

# LA COMPUTACION CUANTICA

Por Eduardo A. Castro (\*)

*En este trabajo de divulgación científica y dirigido a un público general, se exponen los fundamentos de la computación cuántica de un modo didáctico. Se destacan algunos de los últimos aportes significativos sobre el tema, así como el origen de las dificultades que existen para materializar la construcción de una computadora cuántica. Asimismo se puntualizan algunas reservas y aún diversas objeciones serias acerca de aquella posibilidad. Finalmente, se presentan varias vías posibles de aplicación de una computadora cuántica a problemas de interés en distintos campos del saber y el quehacer humano.*

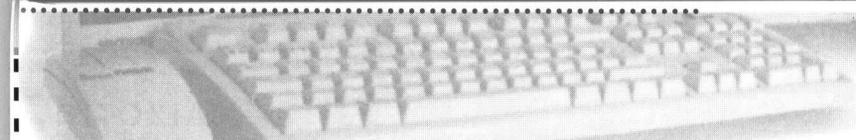
Resulta del todo evidente la destacadísima incidencia actual de la computación en la vida ordinaria de todo ciudadano, así como su empleo extendido en todas las áreas del desarrollo y la aplicación científica y tecnológica. Por otra parte, los aportes fundamentales de la teoría cuántica no sólo han promovido una verdadera revolución científica en el terreno de las ciencias básicas como la física, la química, la biología y otras afines, sino que han tenido una notable influencia en el campo del pensamiento y la cultura contemporáneos. En consecuencia, una parte significativa de estos conocimientos y desarrollos impregnan a nuestras vidas y nuestros quehaceres cotidianos, por lo que resulta cuanto menos necesario el tener una noción aproximada de ellos a fin de poder actuar y desenvolvemos con un cierto grado mínimo de responsabilidad ciudadana. En lo atinente al tema objeto de este artículo, hoy día la computación cuántica ya se ha convertido en un emprendimiento apasionante del saber humano y sus posibilidades de desarrollo y potencialidades aplicativas son tan grandes que, en la medida en que éstas se concreten, ellas habrán de tener una marcada influencia sobre muchos aspectos de nuestras vidas.

El propósito de este trabajo de divulgación es el de ofrecer una visión panorámica de la computación cuántica, tratando de exponer el tema de una manera clara y didáctica, y en térmi-

nos comprensibles para toda clase de lectores interesados en el mismo. Si bien algunas ideas, ciertas descripciones experimentales y conceptos teóricos conllevan un grado apreciable de dificultad de comprensión, se los habrá de exponer de una forma relativamente rigurosa, puesto que de otra manera se desnaturalizaría el carácter de la exposición misma. En todos los casos se tratará de efectuar las pertinentes presentaciones del modo más sencillo posible.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la próxima sección se ofrecen algunas ideas generales respecto de la computación y la forma concreta de materializar la información misma por esta vía. En la tercera sección se detallan varias maneras de implementar la información cuántica y los logros alcanzados hasta el momento. En la sección cuarta se destacan los inconvenientes asociados a estos avances con vistas a la posible construcción de una computadora cuántica. En la quinta sección se desarrolla el tema de la información cuántica y en la siguiente se introduce el concepto de las placas lógicas. La séptima sección se refiere al diseño experimental de las placas lógicas cuánticas con vistas a su empleo en la construcción de las computadoras cuánticas. Finalmente, en la octava sección se discuten las posibilidades de arribar con éxito al fin propuesto, así como algunas de las reservas que se han planteado al respecto, y en la

\*) CEQUINOR, Departamento de Química, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata.



novena y última sección se analizan las conclusiones derivadas de todo lo anteriormente expuesto.

### ALGUNOS ANTECEDENTES VINCULADOS A LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Durante el último medio siglo, cada dos años las computadoras han venido duplicando la velocidad de procesamiento en tanto sus componentes se han hecho dos veces más pequeños. Ahora los circuitos y los transistores que componen un equipo de computación miden solamente una décima parte del grosor del cabello humano. Evidentemente, estos datos por sí mismos nos muestran que se produjo un progreso extraordinario y así llegamos a una situación donde las máquinas actuales son millones de veces más poderosas que sus antepasados primitivos. Sin embargo, este grado fabuloso de avance no puede proseguir indefinidamente y la tecnología de los circuitos integrados se está acercando a sus límites materiales.

Las técnicas litográficas más avanzadas que se utilizan para fabricar los dispositivos electrónicos eventualmente pueden llegar a producir partes que sean unas cien veces más pequeñas que las actuales. Pero a esta escala, donde los materiales se manifiestan y comportan como un conjunto de átomos individualizados, los circuitos integrados difícilmente funcionen. Y así, a una escala diez veces menor, estos individuos asumen plenamente su identidad y entonces un simple defecto puede anular el funcionamiento de todo el conjunto. En consecuencia, si en el futuro los componentes esenciales de una computadora habrán de alcanzar este grado de miniaturización, entonces inevitablemente una nueva tecnología, cualitativamente distinta a la actual, deberá reemplazar y/o suplementar a la que hoy se emplea.

Hace ya veinte años que algunos pioneros de los circuitos usados en el procesamiento de la información comenzaron a formular preguntas sobre el destino del proceso de miniaturización de los componentes de una computadora y así plantearon cuestiones

tales como: ¿cuán pequeños pueden llegar a ser los componentes de un circuito?, ¿cuánta energía puede llegar a demandar el proceso de computación en base a los componentes electrónicos ultrapequeños?, etc. (1,2).

A principios de la década del '80 se pudo demostrar que, en principio, una computadora podía llegar a funcionar en base a principios y leyes puramente mecano-cuánticas (3). Posteriormente otros grupos de investigadores comenzaron a modelar las computadoras mecano-cuánticas a fin de analizar en qué medida ellas diferirían de las clásicas y en qué extensión los efectos cuánticos podrían llegar a ser aprovechados para aumentar la velocidad de procesamiento y realizar cálculos a través de nuevas técnicas numéricas (4, 10). El progreso en esta área de la investigación ha continuado y hoy en día se está trabajando con inusitada intensidad sobre diversos aspectos de la computación cuántica. El lector interesado puede consultar dos interesantes artículos de revisión recientemente publicados (11, 12).

### LA MECÁNICA CUÁNTICA

La mecánica cuántica constituye el marco teórico fundamental para describir y comprender nuestro mundo material. En tal carácter, abarca una gran cantidad y diversidad de temas que van desde lo microscópico a lo macroscópico. En particular, es en el primero de estos dominios donde los denominados "efectos e interpretaciones cuánticas" resultan muchas veces harto extrañas a nuestra comprensión ordinaria y a nuestra visión corriente de los fenómenos físicos. Sin embargo, la mecánica cuántica ha predicho una cantidad enorme de efectos que contrarían nuestra capacidad intuitiva normal, los cuales fueron repetidamente verificados experimentalmente.

