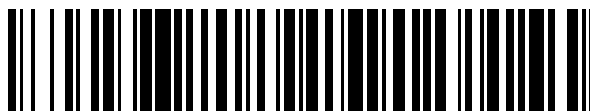


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 850 151**

51 Int. Cl.:

G06N 10/00 (2009.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.06.2015** **E 15174362 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **09.12.2020** **EP 3113084**

54 Título: **Dispositivo y procedimiento de procesamiento cuántico**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
25.08.2021

73 Titular/es:

PARITY QUANTUM COMPUTING GMBH (100.0%)
Rennweg 1/ Top 314
6020 Innsbruck, AT

72 Inventor/es:

LECHNER, WOLFGANG;
HAUKE, PHILIPP y
ZOLLER, PETER

74 Agente/Representante:

GONZÁLEZ PECES, Gustavo Adolfo

ES 2 850 151 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Dispositivo y procedimiento de procesamiento cuántico

Campo

5 Las realizaciones descritas en la presente memoria se refieren a aparatos y procedimientos para computar soluciones a problemas computacionales usando un sistema cuántico y, más específicamente, a un sistema cuántico que incluye una pluralidad de bits cuánticos (qubits).

Antecedentes

10 Los dispositivos de computación basados en el procesamiento clásico de la información, es decir, los dispositivos de computación que no hacen uso de los efectos mecánicos cuánticos, que una vez comenzaron como computadores de cable, los cuales sólo podían realizar operaciones específicas. La transición a los computadores totalmente programables revolucionó el campo e inició la era de la información. En la actualidad, los dispositivos de computación cuántica, es decir, los dispositivos de computación que, posiblemente además de utilizar el procesamiento de información clásico, hacen uso de los efectos de la mecánica cuántica para resolver problemas de computación, se encuentran en cierto sentido en las etapas de los computadores de cable en el sentido de que sólo pueden abordar los problemas de computación para los que están especialmente diseñadas, es decir, "de cable". En particular, todos los dispositivos de computación cuántica existentes, en todas las plataformas y disciplinas, aún no son totalmente programables y escalables.

20 Por ejemplo, el dispositivo de computación cuántica de D-WAVE SYSTEMS Inc., basado en qubits superconductores, forma dos grupos de qubits, en los que pueden tener lugar interacciones arbitrarias entre qubits de diferentes grupos, pero no se producen interacciones entre qubits del mismo grupo. Pueden añadirse otros grupos de qubits, pero con las mismas limitaciones. Por lo tanto, este dispositivo de computación cuántica está restringido por sus restricciones de cableado, que no permiten las interacciones necesarias para realizar una arquitectura totalmente programable y escalable.

25 Por lo tanto, hay una necesidad de mejorar los procedimientos y dispositivos para resolver problemas de computación usando un sistema cuántico.

30 El documento US 2015/111754 A1 se refiere al recocido cuántico. Se proporciona al menos un procesador para recibir un problema computacional y convertir el problema computacional en un Hamiltoniano final. El sistema comienza con un Hamiltoniano inicial y evoluciona a través de un Hamiltoniano de evolución hasta el Hamiltoniano del problema final HP cuyo estado fundamental codifica una solución al problema. Un ejemplo de Hamiltoniano del problema incluye un primer componente proporcional a los términos diagonales de un qubit y un segundo componente proporcional a los términos diagonales de varios qubit. El documento US 2012/254586 A1 se refiere al recocido cuántico. Un procesador cuántico que comprende qubits de flujo superconductor puede ser usado para encarnar un Hamiltoniano del problema en la forma de un Hamiltoniano de Ising de 2 locales. Aolita y otros, Physical Review Letters 106, 090501 (2011) se refiere a los estados cuánticos de los sistemas cuánticos de variables continuas (CV), de dimensiones infinitas.

Sumario

Según la invención definida por la reivindicación 1, se proporciona un procedimiento de cálculo de una solución a un problema computacional utilizando un sistema cuántico que incluye una pluralidad de qubits.

40 De acuerdo con otra realización definida en la reivindicación independiente 13, se proporciona un aparato para computar las soluciones a los problemas de computación.

Las realizaciones también se dirigen a los procedimientos para operar los sistemas y dispositivos revelados, y al uso del sistema revelado para realizar los procedimientos de acuerdo con las realizaciones descritas en el presente documento.

45 Otras ventajas, características, aspectos y detalles que pueden combinarse con las realizaciones descritas en la presente memoria serán evidentes a partir de las reivindicaciones dependientes, la descripción y los dibujos.

Breve descripción de los dibujos

Una completa y habilitante revelación a una de las habilidades ordinarias en la técnica se establece más particularmente en el resto de la memoria incluyendo la referencia a los dibujos que la acompañan:

50 La Fig. 1 muestra un aparato para computar soluciones a problemas computacionales usando un sistema cuántico, de acuerdo con las realizaciones descritas en la presente memoria;

Las Figs. 2-4 muestran ejemplos de la disposición de una pluralidad de qubits de acuerdo con las realizaciones descritas en la presente memoria;

La figura 5 ilustra la noción de un Hamiltoniano de un solo cuerpo según las realizaciones descritas en la presente memoria;

Las Figs. 6-7 ilustran la noción de un Hamiltoniano de corto alcance según las realizaciones descritas en la presente memoria;

5 La figura 8 ilustra un procedimiento para calcular una solución a un problema computacional utilizando un sistema cuántico que comprende una pluralidad de qubits.

Las Figs. 9-16 ilustran codificaciones específicas de un problema computacional en un Hamiltoniano del problema y el correspondiente Hamiltoniano final, de acuerdo con las realizaciones descritas en la presente memoria.

10 La Fig. 17 ilustra las ventajas de las realizaciones descritas en la presente memoria en relación con la robustez del sistema cuántico frente a los errores.

Descripción detallada

15 A continuación, se hará referencia en detalle a diversas realizaciones, de las que se ilustran uno o más ejemplos en cada figura. Cada ejemplo se proporciona a modo de explicación y no pretende ser una limitación. Por ejemplo, las características ilustradas o descritas como parte de una realización pueden utilizarse en otras realizaciones o junto con ellas para dar lugar a otras realizaciones más. Se pretende que la presente divulgación incluya esas modificaciones y variaciones.

20 Dentro de la siguiente descripción de los dibujos, los mismos números de referencia se refieren a los mismos componentes. Generalmente, sólo se describen las diferencias con respecto a las realizaciones individuales. Las estructuras que se muestran en los dibujos no están necesariamente representadas a escala y pueden contener detalles dibujados de manera exagerada para permitir una mejor comprensión de las realizaciones.

25 Las realizaciones descritas en la presente memoria se relacionan con un sistema cuántico que incluye una pluralidad de qubits. Un qubit, como se describe en la presente memoria, puede referirse a un sistema cuántico mecánico de dos niveles. Un qubit puede incluir dos estados de base cuánticos $|0\rangle$ y $|1\rangle$ que representan posibles estados cuánticos del qubit. Según el principio de superposición de la mecánica cuántica, cada superposición de la forma $a|0\rangle + b|1\rangle$ es un posible estado cuántico del qubit. Por lo tanto, a y b son números complejos. Matemáticamente, un qubit puede ser representado por un espacio vectorial bidimensional. Una pluralidad de qubits puede tener estados base cuánticos correspondientes a configuraciones en las que cada qubit de la pluralidad de qubits está o bien en el estado cuántico $|0\rangle$ o en el estado cuántico $|1\rangle$. Considerando, por ejemplo, una pluralidad de cinco qubits, un estado base cuántico ejemplar para los 5 qubits puede ser $|00101\rangle$. Allí, el estado cuántico $|00101\rangle$ representa una configuración en la que el primer, segundo y cuarto qubit están en el estado cuántico $|0\rangle$ y el tercer y quinto qubit están en el estado cuántico $|1\rangle$. Para una pluralidad de m qubits, hay m^2 de estados base cuánticos. En vista del principio de superposición, dados dos estados cuánticos para una pluralidad de qubits, una superposición de los estados de base cuántica es también un estado cuántico para la pluralidad de qubits. Por ejemplo, una superposición de la forma $a|00101\rangle + b|11110\rangle + c|11111\rangle$, con números complejos a , b y c , es un estado cuántico para la pluralidad de qubits. Matemáticamente, un sistema cuántico que consiste en una pluralidad de m qubits puede ser representado por un espacio vectorial de 2^m dimensional.

35 La pluralidad de qubits puede incluir o consistir en una pluralidad de qubits superconductores, por ejemplo qubits de transmisión o flujo. Un qubit superconductor puede incluir un bucle superconductor primario y uno secundario. Las corrientes superconductoras que se propagan en el sentido de las agujas del reloj y en sentido contrario, respectivamente, en el bucle superconductor primario pueden formar los estados básicos cuánticos $|1\rangle$ y $|0\rangle$ del qubit superconductor. Además, una polarización de flujo magnético a través del bucle superconductor secundario puede acoplar los estados básicos cuánticos $|0\rangle$ y $|1\rangle$.

40 Alternativamente, el sistema cuántico puede realizarse utilizando un sistema de iones atrapados. En este caso, los estados de base cuánticos $|0\rangle$ y $|1\rangle$ de un qubit están formados por dos niveles de un colector Zeeman o hiperfino o a través de una transición óptica prohibida de iones alcalinotérreos, o iones alcalinotérreos de carga positiva, como el Ca^{40+} .

45 Otra alternativa es que el sistema cuántico se realice utilizando átomos ultracongelados, por ejemplo, átomos alcalinos neutros ultracongelados, que están atrapados en una red óptica o en grandes redes espaciadoras de campos láser. Los átomos pueden evolucionar hacia un estado fundamental utilizando el enfriamiento por láser. Los estados de base cuántica de un qubit están formados por el estado fundamental de un átomo y un estado de Rydberg alto. Los qubits pueden ser dirigidos por la luz láser.

50 Como otra alternativa, el sistema cuántico puede realizarse con puntos cuánticos. Los qubits de puntos cuánticos pueden ser fabricados a partir de heteroestructuras de GaAs/AlGaAs. Los qubits están codificados en estados de espín, que pueden prepararse sintonizando adiabáticamente el potencial de un solo pozo a un potencial de doble pozo.

5 Como otra alternativa, el sistema cuántico puede realizarse con impurezas en cristales de estado sólido, como los centros NV, que son defectos puntuales en los cristales de diamante. Otras impurezas están siendo investigadas, por ejemplo, centros de color ligados a impurezas de cromo, iones de tierras raras en cristales de estado sólido, o centros de defectos en carburo de silicio. Los centros NV tienen dos electrones no apareados, lo que proporciona un estado fundamental de espín-1 que permite la identificación de dos niveles de defectos agudos con grandes tiempos de vida que pueden ser usados para realizar un qubit, posiblemente en conjunción con los espines nucleares circundantes.

10 Según las realizaciones, el sistema cuántico puede incluir uno o más, o una pluralidad de sistemas cuánticos individuales de nivel q , en los que q puede ser una constante. Por ejemplo, q puede estar en el rango de 2 a 8, por ejemplo, 3, 4, 5 o 6. Un sistema cuántico individual de nivel q puede incluir una base consistente en los estados q $|0\rangle, |1\rangle, \dots, |q-1\rangle$. Un sistema cuántico individual de 3 niveles se denominará "qutrit".

15 Un Hamiltoniano de un sistema cuántico puede representar una interacción o una pluralidad de interacciones para el sistema cuántico. Un Hamiltoniano es un operador que actúa en el sistema cuántico. Los valores eigen (propios) de un Hamiltoniano corresponden a un espectro de energía del sistema cuántico. El estado fundamental de un Hamiltoniano es el estado cuántico del sistema cuántico con energía mínima. El estado fundamental de un Hamiltoniano puede ser un estado cuántico a temperatura cero.

20 Un sistema de computación clásico, como se describe en la presente memoria, puede referirse a un sistema de computación que opera con bits clásicos. Un sistema de computación clásico puede incluir una unidad central de procesamiento (CPU) para procesar información con bits clásicos y/o una memoria para almacenar información con bits clásicos. Un sistema de computación clásico puede incluir uno o más computadores convencionales y/o una red de computadores convencionales, como los computadores personales (PC).

25 Antes de proporcionar una descripción detallada de las realizaciones, algunos aspectos de la presente divulgación se explicarán ahora con referencia a la Fig. 1, que ilustra un aparato ejemplar 400 para calcular soluciones a problemas computacionales de acuerdo con las realizaciones descritas en la presente memoria.

30 El aparato 400 que se muestra en la Fig. 1 está adaptado para calcular soluciones a problemas de computación usando un sistema cuántico 420. El sistema cuántico 420 incluye una pluralidad de qubits 100, cada uno de los cuales está representado en la Fig. 1 por un punto negro. Según la representación mostrada en la Fig. 1, la pluralidad de qubits 100 están dispuestos según una red bidimensional 120, en particular una red cuadrada bidimensional.

La Fig. 1 muestra además una unidad de refrigeración 410 configurada para enfriar el sistema cuántico 420. La unidad de refrigeración 410 puede enfriar el sistema cuántico 420 a una temperatura de operación.

35 La figura 1 muestra un sistema de computación clásico 450. El sistema de computación clásico 450 está configurado para recibir, como entrada, un problema computacional 452 a ser resuelto. El problema computacional 452 puede ser, por ejemplo, un problema de NP complejo o difícil, como, por ejemplo, el problema del vendedor viajero o el problema del modelo de espín de Ising. En este caso, "NP" significa "tiempo polinómico no determinístico".

40 El sistema de computación clásico 450 está configurado además para codificar el problema computacional 452 en un Hamiltoniano del problema 472 del sistema cuántico 420. Según la realización ilustrada en la Fig. 1, el Hamiltoniano del problema 472 tiene la forma $H^{\text{prob}} = \sum_k J_k \sigma_z^{(k)}$, en la que $\sigma_z^{(k)}$ es un operador de Pauli que actúa en un k -ésimo qubit de la pluralidad de qubits 100, y en la que cada J_k es un parámetro ajustable determinado por una o más entidades externas, por ejemplo, los campos magnéticos, que pueden ajustarse a cada qubit k individualmente. Por ejemplo, J_k puede ser la intensidad de un campo magnético ajustable que influye en el k -ésimo qubit. Puede proporcionarse una pluralidad de entidades externas ajustables, por ejemplo, los campos magnéticos, en los que cada entidad externa ajustable influye en un solo qubit de la pluralidad de qubits. Ajustando las entidades externas, los parámetros J_k pueden ser ajustados dependiendo del problema computacional 452.

45 La codificación del problema computacional 452 en el Hamiltoniano del problema 472, tal como lo realiza el sistema computacional clásico 450, incluye la determinación, a partir del problema computacional 452, de una configuración de codificación del problema para la pluralidad de parámetros ajustables J_k . Para cada uno de los parámetros ajustables J_k , se puede determinar un valor de parámetro dependiendo del problema computacional 452. En consecuencia, la configuración de codificación del problema depende del problema computacional.

50 La Fig. 1 muestra además una unidad de recocido cuántico programable 430 adaptada para realizar el recocido cuántico pasando de un Hamiltoniano inicial del sistema cuántico 420 a un Hamiltoniano final del sistema cuántico 420.

55 Según la realización descrita con respecto a la Fig. 1, el Hamiltoniano inicial tiene la forma $H^{\text{init}} = \sum_k a_k \sigma_x^{(k)}$, donde a_k es un coeficiente y donde $\sigma_x^{(k)}$ es un operador de Pauli que actúa en el k -ésimo qubit en la pluralidad de qubits 100. Los operadores de Pauli $\sigma_z^{(k)}$ y $\sigma_x^{(k)}$ pueden ser operadores de Pauli no conmutables, en particular los anti-conmutables. El Hamiltoniano inicial H^{init} puede ser independiente del problema computacional 452.

El Hamiltoniano final es la suma del Hamiltoniano del problema 472 y un Hamiltoniano de corto alcance 474. Según la realización, el Hamiltoniano de corto alcance 474 es un Hamiltoniano de plaquetas que representa las interacciones entre grupos de qubits correspondientes a las plaquetas. Las plaquetas pueden ser, por ejemplo, cuadrados elementales de una red cuadrada bidimensional según la cual se disponen los qubits. En la figura 7, que se describe con más detalle a continuación, se muestra un ejemplo de una plaqueta 370 de una red bidimensional según las realizaciones descritas en la presente memoria. El Hamiltoniano de corto alcance es un Hamiltoniano de cuerpo d , por ejemplo, un Hamiltoniano de plaquetas de 4 cuerpos, donde d es independiente del problema computacional 452. Según las realizaciones, el Hamiltoniano de corto alcance 474 puede ser independiente del problema computacional 452.

Como se ha mencionado anteriormente, el problema computacional 452 está codificado en el Hamiltoniano del problema 472, en particular en la configuración de codificación de los parámetros ajustables J_k . Según las realizaciones, la codificación es tal que el Hamiltoniano 470 final, que es la suma del Hamiltoniano del problema 472 y el Hamiltoniano 474 de corto alcance, tiene un estado fundamental que contiene información sobre una solución al problema computacional 452. Por consiguiente, si el sistema cuántico 420 se encuentra en el estado fundamental del Hamiltoniano final 470, la información sobre el problema computacional puede ser revelada midiendo el sistema cuántico 420.

Según las realizaciones descritas en la presente memoria, y como indica la flecha 499 de la Fig. 1, el sistema cuántico 420 ha evolucionado hacia el estado fundamental del Hamiltoniano final 470, en el que la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema 472 están en la configuración de codificación del problema. De acuerdo con la realización mostrada en la Fig. 1, el sistema cuántico 420 está evolucionado hacia el estado fundamental del Hamiltoniano final 470 por la unidad de recocido cuántico 430 que realiza el recocido cuántico. En este caso, realizar el recocido cuántico incluye pasar del Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final 470.

Según la realización, el sistema cuántico 420 se inicializa en un estado cuántico inicial enfriando el sistema cuántico 420 hacia un estado fundamental del Hamiltoniano inicial. Además, la unidad de recocido cuántico programable 430 está adaptada para hacer evolucionar el sistema cuántico 420 desde el estado cuántico inicial en un tiempo inicial hasta un estado cuántico final en un tiempo final, mediante la realización de un recocido cuántico. El recocido cuántico puede incluir el paso del Hamiltoniano inicial en el tiempo inicial al Hamiltoniano final 470 en el tiempo final para evolucionar el sistema cuántico 420 desde el estado cuántico inicial al estado cuántico final. El recocido cuántico puede realizarse mientras el sistema cuántico 420 se mantenga a una temperatura sustancialmente igual a la de operación por la unidad de enfriamiento 410.

El recocido cuántico puede incluir gradualmente, por ejemplo, adiabáticamente, el paso del Hamiltoniano inicial H^{init} al Hamiltoniano $H^{\text{final}} = H^{\text{prob}} + H^{\text{SR}}$, donde H^{SR} es el Hamiltoniano de corto alcance, a través de un Hamiltoniano de interpolación $H(t)$. De acuerdo con la realización ilustrada en la Fig. 1, el Hamiltoniano de interpolación tiene la forma $H(t) = A(t) H^{\text{init}} + B(t) H^{\text{prob}} + C(t) H^{\text{SR}}$. En este caso, H^{init} puede referirse al Hamiltoniano inicial, H^{final} puede referirse al Hamiltoniano final, t puede ser un parámetro de tiempo, y $A(t)$, $B(t)$ y $C(t)$ pueden ser coeficientes de interpolación dependiendo del parámetro de tiempo t . Siendo t el tiempo inicial t_0 , el coeficiente de interpolación $A(t_0)$ puede ser igual al valor inicial 1, y el coeficiente de interpolación $B(t_0)$ puede ser igual al valor inicial 0. Alternativamente, siendo t el tiempo inicial t_0 , el coeficiente de interpolación $A(t_0)$ puede ser mucho mayor que el coeficiente de interpolación $B(t_0)$. Siendo t el tiempo final t_{fin} , los coeficientes de interpolación $A(t_{\text{fin}})$ pueden ser iguales al valor final 0, y $B(t_{\text{fin}})$ y $C(t_{\text{fin}})$ pueden ser iguales al valor final 1, respectivamente, de modo que el Hamiltoniano de interpolación $H(t_{\text{fin}})$ es igual a H^{final} . Alternativamente, dado que t es el valor final de t_{fin} , el coeficiente de interpolación $A(t_{\text{fin}})$ puede ser mucho menor que los coeficientes de interpolación $B(t_{\text{fin}})$ y $C(t_{\text{fin}})$. La realización del recocido cuántico puede incluir gradualmente, por ejemplo, adiabáticamente, el cambio de los coeficientes de interpolación $A(t)$, $B(t)$ y $C(t)$ desde sus valores iniciales en el tiempo inicial hasta sus valores finales en el tiempo final. En consecuencia, el Hamiltoniano de interpolación se cambia gradualmente del Hamiltoniano inicial en el tiempo inicial al Hamiltoniano final en el tiempo final. En particular, el procedimiento de recocido cuántico como se describe en la presente memoria puede ejecutarse de manera que $C(t)=B(t)$ en todo tiempo.

