

25/2019

18 de septiembre de 2019

José Ignacio Castro Torres

La segunda revolución en la
mecánica cuántica y su aplicación
a las tecnologías de la defensa

[Visitar la WEB](#)

[Recibir BOLETÍN ELECTRÓNICO](#)

La segunda revolución en la mecánica cuántica y su aplicación a las tecnologías de la defensa

Resumen:

El término de mecánica cuántica se acuñó a principios del siglo XX para describir los fenómenos que se producen debido a la existencia e interacción de ondas y partículas subatómicas. Gracias a estos primeros estudios se produjo la primera revolución cuántica, que condujo al desarrollo de inventos como el reloj atómico, los semiconductores o el láser. Actualmente se están sentando las bases de la segunda revolución cuántica gracias a la aplicación científica de fenómenos como el entrelazamiento y la superposición, de directo empleo en las tecnologías de la defensa. Hay que tener en cuenta el impacto que está causando esta segunda revolución en un entorno de solapamiento entre la tecnología comercial con la de seguridad y defensa, donde el segundo ámbito es cada vez más dependiente del primero. Parafraseando los postulados geopolíticos de Makinder, podríamos afirmar que quien domina las dimensiones cuánticas puede dominar las dimensiones espacio-temporales y quien domina estas puede dominar el mundo.

Palabras clave:

Mecánica cuántica, Revolución en Asuntos Militares (RMA), China, potencia subatómica.

The second revolution in quantum mechanics and its application to defense technologies

Abstract:

The term quantum mechanics was created in the early 20th century for describing occurring phenomena due to subatomic waves and particles existence and interaction. Thanks to these investigations, the first quantum revolution took place, guiding to the development of inventions such as atomic clocks, semiconductors or lasers. Foundations for the second quantum revolution are currently being placed thanks to the scientific application of phenomena such as entanglement and superposition, which are directly related to defence technologies. It is necessary consider the impact this second revolution is causing in an overlapping environment between commercial and security and defence technologies, where the second area is increasingly dependent on the first. Paraphrasing Makinder's geopolitical postulates, we could say that whoever dominates quantum dimensions can dominate the space-time dimensions and whoever dominates these can dominate the world.

Keywords:

Quantum mechanics, Revolution in Military Affairs (RMA), China, Subatomic Power.

Cómo citar este documento:

CASTRO TORRES, José Ignacio. *La segunda revolución tecnológica en la mecánica cuántica y su aplicación a las tecnologías de la defensa*. Documento de Análisis IEEE 25/2019. [enlace web IEEE](#) y/o [enlace bie³](#) (consultado día/mes/año) *añadir esta información a la cita, a partir de cuando esté disponible*

Introducción

Los grandes avances científicos han sido en muchas ocasiones los motores de importantes transformaciones en el ámbito militar. En este contexto, los conocimientos que produjo la primera revolución cuántica fueron la base para la invención de las tecnologías láser o los semiconductores, que derivaron en las tecnologías militares que hoy en día se conocen y aplican.

Actualmente se está produciendo un fenómeno muy parecido al anterior, por lo que se podría considerar que nos encontramos inmersos en una segunda revolución cuántica que, gracias a aprovechar las cualidades de las entidades subatómicas, podrá desarrollar plenamente aspectos tan importantes como la inteligencia artificial, el posicionamiento sin GPS, las comunicaciones seguras y la detección e identificación de objetos desconocidos.

Esta revolución tecnológica se está produciendo en un momento geopolítico de transición entre el orden unimultipolar, encabalgado en el cambio de siglo, y el nuevo orden multipolar que se vislumbra. Por ello, la potencia que sepa aprovechar las ventajas de esta brecha tecnológica estará en condiciones de asumir el liderazgo en la esfera internacional. Esta posibilidad ha sido muy bien identificada por China, que ha dedicado grandes esfuerzos a posicionarse como la nueva potencia subatómica¹.

La competencia por ocupar un lugar de relevancia en el nuevo orden mundial también se trasladará al ámbito de la defensa, donde la aplicación directa de los conceptos de la segunda revolución cuántica puede proporcionar a las fuerzas armadas un salto generacional.

A lo largo del presente documento se tratará de exponer el fenómeno de la mecánica cuántica desde el punto de vista de sus aplicaciones militares, para posteriormente

¹ El término emergente «potencia subatómica» se suele aplicar a aquel actor que posee las capacidades de dominar las tecnologías cuánticas en competencia con sus rivales. Este tipo de definiciones no es del todo novedosa si se tiene en cuenta la frecuencia con la que se vienen empleando en muchos estudios geopolíticos o estratégicos otros términos como «potencia tecnológica», «potencia nuclear» o «potencia convencional».

estudiar estos aspectos en las profundas transformaciones que está experimentando el entorno geopolítico y el ámbito de la defensa y seguridad.

El concepto de mecánica cuántica y la nueva revolución científica

El ámbito de la física cuántica comprende todos aquellos fenómenos que se producen debido a la existencia e interacción de ondas o partículas subatómicas y, en ocasiones, átomos (a todos los que se denominarán entidades), siempre y cuando no se considere que estos posean velocidades próximas a la de la luz². En este epígrafe se citarán algunos de los fenómenos físicos a los que se hará referencia a lo largo de este documento, necesarios para comprender la situación actual en la que la mecánica cuántica se puede aplicar a las tecnologías de la defensa.

Los antecedentes de estos estudios se remontan a finales del siglo XIX, pero los descubrimientos de físicos como Plank, Einstein, Rutherford, Heisenberg o Schrodinger constituyeron el comienzo de una serie de sucesos que eran completamente discordantes con la intuición física, pero que se ajustaban a las ecuaciones matemáticas que se estaban desarrollando durante el primer cuarto del siglo XX.

Precisamente sería Max Plank quien daría nombre a esta rama de la física, admitiendo que la energía no se liberaba de forma continua, sino a través de paquetes energéticos o «cuantos», cuya expresión era el producto de una nueva constante por la frecuencia de la radiación. Este hecho fue contrastado por Einstein cuando descubrió el efecto fotoeléctrico. Este efecto se fundamentaba en que al iluminar con luz una placa metálica, esta emitía electrones provocando una corriente. Dicha emisión no se producía según la cantidad de luz (intensidad), sino por la energía que esta poseía (la frecuencia de la radiación). Además, la emisión de electrones no se causaba de manera continua, sino que solo era válida para determinadas frecuencias. Por tanto, Einstein dedujo que la luz se transmitía a través de «cuantos» de energía, a los que denominó «fotones»³.

² Existen varios autores que explican de manera divulgativa los fenómenos asociados a este concepto. No obstante, por ser relativamente asequible, se recomienda la lectura de la serie "Cuántica sin fórmulas" en la página web "El Tamiz", de Pedro Gómez-Esteban. Dicha serie se halla disponible en: <https://eltamiz.com/cuantica-sin-formulas/>

³ PAIS, Abraham. Einstein and the quantum theory. *Reviews of Modern Physics*, 1979, vol. 51, no 4, p. 875.

La situación era desconcertante, ya que la luz se comportaba como una onda, pero también poseía las propiedades de las partículas (fotones). Por ello, Louis de Broglie pensó que el comportamiento de la luz podía aplicarse al resto de entidades y por tanto, todo lo que existe puede comportarse como una onda o como una partícula, determinando de este modo la dualidad onda-corpúsculo⁴.

Estas primeras experiencias fueron la base de la primera revolución cuántica en el ámbito de la física, que llevó a importantes descubrimientos como el láser, la imagen por resonancia magnética, el transistor o los microprocesadores. No obstante, estos revolucionarios inventos no eran todavía capaces de aprovechar todo el potencial que la física cuántica podía ofrecer⁵.

Una vez descrito el nacimiento de la mecánica cuántica y la importancia que esta ha tenido en el desarrollo de importantes descubrimientos tecnológicos, parece oportuno continuar en el ámbito de la física para estudiar una serie de fenómenos relevantes para la nueva revolución cuántica que se avecina.

Existen dos tipos principales de fenómenos físicos que deben ser asimilados para comprender el potencial que estos tienen en las aplicaciones de la mecánica cuántica en relación con las tecnologías de la defensa. Estos fenómenos se denominan entrelazamiento y superposición⁶.

El entrelazamiento es la cualidad que poseen dos o más entidades subatómicas para influirse mutuamente, a pesar de la distancia a la que se encuentren. Esto quiere decir que lo que le ocurra a una entidad que pueda encontrarse separada de otra, en las dimensiones espacio-temporales clásicas, puede influir en el comportamiento de la otra partícula con la que se encuentra entrelazada. La capacidad de generar y gestionar pares

⁴ DE BROGLIE, Louis. Waves and quanta. *Nature*, 1923, vol. 112, no 2815, p. 540.

⁵ SABLON, Kimberly; REYNOLDS. Peter J; FATEMI, Fredrik; GAMBLE. Sara; "A report from the cutting edge of physics, in layman's terms", US Army, disponible en:

https://www.army.mil/article/211705/a_report_from_the_cutting_edge_of_physics_in_laymans_terms

Fecha de la consulta 12/07/2019.

⁶ A efectos de simplificación, en este documento no se describirán los fenómenos de la decoherencia ni la supremacía cuántica.

de este tipo de entidades podría ser la base del funcionamiento de los dispositivos de cifrado, comunicaciones y detección⁷.

La superposición supone la capacidad de una entidad de encontrarse en diferentes estados al mismo tiempo, hasta que no sea forzada a adoptar uno de ellos debido a una medida externa. Esta cualidad proporcionaría la posibilidad de no tener que discernir entre uno u otro estado, como los «ceros» y «unos» de la computación tradicional, sino también podrían existir estados intermedios entre ambos valores. Basándose en la repetición de este abanico de posibilidades, los nuevos ordenadores cuánticos podrían aumentar sus capacidades exponencialmente, mientras que los tradicionales siguen una progresión lineal⁸.

Las nuevas aplicaciones de la mecánica cuántica a la defensa y seguridad

Es indudable que el paradigma de la seguridad en el entorno global está cambiando drásticamente y es posible que lo haga aún más durante el segundo cuarto de siglo. En este contexto es muy probable que las aplicaciones que posee la física cuántica sean decisivas para reconfigurar este nuevo entorno.

La mecánica cuántica posee una serie de aplicaciones de directo interés para el ámbito de la defensa y seguridad. Actualmente los principales progresos se prevén en los campos de la computación e inteligencia artificial, el desarrollo de sensores, las ayudas a la navegación y las comunicaciones.

A lo largo del presente epígrafe se desglosarán los principales campos en los que se prevé que tengan aplicación militar estas futuras utilidades, así como algunas de las posibilidades que *a priori* ofrecen, dentro de un amplio compendio que seguramente se incrementará a medida que los progresos en la investigación sean transferidos al ámbito tecnológico.

⁷ HORODECKI, Ryszard, et al. Quantum entanglement. *Reviews of modern physics*, 2009, vol. 81, no 2, p. 865.

⁸ Martin Giles, "Explainer: What is a quantum computer?", MIT Technology Review, disponible en: <https://www.technologyreview.com/s/612844/what-is-quantum-computing/> Fecha de la consulta 10/07/2019.

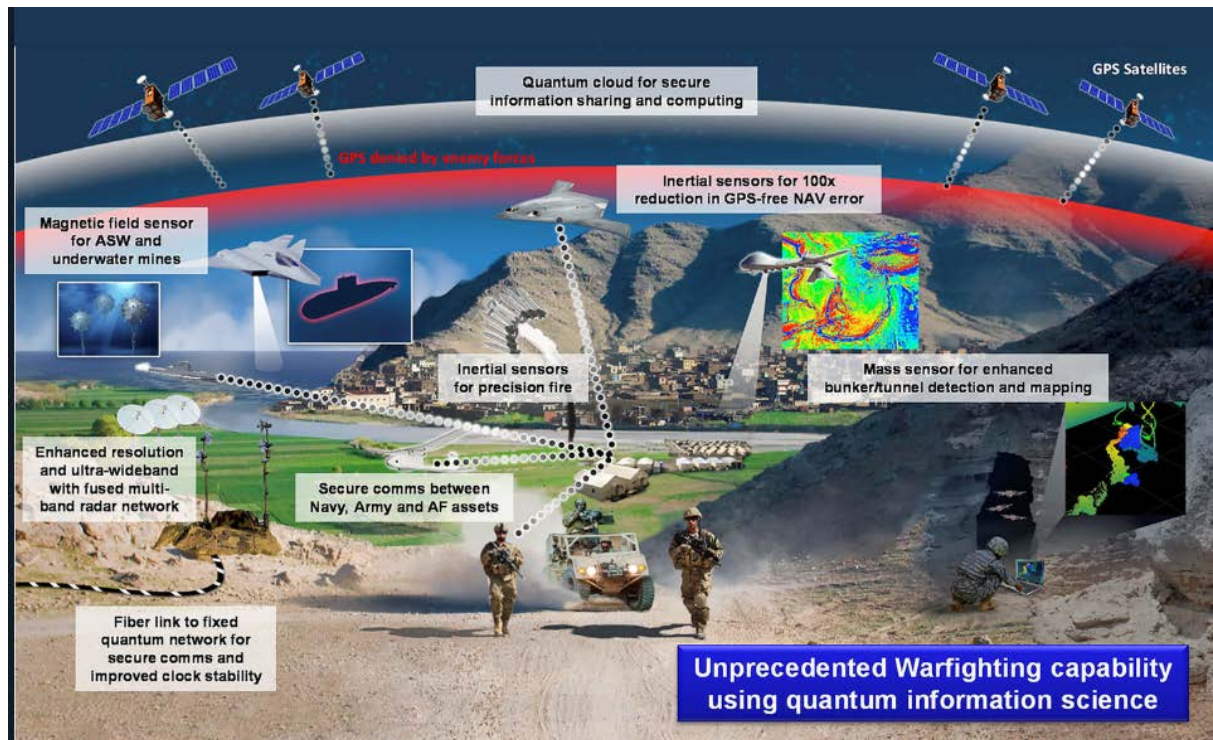


Figura 1: Aplicaciones científicas en el entorno cuántico del conflicto.