Una forma de apreciar este extraño carácter de la mecánica cuántica consiste en analizar la naturaleza dual de la materia. La denominada "dualidad partícula-onda" significa que todos los objetos materiales, tales como los átomos y las sillas, bajo ciertas circunstancias se comportan como ondas y que

cosas que normalmente se describen como ondas, tales como el sonido y la luz, ocasionalmente se comportan como partículas. En esencia, la mecánica cuántica permite determinar qué clases de ondas están asociadas a cada tipo de partículas, e inversamente, para cada objeto se puede conocer qué clase de onda le corresponde.

Una de las primeras consecuencias de esta dualidad es que los sistemas materiales pequeños, tales como los átomos, solamente pueden existir en estados discretos de energía. Así, cuando un átomo cambia de un estado de energía a otro, absorbe o emite una cantidad bien definida de ella en forma de fotones. A su vez, los fotones pueden ser considerados como las partículas que corresponden a las ondas luminosas.

Una segunda consecuencia acerca de las ondas mecano-cuánticas es que ellas, al igual que cualquier clase de onda tales como las ondas sonoras, se pueden superponer, o sea que es posible adicionarlas o restarlas. Y entonces acaece una de las extrañezas más notables derivadas de la teoría cuántica ya que cada una de las ondas ofrece una descripción aproximada de la posición de la partícula. Pero cuando dos o más ondas se combinan, entonces la posición de la partícula queda indeterminada respecto de nuestra concepción ordinaria. En un sentido cuántico podemos afirmar que, por ejemplo, un electrón puede hallarse al mismo tiempo en un cierto lugar y también estar en otros sitios. Solamente cuando se determina la localización de este electrón, por ejemplo, iluminándolo con fotones, se revelará que está ubicado en un solo punto, pero no en varios a la vez.

Naturalmente, nuestros extrañados lectores se preguntarán qué grado de verdad hay en todo esto, ya que su experiencia cotidiana no le muestra tal tipo de comportamiento con los objetos corrientes. En realidad, esta inusitada manera de comportarse es de carácter universal y vale aún para los objetos que podemos ver con nuestros propios ojos de manera directa. Sin embargo, debido a una cuestión de magnitudes y órdenes dimensionales,

nuestros sentidos ordinarios son incapaces de aprehender estas peculiaridades. En consecuencia, sólo los objetos ultrapequeños, de dimensiones atómicas o menores, exhiben abiertamente un inusual modo de comportamiento, el cual es observable y determinable con precisión por medio del empleo de técnicas específicas y equipos apropiados.

Cuando dos o más ondas cuánticas superpuestas se comportan como una sola, se dice que son "coherentes". El proceso por el cual dos o más ondas coherentes recobran sus respectivas identidades individuales se denomina "decoherencia".

## LA INFORMACIÓN COMO PROCESO FÍSICO

Usualmente no se piensa acerca de la computación como un proceso eminentemente físico. Más bien, se la considera como una operación matemática teórica. Sin embargo, cuando se analiza con algún cuidado, el efectuar una computación es esencialmente un proceso físico. Consideremos el ejemplo trivial de sumar "1+2": ¿cómo se maneja esta operación sencilla por medio de una computadora? Las entradas 1 y 2 son dos cantidades abstractas que antes de efectuar cualquier clase de computación son codificadas en un determinado sistema físico. Esta codificación puede efectuarse de muy diferentes formas, dependientes cada una de ellas del dispositivo computacional empleado. En el caso ultraelemental de un contador manual, uno corre hacia un costado (habitualmente hacia la derecha) primero una bolilla y luego dos más. Finalmente, para arribar al resultado final de la operación se cuenta el número total del conjunto armado mediante las dos primeras operaciones de correr bolillas hacia un costado. En las computadoras usuales, el proceso físico consiste en aplicar determinados voltajes de potencial a la placa de un transistor en un microchip de silicio.

En consecuencia, el proceso mismo de computación consiste en un conjunto de instrucciones, denominadas "algoritmos", llevadas a cabo por medio de

un proceso físico. Al completarse el algoritmo se obtiene un resultado que finalmente se reinterpreta en términos abstractos, pero a partir de la observación final del estado de un sistema físico (sean las bolillas totales o el conjunto de voltajes en las placas). El punto crucial que en este contexto se debe puntualizar es que, aunque "1+2" se puede definir en términos abstractos, el proceso computacional que nos permite inferir que el resultado es 3 se encuentra constituido por un proceso físico.

La unidad básica de la información en una computadora lleva la denominación de "bit". Esta unidad es simplemente una diferenciación entre dos alternativas: si o no, 0 ó 1, falso o verdadero. En las computadoras usuales, llamadas también "digitales", un bit de información está constituido por el voltaje aplicado entre las placas de un capacitor: un capacitor cargado representa al 1 y uno descargado al 0. ¿Qué conexión guarda esta unidad de información con una operación tal como la anteriormente descrita? Cada número se representa en el sistema binario o sea solamente a través de unos y ceros, por lo que llevarán algunos bits representar cada número. La operación se efectúa según las reglas del álgebra binaria y el resultado será un número representado en este sistema o sea un nuevo conjunto de bits (cadena finita de unos y ceros), que al ser leídos nos suministrarán el resultado final.

Una computadora cuántica funciona en base al proceso de asimilar el familiar carácter discreto de la información digital al extraño carácter discreto de los estados cuánticos de energía de la materia. Supóngase tener un átomo de hidrógeno que podría ser empleado para almacenar bits de información en una computadora cuántica. Cuando el átomo se encuentra en el estado fundamental con su electrón en el nivel de energía más baja (color azul oscuro en la Figura 1a) puede representar al cero. El mismo átomo en un estado excitado, con su electrón en un nivel de mayor energía (color azul medio en la Fig. 1a) puede representar al uno. Los bits atómicos 0 y 1 pueden cambiar al valor opuesto (1 y 0 respectivamente)

