
Este trabajo, pretende poner en valor la estrecha interrelación que existe entre la computación cuántica y las tecnologías habilitadoras clave y el círculo virtuoso que puede establecerse entre ambas. En efecto, las tecnologías habilitadoras clave contribuyen al desarrollo de la computación cuántica y a su vez los computadores cuánticos permitirán el desarrollo de las tecnologías habilitadoras clave. Una de las principales aplicaciones de la computación cuántica es en la simulación de sistemas complejos, p.ej. en ámbitos como la biotecnología o los materiales avanzados, en los cuales se trabaja a nivel de átomos y moléculas. La computación cuántica está basada en estos mismos principios por lo que hace a los computadores cuánticos mucho más apropiados que los computadores clásicos para simular estos sistemas. En palabras de Richard Feynman, la realidad no es clásica sino cuántica y para simularla es mucho mejor utilizar computadores cuánticos.

COMPUTACIÓN CUÁNTICA: INTERRELACIÓN CON LAS TECNOLOGÍAS HABILITADORAS CLAVE

Las *Key Enabling Technologies* (KET's) son también las tecnologías habilitadoras del desarrollo y construcción de computadores cuánticos. Sin embargo, en el caso de la computación cuántica, se produce un efecto de retroalimentación positiva entre la computación cuántica y las tecnologías habilitadoras clave. Tal y como explicaba Richard Feynman en su artículo "Simulando la física con los computadores", la realidad no es clásica sino cuántica y para simularla, es mejor hacerlo mediante computadores cuánticos, sugiriendo que una de las principales aplicaciones de la computación cuántica consistiría en simular la naturaleza misma: átomos, moléculas y materiales. De hecho, las leyes clásicas no son aplicables a las moléculas porque las partículas atómicas siguen otras leyes diferentes, las de la física cuántica. Este hecho, confiere una importancia todavía mayor a la computación cuántica que la que se derivaría solamente de su innata capacidad de proceso paralelo y, por lo tanto, de su velocidad de proceso, mucho mayor que la de los más modernos supercomputadores actuales. Un procesador actual (1) funciona a unos 10 teraflops, unidad de medida que equivale a un billón de operaciones de cálculo por segundo, y esta marca puede ser alcanzada con un computador cuántico de sólo 30 *qubits*.

La nanoelectrónica, la fotónica y la nanotecnología, son las tres tecnologías relacionadas con la física cuántica, que a su vez son tecnologías habilitadoras clave y que permiten el desarrollo de la computación cuántica y en última instancia, permiten la construcción de computadores cuánticos. A su vez, la computación cuántica contribuirá de

una forma decisiva al desarrollo de dos de las otras tres tecnologías habilitadoras clave: la biotecnología industrial y los materiales avanzados. Además, la computación cuántica, contribuirá al desarrollo de otros ámbitos tecnológicos de creciente relevancia actualmente, como p.ej. la Inteligencia Artificial. El presente trabajo, pretende abordar los principales desafíos que habrá que abordar para la construcción de computadores cuánticos y, en definitiva, los retos que habrá que superar desde la transformación digital, todavía en proceso, hasta la transformación cuántica, lo que supondrá finalmente, el paso progresivo desde una economía digital hacia una economía cuántica, que no se hará plenamente efectiva, hasta que los dispositivos cuánticos lleguen al mercado de consumo de la misma forma que lo hicieron los dispositivos digitales: ordenadores personales, *smartphones*, etc.

El desarrollo de la computación cuántica supone uno de los retos científicos y tecnológicos más grandes en la actualidad que conlleva la necesidad de avances en tecnologías habilitadoras clave como la nanoelectrónica, la fotónica y la nanotecnología. Estas tecnologías son igualmente, tecnologías habilitadoras de empleo de alto valor añadido. Además, el desarrollo de la computación cuántica habilitará a su vez la creación de empleos de alto valor añadido en campos como la biotecnología industrial y los materiales avanzados que necesitan técnicas que permitan la simulación de sistemas complejos. Igualmente, se verán beneficiadas la inteligencia artificial y la neurociencia, entre otros muchos ámbitos que serán generadores de empleo de alto valor añadido.

Incluso, el efecto en el empleo de los sistemas de fabricación avanzada y por lo tanto de la robótica y de la automatización es discutible. Se destruirán muchos puestos de trabajo de poco valor añadido y el trabajo manual desaparecerá en gran medida, sin embargo, se crearán otros puestos de trabajo de más valor añadido y relacionados con la tecnología. Los puestos de trabajo del futuro, no se conocen con certeza, pero lo que parece claro es que la formación de calidad en disciplinas STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas) será fundamental.