En vista, por ejemplo, del teorema adiabático de la mecánica cuántica, pero sin querer quedar ligado a ninguna teoría en particular, el estado cuántico del sistema cuántico 420 será el estado fundamental o, al menos, estará bien aproximado por un estado fundamental del Hamiltoniano de interpolación $h(t)$ para todos los valores del parámetro de tiempo t que van desde el tiempo inicial hasta el tiempo final si el paso del Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final 470 se realiza con suficiente lentitud. En consecuencia, el recocido cuántico evoluciona el estado cuántico inicial en el tiempo inicial al estado cuántico final en el tiempo final, en el que el estado cuántico final es el estado fundamental del Hamiltoniano final o al menos se aproxima bien a un estado fundamental del Hamiltoniano final 470.

La figura 1 muestra además un dispositivo de medición 440 adaptado para medir el sistema cuántico 420. Como se muestra, el dispositivo de medición 440 puede ser adaptado para medir una porción 425 de los qubits de la pluralidad de qubits 100. Usando el dispositivo de medición 440, la porción 425 puede ser medida para obtener una lectura del estado cuántico final. El estado cuántico final, estando bien aproximado por el estado fundamental del Hamiltoniano final, contiene información sobre la solución del problema computacional 452. La lectura del estado cuántico final puede revelar la información sobre la solución. Según la representación mostrada en la Fig. 1, la lectura puede ser proporcionada por el dispositivo de medición 440 al sistema de computación clásico 450, como se

indica en la Fig. 1 por la flecha 445. El sistema de computación clásico 450 puede determinar la solución 490 al problema de computación a partir de la lectura. El sistema de computación clásico 450 puede al menos determinar una solución de prueba para el problema computacional, y verificar si la solución de prueba es realmente una solución para el problema computacional. En el caso de los problemas de NP, la verificación es un cálculo que puede realizarse en tiempo de polinomios, y normalmente puede ser fácilmente calculado. Si resulta que no se ha encontrado una solución al problema computacional, el proceso se repite hasta que se encuentra una solución al problema computacional.

A la luz de lo anterior, según una realización, se proporciona un procedimiento de cálculo de una solución a un problema computacional utilizando un sistema cuántico que incluye una pluralidad de qubits. El procedimiento incluye la codificación del problema computacional en un problema Hamiltoniano del sistema cuántico, como se ilustra en la Fig. 8 con el bloque 510. El Hamiltoniano del problema es un Hamiltoniano de un solo cuerpo que incluye una pluralidad de parámetros ajustables, y la codificación incluye la determinación, a partir del problema computacional, de una configuración de codificación del problema para la pluralidad de parámetros ajustables. La pluralidad de parámetros ajustables incluye una pluralidad de intensidades de campo y/o una pluralidad de direcciones de campo de campos de un solo cuerpo que actúan sobre la pluralidad de qubits. El procedimiento incluye además la evolución del sistema cuántico desde un estado cuántico inicial hacia un estado fundamental de un Hamiltoniano final del sistema cuántico, como se ilustra en la Fig. 8 con el bloque 520. El Hamiltoniano final es la suma del Hamiltoniano del problema y un Hamiltoniano de corto alcance, en el que la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema está en la configuración de codificación del problema. El Hamiltoniano de corto alcance es un Hamiltoniano que representa las interacciones de una pluralidad de qubits, en el que no se producen interacciones entre qubits que están distanciados entre sí por una distancia mayor que la distancia de corte de la interacción. El Hamiltoniano de corto alcance es un Hamiltoniano de d cuerpos, siendo d independiente del problema computacional, donde $d = 2, 3, 4, 5, 6, 7$ u 8 . El procedimiento incluye además la medición de al menos una porción de la pluralidad de qubits para obtener una lectura del sistema cuántico, como se ilustra en la Fig. 8 en el bloque 530. El procedimiento incluye además la determinación de una solución al problema de computación a partir de la lectura, como se ilustra en la Fig. 8 con el bloque 540.

Las realizaciones descritas en la presente memoria permiten así determinar una solución a un problema computacional, por ejemplo, un problema de NP complejo, usando el sistema cuántico. Comparado con la determinación de una solución a un problema computacional utilizando únicamente un sistema de computación clásico, es decir, sin un sistema cuántico, las realizaciones descritas en la presente memoria pueden proporcionar una disminución en el tiempo computacional requerido para resolver el problema computacional. En otras palabras, en comparación con los sistemas de computación clásico, las realizaciones descritas en la presente memoria pueden permitir la resolución de los problemas de computación más rápidamente, o incluso pueden permitir encontrar tal solución en absoluto, ya que el cálculo de la solución puede tardar demasiado tiempo en computar en un sistema de computación clásico.

Otra ventaja se refiere al aspecto según el cual el Hamiltoniano del problema es un Hamiltoniano de un solo cuerpo. Mientras que otros tipos de problemas Hamiltonianos, en particular los problemas Hamiltonianos que involucran interacciones entre grandes grupos de qubits o interacciones entre qubits distantes entre sí (interacciones de largo alcance), pueden ser inviables o al menos requieren una configuración muy complicada del sistema cuántico y de los componentes que impulsan el cómputo cuántico, un Hamiltoniano del problema de un solo cuerpo, como se describe en este documento, puede ser realizado utilizando una configuración mucho más simple, es decir, un dispositivo de procesamiento cuántico mucho más simple. Además, el Hamiltoniano del problema de las realizaciones descritas en la presente memoria con sus parámetros ajustables proporciona un sistema completamente programable, con el cual una amplia gama de problemas computacionales pueda ser codificada. Los dispositivos y procedimientos de acuerdo con las realizaciones descritas en la presente memoria, por lo tanto, permiten computar una solución a una amplia gama de problemas computacionales, tales como los problemas NP complejos. En comparación con los sistemas en los que sólo se puede codificar un número limitado de problemas, ya que ciertas interacciones requeridas por el problema Hamiltoniano están cableadas en el sistema, se proporciona así una mayor flexibilidad y un dispositivo y un procedimiento mucho más potentes.

Otra ventaja más se refiere al aspecto según el cual el Hamiltoniano final es la suma del Hamiltoniano del problema y un Hamiltoniano de corto alcance. El Hamiltoniano de corto alcance puede ser una suma de los sumandos del Hamiltoniano, donde los sumandos del Hamiltoniano pueden ser sumandos del Hamiltoniano como se describe en la presente memoria. Tener un Hamiltoniano de corto alcance proporciona la ventaja de que no es necesario diseñar interacciones entre qubits distantes. Esto es de nuevo en contraste con los Hamiltonianos que requieren interacciones de largo alcance que pueden ser inviables de realizar en el sistema cuántico o pueden al menos requerir una configuración muy complicada del dispositivo de procesamiento cuántico.

Cuando el parámetro d del Hamiltoniano de corto alcance d del cuerpo es independiente del problema computacional, esto significa que el cómputo puede realizarse con el mismo dispositivo de procesamiento cuántico, independientemente del problema computacional que esté codificado. Si el Hamiltoniano de corto alcance es independiente del problema computacional, la ventaja adicional es que las interacciones entre los qubits

determinados por el Hamiltoniano de corto alcance no tienen por qué cambiar en función de los diferentes problemas computacionales.

Las realizaciones descritas en la presente memoria proveen una arquitectura escalable para soluciones informáticas a problemas computacionales. Para un sistema cuántico dado, se pueden calcular soluciones a una amplia variedad de problemas computacionales de un cierto tamaño máximo, donde el tamaño máximo está determinado por el número de qubits del sistema cuántico. Para calcular soluciones de problemas computacionales más allá de este tamaño máximo, se puede proporcionar un sistema cuántico mayor, es decir, un sistema cuántico que contenga un número mayor de qubits, con un Hamiltoniano del problema correspondiente, Hamiltoniano de corto alcance y Hamiltoniano final según las realizaciones descritas en la presente memoria, para tratar problemas computacionales de un tamaño mayor. Por escoger un sistema cuántico con un número apropiadamente grande de qubits, las soluciones así pueden ser computadas para problemas computacionales de cualquier tamaño deseado. Independientemente del número de qubits del sistema cuántico, el Hamiltoniano del problema es un Hamiltoniano de un solo cuerpo y el Hamiltoniano final es la suma del Hamiltoniano del problema y un Hamiltoniano de corto alcance, según las realizaciones descritas en la presente memoria. Por consiguiente, se proporciona una arquitectura escalable para calcular soluciones a problemas computacionales.

Según algunas realizaciones, el problema computacional puede ser un problema de decisión. Un problema de decisión puede referirse a un problema computacional que se formula como una pregunta de sí/no. La solución de un problema de decisión puede ser "sí" o "no". Alternativamente, la solución de un problema de decisión puede ser un solo bit clásico, es decir, 0 o 1. Según otras realizaciones, el problema computacional puede formularse de manera diferente a un problema de decisión.

El problema computacional puede ser cualquiera de los diversos problemas de cálculo considerados en, por ejemplo, los campos de la informática, la física, la química o la ingeniería. A efectos de explicación, pero sin pretender limitar el alcance, a continuación se examinan tres ejemplos de problemas de cálculo. Los tres ejemplos que se examinan a continuación son ejemplos de problemas de decisión.

Un primer ejemplo de un problema computacional de acuerdo con las realizaciones descritas en la presente memoria es el "problema de los vendedores viajeros". El problema de los vendedores viajeros implica una primera lista de ciudades y una segunda lista de distancias entre cada par de ciudades de la primera lista. El problema del vendedor viajero hace la siguiente pregunta: "Dada la primera lista, la segunda lista y una constante K, ¿existe un recorrido de distancia máxima K, en el que el recorrido (i) visita cada ciudad de la primera lista exactamente una vez y (ii) regresa a la ciudad en la que comienza el recorrido?"

Un segundo ejemplo de un problema computacional según las realizaciones descritas en la presente memoria es el "problema de 3-colores" relacionado con la coloración de los grafos matemáticos. Un grafo matemático puede incluir un conjunto de vértices y un conjunto de bordes que representan conexiones entre pares de vértices. Los 3-colores de un grafo matemático es una asignación de cada vértice del grafo matemático a uno de los tres colores posibles (digamos, "rojo", "verde" o "azul") en el que cualquier par de vértices conectados por un borde se asignan a colores diferentes. Para algunos grafos matemáticos, un tricolor puede no existir. El problema de los 3 colores plantea la pregunta: "Dado un grafo matemático, ¿existe un 3-colores?"

Un tercer ejemplo de un problema computacional de acuerdo con las realizaciones descritas en la presente memoria se refiere al modelo de espín de Ising. El modelo de espín de Ising es un modelo físico que representa las interacciones entre una pluralidad de espines s_1, s_2, \dots, s_n , en el que cada espín s_i es una variable que puede tener el valor 1 o el valor -1, con i que va de 1 a n . Para la pluralidad de espines, se puede considerar una función de energía de Ising $H(s_1, s_2, \dots, s_n)$, en la que la función de energía de Ising tiene la forma

$$H(s_1, s_2, \dots, s_n) = \sum_{ij} c_{ij} s_i s_j + \sum_i c_i s_i$$

en la que cada c_{ij} es un coeficiente de acoplamiento y cada c_i es un coeficiente de campo. La función de energía de Ising implica interacciones entre pares, donde una interacción entre pares entre los espines s_i y s_j se representa con el término $c_{ij} s_i s_j$ en la función de energía de Ising. El valor absoluto del coeficiente de acoplamiento c_{ij} refleja la intensidad de la interacción entre pares entre los espines s_i y s_j . El signo del coeficiente de acoplamiento c_{ij} refleja la naturaleza de la interacción entre pares, por ejemplo, interacciones ferromagnéticas o antiferromagnéticas. El modelo de espín de Ising puede ser un modelo de espín de Ising de largo alcance. Un modelo de espín de Ising de largo alcance puede incluir interacciones entre pares de espines que están distantes el uno del otro según una medida de distancia. Un modelo de largo alcance del espín de Ising puede incluir interacciones entre pares de espines que están distantes entre sí por una distancia que es al menos el logaritmo de la distancia máxima entre dos espines. Algunos modelos de espín de Ising de largo alcance, por ejemplo, los modelos de espín de Ising de todo a todo, pueden implicar interacciones entre todos los pares de espines. Por ejemplo, un modelo de espín de Ising en el que cada uno de los coeficientes de acoplamiento c_{ij} es distinto de cero puede considerarse un modelo de espín de Ising de largo alcance.

La función de energía de Ising incluye además términos $c_i s_i$ que representan una interacción entre un espín s_i y un campo externo que influye en el espín s_i pero que no influye en los otros espines. La intensidad y la dirección del

campo que influye en el espín si se representan por el valor absoluto y el signo del coeficiente de campo c_i , respectivamente. Un problema computacional asociado al modelo de espín de Ising, denominado en el presente documento el problema del modelo de espín de Ising, puede formularse de la siguiente manera: "Dado un conjunto de coeficientes de acoplamiento c_{ij} , un conjunto de coeficientes de campo c_i y una constante K , ¿existe una configuración (s_1, s_2, \dots, s_N) de los espines tal que $H(s_1, s_2, \dots, s_N)$ sea menor que K ?".

De acuerdo con las realizaciones descritas en la presente memoria, el problema computacional puede incluir una pluralidad de variables de entrada. La pluralidad de variables de entrada puede representar información sobre el problema computacional a resolver. Por ejemplo, refiriéndose a los tres ejemplos de problemas computacionales descritos anteriormente, la pluralidad de variables de entrada puede incluir: la primera lista de ciudades y la segunda lista de distancias (para el problema del vendedor viajero); los conjuntos de vértices y bordes de un grafo (para el problema de 3-coloraciones); los conjuntos de coeficientes de acoplamiento c_{ij} y coeficientes de campo c_i (para el problema del modelo de espín de Ising).

Según las realizaciones, computar una solución al problema computacional puede incluir computar una solución de prueba al problema computacional. Una solución de prueba puede o no ser una verdadera solución al problema computacional. En el caso de las realizaciones según las cuales el problema computacional pertenece a la complejidad de clase NP, el cálculo de una solución al problema computacional puede incluir el cálculo de un conjunto de variables testigo, como se describe a continuación.

De acuerdo con las realizaciones descritas en la presente memoria, una solución al problema computacional es computada usando el sistema cuántico que comprende la pluralidad de qubits. La pluralidad de qubits puede comprender al menos 8 qubits, en particular al menos 3 qubits. Además o alternativamente, la pluralidad de qubits puede incluir N qubits, donde N está entre 100 y 10.000 qubits, preferentemente incluso más. Se entenderá que la pluralidad de qubits 100 que se muestra en las figuras descritas en el presente documento se muestra con fines ilustrativos y explicativos, y que el número real de qubits puede variar.

Los qubits del sistema cuántico pueden estar dispuestos en una superficie bidimensional o en una superficie tridimensional, que puede ser plana o puede incluir curvatura. Las Figs. 2-4 muestran diferentes disposiciones espaciales de la pluralidad de qubits 100 según las realizaciones descritas en la presente memoria. Estas disposiciones espaciales pueden ser las disposiciones de los dispositivos de computación cuántica, por ejemplo, chips cuánticos en los que pueden incorporarse los qubits y/u otros sistemas cuánticos individuales (sistemas de nivel q como los qutrits). Como se muestra en la Fig. 2, la pluralidad de qubits 100 puede disponerse de acuerdo con una superficie plana bidimensional 110, como se indica en la Fig. 2 por las líneas discontinuas. Se entenderá que la superficie bidimensional 110 que se muestra en la Fig. 2 está dibujada con el fin de representar visualmente una disposición espacial bidimensional de la pluralidad de qubits, pero no es necesario que la superficie bidimensional 110 sea una superficie física y tangible en la que se disponga la pluralidad de qubits 100. Consideraciones similares se aplican a las realizaciones según las cuales la pluralidad de qubits está dispuesta según una red bidimensional o una red tridimensional, como se describe a continuación.

Según otras realizaciones, y como se muestra en la Fig. 3, la pluralidad de qubits 100 puede ser dispuesta según una red bidimensional 120, como se indica en las líneas discontinuas. Una red, como por ejemplo una red bidimensional o una red tridimensional, puede incluir una pluralidad de nodos dispuestos espacialmente de acuerdo con una red regular. En la Fig. 3, la pluralidad de qubits 100, representada por la pluralidad de puntos negros, corresponde a los nodos de la red bidimensional 120. Como se muestra, cada qubit de la pluralidad de qubits 100 puede ser dispuesto en un nodo de la red bidimensional 120. En la representación mostrada en la Fig. 3, la red bidimensional 120 es una red cuadrada bidimensional. Según otras realizaciones, la red bidimensional 120 puede ser, por ejemplo, una red hexagonal o triangular, o cualquier otro tipo de red bidimensional.

Según las realizaciones, la pluralidad de qubits puede ser organizada según una red tridimensional. Como en la Fig. 3, la pluralidad de qubits puede corresponder a los nodos de la red tridimensional. Cada qubits de la pluralidad de qubits puede estar dispuesto en un nodo de la red tridimensional. La red tridimensional puede ser una red cuadrada tridimensional. Como en el caso de las redes bidimensionales, también se pueden considerar otros tipos de redes tridimensionales.

Una red bidimensional es una estructura plana, que puede proporcionar una disposición espacial más simple de los qubits en comparación con, por ejemplo, una red tridimensional o alguna disposición espacial irregular.

Según las realizaciones, la pluralidad de los qubits puede estar dispuesta según una porción de una red bidimensional o según una porción de una red tridimensional. La figura 4 ilustra una realización según la cual la pluralidad de qubits 100 está dispuesta según una porción de forma triangular 121 de una red bidimensional. La Fig. 4 muestra una vista superior de la porción de forma triangular 121. Una porción de forma triangular corresponde a la disposición de un dispositivo de computación cuántica de acuerdo con algunas realizaciones las cuales están configuradas para llevar a cabo los procedimientos descritos en la presente memoria. También pueden considerarse porciones de redes que tienen una forma diferente.

El Hamiltoniano del problema es un Hamiltoniano de un solo cuerpo que incluye una pluralidad de parámetros ajustables. Un Hamiltoniano de un solo cuerpo del sistema cuántico, como se describe en la presente memoria, puede referirse a un Hamiltoniano en el que no se producen interacciones entre grupos de dos o más qubits. Un Hamiltoniano de un solo cuerpo puede ser la suma de una pluralidad de sumandos del Hamiltoniano. Cada sumando del Hamiltoniano puede actuar en un solo qubits de la pluralidad de qubits. Un Hamiltoniano de un solo cuerpo puede tener la forma $H = \sum_i H_i$ en la que cada H_i es un sumando del Hamiltoniano y actuando únicamente en el i -ésimo qubit. Un Hamiltoniano de un solo cuerpo puede representar interacciones entre la pluralidad de qubits y una entidad externa, por ejemplo, un campo magnético o un campo eléctrico, en el que cada qubit interactúa individualmente con la entidad externa.