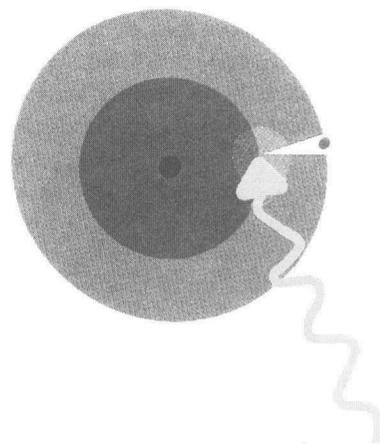


Figura 1a. Los átomos de hidrógeno podrían ser usados para guardar bits de información en una computadora cuántica. Un átomo en su estado fundamental con su electrón en el nivel energético más bajo posible (color azul oscuro) puede representar al cero. El mismo átomo en un estado excitado, con su electrón en un nivel de energía más alto (color azul medio) puede representar al uno. Los bits 0 y 1 del átomo pueden cambiarse el valor opuesto empleando un pulso de luz láser (color azul claro). Si los fotones del pulso tienen la misma energía que la diferencia entre el estado excitado y el estado fundamental del átomo, el electrón pasará de un nivel a otro.

empleando un pulso de luz láser (color azul claro). Si los fotones componentes del pulso que se aplique durante un lapso apropiado y en forma gradual tienen una energía exactamente igual a la diferencia entre los niveles excitado ( $E_1$ ) y el fundamental ( $E_0$ ), entonces el electrón "salta" de un estado a otro, tal como se muestra esquemáticamente en la Figura 1a. La lectura del bit atómico involucra a un segundo estado excitado (color azul medio en la Figura 1b), cuya energía es  $E_2$  y un pulso de luz láser con energía  $E_2 - E_1$  (haz color azul claro en la Fig. 1b). Si el átomo se encuentra en el estado fundamental (color azul con rallado blanco en la Figura 1b) representando al cero, entonces el pulso no tiene efecto alguno pues su energía no corresponde a ninguna diferencia entre los niveles atómicos. Pero si el átomo se encuentra en el primer estado excitado (color oscuro en la Figura 1b) con energía  $E_1$ , el pulso inducirá un salto al nivel  $E_2$ . Posteriormente, el átomo retornará al nivel  $E_1$  emitiendo un fotón de energía  $E_2 - E_1$  (haz color azul oscuro en la Figura 1b) y esta emisión, adecuadamente registrada, informará que el valor del bit era 1.

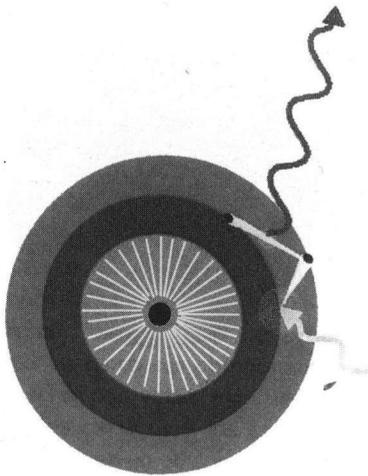


Figura 1b. La lectura del bit que almacena un átomo se realiza usando un pulso de luz láser que tiene la misma cantidad de energía que la diferencia entre el primer nivel excitado del átomo, digamos  $E_1$  y el aún más alto segundo nivel excitado, que denominamos  $E_2$ . Si el átomo se encuentra en el estado fundamental, representando al cero, este pulso no tiene efecto alguno. Pero si el átomo se encuentra en el primer estado excitado, representando al uno, el pulso lo impulsa al nivel de energía  $E_2$ . Luego, el átomo retornará al estado  $E_1$  emitiendo al fotón antedicho.

Así como en una computadora analógica se necesitará toda una batería de capacitores registrando ceros y unos, un conjunto de átomos de hidrógeno adecuadamente preparados cumplirá idéntica función. Pero entonces ¿cuál es la diferencia entre una computadora clásica y una computadora cuántica si lo único que tenemos hasta aquí son meras formas alternativas de representar y manipular a la información? La respuesta será clara y concluyente cuando se pase a la siguiente sección que aborda el tema de la "información cuántica".

## LA INFORMACIÓN CUÁNTICA

Si cualquier sistema cuántico se diseña para hacer las veces de una computadora, entonces debe ser capaz de algo más que de guardar bits. Un operador debe poder cargar la información en el sistema, procesarla por medio de manipulaciones lógicas sencillas y finalmente descargar la información resultante del procesamiento anterior. O sea que un sistema cuántico debe ser capaz de leer, escribir y procesar una

aritmética.

En el proceso físico entre los estados  $E_0$  y  $E_1$  se hizo mención explícita a dos condiciones significativas en la incidencia del haz de luz láser de energía  $E_1 - E_0$ : "gradualismo y duración apropiada". ¿Qué se quiere significar con aplicación gradual? El campo eléctrico oscilatorio asociado a la luz láser impulsa al electrón de un átomo desde un nivel energético a otro de la misma manera que una adulto empuja a un niño al hacer un columpio para que cada vez vaya más alto. Toda vez que actúa la onda oscilante sobre el electrón le imparte un pequeño impulso. Cuando los fotones del campo electromagnético poseen la misma energía que la diferencia entre los dos niveles  $E_1$  y  $E_0$ , entonces estas impulsiones coinciden con el movimiento de balanceo del electrón y gradualmente convierten a la onda correspondiente al electrón en una superposición de ondas con energías diferentes. En el proceso de excitación, la amplitud de la onda asociada con el estado fundamental disminuirá al tiempo que aquella correspondiente al nivel excitado se incrementará. En este proceso, el bit registrado por el átomo cambia del estado fundamental al estado excitado.

Si el pulso de luz apropiado, o sea aquél de energía  $E_1 - E_0$ , se aplica durante un lapso que corresponde a una fracción del tiempo total del proceso antes descrito para cambiar el átomo de 0 a 1, digamos la mitad del tiempo, entonces el átomo se encuentra en un estado que es igual a una superposición de la onda correspondiente al 0 y la otra mitad correspondiente al uno, ambas con igual amplitud. Este bit cuántico, denominado usualmente "cubit" (13) se encuentra en consecuencia a mitad del camino entre el estado cero y el estado uno. Y aquí radica la diferencia esencial entre un bit clásico y otro cuántico. Un capacitor a medio cargar en una computadora convencional origina errores y no caben más que dos alternativas para un bit: 0 ó 1. En cambio, un cubit puede asumir un número infinito de valores entre 0 y 1, debido a la validez del principio cuántico de superposición. Las cosas sucederían como si los cubits

coexistieran, en principio, en muchísimos estados de información al mismo tiempo, y no solamente cero o uno. Esta característica tan peculiar y extraña a nuestro modo común de pensar, pero totalmente válida y comprobable experimentalmente, es la que abre un campo de posibilidades insospechadas a la nueva computación cuántica.

## LAS PLACAS LÓGICAS

Los circuitos electrónicos están contruados con elementos lineales, tales como cables, resistores y capacitores, y no lineales, tales como diodos y transistores, todos los cuales manipulan a los bits de distinta manera. Los dispositivos lineales modifican a las señales de entrada de manera individual. En cambio, los no lineales hacen que las señales de entrada que pasan a través de ellos sean sometidas a un proceso de interacción.

