

# ORDENADOR CUANTICO ARQUITECTURA E INFORMACIÓN

Hector Fabian Gonzalez Ariza  
Facultad de Fisicomecanicas  
Ingenieria de Sistemas  
Universidad Industrial de Sandander  
Bucaramanga, Colombia

Nathaly Hernández Aguilar  
Facultad de Fisicomecanicas  
Ingenieria de Sistemas  
Universidad Industrial de Sandander  
Bucaramanga, Colombia  
24 de Noviembre del 2017

Karen Viviana González Mogollon  
Facultad de Fisicomecanicas  
Ingenieria de Sistemas  
Universidad Industrial de Sandander  
Bucaramanga, Colombia

**Resumen**—La investigación y el proceso de producción buscan construir computadoras basadas en un nuevo paradigma tecnológico y un nuevo principio computacional que busca mejorar el rendimiento de los procesos computacionales. En este artículo se analizara y estudiara los avances que ha tenido la computación cuántica en la actualidad, el desarrollo de bits cuánticos y compuertas lógicas cuánticas como en el desarrollo de algoritmos cuánticos. Se realizaron búsquedas para la obtención de conceptos con el fin de afianzar conocimientos.

**Index Terms**—Computación cuántica, procesos de producción computacional, bit cuántico, algoritmos.

**Abstract**—The research and the production process seek to build computers based on a new technological paradigm and a new computational principle that seeks to improve the performance of computational processes. In this article we will analyze and consider the progress that has taken the quantum computing in the development of quantum bits and quantum logic gates and in the development of quantum algorithms. We searched for the obtaining of concepts in order to strengthen knowledge.

**Index Terms**—Quantum Computing, production processes, quantum bit, computational algorithms.

## I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, los avances tecnológicos han marcado un antes y un después en la manera como los seres humanos interactuamos con ella, gracias a esto se puede tener todo a el alcance de cualquier persona, cada cierto tiempo como ya esta establecido por algo que se conoce como la *Ley de Mooore* hay un crecimiento o un desarrollo en donde se duplica el número de transistores en un microprocesador, esto aumenta tanto la velocidad como la capacidad en estos instrumentos de los cuales hay que destacar el avance de la computadora, que surgió al rededor de 1941 en donde ocupaba una gran espacio para su funcionamiento y que ahora se puede tener en la palma de la mano, esto con lleva a que cada día, mas personas tengan un dispositivo de estos para suplir sus necesidades y cada vez hayan mas desabolladores preocupados por sacar nuevas aplicaciones que se puedan utilizar en estos aparatos electrónicos, como consecuencia los procesadores de estas maquinas deben ser cada día mas potentes pequeños y livianos llevándolos a

un punto microscópico tanto las redes como los transistores que se inter-conectan y que hacen posible el funcionamiento de estos, pero esto no se mantendrá por siempre dado que en algún punto en un futuro no muy lejano pasaremos de un nivel microscópico a un nivel atómico provocando interferencias con las conexiones y saltos no deseados de bits, por este motivo se ha empezado a incursionar mas en la mecánica cuántica para poder explicar este fenómeno y también aplicarla a la computación para finalmente desarrollar lo que hoy en día se conoce como la computación cuántica.

## II. ESTADO DEL ARTE

La idea de crear un ordenador cuántico surgió en la década de 1980 por Paul Benioff y en 1982 se propuso utilizar fenómenos cuánticos para realizar los cálculos computacionales de gran complejidad porque los computadores tradicionales no son capaces o son muy lentos para dar el resultado de ciertos algoritmos. En 1997 hicieron los primeros experimentos para realizar el primer tele-transporte cuántico de un fotón y en el año 2000, IBM diseño un computador cuántico de 5 qubits el cual fue capaz de ejecutar un algoritmo de búsqueda de orden, el cual forma parte el algoritmo de Shor.

En el 2011, la empresa D-Wave System vendió la primera computadora cuántica a Lockheed Martin por 10 millones de dolares, e IBM actualmente esta iniciando un nuevo proyecto el cual es crear un ordenador cuántico de 50 qubits para investigaciones y otro ordenar de 20 qubits para empezar a comercializarlo.[1]

## III. MARCO TEÓRICO

### A. ¿Qué es la computación cuántica ?

La computación cuántica es un paradigma que se diferencia de la computación clásica ya que se basa en uso de *qubit* en vez de *bits*, gracias a esto se dan nuevos estados los cuales pasan de ser dos a ser cuatro esto abre infinidad de posibilidades en la resolución de problemas altamente complejos así como la creación de nuevos algoritmos porque se crean nuevas compuertas lógicas que permiten analizar problemas con diferentes complejidades creando grandes

expectativas frente a este paradigma.

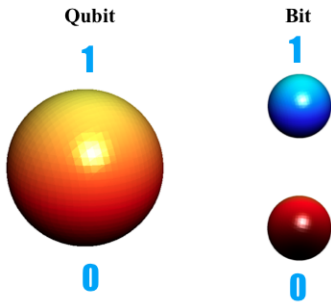


Figure 1: Qubit y Bit

A finales del siglo veinte se da la idea de la computación cuántica que surgió gracias a que se quería aprovechar las leyes cuánticas y aplicarlas al rededor de la computación clásica.

