

Universidades coordinadoras



MÁSTER EN ESTUDIOS DE LA CIENCIA, LA TECNOLOGÍA Y LA INNOVACIÓN

DEFENDIDO EN LA UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Curso 2021-2022

SOCIEDAD DEL RIESGO Y COMPUTACIÓN CUÁNTICA

AUTOR:

VALENTÍN
GARCÍA
SOUTO

Fdo.



MARTA ISABEL
GONZÁLEZ
GARCÍA

Fdo.



TUTORES:

FERNANDO
JIMÉNEZ
SÁEZ

Fdo.



JON MIKEL
ZABALA
ITURRIAGAGOITIA

Fdo.



Sopela (Bizkaia), 11 / 06 / 2022

Contenido

Título	3
Resumen	3
Palabras clave	3
Title	4
Abstract.....	4
Key words.....	4
1. Introducción	5
2. Sociedad del conocimiento y sociedad del riesgo	7
2.1. Sociedad del conocimiento.....	7
2.2. Sociedad del riesgo	7
2.3. El riesgo y la adopción de la innovación	9
3. Computación clásica, cuántica y simulación.....	10
3.1. Computación clásica versus computación cuántica	10
3.2. Simulación cuántica	12
4. Factores del entorno y riesgos previsibles.....	13
4.1. Factores Políticos	14
4.1.1. Gobierno.....	14
4.1.2. Clima político.....	14
4.1.3. Conflictos.....	15
4.1.4. Políticas gubernamentales	15
4.1.5. Elecciones.....	15
4.1.6. Programas de financiación	15
4.1.7. Tratados comerciales	16
4.1.8. Intervención del estado y poder de las corporaciones.....	16
4.2. Factores Económicos	16
4.2.1. Nivel de producción	16
4.2.2. Política monetaria	17
4.2.3. Situación económica	17

4.2.4. Tipo de cambio	17
4.2.5. Tendencias económicas	17
4.2.6. Ciclos económicos	18
4.2.7. Políticas fiscales.....	18
4.3. Factores sociales y culturales.....	18
4.3.1. Distribución de la renta.....	18
4.3.2. Situación demográfica.....	19
4.3.3. Estilo de vida	19
4.3.4. Crecimiento de la población	19
4.3.5. Barreras culturales	19
4.4. Factores Tecnológicos.....	20
4.4.1. Acceso a la tecnología	20
4.4.2. Incentivos tecnológicos.....	20
4.4.3. Niveles de innovación	20
4.4.4. Cambios tecnológicos.....	21
4.4.5. Avances tecnológicos	21
4.5. Factores Ecológicos.....	21
4.5.1. Clima.....	21
4.5.2. Normativa ambiental	21
4.5.3. Cambios climáticos.....	22
4.5.4. Recursos energéticos	22
4.6. Factores Legales.....	22
4.6.1. Normativas propias del sector	22
4.6.2. Regulaciones sobre empleo	23
4.6.3. Estabilidad gubernamental	23
5. Conclusiones	23
6. Limitaciones y asunciones.....	29
Referencias.....	30

Título

Sociedad del riesgo y computación cuántica.

Resumen

Resulta difícil dudar de la afección que las tecnologías cuánticas van a tener en la evolución de la humanidad y de su relación con el medio natural. Más allá de las conclusiones hechas públicas tras el *World Economic Forum 2021*, en las que las tecnologías cuánticas se definieron como, quizás, las más interesantes del siglo XXI, día a día se producen nuevas investigaciones científicas que las relacionan con los aspectos más relevantes de nuestras vidas. Adicionalmente, su afección transversal a otras tecnologías o áreas de conocimiento podrán suponer importantes cambios en el devenir tecnocientífico y socioeconómico de la población en general.

Está además comúnmente aceptado que cada avance en la frontera sin fin de la ciencia puede producir riesgos. El desarrollo de la sociedad del conocimiento se empareja con la evolución de la sociedad del riesgo y, normalmente, cuando mayor conocimiento hay disponible mayor es también el nivel de riesgo al que se debe hacer frente.

La principal hipótesis planteada en este estudio consiste en que, si bien la computación y la simulación cuánticas producirán importantes beneficios para la humanidad y el medio natural, su desarrollo y uso adecuados podrían verse condicionados negativamente, es decir, estarían amenazados, por los factores políticos, económicos, socioculturales, tecnológicos, medioambientales y legales del entorno externo. La metodología utilizada para corroborar la hipótesis ha sido el análisis PESTEL del entorno externo.

El objetivo del análisis realizado consiste tanto en identificar los riesgos que previsiblemente podrían surgir del entorno externo -las amenazas-, como en proponer acciones para gestionarlos adecuadamente.

El resultado ha sido la identificación de treinta y dos riesgos potenciales y otras tantas propuestas de acción. Se trata entonces de adelantarse para poder evitar los riesgos o, cuando menos, mitigarlos. En resumen, de intentar asegurar que tanto el planeta como quienes lo habitamos aprovechemos al máximo los beneficios que las tecnologías cuánticas pueden llegar a ofrecernos.

Palabras clave

Computación cuántica, tecnologías cuánticas, simulación cuántica, sociedad del conocimiento, sociedad del riesgo, cultura científica, alfabetización científica.

Title

Risk society and quantum computing.

Abstract

It is hard to doubt the impact that quantum technologies will have on the evolution of humanity and its relationship with the natural environment. Aside from the conclusions made public after the 2021 World Economic Forum, in which quantum technologies were defined as perhaps the most interesting technologies of the 21st century, new scientific research is being carried out every day that relates them to the most relevant aspects of our lives. In addition, its transversal effect on other technologies or areas of knowledge could lead to important changes in the techno-scientific and socio-economic future of the population in general.

It is also commonly accepted that every advance in the endless frontier of science can pose risks. The development of the knowledge society goes hand in hand with the evolution of the risk society and, normally, the more knowledge that is available, the higher the level of risk that must be faced.

The main hypothesis put forward in this study is that, although quantum computing and quantum simulation will produce important benefits for humanity and the natural environment, their proper development and use could be negatively influenced, in other words, threatened, by the political, economic, socio-cultural, technological, environmental and legal factors of the external environment. The methodology used to corroborate the hypothesis has been the PESTEL analysis of the external environment.

The objective of the analysis is both to identify the risks that could foreseeably arise from the external environment - the threats - and to propose actions to manage them appropriately.

The result has been the identification of thirty-two potential risks and as many proposals for action. The aim is to anticipate in order to avoid risks or, at least, to mitigate them. In short, it is about trying to ensure that both the planet and those of us who inhabit it make the most of the benefits that quantum technologies can offer us.

Key words

Quantum computing, quantum technologies, quantum simulation, knowledge society, risk society, scientific culture, scientific literacy.

1. Introducción

Parece difícil dudar que las tecnologías cuánticas van a afectar profundamente a la sociedad durante las próximas décadas. De hecho, el *World Economic Forum* las identificó en su foro de Davos de 2021 como “quizás, las tecnologías más interesantes del siglo XXI” .

Desde que se formuló la teoría de la física cuántica a principios del siglo XX, hemos encontrado explicación a fenómenos que ocurren a escala microscópica y que no era posible comprender desde la perspectiva de la física clásica newtoniana. El comportamiento de moléculas, átomos y electrones, entre otros, no se ajusta a las leyes de la física macroscópica tradicional. Su funcionamiento obedece a una nueva mecánica que rige un conjunto de sucesos inesperados que no son perceptibles a la vista humana, pero cuyo conocimiento nos están ayudando a entender y a gobernar aspectos del medio natural de los que ni tan siquiera éramos conscientes con anterioridad. Fenómenos cuánticos como la superposición, el entrelazamiento, el teletransporte, la dualidad onda-partícula y el colapso por observación han modificado radicalmente nuestra manera de comprender el medio físico y han supuesto un importante impulso a la actividad científica, desplazando con firmeza la frontera sin fin de la ciencia (Otero Carvajal, 2007).

La aplicación de la mecánica cuántica fruto de la actividad científica durante la segunda mitad del siglo XX ha proporcionado avances muy relevantes como la utilización masiva del láser, la fibra óptica, el GPS o las imágenes por resonancia magnética, por citar algunos. Por otra parte, actualmente somos capaces de utilizar más profundamente el conocimiento adquirido durante las décadas anteriores y están emergiendo a distinto ritmo novedosas tecnologías cuánticas que probablemente van a provocar importantes disrupciones en el mundo conocido. Entre las distintas tecnologías cuánticas emergentes, es difícil cuestionar que la que más pueda afectarnos a medio plazo, debido a su grado de madurez actual y a su potencial afección, sea la computación cuántica. Los avances en la capacidad de procesamiento cuántico son especialmente crecientes año tras año, habiendo pasado desde los 27 qubits o bits cuánticos del primer ordenador cuántico comercial, anunciado por IBM en 2019, hasta los 4.158 qubits recientemente anunciados por este mismo fabricante para la versión Kookaburra de su procesador cuántico, que verá la luz en 2025 (Gambetta, 2022).