Los circuitos realizan computaciones por medio de repeticiones de unas pocas y muy sencillas tareas lineales y no lineales una y otra vez a una gran velocidad. En el campo de la computación estos dispositivos reciben el nombre de "placas lógicas", las cuales realizan operaciones elementales sobre los bits de información. En el siglo XIX el lógico irlandés George Boole demostró que cualquier tarea compleja de tipo lógica o aritmética se puede llevar a cabo usando combinaciones adecuadas de solamente tres operaciones simples: **NO**, **COPIAR** e **Y**. Veamos el significado de cada una de ellas.

**NO:** consiste en cambiar un bit, o sea de 0 pasa a 1 y de 1 pasa a 0. Es la operación lógica NOT donde lo verdadero pasa a falso y lo falso a verdadero.

**COPIAR:** hace que un segundo bit sea igual al primero. O sea que al cero lo transforma en cero y al uno en uno. Estas dos tareas son lineales, puesto que en ambas la salida o el resultado refleja el valor de una sola entrada.

**Y:** es una tarea algo más elaborada, pues considera dos bits de entrada y de acuerdo a sus respectivos valores produce un resultado. En efecto, si ambos bits de entrada son 1, entonces un tercero (el resultado) es 1. En cualquier otro de los tres casos restantes

(o sea 0 y 1, 1 y 0, 0 y 0), el resultado es cero.

Se ve entonces que esta operación es no lineal pues la salida depende de alguna clase de interacción entre dos entradas. Estas operaciones pueden llevarse a cabo con placas lógicas electrónicas (clásicas) así como con sus análogas cuánticas. Las Figuras 2a, b y c muestran cómo pueden comprenderse y realizarse estas tres operaciones por medio de un sistema cuántico.

Vale la pena destacar la diferencia substancial que existe entre las placas clásicas y las placas cuánticas. En el primer caso, el cambio que se produce, por ejemplo, en la placa convencional al actuar la operación NO es de carácter total, o sea que el cero pasa a uno y el uno al cero. En cambio, las placas cuánticas, además de la tarea anterior, pueden hacer que este cambio sea parcial y los cubits se modifiquen a medias, produciendo un estado final que sea, por ejemplo, mitad de uno y mitad de cero. Es en esta diferencia radical que subyace la mayor universalidad de las computadoras cuánticas respecto de las convencionales, otorgándoles así un campo de posibilidades operacionales mucho más vasto.

Para avanzar un poco en la comprensión del empleo de los cubits, consideremos que en una computadora cuántica colocamos la información de entrada tal que cada uno de ellos sea igual a una superposición de 0 y 1, cada uno de ellos con igual magnitud. Entonces, la computadora se encuentra en una superposición igual a todas sus entradas posibles. Al efectuar una operación determinada, el resultado final es una superposición de todas las posibles salidas de esa particular computación. O sea que las cosas suceden como si de algún modo muy extraño, la computadora efectuase todas las posibles operaciones a la vez. En efecto es lo que se denomina "paralelización o paralelismo cuántico".

Aunque este paralelismo cuántico pueda resultar harto extraño y de muy difícil, o aún imposible, comprensión racional, un ejemplo sencillo nos mostrará que puede ser razonable y que en verdad no está para nada alejado de algunas experiencias de nuestra vida co-

tidiana. Considérese el caso de las ondas sonoras, donde los tonos puros están constituidos por vibraciones de una sola frecuencia. El análogo cuántico serían los cubits cero y uno. Cuando musicalmente se combinan los tonos puros se tienen los coros y sabemos muy bien que ellos suenan muy distinto respecto de los tonos individuales. De igual manera, en la computación cuántica, una superposición de cubits 0 y 1 difiere de cada uno de éstos tomados por separado. Vemos así que en ambos casos las ondas interfieren unas con otras para dar un producto final muy distinto a cada uno de sus componentes iniciales.

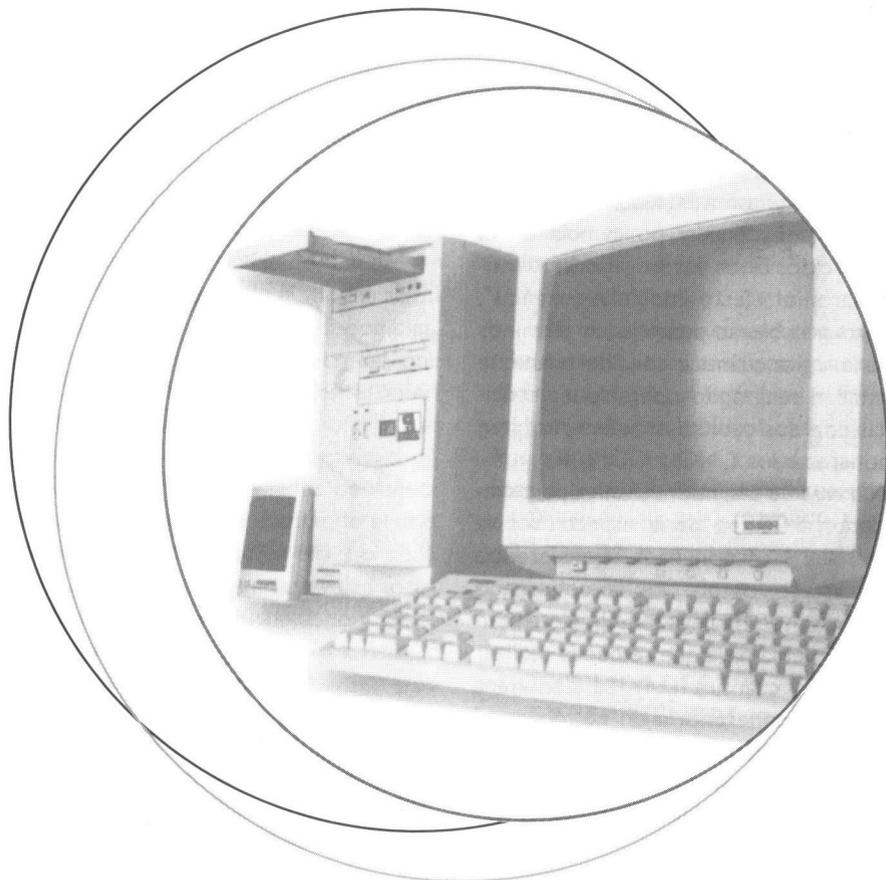
Hasta aquí hemos descrito en forma un tanto simbólica (a través del uso de átomos de hidrógeno) la forma práctica de almacenar y manejar a los cubits en una computadora cuántica. Pasemos ahora a describir brevemente algunas de las formas concretas de efectuar estas operaciones.