Fuente: Global Defence Technology, "Quantum Leap: Atomic sense for the military", disponible: https://defence.nridigital.com/global_defence_technology_feb19/quantum_leap_atomic_sensing_for_the_military. Fecha de la consulta 13/07/2019.

Las ayudas al posicionamiento y navegación. Los relojes cuánticos y los sistemas inerciales

La dependencia de los sistemas globales de navegación por satélite, como el GPS, se hace hoy en día imprescindible en todos los aspectos del desarrollo humano. En el caso del ámbito militar, este tipo de tecnologías es absolutamente vital para el posicionamiento y navegación de las unidades, así como para el empleo de sus armas, entre otras muchas aplicaciones.

A lo largo de la reciente historia de estos sistemas se han dado varios incidentes que han demostrado la dependencia anteriormente citada. Uno de los más significativos se produjo en 2016, cuando la fuerza aérea estadounidense introdujo un software erróneo que ocasionó que 15 satélites emitiesen su señal con un desfase de 13 microsegundos. Al perder la sincronía, a los ingenieros no les quedó otra alternativa que mantener temporalmente la señal de tiempo del sistema congelada, mientras buscaban una

solución⁹. El servicio pudo volver a sus condiciones iniciales a las 12 horas desde la producción de la anomalía, pero tuvo consecuencias en todo el mundo¹⁰.

Debido a las consideraciones anteriores, se comprende la necesidad de disponer de relojes cada vez más precisos, que permitan la perfección sincrónica de las tecnologías emergentes. En este campo los relojes atómicos llevan acompañando el progreso científico desde el año 1955 cuando se diseñó el primer reloj de cesio. Como explicación sucinta se puede exponer que determinados electrones del átomo de este elemento, al ser irradiados con ondas de radiofrecuencia, pueden saltar de un nivel a otro de energía. La frecuencia de esa radiación se encuentra relacionada con su periodo de tiempo, por lo que un determinado valor de la frecuencia se ajusta a un segundo temporal. Al producirse un salto de los electrones de un nivel a otro de energía, en la inmensa mayoría de los átomos de cesio, estos son medidos por un detector fijando un segundo de tiempo¹¹.

Aunque el error de las medidas sea relativamente pequeño, este obliga a realizar determinados ajustes, que podrían ser cada vez menores según se progresa en la investigación cuántica. De hecho, uno de los principales récords de precisión en la medida del tiempo, a la par que estabilidad, se alcanzó en el año 2014 cuando un reloj de rejilla óptica de estroncio obtuvo un error de medición menor de un segundo en 5 000 millones de años¹².

Estos relojes podrán emplearse en satélites a medida que se vaya produciendo la transferencia de conocimiento desde los laboratorios a las empresas tecnológicas,

⁹ Para ampliación de información acerca de la necesidad de sincronización de todos los sistemas de comunicaciones se recomienda la lectura de NATH, Rajendra, "Understanding the concepts of synchronization and holdover", EE Times, disponible en https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1278627 Fecha de la consulta 19/07/2019.

¹⁰ BARANIUK, Chris, "GPS error caused '12 hours of problems' for companies", BBC News, 4 February 2016, disponible en: <https://www.bbc.com/news/technology-35491962> Fecha de la consulta 20/07/2019.

¹¹ HADHAZY, Adam, "How Does an Atomic Clock Work?", Live Science, June 21, 2010, disponible en: <https://www.livescience.com/32660-how-does-an-atomic-clock-work.html> Fecha de la consulta 21/07/2019. La definición de un segundo de tiempo en el sistema internacional, adoptada por España según Real Decreto 2032/2009, de 30 de diciembre, por el que se establecen las unidades legales de medida es "la duración de 9 192 631 770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133".

¹² National Institute of Standards and Technology (NIST), "JILA strontium atomic clock sets new records in both precision and stability", PHYSORG, January 2014, disponible en: <https://phys.org/news/2014-01-jila-strontium-atomic-clock-precision.html> Fecha de la consulta 22/07/2019.

aunque primero tendrán que resolver los problemas de someterlos a las demandantes situaciones de la puesta en órbita y el funcionamiento durante largos periodos y condiciones extremas. La medida del tiempo no necesitará que el sistema tenga que depender de la generación de una señal proveniente de una estación terrestre para asegurar la sincronización, pudiendo establecerse esta directamente de forma satelital. En caso de conseguirse en los años venideros, sistemas de posicionamiento global como el Galileo podrían reducir drásticamente sus costes¹³.

A pesar de todos los progresos tecnológicos que puedan ser llevados a cabo en el Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS, por sus siglas en inglés), este es manifiestamente dependiente de las labores de mantenimiento y gestión, así como extremadamente vulnerable a errores u actos hostiles. Por estos motivos, en el ámbito militar se podría prever un contexto de degradación para el despliegue de las fuerzas propias en un «entorno de denegación de GPS», dentro de lo que se podría denominar como «Anti-Acceso/Denegación de Área o *Anti Access/Area Denial*» (A2/AD)¹⁴.

A este respecto, los sistemas inerciales actuales basados en giróscopos y acelerómetros son relativamente imprecisos y necesitan ser referenciados frecuentemente. Sin embargo, la mecánica cuántica podría solucionar este problema, debido a la sensibilidad de las partículas empleadas, pudiendo ser una excelente alternativa a los entornos de degradación de los sistemas de navegación por satélite o un excelente complemento en aquellas situaciones en que no puedan ser utilizados, como las operaciones en inmersión, espacios confinados y subterráneos¹⁵.

El funcionamiento de estos dispositivos se basa en la dualidad onda-corpúsculo que existe a niveles microscópicos, desde las partículas subatómicas hasta el agrupamiento de varios átomos. El comportamiento de estas entidades como ondas permite que interactúen entre sí, sumándose o restándose en el caso de encontrarse alineadas o desalineadas unas con otras (en fase o desfasadas), causando interferencias constructivas o destructivas. Si esta variación de fase fuera debida a un estímulo externo

¹³ WALPORT, Mark; KNIGHT, Peter, *The Quantum Age: technological opportunities*, Government Office for Science, London., p.26.

¹⁴ RYU, Jessica, *USMC ISR: Preparing for the A2/AD Threat*, U.S. Army Command and General Staff College, Fort Leavenworth, KS, 2014, p. 46.

¹⁵ INGLESANT, Philip; JIROTKA, Marina; HARTSWOOD, Mark; *Responsible Innovation in Quantum Technologies*, Op. Cit., p.12.

medible, como pudiera ser una fuerza debido a un cambio de aceleración, al comparar el patrón de interferencia entre una onda desplazada y otra no desplazada se podría obtener información sobre la intensidad de dicha fuerza. Este sería el concepto de interferometría atómica, que utiliza la cualidad que tienen los átomos y las partículas subatómicas de comportarse como ondas, utilizando la interferencia de estas ondas para establecer una comparación medible.

En el caso particular que nos atañe, en el que se pretende medir cambios basados en la gravedad, las entidades más útiles son del tamaño de los átomos debido a la masa que poseen. Otras partículas, como los fotones, no son adecuados para detectar la fuerza gravitacional por carecer de masa.

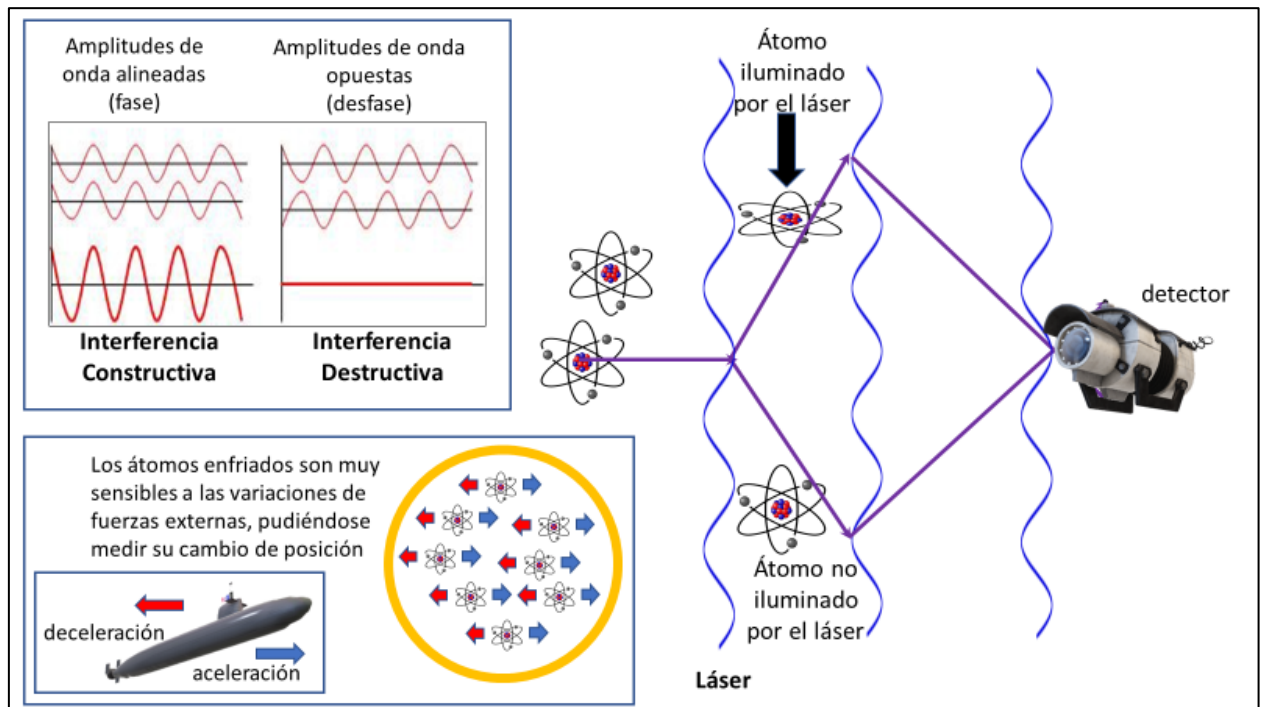


Figura 2: Funcionamiento de un interferómetro cuántico como sistema inercial.

Fuente: elaboración propia a partir de la documentación aportada.

El fundamento del funcionamiento del sistema se basa en que la gravedad es el factor externo que provoca un cambio de fase, que finalmente produce una modificación del patrón de interferencia. Para poder conseguir el efecto deseado, se proyecta una luz láser sobre los átomos, experimentando aquellos que son iluminados por un fotón de luz

un camino diferente de aquellos que no han sido afectados. Cuando ambos átomos se recombinan, el patrón de interferencia de los átomos que siguieron rutas diferentes indica la fuerza gravitatoria a que el sistema ha sido sometido¹⁶.

La tecnología de imagen cuántica

Las técnicas de imagen actual basadas en píxeles tienen un techo tecnológico que puede ser rebasado por la aplicación de la mecánica cuántica en este ámbito. Existen actualmente varias líneas de investigación para la obtención de imágenes cuánticas. La primera de ellas se basa en la captación de fotones aislados a partir de la emisión de una emisión láser¹⁷. Este tipo de dispositivos tendría la capacidad de obtener imágenes en 3D de objetos que puedan estar escondidos tras esquinas o paredes. Como los fotones emitidos se encuentran aislados unos de otros, los que finalmente son captados por un receptor tienen distinto tiempo de llegada, lo que en términos cuánticos puede ser medido para reconstruir una imagen tridimensional.

Otra segunda línea de investigación tiene por objeto obtener imágenes de entornos degradados no asequibles a las tecnologías actuales, bien por la poca luz ambiental o bien por la existencia de impedimentos como humo o niebla. Igualmente, la sensibilidad de las futuras tecnologías puede ser de aplicación para la visión en 3D de objetos por su firma infrarroja¹⁸.

Otra técnica en experimentación es la obtención de «imágenes fantasma». Hasta ahora las cámaras se fundamentaban en la captación, con diferentes grados de precisión y sensibilidad, de la luz reflejada por un objeto.

¹⁶ MUNRO, Ewan, “Quantum sensing”, Quantum World Association, Jul 22, 2018, disponible en: https://medium.com/@quantum_wa/quantum-sensing-f33643d098bb Fecha de la consulta 22/07/2019.

¹⁷ Este tipo de dispositivos suele denominarse en inglés como *Single Photon Avalanche Detector* (SPAD). En el año 2014 el Massachusetts Institute of Technology (MIT) demostró la capacidad de obtener una imagen en 3D de una fuente de fotones de tan bajo flujo, que el promedio de fotones para obtener un pixel era menor de uno. Actualmente las distancias de detección abarcan varias decenas de metros.