Por otro lado un *Qubit*, la versión cuántica de un *bit*, tiene muchos mas estados posibles. Los estados se pueden representar por una flecha que apunte a cualquier punto de una esfera. El polo norte es equivalente al 1; el polo su, al 0. Los otros puntos son superposiciones cuánticas de 0 y 1.

### B. Aplicaciones

Los usos que se le pueden dar a este tipo de tecnología son múltiples. Es que al poder estar en varios estados en simultáneo puede resolver operaciones complejas en segundos.

Tan solo por dar un ejemplo, un sistema basado en bits para descifrar una contraseña analizaría las diferentes combinaciones posibles una a una, en cambio el qubit puede procesar todas esas opciones en simultáneo y dar una respuesta casi inmediata.

La computación cuántica se podría emplear para la comunicación, ya que permitiría codificar la información de manera más segura. También se podría utilizar para simular reacciones químicas y así producir grandes desarrollos para la ciencia y la medicina.

### C. Como funciona un ordenador cuántico

Los ordenadores cuánticos realizan con facilidad tareas que hoy son extremadamente difíciles o directamente imposibles para nuestros ordenadores comunes.

Todo lo que realiza un ordenador hoy en día está basado en series de ceros y unos. Estos dos dígitos son capaces de combinarse para almacenar información o procesarla. Lleva siéndolo así durante décadas, aunque los científicos llevan tiempo intentando dar el próximo salto, la computación cuántica.

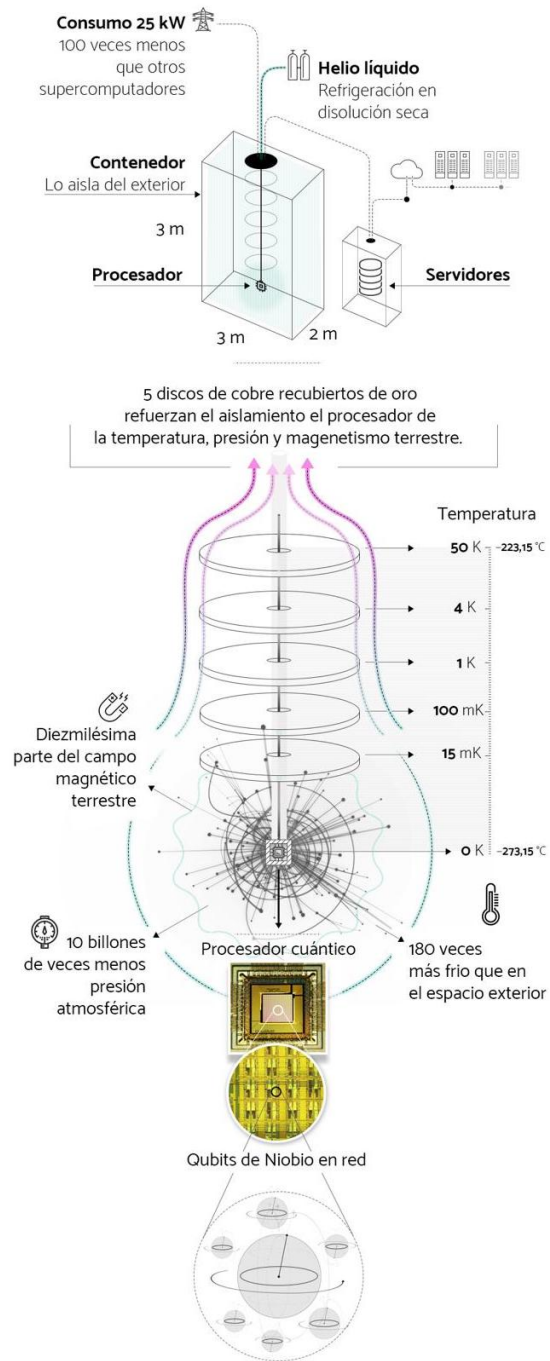


Figure 2: Representacion estructural de un ordenador cuántico [15]

### D. Esfera de Bloch

La *esfera de Bloch* en mecánica cuántica fue propuesta por el premio nobel en física, el suizo *Felix Bloch* y es la manera como se representa de manera geométrica una serie de estados, básicamente es como se puede describir y representar los bits cuánticos que son la base del ordenador cuántico su característica mas especial es que puede tener una infinidad de estados en cada punto de ella gracias a que su radio esta dado por  $R^3$ [3] cada punto alrededor de la de la esfera corresponde

inequívocamente a un estado de total pureza del espacio de dimensión dos, que esta un sistema cuántico de dos niveles.

