

INFORMACIÓN SOBRE TECNOLOGÍA

Computación cuántica: lo que dicen y lo que se espera

La autonomía en un entorno industrial necesita resolver problemas computacionales en los campos de la optimización y la inteligencia artificial (IA). Algunos de estos problemas no pueden resolverse con el hardware y el software disponibles actualmente. ¿Podría la computación cuántica ser la clave?



Thorsten Strassel
ABB Research Switzerland
Baden-Daettwil, Suiza

thorsten.strassel@
ch.abb.com



Elsi-Mari Borrelli
ABB Research Switzerland
Baden-Daettwil, Suiza

elsi-mari.borrelli@
ch.abb.com

La computación cuántica es actualmente uno de los temas de los que más se habla en tecnología. Y aun así está lejos de nuestro día a día en el mundo tradicional, su potencia disruptiva sigue sin llegar a la mayoría. Cada nuevo día aparecen nuevos titulares, a bombo y platillo, que culminaron con la espectacular noticia a finales de 2019 que afirmaba que Google había ganado a sus competidores en la carrera por la «supremacía cuántica». El nuevo récord fue recibido con entusiasmo por la comunidad tecnológica, que llegaron a comparar este importante logro de ingeniería con el aterrizaje del Apollo 11 en la luna →01-02.

De vuelta en la Tierra, es bueno que cuestionemos y evaluemos el significado de la computación cuántica en las aplicaciones industriales del futuro: ¿qué tipo de tecnologías permitiría la computación cuántica en las aplicaciones industriales? ¿Qué obstáculos impiden el uso de la computación cuántica a día de hoy? ¿Hay otras tecnologías emergentes que puedan tener un impacto parecido?

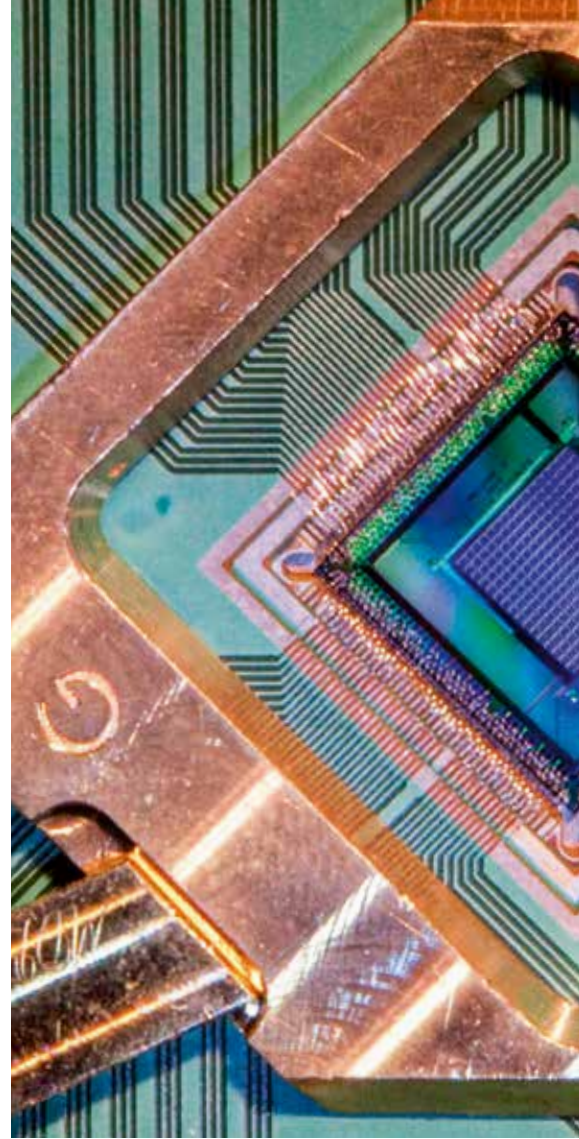
¿Puedo comprarme una computadora cuántica ahora?

Un buen punto de partida es establecer qué son las computadoras cuánticas y quién está en la carrera por construirlas.

