

atlanTTic

research center
for Telecommunication Technologies

Tecnologías, soluciones y desafíos para computación cuántica distribuida

Universidade de Vigo

Universidade de Vigo



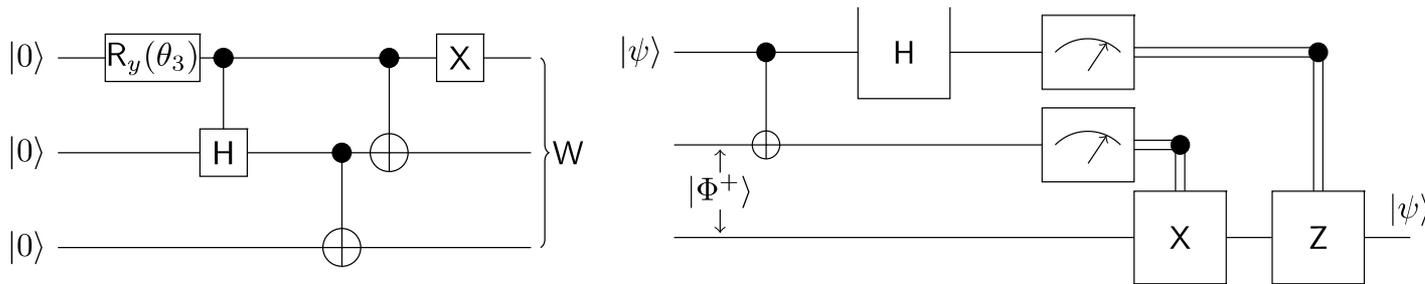
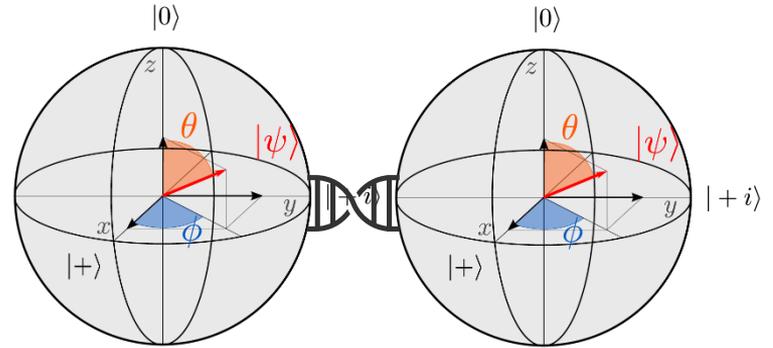
Contenidos

1. Comunicaciones y redes cuánticas
2. Realizaciones físicas para la Internet cuántica
3. Arquitecturas de redes cuánticas
4. Computación cuántica distribuida
5. Interconexión de QPU

Comunicaciones y redes cuánticas

Entanglement como recurso de comunicaciones P2P

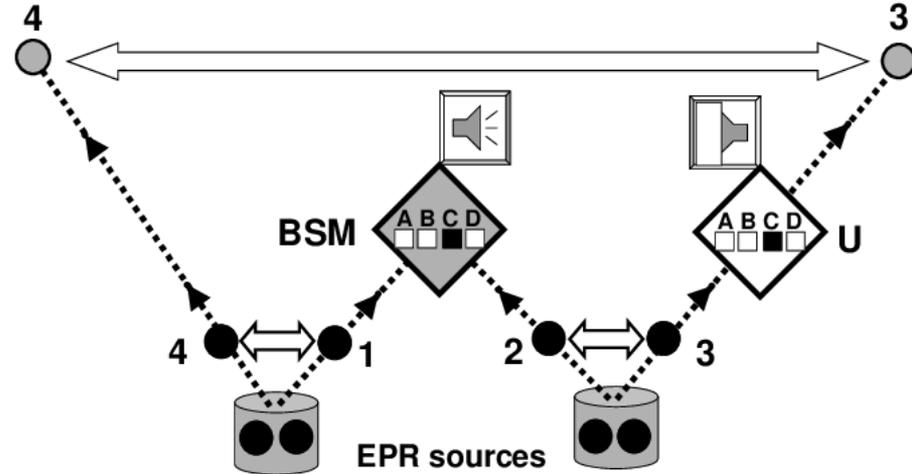
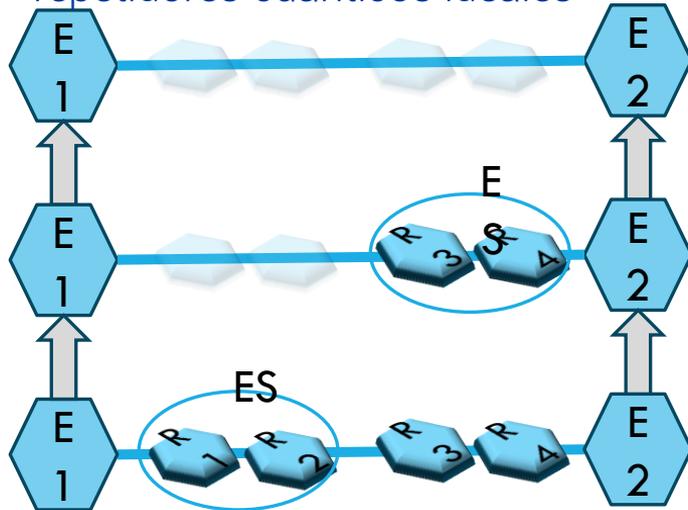
- QKD (MDI)
- Teleportación / codificación densa
- Conmutación no causal
- Computación: división de circuitos