CUESTIONES FUNDAMENTALES

Gran parte de la ciencia de la información, clásica y cuántica, puede resumirse analizando variantes de una pregunta básica. ¿Qué cantidad de un recurso de información se necesita para realizar una determinada tarea de procesamiento de información? Por ejemplo: "¿Cuántos pasos computacionales se exigen para encontrar los factores primos de un número de 300 dígitos? El mejor algoritmo clásico conocido precisaría de unos 5×10^{24} pasos, unos 150.000 años a velocidades de Terahertz. Aprovechando los innumerables estados cuánticos, un algoritmo cuántico de factorización necesitaría sólo 5×10^{10} pasos, menos de un segundo a velocidades de Terahertz. (2)

Cuando se produzca la supremacía cuántica, esto es, cuando los computadores cuánticos sean capaces de resolver problemas que los computadores clásicos no son capaces, la computación cuántica permitirá la simulación de sistemas complejos en ámbitos como la biotecnología y los materiales avanzados, donde el comportamiento de las moléculas resulta muy difícil de modelizar con computadores clásicos porque su dinámica responde a fenómenos cuánticos, permitiendo también la simulación del funcionamiento del propio cerebro humano y será también entonces, una herramienta fundamental en el desarrollo de la neurociencia, así como en la simulación de modelos cosmológicos, que no resultan abordables de otra forma. En definitiva, los sistemas de computación cuántica podrían superar algún día a los computadores clásicos, sobre todo en lo referente a la simulación de sistemas ya que los computadores cuánticos comparten su naturaleza cuántica con los sistemas que tratan de simular por lo que poseen una ventaja intrínseca a la hora de simularlos. (3)

Pero, desde el otro punto de vista y también muy importante, los computadores cuánticos permitirán diseñar y posteriormente fabricar componentes que a su vez se utilizarán en computación cuántica, mejorando las prestaciones de los componentes cuánticos que implementarán los *qubits*, reduciendo su tasa de errores y permitiendo a su vez construir computadores cuánticos más perfeccionados que ayudarán a su vez el progreso de las propias tecnologías habilitadoras clave, permitiendo construir materiales con mayores prestaciones con aplicaciones decisivas en salud, en energía y en nanoelectrónica entre

otras aplicaciones. Se establece de esta forma un círculo virtuoso entre la computación cuántica y las tecnologías habilitadoras clave, y entre estas con la propia computación cuántica.

Sin embargo, otro punto fundamental que se quiere mencionar, es que no hace falta ser una gran empresa de las que se han mencionado anteriormente ni una *start-up* de componentes cuánticos para poder beneficiarse de las ventajas de la computación cuántica. Como sucedió con la computación clásica, todo tipo de empresas y sectores podrán beneficiarse en modo *Software as a Service* (SaaS) y muy particularmente todas aquellas empresas que trabajen en ámbitos relacionados con la biotecnología, la química, el desarrollo de nuevos materiales y el desarrollo de fármacos. Cualquier procedimiento industrial que necesite el conocimiento de la materia a nivel de átomos y moléculas se verá especialmente beneficiado. Para otro tipo de diseños, que no involucren el conocimiento de la materia a nivel molecular, la computación clásica, con arquitecturas paralelas sobre las que implementar y ejecutar el método de elementos finitos permitiría trabajar con precisión suficiente. Además, hay otro aspecto muy importante de la computación cuántica, las simulaciones podrán hacerse también de una forma mucho más veloz que en el caso de la computación clásica, pudiéndose resolver problemas relacionados con la meteorología, el clima, la factorización de números primos muy grandes en segundos, cuando antes, con la computación clásica, incluso con los más modernos supercomputadores, se requerían días, semanas, años o incluso siglos.

Se realizarán también unas consideraciones sobre las tres tecnologías habilitadoras clave en el desarrollo de los computadores cuánticos y su papel en el desarrollo de la computación cuántica: la nanoelectrónica, la fotónica y la nanotecnología. Los materiales avanzados son otra tecnología habilitadora clave para la construcción de computadores cuánticos habida cuenta de que se están buscando materiales más allá del silicio que garanticen a escalas por debajo de los 5 nm, el cumplimiento de la ley de Moore. Además, como se verá, es bien conocido que la futura disponibilidad de computadores cuánticos influirá, a su vez, de una forma decisiva en el desarrollo de las propias tecnologías habilitadoras clave, en concreto en el desarrollo de la biotecnología, de los propios materiales avanzados y de la fabricación avanzada. En efecto, las posibles aplicaciones de la computación cuántica en campos como la simulación de sistemas complejos, la inteligencia artificial y la criptografía cuántica exceden con mucho las posibilidades de la computación clásica y repercutirán de una forma decisiva en el progreso tecnológico dando lugar a una nueva economía cuántica con repercusiones importantes en la creación de nuevos puestos de trabajo de alto valor añadido.

