

QMexico Summer School

QBronze 1.4 · Entrelazamiento y protocolos

Entanglement and Protocols

202 Junio 2026

Material final para estudiantes · Notación matemática en \LaTeX

El módulo organiza los conceptos en una secuencia matemática progresiva. Cada bloque introduce una definición, fija la convención de notación y resuelve ejercicios con pasos explícitos.

La convención común de las cinco presentaciones es usar vectores columna, producto tensorial de izquierda a derecha y amplitudes reales salvo que se indique lo contrario.

Convención de trabajo. Cada desarrollo mantiene la misma lectura de vectores columna, bases ordenadas y operaciones aplicadas por la izquierda.

MAPA

1. Entrelazamiento
2. Bell y GHZ
3. Inferencia condicional
4. Codificación superdensa
5. Teleportación
6. Correcciones y recursos

Un estado de varios qubits está entrelazado si no puede escribirse como producto tensorial de estados individuales.

Por qué importa. El entrelazamiento no significa simplemente observar resultados correlacionados. La señal matemática es que el vector conjunto no puede factorizarse como producto tensorial de estados locales.

NOTACIÓN

$$|\psi\rangle_{AB} \neq |a\rangle_A \otimes |b\rangle_B$$

No basta con que haya superposición; debe fallar la factorización.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. El entrelazamiento no significa simplemente observar resultados correlacionados. La señal matemática es que el vector conjunto no puede factorizarse como producto tensorial de estados locales.

PASOS

1. Intenta escribir como producto.
2. Compara coeficientes.
3. Si no hay solución, es entrelazado.

¿ $\frac{|00\rangle+|11\rangle}{\sqrt{2}}$ es separable?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento.

El entrelazamiento no significa simplemente observar resultados correlacionados.

La señal matemática es que el vector conjunto no puede factorizarse como producto tensorial de estados locales.

SOLUCIÓN

No. Si fuera $(a|0\rangle + b|1\rangle)(c|0\rangle + d|1\rangle)$, exigiría $ad = 0$, $bc = 0$, $ac \neq 0$, $bd \neq 0$, contradicción.

Un estado puede tener cuatro términos y ser separable. La superposición uniforme de dos qubits es $|+\rangle \otimes |+\rangle$.

Por qué importa. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar.

Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

NOTACIÓN

$$|+\rangle \otimes |+\rangle = \frac{|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle}{2}$$

La presencia de muchos términos no implica entrelazamiento.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica.

La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar.

Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

PASOS

1. Factoriza si todos los coeficientes tienen estructura de producto.
2. Busca escritura como tensorial.

Clasifica $\frac{|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle}{2}$.

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento.

La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar.

Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

SOLUCIÓN

Es separable:

$$\frac{|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle}{2} = |+\rangle \otimes |+\rangle.$$

Los estados Bell son estados de dos qubits máximamente entrelazados. Tienen correlaciones perfectas u opuestas y signos relativos relevantes.

Por qué importa. El entrelazamiento no significa simplemente observar resultados correlacionados. La señal matemática es que el vector conjunto no puede factorizarse como producto tensorial de estados locales.

NOTACIÓN

$$|\Phi^\pm\rangle = \frac{|00\rangle \pm |11\rangle}{\sqrt{2}}, \quad |\Psi^\pm\rangle = \frac{|01\rangle \pm |10\rangle}{\sqrt{2}}$$

Reconoce patrones: Φ usa iguales, Ψ usa opuestos.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. El entrelazamiento no significa simplemente observar resultados correlacionados. La señal matemática es que el vector conjunto no puede factorizarse como producto tensorial de estados locales.

PASOS

1. Mira qué cadenas aparecen.
2. Iguales: Φ .
3. Opuestas: Ψ .
4. Signo + o - según fase relativa.

Clasifica $\frac{|01\rangle - |10\rangle}{\sqrt{2}}$.

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. El entrelazamiento no significa simplemente observar resultados correlacionados. La señal matemática es que el vector conjunto no puede factorizarse como producto tensorial de estados locales.

SOLUCIÓN

Es $|\Psi^-\rangle$ y está entrelazado.

Un Bell Φ^+ se prepara aplicando H al primer qubit y luego CNOT con primer qubit como control.

