

# Computación Cuántica

López Soto Miguel Ángel

Sistemas Operativos 2019-2

---

## Introducción

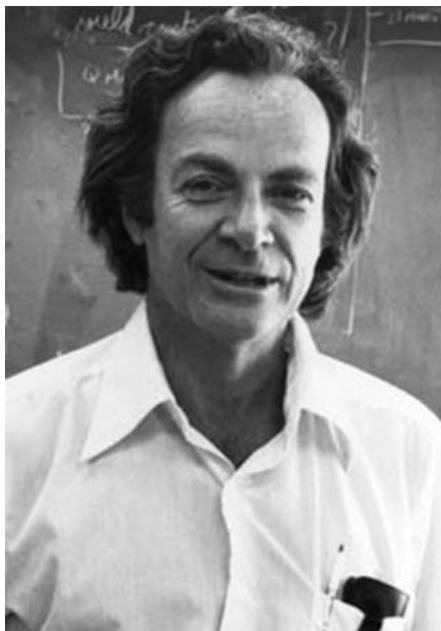
En los últimos años se ha vuelto un tema de interés y un tema regular el hablar de computación cuántica, IBM lanzó el primer sistema de computación cuántico integrado del mundo para uso comercial. Además de esto, múltiples empresas han estado invirtiendo en este tipo de tecnologías ya que La ley de Moore está llegando a su fin. ¿Cómo es esto? Pues las empresas que se dedican a fabricar circuitos integrados muy densos como INTEL o empresas que diseñan hardware como Nvidia y AMD tienen proceso de fabricación que ellos denominan la métrica de nanómetros para identificar sus procesos de fabricación. Actualmente se está hablando de 7 [nm] por parte de AMD o 10 [nm] por parte de Intel pero a estas escalas ya estamos llegando a un límite físico en el cual dibujar un chip en una placa de silicio llega a resultar complicado o imposible. Entonces ¿qué alternativas tenemos? Pues existen opciones como aumentar el número de núcleos en los procesadores, pero esto nos lleva a que los programadores



---

debemos aprovechar todo el potencial que se tiene con el cómputo paralelo, pero sabemos que esto no es así. Otra opción es mantener los transistores y subir la frecuencia de reloj, pero esto nos lleva a un mayor consumo y por lo tanto mayor disipación de calor por lo cual, el límite estándar es de aproximadamente 5 GHZ en procesadores domésticos. ¿Entonces qué nos queda para un futuro a mediano plazo? Probablemente sigamos utilizando computadoras tal y como las conocemos al menos en un ámbito más profesional. Pero debemos tomar en cuenta algunas otras alternativas al uso del silicio y los transistores.

## Un poco de Historia.



Richard Feynman Fue un físico estadounidense, considerado uno de los padres de la electrodinámica cuántica (QED) fue uno de los físicos más importantes de la segunda mitad del siglo XX. Su personalidad extravagante hizo que este personaje fuera recordado no solo por sus aportes a la ciencia si no también por sus historias graciosas e interesantes. En los años 80's Feynman publicó un artículo llamado "Simulating Physics with Computers" en el cual describe las limitantes que tenían las computadoras para realizar simulaciones sobre física en general y más específicamente sobre mecánica cuántica. En este artículo aborda diferentes problemas en los que detalla la ineficiencia de las computadoras de la época para representar fenómenos cuánticos. Por ello propone que para simular estos efectos cuánticos es necesaria una computadora cuántica que nos dé resultados que se

darían en la naturaleza.