Según diversas fuentes consultadas, las aplicaciones de la física cuántica suponen actualmente entre un

30% y un 50% del PIB de los países desarrollados, pero resulta claro que el desarrollo de los nuevos computadores cuánticos y de las nuevas redes de computación cuántica, supondrían el marco para la creación de una nueva economía cuántica, con una contribución al PIB aún mayor. Actualmente existen diferentes enfoques en todo el mundo, en la carrera para fabricar *qubits*. Estos incluyen trampas de iones, bucles superconductores, vacantes de diamantes y *qubits* topológicos. Pero el diseño de la Universidad de Nueva Gales del Sur (UNSW, Australia) se basa en lo que se conoce como *qubits* de espín de silicio. A diferencia de otros conceptos, este enfoque imita los dispositivos de estado sólido que ya se están produciendo para computadoras en la actualidad, lo que significa que el diseño de UNSW se puede crear utilizando procesos y componentes estándar de la industria.

NANOELECTRÓNICA

Dentro de la línea *Beyond CMOS* de la micro y nanoelectrónica, sería necesario explorar la posibilidad de utilizar nanotubos de carbono, grafeno, nanocables, puntos cuánticos, el transistor de un único electrón y la espintrónica como objetos cuánticos capaces de implementar *qubits*. El grafeno y los nanotubos de carbono incluidos en la línea *Beyond CMOS* de la micro y nanoelectrónica son 2 de las doce tecnologías o materiales disruptivos en *hardware* para extender la ley de Moore.

MATERIALES AVANZADOS

Se trataría de describir cuáles serían las contribuciones de los materiales avanzados en el desarrollo de la computación cuántica y en la comunicación cuántica, así como, por otra parte, la simulación de materiales avanzados mediante la computación cuántica que es otra línea de futuro. La computación cuántica permitiría entender como la configuración microscópica de un material se corresponde con sus propiedades a gran escala.

Así la siguiente beneficiada por la aparición de los computadores cuánticos, sería la ciencia de materiales. Esta disciplina se ocupa de entender las propiedades de la materia a partir de su constitución molecular. Se trata de un área de conocimiento eminentemente cuántica, que trabaja con un gran número de átomos o de moléculas en interacción mutua. Los metales, por ejemplo, son maleables y reflejan la luz porque los electrones son compartidos por la totalidad de sus átomos.

De especial importancia, son los semiconductores, materiales a caballo entre un conductor de la electricidad y un aislante, que forman la base de la tecnología electrónica. No podrían entenderse de no ser por la física cuántica, que da cuenta de su comportamiento en base a una estructura de bandas en las que algunos electrones pueden pasar a

estados excitados si reciben energía, dando lugar a algo que parece un conductor a la temperatura adecuada.

La física cuántica facilitaría la creación de máquinas basadas en materiales inteligentes cuánticos. Un material inteligente clásico es aquel del que se pueden controlar sus propiedades mediante una red de sensores y procesadores distribuidos por toda su extensión. Estos sensores se encargan de recabar información sobre el ambiente en que se hallan, dando instrucciones a su entorno para que se comporten de una u otra forma. Así, se puede tener un cristal que, p.ej., se vuelva opaco cuando la temperatura de la sala en la que se encuentra llega a un cierto valor, o estructuras que se reparen a sí mismas. En el caso de los materiales inteligentes cuánticos, lo que se modificará serán las propiedades cuánticas del material: sin embargo, en este caso, los sensores no se podrán dedicar a medirlas porque en física cuántica la medida cambia el estado. Así que, si se quiere poder manipular esas propiedades, será necesario un computador cuántico que pueda operar con su ambiente como si fuera un estado completo, sin perturbarlo al realizar una medida. En un material inteligente cuántico, los procesadores actuarán sobre el estado completo del material, que será una superposición.

¿Para qué serviría todo esto? Un artículo de 2013 de los físicos Tad Hogg y J. Geoffrey Chase propuso varias aplicaciones. Una de ellas sería lo que dan en llamar camuflaje activo: un material que pudiese ajustar su color, dependiendo de la luz que recibiese. De hecho, se podría diseñar de forma que cada pequeña parte hiciese lo propio, consiguiendo así un vestido que sería indistinguible de su entorno. Otra serían materiales que podrían cambiar sus propiedades mecánicas, por ejemplo, para aislar a la persona u objeto del ruido o del calor. También se podría cambiar el grado de dureza o de ductilidad de un objeto haciéndolo más o menos maleable según fuera necesario.