Comunicaciones y redes cuánticas

Entrelazamiento bipartito a grandes distancias

- *Swapping*: 2 EPR (AB + BC) \rightarrow 1 EPR (AC)
- Extensión: intercambio recursivo en repetidores cuánticos ideales



Cada intercambio consume dos pares entrelazados y reduce el número de enlaces lógicos en una unidad

Comunicaciones y redes cuánticas

Pero los repetidores cuánticos **no son ideales**

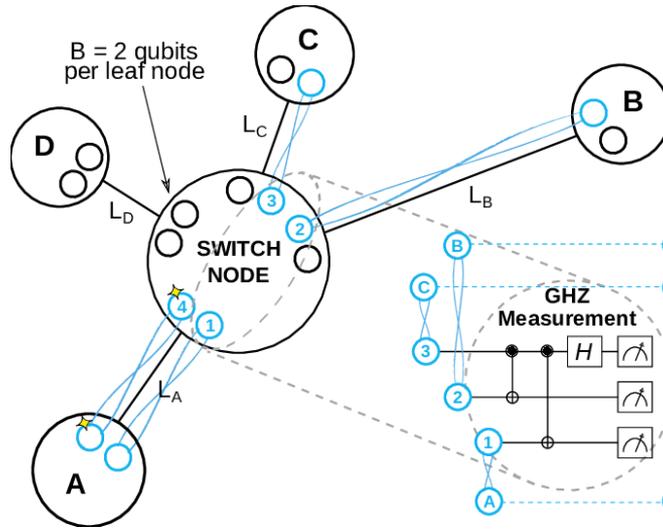
- Atenuación + detección imperfecta de fotones
- Decoherencia: sistemas abiertos
- BSM probabilística
- Canales ruidosos: errores de fase

Soluciones:

- Reintento $\propto \frac{1}{p}$
- Purificación de entrelazamiento: dos o más qubits entrelazados con baja $F \rightarrow$ 1 qubit con alta F
- QEC: Corrección/detección error

Protocolo	Estados de entrada	Prob. éxito	Fidelidad
[122]	Estados de Bell	$(F_1 + F_2)^2 + (F_3 + F_4)^2$	$\frac{F^2 + F_2^2}{(F + F_2)^2 + (F + F_4)^2}$
[122]	Binario	$F^2 + (1 - F)^2$	$\frac{F^2}{F^2 + (1 - F)^2}$
[65]	Werner	$(F + \frac{1-F}{3})^2 + (\frac{2(1-F)}{3})^2$	$\frac{F^2 + \frac{1}{9}(1-F)^2}{F^2 + \frac{2}{3}F(1-F) + \frac{5}{9}(1-F)^2}$