La figura 5 muestra una ilustración esquemática de un Hamiltoniano de un solo cuerpo según las realizaciones descritas en la presente memoria. En aras de la concreción, pero sin pretender limitar el alcance, la pluralidad de qubits que se muestra en la Fig. 5 incluye 10 qubits, a saber, los qubits 201 a 210, dispuestos en una porción de una red cuadrada bidimensional que forma un triángulo, similar a la Fig. 4. El Hamiltoniano de un solo cuerpo descrito con referencia a la Fig. 5 es la suma de 10 sumandos del Hamiltoniano 221 a 230. En la Fig. 5, cada uno de los sumandos del Hamiltoniano 221 a 230 se dibuja esquemáticamente como un cuadrado que rodea un solo qubit, lo que indica que cada sumando del Hamiltoniano actúa en un solo qubit. Por ejemplo, el sumando del Hamiltoniano 221 se representa como un cuadrado que rodea el qubit 201 y el qubit 201 solamente, lo que indica que el sumando del Hamiltoniano 221 actúa en el qubit 201 pero no actúa en ninguno de los restantes qubits 202 a 210.

El Hamiltoniano del problema, siendo un Hamiltoniano de un solo cuerpo, puede ser la suma de los sumandos del Hamiltoniano de un solo cuerpo como se describe anteriormente. La pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema puede incluir una pluralidad de parámetros ajustables de los sumandos del Hamiltoniano. Uno o más sumandos del Hamiltoniano de un solo cuerpo, en particular cada uno de los sumandos del Hamiltoniano, puede incluir uno o más parámetros ajustables.

Un parámetro ajustable del problema Hamiltoniano, como se describe en este documento, puede referirse a un parámetro que represente una intensidad y/o una dirección de una interacción entre un qubit de la pluralidad de qubits y una entidad externa. La entidad externa puede, por ejemplo, incluir al menos uno de los siguientes elementos: uno o más campos magnéticos; uno o más campos eléctricos, y/o uno o más campos de láser, microondas o desplazamientos de fase de deformaciones mecánicas. El ajuste de un parámetro ajustable del Hamiltoniano del problema puede realizarse ajustando la entidad externa y/o ajustando la intensidad y/o el tipo de interacción entre el qubit y la entidad externa. En consecuencia, el parámetro ajustable puede representar una interacción ajustable, por ejemplo, una interacción que no esté cableada en el sistema cuántico.

La pluralidad de parámetros ajustables del problema Hamiltoniano incluye una pluralidad de intensidades de campo y/o una pluralidad de direcciones de campo de campos de un solo cuerpo que actúan sobre la pluralidad de qubits. Los campos que actúan en la pluralidad de qubits pueden incluir uno o más campos magnéticos y/o uno o más campos eléctricos, por ejemplo, en realizaciones relacionadas con qubits superconductores.

Un campo de un solo cuerpo puede referirse a un campo que influye en un solo qubits en la pluralidad de qubits. Según las realizaciones, la pluralidad de campos de un solo cuerpo puede incluir diferentes campos de un solo cuerpo que influyan en los correspondientes qubits de acuerdo con las posibles diferentes intensidades de campo y/o posibles direcciones de campo. Por ejemplo, un primer campo de un solo cuerpo y un segundo campo de un solo cuerpo pueden influir en un primer y un segundo qubits, respectivamente, en la pluralidad de qubits. En ese caso, el primer campo de un solo cuerpo y el segundo campo de un solo cuerpo, siendo ambos, por ejemplo, campos magnéticos, pueden tener diferentes intensidades y/o direcciones de campo.

Según las realizaciones, que pueden combinarse con otras realizaciones descritas en la presente memoria, el Hamiltoniano de un solo cuerpo tiene la forma $\sum_k J_k \sigma_z^{(k)}$, en la que $\sigma_z^{(k)}$ es un operador de Pauli de un k -ésimo qubit de la pluralidad de qubits, en la que cada J_k es un coeficiente, y en la que los coeficientes J_k forman la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano de un solo cuerpo. Según algunas realizaciones, el operador de Pauli $\sigma_z^{(k)}$ puede ser un operador de Pauli asociado a una primera dirección espacial.

Para un sistema cuántico que incluya una pluralidad de qubits superconductores, un Hamiltoniano de un solo cuerpo, como por ejemplo el Hamiltoniano del problema, puede realizarse por una pluralidad de flujos magnéticos que interactúan con la pluralidad de qubits superconductores. El flujo magnético o la polarización del flujo magnético puede extenderse a través del bucle superconductor primario y a través del bucle superconductor secundario de un qubit superconductor. La pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema puede ser ajustada ajustando la pluralidad de flujos magnéticos o la polarización del flujo magnético.

Para un sistema cuántico realizado con iones atrapados, los iones individuales pueden ser abordados por la separación espacial o la separación en energía. En el caso de la separación espacial se utiliza un rayo láser que ha atravesado y/o se ha reflejado en un deflector acústico-óptico, un modulador acústico-óptico, dispositivos de microespejos o similares. El caso de la separación en energía implica el uso de un gradiente de campo magnético que cambia las frecuencias de transición internas, permitiendo la selección a través de las diferencias de energía, es decir, la desafinación de los campos aplicados. Un Hamiltoniano de un solo cuerpo puede realizarse mediante

campos láser o microondas resonantes o no resonantes con la transición interna o mediante diferencias espaciales de campo magnético.

Para un sistema cuántico realizado con puntos cuánticos, un Hamiltoniano de un solo cuerpo puede ser realizado con campos eléctricos.

5 Para un sistema cuántico realizado con centros NV, usando resonancia magnética mediante la aplicación de pulsos de microondas, los estados qubits pueden ser manipulados coherentemente en escalas de tiempo de nano segundos. La manipulación selectiva de los estados qubits también puede lograrse condicionada al estado de los espines nucleares cercanos.

10 El problema computacional puede ser mapeado en la configuración de codificación del problema. La configuración de codificación del problema puede depender y/o contener información sobre el problema computacional. El acto de determinar la configuración de codificación del problema puede incluir la determinación y/o el cálculo de un valor para cada uno de la pluralidad de parámetros ajustables. Cada valor puede ser determinado y/o calculado a partir del problema computacional.

15 De acuerdo con las realizaciones, diferentes problemas de computación pueden ser codificados en el Hamiltoniano del problema determinando las diferentes configuraciones de codificación del problema correspondientes. Por ejemplo, un primer problema computacional y un segundo problema computacional pueden codificarse en el problema Hamiltoniano, lo que da lugar a una primera configuración de codificación del problema y una segunda configuración de codificación del problema para la pluralidad de parámetros ajustables. Si el segundo problema computacional es diferente del primer problema computacional, la segunda configuración de codificación de los parámetros ajustables puede ser diferente de la primera configuración de codificación del problema.

20 De acuerdo con las realizaciones, el procedimiento puede incluir el suministro del problema computacional, o al menos la información relativa al problema computacional, a un sistema de computación clásico, como por ejemplo el sistema de computación clásico 450 mostrado en la Fig. 1. Por ejemplo, una pluralidad de variables de entrada del problema computacional, como se describe en el presente documento, puede proporcionarse al sistema de computación clásico. De acuerdo con las realizaciones, el problema computacional puede ser codificado en la configuración de codificación del problema por el sistema de computación clásico. El sistema de computación clásico puede ser configurado para computar la configuración de codificación del problema desde el problema computacional, por ejemplo, desde una pluralidad de variables de entrada del problema computacional.

30 La terminología de un Hamiltoniano de corto alcance, tal como se utiliza en el presente documento, se refiere a un Hamiltoniano que representa las interacciones de la pluralidad de qubits, en las que no se producen interacciones entre qubits que están distanciados entre sí por una distancia mayor que la distancia de corte de la interacción. La distancia de corte de la interacción puede ser una distancia constante. La distancia de corte de la interacción puede ser mucho menor en comparación con una distancia máxima de qubits entre los qubits de la pluralidad de qubits. Por ejemplo, la distancia de corte de la interacción puede ser 30% o inferior a la distancia máxima en qubits, en particular 20% o inferior, más particularmente 10% o inferior. Para una pluralidad de qubits dispuestos según una red, el Hamiltoniano de corto alcance puede ser un Hamiltoniano de alcance r , en el que no se producen interacciones entre qubits que estén distanciados entre sí por una distancia superior a r veces una distancia elemental (constante de la red) de la red. En este caso, r puede ser de 1 a 5, por ejemplo, $r = \sqrt{2}, 2, 3, 4$ o 5. La noción de una distancia elemental de una red según las realizaciones descritas en la presente memoria se ilustra a continuación en referencia, por ejemplo, a las Figuras 6 y 7.

Independientemente del número de qubits del sistema cuántico, un Hamiltoniano de plaquetas y un Hamiltoniano vecino más próximo en pares del sistema cuántico, como se describe en la presente memoria, serán considerados como Hamiltonianos de corto alcance.

45 Un ejemplo de un Hamiltoniano de corto alcance es un Hamiltoniano de un solo cuerpo, como se describe en la presente memoria. Para un Hamiltoniano de un solo cuerpo, la distancia de corte de interacción puede considerarse como cero, ya que no hay interacciones entre grupos de dos o más qubits, sino sólo interacciones entre qubits individuales y una entidad externa, por ejemplo, un campo magnético o un campo eléctrico.

50 Las figuras 6 y 7 muestran otros ejemplos de Hamiltonianos de corto alcance para realizaciones en las que la pluralidad de qubits 100 está dispuesta de acuerdo con una red cuadrada bidimensional 120, y se encuentran en posiciones de nodos de la red cuadrada bidimensional que forman una porción triangular de la red cuadrada bidimensional. En aras de la concreción, pero sin pretender limitar el alcance, la red cuadrada bidimensional 120 ejemplar mostrada en las Figs. 6 y 7 incluye 55 qubits dispuestos en un triángulo dentro de una red cuadrada de 10 x 10 que comprende 10 filas y 10 columnas. Cuando se atraviesa cualquier fila de qubits de la red bidimensional 120 a lo largo de la dirección x 310, por ejemplo la fila 391 como se indica por las líneas de puntos, los qubits consecutivos de la fila están dispuestos a una distancia elemental D entre sí, lo que también se denomina una constante de la red en dirección x . La distancia elemental D se indica con el número de referencia 350. Del mismo modo, cuando se atraviesa cualquier columna de qubits de la red bidimensional 120 en la dirección y 320, por ejemplo la columna 392, los qubits consecutivos de la columna están a una distancia elemental, lo que también se

denomina constante de la red en la dirección y . En las Figs. 6 y 7, la red de una red cuadrada y las distancias elementales (constantes de red) en dirección x y en dirección y son las mismas. Sin embargo, las constantes de red en dirección x y en dirección y también podrían ser diferentes. Como se muestra, la dirección x 310 es perpendicular a la dirección y 320. La distancia máxima en qubits de la pluralidad de qubits 100 que se muestra en las Fig. 6 y Fig. 7 es la distancia entre los qubits 301 y 302. La distancia máxima en qubits es igual a $(9\sqrt{2})D$.

Un ejemplo de un Hamiltoniano de corto alcance descrito con referencia a la Fig. 6 es un Hamiltoniano vecino más cercano entre pares. Un Hamiltoniano vecino más cercano entre pares puede involucrar sólo interacciones entre pares de qubits vecinos en la red bidimensional 120, donde un par de qubits vecinos puede referirse a un par de qubits distanciados entre sí a la distancia elemental D . Los qubits 362 y 364 mostrados en la Fig. 6 forman un ejemplo de un par de qubits vecinos. Un Hamiltonianos vecino más cercano en pares puede ser la suma de una pluralidad de sumandos del Hamiltoniano, donde cada sumando del Hamiltoniano representa una interacción entre un par de qubits vecinos. Para un Hamiltoniano vecino más cercano en pares descrito en referencia a la Fig. 6, la distancia de corte de la interacción es igual a la distancia elemental D . Por consiguiente, la distancia de corte de la interacción es mucho más pequeña comparada con la distancia máxima en qubits, es decir, la distancia de corte de la interacción D está por debajo del 10% de la distancia máxima en qubits.

Un ejemplo de un Hamiltoniano de corto alcance descrito con referencia a la Fig. 7 es un Hamiltoniano de plaquetas. En la Fig. 7, 55 qubits que se muestran como círculos negros están de nuevo dispuestos en una red cuadrada bidimensional 120 y forman un triángulo en ella. Una plaqueta de la red cuadrada bidimensional 120 es un cuadrado elemental de la red cuadrada bidimensional 120, como se ilustra en la Fig. 7 con el número de referencia 370. La plaqueta 370 comprende los qubits 371, 372, 373 y 374, en los que el qubit 371 está dispuesto a la distancia elemental D desde el qubit 372 y desde el qubit 374, y en los que el qubit 373 también está dispuesto a la distancia elemental D desde los qubits 372 y 374. Además, los qubits auxiliares mostrados con rectángulos negros se añaden en una línea adicional para completar las plaquetas de los qubits. Por ejemplo, el qubits auxiliar 305 completa la plaqueta de los qubits 302, 303 y 304. Los qubits auxiliares pueden prepararse en un estado cuántico específico, por ejemplo, $|1\rangle$. Para esta geometría de la red, un Hamiltoniano de plaquetas puede implicar sólo interacciones entre grupos de cuatro qubits, o grupos de tres qubits y un qubit ancilla, correspondientes a plaquetas de la red cuadrada bidimensional 120. Un Hamiltoniano de plaquetas puede ser la suma de una pluralidad de sumandos del Hamiltoniano. Cada sumando del Hamiltoniano puede representar una interacción correspondiente a una plaqueta de qubits en la red, o una interacción correspondiente a una plaqueta de qubits y un qubit auxiliar. Alternativamente, no se pueden utilizar qubits auxiliares, y el Hamiltoniano de plaquetas incluye entonces sumandos del Hamiltoniano que describen interacciones entre sólo tres qubits. Para un Hamiltoniano de plaquetas descrito con referencia a la Fig. 7, la distancia de corte de la interacción es $\sqrt{2}D$, ya que la distancia máxima entre dos qubits en una plaqueta es $\sqrt{2}D$. Por ejemplo, la distancia entre los qubits 371 y 373 es $\sqrt{2}D$. Por consiguiente, la distancia de corte de interacción es mucho menor en comparación con la distancia máxima en qubits, a saber, la distancia de corte de interacción $\sqrt{2}D$ es inferior al 12% de la distancia máxima en qubits.

Para un sistema cuántico que incluye una pluralidad de qubits superconductores, un Hamiltoniano de plaquetas puede ser realizado usando una pluralidad de qubits auxiliares, donde un qubit auxiliar puede ser dispuesto dentro de cada plaqueta, por ejemplo, en el centro de cada plaqueta. Las interacciones entre qubits de la forma $K_{km}\sigma_z^{(k)}\sigma_z^{(m)}$ pueden realizarse mediante una unidad de acoplamiento, por ejemplo, una unidad de acoplamiento inductivo, como se describe en el presente documento. La unidad de acoplamiento incluye un dispositivo de interferencia cuántica superconductor. La aplicación de una polarización de flujo magnético ajustable al dispositivo de interferencia cuántica superconductor permite ajustar el coeficiente K_{km} . Un sumando del Hamiltoniano de plaquetas puede entonces realizarse por $H_{sr,p} = C(\sigma_z^{(1)} + \sigma_z^{(2)} + \sigma_z^{(3)} + \sigma_z^{(4)} - 2\sigma_z^{(p)} - 1)^2$, que incluye sólo interacciones entre pares de la forma $\sigma_z^{(k)}\sigma_z^{(m)}$ y términos $\sigma_z^{(1)}$ términos de un solo cuerpo que corresponden a diferencias de energía impuestas entre los estados de base cuántica $|0\rangle$ y $|1\rangle$. Aquí, $\sigma_z^{(p)}$ representa el qubit ancilla. El Hamiltoniano de corto alcance es una suma de los sumandos del Hamiltoniano $H_{sr,p}$. Para las realizaciones que implican qubits auxiliares, un Hamiltoniano de un solo cuerpo de la forma $h\sum_p\sigma_x^{(p)}$ para la pluralidad de qubits auxiliares se añade al Hamiltoniano inicial.

Alternativamente, un Hamiltoniano de plaquetas puede realizarse sin qubits auxiliares, por ejemplo, usando dispositivos superconductores de tres islas como qubits de transmisión. Integrando dos dispositivos adicionales de interferencia cuántica superconductores en la unidad de acoplamiento y acoplando capacitivamente los cuatro qubits de una plaqueta a un resonador coplanario, puede realizarse un sumando del Hamiltoniano de la forma $-C\sigma_z^{(1)}\sigma_z^{(2)}\sigma_z^{(3)}\sigma_z^{(4)}$. El coeficiente de acoplamiento C puede ajustarse mediante polarizaciones de flujo magnético dependientes del tiempo a través de los dos dispositivos adicionales de interferencia cuántica superconductores.

Para un sistema cuántico realizado con iones atrapados, las interacciones entre dos iones se transmiten a través de un bus de fonones. Para ello, se utilizan láseres o microondas que se desintonizan con respecto a la transición de las bandas laterales azul y/o roja de los fonones. La intensidad del láser y la desintonización permiten ajustar la intensidad de interacción. También se pueden utilizar interacciones directas a través de las excitaciones de Rydberg.

Para un sistema cuántico realizado con átomos fríos, las interacciones entre qubits pueden ser controladas por la desintonización de un láser que excita átomos d . En este caso, el Hamiltoniano es un Hamiltoniano de cuerpo d . Los

Hamiltonianos de plaquetas pueden ser implementados a partir de interacciones de cuerpo d o de qubits auxiliares con interacciones de dos cuerpos.

5 Para un sistema cuántico realizado con puntos cuánticos, una interacción entre dos qubits está regulada por un gradiente de campo eléctrico y un campo magnético. Un Hamiltoniano de corto alcance puede ser realizado con secuencias de pulsos y campos magnéticos. Un Hamiltoniano de plaquetas puede realizarse utilizando un qubit auxiliar adicional con el Hamiltoniano de corto alcance actuando en todos los pares de la plaqueta.

Para un sistema cuántico realizado con centros de NV, las interacciones entre los centros de NV pueden ser transmitidas acoplándolas a los campos de luz.

10 Según las realizaciones, que pueden combinarse con otras realizaciones descritas en este documento, la pluralidad de qubits puede disponerse según una red bidimensional. El Hamiltoniano de corto alcance puede implicar interacciones entre grupos de cuatro qubits correspondientes a plaquetas de la red bidimensional. Según las realizaciones, el Hamiltoniano de corto alcance puede ser un Hamiltoniano de plaquetas, como se describe en la presente memoria.

15 El Hamiltoniano de corto alcance es un Hamiltoniano de cuerpo D , donde D es 2, 3, 4, 5, 6, 7 u 8. Un Hamiltoniano de cuerpo d , como se describe en la presente memoria, puede referirse a un Hamiltoniano que representa las interacciones de la pluralidad de qubits, donde no se producen interacciones conjuntas entre los grupos que comprenden $d+1$ o más qubits. Un Hamiltoniano de cuerpo d puede implicar interacciones entre grupos que comprenden d o menos qubits. Un Hamiltoniano de cuerpo d puede ser la suma de una pluralidad de Hamiltonianos de cuerpo d , en la que cada Hamiltoniano de cuerpo d representa una interacción conjunta entre un grupo de d qubits o menos.

20 Por ejemplo, un Hamiltoniano de un solo cuerpo, como se describe en la presente memoria, puede ser considerado como un Hamiltoniano de cuerpo d , con $d = 1$. Como un ejemplo adicional, un Hamiltoniano de dos cuerpos más cercanos, como se describe en la presente memoria, puede ser considerado como un Hamiltoniano de cuerpo d , con $d = 2$. Como un ejemplo más, un Hamiltoniano de plaquetas, como se describe en la presente memoria, puede ser considerado como un Hamiltoniano de cuerpo d , con $d = 4$. De acuerdo con las realizaciones, que pueden combinarse con otras descritas en la presente memoria, el Hamiltoniano de corto alcance puede ser un Hamiltoniano de cuerpo d , con $d = 4$. El valor de d puede depender de la geometría de la red. Por ejemplo, para una red hexagonal, una plaqueta implicaría seis qubits, y un Hamiltoniano de plaquetas podría ser un Hamiltoniano de 6 cuerpos.