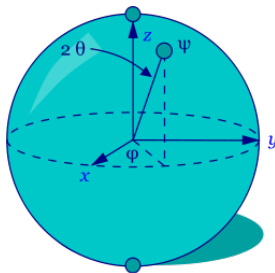


Figure 3: Esfera de Bloch [16]

Un punto en la *esfera de Bloch* es denominado como un estado cuántico o mas comunmente llamado *qubit* que se expresa como

$$|\psi\rangle = \cos(\theta/2) |0\rangle + e^{i\phi} \sin(\theta/2) |1\rangle$$

Donde  $\theta$  y  $\phi$  angulos que estan comprendidos entre  $0 \leq \theta \leq \pi$  y  $0 \leq \phi \leq 2\pi$ .

### E. Arquitectura del computador cuántico

Un computador cuántico utiliza la arquitectura Von Neumann cuántica la cual es similar a la arquitectura clásica de Von Neuman como pueden ver en la figura 4. La arquitectura cuántica ejecuta una serie de operaciones de puertas cuánticas mediante la carga de los qubits que deben ser manipulados en registros cuánticos del QALU (Unidad aritmética lógica cuántica). La longitud del registro cuántico puede ser arbitrariamente larga. Con el fin de enredar dos qubits de posiciones arbitrarias en la memoria, los dos qubits se cargan desde la memoria cuántica en el QALU donde se realizan las operaciones de puertas. [4]

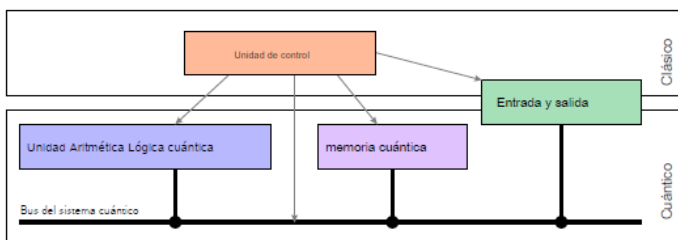


Figure 4: La arquitectura cuántica von Neuman [4]

Después de las operaciones de puertas cuántica, los qubits pueden permanecer en el QALU para su posterior procesamiento o los qubits se mueven de nuevo en la memoria cuántica. Para detectar estados cuánticos, la información cuántica requerido se puede mover a una salida, o la detección, región.

1) *Memoria cuántica*: En los ordenadores cuánticos a gran escala, tienen que alcanzar grandes capacidades de almacenamiento de datos cuánticos con la demanda de hardware baja (clásica) en la memoria cuántica. Aunque se debe tener en cuenta que la arquitectura de la computadora cuántica es tolerante a fallas. Por lo tanto la ALU cuántica realiza todas las operaciones cuánticas, los bancos de memorias cuánticas es compatible con la conversión de código eficiente, la teleportación transmite estados cuánticos sin enviar datos cuánticos, y el organizador dinámico controla todos los procesos. Esta arquitectura utiliza múltiples bancos pero esto no mejora los tiempos de acceso del qubit lógico, por eso se podría decir que la tasa de error subyacente del mecanismo de almacenamiento físico de los qubits, la complejidad del algoritmo y el tamaño de los datos de entrada, así como el tiempo de operación ALU cuántica, el paralelismo y el código de corrección de error que almacenan los qubits lógicos limita el tamaño del banco. [2]

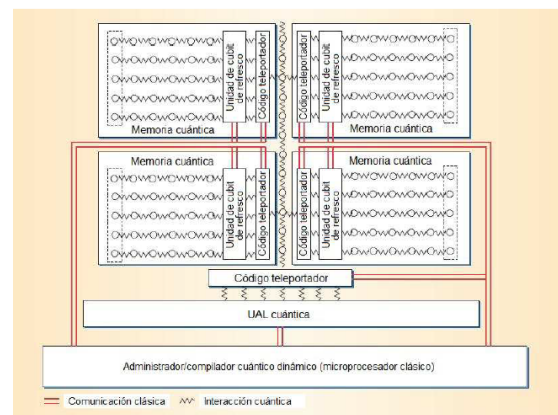


Figure 5: Arquitectura cuántica [2]

2) *Hilos cuánticos*: En ausencia de diagramas de fase para los hilos, se escoge un catalizador identificando metales para los cuales los componentes de los hilos sean solubles en fase líquida, pero no formen sólidos en la parte estable del crecimiento. [17]

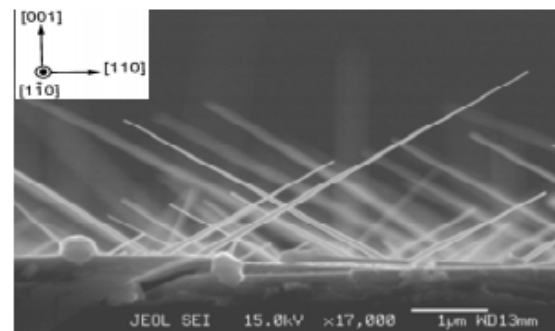


Figure 6: Hilos cuánticos [17]