Comunicaciones y redes cuánticas

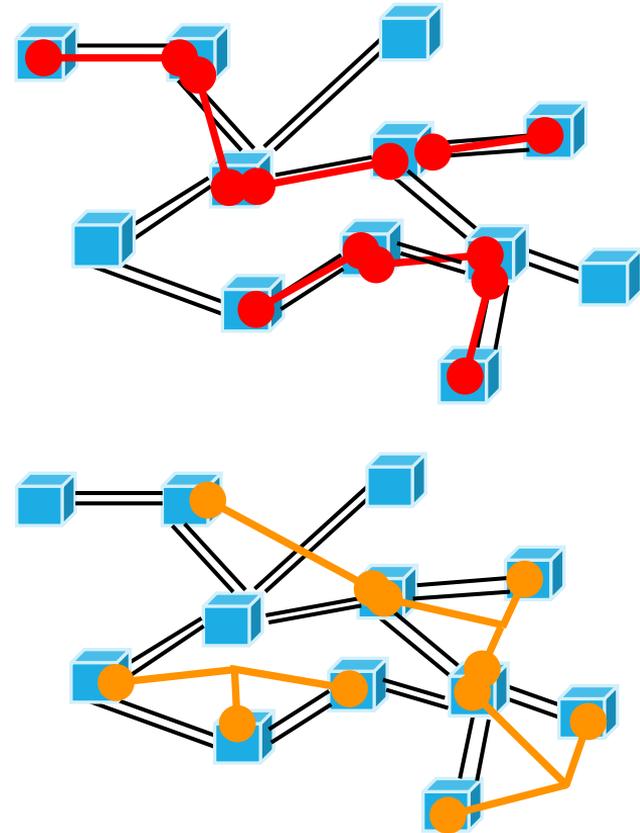
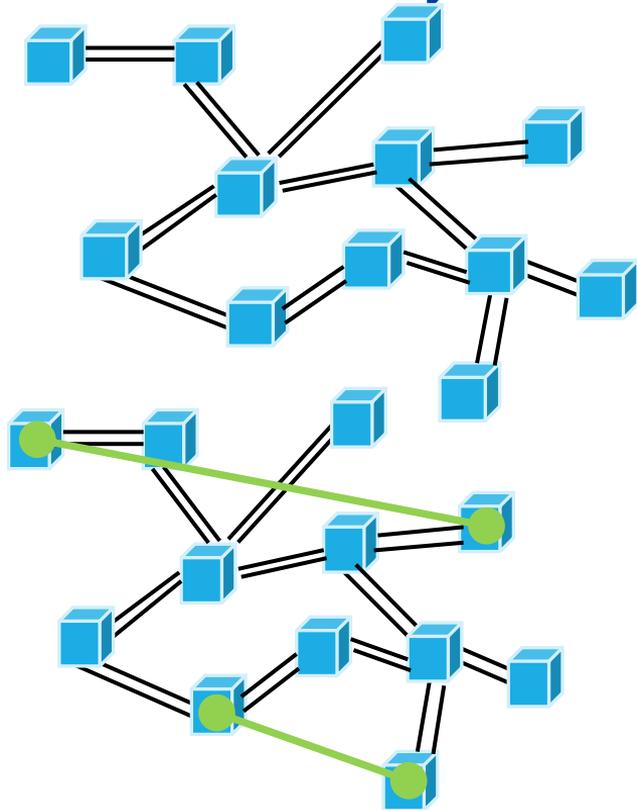


QR: limitados a topologías lineales

Quantum switch: un dispositivo con más grados de libertad para el ES

- Entre cualquier entrada/salida
- Con memorias o registros cuánticos
- Idealmente, con entrelazamiento multi-partito (e.g., GHZ, Werner)

Comunicaciones y redes cuánticas



Realizaciones físicas para Internet cuántica

Errores	Supresión de errores	1G	2G	3G
Pérdidas	Probabilista	✓	✓	
	Determinista			✓
Error operativo	Probabilista	✓		
	Determinista		✓	✓
	Escala temporal	$\max\{\frac{L}{c}, t_0\}$	$\max\{\frac{L_0}{c}, t_0\}$	t_0
	Complejidad	$\text{poly}(L)$	$\text{polylog}(L)$	$\text{polylog}(L)$

Repetidores cuánticos no ideales: mecanismos operativos

Supresión determinista: QEC o destilación de entrelazamiento (LOCC)

Supresión probabilista: detección de errores, *Heralded* EGP, EGP interactiva a 2 vías

Realizaciones físicas para Internet cuántica

Generación de entrelazamiento multi-partito:

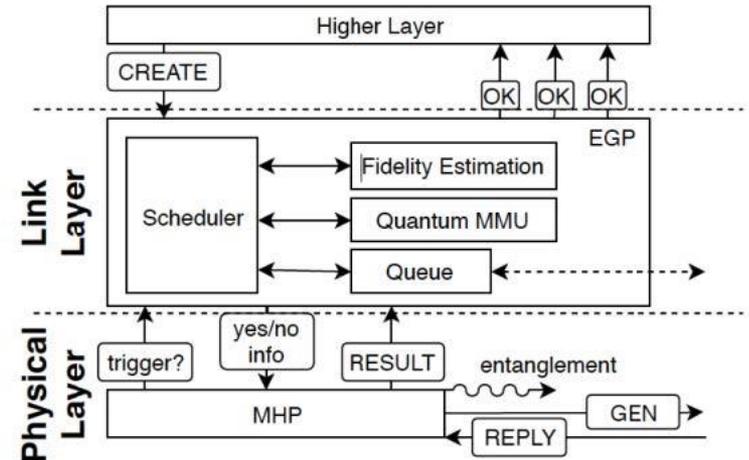
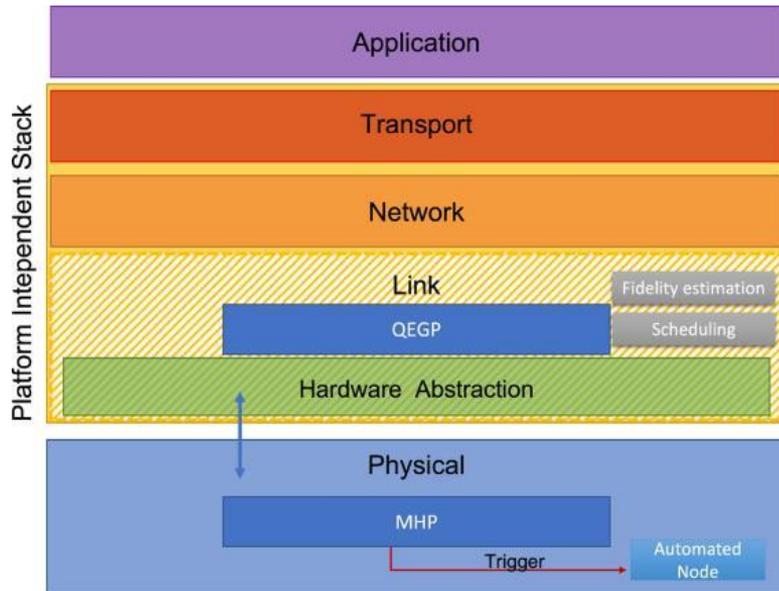
- Generación probabilista óptica: estados GHZ n-partitos con prob. 2^{1-2n}
- Generación determinista: mediante pozos cuánticos (polarización o time-bin), o interfaces luz-materia. Estado del arte:
 - Estados clúster lineales de 12 fotones
 - Estado GHZ de 14 fotones

Repetidores completamente ópticos

- Sin memoria, pero altamente sensibles a pérdidas
- Esquemas combinados con QEC, p.e., código de Shor señalizado (*heralded*)

Arquitecturas de redes cuánticas

Diseño lógico con entrelazamiento bipartito



QuTech. doi: [10.1145/3341302.3342070](https://doi.org/10.1145/3341302.3342070) doi: [10.1016/j.comnet.2022.109092](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109092).

Arquitecturas de redes cuánticas

Modelo en capas recursivas

- Generación de entrelazamiento arbitrario bi- o multi-: recursos exp.
- División de la red en **capas anidadas**
 - Entrelazamiento y ES entre los nodos de una misma capa
 - Entrelazamiento y ES entre algunos nodos de la capa i y un subconjunto de la capa $i+1$ → topologías *overlay*
- *Quantum Ruleset* para las acciones básicas de los protocolos cuánticos

Mensajes del protocolo			
Nombre	Nombre descriptivo	Argumentos	Comentarios
Eventos remotos (transmisión de mensajes)			
free	Liberar un estado	Partner addr., resource ID	Release a state back to the free pool. Used after purification
update	Notificación de cambio de estado	Partner addr., resource IDs, Pauli frame correction	Used to indicate a Pauli frame correction to a state. Most commonly used with transfer to complete entanglement swapping
meas	Resultado de una medida	Partner addr., resource IDs, result	Exchange purification results. Each partner sends this message, and a separate rule will recognize whether purification results agree and proceed appropriately. Numerous types are possible
transfer	Notificación de transferencia de entrelazamiento	Partner addr., resource IDs	Distribute the result of a swapping circuit. Generalizes to a notice of entanglement transfer from one location or partner to another. Carries a new resource ID to use for the resulting state

Arquitecturas de redes cuánticas

Estandarización: incipiente y escasa, principios generales en la [RFC9340](#)

- **P1.** El servicio fundamental de la IC es el entrelazamiento y su distribución entre los nodos de la red cuántica
- **P2.** Los pares de Bell son indistinguibles, lo que implica la coordinación de los nodos para garantizar la operación sobre qubits en el mismo estado de Bell
- **P3.** La fidelidad es parte del servicio, un servicio puede operar siempre y cuando la fidelidad supere un cierto umbral sin necesidad de corregirla;
- **P4.** El tiempo es un recurso caro debido a la baja tasa de generación de pares de Bell
- **P5.** La IC debe ser flexible frente a las capacidades y limitaciones actuales se superarán en el futuro.