Se espera que la computación cuántica afecte al resto de las tecnologías emergentes (tanto las cuánticas como las no cuánticas), si bien, a día de hoy, ya se empieza a comprender el impacto que podrá tener en ámbitos como la ciberseguridad y la inteligencia artificial. Adicionalmente, la simulación cuántica parece tener también un enorme potencial dada su capacidad de emular sistemas físicos que, si bien no pueden ser muy complejos en la actualidad, no se vislumbra por qué no podrán complicarse hasta el extremo en el futuro. El ritmo al que se está incrementando la capacidad operativa de los computadores cuánticos, medida en qubits, es francamente alto y los progresos que se están dando en la corrección de los errores que se producen todavía en ellos son muy interesantes.

Actualmente nos encontramos inmersos en una nueva revolución, probablemente entrando en una nueva era, en la que las tecnologías cuánticas tendrán una importancia extraordinaria en el desarrollo de la sociedad. Sin embargo, como podría ser previsible su impacto no solo traerá beneficios para la sociedad (De Wolf, 2017). De la mano de la computación cuántica, por ejemplo, están apareciendo ya nuevos riesgos inesperados relacionados con la seguridad de la información que afectarán, si no lo están haciendo ya, de un modo u otro a las personas, las empresas, y las instituciones públicas, y a la manera en la que éstas se desarrollan y relacionan entre sí. La cuestión radica en comprender que cualquier avance en la sociedad del conocimiento vendrá acompañado de otro avance de magnitud similar en la sociedad del riesgo (Beck, 1996).

Todo apunta a que es conveniente empezar a cuestionarnos si la humanidad está preparada para afrontar el nuevo marco que se va a generar como consecuencia del conocimiento y la tecnología generadas en el ámbito de la computación cuántica, si puede hacerlo con las mínimas garantías de seguridad necesarias, y si es capaz de aprovecharse de todo el beneficio que la computación cuántica puede reportarle. Es conveniente por tanto conocer cuanto antes los riesgos que puedan derivarse del avance y uso de las tecnologías cuánticas, y, contrariamente, también de su falta de desarrollo y adopción, en aras de poder evitarlos - o cuando menos gestionarlos y minimizarlos-. Hacerlo con la antelación suficiente puede resultar fundamental para aprovechar que los avances que se produzcan en el mundo científico y tecnológico tengan una traslación lo más eficaz, segura y responsable para el conjunto de la sociedad.

El cambio va a ser relevante. No debemos caer en la autocomplacencia y pensar que las tecnologías cuánticas nos aportarán exclusivamente beneficios, por muy importantes e inesperados que éstos puedan llegar a ser, o que nos favorecerán con toda la intensidad que podrían llegar a hacerlo. La evidencia existente sobre las transiciones tecnológicas observadas en el pasado, y que dieron lugar a disrupciones no sólo económicas, sino también políticas y sociales, nos indica que el nivel de riesgo se incrementará al mismo nivel que los beneficios, y que tendremos que hacer frente a situaciones inesperadas (Cavero, 2011). Parece conveniente analizar la situación de riesgo derivado tanto del desarrollo y aplicación de la computación cuántica como de su avance y adopción inadecuadas, para poder así prever con suficiente antelación los posibles riesgos que pueden llegar a darse. Es recomendable, por lo tanto, identificarlos con una visión holística que contemple una misma realidad desde múltiples ópticas.

Resulta difícil cuestionar que cuanto antes empecemos en la identificación de los riesgos antes podremos valorar su afección, y que esa es la base necesaria para poder comenzar a planificar y a ejecutar las acciones más adecuadas de cara a evitarlos o, cuando menos, mitigar los perjuicios que nos puedan ocasionar.

2. Sociedad del conocimiento y sociedad del riesgo

2.1. Sociedad del conocimiento

La generación de nuevo conocimiento, su trasmisión y utilidad en el desarrollo tecnológico ha tenido una incidencia directa en el progreso de la humanidad. Más concretamente, durante las últimas décadas, el resultado de la actividad científico-tecnológica ha provocado un tremendo avance en el desarrollo de nuevas tecnologías, y en la incorporación de éstas en forma de innovaciones que han transformado radicalmente la forma en la que vivimos, alterando factores políticos, sociales y económicos.

La sociedad postindustrial dio como uno de sus principales resultados, además de la globalización, la conocida como sociedad de la información, dado el relevante papel que el conocimiento ocupaba en ella, y la cada vez mayor importancia que adquirían las tecnologías de la información y comunicación en el Producto Interior Bruto (PIB) y en las tasas de empleo de los países. Tras la misma, la codificación del conocimiento teórico, la especialización de la ciencia y su crecimiento exponencial, la creación de sistemas de ciencia y tecnología que permitieron el desarrollo de la actividad científica de manera sistemática, pusieron el conocimiento en el centro y lo convirtieron en la base de la organización económica y social, constituyendo el fundamento de la sociedad del conocimiento (Bell, 1973).

En un sentido amplio y con visión histórica, todas las sociedades han sido sociedades de la información y, consecuentemente, del conocimiento. El conocimiento religioso, astronómico o agrícola supusieron, ya desde el antiguo Egipto, la base de la autoridad y el principio de organización social (Stehr, 1994). La diferencia principal radica en que, hoy en día, el conocimiento ha afectado tremendamente a la economía y se ha constituido como la fuente principal de aportación de valor para la nueva economía global del conocimiento del siglo XXI, para la producción de bienes y servicios y para la competitividad de empresas y territorios. La tecnología, como mayor palanca de innovación, ha ocupado un papel fundamental en el desarrollo económico y social, y en la actualidad resulta complejo negar que todas las organizaciones se han convertido en sujetos estructurales de base tecnológica.

El conocimiento resurge como una fuente de producción, dando lugar inclusive a nuevos sectores y mercados, provoca una nueva forma de organizarse socialmente y mediatiza la manera en la que nos relacionamos y ejercemos el poder (Castells, 1996). En resumen, produce importantes avances políticos, económico y sociales, aunque también origina novedosos riesgos como la desigualdad -falta de democratización- de su adopción.

2.2. Sociedad del riesgo

El incremento exponencial del conocimiento científico no solo ofrece beneficios. Ya desde el proyecto Manhattan la humanidad ha sido consciente de que un mayor nivel de

conocimiento redundante en un mayor riesgo. Se podría decir que son dos gemelos que evolucionan con cierta armonía, a mayor conocimiento, mayor riesgo (Beck, 1986).

La actividad científica y el desarrollo tecnológico han dado paso a una nueva modernidad en la que las innovaciones, además de beneficios, han generado novedosas formas de riesgo con alcance global. Hablamos de una doble experiencia que produce bien provecho o bien peligros (Bechmann, 1995), siendo éstos el resultado tanto de posibles catástrofes -bien sean inesperadas en forma de accidentes nucleares o bien sean larvadas como el cambio climático-, como por efecto del alcance social de la difusión de dichas innovaciones, por ejemplo, a través del acceso desigual que diferentes segmentos de la sociedad tienen a las mismas, lo que redundante en sociedades crecientemente polarizadas. Adicionalmente, los efectos negativos del uso del conocimiento alcanzan también a otras especies con las que convivimos. No solo la humanidad se ve condicionada por la producción científico-tecnológica, también lo son las otras especies que cohabitan con nosotros, al igual que lo es la salud del propio planeta (Beck, 1986).

Los riesgos a los que hemos de enfrentarnos como consecuencia del exponencial conocimiento disponible tienen alcance global y son cualitativamente más relevantes que los que afrontábamos en épocas anteriores. De hecho, hemos llegado a un punto en el que son los riesgos los responsables de las crecientes movilizaciones de colectivos sociales. Al abordar por tanto el impacto que la computación cuántica va a tener sobre la sociedad, no se debe limitar el análisis exclusivamente al impacto positivo que ésta vaya a tener en forma de nuevos bienes y servicios, sino que debe abordarse de manera igualmente exhaustiva la distribución de los riesgos que esta tecnología plantea. No esperemos, por lo tanto, a que la computación cuántica empiece a generar riesgos inesperados para decidir cómo los distribuimos. Ese modelo nos ha traído consecuencias difícilmente gestionables a posteriores, como en el caso del cambio climático. Tratemos de anticiparnos en la medida de lo posible.

Adicionalmente, cabe destacar que la sociedad del riesgo no se alimenta exclusivamente de los avances en la producción científico-tecnológica fruto de la actividad investigadora. Las decisiones que tomamos en nuestra vida cotidiana afectan cuantitativa y cualitativamente a los riesgos que debemos gestionar. La sociedad del riesgo empieza donde termina la tradición, cuando ya no funciona lo que históricamente entendíamos como cierto, cuando cada persona ha de decidir qué uso da al conocimiento y cómo se apropia de los avances que nos ofrece la ciencia (Beck, 1998).

Por otra parte, la sociedad también reacciona ante posibles apropiaciones indeseadas de la actividad científico-tecnológica por parte de agentes sociales que buscan el beneficio propio. Muchos de los riesgos de la época actual son el resultado de exposiciones al riesgo provocadas que no existirían si no se hubieran tomado decisiones erróneas o malintencionadas. Es por ello que el riesgo forma parte actualmente de los debates públicos y está en el centro de las principales controversias sociales.

En paralelo a lo anterior, la problemática del riesgo ha sido analizada por la ciencia desde la segunda mitad del siglo precedente, fruto de lo cual ha aparecido copiosa regulación legislativa sobre situaciones que pueden incrementar el nivel de riesgo (Koeck, 1995). En adición, las coberturas de los seguros han modificado igualmente su alcance para contemplar riesgos sobrevenidos o latentes que puedan afectar a las personas o a las organizaciones.