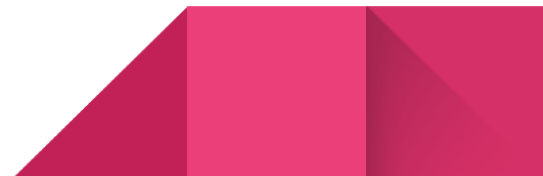
Dada el panorama de la mecánica cuántica comienzan avances teóricos en esta rama de la física/computación donde se intenta en primera instancia codificar la información

---

tal y como se estaba trabajando (bits) pero utilizando las propiedades raras que hay en el mundo cuántico. Se realizaron avances significativos como

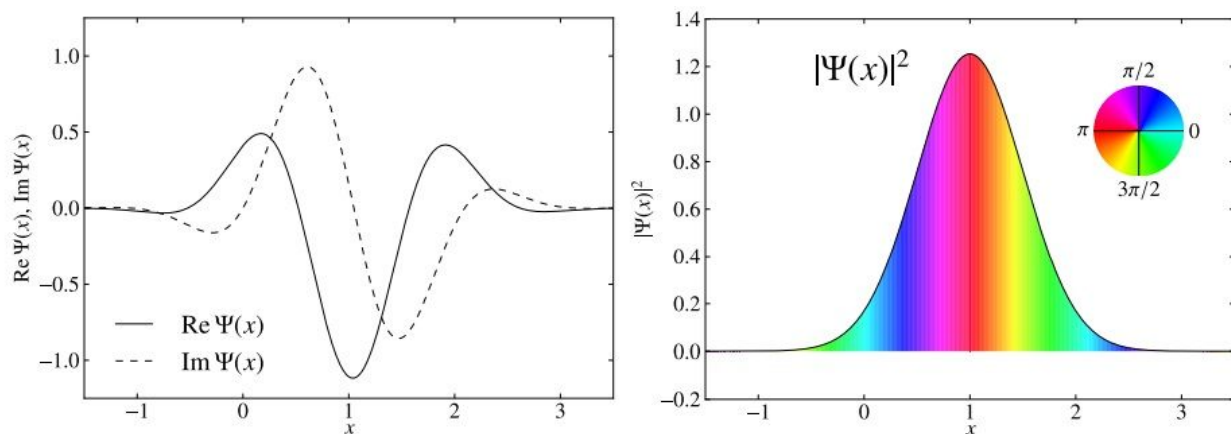
- 1985 - David Deutsch describió el primer computador cuántico universal
- 1993 Dan Simon demostraba la ventaja que tendría un computadora cuántica frente a una tradicional al comparar el modelo de probabilidad clásica con el modelo cuántico.
- Entre 1994 y 1995 Peter Shor definió el algoritmo que lleva su nombre y que permite calcular los factores primos de números a una velocidad mucho mayor que en cualquier computadora tradicional.
- En 1996 Lov Grover propone el algoritmo de búsqueda de datos que lleva su nombre. Al igual que el resto de algoritmos cuánticos, se trata de un algoritmo probabilístico con un alto índice de acierto.

Como siempre pasa, el desarrollo teórico siempre viene antes que el desarrollo tecnológico. Hablando en términos de sistemas operativos utilizamos todo lo que alguna vez se desarrolló en el siglo pasado y no solo en eso, también en otras áreas como la Inteligencia Artificial o "Ray Tracing". Estos desarrollos teóricos sirven para impulsar el desarrollo tecnológico. Para años posteriores se comienza a trabajar con experimentos que permiten medir y realizar diferentes operaciones con átomos de baja densidad. Y posteriormente se prueban nuevas formas de manipulación a nivel atómico como el enfriamiento por láser.



## Hablemos de mecánica cuántica.

La mecánica cuántica es una rama de una física más general llamada física cuántica. Surge como un intento de explicar algunos fenómenos que las teorías de ese entonces no lograban explicar como la catástrofe ultravioleta en la radiación de cuerpo negro. La primera propuesta de un principio propiamente cuántico se debe a Max Planck en 1900, para resolver el problema de la radiación de cuerpo negro, que fue duramente cuestionado, hasta que Albert Einstein lo convierte en el principio que exitosamente pueda explicar el efecto fotoeléctrico. Las primeras formulaciones matemáticas completas de la mecánica cuántica no se alcanzan hasta mediados de la década de 1920, sin que hasta el día de hoy se tenga una interpretación coherente de la teoría, en particular del problema de la medición. Después de muchas discusiones entre los físicos, se llega a una interpretación de la mecánica cuántica llamada interpretación de Copenhague. Esta interpretación fue dada por Niels Bohr y otros personajes importantes como Max Born, Werner Heisenberg la cual nos dice que existe una función llamada función de onda que describe los estados de una partícula y que ésta partícula mientras no se observa está en un estado de superposición, en el momento que alguien realiza una observación o medición, la función de onda colapsa con una probabilidad de que se halle en un estado u otro dependiendo de la función de onda. Todo esto viene dado por la física estadística y según la interpretación, La suma de los módulos de la función de onda es igual a uno y cada módulo representa una probabilidad. Así pues tenemos