Por qué importa. En código conviene distinguir el registro cuántico, el registro clásico y la operación de medición. Una compuerta modifica el estado cuántico; una medición produce información clásica.

NOTACIÓN

$$|00\rangle \xrightarrow{H \otimes I} \frac{|00\rangle + |10\rangle}{\sqrt{2}} \xrightarrow{\text{CNOT}} \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}$$

La CNOT convierte superposición local en correlación no separable.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. En código conviene distinguir el registro cuántico, el registro clásico y la operación de medición. Una compuerta modifica el estado cuántico; una medición produce información clásica.

PASOS

1. Aplica H al control.
2. Aplica CNOT.
3. Verifica términos finales.

Prepara $|\Phi^+\rangle$ desde $|00\rangle$.

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. En código conviene distinguir el registro cuántico, el registro clásico y la operación de medición. Una compuerta modifica el estado cuántico; una medición produce información clásica.

SOLUCIÓN

$$|00\rangle \rightarrow \frac{|00\rangle + |10\rangle}{\sqrt{2}} \rightarrow \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}.$$

Al medir Φ^+ en la base computacional, sólo aparecen 00 y 11 con probabilidad $1/2$ cada uno.

Por qué importa. La medición convierte un estado cuántico en una cadena clásica.

Los conteos de un simulador son aproximaciones estadísticas de las probabilidades, salvo en estados deterministas donde todos los disparos caen en una sola cadena.

NOTACIÓN

$$\mathbb{P}(00) = \mathbb{P}(11) = \frac{1}{2}, \quad \mathbb{P}(01) = \mathbb{P}(10) = 0$$

La correlación de medición no por sí sola prueba entrelazamiento, pero aquí proviene de un estado no factorizable.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. La medición convierte un estado cuántico en una cadena clásica. Los conteos de un simulador son aproximaciones estadísticas de las probabilidades, salvo en estados deterministas donde todos los disparos caen en una sola cadena.

PASOS

1. Identifica amplitudes no nulas.
2. Eleva al cuadrado.
3. Lista resultados posibles.

Predice conteos de 1000 mediciones de Φ^+ .

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. La medición convierte un estado cuántico en una cadena clásica. Los conteos de un simulador son aproximaciones estadísticas de las probabilidades, salvo en estados deterministas donde todos los disparos caen en una sola cadena.

SOLUCIÓN

Aproximadamente 500 para 00 y 500 para 11, por ejemplo

{'000'?}

En dos qubits: {00 : 500, 11 : 500}.

Con tres qubits, el circuito H en q_0 seguido de dos CNOT controladas por q_0 produce un estado GHZ.

Por qué importa. El entrelazamiento no significa simplemente observar resultados correlacionados. La señal matemática es que el vector conjunto no puede factorizarse como producto tensorial de estados locales.

NOTACIÓN

$$|\text{GHZ}\rangle = \frac{|000\rangle + |111\rangle}{\sqrt{2}}$$

Todos los qubits quedan perfectamente correlacionados.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. El entrelazamiento no significa simplemente observar resultados correlacionados. La señal matemática es que el vector conjunto no puede factorizarse como producto tensorial de estados locales.

PASOS

1. H crea superposición en el control.
2. CNOT copia correlación al segundo.
3. CNOT copia correlación al tercero.

¿Qué resultados aparecen al medir un GHZ de 3 qubits?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. El entrelazamiento no significa simplemente observar resultados correlacionados. La señal matemática es que el vector conjunto no puede factorizarse como producto tensorial de estados locales.

SOLUCIÓN

Sólo 000 y 111, cada uno con probabilidad $1/2$.

En una simulación de 1000 disparos, GHZ debe producir aproximadamente mitad 000 y mitad 111.

Por qué importa. La medición convierte un estado cuántico en una cadena clásica.

Los conteos de un simulador son aproximaciones estadísticas de las probabilidades, salvo en estados deterministas donde todos los disparos caen en una sola cadena.

NOTACIÓN

$$\{000 \approx 500, 111 \approx 500\}$$

Pequeñas diferencias se deben al muestreo.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. La medición convierte un estado cuántico en una cadena clásica. Los conteos de un simulador son aproximaciones estadísticas de las probabilidades, salvo en estados deterministas donde todos los disparos caen en una sola cadena.