25 Es ventajoso tener un Hamiltoniano de corto alcance que sea un Hamiltoniano de cuerpo d con una d pequeña, por ejemplo $d = 4$, ya que las interacciones correspondientes entre los qubits pueden ser diseñadas más fácilmente en comparación con los Hamiltonianos de cuerpo d con una d más grande.

30 El tamaño de un problema computacional, tal como se describe en la presente memoria, puede referirse a una medida del número de unidades de información clásica necesarias para especificar el problema computacional. El tamaño de un problema computacional puede depender del número de variables de entrada del problema computacional. El tamaño de un problema computacional puede aumentar a medida que aumenta el número de variables de entrada. El tamaño del problema computacional puede ser igual al número de variables de entrada. Por ejemplo, para el problema de los vendedores viajeros, tal como se describe en este documento, el tamaño puede referirse a la suma de las longitudes de la primera y la segunda lista. Como otro ejemplo, para el problema del modelo de espín de Ising, el tamaño puede referirse al número n de espines s_i .

35 Para un primer problema computacional que tenga un primer tamaño, el Hamiltoniano final correspondiente puede ser la suma de un primer Hamiltoniano del problema y un primer Hamiltoniano de corto alcance. Para un segundo problema computacional que tiene un segundo tamaño, el Hamiltoniano final correspondiente puede ser la suma de un segundo Hamiltoniano del problema y un segundo Hamiltoniano de corto alcance. Si el segundo tamaño es el mismo que el primero, el segundo Hamiltoniano de corto alcance puede ser el mismo que el primer Hamiltoniano de corto alcance. Si el segundo tamaño es diferente del primer tamaño, el segundo Hamiltoniano de corto alcance puede ser diferente del primer Hamiltoniano de corto alcance. Por ejemplo, en referencia al modelo de espín de Ising descrito anteriormente, el primer problema computacional puede referirse a un primer problema del modelo de espín de Ising para N espines con un primer conjunto de coeficientes de acoplamiento y coeficientes de campo, y el segundo problema computacional puede referirse a un segundo problema del modelo de espín de Ising, también para N espines, con un segundo conjunto de coeficientes de acoplamiento y coeficientes de campo diferentes del primer conjunto de coeficientes de acoplamiento y coeficientes de campo. En este caso, los tamaños del primer y segundo problema del modelo de espín de Ising pueden considerarse iguales al número N . Según las realizaciones, el Hamiltoniano de corto alcance para el primer problema del modelo de espín de Ising es el mismo que el Hamiltoniano de corto alcance para el segundo problema del modelo de espín de Ising.

55 El Hamiltoniano de corto alcance es un Hamiltoniano de cuerpo D , donde D es independiente del problema computacional. Además, la distancia de corte de interacción puede ser independiente del problema computacional.

De acuerdo con las realizaciones, que pueden ser combinadas con otras realizaciones descritas en la presente memoria, el Hamiltoniano de corto alcance puede ser independiente del problema computacional.

De acuerdo con las realizaciones descritas en la presente memoria, el procedimiento incluye la evolución del sistema cuántico desde el estado cuántico inicial hacia el estado fundamental del Hamiltoniano final. El estado fundamental del Hamiltoniano final es un estado cuántico del sistema cuántico que minimiza la energía del Hamiltoniano final. El estado fundamental del Hamiltoniano final es un estado eigen (o propio) del Hamiltoniano final, en particular un estado eigen con un valor eigen mínimo. Dado que el problema computacional está codificado en el Hamiltoniano del problema y dado que el Hamiltoniano final es la suma del Hamiltoniano del problema y el Hamiltoniano de corto alcance, el estado fundamental del Hamiltoniano final contiene información sobre el problema computacional y/o puede codificar una solución del problema computacional.

El estado fundamental del Hamiltoniano final puede ser un estado del sistema cuántico a temperatura cero. Al no querer estar ligado a ninguna teoría en particular, según consideraciones en el campo de la física cuántica, se considera imposible que un sistema cuántico alcance una temperatura de cero absoluto. Aun así, la evolución del sistema cuántico desde el estado cuántico inicial hacia el estado fundamental del Hamiltoniano final, incluyendo por ejemplo el enfriamiento del sistema cuántico a una temperatura operativa T_{\max} , puede permitir acercarse al estado fundamental del Hamiltoniano final. La temperatura de operación T_{\max} puede depender fuertemente del tipo de qubits utilizados en el sistema cuántico. Por ejemplo, en el caso de los qubits superconductores, T_{\max} puede ser de 50 mK o inferior, preferentemente de 1 mK o inferior. El sistema cuántico puede evolucionar desde el estado cuántico inicial a un estado cuántico final del sistema cuántico para acercarse al estado fundamental del Hamiltoniano final. El estado cuántico final puede ser un estado del sistema cuántico a la temperatura de operación T_{\max} o a una temperatura más baja, es decir, puede ser un estado térmico del Hamiltoniano final a la temperatura de operación o a una temperatura más baja. En consecuencia, el estado cuántico final puede aproximarse al estado fundamental del Hamiltoniano final. El estado cuántico final puede contener información sobre el estado fundamental del Hamiltoniano final. El estado cuántico final puede contener información sobre la solución del problema computacional.

El sistema cuántico puede ser enfriado, por ejemplo, por una unidad de refrigeración como se describe en la presente memoria, a la temperatura de operación T_{\max} o a una temperatura más baja. La temperatura de operación puede ser una temperatura distinta de cero.

Según las realizaciones, que se combinan con otras realizaciones descritas en la presente memoria, el procedimiento puede incluir la inicialización del sistema cuántico en un estado cuántico inicial enfriando el sistema cuántico hacia un estado fundamental de un Hamiltoniano inicial. El estado fundamental del Hamiltoniano inicial es un estado cuántico del sistema cuántico minimizando la energía para el Hamiltoniano inicial. El estado fundamental del Hamiltoniano inicial es un estado eigen del Hamiltoniano inicial, en particular un estado eigen con un valor propio mínimo. El estado fundamental del Hamiltoniano inicial es un estado del sistema cuántico a temperatura cero. Enfriar el sistema cuántico hacia el estado fundamental del Hamiltoniano inicial puede permitir acercarse al estado fundamental del Hamiltoniano inicial. El estado cuántico inicial puede aproximarse al estado fundamental del Hamiltoniano inicial.

El Hamiltoniano inicial puede ser independiente del problema computacional. El Hamiltoniano inicial puede ser un Hamiltoniano de cuerpo d , con d siendo 1, 2, 3 o 4. El Hamiltoniano inicial puede ser un Hamiltoniano de un solo cuerpo, como se describe en la presente memoria. Tener un Hamiltoniano inicial que sea un Hamiltoniano de un solo cuerpo permite un establecimiento simple para realizar el Hamiltoniano inicial, por ejemplo, para un sistema cuántico de qubits superconductores.

El Hamiltoniano inicial puede ser un Hamiltoniano de un solo cuerpo con la forma $H^{\text{init}} = \sum_k a_k \sigma_x^{(k)}$. En este caso, a_k puede ser un coeficiente para un qubit k -ésimo t en la pluralidad de qubits y $\sigma_x^{(k)}$ puede ser el operador de Pauli que actúa en el qubit k -ésimo. En particular, $\sigma_x^{(k)}$ puede ser un operador de Pauli que corresponde a una segunda dirección espacial. La segunda dirección espacial puede ser ortogonal a la primera dirección espacial como se describe en el presente documento. El operador de Pauli $\sigma_x^{(k)}$ y el operador de Pauli $\sigma_z^{(k)}$ pueden ser operadores no conmutables, en particular anti-conmutación. Según las realizaciones, cada uno de los coeficientes a_k es igual a un único coeficiente común h . El Hamiltoniano inicial puede ser un Hamiltoniano de un solo cuerpo que tenga la forma $H^{\text{init}} = h \sum_k \sigma_x^{(k)}$.

Para un qubit superconductor, una polarización de flujo magnético a través del bucle primario superconductor del qubit superconductor puede establecerse de tal manera que los estados base $|0\rangle$ y $|1\rangle$ tengan la misma energía, es decir, la diferencia de energía para estos estados base sea cero. Además, una polarización de flujo magnético a través del bucle superconductor secundario puede acoplar los estados base $|0\rangle$ y $|1\rangle$. Por consiguiente, un sumando del Hamiltoniano de la forma $h\sigma_x^{(k)}$ puede realizarse para el qubit superconductor. Por consiguiente, un Hamiltoniano inicial de la forma $H^{\text{init}} = h \sum_k \sigma_x^{(k)}$ puede utilizarse para una pluralidad de qubits superconductores. Un estado fundamental del Hamiltoniano inicial puede ocuparse con casi certeza fijando el coeficiente h en un valor mucho mayor que la escala de energía determinada por la temperatura del sistema cuántico.

Para un sistema cuántico realizado con iones atrapados, los iones pueden ser inicializados por bombeo óptico utilizando un láser, que transfiere determinadamente los iones a uno de los dos estados de base cuántica de un qubit. Esto reduce la entropía y por lo tanto es un enfriamiento de los estados internos.

5 Para un sistema cuántico realizado con átomos fríos, el estado cuántico inicial puede ser preparado por átomos excitantes que están en su estado fundamental a un estado Rydberg con una gran desintonización.

Para un sistema cuántico realizado con centros de NV, los centros de NV pueden ser abordados individualmente utilizando técnicas estándar de microscopía óptica confocal. La inicialización y la medición pueden realizarse mediante excitación óptica no resonante o resonante.

10 Según las realizaciones, el sistema cuántico evoluciona desde el estado cuántico inicial hacia un estado fundamental del Hamiltoniano final. Según las realizaciones, la evolución del sistema cuántico puede incluir la realización de un recocido cuántico. El recocido cuántico puede ser realizado por una unidad de recocido cuántico programable, como se describe en la presente memoria.

15 Realizar el recocido cuántico puede incluir el paso del Hamiltoniano inicial del sistema cuántico al Hamiltoniano final. Realizar el recocido cuántico puede incluir el paso del Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final a través de un Hamiltoniano de interpolación. El Hamiltoniano de interpolación puede ser un Hamiltoniano dependiente del tiempo. El Hamiltoniano de interpolación puede tener uno o más parámetros de interpolación para interpolar entre el Hamiltoniano inicial y el Hamiltoniano final. Por ejemplo, el Hamiltoniano de interpolación puede tener la forma $H(t) = A(t) H^{\text{init}} + B(t) H^{\text{final}}$. En la que, H^{init} puede referirse al Hamiltoniano inicial, H^{final} puede referirse al Hamiltoniano final, t puede ser un parámetro de tiempo, y $A(t)$ y $B(t)$ pueden ser coeficientes de interpolación dependiendo del parámetro de tiempo t .

20 Realizar el recocido cuántico puede incluir el paso del Hamiltoniano inicial en un tiempo inicial al Hamiltoniano final en un tiempo final. En el tiempo inicial, uno o más parámetros de interpolación del Hamiltoniano de interpolación pueden ser fijados en uno o más valores iniciales respectivos. En el tiempo inicial, el Hamiltoniano de interpolación puede ser igual al Hamiltoniano inicial. Por ejemplo, en una realización en la que el Hamiltoniano de interpolación tiene la forma $H(t) = A(t) H^{\text{init}} + B(t) H^{\text{final}}$, el parámetro de interpolación $A(t)$ puede establecerse en el valor inicial 1 en el tiempo inicial y el parámetro de interpolación $B(t)$ puede establecerse en el valor inicial 0 en el tiempo inicial. En consecuencia, el Hamiltoniano de interpolación es igual a H^{init} en el tiempo inicial.

25 Realizar el recocido cuántico puede incluir el paso gradual del Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final. Realizar el recocido cuántico puede incluir el cambio gradual de uno o más parámetros de interpolación del Hamiltoniano de interpolación. En los tiempos intermedios entre el tiempo inicial y el tiempo final, el Hamiltoniano de interpolación es diferente del Hamiltoniano inicial y/o del Hamiltoniano final. Un parámetro de interpolación del Hamiltoniano de interpolación puede cambiarse gradualmente de un valor inicial, por ejemplo, en el tiempo inicial, a un valor final, por ejemplo, en el tiempo final. En el tiempo final, el Hamiltoniano de interpolación es igual al Hamiltoniano final. Por ejemplo, para las realizaciones según las cuales el Hamiltoniano de interpolación tiene la forma $H(t) = A(t) H^{\text{init}} + B(t) H^{\text{final}}$, el parámetro de interpolación $A(t)$ puede cambiarse gradualmente del valor inicial 1 en el tiempo inicial al valor final 0 en el tiempo final. Análogamente, el parámetro de interpolación $B(t)$ puede cambiarse gradualmente del valor inicial 0 en el tiempo inicial al valor final 1 en el tiempo final. En consecuencia, el Hamiltoniano de interpolación $H(t)$ es igual al Hamiltoniano final en el tiempo final.

30 Según las realizaciones, que pueden combinarse con otras realizaciones descritas en la presente memoria, el sistema cuántico se mantiene a una temperatura de operación de 50 mK o inferior, en particular de 1 mK o inferior, mientras se realiza el recocido cuántico.

Según las realizaciones, que pueden combinarse con otras realizaciones descritas en la presente memoria, la realización del recocido cuántico del Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final incluye la evolución adiabática del Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final.

35 Para un sistema cuántico que incluya una pluralidad de qubits superconductores con un Hamiltoniano inicial de la forma $\sum_k h E_k \sigma_x^{(k)}$, un Hamiltoniano del problema de la forma $\sum_k J_k \sigma_z^{(k)}$ y un Hamiltoniano de corto alcance de la forma $C \sum_i C_i$ con los sumandos del Hamiltoniano C_i correspondientes a las plaquetas, el recocido cuántico puede realizarse de la siguiente manera. Después de la inicialización, donde $C=J_k=0$, se aumenta lentamente C y J_k mientras se reduce lentamente el coeficiente a hasta $a = 0$.

40 Como alternativa o además de las realizaciones que implican el recocido cuántico, la evolución del sistema cuántico desde el estado cuántico inicial hacia el estado fundamental del Hamiltoniano final puede incluir el enfriamiento del sistema cuántico desde el estado cuántico inicial hasta el estado cuántico final. El estado cuántico inicial puede ser un estado del sistema cuántico a una temperatura inicial. El estado cuántico final puede ser un estado del sistema cuántico a una temperatura final. La temperatura final es inferior a la temperatura inicial. El enfriamiento del sistema cuántico desde el estado cuántico inicial a la temperatura inicial hasta el estado cuántico final a la temperatura final puede incluir la disminución, por ejemplo, la disminución gradual, de la temperatura desde la temperatura inicial hasta la temperatura final. Según las realizaciones, que pueden combinarse con otras realizaciones descritas en la

presente memoria, la temperatura final puede ser de 50 mK o inferior, en particular de 1 mK o inferior. Según las realizaciones, que pueden combinarse con otras realizaciones descritas en la presente memoria, la temperatura inicial puede ser la temperatura ambiente o inferior, en particular 200 Kelvin o menor.

5 Según las realizaciones, el procedimiento incluye la medición de al menos una porción de la pluralidad de qubits para obtener una lectura del estado cuántico final. Según algunas realizaciones, se mide una porción de la pluralidad de qubits, de modo que no se miden todos los qubits de la pluralidad de qubits. La porción de la pluralidad de qubits puede comprender el 70% o menos de la pluralidad de qubits, en particular el 60% o menos, más particularmente el 50% o menos. Según algunas realizaciones, si el número total de qubits en la pluralidad de qubits se denota con N , entonces el número de qubits en la porción se escala según \sqrt{N} .

10 Medir al menos una porción de la pluralidad de qubits puede incluir la medición de cada qubit en al menos una porción individualmente. La medición de al menos una porción puede incluir la medición de un operador de Pauli, por ejemplo, el operador de Pauli σ_z , para cada uno de los qubits en la porción de al menos una porción de los qubits. La medición de al menos una porción puede incluir la realización de una medición de dos resultados para cada qubits en al menos una porción de la pluralidad de qubits. Una medición de dos resultados puede proporcionar uno de dos posibles resultados, por ejemplo, 0 o 1. El al menos una porción de qubits puede ser medido por un aparato de medición, como se describe en este documento.

15 La medición de al menos una porción puede proporcionar la lectura del estado cuántico final. La lectura puede tener la forma de la información clásica, representada por una pluralidad de bits clásicos. La lectura puede revelar información sobre el estado cuántico final y/o sobre el estado fundamental del Hamiltoniano final. La lectura puede proporcionar información sobre una solución, por ejemplo, una solución de prueba, una solución verdadera o un conjunto de variables testigo, para el problema computacional. La lectura puede ser una solución al problema computacional.

20 Para un sistema cuántico que incluya una pluralidad de N qubits superconductores, los estados qubit $|0\rangle$ y $|1\rangle$ para la pluralidad de qubits pueden medirse con alta fidelidad utilizando un dispositivo de medición que incluya una pluralidad de dispositivos de interferencia cuántica superconductores, en particular N dispositivos de interferencia cuántica superconductores de CC hysterical y N dispositivos de interferencia cuántica superconductores de RF controlados por líneas de polarización, en los que el número de líneas de polarización se escala según \sqrt{N} .

25 Para un sistema cuántico realizado con iones atrapados, se puede realizar una medición del sistema cuántico mediante espectroscopia de fluorescencia. Allí, los iones son conducidos en una transición con una vida corta si están en uno de los dos estados de espín. Como resultado, los iones en el estado excitado emiten muchos fotones, mientras que los otros iones permanecen oscuros. Los fotones emitidos pueden ser registrados por cámaras comerciales CCD. La medición en cualquiera de las direcciones de la esfera de Bloch se logra mediante pulsos apropiados de un qubit antes de la espectroscopia de fluorescencia.

30 Para un sistema cuántico realizado con átomos fríos, los qubits pueden medirse realizando un barrido selectivo de los átomos del estado fundamental y obteniendo imágenes de fluorescencia con resoluciones de un solo sitio.

35 Para un sistema cuántico realizado con puntos cuánticos, los qubits pueden ser leídos en una secuencia de pulsos por un rápido pasaje adiabático.

40 De acuerdo con las realizaciones, el procedimiento incluye la determinación de una solución al problema computacional a partir de la lectura. El procedimiento puede incluir el cálculo de la solución a partir de la lectura. La lectura puede ser proporcionada a un sistema de computación clásico, como se describe en este documento. El sistema de computación clásico puede determinar o calcular la solución del problema de computación a partir de la lectura.

45 El problema computacional, tal como se describe en el presente documento, puede estar relacionado con la clase de complejidad de NP considerada en el campo de la informática, en la que "NP" significa "tiempo polinómico no determinístico". Según las realizaciones, que pueden combinarse con otras realizaciones descritas en la presente memoria, el problema computacional pertenece a la clase de complejidad de NP. La clase de complejidad de NP comprende los problemas de decisión. De manera informal, para un problema computacional perteneciente a la clase de complejidad de NP, existe un conjunto de variables testigo a partir de las cuales es posible verificar que la solución del problema computacional es "sí". En ese caso, para los problemas de cálculo de NP, el proceso de verificación de que la solución es "sí" puede llevarse a cabo mediante un algoritmo de verificación que tiene un tiempo de ejecución que escala sólo polinómicamente con el tamaño del problema computacional. En otras palabras, el conjunto de variables testigo contiene información sobre la solución, en la que la información puede ser procesada en tiempo de ejecución polinómico por el algoritmo de verificación para verificar que la solución es "sí". Para una definición formal de la clase de complejidad de NP, se hace referencia a la literatura de la ciencia informática pertinente.