Además de los materiales inteligentes, la computación cuántica también haría posible una mejor comprensión de comportamientos de raíz cuántica como la superconductividad. Esta se da en ciertas sustancias cuando los electrones se juntan en pares, llamados pares de Cooper, y pasan a comportarse como una unidad. Un superconductor se distingue por tener una resistencia eléctrica nula, lo que significa que puede transmitir electricidad sin pérdidas. El problema de los superconductores es que todos los que se conocen funcionan solo a temperaturas muy bajas, lo que les hace inviables como materiales de construcción: fabricar, p.ej., cables eléctricos con un material superconductor sería prohibitivamente caro, porque habría que mantenerlos refrigerados en todo momento. El reto es dar con la forma de fabricar un superconductor que opere a temperatura ambiente. La aparente quimera puede estar más cerca de lo que creemos: de momento,

se conocen ya varios ejemplos de superconductores a temperaturas relativamente altas, con un valor máximo de $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ que, a pesar de ser muy frío está a doscientos grados por encima del cero absoluto ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$). No es inconcebible que, en un futuro, se logre fabricar un conductor apto para temperaturas aún más altas. Para ello, el computador cuántico sería fundamental: su poder para simular sistemas cuánticos permitiría probar cientos o miles de combinaciones con distintos materiales, sin tener que pasar por el laboratorio, donde generar un candidato a superconductor es un proceso laborioso y costoso. Tras el proceso de ensayos virtuales, una vez obtenido el diseño preciso solo faltaría proceder a su síntesis física. Un superconductor a temperatura ambiente revolucionaría los sistemas de transmisión de energía, porque haría posible un transporte sin pérdidas. No sería la única aplicación: un material de estas características sería capaz de crear un campo magnético exactamente igual al que se le aplica, pero en la dirección opuesta, lo que constituye el principio de funcionamiento de los trenes de levitación magnética, que se convertirían en la forma más barata y eficiente de transportar a personas si no hiciese falta refrigerar su suelo, hecho de un material superconductor. Hay un futuro prometedor para los materiales basados en la física cuántica, que serán capaces de realizar todo tipo de funciones que en estos momentos suenan como ciencia ficción: su llegada está solo pendiente del desarrollo del primer computador cuántico.

BIOTECNOLOGÍA INDUSTRIAL

Las aplicaciones que tendrá la computación cuántica en la simulación de reacciones químicas y en el desarrollo de nuevos fármacos contribuirán de una forma importante al desarrollo de la biotecnología industrial.

La Biotecnología se define como el uso de organismos vivos o partes de ellos (estructuras subcelulares, moléculas) para la producción de bienes y servicios. En esta definición se encuadran actividades que el hombre ha venido desarrollando durante miles de años, como la producción de alimentos fermentados (pan, yogurt, vinos, cerveza, etc.). La Biotecnología Moderna es aquella que, contemplando la definición anterior, hace uso y dominio de la información genética. El nacimiento de la ingeniería genética a principios de la década de los setenta sentó las bases de esta nueva actividad. Esto permitió transferir genes (información genética) de una especie a otra y por lo tanto 'programar' organismos vivos para que realicen un sinnúmero de tareas específicas en la producción industrial.

La Biotecnología Industrial es la biotecnología aplicada en la industria. Está basada en la ejecución de procesos industriales utilizando organismos biológicos y sus procesos fisiológicos. De esta manera se logran nuevos productos y procesos, más económicos y con menor impacto ambiental.

- Es una tecnología multidisciplinar ya que integra la bioquímica, la microbiología y la biología molecular con la química, la matemática, la informática y las tecnologías de proceso.
- Es aplicable en diversos sectores industriales como la industria química, textil, alimentación, energía, farmacéutica, agroindustria, producción de materiales, etc.
- Genera constantes innovaciones en productos y procesos.
- Ofrece beneficios ambientales considerables tanto por la obtención de procesos industriales más limpios como por el uso de biotecnologías para la solución de problemas de contaminación.
- Demanda recursos humanos cualificados (científicos, ingenieros, gerentes, abogados, gestión).
- Requiere de regulaciones específicas ligadas a temas sociales, éticos y de percepción pública.

En el ámbito de la Biotecnología industrial son frecuentes tanto las patentes de proceso como las patentes de producto de ahí que sea necesario un marco adecuado en cuanto a derechos de propiedad industrial e intelectual. La tecnología de ADN recombinante es una poderosa herramienta que ha sido y será empleada en muchos campos de la biotecnología.

La Biotecnología industrial es el paradigma de tecnología en el que el *scale-up* se encuentra claramente diferenciado, desde el laboratorio, pasando por planta o instalaciones piloto hasta llegar a las instalaciones industriales. En definitiva, una vez conseguido el proceso en el laboratorio, es necesario su escalado que habitualmente se realiza en plantas piloto o en equipamiento de pequeño volumen en las plantas de fabricación. Se procede entonces a la puesta en marcha de los procesos en las instalaciones industriales lo que normalmente obliga a la realización de varios lotes industriales para comprobar que se obtienen los rendimientos y la calidad requeridos hasta llegar a conseguir de forma adecuada el *know-how* del proceso.

