



## Hacia la construcción de computadores para la inteligencia artificial

*Jorge Eduardo Ortíz T,  
Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería de Sistemas,  
Univeridad Nacional de Colombia.  
Jorge@ing.unal.edu.co*

### RESUMEN

Es frecuente encontrar diferentes opiniones sobre el concepto y real significado de la palabra *computador*. También es usual que el común de la gente desconozca las posibilidades y limitaciones de estos sistemas, por esa razón en este artículo se propone un concepto (flexible y muy general) de computador y con base en ese concepto se plantean una serie de inquietudes y se intenta dar respuesta para algunas de ellas. Se concluye que existen problemas de cómputo intratables (en todas las áreas del conocimiento y de la actividad humana como el caso de Medicina y en general de las ciencias de la salud) con los actuales computadores electrónicos. Por ello se exploran algunos conceptos ligados con la física cuántica que se constituye en la base teórica que (posiblemente) permitirá construir computadores más eficientes que los actuales, es decir, con la capacidad de resolver problemas que la tecnología electrónica no puede. Sin embargo, se formulan algunos razonamientos que indican que probablemente para esa tecnología cuántica existen también problemas computacionales que sobre ella serán intratables (no solubles). En este sentido, se concluye también que, como ocurre con el enfoque electrónico convencional, para el enfoque cuántico existen problemas que seguramente no serán solubles bajo esa nueva plataforma. ¿Cómo diseñar e implementar, entonces, un computador que exhiba comportamientos realmente interesantes tales como la *conciencia* y una *inteligencia verdaderamente creadora*?. Por ahora no existe una respuesta satisfactoria para esta inquietud, no obstante si se ha avanzado en la construcción de sistemas que exhiben comportamientos aparentemente inteligentes.

**Palabras clave:** *Computador, MTD, MTP, Qbit, MTQ, Canal, Compuerta cuántica, Registro de memoria, Computador de Feynman, Simulación.*

### INTRODUCCION

El problema de la Inteligencia Artificial está ligado tanto al modelamiento de los problemas a solucionar de una forma Inteligente como también al ambiente y entorno computacional en el cual dicho modelo debe implementarse. Las actuales tecnologías de computadores electrónicos, basados en el modelo secuencial de *Turing*, tienen el inconveniente de no permitir (en la práctica) realizar cómputos de manera masivamente paralela. Día tras día la tendencia, cada vez más pronunciada, a la miniaturización de los componentes electrónicos conlleva el problema de que a niveles microscópicos (nivel de átomos, electrones y partículas aun más pequeñas) la física clásica (la Newtoniana) no resulta adecuada para modelar fielmente los cómputos a ese nivel. Surge, pues, la necesidad de aplicar otro tipo de conocimientos (cada vez más popular) denominados genéricamente *física Cuántica* que describe, de una manera más o menos adecuada, los estados de las partículas y los sistemas en esos niveles.

Las investigaciones y resultados de la física cuántica se aplican en la formulación del modelo para varios fenómenos físicos de importancia para la humanidad. Uno de esos campos en los que la utilidad de esta teoría es evidente está en la construcción de computadores eficientes que permiten implementar (en principio) modelos verdaderamente masivamente paralelos y puede demostrarse que los problemas de computación solucionados por esa vía son, por lo menos en eficiencia, mucho mejores que las actuales soluciones obtenidas por computadores electrónicos convencionales.

Pero ¿cómo puede ayudar la física cuántica en el diseño y la construcción de máquinas más eficientes? ¿Qué tipos de problemas pueden ser solucionados con esas tecnologías y

cuales no? ¿Pueden los computadores cuánticos ayudar a encontrar una teoría general de la inteligencia? Y si existe ¿podrán soportarla?.

## OBJETIVOS DE LA IA

Desde una perspectiva global, a largo plazo, existen dos objetivos fundamentales de la Inteligencia artificial:

1. Formulación de la *Teoría de la Inteligencia*, y
2. *Diseño y construcción de computadores* que soporten los postulados de esa teoría.