La teleportación en los hilos cuánticos es superior a otros medios de entrega de estados cuánticos. Además se debe tener en cuenta que la tecnología de estado sólido implementa qubits con átomos implantados en silicio. Los qubits físicos

no se pueden mover, pero se puede aplicar una operación de intercambio para pares progresivos de átomos para mover los valores de los qubits a lo largo de la línea de átomos. Aunque se podría usar una serie de compuertas cuánticas de intercambio para implementar alambres cuánticos, cada compuerta de intercambio se compone de tres compuertas[18] CNOT, la cual introduce errores en los cubits físicos—errores que generan sobrecarga adicional en los procedimientos de corrección. La teleportación en cambio usa compuertas de intercambio cuánticas que no son correctores de errores para distribuir qubits en un estado gato para la fuente y el destino del alambre. Un estado gato (nombrado en base al gato de Schrödinger) es un vector qubit con probabilidades igualmente distribuidas entre todos los bits puestos a 1 y todos los bits puestos a 0.[19]

3) *CUDA(Arquitectura Unificada de Dispositivos de Cómputo)*: CUDA ha sido introducida por NVIDIA como una arquitectura de hardware y software tanto para la emisión y como así también para la gestión de cálculos en sus más recientes familias GPU, razón por la cual puede operar como un verdadero dispositivo de computación de datos paralelos genérico. Una extensión para el lenguaje de programación C se proporciona con el fin de desarrollar los códigos fuente.

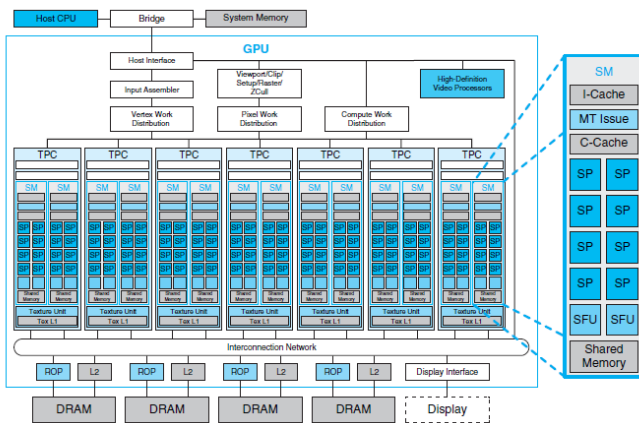


Figure 7: CUDA [21]

Desde el punto de vista del hardware, el dispositivo GPU consta de un arreglo de multiprocesadores (MP) del tipo SIMT (Instrucciones únicas para varios hilos) cada uno de los cuales contiene varios procesadores de transmisión.[22] La memoria global del dispositivo es un espacio único accesible para todos los multiprocesadores, que actúa como la memoria del dispositivo principal, y es de una gran capacidad. Además, cada multiprocesador es dueño de una memoria privada en el chip, llamada memoria compartida o caché de datos en paralelo, la cual es de un tamaño más pequeño y menor latencia de acceso que la memoria global.

### F. Multicomputador Cuántico

Para hacer realidad la ciencia con un computador cuántico, se deben haber coordinado avances en varios frentes. Como

se muestra en la figura 8 los subcampos en que todos deben contribuir a una máquina útil completa. Las máquinas serán construidas para correr algoritmos específicos que existen en ciertas clases computacionales inaccesibles para las computadoras clásicas. Sin estos algoritmos, no habrá ningún incentivo económico para construir y desplegar máquinas. Sin corrección de error, las máquinas no pueden correr para cualquier espacio de tiempo útil. En el “fondo” de la pila se encuentra el qubit de almacenamiento, la compuerta y las tecnologías de transporte/interconexión, las cuales suministran campos de prueba útiles para la teoría cuántica en sí, sino que son de interés aquí principalmente como base para la construcción de computadoras cuánticas a gran escala. Ambas, el tope y el fondo de esta pila están muy ocupados con brillantes investigadores dedicados.

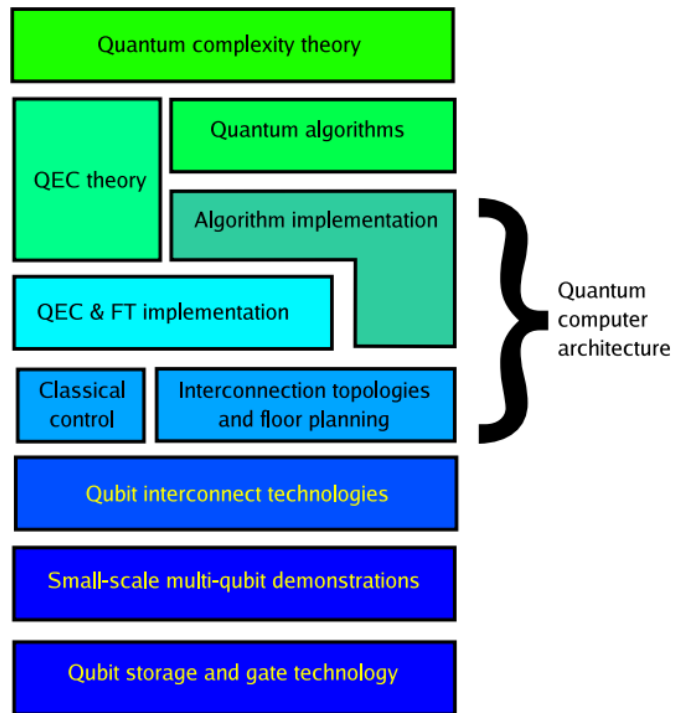


Figure 8: Arquitectura de computadora cuántica entre algunos subcampos de la computación cuántica. El CEC es la corrección de error cuántica; TF es la tolerancia a fallas.[23]