---

Otro aspecto importante a recalcar son los principios de la mecánica cuántica que para efecto de este texto solo se mencionan los más importantes.

### Principio de Superposición.

Este principio nos dice que una partícula al no ser observada está en un estado indeterminado dado por una superposición cuántica que es la suma de estados en los que puede estar la partícula.

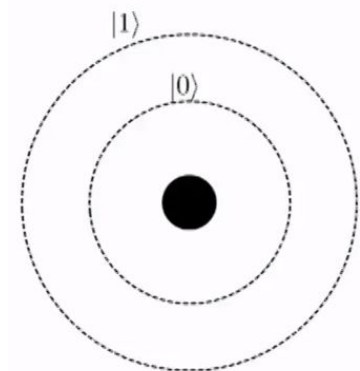
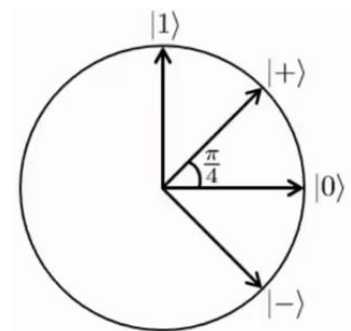
$$|\psi\rangle = \alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle = \beta_0|+\rangle + \beta_1|-\rangle$$

Esto puede ser tanto que esté en un estado con “tanto” de 1 o “tanto” de 0 dados por los coeficientes.

También cabe aclarar que al ser un módulo al cuadrado y al estar definidos estos coeficientes en el campo de los números complejos hay un número infinito de posibles estados de superposición

Se pueden definir estados dependiendo de la partícula que estemos analizando. Podemos hablar de átomos por ejemplo de Hidrógeno y sus electrones que al ser alterados por un foton, estos pasan de un estado de baja energía conocido como ground state ( 0 ) o de alta energía conocido como excited state 1.

O también podemos hablar de polarización de fotones que no se profundizará en eso.



---

## Entrelazamiento

Esto quiere decir que cuando dos o más partículas están entrelazadas cuando queremos medir alguna propiedad, se va a medir el estado del sistema y no el de una partícula individual. Esto trae consigo que ambas partículas al ser medidas colapsen y se tenga un estado en el que una partícula depende de otra.

Esto tiene implicaciones por ejemplo, para la transmisión de información.

## Decoherencia

Cuando un observador mide alguna propiedad de una partícula, provoca un colapso de la función de onda de dicha partícula. Ésta va a tener una probabilidad de colapsar en cierto estado según cómo esté dado dicho estado. Esto también explica el porqué no vemos efectos cuánticos a escala macroscópica.

## Ahora hablemos de computación cuántica.

Sabemos que en una computadora clásica podemos representar la información en bits (0,1) y estos van a estar bien definidos.

Para términos cuánticos tenemos los llamados Qbits que al igual que los bits tradicionales éstos pueden estar en 0 o 1 pero añadiendo el estado de superposición podemos estar en alguno de esos dos estados con diferentes coeficientes. Puede estar más de 1 que de 0 o viceversa. Con estos estados podemos representar la información. Si queremos hacer una función con  $n$  bits, lo que hacemos es ir operándolos uno a uno para poder obtener las diferentes salidas según la función que tengamos.