Ninguna de esas metas es trivial y ambas se encuentran hoy por hoy en la mira de muchos investigadores en todo el mundo. De ninguno puede decirse que se ha dicho la última palabra y, parece ser, que los dos están muy lejanos de ser alcanzados.

En las secciones que siguen se discute una posible alternativa para llegar al cumplimiento del segundo de los objetivos. La idea de diseño de un computador para la Inteligencia artificial basado en los postulados de la Física cuántica. Sin embargo, antes de abordar su diseño, se discutirán algunos conceptos importantes para abordar el problema.

## IDEA DE COMPUTADOR Y MAQUINAS DE TURING

Lo primero que debe discutirse es la misma definición de lo que realmente es un computador. En general puede decirse que un computador es un *sistema que puede procesar y almacenar información*. Cualquier máquina, dispositivo o sistema, que cumpla estas dos características puede considerarse (por lo menos desde el punto de vista de ingeniería), un computador. Sobre esta definición, es claro que los actuales computadores electrónicos pueden procesar y guardar información y que por esa razón los denominemos computadores digitales debido a que la información que pueden manejar y recordar es del tipo digital.

Sin embargo, la definición es suficientemente amplia (e interesante) de tal forma que de ella se desprende que una bacteria, una planta, un insecto, y hasta el mismo ser humano son computadores basados en tecnologías no electrónicas. Debido a esta definición se habla en nuestros días de, por ejemplo, computadores moleculares que son artefactos capaces de solucionar problemas e implementar algoritmos sobre la estructura natural del ADN (dado que la naturaleza codifica y procesa información basada en un alfabeto de cuatro letras: *Adenina*, *Timina*, *Guanina* y *Citosina* mientras que nuestra tecnología digital lo hace empleando dos el **0** (cero) y el **1** (uno)).

Formalmente hablando, un computador (en ese sentido amplio) puede definirse como una máquina de *Turing*. Un máquina de *Turing* es un modelo idealizado de un sistema que procesa y almacena información (un computador). Sin entrar en muchos detalles, suele decirse que una máquina de *Turing* (MT) es un sistema compuesto por una cinta que posee una secuencia infinita de celdas en las cuales pueden escribirse símbolos tomados de algún alfabeto. Este sistema cuenta, además, con una cabeza que es capaz de leer los símbolos incluidos en las celdas de la cinta y escribir en ellas. Internamente cuenta con un mecanismo que le permite determinar el símbolo que debe escribir en la celda recién leída y cambiar de estado como función del estado actual y del símbolo leído y, finalmente, moverse una celda hacia la izquierda o hacia la derecha. Este proceso continuará hasta que el sistema llegue a una combinación de símbolos de entrada-estado actual que no hayan sido programados para escribir y moverse. En la terminología técnica actual se suele denominar determinística a este tipo de máquina de Turing (MTD).

Una versión refinada de un modelo de Turing determinístico, es la máquina de Turing Probabilística (MTP). Su importancia radica en el hecho de que muchos problemas que toman una gran cantidad de tiempo para encontrar la respuesta deseada en una MTD pueden ser fácilmente solucionados con una MTP. Con ellas, sin embargo, surge un área que empieza a ser importante en ciencias del computador ¿Cómo determinar el momento y la cantidad de tiempo necesarias para encontrar la respuesta en un MTP?. Los científicos de las ciencias de la computación han mostrado que cualquier función computable con una MTP lo es también con una MTD. La diferencia fundamental está en que éstas últimas son frecuentemente más eficientes [Gill77].

## ELEMENTOS DE UN COMPUTADOR

A finales de la década de los 30's *Shannon* estableció un puente entre el álgebra de *Boole*, a su vez basada en la lógica de Aristóteles, que permitió llevar a la práctica el concepto de *Computador Universal* de *Turing*. Él encontró que podía construir *funciones de conmutación* usando una analogía entre la electricidad y los valores *verdadero* y *falso* que pueden tomar las *variables lógicas* en las funciones de conmutación. *Shannon* estableció que, por convención, podía denominar un *uno lógico* a un voltaje alto (digamos unos 5 voltios) y un *cero lógico* a voltajes cercanos a cero.