Arquitecturas de redes cuánticas

Estandarización: retos principales en la [RFC9340](#)

- **R1.** Necesidad de un canal clásico para el envío de la información de control: los pares entrelazados son un mero recurso de comunicación sin información de control asociada.
- **R2.** Diferente gestión de estado: store-and-swap vs. Store-and-forward
- **R3.** Coordinación de los extremos tras el entrelazamiento
- **R4.** La generación de entrelazamiento requiere estados temporales que permitan almacenar los estados cuánticos hasta que la información de control sea recibida.

Arquitecturas de redes cuánticas: retos técnicos

Entanglement routing: la elección de las rutas para distribuir el entrelazamiento no puede ser agnóstica de

- Los recursos de entrelazamiento disponibles (P1, P4; R2, R4)
- La calidad del entrelazamiento (P3; R3, R4)

Routing tupla: (*source, destination, fidelity, delay, persistence*)

Entanglement routing vs. Classical routing

- ER es dinámico, la escala de tiempos es corta
- ER es no determinista
- ER es no simultáneo: un recurso de entrelazamiento no es compartible
- ER requiere sincronismo

Arquitecturas de redes cuánticas: retos técnicos

Entanglement routing: una visión cuantitativa

- Tiempo medio de decoherencia, estados bipartitos: 1,46 s
- Comunicación sobre canales clásicos: < 1 ms
- Tiempo de medida del entrelazamiento: < 3 μ s
- Tiempo de establecimiento del entrelazamiento: $\approx 165 \mu$ s

Recurso crítico: [memorias cuánticas](#) con tiempos de persistencia y coherencia elevados para repetidores y switches (alt., repetidores/switches enteramente ópticos)

Arquitecturas de redes cuánticas: problemas abiertos

Planificación del entrelazamiento: ¿cuándo? ¿dónde? ¿para quién? ¿cómo?

- Generación anticipada: entrelazamiento pre-configurado, en todos los nodos, para quien primero lo demande, bipartito
- Generación bajo demanda: por petición, en todos los nodos de una ruta, individual, ¿multi-partito?

Control del ES: ¿QEC? → necesarios mejores códigos de corrección de errores

Gestión de la purificación: reintentos vs purificación a lo largo de la ruta. Soluciones vía RL, POMDP

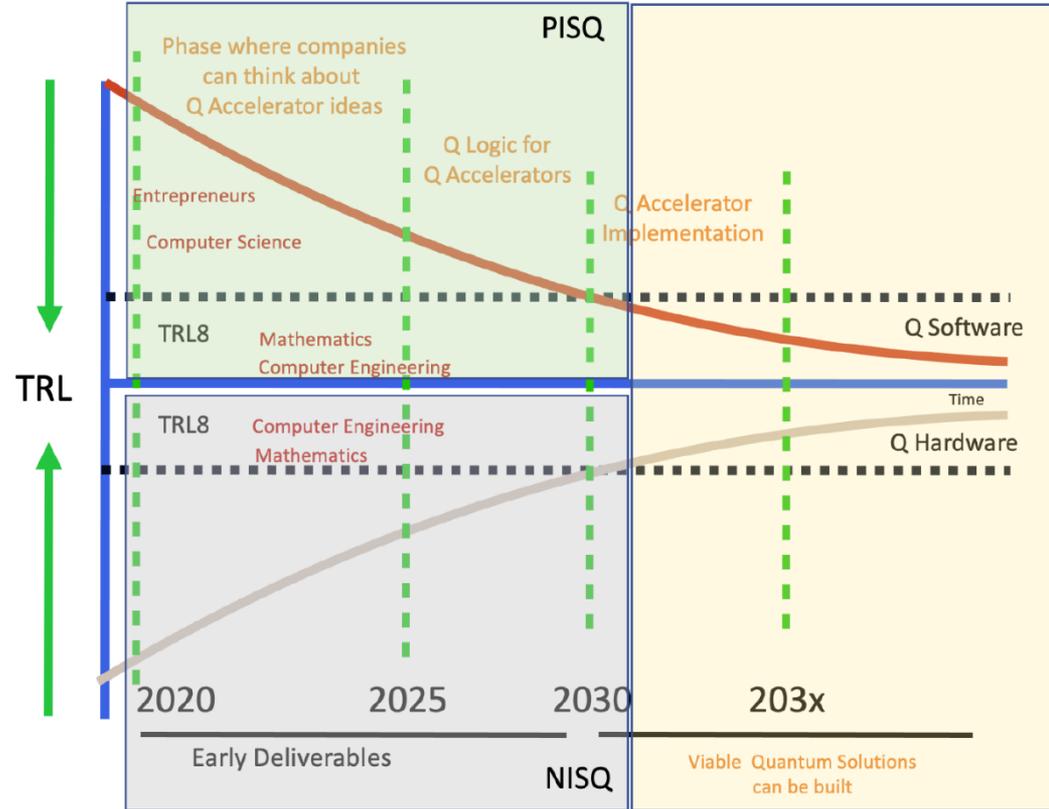
Asignación eficiente de los recursos de entrelazamiento. Quantum NUM