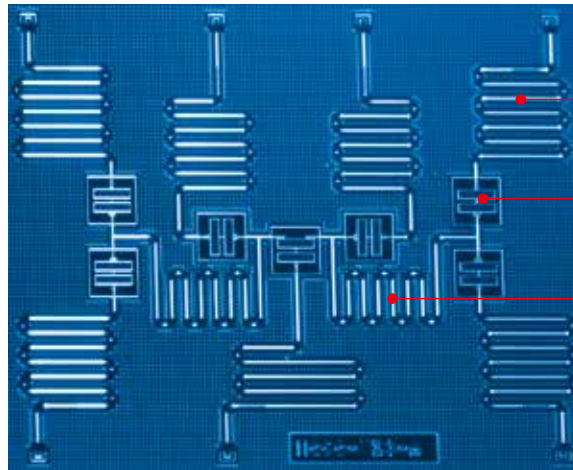
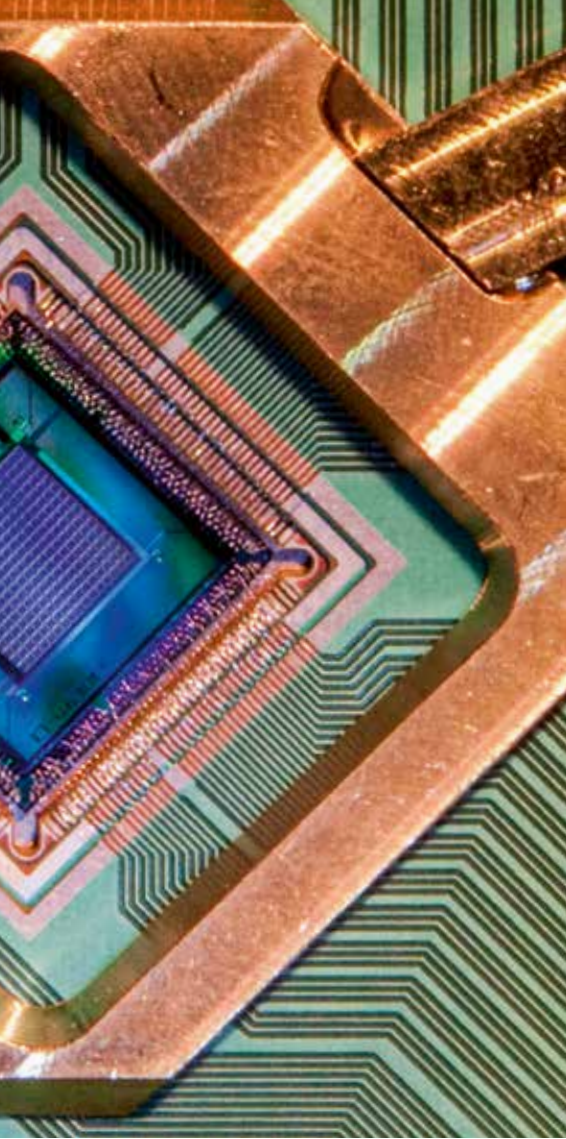
Ni se espera que las computadoras cuánticas vayan a sustituir rápidamente a los portátiles —ni siquiera a largo plazo— ni son superordenadores universales que

Las computadoras cuánticas son, de hecho, máquinas grandes especializadas.

vayan a sustituir a la computación de grandes clústeres. Las computadoras cuánticas son, de hecho, máquinas grandes especializadas que tienen por objeto superar



01



Control y lectura resonador (x7)

Qubit (x7)

Resonador bus (x2).
Permiten una puerta de 2 qubit.

02



03

01 La computación cuántica puede ser la clave para lograr la autonomía de las máquinas en la industria, pero ¿son viables fuera del laboratorio? Se muestra un chip D-Wave 2000Q

02 Diseño temprano de un chip qubit IBM7 basado en tecnología superconductora.

03 Computadora cuántica IBM Q System One.

al hardware convencional (y sus sucesores) en problemas computacionales específicos —de los que hablaremos más abajo →03. Las computadoras cuánticas utilizan principios de mecánica cuántica para resolver en minutos problemas para los que los superordenadores más rápidos necesitarían miles de años o más. Y lo que es más importante, la aceleración solo puede conseguirse utilizando algoritmos especiales (cuyo diseño es una ciencia en sí misma) que aprovechan las leyes de la física cuántica; los algoritmos actuales no sirven.