Puede demostrarse que una red de compuertas, en el sentido que se describe más adelante, puede simular la máquina universal de *Turing* y que, en consecuencia, en la práctica se puede construir electrónicamente ese modelo de cómputo. De lo anterior se desprende que las implementaciones de una máquina de *Turing* se pueden realizar construyendo los siguientes elementos:

Número	Elemento	Descripción
1.	<i>Sistema de canales</i>	A través de los cuales fluye la información desde el exterior hacia el interior del sistema, fluye información en el interior del sistema y se envía la información procesada (respuesta) hacia el exterior.
2.	<i>Conjunto de compuertas lógicas funcionalmente completas</i>	También denominadas compuertas universales en el sentido de que cualquier función de conmutación puede expresarse mediante una red adecuada usando únicamente elementos de ese conjunto de compuertas. Por ejemplo, para los computadores electrónicos el conjunto de compuertas lógicas $\{NOT, AND\}$ es funcionalmente completo.
3.	<i>Un reloj</i>	Que genera una serie de impulsos que sincronizan las distintas operaciones a través de la red de compuertas para alcanzar el cómputo deseado.
4.	<i>Registro de Memoria</i>	En donde se almacena la información de entrada, de estado general del sistema y la información de respuesta.
5.	<i>Mecanismo de evolución</i>	Es el proceso a través del cual las entradas son transformadas por el sistema en las respuestas deseadas.

En las secciones que siguen se discute la implantación de estos elementos a la luz de la teoría de la física cuántica para llegar a lo que se denomina un *computador cuántico universal* propuesto por Feynman.

### FÍSICA Y COMPUTADORES

Cada día que pasa los computadores se hacen más pequeños en tamaño y, seguramente más eficientes en sus capacidades de cómputo, por esa razón es cada vez más importante describir su comportamiento usando, ya no la física clásica de Newton, sino la física para escalas microscópicas hoy conocida como física cuántica.

Los efectos que para la teoría de la computación conlleva la reformulación de las operaciones básicas de un computador, en el sentido que sean consistentes con la teoría cuántica, son mayores que el impacto que, sobre las ciencias del computador, puede tener el sistema *Internet* y, posiblemente solo sea comparable con otros enfoques, de similar envergadura, como la *computación molecular*.

La primera máquina de Turing, descrita a la luz de la teoría cuántica fue desarrollada por *Benioff* quien demostró que era teóricamente posible construir una MT, con la característica de la *reversibilidad*, esto es, con la capacidad de poder conocer cuales fueron exactamente las entradas al sistema a partir de las respuestas de éste. En la tecnología electrónica actual, por ejemplo, una simple compuerta **NOT** es reversible, sin embargo, una compuerta **AND** no lo es. *Benioff*, quien se basó en un trabajo previo desarrollado por *Bennett*, denominó a este computador ideal una *Má-*

### *quina de Turing Cuántica (MTQ).*

Una *MTQ* puede pensarse como la generalización de una *MTP*. En este caso, la *MTQ* se puede inicializar en algún estado a partir del cual se puede hacer evolucionar hasta un tiempo *t* en el cual, el estado de la máquina puede describirse por la superposición de todos los posibles estados alcanzables en ese instante del tiempo. Esto significa que en una *MTQ* los posibles contenidos de cada celda en la cinta son, en un tiempo dado, todos los posibles que ella puede escribir y que si el sistema (la *MT*) es observada por algún agente humano, ésta colapsará a uno y solo uno de esos símbolos y que el símbolo al que finalmente colapsa depende de una probabilidad que esta determinada por la superposición en sí misma.