Se encuentran disponible diferentes espacios de memoria. La memoria global del dispositivo es un espacio único accesible para todos los multiprocesadores, que actúa como la memoria del dispositivo principal, y es de una gran capacidad. Además, cada multiprocesador es dueño de una memoria privada en el chip, llamada memoria compartida o caché de datos en paralelo, la cual es de un tamaño más pequeño y menor latencia de acceso que la memoria global.

Además, hay otros espacios de direccionamiento, omitidos en la figura 9, para propósitos más específicos, como son las memorias de textura y constante[24].

El modelo de ejecución de CUDA se basa en unas capas de abstracción jerárquica: cuadrículas, bloques, tramas e hilos. Se tiene en cuenta que el hilo es la unidad de ejecución básica que es realmente mapeado sobre un procesador. Un bloque es un lote cooperando junto un multiprocesador, por lo tanto los hilos en un bloque comparten la caché de datos paralelos y la cuadrícula está compuesta por varios bloques, los cuales son procesadores de diferentes bloques de una cuadrícula por eso, están repartidos entre el conjunto de multiprocesadores y una trama es un grupo de hilos ejecutándose de una manera SIMT, de tal manera que los hilos de un mismo bloque estarán repartidos en un multiprocesador trama por trama[25].

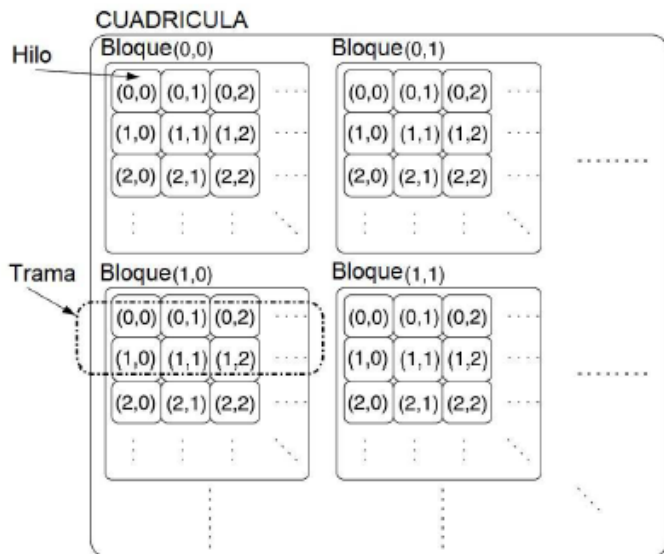


Figure 9: Esquema de ejecución SIMT en CUDA[24]

### G. Bit cuántico

Un qubit o cubit es un sistema cuántico con dos estados propios. Esto es, se trata de un sistema que sólo puede ser descrito correctamente mediante la mecánica cuántica, y en el que, aunque puede estar en un continuo de estados, al medir cualquier propiedad observable, sólo son posibles dos resultados, con una probabilidad determinada por el peso del estado propio correspondiente en la función de ondas que describe el sistema. Adicionalmente, un qubit puede ser objeto de manipulación arbitraria, dentro de las leyes de la mecánica cuántica.

Se considera el análogo cuántico de un bit clásico, que se puede describir por mecánica clásica y también tiene solo dos valores posibles, que se pueden manipular a voluntad de acuerdo con las leyes de la mecánica clásica.

También se entiende por qubit la información que contiene ese sistema cuántico de dos estados posibles. En esta acepción, el qubit es la unidad mínima y por lo tanto constitutiva de la teoría de la información cuántica. La cantidad de información

contenida en un qubit, y, en particular, la forma en que esta información puede ser manipulada, es fundamental y cualitativamente diferente de un bit clásico. Hay operaciones lógicas, por ejemplo, que son posibles en un qubit y no en un bit.

En un procesador cuántico las cosas son distintas debido a la utilización de qubits, o bits cuánticos. Los qubits son sistemas que marcan los ceros y unos en diferentes estados cuánticos. La ventaja reside en que las mismas propiedades cuánticas del sistema donde se almacenan están sujetos a los fenómenos de superposición y entrelazamiento.