La idea de la computación cuántica la puso sobre la mesa el Premio Nobel, Richard Feinman, en su ya famoso discurso en IBM en 1982. A ello le siguieron iniciativas experimentales, que dieron lugar, a finales de los 90, a los primeros dispositivos computacionales cuánticos que permitieron la manifestación del denominado qubit, el pariente cuántico del bit de la computación clásica. Los últimos avances teóricos han desarrollado el campo de una manera significativa. Hoy, los chips de 54 qubits están a la vanguardia y corpora-

ciones como Google, IBM y Honeywell han asumido el liderazgo del hardware con departamentos de investigación de alto perfil mientras un par de startups de hardware intentan seguirles el ritmo. (Estos esfuerzos se refieren a una arquitectura universal para computadoras cuánticas; en el caso de hardware

El proceso solo puede acelerarse utilizando algoritmos especiales.

optimizado para el algoritmo específico del temple cuántico, la empresa D-Wave es la más conocida.) Simultáneamente, las agencias gubernamentales y la Wallenberg Foundation en Suecia han contribuido al desarrollo de conocimiento y la comercialización. Hasta ahora, y a pesar de todos estos esfuerzos, la tecnología no ha salido de las paredes del laboratorio y no tiene aplicación comercial. ¿Pero durante cuánto tiempo?

¿Qué está ocurriendo dentro?

Desde que la idea de la computación cuántica vio la luz y se llevaron a cabo las primeras implementaciones de qubit, se han estudiado varios candidatos para implementar el hardware. A día de hoy, las trampas de iones y los bucles superconductores son las tecnologías más maduras utilizadas para la implementación de las computadoras cuánticas →04–05.

Los chips más avanzados tienen 54 qubits, con cada uno conectado a otros cuatro qubits para superconducir computación cuántica universal. En →04, los cables microondas para las señales de control están conectadas al chip cuántico, que es el cuadrado oscuro en la

—
Se requieren innovaciones técnicas importantes para desarrollar la tecnología más allá de unos cuantos miles de qubits.

parte inferior de la imagen. En el caso de las trampas de iones, el número de qubits indicado es 11 qubits con total conectividad. Los qubits pueden implementarse sobre varias plataformas tecnológicas que tienen pros y contras para el diseño de la computadora cuántica. Para poder ejecutar un algoritmo en el hardware cuántico, los qubits han sido diseñados para interactuar a través de varios tipos de puertas lógicas. Más allá de las propiedades de los propios qubits, su disposición específica y las características de operación de la puerta determinan la implementación exitosa de los algoritmos cuánticos. Dado que los qubits, y por tanto la información que almacenan, son muy sensibles al ruido que introducen las fuentes externas y las propias operaciones de la puerta, es muy difícil lograr una implementación fiel de los algoritmos. Para reducir el ruido que la interacción introduce en sus proximidades, las computadoras cuánticas actuales deben utilizarse a temperaturas próximas a cero absoluto o en vacío de alta calidad →06. Una computadora cuántica universal, por lo tanto, requeriría eficientes algoritmos de corrección de errores para contrarrestar los efectos perjudiciales del ruido. Se han propuesto varias estrategias de corrección de errores, pero utilizan qubits, lo que reduce el número final de qubits disponible en el chip para el propio problema computacional.

Los chips cuánticos actuales se limitan a varias decenas de qubits, aún con un número importante de errores en las operaciones de puerta. Pero, ¿cómo está previsto desarrollar el hardware a medio y largo plazo?



04

Se ha propuesto un equivalente de la conocida Ley de Moore que prevé duplicar la potencia de la computación cuántica (el «volumen cuántico») al año [1]. No obstante, se requieren innovaciones técnicas importantes para desarrollar la tecnología más allá de unos cuantos miles de qubits. Mientras esperamos a que la tecnología llegue hasta la inmensa potencia de computación prometida, conviene preguntarnos si ya puede haber algunas ventajas a medio plazo.

Dejemos actuar a los algoritmos

Los ordenadores cuánticos son probablemente más conocidos por la amenaza teórica que plantean para los sistemas de cifrado existentes. Sin embargo, dado que para factorizar criptográficamente cifras importantes se requiere computación con cerca de 1 millón de qubits de alta calidad, hasta los mejores chips cuánticos a pequeña escala se quedan cortos en las capacidades requeridas. La misma perspectiva aplica a todos los algoritmos cuánticos de «Misión Marte» —es decir, los que prometen una velocidad impresionante para un gran número de aplicaciones (frente a los algoritmos «lunares» que prometen una velocidad menos impresionante pero con hardware limitado).

La notable brecha entre el hardware existente y los requisitos para ejecutar algoritmos significativos ha creado de forma natural un terreno fértil para el escepticismo. ¿Es quizás el reto de ingeniería que supone obtener una ventaja real con hardware cuántico sencillamente demasiado grande? Para dar a los escépticos un argumento



04 Interior de un sistema de computación cuántica IBM El chip cuántico está situado en el pequeño cuadrado oscuro en la parte inferior central.