¹⁸ WALPORT, Mark; KNIGHT, Peter, *The Quantum Age: technological opportunities*, Government Office for Science, London, pp.30-31.

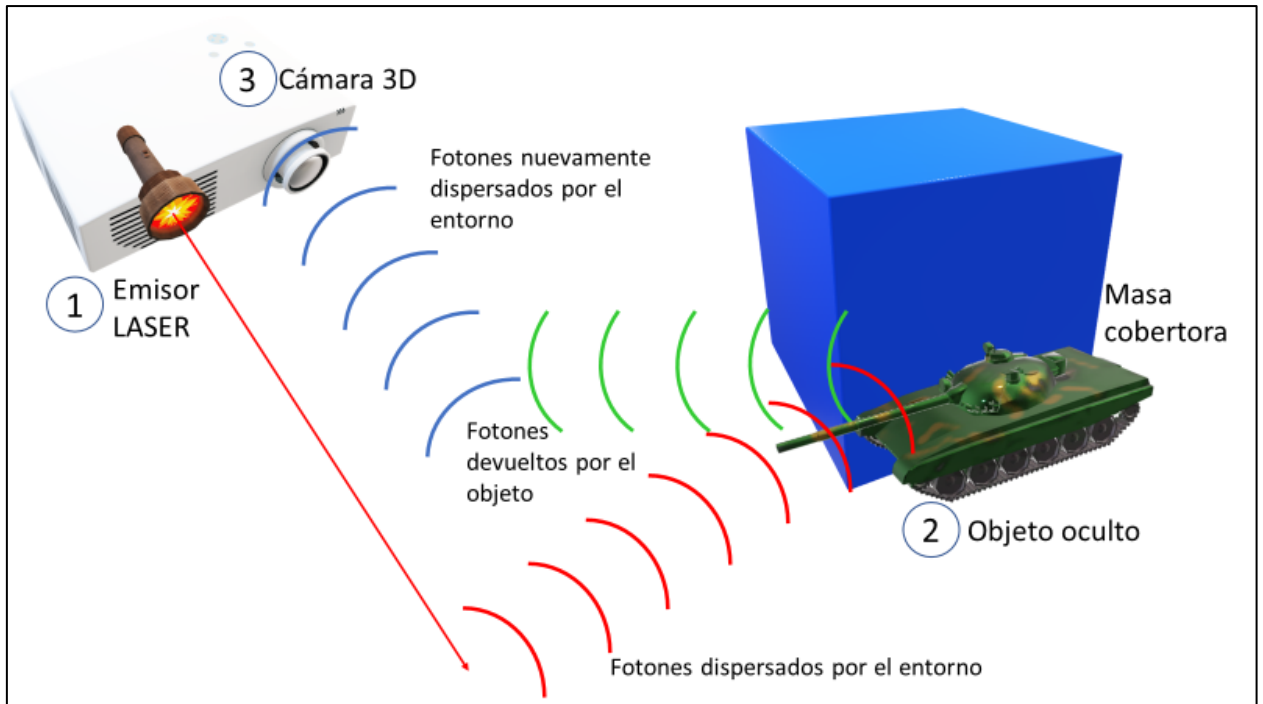


Figura 3: Esquema de funcionamiento de un dispositivo cuántico de medida fotónica.

Fuente: elaboración propia a partir de WALPORT, Mark y KNIGHT, Peter, *The Quantum Age: technological opportunities*, Government Office for Science, London, p.30.

Basándose en las propiedades del entrelazamiento, se pueden generar pares de fotones entrelazados a partir de un haz primario energético de luz ultravioleta cuando este atraviesa determinados tipos de cristal. Los nuevos haces se dividen en uno de luz visible y otro de luz infrarroja de muy baja energía, que es precisamente el que se proyecta sobre el objeto a medir. Cuando la luz infrarroja reflejada por el objeto es captada por un detector, los fotones infrarrojos entrelazados que llegan al detector causan un efecto a distancia sobre sus correspondientes pares de luz visible, que se encontraban sobre el otro haz generado a partir del haz primario. Las fluctuaciones de los fotones de luz visible entrelazados tienen la capacidad de crear una «imagen fantasma» del objeto que ha sido iluminado con el haz infrarrojo.

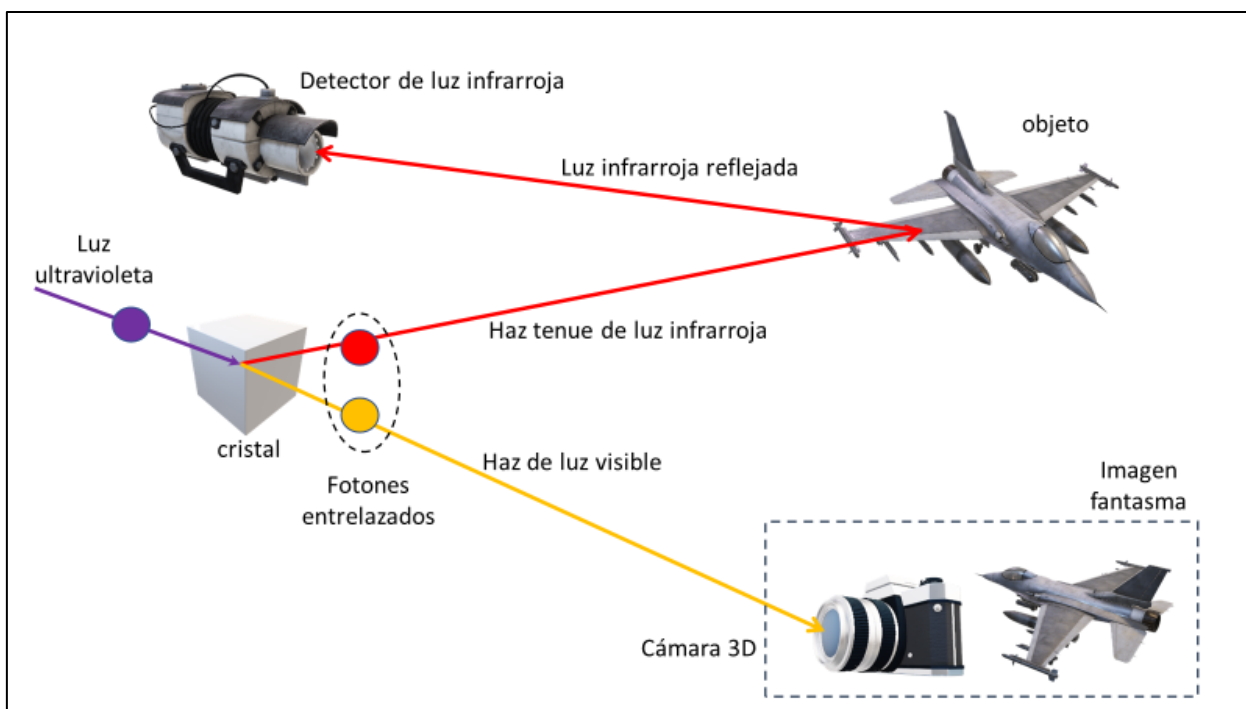


Figura 4: Esquema de funcionamiento de un dispositivo cuántico de generación de «imágenes fantasma». Fuente: elaboración propia a partir de WALPORT, Mark y KNIGHT, Peter, *The Quantum Age: technological opportunities*, Government Office for Science, p.35.

La investigación en el campo de las imágenes cuánticas aún ofrece mayores posibilidades. Uno de los principales problemas en la detección lo constituye la distorsión en las medidas por causas externas, que se suele denominar como «ruido». Incluso los propios fotones producen al generarse un «ruido de disparo» debido a que la luz fluctúa aleatoriamente. No obstante, y gracias a la mecánica cuántica, estos efectos adversos pueden ser minimizados. Algunos determinados tipos de cristal pueden dividir un haz de láser en dos haces de fotones entrelazados con un nivel de ruido idéntico en ambos. Al dividir el número de fotones medidos en un haz entre los medidos en el otro se proporciona una relación correspondiente a la inexistencia de ruido. Si durante la operación se produjese una variación en la relación, esta podría detectarse y corregirse para obtener una imagen más nítida¹⁹.

¹⁹ BEENAKKER, Carlo; SCHÖNENBERGER, Christian. Quantum shot noise. *Physics Today*, 2003, vol. 56, no 5, p. 37-42.

Los sensores cuánticos y los métodos de detección

Los sensores se emplean muy frecuentemente para detectar propiedades como el sonido, movimiento, luz, presión, temperatura o variaciones de campos electromagnéticos. Los sensores cuánticos pueden igualmente ofrecer estas posibilidades, pero con mayor sensibilidad y precisión que los sistemas actuales.

Debido a la susceptibilidad que tiene el fenómeno de la superposición a las variaciones del entorno, se puede obtener una información precisa de cualquier distorsión o anomalía por pequeña que esta sea. Al proyectar una partícula subatómica, esta se puede comportar como un corpúsculo o como una onda, pudiendo ocupar dos lugares al mismo tiempo. El interferómetro cuántico funciona aprovechando esta cualidad, mediante el lanzamiento de partículas a través de unos precisos pulsos de láser en unos instantes de tiempo perfectamente determinados. Esta liberación de partículas crea una serie de ondas que interactúan unas con otras estableciendo un «patrón de interferencia» característico. Este patrón podría ser alterado en el caso de que las ondas encuentren el objeto para el que se encuentran diseñadas²⁰.

Igualmente se puede aprovechar la capacidad de detección en el ámbito cuántico para realizar esta de modo pasivo. En este momento existen sensores capaces de detectar las variaciones del campo magnético terrestre, aplicándose en sismología o prospecciones mineras. A modo de ejemplo, la tecnología cuántica permite el diseño de sensores magnéticos mucho más sensibles que los actuales, capaces de detectar con un alto nivel de precisión y mínima distorsión menores masas metálicas en movimiento o instalaciones subterráneas. Entre los múltiples campos de aplicación de este tipo de sensores se pueden citar la detección pasiva de submarinos o la localización de actividad subterránea en entornos de combate urbano o lucha contra-insurgencia²¹.

²⁰ FLAHERTY, Brittany, "Quantum measurement could improve gravitational wave detection sensitivity", MIT News, May 1, 2019, disponible en: <http://news.mit.edu/2019/quantum-measurement-could-improve-gravitational-wave-detection-sensitivity-0501> Fecha de la consulta 19/07/2019.

²¹ INGLESANT, Philip; JIROTKA, Marina; HARTSWOOD, Mark; Responsible Innovation in Quantum Technologies, Op. Cit., p.12.

Se puede citar que, en el campo de la lucha antisubmarina y medidas contraminas, las radiaciones electromagnéticas se atenúan con facilidad en el agua. Esto mismo le ocurre en menor medida a los campos magnéticos de los objetos metálicos, por lo que actualmente se suele recurrir a dispositivos basados en el sonido, que se transmite en el medio marino con mayor facilidad²². Gracias a la mecánica cuántica han empezado a desarrollarse los «Dispositivos Superconductores de Interferencia Cuántica/*Superconducting Quantum Interference Device*» (SQUID por sus siglas en inglés), con una sensibilidad y alcance muy superiores a los de los detectores por sónar actuales, pudiendo obtener información precisa hasta una distancia de seis kilómetros²³.

Los submarinos producen diferentes tipos de estelas características debido tanto a su velocidad como a la hidrodinámica de su casco, creando anomalías en las aguas que se encuentran a su alrededor. Utilizando una serie de dispositivos SQUID, estos pueden comparar entre sí las lecturas de cada uno de ellos, así como eliminar cualquier posible anomalía o «ruido» que alterase la medición²⁴. Al igual que el ejemplo descrito para la lucha antisubmarina, se podría concebir cualquier tipo de red de detección cuántica que revelase anomalías magnéticas o de otro tipo en el área de operaciones.

²² Los magnetómetros han sido utilizados en la lucha antisubmarina desde la Segunda Guerra Mundial, aunque su alcance tiene importantes limitaciones debido a la atenuación del campo magnético con la distancia.

²³ WOOD, L. Todd, "China may have new long-range Quantum sub detector", The Washington Times, August 22, 2017, disponible en: <https://www.washingtontimes.com/news/2017/aug/22/china-may-have-new-long-range-quantum-sub-detector/> Fecha de la consulta 19/07/2019.

²⁴ International Defence and Security Technology, Militaries Developing Quantum magnetometers for Submarine Detection and navigation in GPS Denied Environments, 2019, disponible en: <https://idstch.com/magnetometers-submarine-detectors-getting-super-sensitive-superconductivity-quantum-machine-learning/> Fecha de la consulta 19/07/2019.