PASOS

1. Calcula probabilidades ideales.
2. Multiplica por shots.
3. Acepta fluctuaciones cercanas.

¿Es compatible $\{000 : 480, 111 : 520\}$ con GHZ?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. La medición convierte un estado cuántico en una cadena clásica. Los conteos de un simulador son aproximaciones estadísticas de las probabilidades, salvo en estados deterministas donde todos los disparos caen en una sola cadena.

SOLUCIÓN

Sí. Ambos resultados permitidos aparecen cerca de 500 y no aparecen otros resultados.

Un estado como $\frac{|000\rangle + |001\rangle + |111\rangle}{\sqrt{3}}$ permite razonamiento condicional por mediciones parciales.

Por qué importa. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

NOTACIÓN

$$|\psi\rangle = \frac{|000\rangle + |001\rangle + |111\rangle}{\sqrt{3}}$$

Para inferencias, lista sólo cadenas compatibles con el resultado observado.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

PASOS

1. Enumera cadenas con amplitud no nula.
2. Filtra por el qubit medido.
3. Lee consecuencias para los demás.

Si el primer qubit se mide como 0, ¿qué se sabe del segundo?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

SOLUCIÓN

Las cadenas compatibles son 000 y 001. En ambas, el segundo qubit es 0.

Una medición puede permitir inferir otros qubits con probabilidad uno si todas las cadenas compatibles comparten el mismo valor.

Por qué importa. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

NOTACIÓN

$$\mathbb{P}(q_j = b \mid q_i = a) = 1$$

No uses intuición; filtra cadenas.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

PASOS

1. Toma el resultado observado.
2. Elimina cadenas incompatibles.
3. Revisa si el qubit consultado es constante.

En $\frac{|000\rangle+|001\rangle+|111\rangle}{\sqrt{3}}$, si el primer qubit es 1, ¿qué pasa con el tercero?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

SOLUCIÓN

La única cadena compatible es 111. Entonces el tercero es 1 con probabilidad 1.

La codificación superdensa transmite dos bits clásicos mediante el envío de un qubit, usando un par entrelazado compartido como recurso.

Por qué importa. La codificación superdensa usa un par entrelazado compartido y una transmisión cuántica para transportar dos bits clásicos. El recurso que permite la compresión es el entrelazamiento previo.

NOTACIÓN

1 qubit enviado + 1 par Bell compartido \Rightarrow 2 bits clásicos

El par Bell se consume durante el protocolo.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. La codificación superdensa usa un par entrelazado compartido y una transmisión cuántica para transportar dos bits clásicos. El recurso que permite la compresión es el entrelazamiento previo.

PASOS

1. Compartir $|\Phi^+\rangle$.
2. Alice aplica operación según dos bits.
3. Alice envía su qubit.
4. Bob decodifica con CNOT y H .

¿Cuántos pares Bell se necesitan para usar el protocolo 4 veces?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. La codificación superdensa usa un par entrelazado compartido y una transmisión cuántica para transportar dos bits clásicos. El recurso que permite la compresión es el entrelazamiento previo.

SOLUCIÓN

Se necesita un par por uso. Para 4 usos: 4 pares, es decir 8 qubits entrelazados inicialmente.

Una convención típica para superdense coding es: $00 \mapsto I$, $01 \mapsto X$, $10 \mapsto Z$, $11 \mapsto XZ$ sobre el qubit de Alice.

Por qué importa. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

NOTACIÓN

$00 : I, \quad 01 : X, \quad 10 : Z, \quad 11 : XZ$

La operación depende del mensaje del emisor, no del receptor.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

PASOS

1. Divide el mensaje en pares de bits.
2. Busca la operación asociada.
3. Aplica al qubit de Alice.

Para enviar 01, ¿qué aplica Alice?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

SOLUCIÓN

Aplica X a su qubit.

Si los dígitos se codifican como 0 : 00, 1 : 01, 2 : 10, 3 : 11, entonces el mensaje 1302 se divide en cuatro pares.