Computación cuántica distribuida

Status NISQ (*Noisy Intermediate-Scale Quantum*):

- QPU de $\sim 10^2 - 10^3$ qubits de fiabilidad baja/media para computación ($p_e \sim 10^{-3}$)
- Diferentes métricas de capacidad de cómputo

- Número de qubits Q (lógicos o físicos)
- Volumen cuántico (VQ, máx. ~ 525000)
- CLOPS (Circuit Layer Operations per s)
- Qubits algorítmicos (#AQ)



Computación cuántica distribuida

Retos en CC y vías de solución

- **Diversidad HW:** compiten muchas tecnología de qubits
- **Qubits por QPU** limitados ($\uparrow Q$) \rightarrow red de interconexión de QPU
- **Profundidad de los circuitos** ($\uparrow VQ$) y QEC ($\uparrow CLOPS$), e.g., $p_e \sim 10^{-3}$ vs 10^{-15} en CMOS
- **Qubits físicos por qubit lógico** ($\uparrow \#AQ$), e.g., 49 q-físicos por q-lógico con códigos tóricos

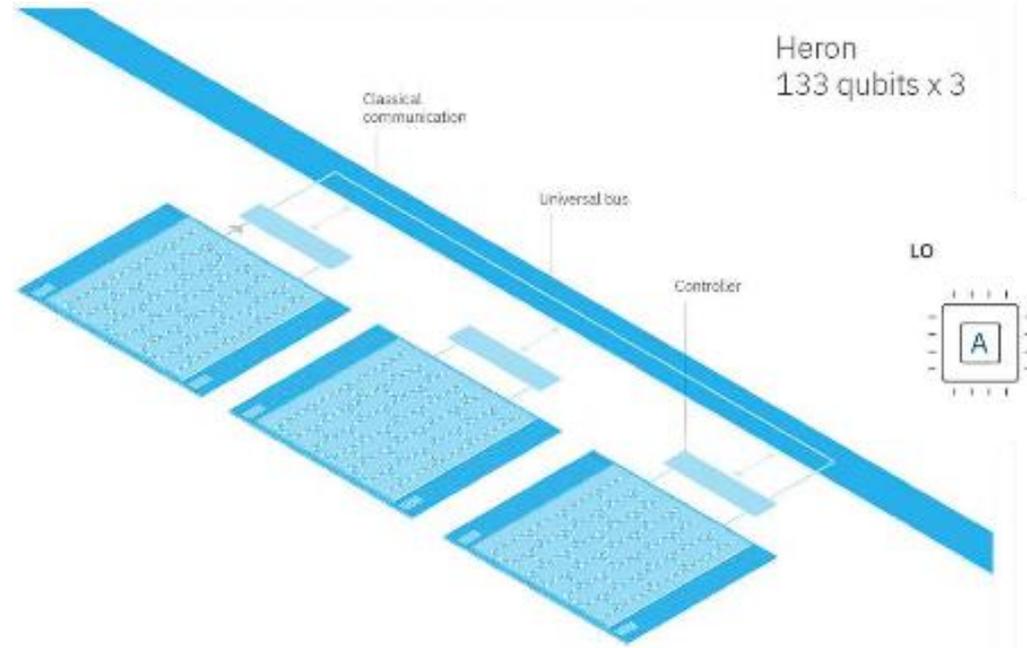
- Generación y **distribución eficiente de entrelazamiento**
- Planificación y **asignación de recursos**