2.3. El riesgo y la adopción de la innovación

Si bien la sociedad del conocimiento pone su punto de mira sobre las bondades y beneficios de la actividad científico-tecnológica, la sociedad del riesgo se enfoca más bien en las amenazas y los riesgos intrínsecos al uso y la adopción del conocimiento disponible. El resultado de la actividad científica no ha supuesto un acuerdo que permita alcanzar una definición unitaria o un concepto único del riesgo. Su análisis, junto con la estructuración de los numerosos trabajos científicos alrededor de éste, han generado enfoques complementarios que se ajustan a los intereses de diferentes disciplinas. La literatura existente sobre la gestión del riesgo ofrece tres principales enfoques al abordar el estudio del riesgo en la adopción de la innovación: el enfoque técnico, el psicológico y el sociológico.

El enfoque técnico es el más relevante y también el más usado en los sectores público y privado (Alexeeff, Loehman y Milvy, 1987). Se ajusta a la denominada teoría de la decisión, y mide el riesgo objetivo como el factor de la probabilidad y la magnitud estimadas para un riesgo determinado. La aproximación que se realiza en este trabajo sobre el riesgo se fundamenta precisamente en este enfoque técnico.

La cuantificación y cualificación del riesgo no resultan sencillas y se ven condicionadas por la dificultad de encontrar una forma cuantitativa resultante de una probabilidad hipotética de ocurrencia y de la estimación subjetiva de la magnitud del alcance. Calcular el riesgo objetivo es complejo y los resultados obtenidos son difícilmente comparables (Shrader-Frechette, 1985).

Si bien riesgo y beneficio han sido estudiados como una única dimensión de signos contrarios, utilizar una misma escala para cuantificar las visiones complementarias sobre el daño y la utilidad ha resultado imposible (Bechmann, 1995). En cualquier caso, el riesgo técnico objetivo debería ser complementado con la percepción social del riesgo, y su análisis ha de ser enriquecido con los enfoques sociológico y psicológico que aporta la subdisciplina de la percepción del riesgo (Douglas, 1985).

El enfoque psicológico huye de la teoría que sostiene que la información compensa la debilidad cognitiva de quienes no tienen conocimiento suficiente y elimina su miedo irracional. Resulta un principio demasiado simple que conviene matizar con un enfoque más complejo aportado por la psicología, como voluntariedad, control, familiaridad, proximidad en tiempo o en espacio, etcétera (Starr y Whipple, 1980). El enfoque sociológico, en cambio, enriquece el análisis del riesgo con factores socioculturales asociados a determinadas

estructuras sociales. En este caso no se trata de analizar el riesgo como una decisión subjetiva e individual, sino en el estudio de factores que provocan que distintos puntos de vista resulten socialmente dominantes (Sismondo, 1993). Futuros análisis, cuando la sociedad comience a estar alfabetizada en computación cuántica deberían ahondar en estos dos enfoques. En este momento resultaría poco enriquecedor dado el desconocimiento de la sociedad en este campo debido a su incipiente estado de desarrollo y apropiación social.

Adicionalmente, se ha de tener en cuenta que la estimación técnica de un riesgo con la que se enfoca este trabajo no ha de coincidir con su percepción subjetiva ni con constructos que se basan en factores socioculturales. No es lo mismo calcular un riesgo técnicamente, partiendo de su probabilidad y su impacto estimados, que estimar el nivel de riesgo que la sociedad esté dispuesta a asumir por la adopción de una determinada tecnología.

3. Computación clásica, cuántica y simulación

3.1. Computación clásica versus computación cuántica

La base de la computación binaria clásica es la codificación de datos utilizando bits, es decir, unidades mínimas de información que solo pueden adoptar dos estados: el 0 y el 1. Según la computación binaria clásica, por tanto, cualquier dato, información, programa o sistema digital queda traducido a una cadena de ceros y unos que, a su vez, se corresponden con dos estados diferentes a nivel físico del ordenador, que pase o no pase electricidad a través de los transistores que lo componen (Abramson, 1963).

En cambio, la base de la computación cuántica es el uso de quantum bits -qubits o sistemas cuánticos de dos niveles-, y su funcionamiento obedece a la distancia en la que gira un electrón en relación con el núcleo del átomo al que pertenece (Feynman, 1982). Los qubits, para su correcto funcionamiento, requieren que el electrón se mantenga en las dos orbitas más bajas del átomo, y para ello se enfrían los sistemas hasta alcanzar los 13 milikelvin (-273'1370°C), impidiendo de ese modo que los electrones ocupen órbitas más allá de las dos primeras. Atendiendo a lo anterior, cuando un electrón tiene menos energía, éste puede situarse en la órbita más cercana al núcleo de las dos disponibles, y se situará en la órbita más alejada cuando tenga más energía. La forma de conseguir que un electrón cambie de una órbita a la otra es aportarle o reducirle energía (Barenco, Ekert, Sanpera y Machiavello, 1996).

Cuando un electrón tiene más energía de la necesaria para situarse en la primera órbita, pero no tiene la suficiente como para alcanzar la segunda, se encuentra en uno de los infinitos estados intermedios, pudiendo estar en la mitad entre las dos órbitas, más cercano a la primera que a la segunda o más cercano a la segunda que a la primera. Y eso sucede mientras no lo observamos -medimos-, momento en el que el sistema colapsa por la

decoherencia del sistema y el electrón pasa a ocupar una de las dos órbitas posibles (Demmer, Fonseca y Koushanfar, 2008).

Para comprender la relevancia de la diferencia entre la computación clásica y la computación cuántica, basta con comprender que un bit solo puede estar en un estado cada vez, mientras que un qubit puede estar en 2^n estados posibles cada vez. Y si utilizamos más de un bit o un qubit, la diferencia entre los posibles estados en los que se pueden encontrar se exponentia cada vez más. Por ejemplo, si trabajamos con 10 bits obtendremos 1 estado de 10 bits a la vez, mientras que si trabajamos con 10 qubits obtendremos 1024 estados de 10 qubits simultáneos (Allende y Da Silva, 2019).

Como cabía esperar, los ordenadores cuánticos aprovechan las características cuánticas de los qubits para ejecutar algoritmos cuánticos, que a diferencia de las puertas lógicas utilizadas en los ordenadores digitales clásicos -*and*, *or*, *not*-, resultan tremendamente más eficientes para resolver ciertos problemas e incluso consiguen solventar otros para los que la informática tradicional no ofrecía ninguna solución. Un ejemplo de las ventajas de la computación cuántica, para ilustrar lo visto hasta ahora, sería el cálculo de rutas eficientes. Pensemos que tenemos que establecer la mejor ruta para el camión de recogida selectiva de residuos en un territorio determinado. Imaginemos que tenemos 1.000.000 de rutas candidatas. En un ordenador clásico, tendríamos que procesar 1.000.000 de opciones hasta asegurarnos de haber encontrado el camino óptimo. En cambio, un ordenador cuántico que trabaja con qubits en vez de con bits, utilizaría el paralelismo cuántico para analizar todos los caminos a la vez. De forma resumida podemos decir que la computación clásica requeriría alrededor de 500.000 iteraciones ($1.000.000/2$) y la cuántica solo necesitaría 1.000 iteraciones ($\sqrt{1.000.000}$) (Allende y Da Silva, 2019).

Para poder llevar a cabo el supuesto anterior, lo más habitual actualmente sería acceder a los ordenadores cuánticos utilizando la modalidad de software como servicio (SaaS) ya que no hay demasiados ordenadores cuánticos -siempre con la salvedad de que la existencia de algunos no se haya hecho pública- y su acceso se ofrece principalmente desde la nube.

A día de hoy se han producido muy pocas compras de ordenadores cuánticos de un número de qubits físicos de cierta relevancia -entre 25 y 150 qubits- (Moskvitch, 2021). Además de no ser económicos y de la escasez de oferta, han de ubicarse en espacios que cumplan con unas condiciones geológicas y de estancia muy específicas. El terreno debe ser extremadamente estable, ya que cualquier vibración puede afectar al funcionamiento del sistema, y la estancia en la que se instale el ordenador debe disponer de unas condiciones realmente exigentes en cuanto al control de la temperatura en cada zona (DiVincenzo, 2000).

Pensemos, en contraposición, en la ingente cantidad de dispositivos digitales basados en la computación clásica que existen en la actualidad y en las condiciones en las que éstos pueden operar. No pensemos sólo en ordenadores de sobremesa y portátiles, sino también en tabletas, teléfonos, relojes y televisores inteligentes, además de toda clase de dispositivos específicos como los nuevos cuadros digitales de control de los automóviles,

cada vez ya más extendidos, los GPS, satélites, equipamiento hospitalario, sistemas de radiofrecuencia para comunicaciones en situaciones de emergencia, etc. El funcionamiento de todos ellos admite una dispersión térmica realmente elevada, siendo perfectamente útiles tanto en la playa como en la alta montaña. Además, pueden utilizarse en movimiento al no verse afectados por las vibraciones habituales de la actividad diaria y resultan estancos al agua y al polvo.