Por qué importa. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

NOTACIÓN

$1 \rightarrow 01, \quad 3 \rightarrow 11, \quad 0 \rightarrow 00, \quad 2 \rightarrow 10$

Cada par usa una instancia independiente del protocolo.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

PASOS

1. Traduce cada dígito.
2. Cuenta pares de dos bits.
3. Asigna un par Bell por par.

¿Cuántas veces se usa superdense coding para 1302?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

SOLUCIÓN

Cuatro veces: una por cada dígito codificado en dos bits.

En superdense coding, Bob necesita tanto el qubit recibido de Alice como su mitad original del par Bell. Si pierde su qubit, no puede decodificar.

Por qué importa. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

NOTACIÓN

decodificación requiere dos qubits

El qubit recibido solo no contiene los dos bits recuperables.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

PASOS

1. Identifica recursos de Bob.
2. Si falta la mitad Bell, la medición no distingue mensajes.
3. Concluye imposibilidad.

Bob recibe el qubit de Alice pero perdió el suyo. ¿Puede recuperar el mensaje?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

SOLUCIÓN

No. Sin su mitad del par entrelazado, no puede completar la decodificación.

La teleportación transfiere un estado cuántico desconocido usando un par Bell compartido y dos bits clásicos enviados por Alice a Bob.

Por qué importa. La teleportación cuántica no copia el estado y no envía información más rápido que la luz. Transfiere el estado usando entrelazamiento previo más dos bits clásicos que determinan la corrección final.

NOTACIÓN

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

No crea una copia: el estado original de Alice queda destruido por la medición.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. La teleportación cuántica no copia el estado y no envía información más rápido que la luz. Transfiere el estado usando entrelazamiento previo más dos bits clásicos que determinan la corrección final.

PASOS

1. Alice y Bob comparten Φ^+ .
2. Alice aplica CNOT y H .
3. Alice mide dos qubits.
4. Bob corrige según dos bits.

¿La teleportación permite copiar $|\psi\rangle$?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. La teleportación cuántica no copia el estado y no envía información más rápido que la luz. Transfiere el estado usando entrelazamiento previo más dos bits clásicos que determinan la corrección final.

SOLUCIÓN

No. Bob obtiene $|\psi\rangle$, pero Alice ya no conserva una copia cuántica del estado.

El resultado de Alice determina la corrección de Bob. Con una convención usual: $00 \rightarrow I$, $01 \rightarrow X$, $10 \rightarrow Z$, $11 \rightarrow ZX$.

Por qué importa. La teleportación cuántica no copia el estado y no envía información más rápido que la luz. Transfiere el estado usando entrelazamiento previo más dos bits clásicos que determinan la corrección final.

NOTACIÓN

$00 : I, \quad 01 : X, \quad 10 : Z, \quad 11 : ZX$

El orden de bits debe coincidir con la convención del circuito.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. La teleportación cuántica no copia el estado y no envía información más rápido que la luz. Transfiere el estado usando entrelazamiento previo más dos bits clásicos que determinan la corrección final.

PASOS

1. Lee los dos bits clásicos.
2. Identifica corrección.
3. Aplica a qubit de Bob.

Si Alice reporta 10, ¿qué corrección aplica Bob?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. La teleportación cuántica no copia el estado y no envía información más rápido que la luz. Transfiere el estado usando entrelazamiento previo más dos bits clásicos que determinan la corrección final.

SOLUCIÓN

Aplica Z al qubit de Bob.

El entrelazamiento no permite comunicación más rápida que la luz. En teleportación, Bob necesita los dos bits clásicos de Alice antes de corregir.

Por qué importa. Las restricciones no son detalles técnicos: protegen la consistencia de la teoría. Sin el canal clásico o sin destruir la copia original, aparecerían contradicciones con la medición y con la causalidad.

NOTACIÓN

canal clásico necesario

Sin los bits clásicos, Bob no sabe qué corrección aplicar.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. Las restricciones no son detalles técnicos: protegen la consistencia de la teoría. Sin el canal clásico o sin destruir la copia original, aparecerían contradicciones con la medición y con la causalidad.

PASOS

1. Bob tiene un estado condicional.
2. Alice envía dos bits por canal clásico.
3. Bob corrige después de recibirlos.

¿El entrelazamiento permite comunicación instantánea?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. Las restricciones no son detalles técnicos: protegen la consistencia de la teoría. Sin el canal clásico o sin destruir la copia original, aparecerían contradicciones con la medición y con la causalidad.