La optimización de los procesos industriales dura prácticamente toda la vida de los mismos, debido a la competencia de otras empresas que obliga a reducciones continuas de costes y a exigencias cada vez más elevadas en la calidad de los productos, ya sea por exigencias del mercado o de las autoridades sanitarias de los diversos países.

A nivel de laboratorio, el equipamiento comúnmente necesario incluye cromatografía de líquidos y de gases, espectrofotometría UV y espectrofotometría IR.

FOTÓNICA

Lo realmente interesante en este apartado, es describir cuáles serían las contribuciones de la fotónica

en el desarrollo de la computación cuántica y en la comunicación cuántica.

La comunicación cuántica envía información de un sitio a otro de tal forma que nadie la puede leer, ya que se envía en superposición. Si alguien intenta leer ese mensaje colapsa la información. El primer experimento de comunicación cuántica se hizo en el año 1992 y era posible transmitir un bit/s a una distancia de 12 cm.

La primera idea que ha de tenerse en cuenta para implementar un computador cuántico es usar fotones como *qubits*. En particular, a diferencia de la mayoría de los otros *qubits*, los fotones no sufren decoherencia y es posible utilizar circuitos lineales para realizar la computación cuántica. El principal material en investigación sigue siendo el silicio por su versatilidad y escalabilidad, aunque la integración basada en semiconductores III-IV está cada vez más consolidada, especialmente para la generación de pares de fotones entrelazados. Los fotones son fáciles de obtener y de manipular: cualquier objeto emite luz y, además, se puede asegurar que sea coherente utilizando un láser. Los aparatos para manipular la luz son conocidos desde hace siglos: espejos, lentes y vidrios en los que la luz se refleja parcialmente. Una combinación ingeniosa de estos elementos constituye un serio candidato a computador cuántico. En un computador cuántico óptico, un *qubit* se representa por la presencia o ausencia de un fotón. En particular, si no hay fotón alguno se tiene un $|0\rangle$, mientras que si hay un fotón, se tiene el estado $|1\rangle$. ¿Se puede lograr una superposición de ambos? La respuesta es afirmativa: primero, se necesita un láser que produzca luz coherente de una determinada longitud de onda; luego, se toma esta luz y se la atenúa, de forma que al final quede solo un fotón o ninguno. Si no se mide la luz, esta se hará de hecho en una combinación de ambos estados, es decir, su valor será $|0\rangle + |1\rangle$. Así pues, la presencia o ausencia de un solo fotón constituye un *qubit* en toda regla. Una vez se dispone de un *qubit*, lo siguiente que hay que hacer es encontrar una forma de manipularlo. Para ello, son necesarios elementos que permitan construir puertas lógicas. En el caso de la manipulación de la luz, se pueden construir a base de tres dispositivos: espejos, cambiadores de fase y divisores de haz. Un cambiador de fase no es nada más que un cristal de un cierto grosor. Cuando la luz viaja a través del mismo, lo hace más lentamente que en el vacío, lo que ocasiona que sufra un ligero retraso respecto a cómo habría evolucionado fuera del cambiador.

Los cambiadores de fase permiten manipular un solo *qubit* para que interfiera con el resto según deseemos. Esto es de gran utilidad, por ejemplo, en aplicaciones como la transformada cuántica de Fourier. Supongamos que se tiene un *qubit* que se ha dividido en dos, de forma que ambas partes se encuentran en fase: en este caso, se tiene interferencia constructiva, es decir, sus probabilidades se

suman. Si ahora se pasa una de las partes por un cambiador de fase, es posible hacer que las crestas del primero coincidan con los valles del segundo, teniendo ahora interferencia destructiva, que hace que la probabilidad de detección en ese estado sea cero. Los divisores de haz son dispositivos que se utilizan para dividir un haz de luz en dos. La idea es bastante sencilla: se toman dos prismas y se unen, poniendo entre ellos una superficie semirreflectante. En un divisor de haz, la luz entra por la parte descubierta del prisma hasta llegar a la superficie semirreflectante, que deja pasar solo parte de la luz, mientras que la otra se refleja y es emitida en una dirección perpendicular a la primera. La fracción que se transmite depende del material utilizado, así como de su cantidad, y se puede adaptar a unas necesidades específicas. Si, como en el caso del ejemplo, se tiene un solo fotón, esto significa que tras el paso por el divisor se obtiene una superposición de dos estados, uno reflejado y otro que pasará a través de la superficie reflectante. Utilizando otros componentes como espejos, se puede manipular esos dos haces para hacer que interfieran entre sí, realizando así las computaciones necesarias.