05 Tecnologías de qubits utilizadas para la computación cuántica. Los qubits normalmente se manipulan con tecnología microondas o láser.

05a bucles superconductores.

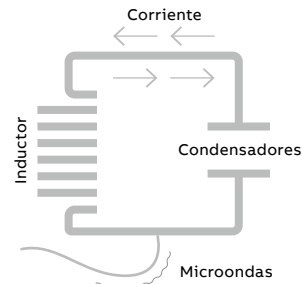
05b Iones atrapados.

05c Puntos cuánticos de silicio

mejor que el de «esperad y veréis», en 2012, el físico John Preskill sugirió otro tipo de hito para las computadoras cuánticas: la supremacía cuántica. Para conseguir este hito, se debía poder demostrar una computadora cuántica que realizara una tarea no trivial (que ni siquiera tiene que ser útil) mucho más rápido que el mejor hardware clásico. Este hito es lo que, en octubre de 2019, consiguió el equipo de computación cuántica de Google [2].

¿Es quizás el reto de ingeniería que supone obtener una ventaja con computación cuántica sencillamente demasiado grande?

Los científicos de Google utilizaron un problema computacional artificial de muestreo de circuitos cuánticos aleatorios. Se generaron secuencias de puertas cuánticas aleatoriamente, es decir, sin intención de formar algoritmos reales, y se pidió a la computadora cuántica de 54 qubits que devolviera el resultado de la «computación» en forma de una salida de cadena de bits (por ejemplo, 0101...). Dada la naturaleza cuántica de las puertas, para cada secuencia, existe una variación estadística con



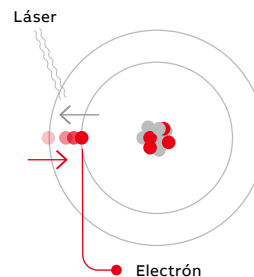
Bucles superconductores

Una corriente eléctrica sin resistencia oscila en un bucle de circuito de resonancia microscópica en un chip. Se inyectan señales de microondas para la manipulación de los niveles de energía.

- + Operaciones de puerta rápidas. Tecnología de fabricación próxima a los chips semiconductores.

- El ciclo de vida de la información en qubit es corto. Debe conservarse en crio-dispositivos a temperatura ultrabaja.

05a



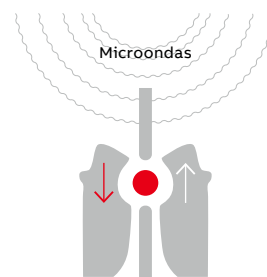
Iones atrapados

Se manipulan los estados de los electrones en los iones. Se utiliza el enfriamiento de láser y los campos RF para atrapar los iones, haces de láser adicionales para manipulación.

- + Qubits muy estables. Fidelidades de puerta más altas conseguidas.

- Funcionamiento lento. Se requiere acceso óptico para haces de láser y vacío ultraalto.