Por esta razón la diferencia fundamental entre una *MTP* y una *MTQ* está en el hecho de que en la primera se sigue una única trayectoria computacional mientras que en la *MTQ* todas las posibles trayectorias computacionales se siguen simultáneamente y la superposición final es el resultado de la suma de todas las posibles trayectorias alcanzables en el tiempo *t*. En términos sencillos lo anterior significa que, a diferencia de una *MT* convencional en la que en cada celda o hay un 1 ó un 0, en una *MTQ* una celda puede contener simultáneamente ese 1 y ese 0.

La conclusión es que, en principio, es posible la construcción de un computador de naturaleza cuántica pero surgen preguntas realmente interesantes como esta ¿Qué problemas puede resolver este tipo de computadores y cuales no?. Para intentar dar respuesta a ello, los científicos en computación han enfocado sus esfuerzos a calcular aspectos matemá-

ticos tales como la *complejidad computacional*, es decir, el tiempo y la memoria requeridos para solucionar un problema en esas máquinas. Los problemas que soportaría una eventual tecnología cuántica, es decir la *computabilidad* y, finalmente, la *universalidad* o sea si ese computador puede simular todas las otras eficientemente.

De lo anterior también pueden surgir hipótesis como esta: Si el universo es finito, entonces presumiblemente existe un límite de lo que puede ser computado debido a la finitud del número de partículas disponibles para codificar bits [COLIN1998]. Podrán acaso resolverse otros problemas más importantes y llamativos para la *Inteligencia artificial* tales como ¿seremos capaces de construir, basados en esta tecnología, sistemas artificiales con una real *inteligencia creadora*? ¿Sistemas artificiales conscientes? ¿Sistemas artificiales solidarios y con sentimientos? ¿Podremos crear vida artificial basada en sistemas robustos y sumamente complejos que puedan autoreproducirse, autoorganizarse y, en principio y en la práctica con la característica de ser evolutivos?

La física es, entonces, definitiva (pero no suficiente) al intentar diseñar y construir computadores cuánticos. Esta ciencia puede ayudar a dar respuesta a inquietudes tales como ¿Cómo puede describirse el estado de un sistema físico? ¿Cómo cambia (evoluciona) el estado si el sistema no es observado? ¿Cómo pueden describirse las observaciones y sus efectos en los cómputos?. Sin embargo, aunque puede ser un elemento clave, no es la base para cumplir el segundo gran objetivo de la IA: la formulación de una Teoría de la Inteligencia. En las secciones que siguen se intentará dar respuesta a estas últimas preguntas.

## CODIFICACIÓN DE INFORMACIÓN EN SISTEMAS CUANTICOS

Una de las unidades de información más conocida por los técnicos y los teóricos de las ciencias del computador, es el *bit*. El *bit* es una unidad de medida que puede codificar entre la *verdad o la falsedad* de algo (o también la presencia o la ausencia de algo). Con un 1 (uno) se puede asumir, por convención, la presencia de algo mientras que un 0 (cero) puede interpretarse como la ausencia de esa situación particular.

¿En dónde se encuentra la real importancia de poder definir y almacenar un *bit* en cualquier sistema físico? Para intentar responder este interrogante es necesario mirar hacia el pasado y recordar que en el siglo XIX un matemático inglés llamado *George Boole* le dio un sentido matemático a la lógica de *Aristóteles* y que, hacia finales de la década de los 30s, *Shannon* codificó, en voltajes, los valores verdadero y falso de una variable *booleana*. Con ello (y probablemente otros acontecimientos de menor importancia) fue posible para la

humanidad desarrollar lo que hoy se conoce como tecnología de computadores digitales. Mediante voltajes altos y bajos se pueden codificar unos y ceros y, en consecuencia, información.