- Quantum (network) Operating Systems

Interconexión de QPU

Escenario e hipótesis

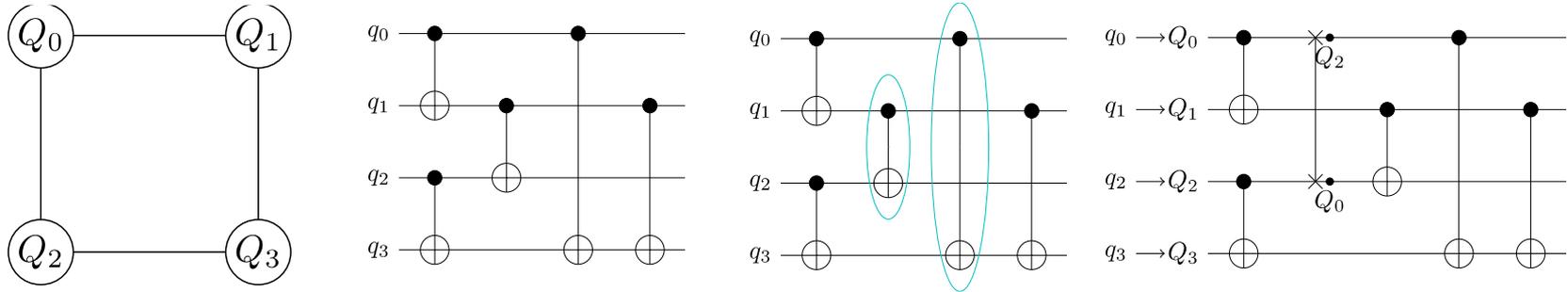
- **Distancia:** 0.01 a 100 m. Tiempos de señalización de ns
- **Determinismo:** preferible para el entrelazamiento entre las QPU
- **Fiabilidad** de las puertas cuánticas > 99%
- Medio físico de comunicación:
 - Lanzaderas de iones
 - Teleportación: aún experimental
 - Interconexión chip-con-chip
 - Redes fotónicas con guíaondas



Interconexión de QPU

Circuit knitting / splitting y QPU interconectadas

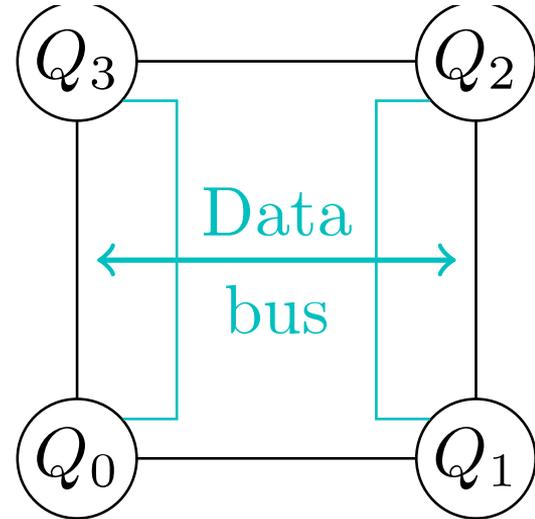
Qubits lógicos virtuales para dividir el cómputo del circuito entre las QPU



Interconexión de QPU

Opción 1

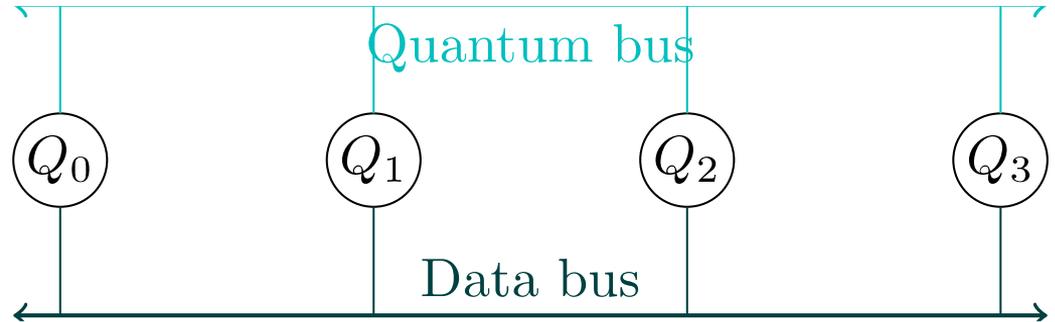
- Directa entre pares de QPU: óptica
- Bus de datos clásico para el control
- Ventajas: simple, a medida del HW, optimizada para cada tecnología de QPU
- Problemas: topología fija



Interconexión de QPU

Opción 2

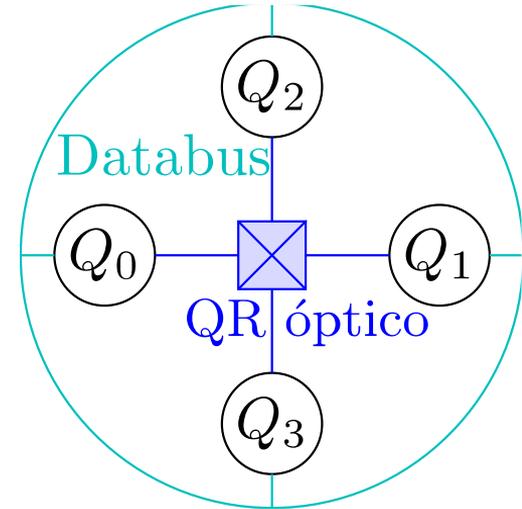
- **Quantum Bus:** directa entre las QPU con una guía de onda direccional (MIT, 2022; IBM Kookaburra QPU, 1586 x 3 qubits, 2025)
- **Ventajas:** arquitectura similar a los computadores clásicos multi-core o multi-CPU, NUMA
- **Problemas:** fotónica compleja