05b



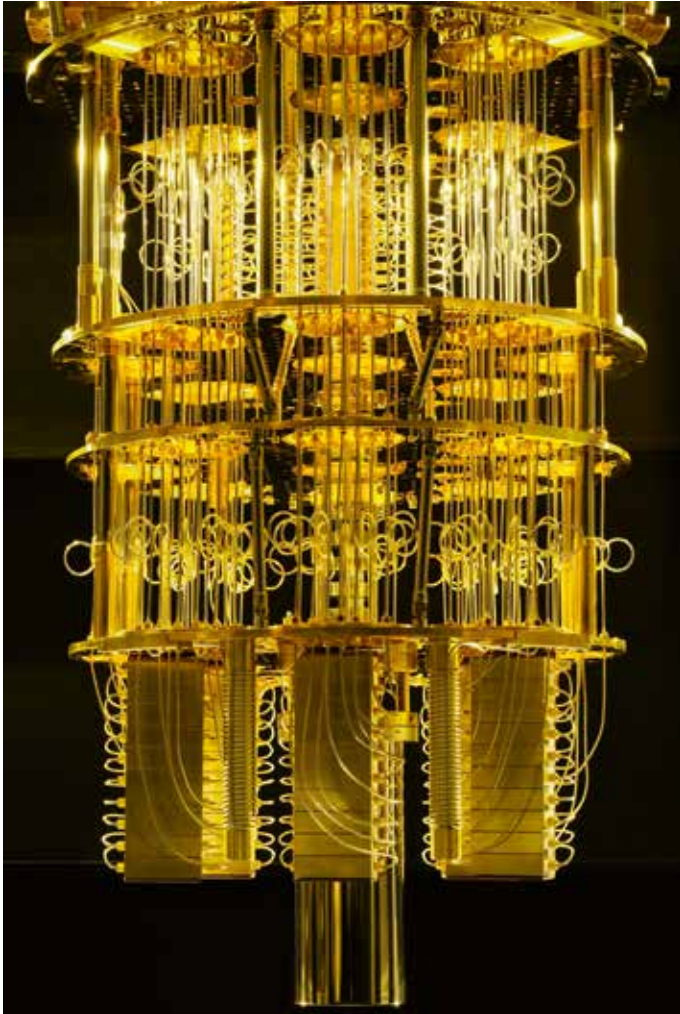
Puntos cuánticos de silicio

Se crean «átomos artificiales» que contienen un único electrón en una estructura semiconductor de silicio. Pulsos de microondas controlan el estado cuántico del electrón.

- + Estable. Construido con tecnología de fabricación ya utilizada en la industria de los semiconductores.

- Tecnología menos madura. Debe conservarse en crio-dispositivos a temperatura ultrabaja.

05c



06

propiedades cuánticas inherentes en las salidas obtenidas. El algoritmo cuántico aplicado repite la computación y crea distribuciones para muestrear las cadenas de bits correspondientes a cada circuito cuántico lo más rápido posible. Encontrar la salida más probable de este circuito cuántico aleatorio con un ordenador clásico se vuelve exponencialmente más difícil a medida que aumentan las cifras de qubits y las puertas aplicadas.

Los científicos calcularon que un ordenador normal tardaría 10 000 años en realizar esta tarea; la computadora cuántica tardó varios minutos.

La tarea con la que se logró la supremacía no es útil para ninguna aplicación y nada sugiere que con los

chips actuales pueda resolverse ninguna tarea útil por el momento. La demostración «solo» evidenció que hasta una computadora cuántica de pequeña escala puede hacer una tarea concreta no trivial mejor que un ordenador clásico. En este sentido, un término como «ventaja» cuántica en lugar de «supremacía» podría ser más apropiado para describir la hazaña.

Sin embargo, también hay evidencia de que hasta ese tipo de computadoras cuánticas de escala intermedia ruidosas (NISQ) con varios cientos o miles de qubits podría contribuir a resolver complicados problemas de optimización combinatoria con heurística cuántica como el de temple cuántico o un algoritmo de optimización aproximada cuántica (QAOA) →07. Estos problemas de optimización

Incluso las computadoras NISQ con cientos o miles de qubits podrían contribuir a resolver complicados problemas de optimización.

combinatoria tienen muchas aplicaciones y los chips cuánticos de escala relevante ya se quedan cortos —así como las hojas de ruta a plazo intermedio de todos los actores de hardware cuántico. En septiembre de 2020, IBM publicó su hoja de ruta de computación cuántica, que prevé un dispositivo de más de 1000 qubits, denominado IBM Quantum Condor, para 2023 [3]. En sectores como el financiero o el automovilístico, recientemente se ha visto cómo estos avances en los chips cuánticos podrían aportar ventajas [4,5].

En el asiento del conductor de la autonomía de la industria

ABB ha estudiado la tecnología de computación cuántica para mapear su potencial con vistas a mejorar la optimización de grandes flotas autónomas, sistemas de energía, cadenas de suministro o procesos de fabricación. Muchas de las aplicaciones suponen complicados problemas de optimización que actualmente no pueden resolverse de manera eficiente, o de ninguna manera. ¿Será la computación cuántica la clave para resolver estos problemas?

En medio de toda la excitación que rodea a la computación cuántica, es bueno recordar que no solo el hardware puede revolucionar los enfoques computacionales de los sistemas autónomos del futuro. Las innovaciones en los propios algoritmos de optimización, en última instancia, presentan

—
06 IBM Q Dilution Refrigerator: la baja temperatura en la parte inferior garantiza el funcionamiento del chip con poco ruido.