Un Qbit puede representar la misma información que un bit pero la diferencia radica en los estados de superposición que se pueden evaluar simultáneamente en la

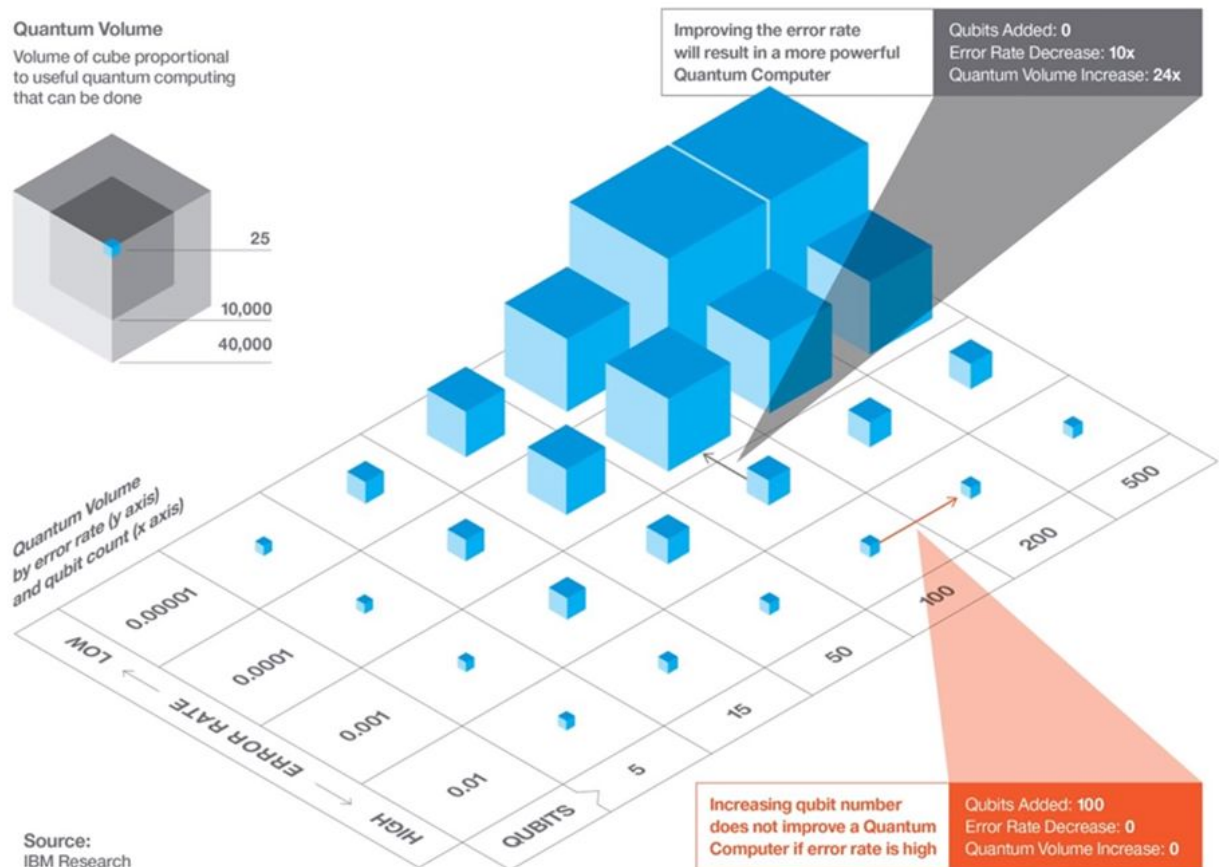


entrada y con compuertas cuánticas ir modificando la probabilidad de estos estados para maximizar el resultado esperado.

$$\alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle$$

$$\alpha_{000}|000\rangle + \alpha_{001}|001\rangle + \alpha_{010}|010\rangle + \alpha_{011}|011\rangle + \dots + \alpha_{111}|111\rangle$$

Sin olvidar de que se trata de una teoría probabilística, siempre vamos a tener un porcentaje de error. En esta gráfica vemos como es que al aumentar el número de Qbits, debemos manejar una tasa de error más baja.