Interconexión de QPU

Opción 3

- **QR óptico:** sin retardo, deterministas, quantum-level device
- **Ventajas:** entrelazamiento flexible bajo demanda, adaptable al problema de cómputo, determinismo
- **Problemas:** tecnología de QR inmadura, lógica de control incierta



Interconexión de QPU

Opción 4

- **IC:** red de interconexión con QR/QS entre las QPU
- **Ventajas:** distancia arbitraria, escalable hasta +10k qubits
- **Problemas:** retardo, pérdida de coherencia



Gracias

Manuel Fernández Veiga
Ana Fernández Vilas
Rebeca P. Díaz Redondo

I & C Lab,atlanTTic

www.atlanttic.uvigo.es



Realizaciones físicas para Internet cuántica

Emisor	Memoria cuántica			Registro q		Propiedades de emisión					
	T_2	T_2^*	F (puerta)	N	T_2	T_1	η_{eff}	ι	η_{DW}	F	λ_{QE} (nm)
I ⁸⁷ Rb							87 %			$\geq 93,3\%$	780
II ⁸⁷ Rb ¹⁷¹ Yb ⁺ ¹²⁸ Ba ⁺	2-6 ms > 1 h 4 ms	400 μ s	$\geq 97,5\%$			300 ns	60 %			89 %	780 369 493
III	3 μ s	39 ns	95 %	$\geq 4(^{171}\text{Yb}^+)$	> 1 h	0,6-0,8 ns	57 %	99,5 %	90 %	$\geq 80\%$	900-1565
IV NV SiV GeV SnV	0,6 s 10 ms	5-36 ns 115 ns	> 99 %	9 1	75 s 100 ms	13 ns 1,6 ns 5,5 ns 4,5 ns	37 % 85 % 0,72 %	98,6 % 72 %	4 % 75 %	96 % 94 %	637 737 602 620
V V _{Si} V _{Si} V _C V ⁴⁺ NV	0,8-20 ms 64 ms	375 μ s	99,98 %	≥ 1		37 ns 91 ns 45 ns 13 ns		69 %	6-9 % 7 % 50 %		862-917 1078-1132 1278-1388 1180-1468
VI G T						34 ns 802 ns			15 % 23 %		1269 1326
VII Eu ³⁺ Er ³⁺ Pr ³⁺ Nd ³⁺	8,1 ms 880 μ s			≥ 1 ≥ 1 ≥ 1 ≥ 1	6 h 1,2 s	0,8-1,2 ms 1,5-8,7 ms 140 μ s				80 % 80 %	579 1532 606 883

Características físicas de memorias cuánticas

Realizaciones físicas para Internet cuántica

Rango ($\varepsilon_G, \eta_c, t_0$)	Tecnologías
$(\gtrsim 1\%, -, -)$	1G
$([0, 1L_{\text{att}}/L, 1\%], \lesssim 90\%, -)$	2G sin codificación
$([0, 1L_{\text{att}}/L, 1\%], -, \gtrsim 1\mu\text{s})$	2G sin codificación
$(\lesssim 0, 1L_{\text{att}}/L, \lesssim 90\%, -)$	2G con codificación
$(\lesssim 0, 1L_{\text{att}}/L, -, \gtrsim 1\mu\text{s})$	2G con codificación
$(\lesssim 1\%, \gtrsim 90\%, \lesssim 1\mu\text{s})$	3G

ε_G probabilidad de error de las puertas cuánticas,
 η_c es la eficiencia de acoplamiento
 t_0 es el tiempo de respuesta de una puerta cuántica

Generación de entrelazamiento bipartito:

- Entrelazamiento local fotón-memoria: sistema- Λ o time-bin (una transición óptica)
- Entrelazamiento memoria-memoria: demostrada experimentalmente con pozos cuánticos, centros NV, trampas de iones y conjuntos atómicos (hasta 7,3 kHz, 1,3 km-22 km, lab)

A iniciativa do Polo de Tecnoloxías Cuánticas de Galicia conta con financiamento de:

Fondos REACT EU



Despregamento dunha infraestrutura baseada en tecnoloxías cuánticas da información que permita impulsar a I+D+i en Galicia.

Apoiar a transición cara a unha economía dixital.

Operación financiada pola Unión Europea, a través do FONDO EUROPEO DE DESENVOLVEMENTO REXIONAL (FEDER), como parte da resposta da Unión á pandemia da COVID-19.

PROGRAMA OPERATIVO
FEDER GALICIA
2014-2020

Unha maneira de facer Europa