. De ahí que hayamos omitido conceptos como “independencia de la trayectoria en el espacio de parámetros”, “fase dinámica”, entre muchos otros, ya que confundirían al público lector, entorpeciendo la comprensión esencial del llamado procesamiento geométrico de la información cuántica.

- Barenco, A.; D. Deutsch y A. Ekert (1995). "Conditional Quantum Dynamics and Logic Gates", *Phys. Rev. Lett.* 74.
- Bennet, C. H.; D. P. Di Vincenzo; J. A. Smolin y W. K. Wothers (1996). "Mixed State Entanglement and Quantum Correction", *Phys. Rev. A* 54.
- Deutsch, D. (1985). "The Church-Turing Principle and the Universal Quantum Computer", *Proc. R. Soc. A* 400 (Londres).
- Domokos, P.; J. M. Raymond; M. Brune y S. Haroche (1995). "Simple Cavity-QED Two Bit Universal Quantum Logic Gate: The Principle and Expected Performances", *Phys. Rev. A* 52.
- Duan, L. M.
____; J. I. Cirac y P. Zoller (2001). "Geometric Manipulation of Trapped Ions for Quantum Computation", *Science*. 292.
- ____ y G. C. Guo (1997). "Preserving Coherence in Quantum Computation by Pairing Quantum Bits", *Phys. Rev. Lett.* 79.
- ____ (1998). "Optimal Quantum Codes for Preventing Collective Amplitude Damping", *Phys. Rev. A* 58.
- Falci, G.; R. Fazio; G. M. Palma; J. Siewert y V. Vedral (2000). "Detection of Geometric Phases in Superconducting Nanocircuits", *Nature*. 407.
- Farhi, E.; J. Goldstone; S. Gutmann; J. Lapan; A. Lundgren y D. Preda (2001). "A Quantum Adiabatic Evolution Algorithm Applied to Random Instances of an NP-Complete Problem", *Science*. 292.
- Feynman, R. (1982). "Simulating Physics with Computers", *Int. J. Theor. Phys.* 21.
- Fuentes-Guridi, I.; S. Bose y V. Vedral (2000). "Proposal for Measurement of Harmonic Oscillator Berry Phase in Ion Traps", *Phys. Rev. Lett.* 85.
- Jones, J. A.; V. Vedral; A. Ekert y G. Castagnoli (2000). "Geometric Quantum Computation Using Nuclear Magnetic Resonance", *Nature*. 403.
- Liu, J. y L. B. Fu (2007). "Singularity of Berry Connections Inhibits the Accuracy of Adiabatic Approximation", *Phys. Lett. A* 370.
- Monroe, C.; D. M. Meekhof; B. E. King; W. M. Itano y D. J. Wineland (1995). "Demonstration of a Fundamental Quantum Logic Gate", *Phys. Rev. Lett.* 75.
- Oshima, K. y K. Azuma (2003). "Proper Magnetic Fields for Nonadiabatic Geometric Quantum Gates in NMR", *Phys. Rev. A* 68.
- Shor, P. W.
____ (1995). "Scheme for Reducing Decoherence in a Quantum Computer Memory", *Phys. Rev. A* 52, R 2493.
- ____ (1994). "Polynomial Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer", *Proceedings of the 35th Annual Symposium on the Foundations of Computer Sciences*. IEEE Computer Society, USA.
- Steane, A. M. (1996). "Error Correcting Codes in Quantum Theory", *Phys. Rev. Lett.* 77.
- Wang, X. B. y M. Keiji (2002). "Nonadiabatic Conditional Geometric Phase Shift with NMR", *Phys. Rev. Lett.* 87, 097901; 88, E179901.
- Zhu, S. L. y Z. D. Wang (2003). "Universal Quantum Gates Based on a Pair of Orthogonal Cyclic States: Application to NMR Systems", *Phys. Rev. A* 67, 022319.

Teoría y Debate

Fernando Leal Carretero

Sobre la disociación entre marco teórico y datos empíricos

Felipe Hevia de la Jara

Relaciones sociedad-Estado: análisis interactivo para una antropología del Estado

Estado

Juan José Palacios Lara

Territorialidad, Estado-nación y economía nacional. Atisbos de una economía transregional en el mundo del siglo XXI

Paula Mussetta

Estado e ingeniería social. Particularidades y dimensiones morales de un programa para la resolución de conflictos

Sociedad

Juan Antonio Rodríguez González

Geografía política de los empresarios. El caso de Aguascalientes

Andrés Valdez Zepeda y Bertha Adelina López Arce

Capital social y movilización ciudadana: el caso de la protesta social en torno al placcazo en la Zona Metropolitana de Guadalajara

Reseñas

Jorge Alonso. El obregonismo y los movimientos sociales

Rogelio Marcial. Masculinidad e intimidad

Agustín Vaca. Ojos imperiales

Informes: tel. (33)3819-3352

espiral@fuentes.csh.udg.mx Página web: <http://www.publicaciones.cucsh.udg.mx/pperioid/espiral/index.htm>

45 Volumen XV
Mayo / Agosto de 2009

\$100.00

Suscripción anual: \$325.00
(incluye costo de envío)



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA
Centro Universitario
de Ciencias Sociales y Humanidades

ESPIRAL

Estudios sobre Estado y Sociedad