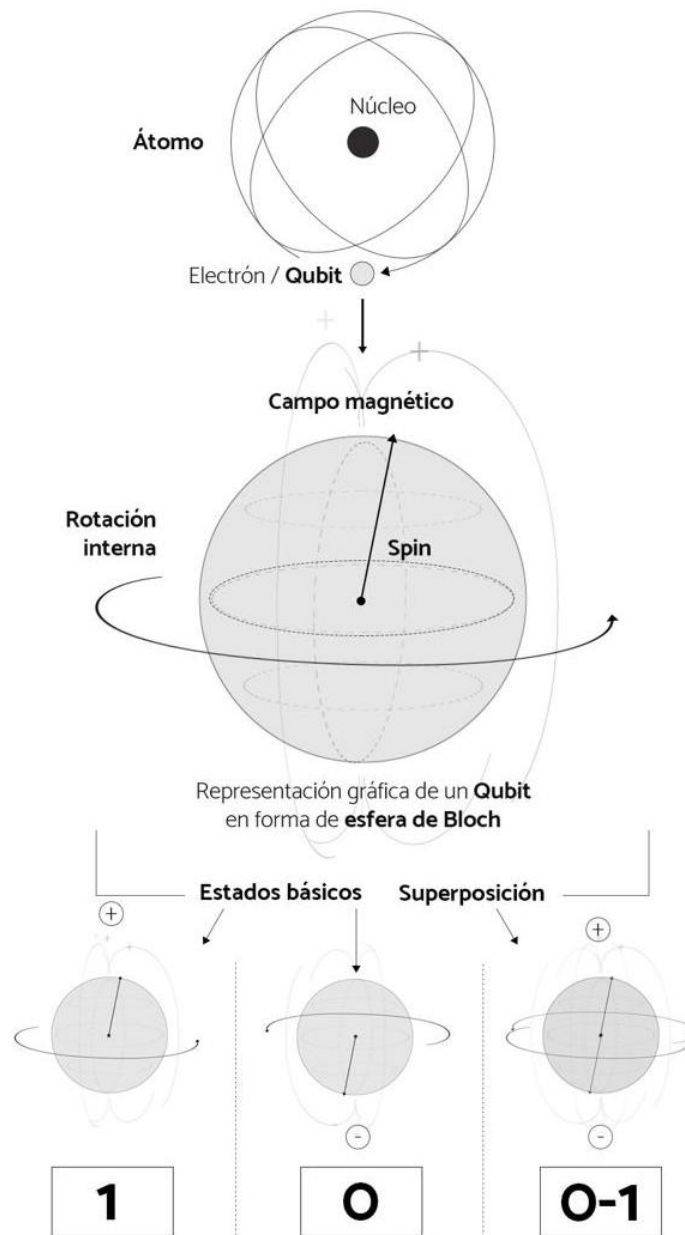


Figure 10: Representación de un Qubit [15]

El primero de estos fenómenos indica que puede ser a la vez

cero y uno. El entrelazamiento a su vez indica una relación muy fuerte entre los estados de varias partículas cuánticas que van a permanecer coordinadas en el tiempo en una especie de “baile” físico.

Pero que estos qubits sean capaces de ir más allá no significa que cuando los observemos podamos verlos a la vez en todos los estados. En el momento clave de la observación, es decir, cuando se definen si son cero o uno, veremos bits normales.

Si observamos una serie de 3 bits observaremos su estado concreto, y con lo cual pueden estar combinados de 8 formas diferentes posibles: 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111. Con 4 bits tendremos 16 combinaciones, con 5 serán 32 y con 6 serán 64, etc.

Mientras que si tenemos 3 qubits pueden representar las ocho combinaciones mencionadas al mismo tiempo. La complicación viene cuando son observados. Entonces tenemos que empezar a hablar de las probabilidades de que estén resultando en una u otra medida basándose en las propiedades de superposición y entrelazamiento mencionados antes.

#### H. Física cuántica

En el universo cuántico, los objetos pueden existir en lo que se denomina una superposición de estados. A nivel atómico, una hipotética bombilla podría estar apagada y encendida al mismo tiempo. Esta extraña característica tiene importantes repercusiones para la informática.

En la mecánica clásica y por lo tanto, en los ordenadores clásicos, la unidad mínima de información es el bit, que puede tener dos valores: 1 o 0, pero nunca ambos a un tiempo. En consecuencia, cada bit solamente puede contener un dato. Estos bits, que se pueden representar como impulsos eléctricos, cambios en los campos magnéticos, o incluso como un interruptor físico, constituyen la base del cómputo, el almacenamiento y la comunicación de los ordenadores y las redes informáticas de nuestros días.

#### I. Mecánica cuántica

La mecánica cuántica es la rama de la física relacionada con lo muy pequeño. En la escala de átomos y electrones, muchas de las ecuaciones de la mecánica clásica, que describen cómo se mueven las cosas a los tamaños y velocidades cotidianas, dejan de ser útiles. En la mecánica clásica, los objetos existen en un lugar específico en un momento específico. Sin embargo, en la mecánica cuántica, los objetos en cambio existen en una neblina de probabilidad; tienen una cierta posibilidad de estar en el punto A, otra oportunidad de estar en el punto B y así sucesivamente.

Si se trata de ordenadores cuánticos que codifican información como serie de estados mecánicos cuánticos tales como direcciones de los electrones o las orientaciones de la polarización de un fotón representando un número que expresaba que el estado del bit cuántico está en alguna parte entre 1 y 0, o una superposición de muchos diversos números de forma que se realizan diversos cálculos simultáneamente.