La combinación de un divisor de haz y un cambiador de fase se pueden utilizar para crear una puerta de Hadamard, uno de los componentes esenciales para obtener un conjunto universal de puertas cuánticas. La otra puerta necesaria, el no controlado, que se construye añadiendo a los dos elementos mencionados un medio de Kerr. Recordemos que, al cambiar de medio, la luz cambia de velocidad. En un medio de Kerr, ese cambio depende no solo del medio, sino de la intensidad de luz que pasa por él: si, por ejemplo, en lugar de un fotón pasan dos, la luz se verá más frenada que en el caso de uno solo. Esta capacidad permite construir dispositivos que actúen de forma distinta sobre estados con distintos números de fotones, y es clave para fabricar un dispositivo que permite la interacción entre dos *qubits*, lo cual es esencial para fabricar un no controlado, cuya salida depende de varios *qubits* a la vez. Un computador que se limitase a modificar los *qubits* individualmente no sería muy útil, porque no podría explotar el entrelazamiento cuántico. Así pues, los medios de Kerr son un componente fundamental de los computadores cuánticos ópticos. Al contrario de lo que pueda parecer, los medios de Kerr son bastante comunes: el agua con azúcar disuelto, por ejemplo, tiene propiedades de este tipo. El problema es que estos medios suelen no solo cambiar la fase de la luz que los atraviesa, sino también absorber una parte. Esto significa que hay que limitarse a láminas muy finas para evitar perder una fracción sustancial de fotones, lo que hace inviable la construcción de una puerta de no controlado y repercute negativamente en la posibilidad de ensamblar un computador cuántico basado en fotones. La imposibilidad de construir medios de Kerr con las propiedades adecuadas hace que, de momento, los computadores cuánticos ópticos no sean una alternativa viable. Algo parecido sucedió con los computadores clá-

sicos: a pesar de que los fotones se consideraron durante un tiempo un gran candidato para sustituir a los electrones, dada la rapidez y eficiencia energética de su transmisión, nunca llegaron a cumplir su promesa debido a la falta de dispositivos ópticos que fueran capaces de hacer que dos fotones interactuasen. En términos de los criterios de DiVincenzo, los sistemas fotónicos fallan por la imposibilidad de construir un conjunto de puertas universales, lo que les quita toda utilidad como procesadores de información. Es muy probable, sin embargo, que los fotones acaben por jugar un papel fundamental en la computación cuántica del futuro, si no *qubits*, sí como transmisores de información entre dos computadores lejanos, utilizando técnicas como el teletransporte (4).

NANOTECNOLOGÍA

La nanotecnología es la tecnología que posibilita el control de la materia a escala atómica. Muchas de las propiedades físicas que ocurren a escala macro se modifican drásticamente cuando se alcanzan estas minúsculas escalas. Con respecto a la nanotecnología, es una tecnología más amplia y de mayor aplicación que la nanoelectrónica. Podría decirse que la nanoelectrónica es un subconjunto de la nanotecnología, ya que la nanoelectrónica podría definirse como la nanotecnología aplicada al diseño y construcción de dispositivos electrónicos a escala nanométrica. La nanotecnología resulta de aplicación en electrónica, en medicina, en construcción, en energía... sus campos de aplicación son por lo tanto transversales. La nanomedicina es la aplicación de la nanotecnología en el ámbito de la medicina, así como la nanoelectrónica es la aplicación de la nanotecnología en el ámbito de la electrónica.

SISTEMAS DE FABRICACIÓN AVANZADOS E INDUSTRIA 4.0

Los sistemas avanzados de fabricación se integran en lo que actualmente se denomina Industria 4.0 ya que estos sistemas habilitan las fábricas inteligentes o *Smart Factories*. En su versión más avanzada una *Smart Factory* sería una *Cloud Factory* y por lo tanto podría llegar a ser gestionable desde cualquier dispositivo con conexión a Internet. *Cloud Factory* hace referencia a que si los sistemas SCADA que monitorizan y controlan los sistemas productivos se alojan de forma segura en la nube, la fábrica podría ser monitorizada y controlada de forma remota, incluso en movilidad, si se dispusiese de los dispositivos e interfaces gráficos adecuados. Además, los sistemas de gestión de una empresa (ERPs, CRMs, etc.) pueden también migrarse a la nube, haciendo entonces que el paradigma de acceso a la información: *any time, any place, any device*, sea aplicable a la gestión integral de una empresa.

En general, todas las Tecnologías Habilitadoras Clave pueden considerarse creadoras de empleo de

alto valor añadido. Cuando no se pueden utilizar robots se crean puestos de trabajo para personas, y en sistemas de fabricación avanzados es el punto más discutible ya que la fabricación avanzada se basa precisamente en líneas automatizadas y robotizadas. Pero, se necesitan biólogos, químicos para la biotecnología industrial, ingenieros de materiales para los materiales avanzados, pero, aunque para los sistemas de fabricación avanzados se necesitan robots, la cuestión es quién construye esos sistemas de fabricación avanzados, por lo que es necesario dotarse de los medios oportunos, pudiendo recurrir a la subcontratación.