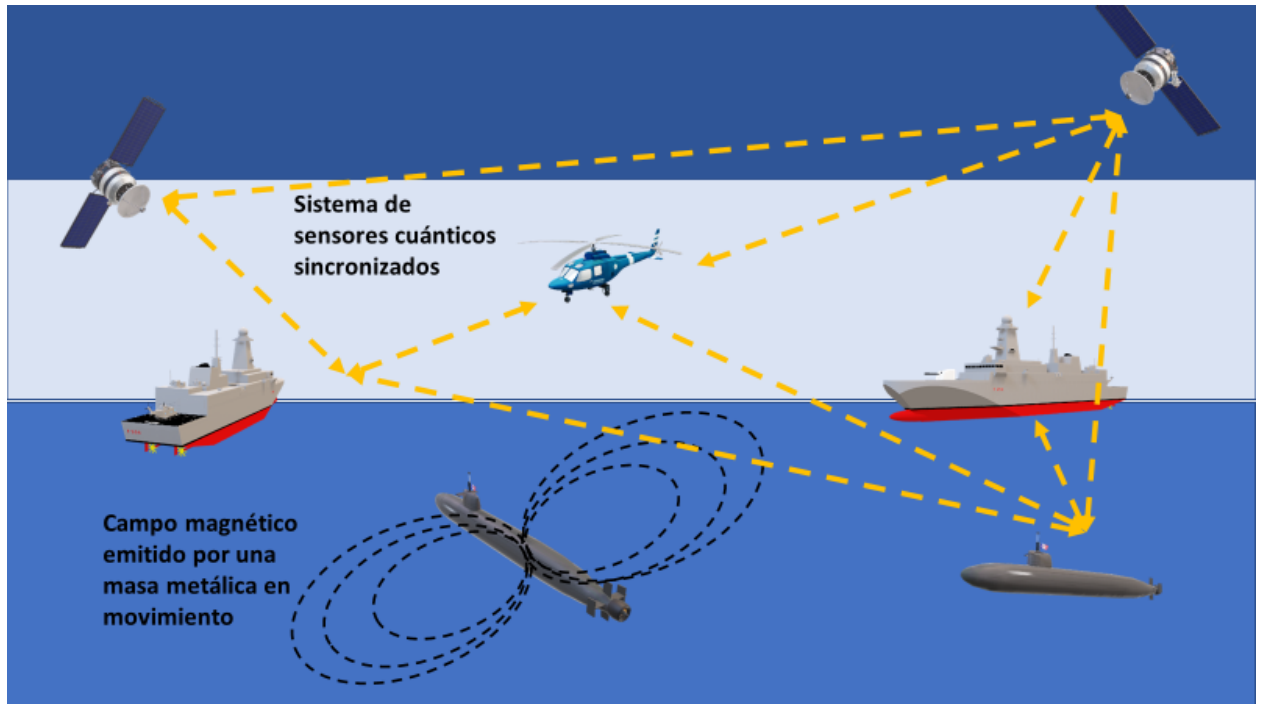


Figura 5: Red de detectores cuánticos de alta sensibilidad.

Fuente: elaboración propia a partir de la documentación aportada.

La supercomputación cuántica y los nuevos simuladores

Un ordenador clásico funciona gracias a una combinación de transistores. Este dispositivo electrónico, proveniente de la primera revolución cuántica, permite que a una pequeña intensidad de entrada le pueda corresponder una notable intensidad de salida. De este modo, si no se produjese una señal de entrada suficientemente intensa el transistor no emitiría ninguna señal amplificada, pudiendo interpretarse como un «cero». En el caso que hubiese una señal de entrada que rebasase un determinado umbral se produciría una señal a la salida, pudiendo interpretarse como un «uno». Mediante la combinación de transistores se establece una serie de funciones o «puertas lógicas» que constituyen la base del diseño de un microprocesador.

En 1965, el cofundador de Intel, Gordon Moore, predijo que cada dos años aproximadamente se duplicaría el número de transistores que posee un microprocesador. Esto se ha cumplido hasta nuestros días, momento en el que los ordenadores son cada vez más potentes con un menor espacio. Pero precisamente esta reducción de volumen empieza a plantear problemas, ya que las tecnologías clásicas tienen un límite de tamaño. Al reducir drásticamente este tamaño, el elemento básico del

ordenador, constituido por el transistor, puede encontrarse con que los electrones de la corriente que lo atraviesa sean de medidas físicas similares. En esta situación dichos electrones, al comportarse tanto como partículas como ondas, podrían escapar a la barrera de paso del transistor que procesa la información, haciendo inviable su empleo²⁵.

En la computación clásica la unidad de información lo constituye el bit que diferencia dos estados (cero o uno). Un ordenador convencional limitado por las dimensiones espaciales necesita hacer las operaciones de forma lineal, una tras otra a lo largo del tiempo. En la computación cuántica la unidad de información es el «cúbit», «qubit» en inglés, que se diferencia en que puede adoptar el estado de cero, uno, o ambos a la vez, gracias al principio de la superposición cuántica. Esta cualidad le da la posibilidad de realizar varias operaciones al mismo tiempo de forma simultánea, ya que cada una de ellas se calcula en una dimensión diferente. Si además estos qubits estuviesen entrelazados, podrían intercambiar entre sí la información que poseyesen²⁶.

Actualmente hay tres líneas de investigación en cuanto a los tipos de modelos de ordenadores cuánticos. La primera de ellas lo constituye el sistema «D-wave» desarrollado conjuntamente por la NASA e Intel y se basa en la aleación simulada de qubits que se produce al variar la energía de un punto en un instante de tiempo, generando todas las posibles soluciones aunque con poca precisión estadística. Este tipo de tecnología es especialmente apta para la resolución de problemas en la que intervengan multitud de muestras, así como en los de ruta crítica. La segunda línea de investigación se centra en la emulación de determinados procesos complejos, como podría ser el comportamiento atmosférico o el de determinados materiales sometidos a un experimento. Hay que tener en cuenta que estos sofisticados procesos necesitarían ordenadores con más de 50 qubits. La tercera línea abarcaría a los ordenadores cuánticos universales capaces, en un futuro, de resolver todo tipo de problemas,

²⁵ THOMPSON, Avery, "Scientists Have Made Transistors Smaller Than We Thought Possible", Popular Mechanics, Oct 12, 2016, disponible en: <https://www.popularmechanics.com/technology/a23353/1nm-transistor-gate/> Fecha de la consulta 24/07/2019.

²⁶ SUGI YK, "What is a quantum computer? Explained with a simple example", FreeCodeCamp, 22 October 2018, <https://www.freecodecamp.org/news/what-is-a-quantum-computer-explained-with-a-simple-example-b8f602035365/> Fecha de la consulta 27/07/2019. Existe una gran cantidad de literatura donde, de un modo u otro, se intenta explicar el funcionamiento de un ordenador cuántico. Se ha preferido elegir esta por la existencia de un ejemplo en el que se compara el funcionamiento de un ordenador clásico y otro cuántico.

poseyendo sus qubits un entrelazamiento constante durante todo el proceso de cálculo. Sin embargo, aún no se han conseguido entrelazar más de 20 qubits, debido a que las partículas subatómicas son demasiado inestables²⁷.

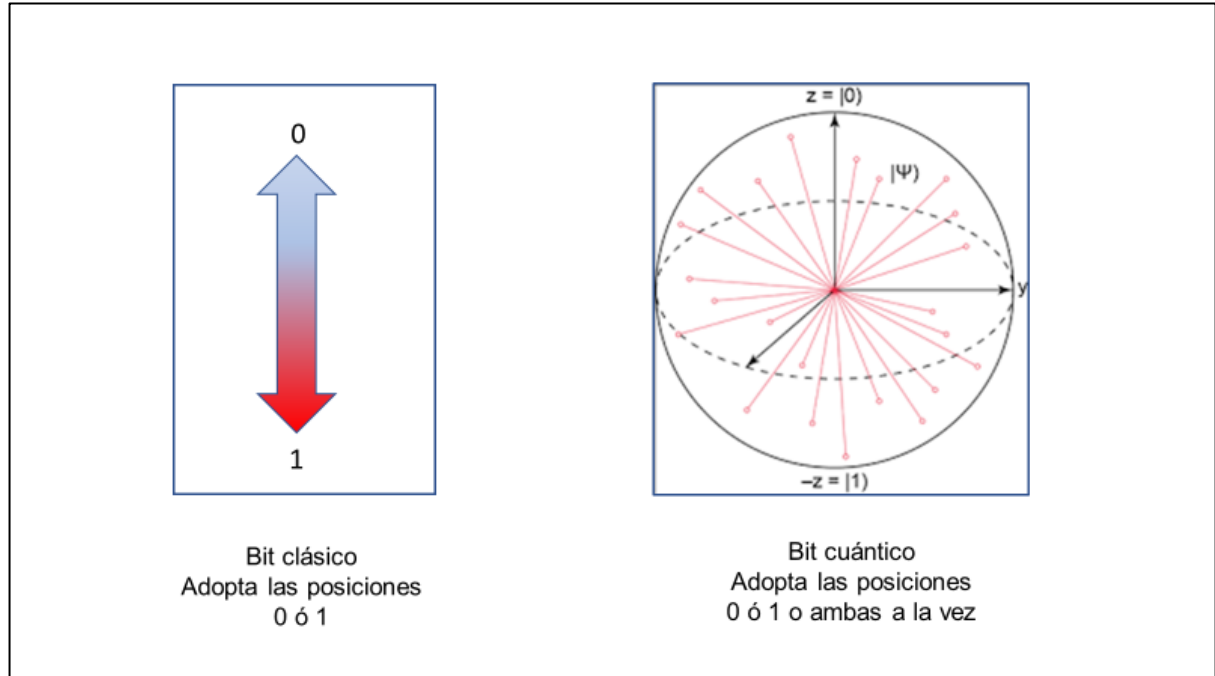


Figura 6: Diferenciación entre el procesamiento clásico y cuántico de la información.

Fuente: elaboración propia a partir de la documentación aportada.

Estas líneas de investigación todavía tienen mucho camino por recorrer, ya que los ordenadores cuánticos son por el momento artefactos complicados, debido a las condiciones físicas en que debe encontrarse la materia para producirse los fenómenos de la mecánica cuántica. Por el momento, estos dispositivos se encuentran en instalaciones muy complejas, en las que se utilizan láseres y sofisticados dispositivos ópticos sometidos a unas condiciones de frío cercanas a los -273° C. Por este motivo se estima que estas computadoras tardarán mucho tiempo en progresar hasta poder ser empleadas de un modo extensivo²⁸.

²⁷ HERMAN, Arthur, "Winning the Race in Quantum Computing", Hudson.org, disponible en: <https://www.hudson.org/research/14346-winning-the-race-in-quantum-computing> Fecha de la consulta 29/07/2019.

²⁸ Ibid.

El crecimiento exponencial de la capacidad de procesamiento de los futuros ordenadores cuánticos, frente a la progresión lineal de los clásicos, podría darles la posibilidad de descifrar códigos de cifrado, hasta ahora imposibles de romper por el número de posibilidades que estos códigos presentan. Igualmente se podría aplicar la computación cuántica al campo de los simuladores, por elevado número de parámetros que este tipo de programas deben manejar. Sobre la base de ello se podrían realizar cálculos de diseño de estructuras y resistencia de materiales, simular complicadas situaciones en las que podrían intervenir unidades militares, optimizar recursos o realizar determinados análisis de inteligencia²⁹.

Las comunicaciones cuánticas

Gracias a la física cuántica se podría intercambiar información sensible sin la necesidad de los actuales sistemas criptográficos. Muchos sistemas de comunicaciones seguras utilizan la llamada criptografía de clave pública, en la que el usuario dispone de dos claves. La primera de ellas es pública y la utiliza cualquier otro corresponsal para encriptar datos, mientras que la segunda es privada y la utiliza el usuario para desencriptar la información. Este sistema de protección de la información se suele basar en la multiplicación de dos grandes números primos para obtener otro aún mayor, lo que es bastante fácil para un ordenador convencional. Sin embargo, la operación inversa es prácticamente imposible con las tecnologías actuales, ya que tendría que ir probando una por una todas las posibles opciones a lo largo de un tiempo extremadamente largo. Simplificando el proceso, solo se podrá obtener uno de los términos de la multiplicación si se conoce el otro³⁰.

Sin embargo, si se llegase a aplicar una fórmula matemática como el «algoritmo de Shor» a un ordenador cuántico, este sería capaz de factorizar un número grande en un espacio razonablemente corto de tiempo, pudiendo romper este tipo de claves. No obstante, la

²⁹ SABLON, Kimberly; REYNOLDS. Peter J; FATEMI, Fredrik; GAMBLE. Sara; "A report from the cutting edge of physics, in layman's terms", Op. Cit.

³⁰ ROBINSON Kelly, "What is Public Key Cryptography?" Twilio, disponible en: <https://www.twilio.com/blog/what-is-public-key-cryptography> Fecha de la consulta 28/07/2019.

cantidad de qubits necesarios serían de decenas de miles de ellos, por lo que esta posibilidad no es todavía accesible en el presente momento tecnológico³¹.

Existen dos nuevos sistemas de aplicación en la computación cuántica llamados distribución de clave cuántica/*quantum key distribution* (QKD por sus siglas en inglés), y criptografía post-cuántica/*post-quantum cryptography* (PQC por sus siglas en inglés).

La QKD se basa en que las claves privadas que protegen la información se envían codificadas a través de fotones en estado cuántico de entrelazamiento con otros que quedan en el emisor. Si en algún momento se pretendiese leer en el camino el flujo de fotones con el que se transmite la información se alterarían los fotones entrelazados, con lo que se detectaría una intrusión. Además, la información que obtendría el hacker sería incompleta, resultando en una serie de errores en su lectura y en la del receptor³².