#### J. Lenguajes de programación cuántica

Los lenguajes de programación cuántica se pueden dividir taxonómicamente en (A) lenguajes de programación cuántica imperativos, (B) lenguajes de programación cuántica funcional y (C) otros (pueden incluir formalismos matemáticos no destinados a la ejecución de computadora)[10]

El desarrollo del lenguaje de programación cuántica se centro en explorar el modelo de máquina de *Turing Cuántica* que fue propuesta por el físico *David Deutsch*[11]. Si bien fue interesante e informativo desde el punto de vista de la comprensión de la complejidad computacional de las clases de problemas con respecto a la computación cuántica, no dio como resultado herramientas prácticas para programar computadoras cuánticas para dar solución se propuso algo que fue llamado *El algoritmo de Deutsch – Jozsa*, la Transformada de Fourier cuántica, el algoritmo de factorización de Shor y el algoritmo de Grover que fueron descritos todos utilizando el modelo de circuito cuántico[12].

Para poder convertir esto en un lenguaje[11] se propuso un pseudocódigo de programación cuántica que, junto con lenguajes de programación ya utilizados y adaptados como C y C ++, se da lugar a los primeros lenguajes de programación cuántica imperativos como la *Lenguaje de computacion cuántica* [13]. Estos lenguajes se construyeron sobre el modelo *QRAM* de computación cuántica y asumieron el control de flujo normal con datos clásicos y cuánticos, y permitieron mediciones intercaladas y operaciones cuánticas[14].

#### K. Algoritmo de Shor

Este algoritmo cimienta su potencia en determinar el periodo de una función adecuada. Aunque su estudio presenta un grado de complejidad relativamente alto, es muy interesante analizar el nuevo enfoque que la mecánica cuántica ofrece para solucionar el problema de factorización.[5]

El algoritmo de Shor consiste en dos partes:

- Una reducción del problema de descomponer en factores al problema de encontrar el orden, que se puede hacer en una computadora clásica
- Un algoritmo cuántico para solucionar el problema de encontrar el periodo.

En la figura 7 se observa una representación circuital en función de compuertas cuánticas y transformada cuántica de Fourier de la implementación del algoritmo de Shor. En la parte a) se observa el contorno de el circuito cuántico. Los hilos representan los qubits y las cajas representan operaciones.

#### L. Paralelismo cuántico

El paralelismo cuántico surge de la capacidad de un registro de memoria cuántica para existir en una superposición de estados base. Cada componente de esta superposición se puede considerar como un argumento único para una función. Una función realizada una vez en el registro en una superposición de estados se realiza en cada uno de los componentes de la superposición.[7]

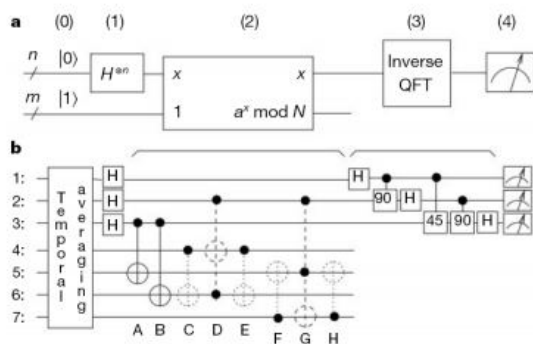


Figure 11: Estructura del Circuito del Algoritmo de Shor

$$f : \sum_{k=0}^{2^{N-1}} |k\rangle_{input} \otimes |0\rangle_{output} \rightarrow \sum_{k=0}^{2^{N-1}} |k\rangle_{input} \otimes |f(k)\rangle_{output}$$

Dado que el número de estados posibles es  $2n$  donde  $n$  es el número de qubits en el registro cuántico, puede realizar en una operación en una computadora cuántica lo que tomaría un número exponencial de operaciones en una computadora clásica. Esto es fantástico, pero mientras más estados superpuestos existan en su registro, menor será la probabilidad de que mida uno en particular.[8]

#### M. Paralelismo en el algoritmo de Shor

La gran mayoría del tiempo dedicado al procesamiento del algoritmo de Shor está en el paso discreto de transformada de Fourier. Según el uso de la transformada de Fourier discreta, se itera de 0 a  $q$ , y para cada valor posible en ese rango iteramos sobre el registro completo y realizamos algunas operaciones matemáticas. Es trivial dividir este trabajo entre múltiples elementos de proceso. Uno puede simplemente iterar en cada elemento del proceso de 0 a  $q$ , y para cada valor en el rango iterar sobre algún subrango prescrito del registro.[9]

#### N. Problemas de la computación cuántica

Uno de los principales inconvenientes en el paradigma de la computación cuántica es la decoherencia cuántica que dicho de una manera más comprensible, esto sucede cuando hay una reversibilidad o una pérdida del carácter unitario en un algoritmo cuántico, también da lugar para explicar como pasa de un estado entrelazo a un estado físico clásico no entrelazado que en otras palabras describe como un sistema físico que este en ciertas condiciones pierde sus características cuánticas pasa a exhibir comportamientos netamente clásicos.