55 Por ejemplo, el problema del vendedor viajero, el problema de los 3 colores y el problema del modelo de espín de Ising, como se describe en la presente memoria, son ejemplos de problemas de decisión en la clase de complejidad

de NP. Por ejemplo, consideremos el problema del modelo de espín de Ising. Si la solución del problema del modelo de espín de Ising para un conjunto determinado de coeficientes de acoplamiento y coeficientes de campo y para una constante K determinada es "sí", entonces una configuración de espines (s_1, s_2, \dots, s_n) para la que la función de energía de Ising asociada $H(s_1, s_2, \dots, s_n)$ es menor que K puede considerarse como un conjunto de variables testigo. Dadas las variables testigo (s_1, s_2, \dots, s_n) , puede verificarse en tiempo de polinomio que la energía $H(s_1, s_2, \dots, s_n)$ es efectivamente menor que K , calculando el número $H(s_1, s_2, \dots, s_n)$ y comparándolo con K . En consecuencia, el problema del modelo de espín de Ising está contenido en la clase de complejidad de NP.

La tarea de determinar si una solución, que es "sí" o "no" para un problema de decisión, puede no tener un algoritmo de tiempo polinómico para algunos problemas de cálculo en NP o puede incluso tener un tiempo de ejecución exponencial, mientras que el algoritmo de verificación puede tener un tiempo de ejecución polinómico. Se considera que algunos problemas de cálculo de la clase de complejidad de NP son intratables desde el punto de vista computacional para los sistemas de computación clásicos. En el que, la terminología de un problema computacional "intratable desde el punto de vista de computación" puede referirse a un problema computacional para el que no existe un algoritmo que funcione en un sistema de computación clásico con tiempo de ejecución polinómico, para determinar si la solución del problema computacional es "sí" o "no". En particular, el problema del vendedor viajero, el problema de los 3 colores y el problema del modelo de espín de Ising, se consideran intratables para los sistemas de computación clásicos, o al menos no se conoce ningún algoritmo que resuelva ninguno de estos problemas en tiempo de ejecución polinómico.

Según las realizaciones, que pueden combinarse con otras realizaciones descritas en la presente memoria, el problema computacional para el que se calcula una solución mediante el sistema cuántico, tal como se describe en la presente memoria, es un problema de NP completo o un problema de NP complejo. Los problemas completos de NP pertenecen a la clase NP y se consideran computacionalmente intratables para los sistemas de computación clásicos. Aunque no todos los problemas de NP complejo pertenecen a la clase NP, los problemas de NP complejo también se consideran computacionalmente intratables para los sistemas de computación clásicos.

En el caso de las realizaciones según las cuales lo computacional pertenece a la clase de complejidad de NP, por ejemplo, los problemas de NP completos, la lectura de la medición puede incluir un conjunto de variables testigo del problema computacional o al menos una porción de este conjunto.

De acuerdo con algunas realizaciones, que pueden combinarse con otras realizaciones descritas en este documento, la determinación de la configuración codificación del problema puede incluir el mapeo del problema computacional en un problema computacional auxiliar, en el que el problema computacional auxiliar incluye la determinación de un estado fundamental de un modelo de espín de largo alcance. El problema computacional auxiliar depende del problema computacional. El mapeo del problema computacional en el problema computacional auxiliar puede incluir el mapeo de los parámetros de entrada del problema computacional en los parámetros de entrada del problema computacional auxiliar. La asignación del problema computacional al problema auxiliar puede ser tal que una solución para el problema computacional pueda determinarse a partir de una solución para el problema computacional auxiliar.

De acuerdo con las realizaciones, el problema computacional auxiliar puede referirse al problema del modelo de espín de Ising, como se describe en la presente memoria. De acuerdo con otras realizaciones, el problema computacional puede ser un problema de la clase de complejidad de NP, por ejemplo, el problema del vendedor viajero, como se describe en la presente memoria. Dado que el problema del modelo de espín de Ising es un problema de NP completo, todos los problemas de la clase de complejidad de NP, como por ejemplo, el problema del vendedor viajero, pueden ser mapeados en el problema del modelo de espín de Ising. Por ejemplo, para el problema del vendedor viajero que incluye una primera lista y una segunda lista, como se describe en este documento, la primera lista y la segunda lista se pueden asignar a un conjunto de coeficientes de acoplamiento y coeficientes de campo, como se describe en este documento, para el problema del modelo de espín de Ising. Una solución para el problema del vendedor viajero puede ser calculada a partir de una solución para el problema del modelo de espín de Ising con los correspondientes coeficientes de acoplamiento y coeficientes de campo. Tales mapeos son conocidos.

Según las realizaciones, la determinación de la configuración de codificación del problema puede incluir la determinación de la configuración de codificación del problema a partir del modelo de espín de largo alcance, por ejemplo, a partir de un modelo de espín de Ising. En las Figs. 9 a 16 se describe con más detalle una forma específica de realizar esta determinación.

Según las realizaciones, que pueden combinarse con otras realizaciones descritas en la presente memoria, el modelo de espín de largo alcance puede ser un modelo de espín de largo alcance con interacciones cuerpo m , donde m es 1, 2 ó 3.

Según las realizaciones, que pueden combinarse con otras realizaciones descritas en la presente memoria, el procedimiento incluye además la determinación del Hamiltoniano de corto alcance a partir de una pluralidad de bucles cerrados de espines en el modelo de espín de largo alcance.

De acuerdo con una realización adicional, se proporciona un procedimiento de cálculo de una solución al problema computacional utilizando el sistema cuántico que comprende la pluralidad de qubits.

5 El procedimiento incluye la codificación del problema computacional en el Hamiltoniano del problema del sistema cuántico, como se describe en la presente memoria. El Hamiltoniano del problema es un Hamiltoniano de un solo cuerpo que incluye la pluralidad de parámetros ajustables, como se describe en la presente memoria. La codificación incluye determinar, del problema computacional, la configuración de codificación del problema para la pluralidad de parámetros ajustables, como se describe en la presente memoria.

10 El procedimiento incluye además la inicialización del sistema cuántico en un estado cuántico inicial. El procedimiento incluye además la evolución del sistema cuántico desde el estado cuántico inicial hasta un estado cuántico final mediante la realización de un recocido cuántico. Realizar el recocido cuántico incluye pasar de un Hamiltoniano inicial del sistema cuántico a un Hamiltoniano final del sistema cuántico, como se describe en este documento. El Hamiltoniano final es la suma del Hamiltoniano problema y el Hamiltoniano de corto alcance, como se describe en la presente memoria, donde la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano problema está en la configuración de codificación del problema y donde el Hamiltoniano de corto alcance es un Hamiltoniano de cuerpo d , donde d es independiente del problema computacional.

15 El procedimiento incluye además la medición de al menos una porción de la pluralidad de qubits para obtener una lectura del estado cuántico final, como se describe en la presente memoria.

El procedimiento incluye además la determinación de una solución al problema computacional a partir de la lectura, como se describe en la presente memoria.

20 Según otra realización, se proporciona un aparato para calcular soluciones a problemas de computación, como por ejemplo el aparato 400 que se muestra en la Fig. 1.

El aparato incluye un sistema cuántico que comprende una pluralidad de qubits, como se describe en la presente memoria.

25 El aparato incluye además una unidad de refrigeración, como por ejemplo la unidad de refrigeración 410 mostrada en la Fig. 1, adaptada para refrigerar el sistema cuántico hacia un estado fundamental del sistema cuántico, como se describe en la presente memoria. La unidad de enfriamiento puede ser configurada para enfriar el sistema cuántico hacia un estado fundamental del Hamiltoniano inicial, como se describe en la presente memoria, para inicializar el sistema cuántico en el estado cuántico inicial, como se describe en la presente memoria. La unidad de enfriamiento puede configurarse para mantener el sistema cuántico a una temperatura de operación que depende en gran medida del tipo de qubits utilizados en el aparato. Por ejemplo, para los qubits superconductores, la temperatura de operación es de 50 mK o inferior, en particular de 1 mK o inferior.

30 El aparato incluye además una unidad de recocido cuántico programable, como por ejemplo la unidad de recocido cuántico programable 430 que se muestra en la Fig. 1, adaptada para evolucionar, mediante el recocido cuántico, el Hamiltoniano inicial del sistema cuántico al Hamiltoniano final del sistema cuántico, como se describe en este documento. El Hamiltoniano final es la suma del Hamiltoniano del problema y el Hamiltoniano de corto alcance, como se describe en la presente memoria.

La unidad de enfriamiento puede ser configurada para mantener el sistema cuántico a la temperatura de operación durante la realización del recocido cuántico por la unidad de recocido cuántico programable.

40 El aparato incluye además un dispositivo de medición, como por ejemplo el dispositivo de medición 440 que se muestra en la Fig. 1, adaptado para medir al menos una porción de la pluralidad de qubits.

45 El aparato incluye además un sistema de computación clásico, como por ejemplo el sistema de computación clásico 450 mostrado en la Fig. 1, conectado a la unidad de recocido cuántico programable y al dispositivo de medición. El sistema de computación clásico puede ser configurado para recibir, como entrada, un problema de computación. El sistema de computación clásico se configura además para codificar el problema computacional en el Hamiltoniano del problema. En este caso, la codificación incluye la determinación, a partir del problema computacional, de la configuración de codificación del problema para la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema, como se describe en este documento. El sistema de computación clásico está configurado además para comunicar la configuración de codificación del problema a la unidad de recocido cuántico.

50 La unidad de recocido cuántico programable está configurada para recibir la configuración de codificación de problemas del sistema de computación clásico. La unidad de recocido cuántico programable está configurada para pasar, por recocido cuántico, del Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final, en el que la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema está en la configuración de codificación del problema.

55 El sistema de computación clásico está configurado para recibir una lectura del sistema cuántico del dispositivo de medición. El sistema de computación clásico está configurado además para determinar una solución al problema computacional a partir de la lectura.

Según un ejemplo útil para comprender la invención, se proporciona un dispositivo programable de recocido cuántico para computar soluciones a problemas computacionales. El dispositivo programable de recocido cuántico incluye un sistema cuántico que incluye una pluralidad de qubits superconductores dispuestos según una red bidimensional.

5 El dispositivo programable de recocido cuántico incluye además un ensamblaje de polarización de flujo magnético que incluye una pluralidad de unidades de polarización de flujo magnético configuradas para generar una pluralidad de flujos magnéticos ajustables. Cada flujo magnético ajustable actúa en un solo qubit superconductor en la pluralidad de qubits superconductores.

10 El dispositivo programable de recocido cuántico incluye además una unidad de acoplamiento que incluye al menos un dispositivo de interferencia cuántica superconductor configurado para acoplar la pluralidad de qubits superconductores según un Hamiltoniano de plaquetas.

15 El dispositivo programable de recocido cuántico incluye además un controlador conectado a la unidad de polarización de flujo magnético y a la unidad de acoplamiento. El controlador está configurado para recibir una configuración de codificación de problemas para una pluralidad de parámetros ajustables de un Hamiltoniano del problema del sistema cuántico, donde el Hamiltoniano del problema es un Hamiltoniano de un solo cuerpo y donde la configuración de codificación del problema codifica un problema computacional. El controlador se configura además para controlar el conjunto de polarización de flujo magnético y la unidad de acoplamiento para evolucionar un Hamiltoniano inicial del sistema cuántico a un Hamiltoniano final del sistema cuántico por recocido cuántico. El Hamiltoniano final es la suma del Hamiltoniano de plaquetas y el Hamiltoniano problema, donde la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema está en la configuración de codificación del problema.

20 La terminología de una "unidad de recocido cuántico programable" se utiliza como sinónimo de la terminología de un "dispositivo de recocido cuántico programable" en este documento.

25 Se describen otros aspectos de la presente divulgación con respecto a las Figs. 9-16. Se describe una codificación específica de un problema computacional en un Hamiltoniano del problema y el correspondiente Hamiltoniano final, a saber, una codificación de un problema de modelo de espín de Ising con interacciones de largo alcance en un Hamiltoniano cuántico final que es la suma de un Hamiltoniano del problema de un solo cuerpo y un Hamiltoniano de plaquetas. El problema (clásico) del modelo de espín de Ising con interacciones de largo alcance es NP completo, y su cuantificación es trivial, de modo que no se hará aquí ninguna distinción entre el modelo de espín clásico y el cuántico de Ising. Se conocen mapeos de otros problemas computacionales clásicos al problema del modelo de espín de Ising. El estado fundamental del Hamiltoniano cuántico final, o un estado térmico a baja temperatura de operación, puede por lo tanto contener información sobre una solución del problema del modelo de espín de Ising, y, mediante el mapeo inverso, de muchos problemas computacionales clásicos de NP complejo. El mapeo específico del Hamiltoniano cuántico final permite la realización de un dispositivo de procesamiento cuántico (procesador cuántico) en una superficie bidimensional, específicamente en una red bidimensional, si el problema del modelo de espín de Ising incluye sólo interacciones del cuerpo d , con d más pequeñas o iguales a dos, y permite la realización del dispositivo de procesamiento cuántico en un espacio tridimensional, específicamente en una red tridimensional, si el problema del modelo de espín de Ising incluye sólo interacciones del cuerpo d , con d más pequeña o igual a tres. El mapeo puede extenderse a los problemas del modelo de espín de Ising con interacciones de cuerpo d y d arbitraria. Los dispositivos de procesamiento cuántico son totalmente programables a través del Hamiltoniano del problema de un solo cuerpo y son arquitecturas escalables.

30 Se considera primero el caso del problema del modelo de espín de Ising, que incluye sólo interacciones cuerpo d , con d menor o igual a dos. La codificación específica parte del problema del modelo de espín de Ising para n espines, como se describe en este documento, con un máximo de interacciones de dos cuerpos y los correspondientes coeficientes de acoplamiento c_{ij} . Los índices i y j pueden variar de 1 a n , siendo j menor que i . En un primer caso, todos los coeficientes de campo c_i son iguales a cero. La Fig. 9 ilustra un problema del modelo de espín de Ising para $n = 6$ espines, en el que los espines se etiquetan de 1 a 6. Hay $n(n - 1)/2 = 15$ interacciones entre pares entre los espines, como se indica en la Fig. 9 por las líneas que conectan los pares de espines. Por ejemplo, la línea indicada con 12 representa una interacción entre pares entre los espines 1 y 2. Las 15 interacciones entre pares corresponden a 15 coeficientes de acoplamiento c_{ij} . Las interacciones son interacciones de largo alcance.

35 Por cada par de espines en el modelo de espines de Ising, se proporciona un qubit correspondiente en el sistema cuántico. Por ejemplo, para los 6 espines con 15 interacciones entre pares que se muestran en la Fig. 9, el sistema cuántico correspondiente incluye 15 qubits. Una configuración de espines en el modelo de espín de Ising se mapea a una configuración de los correspondientes qubits. En el que, la configuración de los qubits depende de la orientación relativa de los espines. Un par de espines que apuntan en la misma dirección (alineación paralela) se mapean a un qubit en el estado de base cuántica $|1\rangle$. Además, un par de espines que apuntan en direcciones opuestas (alineación antiparalela) se mapean a un qubit en el estado básico cuántico $|0\rangle$. Este mapeo se ilustra en la Fig. 10. En la Fig. 10, las etiquetas 0 y 1 corresponden a los estados de base cuántica $|0\rangle$ y $|1\rangle$, respectivamente.

Los coeficientes de acoplamiento c_{ij} se mapean a una pluralidad de parámetros ajustables J_k de un Hamiltoniano del problema que codifica el problema computacional, en este caso el problema del modelo de espín de Ising. El

Hamiltoniano del problema tiene la forma $\sum_k J_k \sigma_z^{(k)}$, donde $k = n*i + j$ y donde k va de 1 a M , con $M=n(n-1)/2$. El problema del modelo de espín de Ising está mapeado al Hamiltoniano del problema de tal manera que los parámetros ajustables J_k del Hamiltoniano del problema representan las interacciones entre los espines en el modelo de espín de Ising, correspondientes a los coeficientes de acoplamiento c_{ij} .

5 El número de qubits necesarios para codificar el problema del modelo de espín de Ising en el Hamiltoniano del problema aumenta cuadráticamente en comparación con el problema del modelo de espín de Ising para n espines, porque el número de interacciones de dos cuerpos entre los espines es igual a $M = n(n - 1)/2$. De acuerdo con algunas realizaciones, se pueden considerar grados adicionales de libertad. El número total de qubits en el sistema cuántico puede ser $M + n - 2$ o más, a los que se pueden añadir $n-2$ qubits auxiliares adicionales y/o qubits auxiliares
10 adicionales por las razones que se explican a continuación. En consecuencia, el número de qubits puede ser mayor que el número de espines n . En particular, el número de qubits puede ser el número de espines n más $M - 2$ grados de libertad adicionales. El Hamiltoniano del problema permite una programación del dispositivo de procesamiento cuántico con sólo interacciones locales, en particular interacciones de un solo cuerpo con campos externos.

15 El aumento del número de grados de libertad del sistema cuántico en comparación con el modelo de espín de Ising se compensa con un Hamiltoniano de corto alcance que es la suma de $M - n$ de los sumandos del Hamiltoniano C_l de 4 cuerpos, llamados Hamiltonianos de restricción que representan restricciones para fijar una porción de los qubits. El Hamiltoniano de corto alcance tiene la forma $\sum_l C_l$, donde el índice l va de 1 a $(n^2 - 3n)/2$ y donde cada sumando del Hamiltoniano C_l es una restricción Hamiltoniana que puede tener la forma

$$C_l = -C \left(\sum_{m=n,e,s,w} \tilde{\sigma}_z^{(l,m)} + S_z^l \right)^2$$

$$= -C \tilde{\sigma}_z^{(l,n)} \tilde{\sigma}_z^{(l,e)} \tilde{\sigma}_z^{(l,s)} \tilde{\sigma}_z^{(l,w)},$$

20 Con referencia a la ecuación anterior, pueden considerarse dos posibles implementaciones de Hamiltonianos de restricción. La suma de la ecuación anterior puede representar una implementación basada en ancilla. La suma se extiende sobre los cuatro miembros de una plaqueta (norte, este, sur, oeste) de una red bidimensional según la cual se disponen los qubits. Además, cada S_z^l es un operador que actúa sobre un qutrit auxiliar incluido en el sistema cuántico. Un qutrit auxiliar tiene una base que consiste en tres estados básicos que, en esta realización, se
25 denominarán $|0\rangle$, $|2\rangle$, y $|4\rangle$. La segunda implementación de los Hamiltonianos de corto alcance es una implementación basada en la interacción que no requiere qutrits auxiliares. Según la implementación basada en la interacción, el C_l es una interacción de cuatro cuerpos entre qubits que forman una plaqueta de la red. Además, en la ecuación anterior, C representa una intensidad de restricción, por ejemplo, una intensidad de restricción constante.

30 Como se ha descrito anteriormente, la codificación del modelo de espín de Ising en el Hamiltoniano del problema implica el mapeo de configuraciones de espines del modelo de espín de Ising en configuraciones de qubits en el sistema cuántico, en el que una configuración de qubits depende de la orientación relativa de los pares de espines en la correspondiente configuración de espines. Para que el mapeo sea coherente, se tienen en cuenta los aspectos relativos a los bucles cerrados en el modelo de espín de Ising, como se expone a continuación. En cada bucle cerrado de espines en el modelo de espín de Ising, el número de pares de espines que tienen una alineación
35 antiparalela es un número par. Por ejemplo, con referencia a la figura 9, consideremos por ejemplo el bucle cerrado formado por las conexiones 14, 24, 23 y 13, como se indica en las líneas discontinuas. El bucle cerrado incluye los espines 1, 2, 3 y 4. Cualquier configuración de los espines 1, 2, 3 y 4 incluye cero, dos o cuatro pares de espines antiparalelos. Ninguna configuración de los espines 1, 2, 3 y 4 tiene uno o tres pares de espines antiparalelos. Por consiguiente, cada configuración de los espines 1, 2, 3 y 4 tiene un número par de espines antiparalelos.