---

Al menos de forma teórica así podemos definir un estado cuántico.

## ¿Cómo funcionan los algoritmos?

Como en la electrónica digital, existen diferentes tipos de compuertas que nos permiten hacer una transformación unitaria del estado cuántico (matemáticamente una matriz) la cual nos permite describir la evolución de este estado cuántico. Ejemplos de éstas son:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}(X + Z)$$

Compuerta de Hadamard

$$U_{NOT} = \sigma_1 = X \equiv \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} |0\rangle &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ |1\rangle &= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Compuerta Not

$$\left. \begin{aligned} |00\rangle &\longrightarrow |00\rangle \\ |01\rangle &\longrightarrow |01\rangle \\ |10\rangle &\longrightarrow |11\rangle \\ |11\rangle &\longrightarrow |10\rangle \end{aligned} \right\} \text{Puerta } CNOT$$



$$CPHASE(\delta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{i\delta} \end{pmatrix}$$

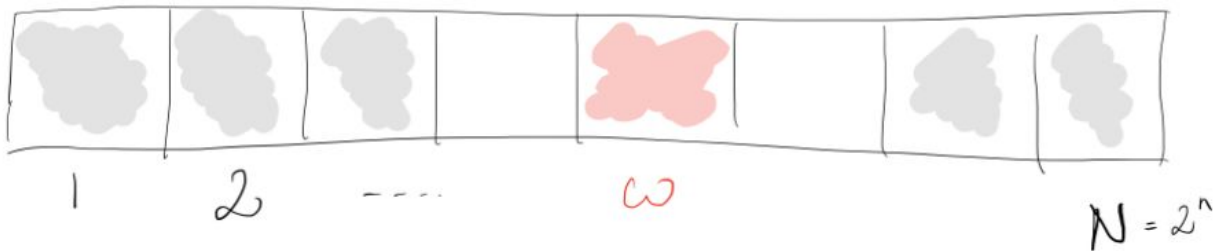
ETC.

## Algoritmo de Búsqueda de Grover

Este algoritmo puede acelerar un problema de búsqueda no estructurada de forma cuadrática, pero sus usos se extienden más allá de eso; Puede servir como un truco general para obtener mejoras de tiempo de ejecución cuadráticas para una variedad de otros algoritmos.

Esto se llama el truco de amplificación de amplitud.

Entonces supongamos que tenemos una lista de tamaño  $N$  y tenemos un elemento único en la lista que queremos encontrar. La lista no tiene ningún orden específico por lo que tenemos algo como esto.



---

La solución mas inmediata es comparando cada elemento con la propiedad que estamos buscando, en promedio, su complejidad va a ser de  $N/2$  y en el peor de los casos tenemos que se debe comparar toda la lista. Pero el algoritmo de grover lo hace en  $\sqrt{N}$  pero ¿como lo hace?

Lo primero que hacemos es codificar la información, para los ítems que no son los que buscamos definimos una función  $f(x) = 0$  mientras que para el ítem buscado será  $f(w) = 1$

Para usar una computadora cuántica para este problema, debemos proporcionar los elementos en superposición a esta función, por lo que codificamos la función en una matriz unitaria llamada oráculo.

Primero elegimos una codificación binaria de los ítems  $x, w \in \{0,1\}$

Ahora definimos la matriz que nos da alguno de los estados que tenemos definidos para  $x$ .

$$U_f|x\rangle = (-1)^{f(x)}|x\rangle.$$

Como vemos, cuando evaluamos  $x$  estamos en el mismo estado mientras que cuando evaluamos  $w$  (que es el ítem que queremos encontrar) la función mapea a

$$U_f|w\rangle = -|w\rangle$$

Entonces, ¿cómo funciona el algoritmo?