Por otra parte, aunque no se da en la computación clásica, uno de los principales problemas con los que se encuentra la computación cuántica en la actualidad, debido a la falta de madurez de las tecnologías que la soportan, es que los qubits físicos todavía presentan errores frecuentes. Debido a que los estados cuánticos no se pueden clonar -es imposible copiarlos-, para asegurar el funcionamiento de 1 único qubit lógico con corrección de errores, son necesarios alrededor de 1.000 qubits físicos a los que se les vaya propagando el error (Gambetta, Chow y Steffen, 2017). Así las cosas, por ejemplo, para disponer de más estados que el número de átomos del universo se estima que serían necesarios 2^{80} bits, mientras que con 270 qubits lógicos sería suficiente. Esto se traduce en que, con la tecnología actual, un ordenador cuántico de 270.000 qubits físicos podría simular todos y cada uno de los átomos del universo (Allende y Da Silva, 2019).

3.2. Simulación cuántica

Un simulador cuántico es un sistema físico cuántico que puede ser utilizado para estudiar las propiedades de un sistema complejo, bien sea este cuántico o clásico. Esto es posible porque el simulador cuántico es capaz de reproducir, normalmente a menor escala y de forma controlada, el sistema en cuestión, o porque puede operar eficientemente con la función matemática que expresa su dinámica (Lloyd, 2006).

A día de hoy, los simuladores cuánticos no son de propósito universal como los ordenadores cuánticos, sino que están preparados exclusivamente para resolver situaciones y problemas específicos. Existen simuladores cuánticos de distintas configuraciones y tipologías que hacen posible resolver situaciones o problemas que resultarían imposibles de solventar con la computación clásica tradicional (Buluta y Nori, 2009)

Actualmente, la simulación cuántica pone átomos o fotones en una forma determinada e imita su comportamiento en un objeto sólido real, pero a escala diferente. Es concebible la simulación de un sistema mediante un ordenador cuántico que use un número de qubits que ofrezca una cantidad de estados simultáneos similar al número de partículas de un sistema original (Lloyd, 2006).

Hasta ahora, la simulación cuántica se ha aplicado principalmente a problemas de física del estado sólido, si bien se empieza aplicar también en cosmología y en física cuántica, atómica y de altas energías (Brown, Munro y Kendon, 2010). Pero hemos de tener en cuenta que se trata de una disciplina incipiente, que está en su génesis, y que todo apunta a que, con el tiempo y el avance de la ciencia y la tecnología, ofrecerá además posibilidades de simular sistemas mucho más complejos.

En resumen, la computación y la simulación cuánticas han supuesto una verdadera ruptura del paradigma del tratamiento informático binario tradicional de la información. Dado el bajo nivel de uso y adopción actual, no es posible identificar con exactitud la(s) utilidad(es) potencial(es) que podrán tener en un futuro. Aun así, ya han demostrado que sobrepasan en eficiencia y en posibilidades a la computación y a la simulación clásicas, y no es sencillo limitar las previsiones de su aplicabilidad en distintos ámbitos y disciplinas en un futuro a medio y largo plazo.

Puede que, en un futuro no lejano, pensar en simular el planeta, el cuerpo o la mente humana no pueda ser desestimado por imposible, tal y como lo hacíamos hasta ahora. Y si esto fuera así, la afección y el impacto que producirían en el desarrollo de las personas y las sociedades, así como en la sostenibilidad del planeta resultaría realmente compleja de predecir. En mi opinión, la humanidad nunca se habría enfrentado con anterioridad a una situación similar, en la que tanto los beneficios esperados como los riesgos que tendría que asumir tuvieran un similar calado y afección, y el cambio sucediera tan rápidamente.

4. Factores del entorno y riesgos previsibles

Al igual que pasó con la irrupción de Internet, su adopción y su uso extensivo, se espera que la computación cuántica altere también profundamente la forma en la que vivimos y nos relacionamos. Quién hubiera esperado treinta años atrás que hoy en día estudiaríamos, trabajaríamos y pudiéramos disponer de una vida social prácticamente plena sobre la base de las tecnologías de la información y la comunicación. Internet ha modificado nuestro entorno, produciendo cambios en la totalidad de los factores que lo conforman, y es una afección multifactor similar a la que podemos esperar por parte de la computación cuántica (DiMaggio, Hargittai, Russell Neuman y Robinson, 2001).

El análisis del entorno ha resultado una herramienta muy útil a la hora de identificar las fortalezas y las debilidades derivadas del contexto interno de las organizaciones, así como las oportunidades y las amenazas que se espera que las afecten por el contexto externo. Su visión holística facilita una enriquecedora visión multidimensional (Çitilci y Akbalık, 2020). La metodología utilizada en este trabajo utiliza los factores del análisis PESTEL (políticos, económicos, socio-culturales, tecnológicos, ambientales y legales) como guía para identificar y prever de qué manera el desarrollo y uso adecuados de la computación cuántica podrían verse afectados negativamente por el entorno externo. Se trata, entonces, de realizar un estudio con el objetivo de prever los riesgos que el entorno externo podría significar para el avance y la adopción convenientes de la computación cuántica.

De cara a identificar los riesgos previsibles, se propone un análisis de cada uno de los factores del entorno que posibilite una visión desde múltiples perspectivas y permita determinar la afección que se espera que se produzca globalmente en cada uno de ellos, si bien ciñéndose exclusivamente a las que se espera que sean negativas. Una vez se hayan identificado los riesgos -las amenazas-, dispondremos de una herramienta inicial para poder

plantear una primera propuesta sobre cuál es la manera más adecuada de hacerles frente, tanto para intentar evitarlos, cuando sea posible, como para tratar de mitigar su impacto, en el resto de los casos.

Esta propuesta inicial deberá ser complementada en trabajos posteriores más pormenorizados, cuando ya se disponga de mayor conocimiento sobre la posible afección que producirá la computación cuántica. En este momento se trata solo de hacer una primera aproximación, de corroborar la hipótesis planteada (la computación y la simulación cuánticas producirán importantes beneficios para la humanidad y el medio natural, pero su desarrollo y uso adecuados podrían verse condicionados negativamente por los factores políticos, económicos, socioculturales, tecnológicos, medioambientales y legales del entorno externo) y de hacer una primera propuesta inicial de cómo debemos empezar plantear la gestión de los riesgos identificados.

4.1. Factores Políticos

4.1.1. Gobierno

Los gobiernos de los distintos países tienen una relevancia especial en el desarrollo de las tecnologías cuánticas. Al tratarse de tecnologías emergentes con un nivel de uso y adopción incipiente, es necesario el impulso gubernamental para su crecimiento.

- **Riesgo previsible:** la falta de visión, interés o capacidad de algunos gobiernos que no consigan impulsar el uso y la adopción de la computación cuántica en sus territorios, debido a la falta de acuerdos intergubernamentales que impidan la adopción de normas comunes aceptadas internacionalmente.

4.1.2. Clima político

El clima político resulta fundamental para poder llegar a acuerdos. A nivel global, se requiere la confianza entre los distintos países para poder alcanzar consensos de calado, como la creación de una entidad internacional que audite los algoritmos que se utilicen y asegure que éstos no contravienen la carta de los derechos humanos. Del mismo modo, es necesario un clima de suficiente confianza para acordar los límites en la investigación, el uso y la adopción de la computación y la simulación cuánticas. A nivel nacional sucede lo mismo, si bien en este caso la confianza debe darse entre los diferentes partidos que conforman los respectivos parlamentos.

- **Riesgo previsible:** la falta de confianza o la ausencia de cooperación, entre países o entre partidos, que impida adoptar decisiones consensuadas comunes que guíen el desarrollo y la evolución de las tecnologías en cuestión.

4.1.3. Conflictos

Los conflictos políticos pueden modular la relación entre países y partidos, e incluso pueden propiciar el uso no legítimo de la computación o la simulación cuántica para favorecer los intereses particulares.

- **Riesgo previsible:** la utilización de la tecnología como un arma que debilite a los adversarios. Un ejemplo actual podría ser el hackeo de la seguridad de la información estratégica de partidos o gobiernos, o el hackeo de la seguridad de las infraestructuras críticas de los países.

4.1.4. Políticas gubernamentales

Las políticas públicas han de ser la base sobre la que se desarrollen tanto las tecnologías cuánticas como las tecnologías emergentes que se vean afectadas por ellas, y a través de las cuales se facilite su difusión y su aplicación en la sociedad. En esa línea, la ciberseguridad, el *big data*, la inteligencia artificial y las cadenas de bloques *-blockchain-*, por ejemplo, son firmes candidatas para requerir políticas específicas que aseguren su uso ético, justo y equitativo.

- **Riesgo previsible:** la falta de regulación específica del uso de las tecnologías emergentes afectadas por la computación cuántica. También por la falta de políticas que enfoquen adecuadamente la actividad científica en aquellos aspectos que sean beneficiosos para la humanidad.

4.1.5. Elecciones

Las elecciones de gobernantes, bien sea por sufragio universal o no, pueden condicionar la continuidad de las políticas establecidas por los gobernantes anteriores. En ese sentido, los partidos de gobierno progresistas, o quienes gobiernen de manera progresista, tendrán la tendencia de establecer políticas progresistas, mientras que los conservadores, tendrán la tendencia de establecer políticas de corte conservador. Y cuando se produzca un cambio de gobierno, la tendencia será a modificar las políticas.