SOLUCIÓN

No. La información útil requiere comunicación clásica.

Las compuertas condicionadas por bits clásicos dependen del valor medido, no de un qubit sin medir.

Por qué importa. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

NOTACIÓN

medición $\Rightarrow c \in \{0, 1\} \Rightarrow$ control clásico

El control clásico aparece después de medir.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

PASOS

1. Mide.
2. Guarda en registro clásico.
3. Aplica compuerta condicionada.

Si una condición clásica no se cumple, ¿se aplica la compuerta?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

SOLUCIÓN

No. La compuerta condicionada se omite.

Si un circuito mide $q_0 = 1$ y después aplica H a q_1 sólo si el registro clásico vale 0, la condición es falsa.

Por qué importa. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

NOTACIÓN

$c = 1 \neq 0 \Rightarrow H$ no se aplica

El resultado final conserva $q_1 = 0$ y $q_0 = 1$.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

PASOS

1. X en q_0 da $q_0 = 1$.
2. Medición guarda $c_0 = 1$.
3. Condición $c = 0$ falla.
4. Medición final da cadena 01.

Predice la salida ideal del circuito condicionado descrito.

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

SOLUCIÓN

{ '01' : 1024 }.

Tanto superdense coding como teleportación consumen entrelazamiento compartido. El par Bell no queda disponible al final como recurso reutilizable.

Por qué importa. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

NOTACIÓN

un uso \Rightarrow un par Bell consumido

No reutilices el mismo par para varias transmisiones independientes.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

PASOS

1. Cuenta usos del protocolo.
2. Asigna un par por uso.
3. Multiplica por dos qubits por par.

Cuatro teleportaciones de un qubit, ¿cuántos pares Bell requieren?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

SOLUCIÓN

Cuatro pares Bell.

Superdense coding transmite bits clásicos usando un qubit enviado. Teleportación transmite un estado cuántico usando dos bits clásicos enviados.

Por qué importa. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

NOTACIÓN

superdense : $2c \leftarrow 1q$; teleportación : $1q \leftarrow 2c$

Ambos requieren un par Bell compartido.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

PASOS

1. Identifica qué se transmite.
2. Identifica qué canal se usa.
3. Identifica el recurso entrelazado.

¿Qué protocolo usa dos bits clásicos para transferir un estado cuántico?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

SOLUCIÓN

Teleportación cuántica.

Para decidir si un estado dado está entrelazado, intenta factorizar. Los estados Bell son entrelazados; productos de estados de un qubit no lo son.

Por qué importa. El entrelazamiento no significa simplemente observar resultados correlacionados. La señal matemática es que el vector conjunto no puede factorizarse como producto tensorial de estados locales.

NOTACIÓN

$$|\psi^-\rangle = \frac{|01\rangle - |10\rangle}{\sqrt{2}} \quad \text{entrelazado}$$

La superposición de un solo qubit no se clasifica como entrelazamiento.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. El entrelazamiento no significa simplemente observar resultados correlacionados. La señal matemática es que el vector conjunto no puede factorizarse como producto tensorial de estados locales.

PASOS

1. Verifica número de qubits.
2. Si hay un solo qubit, no hay entrelazamiento bipartito.
3. Si hay dos, prueba factorización.

¿ $\frac{|0\rangle+|1\rangle}{\sqrt{2}}$ está entrelazado?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. El entrelazamiento no significa simplemente observar resultados correlacionados. La señal matemática es que el vector conjunto no puede factorizarse como producto tensorial de estados locales.

SOLUCIÓN

No. Es un estado de un solo qubit.

Los signos relativos en estados Bell cambian la identidad del estado aunque las probabilidades de la base computacional sean iguales.

Por qué importa. El entrelazamiento no significa simplemente observar resultados correlacionados. La señal matemática es que el vector conjunto no puede factorizarse como producto tensorial de estados locales.

NOTACIÓN

$$\Phi^+ = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}, \quad \Phi^- = \frac{|00\rangle - |11\rangle}{\sqrt{2}}$$

La fase se revela al aplicar operaciones de decodificación.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. El entrelazamiento no significa simplemente observar resultados correlacionados. La señal matemática es que el vector conjunto no puede factorizarse como producto tensorial de estados locales.