### DISEÑO EXPERIMENTAL DE LAS PLACAS LÓGICAS CUÁNTICAS

Para el lector que no es versado en los

temas actuales de la física, la química y la espectroscopía, esta sección le resultará de más difícil comprensión visto el empleo que se hará en ellas de conceptos específicos. De haber intentado siquiera una mediana descripción apropiada al lector lego en el tema, esto hubiera implicado extender el artículo más allá de los límites razonables que impone una publicación de esta clase. Por otra parte, de no haber incluido las breves descripciones y menciones que siguen, este trabajo no estaría completo, careciendo de una parte constitutiva esencial. Por otro lado, el lector interesado en el abundamiento de mayores detalles específicos puede consultar la bibliografía apropiada que se indica en cada caso.

Existe una gran variedad de fenómenos físicos que pueden ser aprovechados para construir una computadora cuántica. En verdad, y aunque esto también resulte un tanto extraño, los dispositivos cuánticos se han ido desarrollando al mismo tiempo que los transistores en el terreno de la espectroscopía. En efecto, hacia fines de la década del '50, los investigadores aprovecharon la existencia de una interacción física entre el espín del electrón y el



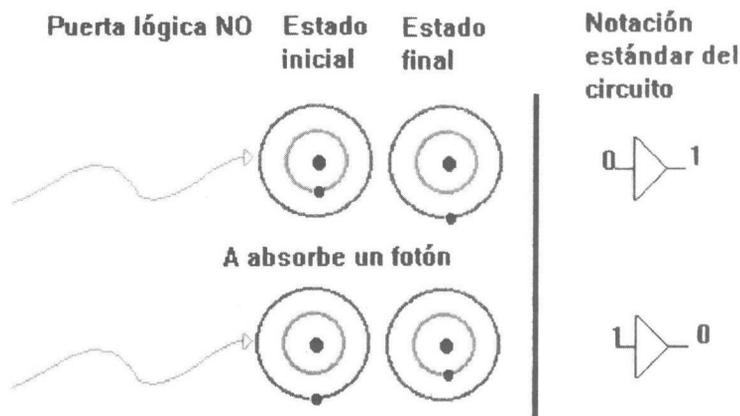


Figura 2a. NO implica algo más que el cambio del bit, tal como la notación de la parte derecha lo muestra: si A es cero, entonces lo cambia a 1 y viceversa. Con los átomos esto puede ser realizado aplicando un pulso de luz cuya energía sea igual a la diferencia entre la energía del estado fundamental de A (con su electrón en el nivel de energía más bajo, en el diagrama lo representa el círculo interior) y la del estado excitado (en el diagrama, el círculo más grande). A diferencia con las puertas lógicas NO convencionales las del tipo cuántico pueden cambiar también parcialmente el bit.

espín del protón en un átomo de hidrógeno.

El espín de una partícula se puede considerar simplemente como la orientación del eje de rotación de la misma con respecto a la dirección de un campo magnético, y al igual que los niveles energéticos, se encuentra cuantizado. La peculiaridad del espín estriba en que sólo puede tomar dos valores, que en este contexto identificamos con los valores uno y cero.

El equipo de investigadores antes mencionado diseñó un sistema tal que el espín protónico cambia si el espín electrónico toma un determinado valor, digamos uno, y no cambia en el otro caso. Estos investigadores denominaron al efecto "doble resonancia", pero si hubieran pensado en términos de la lógica cuántica, considerarían que estaban realizando operaciones sencillas con dos cubits, las cuales permiten concretar los Y, NO y COPIAR.

A través de una nueva técnica perteneciente al campo de la espectroscopía atómica, la denominada "transferencia de estado oscuro en la coherencia Zeeman", se ha llegado a implementar un esquema para que se pueda realizar la lógica cuántica (14). Se denomina Zeeman coherente a un átomo en el cual la función de onda es solamente cero para uno de los componentes del multiplete del estado fundamental (el

cual contiene la estructura fina Zeeman). Esta función de onda puede reasignarse a otro miembro del multiplete si el átomo se expone a dos haces ópticos que acoplan a estos dos niveles del estado fundamental a un estado excitado. En la Figura 3 se representan estos niveles y el diagrama sirve para esquematizar el modo de operación. El funcionamiento se basa en hacer incidir el haz  $B_2$ , el cual deja al sistema

en el estado original 1, pero acopla fuertemente a los estados 2 y 3. Cuando a continuación actúa el haz  $B_1$ , el sistema se transfiere del estado 1 al complejo 2-3, pero, sorprendentemente, debido a la interferencia cuántica la amplitud de la función de onda en el estado 3 siempre permanece pequeña. Entonces, si cesa de actuar  $B_2$ , la función de estado se reduce al estado 2. El apagado de  $B_1$  completa el proceso. Este tipo de espectroscopía posee varias ventajas para ser utilizada como operación básica en la computación cuántica. En efecto, el estado instantáneo siempre es "oscuro", o sea que no puede emitir espontáneamente desde un estado excitado, en la medida en que su densidad de probabilidad de hallarse en el mismo sea muy pequeña. De esta forma, el sistema siempre permanece en un estado cuántico puro. Si uno de los haces  $B_2$  es un modo localizado de cavidad constituido como superposición de estados fotónicos 0 y 1, entonces esta clase de espectroscopía sirve para asimilar tal superposición en la misma combinación de dos subniveles Zeeman. En verdad, esta capacidad de transferencia es la que se ha aprovechado y extendido para resolver el problema más arduo en el diseño de placas lógicas cuánticas.