Un clásico ejemplo para explicar la de coherencia cuántica es hablar del experimento imaginario del gato de Schrödinger, como bien ya se sabe el gato en una caja puede estar vivo o muerto o ambas a la vez en este caso las interacciones de las partículas del gato con su ambiente produce una coherencia al hacer esto la combinación de gato vivo + gato muerto pierde la coherencia se convierte en un estado clásico y por lo tanto se de un colapso y produzca que el el gato en la caja

solo va a tener un estado definitivo y verdadero que será vivo o muerto.

#### IV. CONCLUSIONES

- Actualmente el mundo de la computación cuántica es muy complejo, pero los avances que sean logrado han sido muy importante ya que se logro la compilación de múltiples tareas de gran dificultad y poder dar los resultados en tan corto tiempo, como por ejemplo el algoritmo de short.
- Es inevitable cuando se mira hacia el futuro y no pensar en el desarrollo y el alto desempeño de las computadoras así como el salto que tendrán hacia la mecánica cuántica, serán capaces de resolver cualquier tipo de problema de gran complejidad y de diversas maneras, hoy en día ya tenemos vestigios de estas las cuales sin duda alguna están avanzando a un ritmo acelerado pero aun hay muchos temas que hay que resolver tanto en los costos como su arquitectura y los posibles fallos que se pueden producir, también quedan algunos interrogantes que faltan por resolver como por ejemplo como se puede dar la interacción hombre maquina y si algún día estas supercomputadoras cuánticas podrían no solo estar destinadas a manejar temas específicos si no que también mas generales.

#### REFERENCES

- [1] VICENTE MORET, *Principios fundamentales de computación cuántica* 2013.
- [2] MARIO MASTRIANI;DR. MARCELO NAIIOUF, *Memorias matriciales correlacionadas cuánticas, simples y mejoradas: una propuesta para su estudio y simulación sobre GPGPU*. 2014
- [3] DAVID DEUTSCH, *Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer* 1984.
- [4] MATTHIAS F. BRANDL, *Una Arquitectura de von Neumann de Quantum Gran Escala de la computación cuántica* 15 de noviembre 2017
- [5] HERNANDO EFRAÍN CAICEDO-ORTIZ., *Algoritmo de factorización para un computador cuántico*, Vol. 4, No. 2, May 2010
- [6] DEUTSCH, D., *Quantum Theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer. Proceedings of the Royal Society of London A 400*, 97- 117 (1985)
- [7] DAVID DEUTSCH, *Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer*
- [8] MATTHEW HAYWARD, *Quantum Computing, Shor's Algorithm, and Parallelism GitHub Repository* Parallelism page 11
- [9] MATTHEW HAYWARD, *Quantum Computing, Shor's Algorithm, and Parallelism GitHub Repository*
- [10] DONALD A. SOFGE, MEMBER, IEEE, *A Survey of Quantum Programming Languages: History, Methods, and Tools*
- [11] DD. DEUTSCH, "Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer," in *Proceedings of the Royal Society of London*

- [12] M. NIELSEN AND I. CHUANG, *Quantum Computation and Quantum Information*, Cambridge University Press, 2000.
- [13] DONALD A. SOFGE, MEMBER, IEEE, *A Survey of Quantum Programming Languages: History, Methods, and Tools*
- [14] E. KNILL, "Conventions for quantum pseudocode," *Technical Report LAUR-96-2724, Los Alamos National Laboratory, 1996*
- [15] ÁLEX B., *Computación cuántica: el futuro de los ordenadores*, 21/05/2017
- [16] MUNCHER OF SPLEENS, *Computación cuántica: La esfera de Bloch*, en.wikipedia 18 May 2006
- [17] XIANGFENG DUAN, CHARLES M., *Lieber, Adv.Mater 2000* No. 4, 298-302.
- [18] KANE B, *A Silicon-Based Nuclear Spin Quantum Computer Nature*, vol. 393, 1998, pp. 133-137.
- [19] KANE B, *A Silicon-Based Nuclear Spin Quantum Computer Nature*, vol. 393, 1998, pp. 133-137.
- [20] DIVINCENZO D. P.Y LOSS D., *Quantum Information Is Physical," Superlattices and Microstructures* vol. 23, 1998, p. 419.
- [21] NATHAN WHITEHEAD, ALEX FIT-FLOREA, NVIDIA CORPORATION, *CUDA Architecture Overview*
- [22] QUANTUM COMPUTER SIMULATORS
- [23] ARCHITECTURE OF A QUANTUM MULTICOMPUTER OPTIMIZED FOR SHOR'S FACTORING ALGORITHM, *Rodney Doyle Van Meter III*, 2016
- [24] EL ZEIN A., MCCREATH E., RENDELL A. Y SMOLA A, *Performance evaluation of the NVIDIA GeForce 8800 GTX GPU for machine learning*, in: *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5101, 2008, pp. 466–475.
- [25] BARENCO A., BENNETT C., CLEVE R., DIVINCENZO D., MARGOLUS N., SHOR P., SLEATOR T., SMOLIN J. Y WEINFURTER H, *Elementary gates for quantum computation, Phys.* 1995