PASOS

1. No ignores el signo.
2. Conserva la fase hasta el final.
3. Mide después de decodificar si corresponde.

¿ Φ^+ y Φ^- dan las mismas probabilidades directas en base computacional?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. El entrelazamiento no significa simplemente observar resultados correlacionados. La señal matemática es que el vector conjunto no puede factorizarse como producto tensorial de estados locales.

SOLUCIÓN

Sí: 00 y 11 con $1/2$ cada uno. Pero son estados distintos.

La decodificación de superdense coding convierte diferencias entre estados Bell en diferencias en la base computacional.

Por qué importa. El entrelazamiento no significa simplemente observar resultados correlacionados. La señal matemática es que el vector conjunto no puede factorizarse como producto tensorial de estados locales.

NOTACIÓN

CNOT ($H \otimes I$) o el orden de decodificación según circuito

La idea es transformar Bell en cadenas 00, 01, 10, 11 distinguibles.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. El entrelazamiento no significa simplemente observar resultados correlacionados. La señal matemática es que el vector conjunto no puede factorizarse como producto tensorial de estados locales.

PASOS

1. Bob recibe ambos qubits.
2. Aplica CNOT.
3. Aplica H al qubit correspondiente.
4. Mide ambos.

¿Por qué Bob puede distinguir cuatro mensajes?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. El entrelazamiento no significa simplemente observar resultados correlacionados. La señal matemática es que el vector conjunto no puede factorizarse como producto tensorial de estados locales.

SOLUCIÓN

Porque las cuatro operaciones de Alice producen cuatro estados Bell ortogonales que Bob decodifica a cuatro cadenas distintas.

Teleportar un qubit que estaba entrelazado con un tercero transfiere esa relación al qubit de Bob. No duplica el entrelazamiento; lo relocaliza.

Por qué importa. El entrelazamiento no significa simplemente observar resultados correlacionados. La señal matemática es que el vector conjunto no puede factorizarse como producto tensorial de estados locales.

NOTACIÓN

$$A-C \longrightarrow B-C$$

La medición de Alice destruye su participación cuántica directa.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. El entrelazamiento no significa simplemente observar resultados correlacionados. La señal matemática es que el vector conjunto no puede factorizarse como producto tensorial de estados locales.

PASOS

1. Estado inicial puede incluir un tercero.
2. El protocolo opera sobre el qubit de Alice.
3. El estado final queda en Bob con las correlaciones preservadas.

¿La teleportación rompe necesariamente cualquier entrelazamiento previo del estado enviado?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. El entrelazamiento no significa simplemente observar resultados correlacionados. La señal matemática es que el vector conjunto no puede factorizarse como producto tensorial de estados locales.

SOLUCIÓN

No. El entrelazamiento con un sistema externo puede preservarse, transferido al qubit de Bob.

Si después de medir dos qubits sólo ciertas entradas del vector de estado son no nulas, esas entradas revelan el resultado clásico compatible.

Por qué importa. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

NOTACIÓN

entradas no nulas \Rightarrow subespacio condicional

Usa el orden de qubits indicado por el material antes de concluir.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

PASOS

1. Mira qué bloque de entradas es no nulo.
2. Traduce índice binario.
3. Extrae los bits medidos.

Si sólo las últimas dos entradas son no nulas en un orden donde los dos primeros bits indexan bloques, ¿qué resultado sugieren?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

SOLUCIÓN

Sugieren el bloque final, usualmente asociado a medición 11 bajo esa convención.

No existe una operación cuántica universal que copie un estado arbitrario desconocido.

Por qué importa. Las restricciones no son detalles técnicos: protegen la consistencia de la teoría. Sin el canal clásico o sin destruir la copia original, aparecerían contradicciones con la medición y con la causalidad.

NOTACIÓN

$$\nexists U : U |\psi\rangle |0\rangle = |\psi\rangle |\psi\rangle \quad \forall |\psi\rangle$$

Teleportación no viola esta regla porque el estado original se mide y deja de existir como qubit independiente.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. Las restricciones no son detalles técnicos: protegen la consistencia de la teoría. Sin el canal clásico o sin destruir la copia original, aparecerían contradicciones con la medición y con la causalidad.