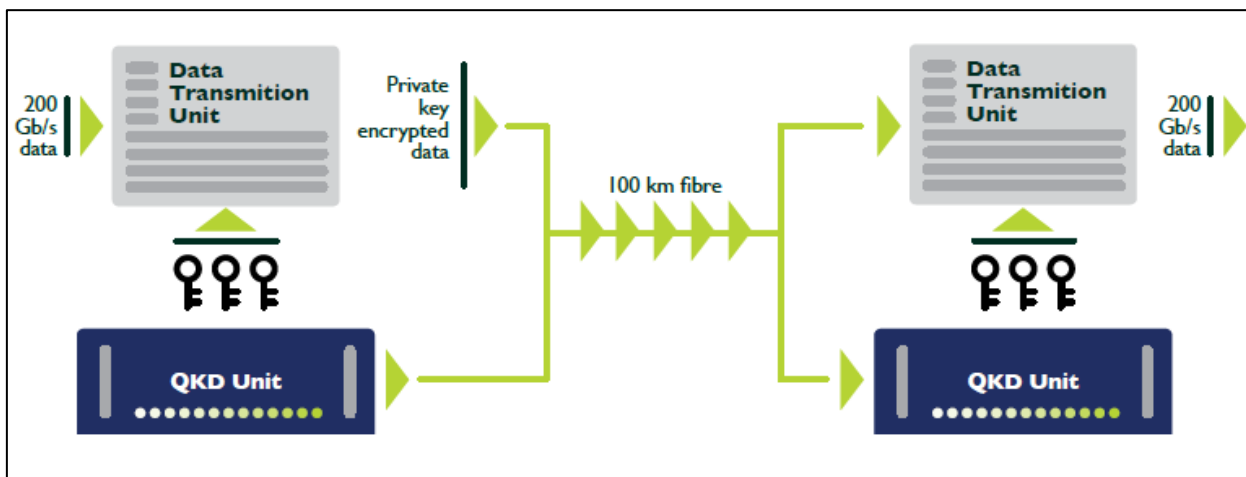


Figura 7. Generación cuántica de claves privadas de encriptamiento y transmisión de datos. Fuente: WALPORT, Mark y KNIGHT, Peter, *The Quantum Age: technological opportunities*, Government Office for Science, London, p.54.

La tecnología QKD es actualmente válida a través de fibra óptica, sin sobrepasar los 100 kilómetros o un haz de láser entre dos puntos. Las primeras aplicaciones se han efectuado en el establecimiento de redes seguras en áreas metropolitanas, pero como la señal cuántica no se puede clonar o amplificar sin errores, una posible solución podría ser el diseño de repetidores. Sin embargo, la atenuación de la señal es menor en el

³¹ WALPORT, Mark; KNIGHT, Peter, *The Quantum Age: technological opportunities*, Government Office for Science, London, p.50.

³² LEWIS, Adam M., TRAVAGNIN, Martino, *The Impact Of Quantum Technologies On The EU's Future Policies, PART 2, Quantum communications: from science to policies*, JCR Science for Policy Report, European Commission, 2018, pp. 7-8.

espacio, reduciéndose prácticamente a nada en el vacío extratmosférico, por lo que lo que una red de satélites QDK unida a estaciones en tierra podría ser la solución a escala global³³.

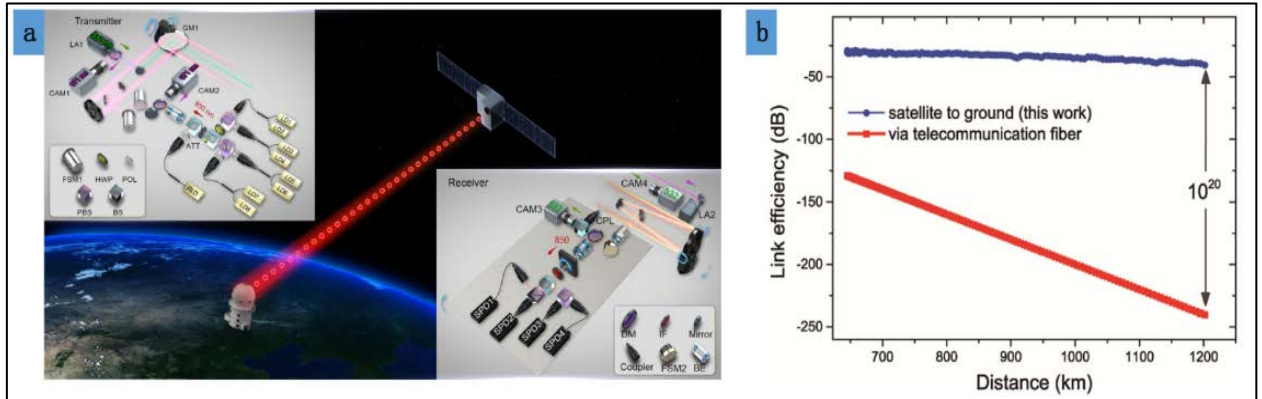


Figura 8: Comunicaciones QDK basadas en satélites: a) enlace QDK efectuado entre el satélite Micius y el observatorio de Xinglong; b) Eficiencias comparadas entre la transmisión QDK a través de satélite y fibra óptica. Fuente: ZHANG, Qiang, et al. Large scale quantum key distribution: challenges and solutions. Optics express, 2018, vol. 26, no 18, p. 24272.

La PQC trata de generar claves basadas en nuevos algoritmos que eviten que los futuros ordenadores cuánticos sean incapaces de descifrar. No obstante, cuanto más complicados sean estos algoritmos mayores recursos informáticos consumirán, por lo que se deberá tender a un equilibrio entre seguridad y eficacia³⁴.

Las revoluciones científicas y la carrera tecnológica

Haciendo un rápido repaso a la historia reciente, la aplicación de los conceptos atómicos y subatómicos al ámbito de la defensa comenzó muy rápidamente, sobre todo de la mano de los estadounidenses, que veían en ellos un modo de compensar el abrumador potencial convencional que les oponía el antiguo pacto de Varsovia. Por ello, en los años 50 lanzarían su *New Look Policy* basada en la disuasión nuclear.

³³ ZHANG, Qiang, et al. Large scale quantum key distribution: challenges and solutions. Optics express, 2018, vol. 26, no 18, p. 24266 y 24269-71.

³⁴ LEWIS, Adam M., TRAVAGNIN, Martino, The Impact Of Quantum Technologies On The EU's Future Policies, PART 2, Quantum communications: from science to policies, *JCR Science for Policy Report*, European Commission, 2018, p. 37.

No obstante, a finales de dicha década los soviéticos lanzarían el primer satélite, abriendo el dominio espacial al espectro del conflicto. En los años 70, una «segunda estrategia» norteamericana añadió la compensación tecnológica basándose en el desarrollo de los medios de inteligencia, vigilancia, armas guiadas de precisión y aeronaves no detectables³⁵.

En el entorno cibernético se podrían enumerar diversos hitos, pero uno de los más importantes sería la diseminación del «gusano Morris» a través de la incipiente Internet del año 1981, añadiendo al conflicto el dominio del ciberespacio³⁶.

Los desarrollos tecnológicos posteriores dieron como consecuencia una capacidad de combate que sorprendería al mundo cuando, en el año 1991, se produjo la Primera Guerra del Golfo. En esa ocasión, una fuerza relativamente reducida se enfrentó con un éxito abrumador al importante potencial militar de Irak. El resultado fue que, al comienzo de la «era de la información», los estadounidenses llegaron a demostrar que con una doctrina e instrucción adecuados, unidos a un importante desarrollo tecnológico, se podía producir una importante Revolución en los Asuntos Militares (RMA por sus siglas en inglés)³⁷. De hecho, las fuerzas de la coalición fueron capaces de actuar sobre las fuerzas enemigas con potencia, precisión y una relativa seguridad en un entorno de superioridad electromagnética y cibernética. Todo ello se consiguió además en unas condiciones en que los daños colaterales fueron especialmente minimizados, si se comparaban con los resultados de los conflictos bélicos anteriores³⁸.

La transición de un mundo unimultipolar hacia un orden multipolar, en el que el poder global estadounidense había sido contestado por potencias globales como China, Rusia u otras potencias regionales, llevó a los norteamericanos a plantearse lo que denominaron como «tercera estrategia de compensación» en el año 2014. En este caso,

³⁵ INGLESANT, Philip; JIROTKA, Marina; HARTSWOOD, Mark; Responsible Innovation in Quantum Technologies applied to Defence and National Security, *Engineering and Physical Sciences Research Council*, 2018, p.8.

³⁶ SHACKELFORD, Scott, "Morris worm: The accidental cyber attack that set the stage for modern cyber security threats", Scroll.in, disponible en: <https://scroll.in/article/900995/morris-worm-the-accidental-cyber-attack-that-set-the-stage-for-modern-cyber-security-threats>. Fecha de la consulta 13/07/2019.

³⁷ METZ, Steven; KIEVIT, James "Strategy and Revolution in Military Affairs: From Theory to Policy", US Army War College, 1995, pp. 1-2.

³⁸ Ibid.

las inversiones se centraron en tecnologías que aún son emergentes, como la robótica, sistemas autónomos, *big data*, miniaturización, inteligencia artificial o inteligencia híbrida hombre-máquina³⁹.

Sin embargo, muchas de las necesidades para llevar a cabo estos proyectos no son factibles con las tecnologías actuales o, cuanto menos, son demasiado costosas. Igualmente, a la vista de las posibilidades de la mecánica cuántica, se prevén otros desarrollos para los que las tecnologías presentes quedarían obsoletas.

La carrera por el liderazgo cuántico

En los momentos en los que las tecnologías emergentes hacen su aparición suelen ser los que apuestan por ellas los que se colocan en una posición de ventaja frente a los demás. Esto ha sido magistralmente previsto por China que, en un momento geopolítico en el que se encuentra en ascenso, ha sabido aprovechar un impulso científico del que sus rivales se han percatado más tarde.

El impulso tecnológico chino se debe entender dentro de un marco global en el que se pretende que los estadounidenses no puedan ejercer el control sobre la región del Pacífico Occidental, área de expansión natural china y cuyas comunicaciones son vitales para su desarrollo. Por ello, sus fuerzas armadas han experimentado una importante transformación hasta alcanzar la capacidad de disputar a EE. UU. el liderazgo regional, aunque para ello necesitaban colocarse en una posición de ventaja tecnológica.

³⁹ WORK, Robert O.; GRANT, Greg. *Beating the Americans at their Own Game: An Offset Strategy with Chinese Characteristics*, Center for a New American Security, Washington, DC, 2019, p. 13.

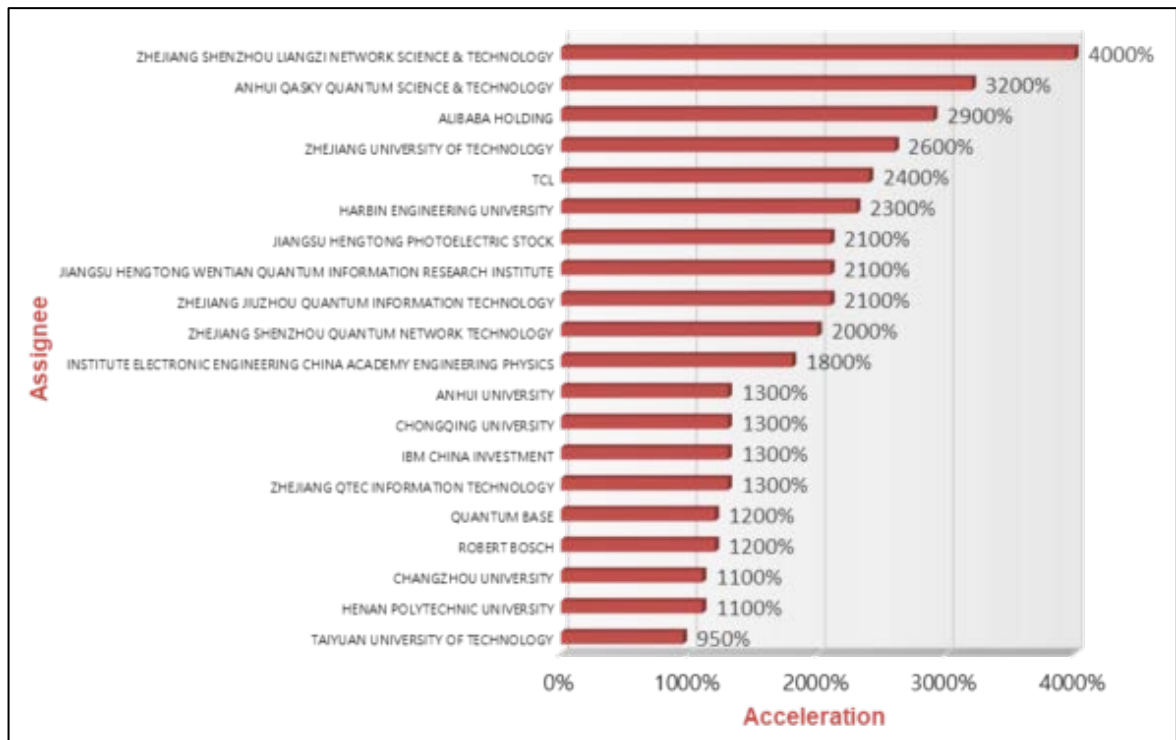


Figura 9: Índice de expansión en patentes cuánticas de las principales compañías del sector entre 2013 y 2018. Destaca el dominio chino y su imbricación con los EE.UU. a través de IBM, el posicionamiento británico con Quantum Base y el de Alemania con Robert Bosch. Fuente: Physis World, Mapping the commercial landscape for quantum technologies, 03 Dec 2018, disponible en: <https://physicsworld.com/a/mapping-the-commercial-landscape-for-quantum-technologies/> Fecha de la consulta 06/08/2019.