La computación cuántica permitirá la fabricación de objetos cuya fabricación actualmente es imposible. El imparable crecimiento de las tecnologías ha llevado a la población a un profundo pesimismo tecnológico y ha creado una alarma social ante el futuro automatizado. Pero el temor a que las nuevas tendencias sean las causantes del desempleo no es algo nuevo, ya lo vivió nuestra sociedad tiempo atrás con la llegada de nuevas fuentes de energía o nuevos sistemas de transporte y comunicación. Ahora se habla de la cuarta revolución industrial, la evolución del futuro focalizada en completar nuestras capacidades intelectuales en las relaciones laborales y sociales. "Es un cambio tecnológico que viene después de la computerización –que sería la tercera revolución que hubo entre los años 70 y 90– pero ésta va más lejos y reincide en la automatización con una nueva generación de robots que son capaces de hacer más cosas gracias al desarrollo de las tecnologías". Con estas palabras define Manuel Hidalgo la industria 4.0, economista y autor del libro "El empleo del futuro" en el que analiza el impacto de las nuevas tecnologías en el mercado laboral. El ejemplar es el resultado de muchos años de investigación basado en la tesis doctoral del escritor de hace 10 años. Su propósito ha sido eliminar ciertos mitos, explicar las razones del cambio tecnológico y sus consecuencias, y prever qué puede ocurrir y qué podemos hacer. Y aunque el autor reconozca que la pérdida de empleos será una realidad, también incita al lector a calmarse y a comprender mejor en qué consiste este cambio.

"Se han perdido, se están perdiendo y se van a perder empleos, eso seguro", asume Hidalgo. "Pero la automatización también generará nuevos trabajos. La economía aumentará su productividad, elevará la capacidad adquisitiva de las personas y esto generará demanda en otros sectores. Por lo tanto, el saldo neto esperado es positivo, es decir, habrá más empleo" y cree que no tiene sentido hablar sólo de las suposiciones negativas que puede implicar la inteligencia artificial en nuestra vida. Esto no significa que las personas lo vayamos a tener fácil. "Tu habilidad ya no vale en el mercado en cuanto el robot sea más rentable que tú", dice. "Pero las habilidades que no se podrán sustituir son las que están relacionadas con la inteligencia humana. La tecnología sólo las podrá potenciar".

Con respecto a la computación cuántica, como actualmente los computadores cuánticos no tienen resueltos aspectos como la decoherencia y la refrigeración, es decir la criogenia, parece claro que no se podrían utilizar computadores cuánticos directamente en planta industrial. Pero donde los computadores cuánticos resultan más útiles es en el diseño y en la simulación. Por ello, nada impide que los diseños ya realizados mediante computación cuántica en la nube mediante el paradigma Software as a Service (SaaS) puedan transmitirse mediante una red industrial de comunicaciones clásica a los sistemas CAM (fabricación asistida por computador) y CIM (fabricación integrada por computador) que controlan el proceso de fabricación industrial.

CONCLUSIONES

El desarrollo de la computación cuántica, actualmente en un estado similar al de la computación clásica en los años 50, abrirá la posibilidad de crear nuevos puestos de trabajo de alto valor añadido, no solamente para el desarrollo y construcción de los nuevos computadores cuánticos, sino que se crearán nuevos puestos de trabajo de alto valor añadido en ámbitos tecnológicos como la inteligencia artificial, la biotecnología industrial y el desarrollo de materiales avanzados, entre otros. Igualmente, serán necesarios muchos puestos de trabajo en el ámbito del *software*, para el desarrollo de los nuevos algoritmos cuánticos.

De hecho y por lo que se refiere al presente, según el estudio "*Europe's digital progress report 2017*" de la Comisión Europea, en 2016 el 37% de la fuerza laboral tenía un nivel insuficiente de habilidades digitales y un 11% carecía totalmente de ellas. El problema es que, tal y como advierte el Centro Europeo para el Desarrollo de la Formación Profesional, el 90% de los empleos demandará, a corto plazo, algún tipo de competencia digital. Así, para 2025, el 84,6% del empleo total de la UE será realizado por personas con cualificaciones digitales de nivel medio y alto, un porcentaje que en el caso de España será del 69,8%. Además, es necesario señalar, que no se trata solamente de saber usar la tecnología, lo cual ya de por sí es relevante, sino que lo realmente importante es tener la capacitación necesaria para poder aportar valor en los nuevos desarrollos tecnológicos.