40 Puesto que los pares de espines antiparalelos están mapeados a qubits que están en el estado de base cuántica $|0\rangle$, cada conjunto de qubits en el sistema cuántico que corresponde a un bucle cerrado de espines en el modelo de espines de Ising tiene un número par de estados de base cuántica $|0\rangle$. Esto proporciona un conjunto de restricciones para al menos una porción de los qubits del sistema cuántico. Por ejemplo, para el bucle cerrado discutido anteriormente con referencia a la Fig. 9, el grupo correspondiente de cuatro qubits se muestra en la Fig.
45 11, indicado con los números de referencia 14, 24, 23 y 13 en vista de la correspondencia entre los pares de espines en el modelo de Ising y los qubits en el sistema cuántico. Como se muestra en la Fig. 11, los qubits 14, 24, 23 y 13 corresponden a una plaqueta de la red bidimensional 120. En vista de la limitación del bucle cerrado, como se ha descrito anteriormente, cualquier configuración de estados de base cuántica para los qubits 14, 24, 23 y 13 incluye cero, 2 o cuatro estados de base cuántica $|0\rangle$, como se ilustra en la Fig. 12.

50 Para asegurar que se satisfagan las restricciones correspondientes a todos los bucles cerrados, basta con hacer cumplir las restricciones asociadas a un subconjunto adecuado de bucles cerrados. De acuerdo con esta realización, los bloques de construcción particulares de bucles cerrados que implican grupos de como máximo cuatro espines son suficientes para asegurar que se satisfagan todas las restricciones, de modo que se proporcione un mapeo coherente desde el modelo de espines de Ising hasta el sistema cuántico. Los bloques de construcción incluyen
55 bucles cerrados que consisten en cuatro espines conectados por cuatro conexiones, en las que una conexión tiene

una distancia índice s , dos conexiones tienen una distancia índice $s + 1$ y una conexión tiene una distancia índice $s + 2$. En este caso, s va de 1 a $N - 2$ y la noción de "distancia índice" entre los espines s_i y s_j se refiere al número $|i - j|$. El conjunto de bucles cerrados con $s = 1$ proporciona $n - 2$ restricciones. Por ejemplo, el bucle cerrado que incluye las conexiones 14, 24, 23 y 13 entre los espines 1, 2, 3 y 4, como se muestra en la Fig. 9 y como se ha descrito anteriormente, es un bucle cerrado de bloque constructivo con $s = 1$.

Otro aspecto se refiere a los límites del sistema cuántico. Algunos bloques de construcción de bucles cerrados implican un grupo de tres espines conectadas con tres conexiones, en lugar de cuatro espines conectadas con cuatro conexiones. Por ejemplo, en referencia a la Fig. 9, el bucle cerrado que incluye las conexiones 12, 23 y 13 entre los espines 1, 2 y 3 puede considerarse a este respecto. El grupo correspondiente de qubits en el sistema cuántico incluye tres qubits 12, 23 y 13 dispuestos según la plaqueta de forma triangular de la red bidimensional. Para hacer cumplir la restricción correspondiente al bucle cerrado de tres espines, se puede considerar un Hamiltoniano de restricción de 3 cuerpos C_i que actúa sobre el grupo correspondiente de tres qubits. Alternativamente, una línea adicional de $n - 2$ qubits auxiliares fijados en el estado de base cuántica $|1\rangle$ puede ser incluida en el sistema cuántico, como se muestra en la Fig. 11 por los círculos con líneas discontinuas. Para hacer cumplir una restricción correspondiente a un bucle cerrado de tres espines, por ejemplo, el bucle cerrado correspondiente a los qubits 12, 23 y 13, se puede considerar un Hamiltoniano de restricción C_i que actúa en los tres qubits correspondientes y en uno de los qubits auxiliares, a saber, el qubit auxiliar 1101 que se muestra en la Fig. 11. Por consiguiente, el Hamiltoniano de restricción C_i es un Hamiltoniano de 4 cuerpos que actúa en una plaqueta de una red bidimensional ampliada, que tiene la misma forma que la descrita anteriormente. Esta última realización tiene la ventaja de que todos los Hamiltonianos de restricción pueden tratarse en pie de igualdad, ya que todos los Hamiltonianos de restricción son Hamiltonianos de 4 cuerpos que corresponden a plaquetas de una red bidimensional.

Los Hamiltonianos de restricción C_i aseguran que las restricciones correspondientes a los bucles cerrados del bloque de construcción, y por lo tanto las restricciones correspondientes a todos los bucles cerrados, sean satisfechas. En consecuencia, el Hamiltoniano de corto alcance proporciona un mapeo consistente desde las restricciones de los espines en el modelo de espines de Ising hasta las restricciones impuestas al sistema cuántico.

Para obtener la lectura, se puede medir una porción de los qubits, como por ejemplo la porción 425 que se muestra en la Fig. 11. Si el sistema cuántico está en el estado fundamental del Hamiltoniano final, los qubits de la porción 425 estarán en una configuración de estados fundamentales cuánticos correspondientes a una configuración de espines en el estado fundamental del modelo de espines de Ising. Si el sistema cuántico está en un estado térmico del Hamiltoniano final cercano al estado fundamental, es decir, a una temperatura suficientemente baja, esto es cierto con alta probabilidad. Por consiguiente, la medición de la porción 425 permite determinar una solución al problema del modelo de espín de Ising, al menos con una alta probabilidad. Si el sistema cuántico se encuentra en el estado final, como se describe en este documento, en el que el estado final está bien aproximado al estado fundamental del Hamiltoniano final, la medición de la porción 425 proporcionará por lo menos información sobre el estado fundamental del modelo de Ising, a partir de la cual se puede calcular una solución de prueba. Entonces se podrá comprobar mediante el cálculo clásico en tiempo de polinomios si la solución de prueba es una solución verdadera y, si no lo es, se podrá repetir el cálculo hasta que se encuentre una solución verdadera.

Como otra ventaja de las realizaciones descritas en el presente documento, dado que la información sobre el modelo de espín de Ising está codificada de manera redundante en el sistema cuántico, pueden medirse diversos grupos posibles de qubits para obtener una lectura a partir de la cual pueda determinarse una solución al problema de computación.

A la luz de lo anterior, la construcción del Hamiltoniano de corto alcance según esta realización es tal que (i) las restricciones cubren todas las interacciones entre los espines, (ii) el número de restricciones es $(n^2 - 3n)/2$ y (iii) el Hamiltoniano de corto alcance puede ser realizado en una simple geometría bidimensional con interacciones cuerpo d , donde $d = 4$, y donde las interacciones corresponden a plaquetas de la red bidimensional. Además, esta realización permite una implementación escalable, ya que añadir un espín en el modelo de espín de Ising equivale a añadir una línea de n espines al sistema cuántico.

La realización descrita con referencia a las Figs. 9-12 se refiere a un modelo de espín de Ising que implica interacciones entre pares entre n espines, en el que los coeficientes de campo son cero. Puede considerarse una codificación similar para un modelo de espín de Ising con coeficientes de campo distintos de cero. Se puede incluir un espín adicional s_{n+1} en el modelo Ising, en el que s_{n+1} se fija en el valor $+1$. Los coeficientes de campo no nulos pueden entonces reformularse como coeficientes de acoplamiento entre los n espines y el espín adicional s_{n+1} . El modelo de espín de Ising con coeficientes de campo no nulos se mapea así a un modelo de espín de Ising en el que los coeficientes de campo son cero. Así pues, puede aplicarse una asignación a un sistema cuántico de la manera descrita anteriormente. Añadir el espín adicional s_{n+1} implica incluir una línea adicional de n qubits al sistema cuántico.

Además, también se puede considerar una codificación para un modelo de espín de Ising que implica interacciones entre grupos de tres espines. En este caso, la función de energía de Ising puede tener la forma

$$H(s_1, s_2, \dots, s_n) = \sum_{ijk} c_{ijk} s_i s_j s_k$$

donde los coeficientes c_{ijk} representan interacciones de 3 cuerpos entre los espines s_i, s_j y s_k , y donde $i > j > k$. En las Figs. 13-16 se ilustra un mapeo de dicho modelo de 3 cuerpos de Ising en un sistema cuántico y una codificación del correspondiente problema del modelo de espín de Ising en un Hamiltoniano del problema del sistema cuántico. En esta realización, los qubits en el sistema cuántico corresponden a triples de espines en el modelo Ising de 3 cuerpos. En el modelo de Ising de 3 cuerpos, hay $R = n(n-1)(n-2)/6$ triples de espines. Por consiguiente, el número de qubits es R o más, en el que pueden incluirse qubits adicionales, por ejemplo qubits auxiliares y/o qubits auxiliares en analogía con el mapeo para el modelo de 2 cuerpos de Ising de espín descrito anteriormente. En esta realización, la pluralidad de qubits está dispuesta según una red cuadrada tridimensional de 1601 que se muestra en la Fig. 16. El Hamiltoniano del problema puede tener la forma $\sum_k J_k \sigma_z^{(k)}$, similar al caso del modelo de espín de Ising que implica como máximo interacciones de 2 cuerpos entre los espines. El Hamiltoniano de corto alcance puede tener la forma $\sum_i C_i$ en la que la restricción Hamiltonianos C_i corresponde a plaquetas de la red cuadrada tridimensional. El número de Hamiltonianos de restricción puede ser $2(R - n)$. Consideraciones similares relativas a los límites del sistema cuántico, que implican los Hamiltonianos de restricción de 3 cuerpos y/o la inclusión de qubits auxiliares y/o qubits auxiliares, se aplican también a esta realización.

Una ventaja adicional de las realizaciones descritas en la presente memoria es la prevención y/o corrección de errores en el sistema cuántico. Por ejemplo, para un sistema cuántico pequeño con 4 qubits, los errores estáticos se reducen o incluso desaparecen si C es mayor que $(n - 2)$ máx. ($|c_{ij}|$) con n representando el número de espines en el modelo de espines de Ising. Además, el número de qubits N en el sistema cuántico es mayor que el número de espines en el modelo de espín de Ising, por ejemplo, N ser $n(n-1)/2$ o más. Por consiguiente, la información relativa al modelo de espín de Ising está codificada en el sistema cuántico de manera redundante. Esta redundancia permite implementar una medición que corrige los errores con una menor sensibilidad a los errores de la decoherencia. La medición de múltiples combinaciones posibles de qubits permite detectar y corregir la decoherencia en el sistema cuántico, de forma similar a los esquemas de corrección de errores en la memoria cuántica topológica. En la figura 17 se ilustran las ventajas de las realizaciones descritas en la presente memoria en relación con la prevención y/o corrección de errores en el sistema cuántico. En la Fig. 17, el eje 1701 se refiere al número de espines n . El eje 1702 se refiere a la escalada de errores. Además, las curvas 1710, 1720 y 1730 muestran el comportamiento del error, la pérdida de información y el número de espines, respectivamente. En el inserto, el eje 1703 se refiere al número de lecturas.

Según otro ejemplo útil para comprender la invención, se proporciona una unidad de procesamiento cuántico (QPU). La unidad de procesamiento cuántico está adaptada para servir como unidad central de procesamiento en aparatos para soluciones informáticas a problemas computacionales. La unidad de procesamiento cuántico [QPU] incluye un sistema cuántico, como se describe en el presente documento. El sistema cuántico [QS] incluye una pluralidad de qubits, como se describe en la presente memoria. La unidad de procesamiento cuántico está adaptada para realizar los procedimientos de acuerdo con las realizaciones descritas en el presente documento.

La unidad de procesamiento cuántico puede adaptarse para encarnar un Hamiltoniano inicial H^{init} en un tiempo inicial $t=t_0$. La unidad de procesamiento cuántico puede ser adaptada para implementar un Hamiltoniano final H^{final} en un tiempo final $t=t_{fin}$. En este caso, la expresión "que implementa un Hamiltoniano" significa que los estados cuánticos del sistema cuántico [QS] que son pertinentes para la funcionalidad de cálculo cuántico de la invención están determinados principalmente por el Hamiltoniano respectivo de acuerdo con el marco de la física cuántica, es decir, las propiedades de cálculo cuántico del sistema cuántico [QS] están suficientemente determinadas por dichos Hamiltonianos y los términos adicionales concebibles en el Hamiltoniano factual del sistema cuántico [QS] son insignificantes en lo que respecta al principio funcional de la invención.

El Hamiltoniano final H^{final} puede ser la suma de un Hamiltoniano del problema H^{prob} y un Hamiltoniano de corto alcance H^{SR} , es decir, $H^{final} = H^{prob} + H^{SR}$. En este caso, el Hamiltoniano del problema H^{prob} puede ser un Hamiltoniano de un solo cuerpo que comprende (es decir, es una función de) una pluralidad de parámetros ajustables J_k . Los parámetros ajustables J_k pueden ser individualmente ajustables de manera apropiada para codificar el problema computacional.

El Hamiltoniano de corto alcance H^{SR} es un Hamiltoniano de cuerpo d , con d igual o mayor que 2, y donde d es independiente del problema computacional. En este caso, el término "Hamiltoniano de corto alcance" se refiere a un Hamiltoniano que representa las interacciones de la pluralidad de qubits, en el que no se producen interacciones entre qubits que están distanciados entre sí por una distancia mayor que una distancia de corte de interacción L_{cut} . El término "Hamiltoniano de cuerpo d " se refiere a un Hamiltoniano que representa las interacciones de la pluralidad de qubits, en el que no se producen interacciones conjuntas entre grupos que comprenden $d+1$ o más qubits.

La unidad de procesamiento cuántico [QPU] puede adaptarse para medir el estado cuántico de al menos una porción de la pluralidad de los qubits del sistema cuántico [QS] después del tiempo de $t=t_{fin}$.

La unidad de procesamiento cuántico [QPU] puede adaptarse para que incorpore un Hamiltoniano de interpolación $H(t)$ de la forma $H(t) = A(t)H^0 + B(t)H^{prob} + C(t)H^{SR}$, donde $A(t)$, $B(t)$ y $C(t)$ son coeficientes de interpolación dependiendo del parámetro de tiempo t , donde H^0 es un Hamiltoniano de inicialización que es apropiado para

inicializar el sistema cuántico para el proceso de cálculo deseado. En este caso $A(t)$, $B(t)$ y $C(t)$ cumplen las condiciones $A(t_0)=1$, $A(t_{fin})=0$, $B(t_0)=0$, $B(t_{fin})=1$, $C(t_{fin})=1$, de manera que $H(t_0) = H^{init} = H^0 + C(t_0) \cdot H^{SR}$ y $H(t_{fin}) = H^{fin} = H^{prob} + H^{SR}$, y en el que $C(t_0)$ es arbitrario y también puede ser 0 o 1.

5 Los qubits de la pluralidad de qubits pueden estar dispuestos según una red bidimensional o según una red tridimensional.

Los qubits de la pluralidad de qubits pueden estar situados en las esquinas de las plaquetas de la red respectiva, donde el término "plaqueta" puede referirse a las retículas de la red respectiva.

10 El Hamiltoniano del problema puede tener la forma $H^{prob} = \sum_k [J_k - \sigma_z^{(k)}]$, donde $\sigma_z^{(k)}$ puede ser un operador de Pauli asociado a una primera dirección espacial $\mathbf{z}(\mathbf{r}_k)$, dicho operador de Pauli $\sigma_z^{(k)}$ actuando en un k-ésimo qubit de la pluralidad de qubits, y donde \mathbf{z} puede referirse al vector de dirección de dicha primera dirección espacial y donde \mathbf{r}_k denota el vector de posición del k-ésimo qubit.

15 El Hamiltoniano de iniciación H^0 puede tener una forma que sea apropiada para inicializar el sistema cuántico para el proceso computacional deseado y que preferiblemente sea fácil de implementar. Por ejemplo, el Hamiltoniano inicializador puede tener la forma $H^0 = h \sum_k [\sigma_x^{(k)}]$, donde h es un coeficiente, donde $\sigma_x^{(k)}$ es un operador de Pauli asociado a una segunda dirección espacial $\mathbf{x}(\mathbf{r}_k)$, dicho operador de Pauli $\sigma_x^{(k)}$ actuando sobre un k-ésimo qubit de la pluralidad de qubits, y donde \mathbf{x} es denota el vector de dirección de dicha segunda dirección espacial y donde \mathbf{r}_k denota el vector de posición del k-ésimo qubit, donde $\mathbf{z}(\mathbf{r}_k)$ y $\mathbf{x}(\mathbf{r}_k)$ son preferentemente mutuamente ortogonales y donde los operadores de Pauli $\sigma_z^{(k)}$ y $\sigma_x^{(k)}$ son preferentemente operadores no conmutación, en particular anti-conmutación.

20 El Hamiltoniano de corto alcance H^{SR} puede ser un Hamiltoniano de plaquetas H^P que puede tener la forma $H^{SR} = H^P := \sum_l [C_l(\sigma_z^{(l,1)}, \dots, \sigma_z^{(l,m)}, \dots, \sigma_z^{(l,M[l])})]$, donde l denota el número de la *l-ésima plaqueta*, $(l,1)$ denota el qubit situado en la primera esquina de la *l-ésima plaqueta*, (l,m) denota el qubit situado en la *m-ésima esquina de la l-ésima plaqueta* y $(l,M[l])$ denota el qubit situado en la última (i.e. la esquina $M[l]$ -th) de la *l-ésima plaqueta*, donde $\sigma_z^{(l,m)}$ denota el operador de Pauli del respectivo qubit y donde el respectivo $M[l]$ -cuerpo-sumando $C_l(\sigma_z^{(l,1)}, \dots, \sigma_z^{(l,m)}, \dots, \sigma_z^{(l,M[l])})$ denota la contribución de la *l-ésima plaqueta* al Hamiltoniano de plaquetas H^P .

25 El Hamiltoniano de corto alcance H^{SR} puede implementarse de manera que sólo los grupos de qubits que forman una plaqueta de los sumandos que contribuyan a la red qubit respectiva $H^{SR}=H^P$, y que, por ejemplo, para una red de qubits que consiste sólo en plaquetas triangulares, $H^{SR}=H^P$ es un Hamiltoniano de cuerpo d , con $d=M=3$, y para una red de qubits que consiste en plaquetas triangulares y cuadrangulares, H^P es un Hamiltoniano que comprende sumandos de 3 y 4 cuerpos, y por lo tanto es un Hamiltoniano de 4 cuerpos.

La unidad de procesamiento cuántico [QPU] puede incluir qubits y/o qutrits adicionales y/o sistemas cuánticos de nivel q y/o otros componentes y dispositivos adaptados para la aplicación de las características deseadas del sistema cuántico, en particular las características deseadas del Hamiltoniano de corto alcance H^{SR} y del Hamiltoniano de plaqueta respectivamente.

35 La red según la cual se disponen los qubits puede ser una red bidimensional sustancialmente plana o una red tridimensional compuesta por subredes bidimensionales sustancialmente planas, que son sustancialmente paralelas entre sí y que están apiladas con respecto a la tercera dimensión.

Los qubits pueden estar dispuestos en una porción de forma sustancialmente triangular de una red bidimensional, respectivamente en una porción de forma básicamente triangular de cada subred de 2 dimensiones.

40 La pluralidad de plaquetas formada por la respectiva disposición de los qubits puede estar compuesta por un conjunto (mayoritario) de plaquetas cuadrangulares y por un conjunto (minoritario) de plaquetas triangulares. Alternativa o adicionalmente, la pluralidad de plaquetas formadas por la respectiva disposición de qubits puede estar compuesta sólo por plaquetas cuadrangulares, por ejemplo, añadiendo qubits adicionales al sistema cuántico que completan todas las plaquetas a las cuadrangulares.

45 Los sumandos C_l del Hamiltoniano de plaquetas $H^P = \sum_l [C_l]$ pueden ser de una de las dos formas:

i).
$$C_l = -c_l \left(\sum_{m=1}^{M(l)} \left(\sigma_z^{(l,m)} \right)^2 + S_z^l \right),$$

ii).
$$C_l = -c_l \sigma_z^{(l,1)} \sigma_z^{(l,2)} \sigma_z^{(l,3)} \sigma_z^{(l,4)}$$
 para las plaquetas cuadrangulares y

$$C_l = -c_l \sigma_z^{(l,1)} \sigma_z^{(l,2)} \sigma_z^{(l,3)}$$
 para las plaquetas triangulares,

en las que c_l es un coeficiente y S_z^l es el operador de Pauli de un qutrit ancilla.

