

Teleportación cuántica: un viaje cuántico sin mover ni un átomo

Introducción

En el mundo clásico, para enviar información sobre un objeto basta con medirlo, transmitir la información y reconstruirlo en el destino. Por ejemplo, si queremos copiar un dibujo, lo escaneamos, enviamos la imagen y la imprimimos en otro lugar. Sin embargo, en el mundo cuántico existe un obstáculo fundamental: el *teorema de no clonación* impide copiar un estado cuántico desconocido sin destruir el original, es decir, no podemos copiar un dibujo sin destruir el original. Entonces, ¿cómo podemos transferir la información cuántica de un lugar a otro? La respuesta es la teleportación cuántica: un protocolo que aprovecha el entrelazamiento y la comunicación clásica para trasladar un cúbit de un punto a otro sin que el cúbit original sobreviva al proceso. Para ello, el protocolo combina diferentes ingredientes:

- Superposición de estados: Mientras que un bit “clásico” sólo puede valer 0 ó 1, un cúbit puede tener cierta probabilidad de valer 0 ó 1, a eso lo llamamos superposición.
- Entrelazamiento cuántico: un vínculo tan fuerte entre dos partículas que su estado individual solo tiene sentido en conjunto, sin importar la distancia que las separe.
- Comunicación clásica (2 bits): los únicos “pasos” que requieren transmitir datos a velocidad convencional, garantizando que no se viola la relatividad.

Un poco de historia

La teleportación cuántica fue propuesta en 1993 por Charles Bennett, Gilles Brassard, Claude Crépeau, Richard Jozsa, Asher Peres y William Wootters. Entre ellos se encuentran figuras clave en el desarrollo de la información cuántica. Por ejemplo, Wootters, junto con Wojciech Zurek, demostró en 1982 el teorema de no clonación; el famoso protocolo BB84 debe su nombre a sus autores, Bennett y Brassard, y al año de su publicación, 1984. Se trata del primer protocolo de intercambio de claves basado en el uso de cúbits y medidas en distintas bases (aunque no emplea el concepto de entrelazamiento). Wootters también acuñó el término cúbit en una conversación con el físico Ben Schumacher en 1992. Ese mismo año, Jozsa colaboró con David Deutsch en la formulación del algoritmo de Deutsch-Jozsa, uno de los primeros algoritmos cuánticos con ventajas demostrables frente a su equivalente clásico.

La propuesta del protocolo de teleportación cuántica utilizaba dos cúbits entrelazados y dos bits de comunicación clásica para transferir íntegramente un estado cuántico desconocido de un lugar a otro, sin clonar ni medir directamente el cúbit original. Cuatro años después, en 1997, un equipo experimental logró demostrar la teleportación cuántica utilizando fotones.

La teleportación cuántica

En el ejemplo del poster queremos transmitir el estado cuántico del cúbit Q1 al cúbit Q2. Una primera aproximación muy simple sería la siguiente: entrelazamos los dos cúbits, Q1 y Q2, y los entregamos a dos personas (a las que llamaremos Alice y Bob). Como la información cuántica no se puede clonar será imposible trasladar el estado de Q1 a Q2 directamente, ya que el primer cúbit debería ser colapsado a un estado clásico y esto, destruiría la superposición en Q2 automáticamente.

La teleportación evita este problema añadiendo un tercer cúbit auxiliar que llamaremos “puente” (Qp). El truco está en entrelazar estos tres cúbits de manera adecuada. Alice tendrá en su poder Q1, el cúbit que queremos transmitir, y Qp, el cúbit puente. Bob se quedará con Q2. Cuando Alice realiza una medida de sus cúbits obtiene información clásica (1s y 0s). Este proceso colapsa el estado de Q2 pero, y aquí está el truco, colapsa en una base distinta a la base de medida. Es decir, el cúbit de Bob sigue en un estado de superposición. Ahora hay dos posibilidades: o bien Q2 ha terminado en un estado idéntico al de Q1 o bien en un estado estrechamente relacionado con este. ¿Cómo puede saber Bob qué ha sucedido? Recibiendo la información de la medida de Alice de forma clásica (con una llamada o un mensaje). Si Alice le pasa la cadena 00, Bob sabrá que no tiene nada más que hacer. Si Bob recibe las cadenas 01, 10, o 11 tendrá que aplicar una puerta cuántica adicional conocida, que modifica el estado de Q2 para hacerlo

idéntico a Q1. En cualquiera de los cuatro casos el estado cuántico de Q1 habrá sido destruido y teleportado hasta Q2.

Demostración experimental

En 1997, se llevó a cabo la primera teleportación cuántica experimental exitosa con fotones, utilizando la polarización como la información a teleportar de un cúbit a otro. Desde entonces, se han teleportado estados cuánticos en diversos sistemas físicos: iones atrapados, átomos neutros, cúbits de estado sólido y, más recientemente, en sistemas de larga distancia mediante fibras ópticas y enlaces satelitales. Algunos ejemplos notables son:

- Experimentos de Zeilinger y colaboradores usando fotones. En 1997 la teleportación se produce a distancias de laboratorio. En 2006 logran teleportar estados cuánticos a través del río Danubio (600 metros). El record del grupo está en 143 km, entre las islas de Tenerife y La Palma (2012).
- Teleportación con iones atrapados: Dos grupos experimentales, liderados por Rainer Blatt en Innsbruck y David Wineland (premio Nobel en 2012) logran de manera independiente en 2004 implementar teleportación con iones atómicos.
- Teleportación con cúbits de estado sólido: en 2013 el grupo de Andreas Wallraff en el ETH de Zurich consiguen teleportación con cúbits superconductores. Estos son los cúbits más utilizados hasta la fecha para computación cuántica y son muchísimo más grandes que un átomo; su tamaño alcanza varios cientos de micrómetros.
- Record actual: el experimento QUESS (Quantum Experiments at Space Scale) de la Agencia Espacial China realizó teleportación cuántica entre un satélite en órbita y estaciones terrestres separadas por más de 1200 km, un hito que abre la puerta a una red de comunicaciones cuánticas global. Este experimento fue liderado por Jian-Wei Pan, discípulo de Zeilinger y bautizado como “father of quantum” por la revista Nature en 2017.

¿Y esto para qué sirve?

La teleportación cuántica es el pilar de futuras redes cuánticas y la base de los repetidores cuánticos, que superan la atenuación y el ruido en canales ópticos permitiendo comunicaciones seguras a larga distancia. También resulta esencial en computación cuántica distribuida, donde las puertas lógicas cuánticas se aplican a cúbits distantes para realizar operaciones cuánticas; en pruebas de fundamentos cuánticos y nuevos protocolos criptográficos; o la creación de sistemas de entrelazamiento a gran escala, indispensables para la sincronización de relojes atómicos y la astronomía cuántica.