De forma similar, un bit puede ser representado por el estado de un sistema cuántico simple de 2 estados. Algunos de esos sistemas simples de nivel cuántico son los que se listan a continuación:

1. El estado del *Espin* de una partícula

$$+ \frac{1}{2} \text{ spin up } \quad \text{y} \quad - \frac{1}{2} \text{ spin down}$$

2. Polarización de un fotón.

3. Nivel de energía discreta en un átomo excitado.

En otras palabras, a nivel microscópico es posible codificar unos y ceros pero debe tenerse especial cuidado en el momento de su procesamiento debido a que las leyes que rigen esos mundos va más allá de las leyes de Newton. En ese mundo las leyes que rigen son basadas en la física cuántica en donde probablemente el concepto más natural y, a la vez el que más desafía el sentido común, se denomina la superposición. Superposición de un sistema de dos estados (digamos un uno lógico y un cero lógico) significa que ese sistema puede estar, simultáneamente en ambos estados (Por supuesto este principio va en contra del sentido común) es decir ese sistema puede estar a la vez en un uno y a la vez en un cero y que colapsará (es decir se definirá por uno de ellos una vez sea observado) y que el paso al un uno o a un cero depende de una probabilidad que va cambiando conforme el sistema va evolucionando.

## COMPORTAMIENTO DE LOS COMPUTADORES QUANTICOS

El estado de un sistema cuántico puede ser descrito por un vector en un Espacio de *Hilbert* (el lector no debe preocuparse si varios de los términos empleados aquí le son desconocidos). En este espacio cualquier vector de estado  $\Psi$  puede escribirse como  $\Psi = \sum_{i=0}^{n-1} \psi_i \omega_i$  en el cual las ponderaciones  $\omega_i$  son números complejos y los vectores propios  $\psi_i$  forman una base ortogonal completa para el vector de estado  $\Psi$ . Cuando se habla de *completo* se quiere decir que cualquier vector  $\Psi$  en el espacio de *Hilbert* puede ser representado por la suma ponderada de sus vectores propios  $\psi_i$ . Si un sistema cuántico puede existir en uno de  $n$  estados propios  $|\Psi_i\rangle$ , también puede existir en un estado de superposición [COLIN1998].

Un sistema cuántico descrito mediante el registro de memoria (es decir el lugar donde procesa y guarda información) en un espacio de Hilbert colapsará (es decir se transformará en) uno de los vectores propios cuando sea observado. La pregunta natural que surge es a ¿Cuál de los estados propios va a colapsar?. La física cuántica también proporciona las herramientas que permiten determinar formalmente cual de ellos será seleccionado. El mecanismo de selección esta regulado por una probabilidad de cada estado propio dada por la expresión

Aquí las barras significan la norma del número complejo que ellas contienen. Esa norma tiene la característica de ser un número real positivo (siempre). La necesidad de dividir entre la suma de las normas de todos los complejos que acompañan a los estados propios surge del hecho de que la suma de probabilidades debe ser igual a 1.

De esta manera cada vez que el sistema cuántico es observado pasará a uno de sus estados propios que dependerá de su probabilidad. Es decir, quien quiera que maneje el azar en el universo, generará un número aleatorio y con base 0 en él decidirá cual de los estados será el elegido. Por esta razón, se dice que los computadores cuánticos son esencialmente probabilísticos. Pero debe notarse que van más allá de las MTP puesto que aquí las probabilidades son dinámicas en el sentido de que van cambiando conforme el sistema cuántico va evolucionando en busca de la respuesta deseada.

### CAPACIDAD COMPUTACIONAL

En principio, como se discutió anteriormente, un computador cuántico puede simular una máquina de *Turing*. Eso significa que, por lo menos, podrían resolver los mismos problemas que solucionan los computadores electrónicos de nuestros días. La diferencia fundamental se encuentra en el tiempo que le tomaría a un sistema cuántico resolver esos problemas. Usualmente quienes trabajan en ciencias del computador denominan *intratable* a un problema que, aunque tenga algoritmo que pueda implementarse bajo cierta tecnología (como la electrónica) requiera de demasiados recursos (principalmente de tiempo) que lo hagan impensable. Se ha demostrado que los futuros computadores Cuánticos son más eficientes que los computadores electrónicos y que problemas que son intratables para los computadores actuales son tratables (solucionables) en un tiempo razonable en computadores Cuánticos.