- **Riesgo previsible:** la realización de cambios en las políticas y que ello dificulte la continuidad de éstas. La afección de las tecnologías cuánticas se producirá durante varias décadas.

4.1.6. Programas de financiación

La financiación de la actividad científica, el desarrollo tecnológico, el uso, la difusión y la adopción de las tecnologías emergentes es fundamental cuando su nivel de madurez es bajo. Apostar económicamente por el impulso con fondos públicos de unas tecnologías u otras puede condicionar realmente los resultados que se obtengan.

- **Riesgo previsible:** la falta de dotación presupuestaria ad hoc suficiente y/o la asimetría entre las dotaciones presupuestarias que se habiliten en cada país o territorio.

4.1.7. Tratados comerciales

Los tratados comerciales facilitan el intercambio de bienes y servicios entre quienes los suscriben. Esto cobra especial relevancia con las tecnologías innovadoras transversales por su falta de madurez, por la escasa oferta de dispositivos habilitadores, como los ordenadores cuánticos, y por la casi inexistente oferta de talento y conocimiento, que se limita a los países y sociedades más avanzadas en cada ámbito. Hoy en día son pocos los que disponen de las tecnologías y el talento necesarios.

- **Riesgo previsible:** la realización de acuerdos y tratados que limiten bien la exportación de ordenadores cuánticos o bien la transferencia del talento y el conocimiento asociados entre las distintas áreas geográficas o que favorezcan su exportación y transferencia a países afines.

4.1.8. Intervención del Estado y poder de las corporaciones

La intervención del Estado moldea la forma en la que las nuevas tecnologías son ofrecidas a la sociedad. En el caso de la computación cuántica que nos ocupa, las corporaciones tecnológicas que comercializan esa tecnología no se la ofrecen a los gobiernos que planean utilizarla para asuntos militares o de inteligencia, de cara precisamente a evitar riesgos inesperados.

- **Riesgo previsible:** la falta de intervención del Estado que posibilite riesgos innecesarios e inexistentes hasta la fecha -dada la novedad y falta de conocimiento sobre los usos potenciales de la computación cuántica-, por un lado, y ocupación del rol de los Estados por parte de las corporaciones tecnológicas que monopolicen la fabricación de ordenadores cuánticos, por el otro.

4.2. Factores Económicos

4.2.1. Nivel de producción

Los niveles PIB de los países y, más concretamente, sus variaciones o su nivel de PIB per cápita, pueden resultar factores influyentes a la hora de afrontar proyectos de impulso a la generación, difusión y/o adopción de tecnologías emergentes innovadoras. Un PIB per cápita bajo o un decremento en el nivel de PIB pueden dificultar la habilitación de las partidas presupuestarias necesarias.

- **Riesgo previsible:** el incremento de la brecha cuántica entre países por falta de inversión de los menos favorecidos económicamente o de los que estén viviendo un periodo económico desfavorable.

4.2.2. Política monetaria

Los bancos centrales influyen en el coste del dinero y en la cantidad de dinero disponible en una economía, haciendo más o menos costosas las inversiones que requieran endeudamiento, e incrementando o decrementando la cantidad de dinero que pueda dedicárselas.

- **Riesgo previsible:** la puesta en marcha de políticas monetarias que encarezcan o dificulten las inversiones necesarias para impulsar el desarrollo de las tecnologías cuánticas.

4.2.3. Situación económica

La situación económica global y la de cada país en particular afecta a la capacidad para dedicar presupuesto a las políticas que se desean desplegar en los territorios. Una situación económica no deseada puede conducir las inversiones a políticas ajenas al desarrollo científico-tecnológico.

- **Riesgo previsible:** la falta de inversiones derivadas de una situación económica débil o desfavorable.

4.2.4. Tipo de cambio

El tipo de cambio condiciona el intercambio de bienes y servicios entre países que trabajen con monedas diferentes. En el caso de la computación cuántica, este factor se magnifica debido a que el exportador de ordenadores cuánticos por excelencia en la actualidad está basado en los Estados Unidos y utiliza el dólar como moneda de referencia para establecer sus precios. Un dólar fuerte redundará en el incremento del precio que se tenga que pagar por parte de quienes utilicen otras monedas de referencia. Por otro lado, no parece que las criptomonedas puedan alterar a corto plazo esta situación. Téngase en cuenta, que se basan en el uso de cifrados informáticos y cadenas de bloques de información, que precisamente se verán puestos en evidencia por la computación cuántica.

- **Riesgo previsible:** el incremento de los precios a pagar para adquirir ordenadores cuánticos por parte de quienes no utilicen el dólar americano como moneda de referencia.

4.2.5. Tendencias económicas

Las tendencias económicas son analizadas con sumo detalle por quienes han de decidir qué partidas económicas se habilitarán en cada momento y cuál será su finalidad. Una tendencia económica al alza suele traducirse en el incremento de la cuantía de los esfuerzos inversores, mientras que una tendencia económica a la baja suele traducirse en su reducción.

- **Riesgo previsible:** la reducción de las cuantías de los esfuerzos inversores por parte de los países y las empresas.

4.2.6. Ciclos económicos

Los ciclos económicos actúan como condicionantes de las políticas y estrategias de inversión que se priman en los países y en las organizaciones. Las grandes inversiones suelen producirse en los ciclos económicos expansivos de cara a intentar asegurar su sostenibilidad plurianual.

- **Riesgo previsible:** la dificultad de planificar inversiones en bienes o servicios relacionados con la computación cuántica que requieran aportaciones presupuestarias que deban mantenerse durante varios años.

4.2.7. Políticas fiscales

Las políticas impositivas pueden ser un acicate para la adopción de las tecnologías innovadoras. Tanto desde el punto de vista de las empresas como de las personas, los impuestos de sociedades y de la renta de las personas físicas son determinantes a la hora de traer empresas ya existentes, fomentar la creación de nuevas, y atraer personas con talento y conocimiento que resulten determinantes para la creación de un polo de actividad en computación cuántica.

- **Riesgo previsible:** el no establecimiento de políticas atractivas para empresas y personas que primen la investigación y el desarrollo tecnológico de cara a ayudar a las empresas de nueva creación con perfil innovador o a reducir el impacto de la inversión en la cuenta de resultados de las empresas consolidadas que apuesten por la computación cuántica.

4.3. Factores sociales y culturales

4.3.1. Distribución de la renta

La distribución de la renta de un país posibilita o impide que las familias englobadas en cada una de las clases sociales dispongan de más o menos medios económicos para dedicarlos a la educación. Y el nivel incipiente de madurez de la computación cuántica actual da como resultado la escasez de oferta de titulaciones en relación con ella. De hecho, la poca oferta que hay en las universidades públicas en la actualidad resulta insuficiente y la demanda se ve dirigida a las universidades privadas, cuyo precio puede resultar excesivo para los recursos económicos disponibles en las familias con rentas medias o bajas.

- **Riesgo previsible:** la no generación de talento suficiente, o la desviación de ese talento hacia otros territorios, para hacer frente a la necesidad de conocimiento y capacidad de

esfuerzo, dada la dificultad de acceder a estudios en computación cuántica debido a su elevado precio.

4.3.2. Situación demográfica

El tamaño y crecimiento poblacional junto con la dinámica de la natalidad, la mortandad y las migraciones, así como los efectos en su composición y en los hogares por sexo o edad, puede determinar el ritmo en el que una tecnología innovadora sea adoptada por una sociedad determinada. Como hemos visto con la irrupción de Internet y con los usos innovadores y extensivos de la tecnología que ha propiciado, la adopción no ha sido igual de exitosa en generaciones compuestas por personas nativas digitales que en las precedentes.

- **Riesgo previsible:** el incremento de la brecha cuántica entre distintas generaciones, especialmente entre las nativas digitales y las anteriores.

4.3.3. Estilo de vida

Cómo se orientan los intereses, las opiniones, los comportamientos y las conductas de una sociedad puede afectar a la adopción de una tecnología innovadora. Así, hay sociedades más proclives a la adopción de nuevas tecnologías, mientras que otros países tienen un comportamiento mucho más conservador, lo que redundaría en la competitividad de sus empresas. Las actitudes y los comportamientos favorables a cierta tecnología pueden redundar en un resultado exitoso de su adopción por parte de la población y de las empresas.

- **Riesgo previsible:** la adopción no exitosa de la computación cuántica por parte de empresas y personas debido a una orientación no adecuada de los intereses, las opiniones, los comportamientos y las conductas sociales.

4.3.4. Crecimiento de la población

El incremento o decremento poblacional, en un territorio y periodo puede influir en el desarrollo y el uso de la computación cuántica. La falta de talento y capacidad de esfuerzo alrededor de la computación cuántica puede agravarse en un territorio caso de que su población disminuya, si además, dicho territorio no tiene la capacidad de atraer talento de otras zonas geográficas.

- **Riesgo previsible:** el incremento de la brecha cuántica entre territorios debido al decremento poblacional de alguno de ellos.

4.3.5. Barreras culturales

Las barreras culturales entre países y sociedades pueden constituir un obstáculo en la adopción de la computación cuántica. Tengamos en cuenta que el número de países

exportadores de esta tecnología es realmente reducido y la oferta de ordenadores cuánticos es muy limitada, por lo que la afinidad cultural entre países puede redundar en la priorización de venta de plataformas cuánticas a países culturalmente cercanos.