5 La disposición espacial de los qubits del sistema cuántico, y/o la asignación de los coeficientes J_k del Hamiltoniano del problema H^{prob} a las coordenadas espaciales de los qubits del sistema cuántico y/o la aplicación del Hamiltoniano de corto alcance y/o la ventajosa determinación de la porción de qubits que se miden para proporcionar una lectura pueden ejecutarse de conformidad con un mapeo de un modelo conocido de interacción cuántica de dos cuerpos o de un modelo conocido de interacción cuántica de tres cuerpos (e. por ejemplo, un modelo de espín de Ising de dos o tres cuerpos) al sistema cuántico [QS], en particular de acuerdo con las restricciones (por ejemplo, las restricciones de bucle cerrado) deducibles de dicho mapeo.

10 La unidad de procesamiento cuántico puede ser adaptada para enfriar el sistema cuántico [QS] hacia el estado fundamental de $H^{\text{init}} := H(t_0)$.

La unidad de procesamiento cuántico puede ser adaptada para enfriar el sistema cuántico [QS] hacia el estado fundamental de $H_{\text{fin}} := H(t_{\text{fin}})$.

La unidad de procesamiento cuántico puede ser adaptada para enfriar el sistema cuántico [QS] hacia el estado fundamental de $H(t)$ en uno o todos los tiempos entre $t=t_0$ y $t=t_{\text{fin}}$.

15 La unidad de procesamiento cuántico puede adaptarse para hacer evolucionar gradualmente la Hamilton de interpolación $H(t)$ de H^{init} a H^{fin} , en particular ejecutando dicha evolución según un protocolo de recocido cuántico adiabático.

La unidad de procesamiento cuántico puede incluir una pluralidad de qubits superconductores dispuestos según una red bidimensional.

20 La unidad de procesamiento cuántico puede incluir un ensamblaje de polarización de flujo magnético que incluye una pluralidad de unidades de polarización de flujo magnético configuradas para generar una pluralidad de flujos magnéticos ajustables, en la que cada flujo magnético ajustable actúa en un solo qubit superconductor en la pluralidad de qubits superconductores.

25 La unidad de procesamiento cuántico puede incluir una unidad de acoplamiento que incluya al menos un dispositivo de interferencia cuántica superconductor configurado para acoplar la pluralidad de qubits superconductores de acuerdo con una Hamiltoniano de plaquetas H^P .

La unidad de procesamiento cuántico puede incluir un controlador conectado a la unidad de polarización de flujo magnético y a la unidad de acoplamiento.

30 El controlador puede ser configurado para recibir una configuración de codificación del problema para una pluralidad de parámetros ajustables de un Hamiltoniano del problema H^P del sistema cuántico, donde el Hamiltoniano del problema es un Hamiltoniano de un solo cuerpo, y donde la configuración de codificación del problema codifica un problema computacional, como se describe en la presente memoria.

35 El controlador puede ser configurado para controlar el conjunto de polarización de flujo magnético y la unidad de acoplamiento para evolucionar un Hamiltoniano inicial H^{init} del sistema cuántico en un Hamiltoniano final H^{fin} del sistema cuántico por recocido cuántico, donde el Hamiltoniano final H^{fin} es la suma del Hamiltoniano de plaquetas H^P y el Hamiltoniano problema H^{prob} , donde la pluralidad de parámetros ajustables J_k del Hamiltoniano problema H^{prob} están en la configuración de codificación del problema.

Según unas realizaciones, el aparato descrito en la presente memoria está adaptado para realizar los procedimientos según realizaciones descritas en la presente memoria.

40 Según otros ejemplos útiles para comprender la invención, se proporciona un dispositivo de procesamiento cuántico. El dispositivo de procesamiento cuántico puede ser configurado para computar soluciones a problemas computacionales, como los descritos en el presente documento. El dispositivo de procesamiento cuántico incluye una unidad de procesamiento cuántico (QPU). La unidad de procesamiento cuántico incluye plaquetas de qubits. Las plaquetas pueden ser las células elementales de una red bidimensional o tridimensional. Las plaquetas pueden incluir como máximo cuatro o como máximo tres qubits. La unidad de procesamiento cuántico puede incluir plaquetas de qubits y una o más qubits ancilla, por ejemplo, un qubit ancilla preparada en un estado cuántico específico. Los qubits, o qubits y qubit(s) ancilla, según el caso, pueden estar dispuestos en las esquinas de las plaquetas. El dispositivo de procesamiento cuántico puede incluir sistemas auxiliares de nivel q , por ejemplo, qutrits auxiliares, dispuestos dentro de algunas o todas las plaquetas. Los sistemas auxiliares de nivel q pueden mediar interacciones entre los qubits, o qubits y qubit(s) ancilla, de una plaqueta. Las plaquetas pueden estar dispuestas para formar una red cuadrada o una parte de ella. Concretamente, las plaquetas pueden disponerse para formar una porción triangular de la red cuadrada.

45

50

La unidad de procesamiento cuántico puede incluir además un primer dispositivo que incluya unidades que interactúen con qubits simples o qubits ancilla, y un segundo dispositivo que incluya unidades que interactúen con los qubits de una plaqueta, o qubits y qubit(s) ancilla de una plaqueta. El primer dispositivo puede estar configurado para implementar un Hamiltoniano de un solo cuerpo en los qubits de las plaquetas, o qubits y qubit(s) ancilla de las plaquetas. El segundo dispositivo puede ser configurado para implementar un Hamiltoniano de plaqueta en los qubits de las plaquetas, o qubits y qubit(s) ancilla de las plaquetas.

Según algunas realizaciones, los qubits son qubits superconductores. Lo(s) qubit(s) ancilla, si está(n) presente(s), también puede(n) ser qubits superconductores. Las plaquetas están dispuestas para formar una red cuadrada bidimensional o una porción de la misma, en particular una porción triangular de la misma. La unidad de procesamiento cuántico incluye un conjunto de polarización de flujo magnético que comprende una pluralidad de unidades de polarización de flujo magnético configuradas para generar una pluralidad de flujos magnéticos ajustables, en la que cada flujo magnético ajustable actúa en un solo qubit superconductor de una plaqueta. El conjunto de polarización del flujo magnético puede configurarse para implementar un Hamiltoniano de un solo cuerpo en los qubits superconductores, o qubits superconductores y qubits ancilla superconductores, de las plaquetas de la red bidimensional o tridimensional. La unidad de procesamiento cuántico incluye dispositivos de interferencia cuántica superconductores, en los que cada dispositivo de interferencia cuántica acopla los qubits superconductores de una plaqueta, o los qubits superconductores y los qubits ancilla superconductores de una plaqueta. Un dispositivo de interferencia cuántica puede permitir una interacción controlada de los bits superconductores de una plaqueta, o de los bits superconductores y el/los qubit(s) ancilla superconductor(es) de una plaqueta. Los dispositivos de interferencia cuántica pueden ser componentes de una unidad de acoplamiento cuántico configurada para implementar un Hamiltoniano de plaquetas en las plaquetas de la red bidimensional o tridimensional.

La unidad de procesamiento cuántico (QPU) puede estar configurada para realizar los procedimientos de computación de una solución a problemas de computación como se describe en este documento. El dispositivo de procesamiento cuántico puede incluir además componentes como una unidad de refrigeración, un dispositivo informático clásico y un controlador, como se describe en este documento. Por ejemplo, el controlador puede estar conectado a la unidad de polarización de flujo magnético y a la unidad de acoplamiento y puede estar configurado para: i) recibir una configuración de codificación del problema para una pluralidad de parámetros ajustables de un Hamiltoniano del problema del sistema cuántico, en el que el Hamiltoniano del problema es un Hamiltoniano de un solo cuerpo, y en el que la configuración de codificación del problema codifica un problema computacional; y ii) el control del conjunto de polarización del flujo magnético y la unidad de acoplamiento para hacer evolucionar un Hamiltoniano inicial del sistema cuántico en un Hamiltoniano final del sistema cuántico por recocido cuántico, en el que el Hamiltoniano final es la suma del Hamiltoniano de plaquetas y el Hamiltoniano problema, en el que la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano problema están en la configuración de codificación del problema.

Las realizaciones descritas en la presente memoria no sólo pueden realizarse con qubits (es decir, bits cuánticos de 2 niveles), sino también con qutrits o sistemas cuánticos de nivel q , con q arbitraria. Las diferentes formas en las que se puede realizar el sistema cuántico, usando qubits superconductores, iones atrapados, puntos cuánticos y centros NV se podrán extender a sistemas de nivel q , en particular sistemas qutrit, al considerar más de dos estados. La manipulación y la lectura de los sistemas de nivel q y las interacciones entre ellos pueden realizarse mediante extensiones de las realizaciones descritas anteriormente.

Si bien lo anterior se refiere a algunas realizaciones de la invención, se pueden concebir otras y realizaciones adicionales sin desviarse del alcance determinado por las reivindicaciones dadas a continuación.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de cálculo de una solución a un problema computacional (452) utilizando un sistema cuántico (420) que comprende una pluralidad de qubits (100), el procedimiento comprende:
 - 5 codificar el problema computacional en un Hamiltoniano del problema (472) del sistema cuántico, en el que el Hamiltoniano del problema es un Hamiltoniano de un solo cuerpo que comprende una pluralidad de parámetros ajustables, en el que la pluralidad de parámetros ajustables comprende una pluralidad de intensidades de campo y/o una pluralidad de direcciones de campo de campos de un solo cuerpo que actúan sobre la pluralidad de qubits, y en el que la codificación comprende la determinación, a partir del problema computacional, de una configuración de codificación del problema para la pluralidad de parámetros ajustables;
 - 10 evolucionar el sistema cuántico desde un estado cuántico inicial hacia un estado fundamental de un Hamiltoniano final (470) del sistema cuántico, en el que el Hamiltoniano final es la suma del Hamiltoniano del problema y un Hamiltoniano de corto alcance (474), en el que la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema están en la configuración de codificación del problema, en el que el Hamiltoniano de corto alcance es un Hamiltoniano que representa las interacciones de una pluralidad de qubits, en el que no se producen interacciones entre qubits que están distanciados entre sí por una distancia mayor que una distancia de corte de interacción, y
 - 15 en el que el Hamiltoniano de corto alcance es un Hamiltoniano de cuerpo d y d es independiente del problema computacional, en el que d es 2, 3, 4, 5, 6, 7 u 8;
 - 20 medir al menos una porción (425) de la pluralidad de qubits para obtener una lectura del sistema cuántico; y determinar una solución al problema computacional a partir de la lectura.
2. El procedimiento de la reivindicación 1, en el que la evolución del sistema cuántico desde el estado cuántico inicial hacia el estado fundamental del Hamiltoniano final comprende el paso de un Hamiltoniano inicial del sistema cuántico al Hamiltoniano final mediante un recocido cuántico.
- 25 3. El procedimiento de la reivindicación 2, que comprende además la inicialización del sistema cuántico en el estado cuántico inicial enfriando el sistema cuántico hacia un estado fundamental del Hamiltoniano inicial.
4. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que realizar el recocido cuántico del Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final, comprende la evolución adiabática del Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final.
- 30 5. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el Hamiltoniano de corto alcance es un Hamiltoniano de cuerpo d , en el que $d = 4$.
6. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el Hamiltoniano de corto alcance es independiente del problema computacional.
- 35 7. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la pluralidad de qubits se ordena según una red bidimensional (120) o según una red tridimensional (1601).
8. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la pluralidad de qubits se ordena según una red bidimensional (120) y en el que el Hamiltoniano de corto alcance implica interacciones entre grupos de cuatro qubits (371, 372, 373, 374) correspondientes a plaquetas (370) de la red bidimensional.
- 40 9. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el problema computacional es un problema NP complejo.
10. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el Hamiltoniano del problema tiene la forma $\sum_k J_k \sigma_z^{(k)}$, en la que $\sigma_z^{(k)}$ es un operador de Pauli de un k -ésimo qubit de la pluralidad de qubits, en la que cada J_k es un coeficiente, y en el que los coeficientes J_k forman la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema.
- 45 11. El procedimiento de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que determinar la configuración de codificación del problema comprende:
 - 50 mapear el problema computacional en un problema computacional auxiliar, en el que el problema computacional auxiliar comprende la determinación del estado fundamental de un modelo de espín de largo alcance, en particular un modelo de espín de largo alcance con interacciones de m cuerpos, en el que m es 1, 2 ó 3; y
 - determinar la configuración de codificación del problema a partir del modelo de espín de largo alcance.

12. El procedimiento de la reivindicación 11, que comprende además: la determinación del Hamiltoniano de corto alcance a partir de una pluralidad de bucles cerrados de los espines en el modelo de espines de largo alcance.
13. Aparato para calcular soluciones a problemas computacionales, que comprende:
- un sistema cuántico (420) que comprende una pluralidad de qubits (100);
 - 5 una unidad de refrigeración (410) adaptada para enfriar el sistema cuántico hacia un estado fundamental del sistema cuántico;
 - una unidad de recocido cuántico programable (430) adaptada para evolucionar, mediante el recocido cuántico, un Hamiltoniano inicial del sistema cuántico en un Hamiltoniano final (470) del sistema cuántico, en el que el Hamiltoniano final es la suma de un Hamiltoniano del problema (472) y un Hamiltoniano de corto alcance (474), en el que el Hamiltoniano del problema es un Hamiltoniano de un solo cuerpo que comprende una pluralidad de parámetros ajustables, en el que la pluralidad de parámetros ajustables comprende una pluralidad de intensidades de campo y/o una pluralidad de direcciones de campo de campos de un solo cuerpo que actúan sobre la pluralidad de qubits, en el que el Hamiltoniano de corto alcance es un Hamiltoniano que representa las interacciones de una pluralidad de qubits, en el que no se producen interacciones entre qubits que están distanciados entre sí por una distancia superior a una distancia de corte de interacción, y
 - 10 en el que el Hamiltoniano de corto alcance es un Hamiltoniano de cuerpo d y d es independiente del problema computacional, en el que d es 2, 3, 4, 5, 6, 7 u 8;
 - un dispositivo de medición (440) adaptado para medir al menos una porción (425) de la pluralidad de qubits; y
 - 20 un sistema de computación clásico (450) conectado a la unidad programable de recocido cuántico y al dispositivo de medición, en el que el sistema de computación clásico está configurado para:
 - recibir, como entrada, un problema computacional (452);
 - codificar el problema computacional en el Hamiltoniano del problema, en el que la codificación comprende la determinación, a partir del problema computacional, de una configuración de codificación del problema para la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema; y
 - comunicar la configuración de codificación del problema a la unidad de recocido cuántico;
 - en el que la unidad de recocido cuántico programable está configurada para:
 - recibir la configuración de codificación del problema del sistema de computación clásico; y
 - 30 evolucionar, por medio del recocido cuántico, del Hamiltoniano inicial al Hamiltoniano final, en el que la pluralidad de parámetros ajustables del Hamiltoniano del problema está en la configuración de codificación del problema; y
 - en el que el sistema de computación clásico está adicionalmente configurado para
 - recibir una lectura del sistema cuántico del dispositivo de medición; y
 - 35 determinar una solución al problema computacional a partir de la lectura.