Antes de mirar la lista de elementos, no tenemos idea de dónde está el elemento marcado. Por lo tanto, cualquier conjetura de su ubicación es tan buena como cualquier otra, que se puede expresar en términos de un estado cuántico llamado superposición uniforme:

$$|s\rangle = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{x=0}^{N-1} |x\rangle.$$

Si en este punto midiéramos en la base estándar  $\{|x\rangle\}$ , esta superposición colapsaría en cualquiera de los estados base con la misma probabilidad de

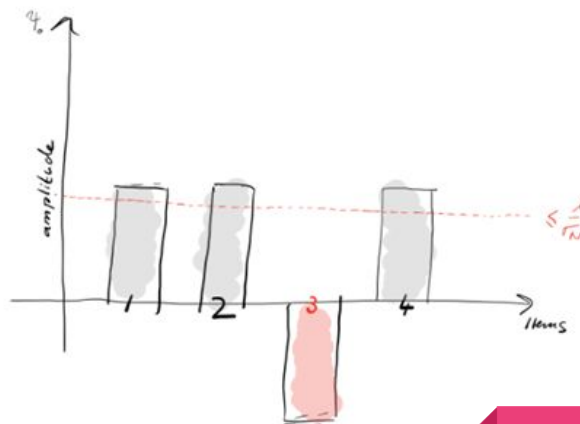
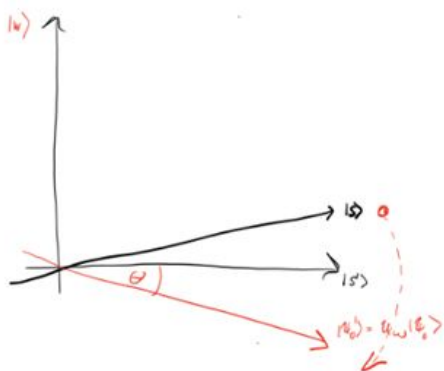
$$\frac{1}{N} = \frac{1}{2^n}.$$

Lo que queremos es amplificar la amplitud de el ítem que queremos encontrar por lo que

Paso 0. Partimos de una superposición uniforme. Ésta se puede realizar mediante la compuerta de Hadamard.

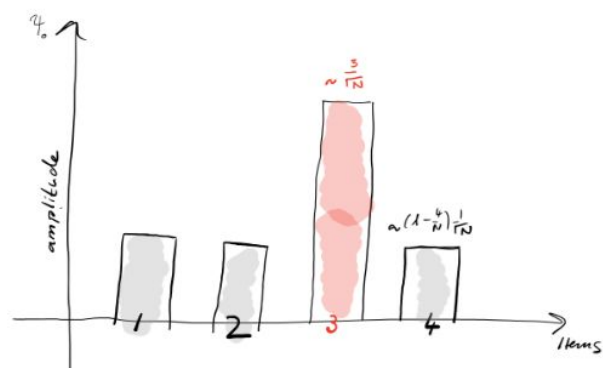
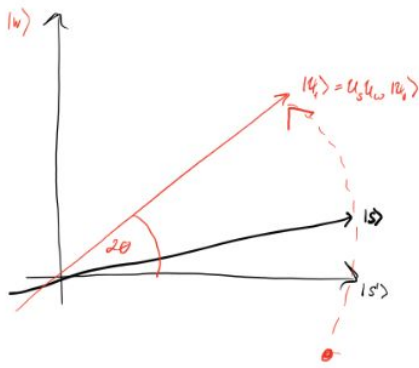
$$|s\rangle = H^{\otimes n} |0\rangle^n$$

Paso 1. Aplicamos una reflexión de fase



Paso 2. Aplicamos otra rotación de fase, pero ahora en sentido inverso por lo que tenemos