- **Riesgo previsible:** el incremento de la brecha cuántica entre territorios no afines culturalmente.

4.4. Factores Tecnológicos

4.4.1. Acceso a la tecnología

No tener en cuenta las desigualdades sociales y económicas a la hora de desarrollar políticas y promover la computación cuántica puede derivar en que las personas de diferentes entornos no tengan oportunidades similares para acceder a esa tecnología y utilizarla. El acceso a las plataformas cuánticas es limitado en la actualidad y, si bien existen accesos gratuitos limitados en posibilidades, los accesos a nivel de hardware, es decir, los que permiten modificar el estado de los qubits es de pago y no resulta accesible para todas las economías.

- **Riesgo previsible:** el incremento de la brecha cuántica entre personas de diferentes entornos con desigualdades sociales y distintas posibilidades económicas.

4.4.2. Incentivos tecnológicos

Los incentivos tecnológicos ofrecidos por las empresas y por los gobiernos pueden acelerar la adopción de las tecnologías innovadoras en las empresas y los territorios, y su ausencia puede ralentizarla. Ofrecer acceso gratuito o subvencionado a la computación cuántica para los equipos de innovación o tecnología de las organizaciones puede redundar en la aceleración de su adopción y uso extensivo.

- **Riesgo previsible:** la falta de impulso hacia el uso de la computación cuántica debido a la no incentivación de su acceso.

4.4.3. Niveles de innovación

El nivel de innovación de los sectores público y privado de un territorio puede ser determinante a la hora de adoptar tecnologías emergentes. Los presupuestos asociados a la innovación, junto con los tipos de innovación utilizados, la cantidad de innovaciones que produce una sociedad y su actitud positiva hacia lo novedoso son importantes palancas para el impulso de la computación cuántica. Una actitud no adecuada puede redundar en el retraso en su uso por no facilitarse su adopción temprana.

- **Riesgo previsible:** la ralentización del uso de la computación cuántica de forma que no se aprovechen las oportunidades derivadas de su adopción temprana y extensiva.

4.4.4. Cambios tecnológicos

Los cambios tecnológicos y la ruptura de los paradigmas tecnológicos existentes pueden afectar al desarrollo y adopción de las tecnologías cuánticas. Dada la indefinición actual en cuanto a las tecnologías que posibilitan la computación cuántica como superconductores o iones atrapados, por ejemplo, pueden producirse esfuerzos duplicados que signifiquen un avance más lento del que podría alcanzarse en caso de centrar todos los esfuerzos en el avance de una tecnología determinada.

- **Riesgo previsible:** la ralentización del desarrollo de la computación cuántica y de su adopción.

4.4.5. Avances tecnológicos

Los avances tecnológicos en áreas como la inteligencia artificial, la ciberseguridad o la biotecnología, por citar algunos, pueden provocar desajustes en los avances que se hayan producido en la aplicación de la computación cuántica en esas disciplinas. Así mismo, la aplicación de las tecnologías cuánticas en las materias mencionadas, pueden provocar avances disruptivos que generen riesgos inesperados.

- **Riesgo previsible:** la aparición de riesgos inesperados que la humanidad no haya experimentado con anterioridad y no esté preparada para afrontar con garantías.

4.5. Factores Ecológicos

4.5.1. Clima

El clima es un factor a considerar a la hora de diseñar los centros de proceso de datos. La necesidad específica de mantener en ellos un rango de temperaturas determinado condiciona su diseño, especialmente el de su sistema de refrigeración. Los ordenadores cuánticos actuales requieren temperaturas cercanas al cero absoluto -alrededor de 13 milikelvin-.

- **Riesgo previsible:** la dificultad de establecer centros cuánticos de proceso de datos en áreas geográficas en las que el clima sea especialmente cálido, dado el encarecimiento adicional que supone atender a las necesidades de enfriamiento de los ordenadores cuánticos en zonas climáticamente no bondadosas.

4.5.2. Normativa ambiental

La normativa ambiental busca mitigar el efecto del desarrollo de la sociedad en el clima del planeta y en los niveles de contaminación. Promover el uso de tecnologías que generen energía sin afectar negativamente al clima es uno de sus objetivos principales y puede redundar en la escasez de la energía disponible.

- **Riesgo previsible:** la falta de regulación que favorezca el uso de la computación cuántica para reducir los niveles de contaminación.

4.5.3. Cambios climáticos

El clima y los cambios que está experimentando son factores muy a tener en cuenta en la actualidad. La sociedad está especialmente concienciada con la importancia del cambio climático para el futuro del planeta y la sostenibilidad del modo de vida actual, y los centros de procesamiento de datos clásicos son, a día de hoy, unos de los grandes consumidores de energía. La eficiencia energética de la computación cuántica en comparación con la clásica puede ayudar a mitigar el consumo de electricidad de los centros de procesamiento de datos.

- **Riesgo previsible:** la incompreensión de las ventajas de la computación cuántica en la reducción de los niveles emisión de gases de efecto invernadero.

4.5.4. Recursos energéticos

Los recursos energéticos, bien sean o no renovables, constituyen un activo fundamental para el desarrollo económico y social de los países y territorios. Su falta puede significar un importante obstáculo a la hora de satisfacer las cada vez mayores necesidades de energía. La computación cuántica puede tanto ayudar reducir su necesidad como a facilitar el uso de energías verdes. Algunos de los casos de uso que se están planteando tiene que ver, precisamente, con la búsqueda de soluciones al problema del almacenamiento de la energía renovable, como las baterías, o la optimización de las aspas de los molinos de viento que generan energía.

- **Riesgo previsible:** la falta de visión, de intención o de inversión para fomentar la actividad científica en computación cuántica que produzca avances en el desarrollo de energías verdes y en almacenamiento de la energía generada por ellas.

4.6. Factores Legales

4.6.1. Normativas propias del sector

Las normativas propias del sector, en este caso, pueden tener una relevancia muy especial en relación con la gestión adecuada de los riesgos. Recordemos que se espera que la computación cuántica tenga un impacto transversal y, consecuentemente, afecte al resto de las tecnologías. Probablemente, sean la inteligencia artificial, la biotecnología y la seguridad, en su más amplia acepción, las áreas de conocimiento y actuación en las que ejerza mayor influencia. Dada la transversalidad y la amplia afección esperadas, no parece que lo ideal sea ceñirse exclusivamente en la regulación normativa de la computación cuántica que, por supuesto, sí será conveniente que cuente con su propia normativa, sino que seguramente la

mejor opción sea ampliar la ya existente en las áreas de conocimiento que resulten más alteradas.

- **Riesgo previsible:** la regulación insuficiente en relación con las tecnologías y áreas de conocimiento más afectadas por el cambio de paradigma que supondrá la aplicación de la computación cuántica en ellas.

4.6.2. Regulaciones sobre empleo

Las regulaciones sobre el empleo pueden influir en el desarrollo del mercado de nuevas tecnologías. Ofrecer beneficios a la contratación de personas con cualificación en computación cuántica o para el reciclaje de otras que provengan del sector tecnológico provocará el acercamiento de la tecnología a las organizaciones y facilitará su adopción.

- **Riesgo previsible:** la falta de regulación específica para fomentar el empleo requerido por el uso de la computación cuántica.

4.6.3. Estabilidad gubernamental

La estabilidad gubernamental puede ser determinante para el establecimiento de legislación sobre las políticas a largo plazo de las estratégicas de los territorios. De nada sirve establecer planes plurianuales si no se asegura la seguridad jurídica pertinente para todo el periodo.

- **Riesgo previsible:** la inestabilidad gubernamental que impida la existencia de políticas públicas a largo plazo.

5. Conclusiones

Cuando se empieza a trabajar con tecnologías emergentes a menudo no somos conscientes de las capacidades que éstas pueden llegar a ofrecer ni tampoco podemos imaginar los distintos usos que pueden dárseles. La energía nuclear, por ejemplo, hace posible una fuente de generación de electricidad capaz de abastecer la necesidad de gran cantidad de viviendas e industrias, pero como hemos comprobado en varias ocasiones (Chernobyl, Fukushima), ni tan siquiera su uso ético está exento de riesgos.

En el momento en que se producen consecuencias inesperadas por el uso de nuevas tecnologías, normalmente ya es demasiado tarde para intentar evitar completamente la afección negativa que puedan producir y sólo nos queda la opción de gestionar sus efectos. Podríamos decir que reaccionamos siempre a posteriori, en vez de hacer previamente y de manera proactiva la debida gestión de riesgos en función de su impacto y probabilidad.

Si enfocamos concretamente las tecnologías cuánticas, dado lo revolucionario de sus planteamientos, la falta de conocimiento y escasísima cultura que tenemos sobre ellas, y la diversidad y amplitud de los campos en los que pueden ser aplicadas, el problema se magnifica y se hace realmente difícil prever el impacto que pueden llegar a producir en la sociedad y el mundo que conocemos. Tengamos en cuenta que la computación cuántica está a punto de conseguir trabajar con los qubits necesarios para simular todos y cada uno de los átomos de universo, lo que significa que en el futuro podrá simular con exactitud el planeta Tierra y el cuerpo y la mente humanas. A consecuencia de ello, el propio método científico se verá alterado gracias a las simulaciones. En muchos casos ya no será necesario esperar a los resultados de los experimentos, a veces durante años, y bastarán unos segundos para validar o refutar las hipótesis que se hayan planteado.