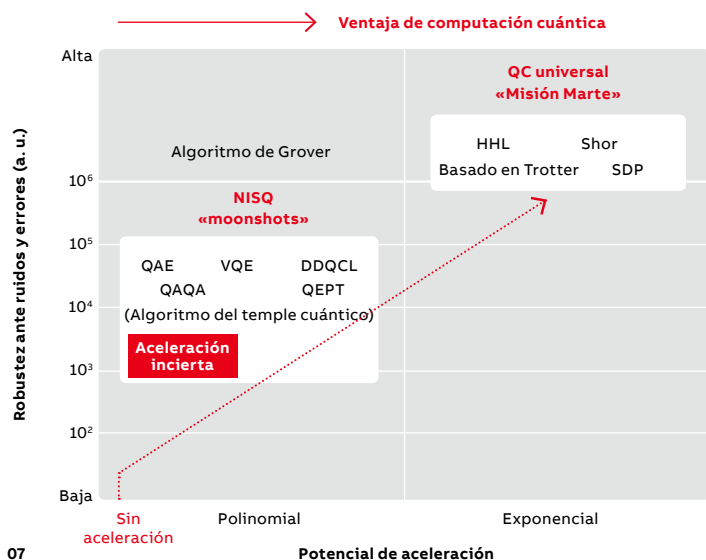
—
07 Algoritmos de computación cuántica seleccionados se agrupan en el régimen NISQ a corto y medio plazo; los algoritmos a largo plazo de Misión Marte son para computadoras cuánticas universales [6].

un mejor retorno sobre la inversión, incluso con el mismo hardware antiguo. Algunas de estas innovaciones están inspiradas en algoritmos de computación cuántica y han acertado mucho los tiempos de solución de algunos problemas. Estos avances algorítmicos no han llegado a los titulares como lo ha hecho la computación cuántica, pero podrían tener un impacto mayor a corto plazo.

En el asiento del conductor de la autonomía industrial, ABB está dirigiendo la adopción de tecnologías computacionales emergentes en nuevas aplicaciones industriales. A medida que los avances

—
No solo el hardware puede revolucionar los enfoques computacionales hacia los sistemas autónomos del futuro.

tecnológicos se transforman en software y hardware cuántico, es fundamental estar preparados para aprovechar todo el potencial para redibujar el escenario de la automatización industrial •



- Algoritmo de Grover: un algoritmo cuántico que encuentra, con probabilidad alta, la entrada única a una función de caja negra que produce un valor de salida específico.
- QAE: estimación de la amplitud cuántica para muestreo Monte Carlo
- VQE: solucionador propio cuántico variacional
- DDQCL: aprendizaje circuito cuántico impulsado por datos
- QAQA: algoritmo de optimización aproximada cuántica
- QEPT: transferencia de población mejorada con cuántica
- HHL: (Harrow, Hassidim, Lloyd) algoritmo cuántico para resolver sistemas de ecuaciones lineales
- Shor: el algoritmo de Shor es un algoritmo polinomial de computación cuántica de factorización de números enteros
- Basado en Trotter: para la simulación de química
- SDP: programas semidefinidos para problemas de optimización combinatorios

07

—
Referencias

<p>[1] J. Gambetta and S. Sheldon, "Cramming More Power Into a Quantum Device," IBM Research Blog 2019. Available: https://www.ibm.com/blogs/research/2019/03/power-quantum-device/. [Accessed September 2, 2020].</p> <p>[2] F. Arute, et al., "Quantum supremacy</p>	<p>using a programmable superconducting processor," Nature 574, pp. 505–510, 2019. Available: https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5. [Accessed September 2, 2020].</p> <p>[3] J. Gambetta, "IBM's Roadmap For Scaling Quantum Technology." Available: https://www.ibm.com/blogs/research/2020/09/ibm-quantum-roadmap/. [Accessed September 21, 2020].</p> <p>[4] F. Neukart et al., "Traffic Flow Optimization Using a Quantum Annealer," Frontiers in ICT, December 20, 2017. Available: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fict.2017.00029/full.</p>	<p>[5] M. Kühn et al., "Accuracy and Resource Estimations for Quantum Chemistry on a Near-Term Quantum Computer," Journal of Chemical Theory and Computation 2019 15(9),4764-4780 Available: https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jctc.9b00236. [Accessed September 2, 2020].</p> <p>[6] A. Montanaro, "Quantum algorithms: an overview". npj Quantum Information 2, article number 15023, 2016. Available: https://doi.org/10.1038/npjqi.2015.23. [Accessed September 2, 2020].</p>
---	--	--