La fase primera de esta transformación consistió en contener el poder estadounidense desde una posición de inferioridad. La segunda fase se caracteriza por haber alcanzado una paridad tecnológica básica en municiones guiadas y «guerra centrada en redes», que permiten a China disuadir a los estadounidenses de realizar operaciones en el litoral. La tercera fase, con unas fuerzas armadas tecnológicamente superiores, habilitarán a los chinos para expulsar a las fuerzas norteamericanas de la primera cadena de islas del mar de la China y hacerles retroceder a la segunda, e incluso más atrás⁴⁰.

⁴⁰ WORK, Robert O.; GRANT, Greg. Beating the Americans at their Own Game: An Offset Strategy with Chinese Characteristics, Center for a New American Security, Washington, DC, 2019, p. 5.



Figura 10: Capas defensivas chinas contra el poder de proyección estadounidense en el Pacífico. Fuente: WORK, Robert O.; GRANT, Greg. *Beating the Americans at their Own Game: An Offset Strategy with Chinese Characteristics*, Center for a New American Security, Washington, DC, 2019, p. 9.

En este contexto, los chinos examinaron las posibilidades que les podía ofrecer la física cuántica si se ponían en cabeza de la carrera tecnológica, por lo que crearon una serie de estructuras coordinadas e invirtieron grandes sumas monetarias para llegar a ser los líderes en el sector sobre el año 2030. Igualmente desarrollaron un programa de captación de científicos, al frente del cual pusieron al profesor Jian-Wei Pan, quien es considerado «el padre de la cuántica» en China. En esta carrera, uno de los hitos más significativos se produjo en 2017, con el establecimiento de comunicaciones entre el satélite cuántico Micius y la estación terrestre de Xinglong⁴¹.

⁴¹ DEE, Vera, "China's Father of Quantum Superpower", China Business Times, Dec 20, 2018, disponible en: <https://en.businesstimes.cn/articles/106030/20181220/china-s-father-quantum-superpower.htm> Fecha de la consulta 03/08/2019.

Después del éxito alcanzado, los chinos anunciaron en 2017 la construcción de la instalación cuántica más grande del mundo en la ciudad de Hefei, donde se encuentran desarrollando sus nuevos ordenadores, así como otras tecnologías directamente relacionadas con el ámbito de la defensa⁴².

Continuando su carrera en el campo de las comunicaciones, a principios de 2018, se utilizó el satélite Micius como relé para intercambiar claves QKD entre Austria y varias localizaciones de China, asegurando el intercambio de claves criptográficas a más de 7 600 kilómetros de distancia. Otro importante experimento con el satélite ha sido establecer una comunicación segura por Internet entre varias redes cuánticas metropolitanas de fibra óptica⁴³.

Dentro del campo de la detección por imágenes, a finales de 2018, la Corporación de Electrónica y Tecnología China anunció haber fabricado un radar cuántico capaz de descubrir las aeronaves indetectables de los estadounidenses⁴⁴.

En cuanto al empleo de sensores, en la primavera de 2019 un acontecimiento significativo fue el descubrimiento de que China podría estar desarrollando un sistema de detección cuántica de submarinos basado en satélites. De ser así, los submarinos estadounidenses más modernos podrían ser descubiertos por las fuerzas chinas. Incluso otros submarinos, basados en propulsión independiente de aire (AIP), podrían ser detectados con esta tecnología⁴⁵.

Sobre la base de las consideraciones anteriores, no es de extrañar que el nuevo *Libro Blanco de la Defensa Nacional* chino tenga en cuenta el progreso tecnológico basado en la mecánica cuántica. El libro, publicado en julio de 2019, justifica el fuerte incremento

⁴² CHEN, Stephen, "China building world's biggest quantum research facility", 20 Jul 2018, Soth China Morning Post, disponible en: <https://www.scmp.com/news/china/society/article/2110563/china-building-worlds-biggest-quantum-research-facility> Fecha de la consulta 03/08/2019.

⁴³ University of Science and Technology of China, "Real-world intercontinental quantum communications enabled by the Micius satellite", January 19 2018, disponible en: <https://phys.org/news/2018-01-real-world-intercontinental-quantum-enabled-micius.html> Fecha de la consulta 05/08/2019.

⁴⁴ MCQUADE, Mike, "Cómo las armas cuánticas cambiarán las guerras del futuro", MIT Technology Review, 06 Febrero, 2019, disponible en: <https://www.technologyreview.es/s/10871/como-las-armas-cuanticas-cambiaran-las-guerras-del-futuro>

⁴⁵ Sebastien Roblin, This One New Piece of Technology Might Make Submarines Completely Obsolete, The national Interest, May 18, 2019, disponible en: <https://nationalinterest.org/blog/buzz/one-new-piece-technology-might-make-submarines-completely-obsolete-58357> Fecha de la consulta 04/08/2019.

presupuestario en defensa debido a que los EE. UU. estaban «participando en la innovación tecnológica e institucional buscando la absoluta superioridad militar»⁴⁶.

Mientras tanto, los estadounidenses han progresado a un ritmo más lento, ya que su importante sector privado se movilizaba con mayor cautela en este ámbito, debido muy posiblemente a las incertidumbres económicas que planteaba sin un fuerte respaldo institucional. Los EE. UU. no emitieron su estrategia en QIS (*Quantum Information Science*) hasta el año 2018, al tiempo que empezaban a ponerse en marcha los elementos de coordinación y se creaban nuevas estructuras⁴⁷.

Finalmente, en 2019, el congreso autorizó la liberación de 10 000 millones de dólares mientras que IBM, Intel, Microsoft y Google aceleraban el desarrollo de los ordenadores cuánticos. El principal nodo de coordinación para las investigaciones quedó instalado en Illinois, a cargo de la Universidad de Chicago, que también debe contratar a los más prestigiosos investigadores. Por su parte, el National Institute of Standards and Technology (NIST) se ha responsabilizado de poner en marcha un consorcio económico para expandir la industria cuántica norteamericana en los sectores de la informática, las comunicaciones y los sensores (todos ellos estrechamente ligados a la defensa). A pesar de estos esfuerzos, los estadounidenses se encuentran en situación de desventaja, ya que según el profesor David Awschalom, considerado uno de los más acreditados científicos estadounidenses en el campo de la física cuántica, crear un adecuado equipo humano les costará al menos 10 años⁴⁸.

A la vista de las posibilidades que estas nuevas tecnologías pueden ofrecer, otros Estados también se han concienciado de la necesidad de incorporarse a esta nueva revolución cuanto antes.

⁴⁶ JOSHI, Manoj, "China issues white paper on national defence: Picks up the US gauntlet", Observer Research Foundation, JUL 25 2019, disponible en: <https://www.orfonline.org/expert-speak/china-issues-white-paper-national-defence-picks-us-gauntlet-53392/> Fecha de la consulta 06/08/2019.

⁴⁷ BINKLEY, J. Stephen et al, National Strategic Overview for Quantum Information Science, *Executive Office of the President of the United States*, Washington D.C., September 2018.

⁴⁸ MAGNUSON, Stew, "SPECIAL REPORT: Defense Community Slow to Grasp Potential of Quantum-Based Tech", National Defence, 3/13/2019, disponible en: <https://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2019/3/13/defense-community-slow-to-grasp-potential-of-quantum-based-devices> fecha de la consulta 01/08/2019.

La Unión Europea se puso en marcha en el año 2016 a través de su *Quantum Manifesto*, en el que más de 3 400 instituciones y particulares exhortaban a la Unión a establecer un plan para asegurar el progreso europeo en el espacio cuántico. Aunque las iniciativas se centraban en las posibilidades de la aplicación de la mecánica cuántica al ámbito civil, se hacía referencia a la seguridad como una de las metas y se enfatizaba la necesidad que tiene el ámbito de la defensa de desarrollar sensores de tipo gravitacional⁴⁹. Desde la primavera de 2019, la UE ha calificado este proyecto como uno de sus «buques insignia» dotándole con un presupuesto de 1 100 millones de euros y estableciendo un consorcio de países donde figuran Francia, Alemania, Holanda, Suiza y España, representada por el Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO)⁵⁰.

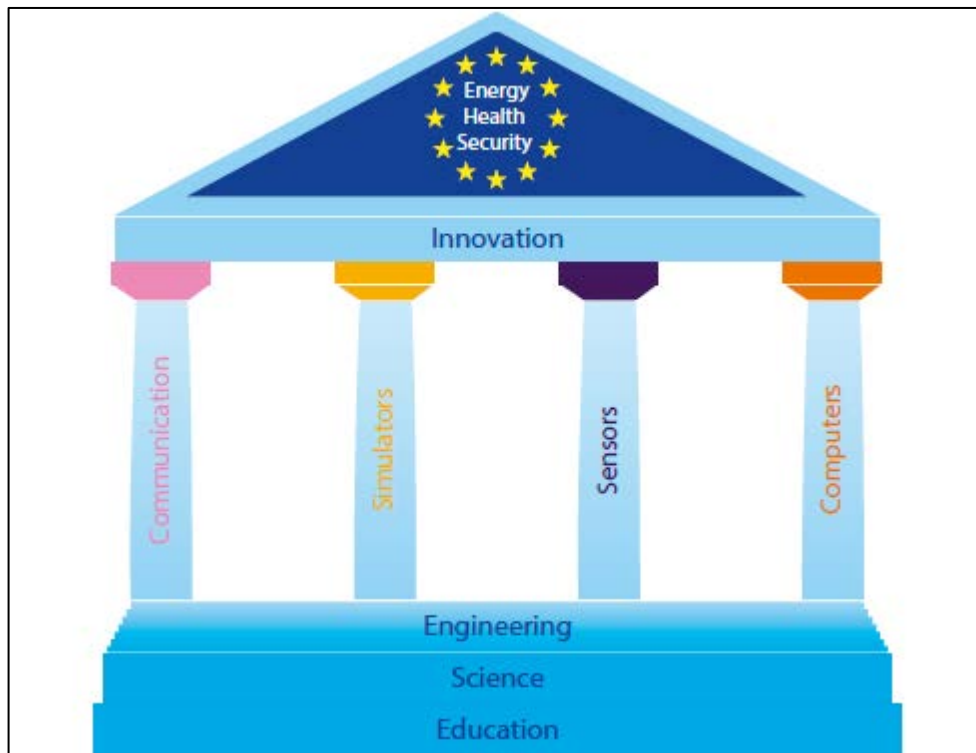


Figura 11: Elementos del programa europeo en tecnologías cuánticas. Fuente: European Union, Quantum Manifesto, May 2106, p. 11, disponible en: https://qt.eu/app/uploads/2018/04/93056_Quantum-Manifesto_WEB.pdf Fecha de la consulta 06/08/2019.

⁴⁹ European Union, Quantum Manifesto, May 2106, p. 17, disponible en: https://qt.eu/app/uploads/2018/04/93056_Quantum-Manifesto_WEB.pdf Fecha de la consulta 06/08/2019.

⁵⁰ Quantum Flagship, “Quantum Flagship Coordination and Support Action (CSA) "QFlag", disponible en: <https://qt.eu/about/qflag-quantum-flagship-coordination-and-support-action/> Fecha de la consulta 06/08/2019.

Dentro de la UE, los alemanes son líderes en tecnologías cuánticas. A su anterior programa anual de 100 millones de euros, a finales de 2018 decidieron añadir otros 650 millones adicionales hasta el año 2022. El programa llamado *Quantentechnologien: von den Grundlagen zum Markt* (tecnologías cuánticas: desde lo esencial hasta los mercados) está coordinado por el Ministerio federal de Educación e Investigación, pero también participan los de Defensa, Interior y Economía y cuenta con el apoyo de prestigiosas instituciones como las sociedades Max-Planck, Leibnitz, Helmholtz y Fraunhofer⁵¹. Entre otros objetivos, el programa contempla la no dependencia de tecnologías extranjeras, la competitividad de las industrias nacionales y la permanencia en Alemania del personal científico⁵².

Francia creó en 2017 la Comisión de Evaluación Científica N°47, dentro de la *Agence nationale de la recherche* (ANR), con dedicación exclusiva a la investigación cuántica. Sus laboratorios de Grenoble investigan la producción de un microprocesador cuántico (projet QuCube). En el ámbito privado, a través de la «Start-up» Muquans, está desarrollando dispositivos gravimétricos y relojes de alta precisión, al tiempo que la sociedad Quandela y la Universidad de París se han centrado en el ámbito de la computación cuántica⁵³.

Asimismo merece la pena destacar los esfuerzos, tanto desde el ámbito institucional como empresarial, que se están llevando a cabo en España. La compañía Telefónica, junto a Huawei y la Universidad Politécnica de Madrid se encuentran desarrollando un proyecto de comunicaciones seguras, basadas en QKD, para poder gestionar dentro de una misma red de fibra óptica las nuevas tecnologías sobre las infraestructuras existentes⁵⁴. En el ámbito científico, destacan las experiencias de entrelazamiento

⁵¹ En el Instituto Max Planck desarrolla su labor el científico español Juan Ignacio Cirac Sasturain, considerado una de las más prestigiosas autoridades mundiales en computación cuántica.

⁵² THOSS Andreas, “€650 million for quantum research in Germany”, Laser Focus World. Sep 28th, 2018, disponible en: <https://www.laserfocusworld.com/lasers-sources/article/16571451/650-million-for-quantum-research-in-germany> Fecha de la consulta 06/08/2018.