Como se puede inferir de todo lo anterior, las tecnologías cuánticas nos van a permitir progresar, avanzar a pasos agigantados en el desarrollo de la sociedad y en las distintas áreas del saber, y sus beneficios para las personas y el medio natural podrían ser inimaginables en el futuro. La sociedad del conocimiento va a experimentar un impulso no conocido con anterioridad, pero, al mismo tiempo y con similar intensidad, la sociedad del riesgo va a acrecentar su presencia y notoriedad.

Prever los riesgos que van a producir las tecnologías cuánticas en la sociedad resultaría un tanto aventurado debido, como ya se ha comentado, a su exiguo desarrollo y al insuficiente saber del que nos hemos apropiado hasta el momento en relación a ellas. Podría considerarse un excesivo ejercicio de imaginación.

En cambio, en base a que sociedades y tecnologías se conforman de manera conjunta, y las afecciones van en ambas direcciones, es decir, se ocasionan mutuamente, es posible adelantarse a los riesgos que la sociedad va a producir en el avance apropiado de las tecnologías cuánticas. Y hacerlo, en este caso sí, con mayor facilidad y probabilidad de acierto. Al fin y al cabo, se trata también de riesgos a los que conviene anticiparse. Si realmente estas tecnologías tienen el potencial de cambiar profundamente a mejor nuestras vidas, las barreras que la sociedad pueda generar al cambio, al progreso, también han de considerarse riesgos. Tengamos en cuenta que son determinadas configuraciones de factores técnicos y sociales las que provocan los beneficios o los daños.

En resumen, entre la totalidad de los riesgos que cabría esperar, es posible identificar un conjunto de ellos que tiene en común tanto su origen -los factores del entorno externo-, como el tipo de afección que podría producir -reducción de los beneficios de la computación cuántica-. Este trabajo ha posibilitado iniciar la identificación de ese tipo de riesgos. No podemos considerarlo un análisis completo, pero ha permitido prever algunas de las amenazas con las que podríamos encontrarnos en el futuro y plantear en consecuencia ciertas propuestas de acciones para hacerlas frente.

El resultado ha sido el siguiente:

Epígrafe	Riesgo identificado	Propuesta de actuación
4.1.1	La falta de visión, interés o capacidad de algunos gobiernos que no consigan impulsar el uso y la adopción de la computación cuántica en sus territorios, debido a la falta de acuerdos intergubernamentales que impidan la adopción de normas comunes aceptadas internacionalmente.	Fomentar acuerdos y políticas supra estatales.
4.1.2	La falta de confianza o la ausencia de cooperación, entre países o entre partidos, que impida adoptar decisiones consensuadas comunes que guíen el desarrollo y la evolución de las tecnologías en cuestión.	Fomentar acuerdos y políticas supra estatales.
4.1.3	La utilización de la tecnología como un arma que debilite a los adversarios. Un ejemplo actual podría ser el hackeo de la seguridad de la información estratégica de partidos o gobiernos, o el hackeo de la seguridad de las infraestructuras críticas de los países.	Fomentar acuerdos y políticas supra estatales.
4.1.4	La falta de regulación específica del uso de las tecnologías emergentes afectadas por la computación cuántica. También por la falta de políticas que enfoquen adecuadamente la actividad científica en aquellos aspectos que sean beneficiosos para la humanidad.	Promover de la colaboración entre la ciencia y la política.
4.1.5	La realización de cambios en las políticas y que ello dificulte la continuidad de éstas. La afección de las tecnologías cuánticas se producirá durante varias décadas.	Lograr consensos que posibiliten políticas plurianuales.
4.1.6	La falta de dotación presupuestaria ad hoc suficiente y/o la asimetría entre las dotaciones presupuestarias que se habiliten en cada país o territorio.	Fomentar acuerdos y políticas supra estatales.
4.1.7	La realización de acuerdos y tratados que limiten bien la exportación de ordenadores cuánticos o bien la transferencia del talento y el conocimiento asociados entre las distintas áreas geográficas o que favorezcan su exportación y transferencia a países afines.	Fomentar acuerdos y políticas supra estatales.

Epígrafe	Riesgo identificado	Propuesta de actuación
4.1.8	La falta de intervención del Estado que posibilite riesgos innecesarios e inexistentes hasta la fecha -dada la novedad y falta de conocimiento sobre los usos potenciales de la computación cuántica-, por un lado, y ocupación del rol de los Estados por parte de las corporaciones tecnológicas que monopolicen la fabricación de ordenadores cuánticos, por el otro.	Fomentar acuerdos y políticas supra estatales.
4.2.1	El incremento de la brecha cuántica entre países por falta de inversión de los menos favorecidos económicamente o de los que estén viviendo un periodo económico desfavorable.	Usar las herramientas financieras globales disponibles, como el Fondo Monetario Internacional.
4.2.2	La puesta en marcha de políticas monetarias que encarezcan o dificulten las inversiones necesarias para impulsar el desarrollo de las tecnologías cuánticas.	Establecer políticas económicas y fiscales adecuadas.
4.2.3	La falta de inversiones derivadas de una situación económica débil o desfavorable.	Usar las herramientas financieras globales disponibles, como el Fondo Monetario Internacional.
4.2.4	El incremento de los precios a pagar para adquirir ordenadores cuánticos por parte de quienes no utilicen el dólar americano como moneda de referencia.	Promocionar el desarrollo científico local.
4.2.5	La reducción de las cuantías de los esfuerzos inversores por parte de los países y las empresas.	Usar las herramientas financieras globales disponibles, como el Fondo Monetario Internacional
4.2.6	La dificultad de planificar inversiones en bienes o servicios relacionados con la computación cuántica que requieran aportaciones presupuestarias que deban mantenerse durante varios años.	Lograr consensos que posibiliten políticas plurianuales.
4.2.7	El no establecimiento de políticas atractivas para empresas y personas que primen la investigación y el desarrollo tecnológico de cara a ayudar a las empresas de nueva creación con perfil innovador o a reducir el impacto de la inversión en la cuenta de resultados de las empresas consolidadas que apuesten por la computación cuántica.	Establecer políticas económicas y fiscales adecuadas.

Epígrafe	Riesgo identificado	Propuesta de actuación
4.3.1	La no generación de talento suficiente, o la desviación de ese talento hacia otros territorios, para hacer frente a la necesidad de conocimiento y capacidad de esfuerzo, dada la dificultad de acceder a estudios en computación cuántica debido a su elevado precio.	Fomentar acuerdos y políticas supra estatales.
4.3.2	El incremento de la brecha cuántica entre distintas generaciones, especialmente entre las nativas digitales y las anteriores.	Impulsar la alfabetización y cultura científicas.
4.3.3	La adopción no exitosa de la computación cuántica por parte de empresas y personas debido a una orientación no adecuada de los intereses, las opiniones, los comportamientos y las conductas sociales.	Impulsar la alfabetización y cultura científicas.
4.3.4	El incremento de la brecha cuántica entre territorios debido al decremento poblacional de alguno de ellos.	Lograr consensos que posibiliten políticas plurianuales.
4.3.5	El incremento de la brecha cuántica entre territorios no afines culturalmente.	Fomentar acuerdos y políticas supra estatales.
4.4.1	El incremento de la brecha cuántica entre personas de diferentes entornos con desigualdades sociales y distintas posibilidades económicas.	Impulsar la alfabetización y cultura científicas.
4.4.2	La falta de impulso hacia el uso de la computación cuántica debido a la no incentivación de su acceso.	Impulsar la alfabetización y cultura científicas.
4.4.3	La ralentización del uso de la computación cuántica de forma que no se aprovechen las oportunidades derivadas de su adopción temprana y extensiva.	Impulsar la alfabetización y cultura científicas.
4.4.4	La ralentización del desarrollo de la computación cuántica y de su adopción.	Promocionar el desarrollo científico local.
4.4.5	La aparición de riesgos inesperados que la humanidad no haya experimentado con anterioridad y no esté preparada para afrontar con garantías.	Impulsar la alfabetización y cultura científicas.
4.5.1	La dificultad de establecer centros cuánticos de proceso de datos en áreas geográficas en las que el clima sea especialmente cálido, dado el encarecimiento adicional que supone atender a las necesidades de enfriamiento de los ordenadores cuánticos en zonas climáticamente no bondadosas.	Promocionar el desarrollo científico local.

Epígrafe	Riesgo identificado	Propuesta de actuación
4.5.2	La falta de regulación que favorezca el uso de la computación cuántica para reducir los niveles de contaminación.	Fomentar acuerdos y políticas supra estatales.
4.5.3	La incompreensión de las ventajas de la computación cuántica en la reducción de los niveles emisión de gases de efecto invernadero.	Impulsar la alfabetización y cultura científicas.
4.5.4	La falta de visión, de intención o de inversión para fomentar la actividad científica en computación cuántica que produzca avances en el desarrollo de energías verdes y en almacenamiento de la energía generada por ellas.	Impulsar la alfabetización y cultura científicas.
4.6.1	La regulación insuficiente en relación con las tecnologías y áreas de conocimiento más afectadas por el cambio de paradigma que supondrá la aplicación de la computación cuántica en ellas.	Promover de la colaboración entre la ciencia y la política.
4.6.2	La falta de regulación específica para fomentar el empleo requerido por el uso de la computación cuántica.	Lograr consensos que posibiliten políticas plurianuales.
4.6.3	La inestabilidad gubernamental que impida la existencia de políticas públicas a largo plazo.	Lograr consensos que posibiliten políticas plurianuales.