PASOS

1. Supón dos estados arbitrarios.
2. La linealidad impide copiar ambos y sus superposiciones.
3. Teleportación transfiere, no duplica.

¿Puede Bob crear una copia del qubit de Alice antes de medir?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. Las restricciones no son detalles técnicos: protegen la consistencia de la teoría. Sin el canal clásico o sin destruir la copia original, aparecerían contradicciones con la medición y con la causalidad.

SOLUCIÓN

No, no hay clonador universal de estados desconocidos.

Afirmaciones típicas deben evaluarse con precisión: no hay comunicación más rápida que la luz, superdense coding sí envía dos bits clásicos con un qubit, y no hay un único estado entrelazado.

Por qué importa. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

NOTACIÓN

entrelazamiento \neq canal clásico instantáneo

Separa recurso, canal y resultado.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

PASOS

1. Pregunta qué recurso se comparte.
2. Pregunta qué se envía.
3. Pregunta qué se recupera.

Marca una afirmación verdadera: en superdense coding se envían 2 bits clásicos usando 1 qubit enviado.

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

SOLUCIÓN

Verdadero, bajo el supuesto de un par Bell compartido previamente.

Una correlación perfecta no basta para afirmar entrelazamiento. El criterio matemático sigue siendo no factorización del estado cuántico.

Por qué importa. La medición convierte un estado cuántico en una cadena clásica. Los conteos de un simulador son aproximaciones estadísticas de las probabilidades, salvo en estados deterministas donde todos los disparos caen en una sola cadena.

NOTACIÓN

correlación perfecta $\not\Rightarrow$ entrelazamiento

Distingue entre una distribución clásica correlacionada y un vector de amplitudes no factorizable.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. La medición convierte un estado cuántico en una cadena clásica. Los conteos de un simulador son aproximaciones estadísticas de las probabilidades, salvo en estados deterministas donde todos los disparos caen en una sola cadena.

PASOS

1. Lee resultados posibles.
2. Calcula si hay correlación.
3. Prueba factorización del estado.

¿Medir siempre resultados iguales prueba por sí solo entrelazamiento?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. La medición convierte un estado cuántico en una cadena clásica. Los conteos de un simulador son aproximaciones estadísticas de las probabilidades, salvo en estados deterministas donde todos los disparos caen en una sola cadena.

SOLUCIÓN

No. También puede ocurrir con bits clásicos perfectamente correlacionados. La prueba es la no factorización.

En teleportación, la tabla de correcciones convierte el estado condicional de Bob en el estado original $|\psi\rangle$.

Por qué importa. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

NOTACIÓN

bits de Alice	corrección de Bob
00	I
01	X
10	Z
11	ZX

La tabla debe usarse con la misma convención de orden que el circuito.

Criterio operativo. Antes de calcular, identifica el orden de los estados, la dimensión del vector y la operación que realmente se aplica. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

PASOS

1. Escribe bits medidos.
2. Consulta la fila correspondiente.
3. Aplica la compuerta correctiva.

Si Bob recibe la instrucción asociada a 11, ¿qué aplica?

Lectura del planteamiento. Se traduce primero la frase a símbolos y después se calcula sin cambiar la convención a mitad del procedimiento. La clave es mantener una convención estable y justificar cada símbolo antes de operar. Así el cálculo no depende de memoria mecánica, sino de una traducción clara entre texto, vector, matriz y resultado.

SOLUCIÓN

Aplica X y Z según el orden definido; una forma común es ZX .

Estas fórmulas son las referencias mínimas que deben quedar disponibles durante la resolución de ejercicios. La prioridad es identificar primero la convención de orden y después aplicar la regla algebraica correspondiente.

FÓRMULAS

$$|\Phi^+\rangle = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}$$

$$|\text{GHZ}\rangle = \frac{|000\rangle + |111\rangle}{\sqrt{2}}$$

superdense : $1q + \text{Bell} \rightarrow 2c$

teleportación : $2c + \text{Bell} \rightarrow 1q$

00 : I, 01 : X, 10 : Z, 11 : ZX