⁵³ Assemblée Nationale, Note N°13: Les technologies quantiques: introduction et enjeux, *Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques*. Mars 2019, p.4.

⁵⁴ Telefónica, “Telefónica, Huawei y la Universidad Politécnica de Madrid realizan una experiencia pionera a nivel mundial de aplicación de criptografía cuántica en redes ópticas comerciales para comunicaciones seguras”, 14 junio de 2018, disponible en: <https://www.telefonica.com/es/web/sala-de-prensa/-/telefonica->

cuántico entre las islas de Tenerife y La Palma, que han conseguido la teleportación de fotones a casi 150 kilómetros de distancia. Estas experiencias se desarrollaron dentro del ámbito de la Agencia Espacial Europea (ESA)⁵⁵.

Los chinos, a la par que desarrollaban el establecimiento de comunicaciones experimentales con Austria, también se interesaban por utilizar el Gran Telescopio Canarias (GRANTECAN) para sus experiencias cuánticas en el espacio. Gracias a las cualidades tecnológicas y la localización de esta instalación, se pueden desarrollar importantes experiencias en el ámbito de las comunicaciones intercontinentales⁵⁶.

Reino Unido ha sido uno de los Estados que más se ha preocupado por el tema, en la medida de sus posibilidades. En 2013, estableció un programa de 270 millones de libras para trasladar la investigación cuántica a los programas industriales⁵⁷. En verano de 2019, el Gobierno británico anunció la inversión de 1 000 millones de libras para colocar al Reino Unido al mismo nivel que chinos y norteamericanos⁵⁸. Parece ser que la estrategia británica no es entrar en competición con los dos grandes líderes, sino abrirse paso en el sector a través de brechas que no hayan sido del todo explotadas por estos.

Otros Estados se encuentran igualmente muy interesados en el tema. Australia, probablemente por su proximidad a China, siente una gran preocupación acerca de este tipo de tecnología. El Ministerio de Defensa australiano ha realizado una inversión de 6,6 millones de dólares para financiar tres proyectos de un total de 11. Los estudios en el ámbito de la defensa se realizarán en la Universidad de Adelaida, a cargo del profesor Andre Luiten, y consistirán en sensores para la detección de submarinos, radares

[huawei-y-la-universidad-politecnica-de-madrid-realizan-una-experiencia-pionera-a-nivel-mundial-de-aplicacion-de-criptografia-cuantica-en-re](#) Fecha de la consulta 10/08/2019.

⁵⁵ European Space Agency (ESA): "Un experimento de la ESA en Tenerife bate el record mundial de teleportacion cuántica", 6 septiembre 2012, disponible en: http://www.esa.int/es/ESA_in_your_country/Spain/Un_experimento_de_la_ESA_en_Tenerife_bate_el_record_mundial_de_teleportacion_cuantica Fecha de la consulta 06/08/2019.

⁵⁶ ABC Canarias: "China elige Canarias para el «teletransporte» entre continentes", 30/11/2017, disponible en: https://www.abc.es/espana/canarias/abci-china-elige-canarias-para-experimentar-teletransporte-entre-continentes-201711280014_noticia.html Fecha de la consulta 06/08/2019.

⁵⁷ WALPORT, Mark y KNIGHT, Peter, The Quantum Age: technological oportunities, Op. Cit. p. 57.

⁵⁸ Department for Business, Energy & Industrial Strategy, UK Research and Innovation, SKIDMORE Chris MP, "Press release: £1 billion investment makes UK a frontrunner in quantum technologies", GOB.UK, disponible en: <https://www.gov.uk/government/news/1-billion-investment-makes-uk-a-frontrunner-in-quantum-technologies> Fecha de la consulta 06/08/2019.

cuánticos para la detección de aeronaves y relojes para la sincronización de los sistemas satelitales⁵⁹.

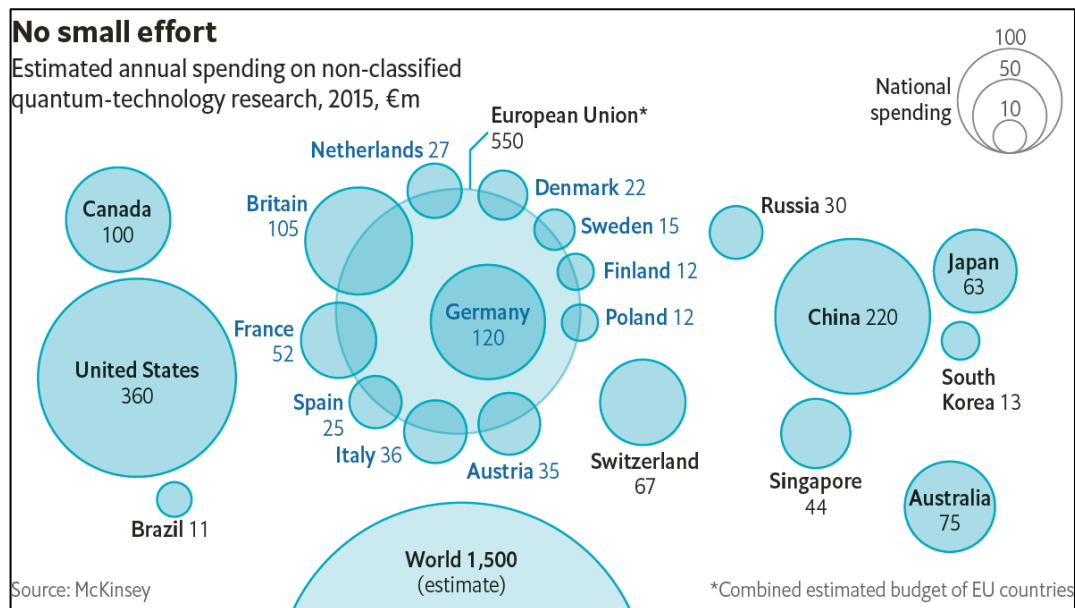


Figura 12: Inversión anual en investigación cuántica en proyectos no clasificados. Fuente: GILL Patrick, “Quantum technology is beginning to come into its own”, The Economist <https://www.economist.com/news/essays/21717782-quantum-technology-beginning-come-its-own/> Fecha de la consulta 06/08/2019.

Igualmente, la situación geopolítica de Israel le obliga a mantenerse en una posición de liderazgo en este ámbito, aunque su preocupación se centra por el momento en la computación cuántica⁶⁰. Canadá es también otro de los países altamente focalizados en esta área de la cuántica, siendo uno de los pioneros en el sector a través de la compañía D-Wave Systems, que ha sido la primera en comercializar un ordenador cuántico, teniendo como clientes a instituciones y compañías tan importantes como Google, NASA y Lockheed Martin⁶¹. El haber comenzado la investigación en 1984 de la mano del padre de la mecánica cuántica canadiense, Gilles Brassard, ha permitido que los canadienses

⁵⁹ SKUJINS Angela, “Australian Defence looks to quantum mechanics for new technologies”, AuManufacturing, disponible en: <https://www.aumanufacturing.com.au/australian-defence-looks-to-quantum-mechanics-for-new-technologies> Fecha de la consulta 06/08/2019.

⁶⁰ WOOLF Yitz, “Israel Se Une A La Carrera Para Convertirse En Una Superpotencia En Tecnología Cuántica”, Dic 18, 2018, Noticias de Israel, disponible en: <https://israelnoticias.com/tecnologia/israel-superpotencia-tecnologia-cuantica/> Fecha de la consulta 06/08/2019.

⁶¹ FRATTO, Natalie, “Why Canada Will Win the Quantum Race”, September 21st 2018, Hackernoon, disponible en: <https://hackernoon.com/why-canada-will-win-the-quantum-race-ba705bfecab> Fecha de la consulta 06/08/2019.

posean un importante potencial humano en este sector, focalizado en las universidades de la Columbia Británica, Waterloo y Sherbrooke. Además el sector público trabaja institucionalmente junto con el privado, destacando la ya citada D-Wave Systems⁶².

La revolución cuántica y la Revolución en los Asuntos Militares

Las Revoluciones en los Asuntos Militares (RMA por sus siglas en inglés) han tenido lugar debido a profundos cambios que se han producido en las fuerzas armadas, considerando varios autores que hasta ahora han existido siete acontecimientos de esta índole a lo largo de la historia. Las principales revoluciones estarían basadas en la aparición del ejército profesional, la formación de ejércitos de masas de la época napoleónica, la fabricación en cadena de armamentos durante la revolución industrial, el carro de combate, el arma nuclear, la era de la información y, por último, la aparición de la inteligencia artificial y su aplicación a campos como las armas autónomas⁶³.

A pesar de lo anterior, la noción de RMA parte del mariscal soviético Nikolai V. Ogarkov, quien en los años 70 percibió que una «revolución técnico-militar se estaba produciendo» principalmente en el ámbito de la informática y las armas guiadas de precisión. Este concepto, que nació como una teoría, tuvo la oportunidad de ser llevado a la práctica durante la Primera Guerra del Golfo en el año 1991⁶⁴.

Tras el conflicto del Golfo, Andrew Krepinevich llegaría a un mayor detalle cuando describió que una revolución militar sucede cuando «la aplicación de nuevas tecnologías a un significativo número de sistemas de armas, en conjunción con conceptos operativos innovadores y adaptaciones organizativas, modifican las propiedades y la conducción del conflicto. Esto se caracteriza por un dramático incremento, a veces de un orden de magnitud o más, de la potencia de combate y efectividad de las fuerzas armadas»⁶⁵.

⁶² SUSSMAN, Ben, et al. Quantum Canada. *Quantum Science and Technology*, 2019, vol. 4, no 2, pp. 020502-020504.

⁶³ GUINEA, Ángel, Próxima Revolución en los Asuntos Militares. Los Sistemas de Armas Autónomos (AWS), *Revista Ejército* n.º 937, mayo 2019, p. 36.

⁶⁴ CORRELL, John T., "The Counter-Revolution in Military Affairs", *Air Force magazine*, JULY 2019, disponible en: <http://www.airforcemag.com/MagazineArchive/Pages/2019/July%202019/The-Counter-Revolution-in-Military-Affairs.aspx> Fecha de la consulta 07/08/2019.

⁶⁵ KREPINEVICH, Andrew F., Cavalry to Computer: The Pattern of Military Revolutions, *The National Interest*, N° 37, Fall 1994, p. 30

Las RMA se producen al finalizar un periodo de latencia o estancamiento de conceptos, organizaciones y tecnologías. Normalmente no aparecen por sí mismas, sino que son parte de cambios conceptuales, sociales, políticos, económicos y tecnológicos. En este nuevo entorno, debido a que los Estados satisfechos con el estatus que poseen no ven la necesidad de cambiarlo, las RMA suelen ser iniciadas por otros actores motivados por el temor, la inferioridad o la necesidad.

En toda RMA se produce un momento de «masa crítica» que consiste en la confluencia de los nuevos conceptos, organizaciones y tecnologías. Para que se produzca este punto crítico debe existir algún factor que proteja, desde sus comienzos, el proceso de cambio evolutivo. En dicho factor suele encontrarse el desconocimiento de los adversarios, al comienzo de la RMA, del riesgo potencial que esta representa. También puede constituirse como factor la pérdida de tiempo en proyectos irrelevantes, que no conducen a la solución del problema⁶⁶.

Los periodos inmediatamente posteriores al punto de masa crítica suelen ser especialmente tendentes al conflicto, ya que los antiguos actores hegemónicos no desean que el actor revisionista alcance sus objetivos. Además, este último desea comprobar la efectividad de su nueva situación, al tiempo que tiende a cambiar su estatus anterior⁶⁷.

Una vez que el nuevo actor ha conseguido una posición de ventaja, se suele producir una respuesta por parte de los actores que no quieren perder su posición dentro de un orden establecido. Estas respuestas, no excluyentes entre sí, pueden ser de tipo simétrico si tienden a emular los logros ya alcanzados por la nueva potencia. En cambio, la respuesta es asimétrica si la intención es encontrar el modo de neutralizar las capacidades del nuevo actor. Finalmente, las RMA alcanzan su punto culminante cuando la potencia emergente se encuentra satisfecha con el estatus alcanzado y los riesgos de

⁶⁶ METZ, Steven; KIEVIT James, *Strategy and the Revolution in Military Affairs: From Theory to Policy*. DIANE Publishing, 1995, p.15.

⁶⁷ Essays, UK. "Revolution in Military Affairs", November 2018, disponible en: <https://www.ukessays.com/dissertation/examples/history/revolution-in-military-affairs.php?vref=1> Fecha de la consulta 08/08/2019.

continuar con el cambio superan a los beneficios. En estas situaciones, los Estados que han ejercido la transformación buscan consolidar su posición de ventaja⁶⁸.