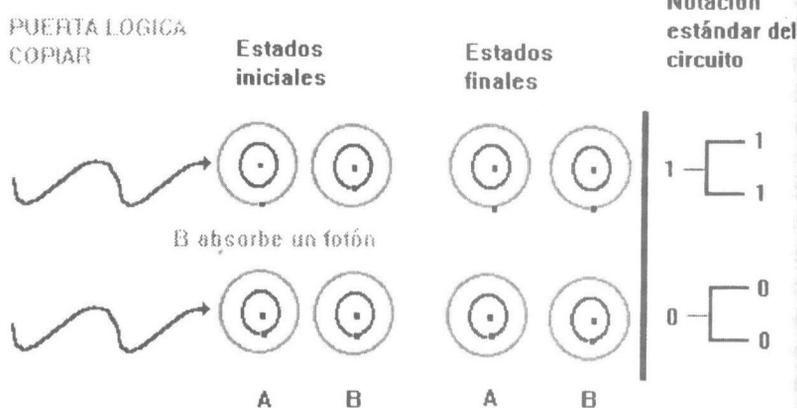
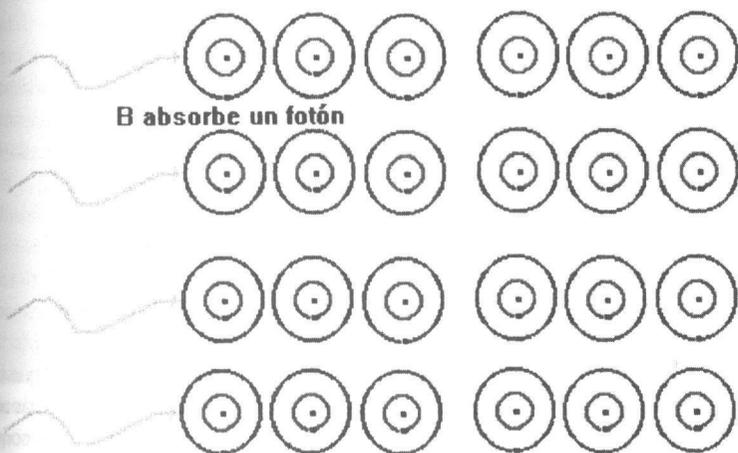


Figura 2b. COPIAR en el mundo cuántico se basa en la interacción entre dos átomos diferentes. Supóngase que un átomo A que almacena 0 ó 1, colocado en la proximidad de otro átomo B en el estado fundamental. La diferencia de energía entre los estados de B adoptará distintos valores según A sea 0 ó 1. Ahora se aplica un pulso de luz cuyos fotones poseen una energía igual a la mayor cantidad ( $A=1$ ). Si el pulso tiene la intensidad y duración apropiadas y si A es 1, B absorberá un fotón e incrementará su energía (primera fila). En cambio, si A es 0, B no puede absorber un fotón del pulso y permanece inalterado (fila interior). En consecuencia, tal como lo muestra el diagrama de la derecha, si A es 1, B se transforma en 1 y si A es 0, B permanece 0.

Puerta lógica  
Y

Estados iniciales

Estados finales



Notación estándar del circuito



el cual modifica la constante dieléctrica efectiva percibida por el segundo fotón. Esto, a su vez, cambia la fase del estado 11 en  $16^\circ$ , mientras que los otros tres estados (00, 01 y 10) permanecen inalterados (18).

Otro grupo de investigadores desarrolló un alambre fotónico consistente en un arreglo de pigmentos con una extensión de  $90 \text{ \AA}$  (19). La absorción de un fotón de luz visible por un cromóforo de entrada en uno de los extremos del arreglo conduce a la emisión de otro fotón en el cromóforo de salida por el extremo opuesto del arreglo. Posteriormente buscaron los métodos apropiados para gatillar la señal de transmisión en este tipo de alambre, permitiendo así que la emisión en la salida pudiera ser generada o restringida de una manera controlada. A través de

esta búsqueda llegaron a sintetizar dispositivos moleculares donde un proceso de transferencia de energía electrónica se dispara selectivamente por la alteración monoeléctrica del estado redox de un pigmento espacialmente aislado en un arreglo de varios de ellos (20). Los compuestos empleados son metaloporfirinas con propiedades fotofísicas y redox predeterminadas, los que constituyen los bloques o unidades de construcción del dispositivo. Esta somera descripción de algunos diseños experimentales de placas lógicas cuánticas de ningún modo agota esta área experimental, ya que al presente se está trabajando activamente en ella y es dable esperar anuncios de nuevos dispositivos que se agreguen a la lista de los ya existentes. Estos nuevos diseños seguramente se concretarán en base a las ideas desarrolladas hasta el presente, así como a sugerencias lanzadas tanto desde el mismo campo experimental como desde el terreno de la especulación teórica.

### POSIBILIDADES DEL DISEÑO EXPERIMENTAL DE UNA COMPUTADORA CUÁNTICA

La computación cuántica es uno de los

INFORMACION CUÁNTICA

Figura 2c. Y también depende de las interacciones atómicas. Imagínes tres átomos A, B y A, los cuales se encuentran próximos entre ellos. La diferencia de energía entre los estados fundamental y excitado de B depende de los estados de los otros dos de A. Supóngase que B se encuentran en el estado fundamental. Ahora aplíquese un pulso de luz cuya energía resulta igual a la diferencia entre los dos estados de B solamente cuando los átomos vecinos A se hallan ambos en 1. Si ambos átomos A se encuentran en 1, entonces este pulso cambiará el estado de B (fila superior) y en cualquier otro caso dicho pulso dejará a B inalterado (restantes filas).

mudar un estado cuántico no perturbado desde un subsistema (un átomo en este caso) a otro.

En otro trabajo reciente (15) se ha demostrado fehacientemente que los primeros estados del ión Berilio que está inserto en una trampa de Paul se pueden acoplar espectroscópicamente a los cuantos vibracionales de los fotones de los iones atrapados. Esta contribución, inspirada en una propuesta totalmente teórica (16), demostró la operación exitosa de una placa cuántica no, la que cambia un cubit condicio-

nalmente en el estado de otro cubit. En un trabajo recientemente publicado (17) se describe un experimento donde se intercambian los roles de los transportadores de información respecto de la descripción anterior. En este caso se emplea el fuerte acoplamiento entre el campo electromagnético y un estado atómico individual para modificar la dinámica cuántica de cada uno de los átomos. El proceso fundamental de emisión espontánea de un fotón por un átomo que se encuentra en un estado excitado, puede ser alterado por medio de la modificación de los estados fotónicos disponibles. Este efecto se puede concretar por medio del confinamiento del fotón en una pequeña cavidad. Se informó que se atrapa al fotón en una cavidad de  $100 \text{ \mu m}$  empleando espejos de reflectividad ultra-alta, representando el uno la presencia del fotón en ella y el cero su ausencia. Una segunda cavidad fotónica de frecuencia distinta constituye el otro cubit. Entonces se hace incidir un haz de átomos de Cesio a través del contenedor de ambas cavidades. Si se encuentra presente el fotón de la primera frecuencia, se excita una transición atómica en un átomo de Cesio,

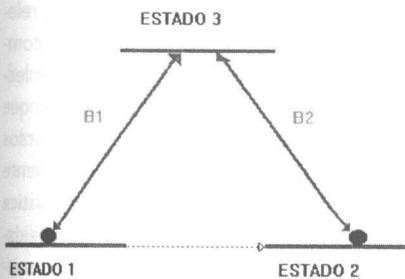


Figura 3. En la espectroscopía del estado oscuro un sistema cuántico pasa del estado 1 al estado 2 por medio de una mezcla con el estado excitado 3 empleando una radiación coherente (modos B1 y B2).