Un solo ejemplo para destacar esta en el caso de la multiplicación de números enteros es un problema tratable para ambas tecnologías, pero descomponer un número entero en sus factores primos para números que se componen de cien-

tos de dígitos es intratable para los computadores clásicos pero no lo es para los Cuánticos. Específicamente, para ambos computadores es fácil encontrar la solución de descomponer el número en sus factores primos y es fácil para un computador Cuántico pero empieza a ser difícil para un computador electrónico. En este caso Ambos resuelven el problema pero si en lugar de ser un número de dos dígitos les ponemos un número de 200 dígitos la diferencia es asombrosa.

Aunque pareciera un ejemplo poco representativo en realidad no lo es. Los sistemas criptográficos que aseguran, por ejemplo, que si un usuario envía su número de tarjeta de crédito a través de Internet nadie más que el destinatario pueda descifrarla, se basan en el hecho de que dado un número de más de doscientos dígitos es imposible descomponerlo en sus factores primos. De esta manera, si existiera un verdadero computador Cuántico los sistemas de seguridad actuales serían demasiado vulnerables.

Existen muchos otros problemas que los computadores clásicos son incapaces de resolver mientras que para los de naturaleza cuántica son perfectamente solucionables. Ello significa que vale la pena encontrar los medios para implementarlos en la práctica. Son varios los comentarios acerca del impacto que sobre la inteligencia artificial puedan tener estos artefactos de cómputo; sin embargo, las investigaciones aún hoy en ese campo son muy insípidas.

### SIMULACIÓN DE UN CEREBRO HUMANO Y EL PROBLEMA DE LA CONCIENCIA

En la sección anterior se propuso un ejemplo (la descomposición de un número en sus factores primos) y se subrayó que para un número suficientemente grande ese era un problema intratable para los actuales computadores pero tratable en uno cuántico. Con base en ese tipo de resultados los actuales científicos de los computadores se preguntan si diseñar sistemas artificiales que muestren comportamientos conscientes será posible con computadores masivamente paralelos implementados bajo los postulados de la física cuántica. En nuestros días existen modelos (matemáticos) de procesamiento masivo que simulan en funcionamiento y comportamiento del cerebro humano y, a través de múltiples ejemplos se ha mostrado que presentan un comportamiento inteligente al poder, por ejemplo, reconocer voz humana o aprender y reconocer personas.

Esos modelos, conocidos como *las Redes Neuronales Artificiales*, han mostrado buenos resultados al ser implementados en computadores secuenciales; pero se sospecha que pueden mostrar resultados sorprendentes al implementarse en otras tecnologías que permitan el proce-

samiento masivamente paralelo, como los computadores cuánticos. Es probable, para concluir, que al simular una Red Neuronal Artificial (suficientemente compleja en la cual se representen del orden de  $10^{14}$  neuronas artificiales y  $10^{17}$  conexiones entre ellas) en un computador cuántico se puedan encontrar comportamientos emergentes en ese sistema neuronal al estilo de una verdadera intelligen-

cia, dotada de una conducta conciente. La realidad es que para verificar esta hipótesis se requiere alcanzar las dos principales metas de la IA: La teoría y el computador en el que pueda ser implementada. En otras palabras estamos en el camino hacia la construcción de un sistema artificial con inteligencia creadora pero muy lejos de alcanzar la meta.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Adleman L.** Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems. *Revista Science*. 1994; 266.
2. **Barenco A.** A universal Two-Bit gate for quantum computation. *Proceedings Royal society London*. 1995; 449 A.
3. **Benioff P.** The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical hamiltonian model of computers as represented by Turing machines. *Journal of statistical physics*. 1980; 22.
4. **Deutsch D.** Quantum theory, the Church-Turing principle, and the universal quantum computer. *Proceedings Royal society London*. 1985; 400 A.
5. **Feynman R.** Simulating physics with computers. *International journal of theoretical physics*. 1982; 21(6,7).