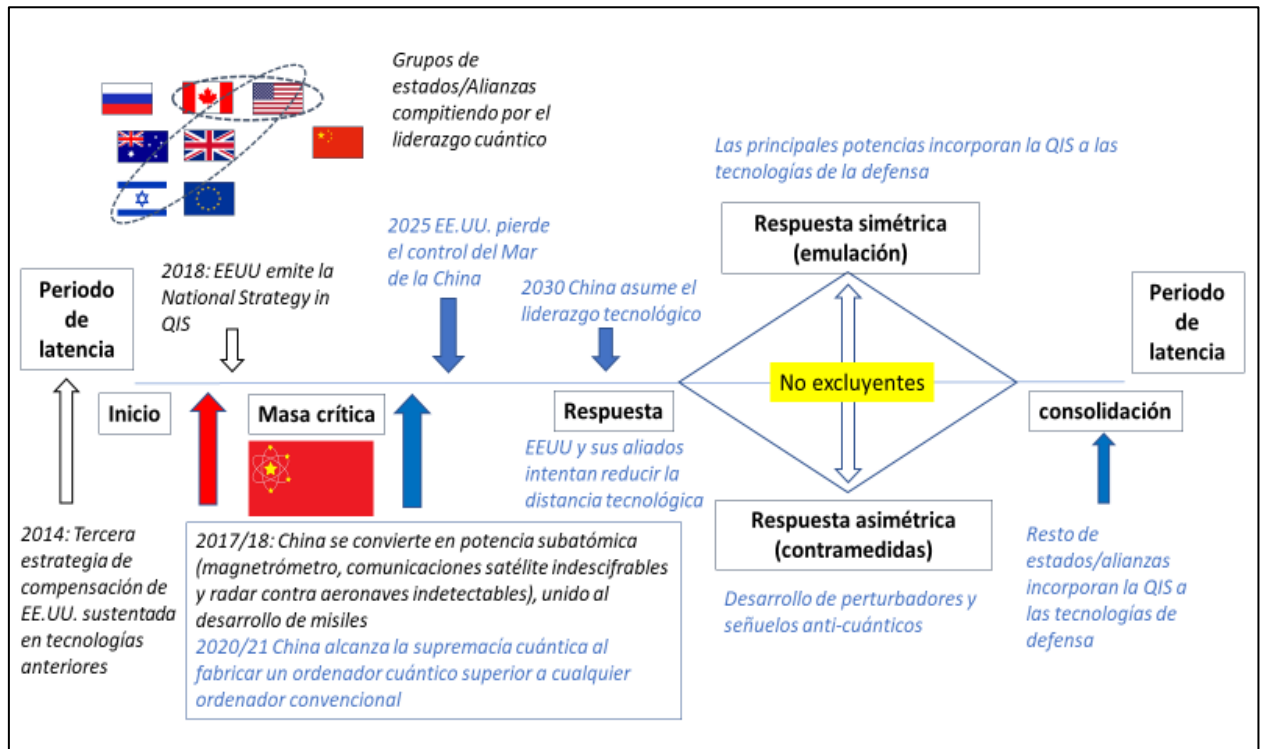


Figura 13: Posible patrón evolutivo de la RMA cuántica. Fuente: Elaboración propia a partir de la documentación aportada (en color negro se relatan los hechos ya acontecidos y en color azul los previsibles o anunciados como intenciones).

Desde los avances tecnológicos estudiados durante la guerra del Golfo, China ha planificado pacientemente una estrategia de «contra-intervención», que ha culminado con sus actuales capacidades A2/AD, aprovechando las tecnologías de la segunda estrategia de compensación norteamericana. Cuando EE. UU. planteó la ya referida tercera estrategia de compensación, dentro de la séptima RMA, esta dependía en una gran medida de la reacción de sus posibles adversarios. Los estadounidenses habían confiado en su potencial para la innovación tecnológica y en que este iba a mantener una brecha que sus oponentes no podían alcanzar⁶⁹.

⁶⁸ METZ, Steven; KIEVIT James, *Strategy and the Revolution in Military Affairs*, Op. Cit. p. 17.

⁶⁹ KANIA, Elsa, "From the Third U.S. Offset to China's First Offset", Real Clear Defense, April 06, 2017, disponible en: https://www.realcleardefense.com/articles/2017/04/06/from_the_third_us_offset_to_chinas_first_offset_11119.html Fecha de la consulta 07/08/2019.

Sin embargo, el retroceso estadounidense en inversiones tecnológicas dio lugar a un «déficit de innovación»⁷⁰, que se ha traducido en que la tercera estrategia de compensación se vea sobremanera afectada, por lo que el anterior vicepresidente de la junta de jefes de Estado mayor, general Paul Joseph Selva, sostenía que esta estrategia «más que una respuesta es una pregunta»⁷¹. Dicha opinión se sustenta en que la aproximación del departamento de defensa de EE. UU. hacia las tecnologías disruptivas ha sido la de realizar pequeñas apuestas (irrelevantes), con lo que se corre el riesgo de que la financiación sea insuficiente para las tecnologías más críticas. Por otra parte, la desaparición de la escena política del anterior secretario de Estado de defensa, general (Ret.) James Mattis, no ha permitido que este haya podido continuar impulsando la investigación en las nuevas capacidades operativas que les proporcionasen la ventaja tecnológica sobre sus adversarios⁷².

En contraste con lo anterior, los esfuerzos chinos han sido bien planificados e impulsados por su administración a través del decimotercer plan quinquenal de innovación científica y tecnológica, que da una especial prioridad a la QIS dentro de las «tecnologías clave para desarrollar y salvaguardar la seguridad nacional y apoyar la lucha contra el terrorismo»⁷³. Derivado de este plan genérico, el Ministerio de Ciencia y Tecnología emitió una serie de directrices para el desarrollo de proyectos clave, haciendo igualmente énfasis en la seguridad y la QIS⁷⁴.

⁷⁰ JOANNOPOULOS, Jhon; PETERS, William A., Defense Technology: We face sophisticated competitors and new terrorist threats. Yet there are opportunities to maintain U.S. leadership and, especially, to better protect our war fighters in the field, en *THE FUTURE POSTPONED Why Declining Investment in Basic Research Threatens a U.S. Innovation Deficit*, Massachusetts Institute of Technology, 2015, pp. 22-24.

⁷¹ ALLEN, William, "Innovation Superiority Is Key to Recapturing U.S. Military Might", SIGNAL, March 1, 2017, disponible en: <https://www.afcea.org/content/Article-innovation-superiority-key-recapturing-us-military-might> Fecha de la consulta 08/08/2019.

⁷² WOOD, Dakota L. *Rebuilding America's Military: Thinking about the Future*. Heritage Foundation, 2018. p. 13.

⁷³ 国务院关于印发/ Consejo de Estado, "十三五"国家科技创新规划的通知/Plan Nacional de Innovación Científica y Tecnológica del "13º Plan Quinquenal", disponible en: http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/08/content_5098072.htm. Fecha de la consulta 08/08/2019.

⁷⁴ 科技部/Ministerio de Ciencia y Tecnología, 科技部关于发布国家重点研发计划纳米科技等重点专项2016年度项目申报指南的通知/Aviso del Ministerio de Ciencia y Tecnología sobre la emisión de las Directrices para la solicitud de proyectos nacionales de 2016 para proyectos especiales clave como la nanotecnología para programas nacionales clave de I + D, disponible en: http://www.most.gov.cn/mostinfo/xinxifenlei/fgzc/gfxwj/gfxwj2016/201602/t20160214_124104.htm Fecha de la consulta 08/08/2019.

Parece lógico que China haya planificado también su propia estrategia de compensación, para que esta transferencia de tecnologías desde el ámbito civil sea rápidamente asimilada al de la defensa. La base tecnológica del cambio podría encontrarse en la aplicación de la segunda revolución cuántica a la séptima RMA.

Este cambio disruptivo en la tecnología deberá llevar aparejados otros cambios. Se vislumbra que las costosas y escasas plataformas de combate muy difíciles de reemplazar, a las que tienden los ejércitos modernos, no tendrían grandes posibilidades de supervivencia en el nuevo entorno operativo. Sin la ventaja de ser indetectables deberían enfrentarse a enjambres de plataformas autónomas e inteligentes, relativamente baratas, conectadas entre sí y con una velocidad y volumen de destrucción antes nunca visto⁷⁵.

La nueva situación además provocará nuevos cambios organizativos, modificando la tradicional tendencia a la reducción de los ejércitos y provocando la aparición de nuevos conceptos doctrinales, de aplicación al nuevo entorno. Por tanto, la RMA cuántica podría extenderse a todo el ámbito global, ya que se están dando las condiciones para ello.

Conclusiones

La segunda revolución cuántica ya se encuentra en marcha y se aplicará en todos los órdenes de la vida moderna. En esta ocasión, es el sector civil el que se ha constituido como motor del nuevo salto tecnológico, lo que quiere decir que la transferencia de tecnologías a escala global será mucho más rápida y que existirán nuevos actores implicados aparte de los Estados, dando paso a la intervención de organizaciones, grupos e individuos, con diferentes intereses, ideales e ideologías.

Aquellos Estados, como China, que no han perdido la detallada planificación y la dirección de las investigaciones y controlan el campo tecnológico e industrial, posiblemente sean las que obtengan mayores ventajas. Estas ventajas ya están siendo aprovechadas para marcar una brecha tecnológica con sus competidores más inmediatos, que han reaccionado tarde al impulso cuántico chino.

⁷⁵ BROSE, Christian. The New Revolution in Military Affairs: War's Sci-Fi Future. *Foreign Affairs*, 2019, vol. 98, p. 123.

La aplicación de la segunda revolución cuántica al ámbito de la defensa va a provocar una verdadera Revolución en los Asuntos Militares. Para ello es necesaria la promoción desde el ámbito gubernamental, de modo que la transferencia de tecnologías al ámbito militar se produzca adecuadamente, dotando a las fuerzas armadas de cada país o alianza de unos medios que necesita para no caer en la obsolescencia.

Las nuevas fuerzas armadas van a necesitar de profundos cambios, que van mucho más allá del concepto de la «tercera estrategia de compensación» estadounidense, del que han bebido muchos de los modernos ejércitos occidentales.

Uno de los cambios más importantes debe ser el de mentalidad, ya que la inteligencia artificial traerá consigo una velocidad de pensamiento y una abrumadora gestión de datos, que anteriormente no eran imaginables. Sin embargo, siempre se necesitará la capacidad de razonamiento, ética e imaginación que puede aportar el ser humano. Por ello la hibridación entre el pensamiento del hombre y la capacidad de razonamiento y gestión de grandes volúmenes de información (big data) de la máquina, deberán ser una característica fundamental en el planeamiento y conducción de las operaciones.

Es muy posible que las organizaciones clásicas de las fuerzas armadas en ejércitos terrestres, marinas y fuerzas aéreas queden superadas en un relativamente corto espacio de tiempo, sumándose a estas otras nuevas fuerzas independientes, como bien podrían ser las espaciales y las de ciberdefensa. No obstante, es posible que el carácter conjunto del nuevo entorno operacional obligue a que las estructuras orgánicas ya contemplen de antemano elementos humanos y materiales que les permitan la interconexión con estructuras de otros ejércitos cuando se constituyan las organizaciones operativas.

Las actuales organizaciones de los ejércitos se encuentran basadas en pocos efectivos y plataformas altamente costosas y tecnificadas, la mayoría de ellas operadas por personal. Los nuevos medios de localización e identificación, unidos a la precisión y velocidad de los nuevos sistemas de armas, pondrán en peligro la capacidad de supervivencia de estas escasas y costosas plataformas. Además hay que tener en cuenta que es factible, con las nuevas tecnologías, la fabricación de plataformas baratas no tripuladas y conectadas entre sí a modo de enjambre, por lo que la supervivencia de las actuales se encontraría aún mucho más comprometida.

Esta situación deberá llevar a un cambio estructural en la orgánica de las unidades actuales, que deberán ser más y de mayor entidad para asegurar que la destrucción de algunas plataformas no deriven en una excesiva merma de su potencia de combate. Es posible que se necesiten, junto a las plataformas actuales, otras de menor entidad, pero con una firma idéntica en el campo de batalla, para que los medios de destrucción enemigos se vean saturados ante una gran presencia de blancos. Igualmente muchas de las plataformas sacrificables podrían ser no tripuladas, protegiendo al combatiente, que será de difícil reposición debido a sus necesarias cualidades humanas y formación.

Del mismo modo, las estructuras orgánicas deberán contar desde un primer momento con plataformas autónomas de combate, que puedan operar de forma independiente, automática o híbrida junto con los combatientes humanos que constituyan las unidades. Estas podrán emplearse como enjambres sustituibles, por su relativo bajo coste, y utilizarse en misiones de mayor riesgo o en condiciones más extremas.

Es igualmente posible que la logística experimente una importante transformación, ya que al incrementarse el número de sistemas autónomos en el campo de batalla estos demanden una importante cantidad de energía, la cual es posible que no sea suficiente con combustibles fósiles. Igualmente, el mantenimiento y reparación de sofisticados equipos necesitará la creación de estructuras especialmente diseñadas para ello.

Como reflexión final de este documento, podríamos concluir que la nueva revolución cuántica conllevará en un futuro próximo una importante Revolución en los Asuntos Militares. Aquellos ejércitos que se adapten a ella tendrán la capacidad de ser operativos en las próximas décadas, mientras que aquellos que no sufran estas profundas transformaciones quedarán en una generación anterior de varios órdenes de magnitud inferiores. Uno de los ejemplos más descriptivos de enfrentamiento entre fuerzas armadas de diferentes generaciones fue la Primera Guerra del Golfo, donde los resultados fueron más que evidentes.

*José Ignacio Castro Torres**

COR.ET.INF.DEM, Analista del IEEE

Doctor en Estudios de Paz y Seguridad Internacional

Máster PR en Instalaciones Radiactivas y Nucleares