sueños más preciados de todos los científicos e ingenieros que trabajan en el campo de la ciencia computacional (21). El aprovechamiento de la capacidad de un sistema cuántico, tal como un conjunto de átomos que pueden estar en muchos estados energéticos distintos a la vez, podría hacer que una computadora cuántica efectuara un gran número de computaciones al mismo tiempo, ofreciendo así la posibilidad de resolver problemas que las computadoras convencionales no pueden siquiera encarar. Sin embargo, actualmente esta aspiración se encuentra localizada en el campo de las posibilidades. Hasta el presente nadie ha llegado a construir una computadora cuántica y mucho menos programar nada para calcular algo en ella. Inclusive, algunos autores han adoptado una actitud harto cauta, alertando acerca de ciertos optimismos desmesurados (22), mientras que otros llegan prácticamente a negar la posibilidad de que en un futuro medianamente cercano se pueda plasmar el sueño de la computación cuántica (23). Estas críticas son significativas, pues provienen de algunos investigadores que se desempeñan en esta misma área y quienes fundamentan sus juicios en argumentos muy sólidos.

¿Cuáles son las razones básicas que no han permitido hasta el presente la materialización de una computadora cuántica y que al mismo tiempo originan estos juicios negativos?

Hemos visto que la computación cuántica se basa en el empleo de los estados cuánticos, los que en términos generales están constituidos por la superposición de varios otros estados de base (en nuestro ejemplo rudimentario de 0 y 1, estos dos serían precisamente los estados básicos y las distintas combinaciones de ellos conformarían las superposiciones resultantes). La dificultad esencial reside en la notoria fragilidad de estos estados. Esta fragilidad significa que ellos son muy inestables y, en consecuencia, al tener que "manipular" muchos de ellos al mismo tiempo, los sistemas cuánticos son muy vulnerables a errores (24).

Si bien es cierto que la dificultad antes mencionada es muy seria, ello no debe considerarse como una barrera absolu-

tamente infranqueable. En efecto, desde el mismo momento en que se tomó acabada conciencia de ello, se ha venido trabajando arduamente para superar este y otros problemas asociados a la construcción de una computadora cuántica. Como consecuencia de estos emprendimientos ya se han logrado algunos resultados alentadores, tales como la construcción de una sencilla placa lógica (25), varios esquemas para la corrección de errores cuánticos (26, 27) y el diseño de un dispositivo electrónico para enviar un "trit" de información (28, 29). Un trit puede alcanzar tres valores posibles: 0, 1 y 2 y es equivalente a 1,58 bit, siendo propuesto originalmente en 1992 por C. H. Bennett (30, 31).

Asimismo, otros aportes teóricos muy recientes han brindado un impulso de gran estímulo a la investigación y el desarrollo en este terreno. Así, S. Lloyd (32) demostró que uno de los problemas que la computación cuántica puede resolver en forma más eficiente que las computadoras clásicas es la simulación de otros sistemas cuánticos. Ya en 1982, R. Feynman había expresado una conjetura al respecto, afirmando que las computadoras cuánticas podrían llegar a simular otros sistemas cuánticos de una manera más eficaz (10). Otro grupo de investigadores describió e ilustró un esquema para corregir los efectos de la decoherencia y reforzar la evolución coherente en la dinámica de un sistema cuántico para el caso de una computadora cuántica construida en base a las placas del tipo de iones encapsulados en una cavidad (33). También es destacable el aporte de Chuang y col. (34), quienes analizaron el impacto de la decoherencia en el algoritmo cuántico de la factorización. Para comprender mejor la importancia del problema de la factorización debe tenerse en cuenta que la unicidad de la descomposición en factores primos de un número natural constituye el Teorema Fundamental de la Aritmética (35). Desde el punto de vista práctico, la determinación de los factores primos de un número natural puede llegar a constituir un problema realmente difícil, aunque luego su verificación sea un asunto trivial. Y esta asimetría es la que constituye la base de la

moderna criptografía y suministra los códigos secretos que se utilizan en terrenos tan disímiles como la contabilidad y la mensajería diplomática. Finalmente se debe resaltar otra reciente contribución novedosísima de la denominada evolución de la balística cuántica en el diseño de las computadoras cuánticas (36).

Los distintos aspectos aquí señalados acerca de las variadas posibilidades para arribar finalmente al diseño experimental de una computadora cuántica nos muestran que esta área de trabajo se encuentra en pleno desarrollo y que las contribuciones y las propuestas más audaces se suceden sin solución de continuidad. Si bien es cierto que ya se han formulado algunas reservas respecto de la concreción más o menos inmediata de este megaproyecto, ellas no han impedido el notable avance de las investigaciones y los aportes tecnológicos (37). Puede ser significativo destacar que en fecha reciente un consorcio de investigadores de Caltech, el prestigioso Massachusetts Institute of Technology (MIT) y la University of Southern California (USC) han creado el Institute for Quantum Information and Computing (QUIC) en el Caltech (38). El propósito central de este nuevo instituto es el de testear todas estas promesas acerca de la computación cuántica y emprender proyectos conducentes a la fabricación de un equipo de esta clase.

## A MODO DE UNA CONCLUSIÓN ABIERTA

En las páginas precedentes se ha ofrecido una visión lo más amplia posible y destinada a un grupo bastante amplio de lectores, de algunas cuestiones relevantes referidas a la denominada computación cuántica. Seguramente el lector atento habrá podido apreciar que en este terreno se conjugan diversos aspectos, varios de ellos aparentemente contrapuestos, y que esta temática ofrece un enorme campo de posibilidades, las cuales seguramente ni los mismos investigadores involucrados en ella alcanzan a avizorar en su totalidad. Afirmar que la computación constituye hoy día un eje central por el que se cruzan prácticamente todas las actividades

del quehacer humano es casi un lugar común. El tener en cuenta que la mecánica cuántica ha promovido toda una revolución científica a partir de principios de este siglo, con amplias proyecciones sobre diversas áreas del saber humano y del desarrollo tecnológico no es sino reconocer algo sobre lo que se ha venido insistiendo constantemente. El saber sobre los últimos aportes de la espectroscopía atómica y molecular así como el impresionante avance de las distintas nanotecnologías y el manipuleo a nivel casi individual de los átomos y las moléculas en diferentes sistemas fisicoquímicos ofrece la espectacular oportunidad de asombrarse con resultados concretos en cuanto al comportamiento y las propiedades de la materia. Y finalmente, al considerar todo el potencial que contiene la inteligencia y las habilidades manipulativas de los científicos y los técnicos, uno puede asegurar casi con certeza total que no hay cuestión que no se pueda encarar y resolver, en tanto ella sea resoluble y viable.