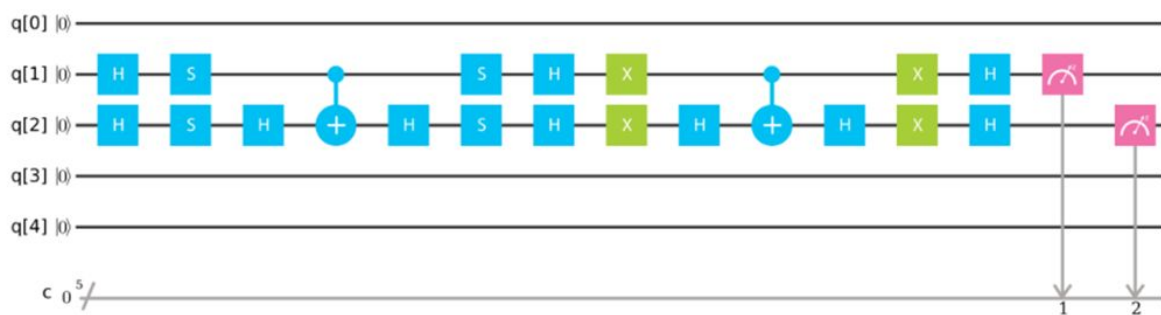
$$|\psi_{t+1}\rangle = U_s U_f |\psi_t\rangle$$



Si este proceso lo repetimos varias veces, tenemos que la probabilidad aumenta para el ítem que queremos encontrar mientras que para los otros disminuye.

Este proceso lo tenemos que hacer  $\sqrt{N}$  aproximadamente, finalmente lo podemos representar en IBM Quantum Experience

### Grover N=2 A=00



---

Estos algoritmos y mas información digerible se puede encontrar en la página de IBM Quantum Experience , ahí se puede simular en una computadora cuántica real algún algoritmo que tengamos en mente. Además, éste tipo de cosas se puede ver de varios ángulos, como físicos o como computólogos. Como físicos hay una lista de reproducción en youtube que aborda todos estos temas, no tan profundos pero si es algo que un físico entendería o un estudiante interesado en la materia podría aprender.

La liga es la siguiente:

[https://www.youtube.com/watch?v=Z1uoz\\_8dLH0&list=PL74Rel4lAsETUwZS\\_Se\\_P-fSEyEVQwniZ](https://www.youtube.com/watch?v=Z1uoz_8dLH0&list=PL74Rel4lAsETUwZS_Se_P-fSEyEVQwniZ)

También se puede como ya mencioné ver un poco más sobre este tema en

<https://quantumexperience.ng.bluemix.net/qx/community>

## Referencias

[https://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica\\_cu%C3%A1ntica](https://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica_cu%C3%A1ntica)

A Beginner's Guide to Quantum Computing

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

<https://www.nucleares.unam.mx/~vieyra/node23.html>

<http://www.criptored.upm.es/crypt4you/temas/cuantica/leccion1/leccion01.html>

Richard P. Feynman. (1982). Simulating Physics with Computers . 6 de abril de 2019, de International Journal of Theoretical Physic Sitio web:

<https://people.eecs.berkeley.edu/~christos/classics/Feynman.pdf>

<http://www.fisicafundamental.net/misterios/computacion.html>



---

<https://www2.physics.ox.ac.uk/research/ion-trap-quantum-computing-group/intro-to-ion-trap-qc>

[http://www.lidiagroup.org/images/descargas/varios/011\\_ccuantica.pdf](http://www.lidiagroup.org/images/descargas/varios/011_ccuantica.pdf)

[https://quantumexperience.ng.bluemix.net/proxy/tutorial/full-user-guide/004-Quantum\\_Algorithms/070-Grover's\\_Algorithm.html](https://quantumexperience.ng.bluemix.net/proxy/tutorial/full-user-guide/004-Quantum_Algorithms/070-Grover's_Algorithm.html)

Imagen de la introducción tomada de

<https://newsroom.ibm.com/2019-01-08-IBM-Unveils-Worlds-First-Integrated-Quantum-Computing-System-for-Commercial-Use>

Imagen de richard feynman tomada de

<https://thediplotainspain.com/2018/05/conferencia-en-el-instituto-internacional-sobre-richard-feynman/>