En plena transformación digital, basada todavía en los bits, esto es, en los unos y ceros del transistor CMOS, pero al fin y al cabo, todavía una transformación basada en la física clásica, se empieza a vislumbrar otra transformación, en este caso cuántica, la cual tendrá por fundamento científico los pequeños paquetes o cuantos de energía discretos, que un físico alemán, Max Planck, tuvo que introducir, en primera instancia, de forma artificial para explicar el extraño comportamiento que aparecía en la radiación del cuerpo negro, allá por el año 1900. Este artificio matemático, el cual, creía Planck, que era solamente una forma de ajustar la curva que des-

cribía la intensidad de la radiación del cuerpo negro en función de su longitud de onda, resultó responder al comportamiento real de la naturaleza y aquellos cuantos o paquetes discretos de energía, se conocen actualmente como fotones.

Esta nueva transformación, se basará, en las tecnologías habilitadoras clave y en la computación cuántica, es decir, en la superposición y entrelazamiento de los unos y ceros de los *qubits*, de tal forma que, debido a la interrelación entre las KET's y la computación cuántica, se producirá un círculo virtuoso entre ambas. El progreso en las KET's permitirá acelerar el desarrollo de la computación cuántica y a su vez, el desarrollo de la computación cuántica permitirá acelerar el desarrollo de las tecnologías habilitadoras clave. Todo ello permitirá a su vez, la implementación del proceso paralelo de una forma natural, consiguiendo resolver en segundos problemas que con la computación clásica podrían requerir un tiempo superior a la propia edad del universo y permitiendo el futuro despliegue de lo que ya se ha comenzado a denominar la futura Internet cuántica. En cuanto a estas futuras redes de comunicación cuántica, es necesario señalar que los nuevos protocolos de comunicación cuántica supondrán el fin de la piratería digital. Además, los nuevos hackers deberían ser expertos tanto en física cuántica como en teoría de la medida. Por otra parte, la criptografía cuántica permitirá el envío completamente seguro de información, haciendo además totalmente obsoleta la criptografía de clave pública y, por lo tanto, dando al traste con las comunicaciones actuales a través de Internet. La criptografía de clave pública se encuentra basada en un algoritmo que implica la factorización de un número primo en un tiempo limitado lo que no es abordable actualmente por la computación clásica, ni siquiera por los más modernos supercomputadores. El algoritmo de Shor, es un algoritmo cuántico que permite encontrar factores de un número de una forma eficiente, con lo que la criptografía de clave pública quedaría obsoleta si este algoritmo se implementase en una computadora cuántica práctica.

Pero a diferencia de la transformación digital, cuyo balance neto en el empleo es todavía incierto, ya que el resultado de esta transformación, se traduce fundamentalmente en innovaciones de eficiencia, como, p.ej., la industria 4.0 o la aplicación de la inteligencia artificial en muchos sectores económicos, la transformación cuántica se traducirá fundamentalmente en innovaciones empoderadoras y, por lo tanto, innovaciones generadoras de empleo. Sin embargo, para que se cumpla esta predicción, se necesitará, todavía mayor formación científico-tecnológica que la que se necesita actualmente en el caso de la transformación digital. Realmente, la conjunción de la teoría con la práctica es la que rinde los mejores resultados, por lo que debería estudiarse la posibilidad de acceder de forma preferente a las carreras técnicas superiores a partir del título de formación profesional superior. La próxima

revolución cuántica tendrá, por tanto, el potencial de crear muchos más trabajos que la actual revolución digital, sin embargo, para que se cumpla esta predicción, las necesidades de formación, serán mucho mayores, se trataría realmente de un cambio de modelo productivo, un cambio basado en la investigación, el desarrollo y la innovación y en última instancia, en la ingeniería del conocimiento. Según Leon Lederman y Dick Teresi en su libro *"The god particle. If the Universe is the Answer, What is the Question?"* la inversión en la investigación abstracta,

que constituye menos del 1 por 100 de los presupuestos de las sociedades industriales, ha rendido mucho más que el Dow Jones medio a lo largo de más de trescientos años. La mayoría de los principales avances tecnológicos que han afectado a la vida humana, cualitativa y cuantitativamente, han salido de la investigación pura, abstracta, alentada por la curiosidad.

■ Juan Miguel Ibáñez de Aldecoa Quintana

NOTAS

- (1) <https://www.ticbeat.com/innovacion/computacion-cuantica-para-dummies-pasado-presente-y-futuro/>
- (2) Investigación y Ciencia. Fenómenos cuánticos.
- (3) Simular la dinámica molecular mediante fotones. Fabien Gatti. Investigación y Ciencia N° 509.
- (4) Las tecnologías cuánticas. La física que revolucionará las máquinas. Eduardo Arroyo.

REFERENCIAS

NEREID. NanoElectronics Roadmap for Europe. From Nanodevices and Innovative Materials to System Integration. <https://www.nereid-h2020.eu/roadmap>

Turing. La computación. Pensando en máquinas que piensan. RBA

Las tecnologías cuánticas. La física que revolucionará las máquinas. Eduardo Arroyo

Simulando la física con los computadores. Richard P. Feynman

Cuántica. Jim Al-Khalili. Alianza Editorial