En la tabla anterior se han identificado treinta y dos riesgos con los que podemos empezar a actuar. Parece que corroboran la principal hipótesis que se plantea en este estudio: el desarrollo y uso adecuados de la computación cuántica podrían verse condicionados negativamente por los factores políticos, económicos, socioculturales, tecnológicos, medioambientales y legales del entorno externo.

Profundizando un poco más en este trabajo, si se utilizan las propuestas de actuación para agrupar los riesgos asociados a cada una, obtenemos una segunda tabla con las acciones a realizar y los objetivos que se desean alcanzar al llevarlas a cabo, de forma que se pueda formular un plan con mayor facilidad.

Propuesta de actuación	Epígrafes
Establecer políticas económicas y fiscales adecuadas.	4.2.2 4.2.7
Fomentar acuerdos y políticas supra estatales.	4.1.1 4.1.2 4.1.3 4.1.6 4.1.7 4.1.8 4.3.1 4.3.5 4.5.2
Impulsar la alfabetización y cultura científicas.	4.3.2 4.3.3 4.4.1 4.4.2 4.4.3 4.4.5 4.5.3 4.5.4

Lograr consensos que posibiliten políticas plurianuales.	4.1.5 4.6.2	4.2.6 4.6.3	4.3.4
Promocionar el desarrollo científico local.	4.2.4	4.4.4	4.5.1
Promover de la colaboración entre la ciencia y la política.	4.1.4	4.6.1	
Usar las herramientas financieras globales disponibles.	4.2.1	4.2.3	4.2.5

No repetamos errores anteriores como la utilización de la ciencia para fabricar armamento, para alterar significativamente el clima de nuestro planeta o para incrementar la desigualdad social y la falta de equidad y justicia. Con la computación cuántica estamos todavía a tiempo y este trabajo de análisis nos propone posibles objetivos y acciones que podríamos empezar a poner en marcha inmediatamente.

En resumen, es posible -y necesario- adelantarse para intentar evitar, mitigar o, si no se puede hacer más, simplemente gestionar, la afección negativa que el entorno externo podría tener en el desarrollo y uso adecuados de la computación cuántica, y, consecuentemente, en el beneficio que su avance y adopción puede representar para la humanidad y el planeta.

6. Limitaciones y asunciones

Las principales limitaciones de este trabajo derivan de la falta de conocimiento actual sobre la posible aplicación de la computación cuántica en las diferentes áreas de conocimiento, mercados y sectores. Su prácticamente inexistente nivel de adopción en la actualidad dificulta tremendamente la capacidad de prever la afección que tendrá en la sociedad, en la economía y en medio natural.

Se asume, consecuentemente, que los riesgos identificados en este trabajo de aproximación, junto con la afección esperada, distarán finalmente de los que realmente se produzcan y del impacto real que derive de ellos. Será necesario actualizar el presente contenido según el tiempo vaya transcurriendo y la posibilidad de intuir riesgos, probabilidad e impacto, se incremente en función del nuevo conocimiento del que sea posible apropiarse para complementarlo.

Además, la metodología utilizada -el análisis PESTEL del entorno- podría resultar insuficiente e incluso inapropiada cuando el nivel de conocimiento sobre tecnologías cuánticas no sea el actual. En este momento ha facilitado una perspectiva multi visión que ha permitido una visión holística del asunto objeto del análisis, pero cuando la previsión no resulte tan aventurada por la falta de conocimiento actual de la sociedad y la escasez de personas expertas, tal vez lo más adecuado sea, realizar encuestas de percepción social multi dimensión -que incluyan los enfoques psicológico y sociológico- y complementarlas con análisis Delphi en el que sea posible la participación de las suficientes personas expertas.

Referencias

- Abramson, N. (1963). *Information theory and coding*, McGraw-Hill, 1963
- Alexeeff, G.V. (1987). *Risk Assessment and Management*, Nueva York: Plenum Press.
- Allende, M. & Da Silva, M. (2019). *Tecnologías cuánticas: una oportunidad transversal e interdisciplinar para la transformación digital y el impacto social*. Banco Interamericano de desarrollo.
- Baker, H., (2021). *How many atoms are in the observable universe?* Live Science.
- Barenco, A., Ekert, A., Sanpera, & A. Machiavello, C. (1996). *A short introduction to quantum computation*. La Recherche.
- Bechmann, G. (1995). *Riesgo y desarrollo técnico-científico. Sobre la importancia social de la investigación y valoración del riesgo*. Cuadernos de Sección. Ciencias Sociales y Económicas 2: 59-98 (Donostia: Eusko Ikaskuntza).
- Beck, U. (1986). *Risk Society: Towards a New Modernity*. Londres: Sage, 1992 (trad. cast. en Paidós: *La sociedad del riesgo*).
- Beck, U. (1996). *Teoría de la sociedad del riesgo. Las consecuencias perversas de la modernidad*, 201-222.
- Beck, U. (1998). *World Risk Society*. Cambridge: Polity Press (trad. cast. en Paidós: *La sociedad del riesgo global*).
- Bell, D. (1973). *El advenimiento de la sociedad post-industrial*, Madrid: Alianza, 1991.
- Benioff, P. (1980). *The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of computers as represented by Turing machines*. J Stat Phys 22, 563–591.
- Brown, K. & Munro, W. & Kendon, V. (2010). *Using Quantum Computers for Quantum Simulation*. Entropy. 12. 10.3390/e12112268.
- Buluta, I. & Nori, F. (2009). *Quantum simulators*. Science vol 326, Issue 5949 pp.108-11.
- Castells, M. (1996). *La era de la información*, 3 vols., Madrid: Alianza, 2000.
- Cavero, J. P. (2011). *Historia de la energía nuclear*. Anatomía de la Historia.
- Çitilci, T., & Akbalık, M. (2020). *The Importance of PESTEL Analysis for Environmental Scanning Process*. In Handbook of Research on Decision-Making Techniques in Financial Marketing (pp. 336-357). IGI Global.

- De Wolf, R. (2027). De Wolf, R. (2017). *The potential impact of quantum computers on society*. Ethics and Information Technology, 19(4), 271-276.
- Demmer, M. & Fonseca, R. & Koushanfar, F. (2008). *Richard Feynman: simulating physics with computers*. CS294: Reading the Classics, Berkeley.
- DiVincenzo, D. P. (2000). *The physical implementation of quantum computation*. Fortschritte der Physik: Progress of Physics, 48(9-11), 771-783.
- Douglas, M. (1985). *La aceptabilidad del riesgo según las ciencias sociales*, Barcelona: Paidós, 1996.
- Feynman, R.P. (1982). *Simulating physics with computers*. International journal of theoretical physics 21.
- Gambetta, J. (2022). *Expanding the IBM Quantum roadmap to anticipate the future of quantum-centric supercomputing*. IBM Research.
- Gambetta, J.M., Chow, J.M. & Steffen, M. (2017). *Building logical qubits in a superconducting quantum computing system*. Quantum Inf 3, 2.
- Koeck, W. (1995). *The Legal Regulation of Technical Risk*. R. von Schomberg (ed.), Contested Technology: Ethics, Risk and Public Debate, Tilburg: International Centre for Human and Public Affairs.
- Lloyd, S. (2006). *Programming the universe: a quantum computer scientist takes on the cosmos*. Vintage.
- Loehman, E. T. (1987). *Measuring Benefits for Air Quality from Survey Data*. L. B. Lave (ed.). Risk Assessment and Management, Nueva York: Plenum Press.
- Milvy, P. (1987). *Towards an Acceptable Criterion of Acceptable Risk*. Lave (1987). Mayo, D.G. y R.D. Hollander (eds.) (1991), *Acceptable Evidence: Science and Values in Risk Management*, Oxford: Oxford University Press.
- Moskvitch, K. (2021). *Fraunhofer se pasa a la cuántica: El Quantum System One de IBM llega a Europa*. IBM.
- Otero Carvajal, L.E. (2007). *La teoría cuántica y la discontinuidad de la física*. Umbral revista de la Facultad de Estudios Generales de la Universidad de Puerto Rico, recinto de Río Piedras, ISSN 2151-8386., 2007
- Paul DiMaggio, P. & Hargittai, E. & Neuman, W.R. & Robinson, J.P. (2001). *Social implications of the internet*. Annual Review of Sociology 27:1, 307-336
- Shrader-Frechette, K. (1985), *Risk Analysis and Scientific Method*, Dordrecht: Reidel.

- Sismondo, S. (1993), *Some Social Constructions*. *Social Studies of Science* 23: 515-553.
- Starr, C. y Whipple, C., (1980), *Risks and Risk Decisions*. Chalk (1988).
- Stehr, N. (1994), *Knowledge Societies*, Londres: Sage.