Entonces ¿qué podemos esperar del avance y los desarrollos en el estudio y la aplicación de un tema donde las especialidades y las capacidades antes citadas constituyen sus componentes principales? Seguramente el lector interesado en este tema podrá sacar sus propias conclusiones.

Es cierto que existen ciertas reservas y aún objeciones justificadas acerca del éxito futuro de la computación cuántica, cosa que hemos destacado previamente. Estas dudas se centran no tanto en la posibilidad de resolver inconvenientes técnicos sino en el hecho de que tales soluciones sean viables. Básicamente, este aspecto está asociado al problema del procesamiento de la información que requiere que las interacciones entre los transportadores de la información sean controladas y coherentes, por lo menos en el lapso que media entre la preparación inicial y las medidas finales. Algunos avances recientes en el enfriamiento láser y el aislamiento térmico, reflejados, por ejemplo, en la obtención de un condensado gaseoso de Bose-Einstein (39), sugieren que sería posible el mantenimiento de una interacción mínima de la computa-

dora cuántica con el entorno y lo suficientemente extendida en el tiempo como para al menos llegar a efectuar algunos pasos de un procesamiento cuántico coherente sobre algunos pocos cubits de información. Aunque de momento se debe destacar que en lo inmediato se llegue a construir una computadora cuántica de alcances amplios, mucho es lo que se podría llegar a hacer con un equipo mínimo de trabajo computacional a nivel cuántico. Por ejemplo, se podrían estudiar efectos que son de gran significado científico, tal como las medidas de Bell (40), que podrían ser implementadas en la teleportación cuántica (30), por medio de la cual un estado cuántico desconocido puede ser transportado a una localización remota. A un nivel de unos 10 cubits, una computadora cuántica es capaz de realizar el codificado cuántico de Schumacher (13), el cual sería de gran interés en la implementación de una criptografía cuántica eficiente. Y quizás, con la disponibilidad de unos 100 cubits, una computadora cuántica llegue a constituir un duplicador eficiente de un conector criptográfico cuántico ruidoso (o sea, parcialmente decoherente). Su aplicación podría permitir la creación de pares de Einstein-Podolsky-Rosen (30) en localizaciones muy remotas, lo cual, a su vez, permitiría efectuar nuevas y muy exigentes pruebas acerca de la validez de la teoría cuántica.

A modo de cierre, creo necesario expresar que aunque la tan ansiada materialización de la "computadora cuántica personal" no llegue a concretarse en la próxima década, todos los esfuerzos realizados y en vías de concreción merecen la pena, ya que es mucho lo que se ha avanzado en el estudio y el desarrollo de la computación cuántica (41) y que ha permitido un conocimiento más profundo e interrelacionado de los principios fundamentales de la teoría cuántica, la teoría de la información, la espectroscopía atómica y molecular, así como las incipientes pero poderosas nanotecnologías. Sin duda alguna son muchas las sorpresas que nos deparará el futuro en este terreno y seguramente varias de ellas ya se habrán producido al momento de que el lector tome contacto con este artículo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- 1- R. Landauer, Ber. Bunsenges Phys. Chem. 80 (1976) 1048
- 2- C. Bennett, IBM J. Res. Dev. 17 (1973) 525
- 3- P. Benioff, Phys. Rev. Lett. 48 (1982) 1581
- 4- D. Deutsch, Proc. R. Soc. London 400<sup>a</sup> (1985) 97
- 5- P. Benioff, J. Stat. Phys. 29 (1982) 515
- 6- W. H. Zurek, Phys. Rev. Lett. 53 (1984) 391
- 7- A. Peres, Phys. Rev. A 32 (1985) 3266
- 8- N. Margolus, Ann. N.Y. Acad. Sci. 480 (1986) 487
- 9- G. J. Milburn, Phys. Rev. Lett. 62 (1989) 2124
- 10- R. Feynman, Opt. News 11 (1985) 11
- 11- D. P. Di Vincenzo, Science 270 (1995) 255
- 12- S. Lloyd, Scient. Am. 273 (1995) 140
- 13- B. Schumacher, Phys. Rev. A 51 (1995) 2738
- 14- C. H. Bennett y D. P. Di Vincenzo, Nature 377 (1995) 3889
- 15- C. Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King, W. M. Itano y D. Jo. Wineland, Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 4714
- 16- J. Y. Cirac y P. Zoller, Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 4091
- 17- Q. Turchette y J. Kimble, Phys. Rev. Lett. 75 (1995) 4710
- 18- B. Schwarzschild, Physics Today, March 1996, 21
- 19- R. W. Wagner, J. S. Lindsey, J. Am. Chem. Soc. 116 (1994) 9759
- 20- R. W. Wagner, J. S. Lindsey, J. Seth, V. Palaniappan y D. F. Bocian, J. Am. Chem. Soc. 118 (1996) 3996
- 21- B. Cibra, Science 272 (1996) 199
- 22- R. Landauer, Phil. Trans. R. Soc. London 353<sup>a</sup> (1995) 367
- 23- S. Haroche y J. M. Raimond, Physics Today, August 1996, 51
- 24- A. Barenco, Contemp. Phys. 37 (1996) 375
- 25- D. Di Vincenzo, Physics World, March 1996, 27
- 26- P. Shor, Phys. Rev. A 54 (1996) 1098
- 27- A. Steane, Phys. Rev. Lett. 77 (1996) 793
- 28- K. Mattle, Phys. Rev. Lett. 76 (1996) 4656
- 29- B. Huttner, Physics World, October 1996, 20
- 30- C. H. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres y W. K. Wootters, Phys. Rev. Lett. 70 (1993) 1855
- 31- C. H. Bennett y S. J. Wiesner, Phys. Rev. Lett. 69 (1992) 2881
- 32- S. Lloyd, Science 273 (1996) 1073
- 33- J. Y. Cirac, T. Pellizzari y P. Zoller, Science 273 (1996) 1207
- 34- Y. L. Chuang, R. Laflamme, P. W. Shor y W. H. Zurek, Science 270 (1995) 1633
- 35- R. Graham, D. E. Knuth y O. Patashnik, Concrete Mathematics, Addison-Wesley, Reading, MA, 1994
- 36- P. Benioff, Phys. Rev. A 54 (1996) 1106
- 37- M. Plenio, V. Vedral y P. Knight, Physics World, October 1996, 19
- 38- G. Taubes, Science 273 (1996) 1164
- 39- Physics Today, August 1995, p. 17
- 40- A. Barenco, D. Deutsch, A. Ekert y R. Jozsa, Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 4083
- 41- La Recherche, Mars 1996, p. 14