Fig. 1

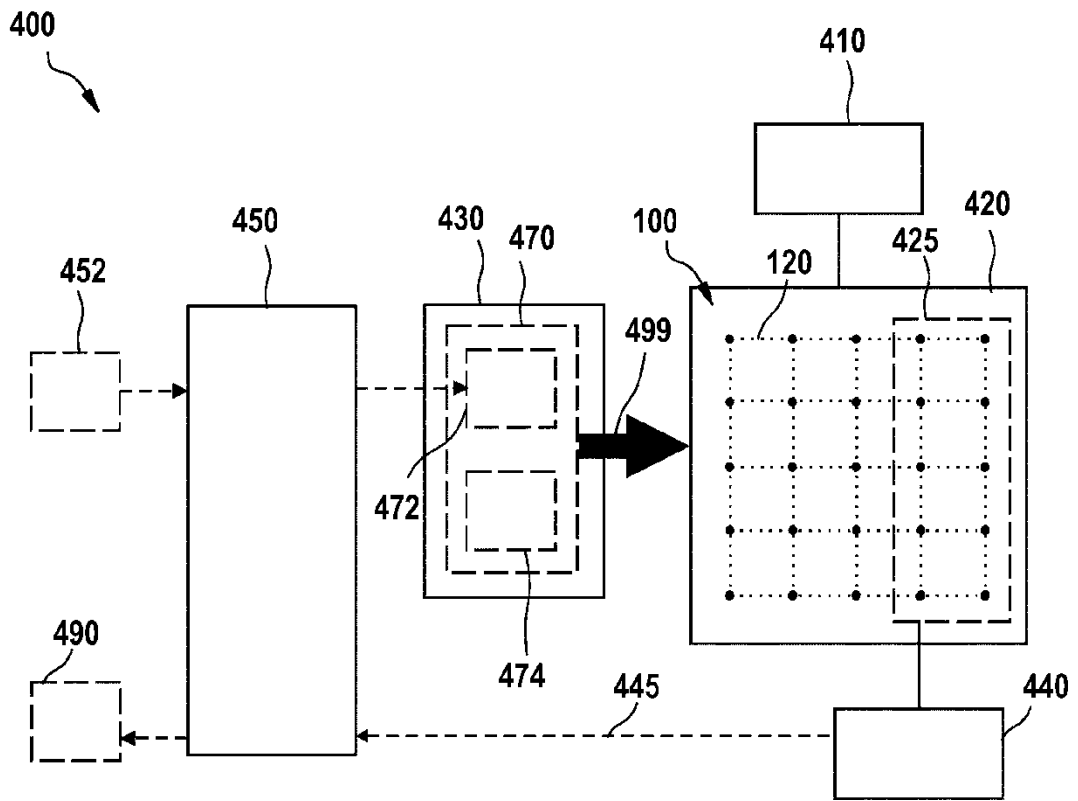


Fig. 2

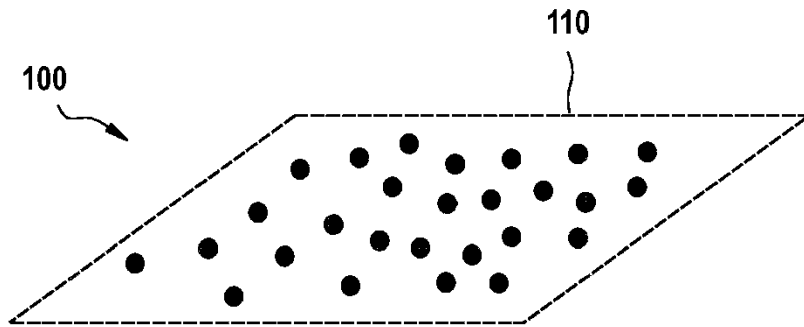


Fig. 3

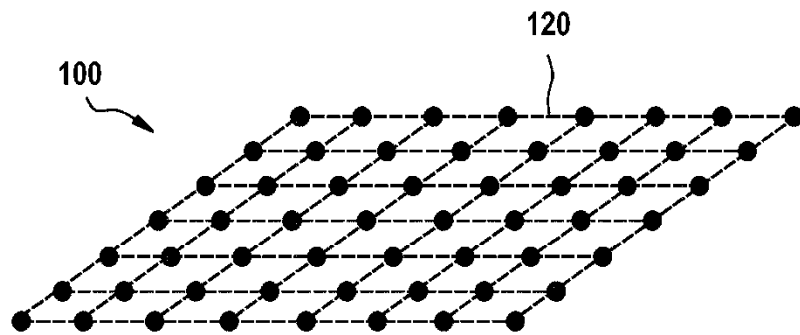


Fig. 4

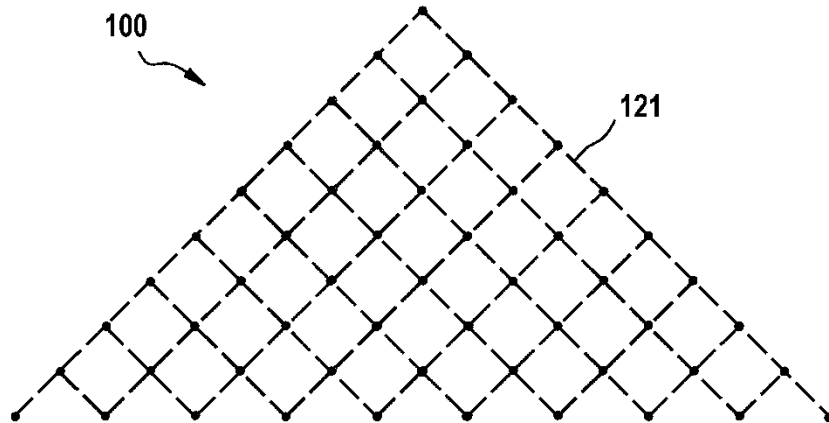


Fig. 5

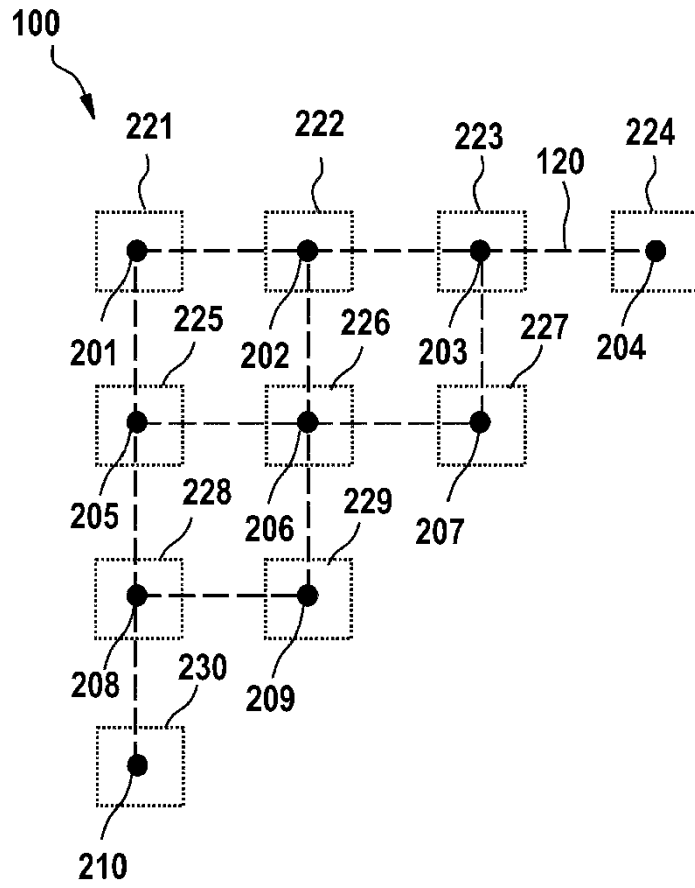


Fig. 6

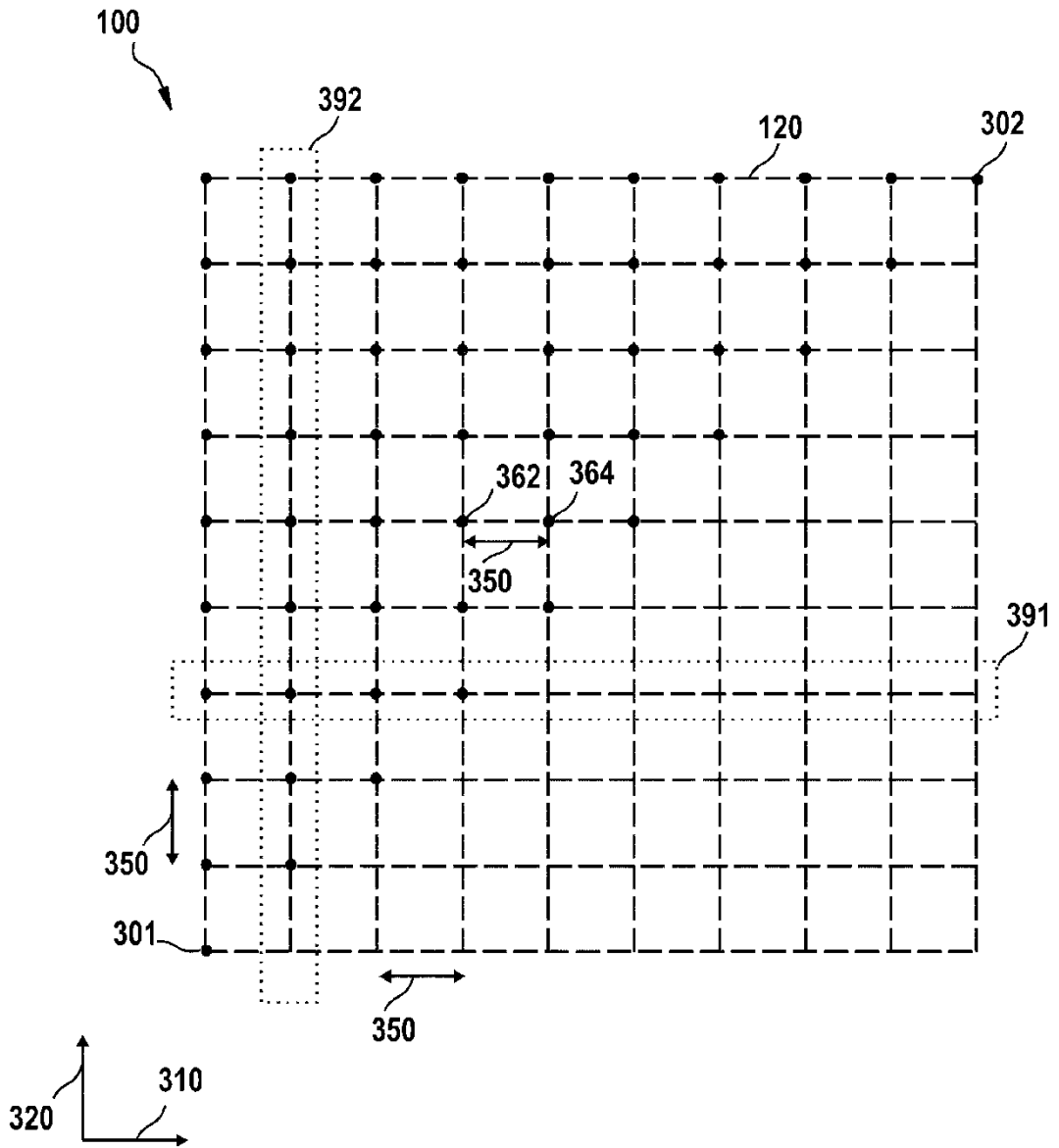


Fig. 7

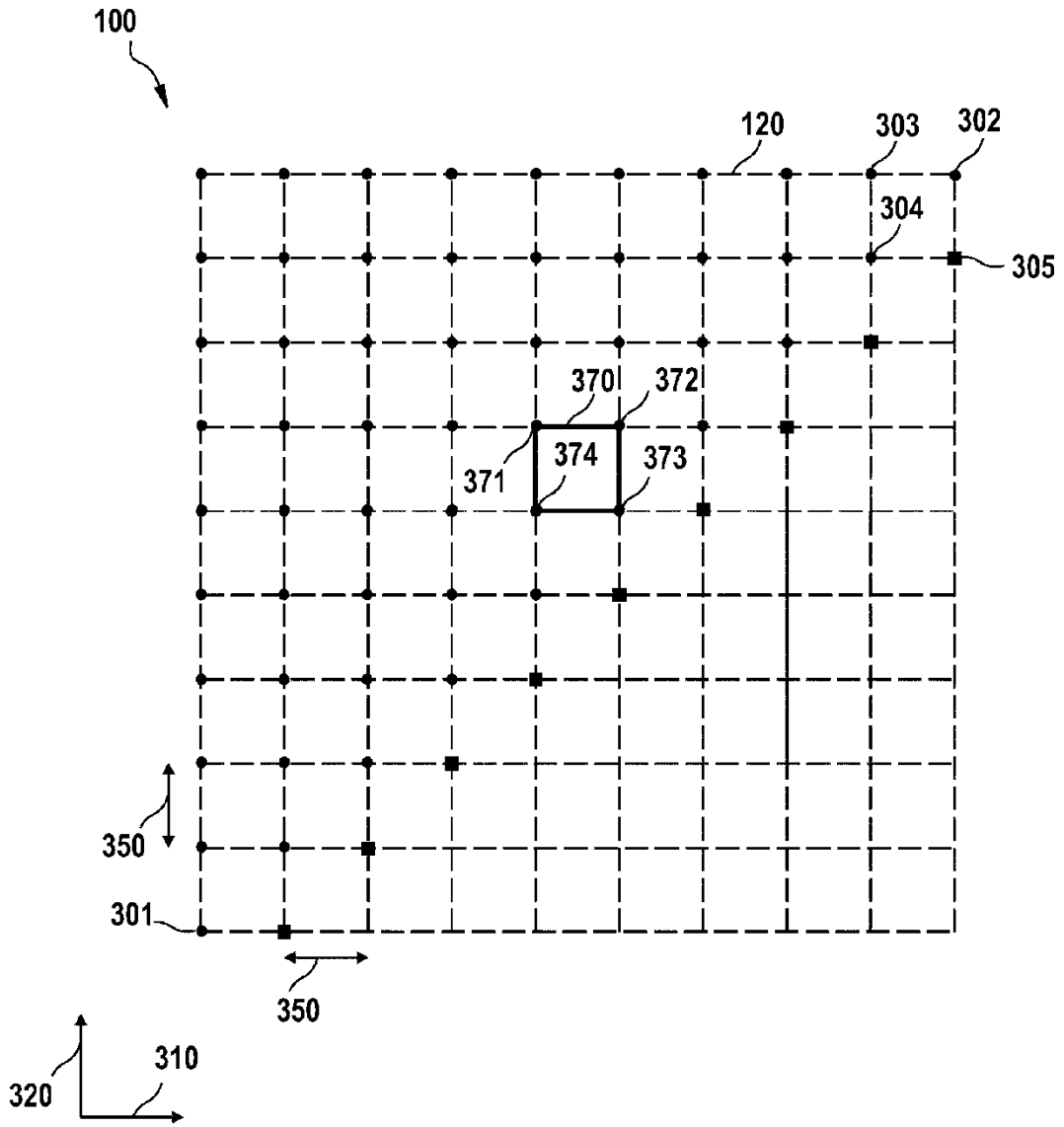


Fig. 8

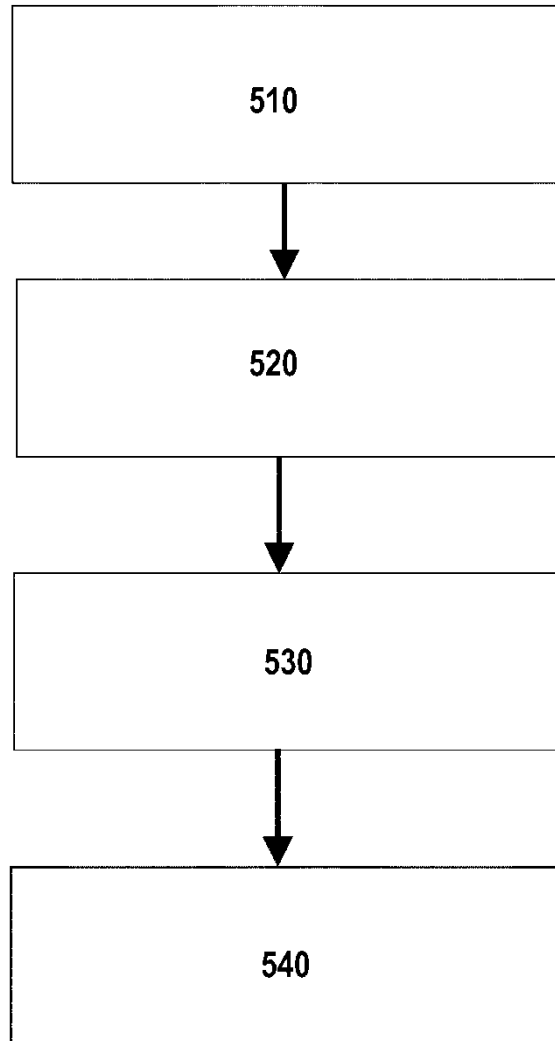


Fig. 9

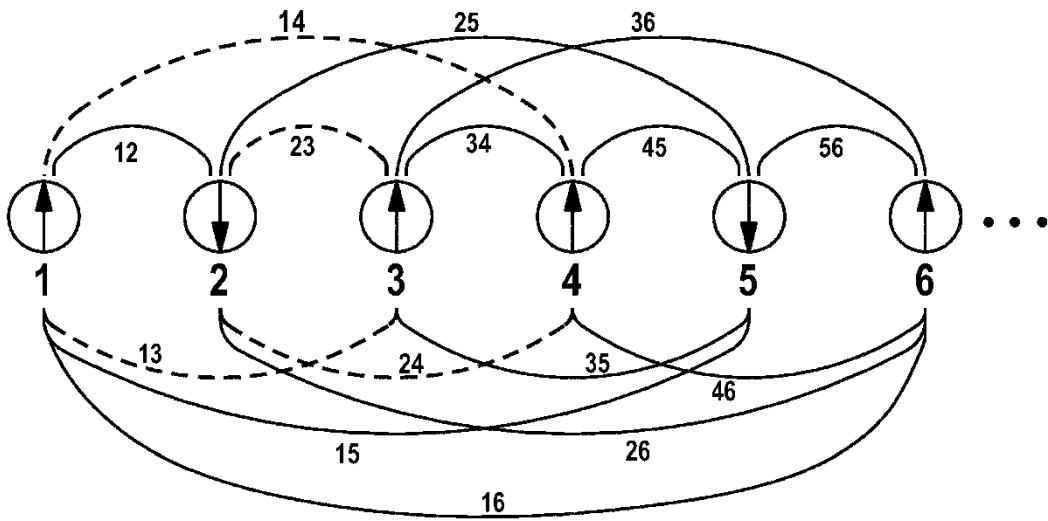


Fig. 10

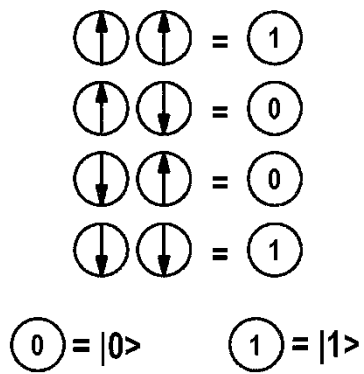


Fig. 11

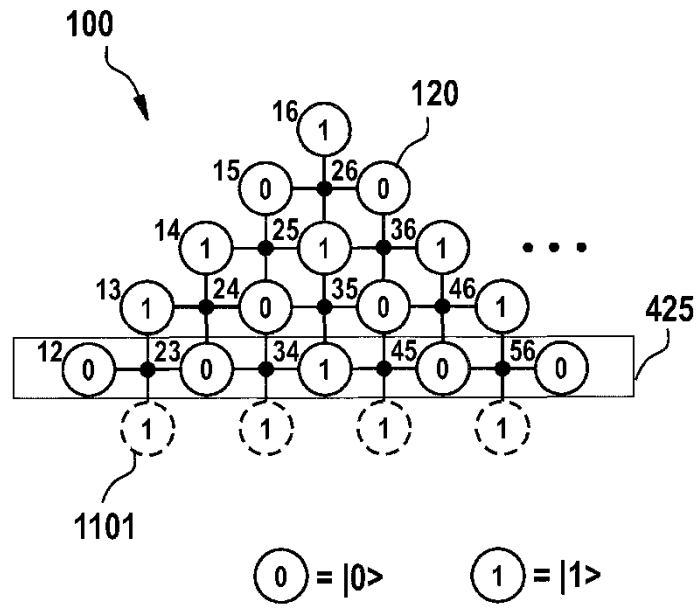


Fig. 12

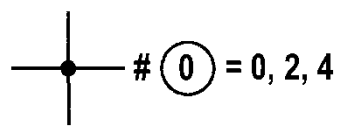


Fig. 13

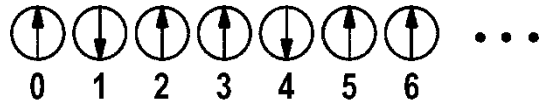


Fig. 14

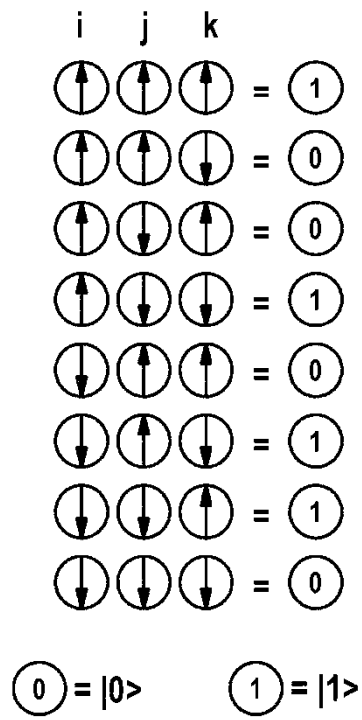


Fig. 15

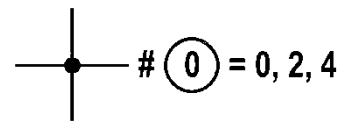


Fig. 16

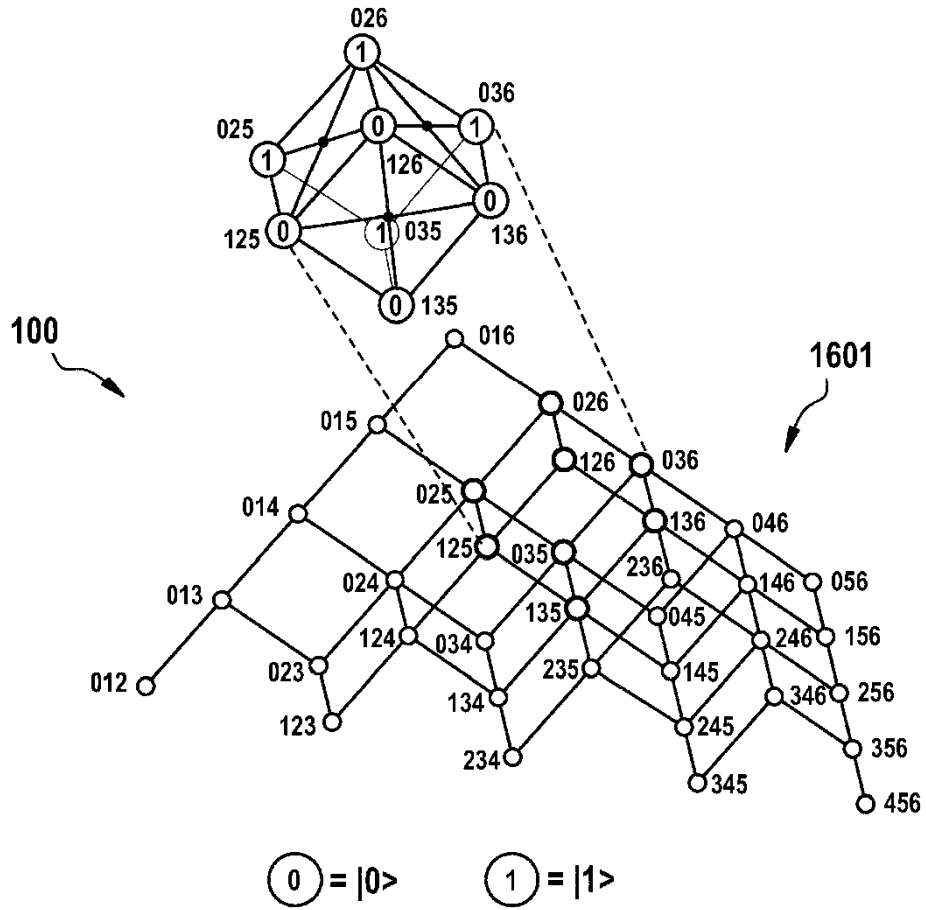


Fig. 17

