# ESCUELA EN ESPAÑOL
## QISKIT FALL FEST

QuantumQuipu

GRUPO DE FÍSICA TEÓRICA
UNMSM

KIPU QUANTUM

IBM

qBraid

JÜLICH
Forschungszentrum

bqb

QWORLD

UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR

Alumni USB

# Hardware Cuántico y Corrección de errores

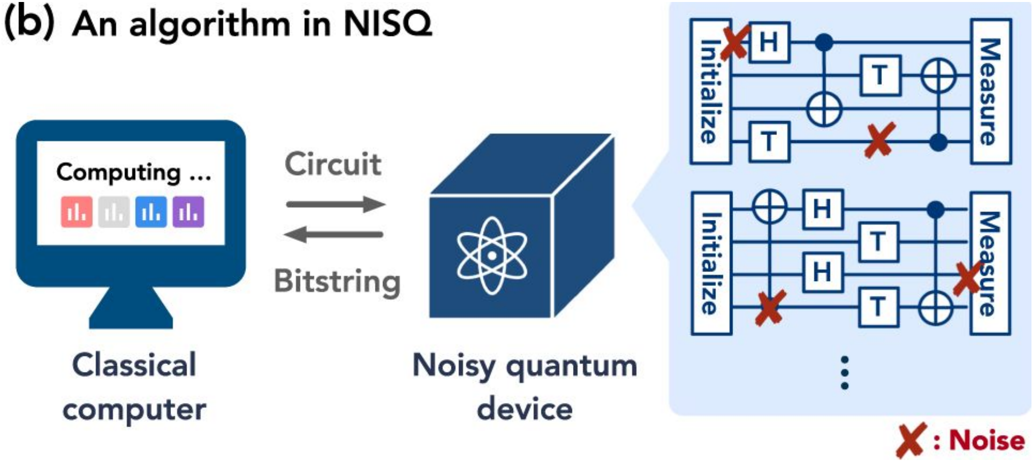
Victor Onofre

# Summary

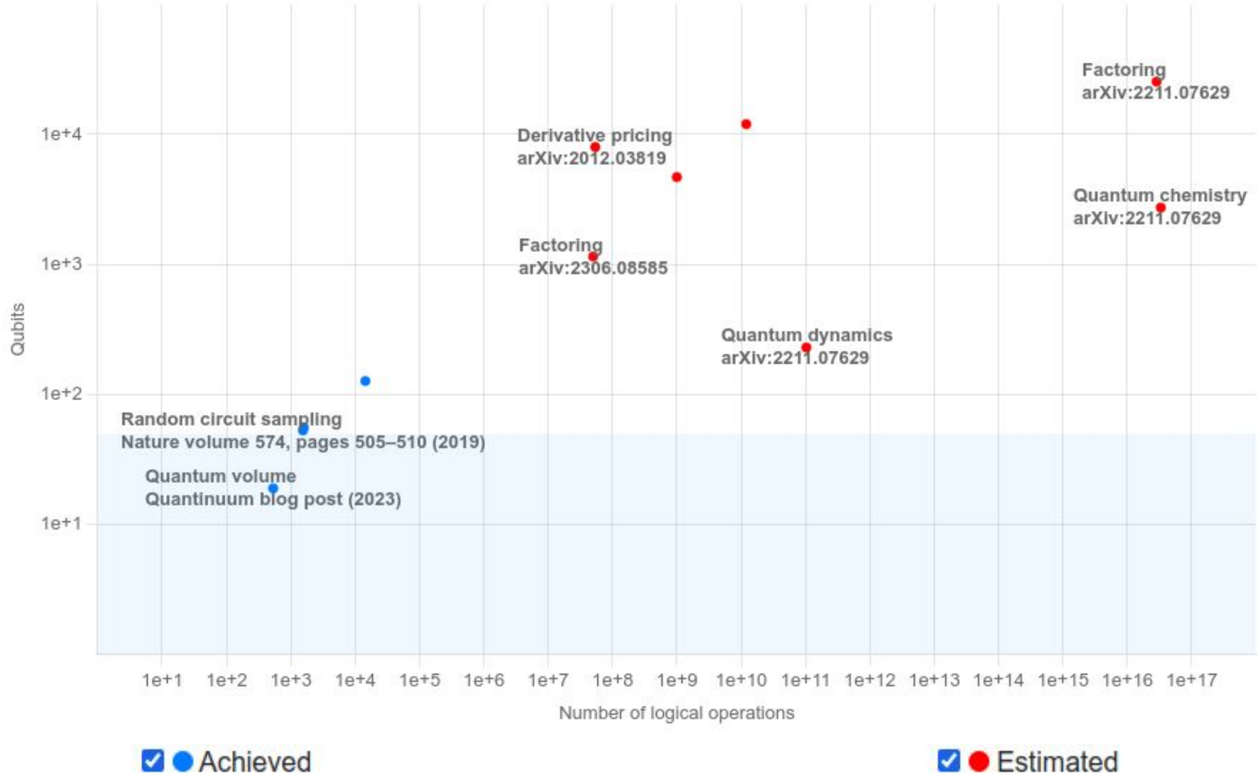
1. NISQ
2. Quantum Hardware
    a. Superconductors qubits
    b. Ion-trap
    c. Neutral atoms
    d. Photonics
3. Fault-tolerant Quantum Computing
4. Introducción a corrección de errores cuánticos
5. Conclusiones

# Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ)

- La “escala intermedia” se refiere al tamaño de las computadoras cuánticas que estarán disponibles en los próximos años, con un número de qubits que oscilara entre 50 y unos cientos.
- "Ruidoso" enfatiza que tendremos un control imperfecto sobre esos qubits. El ruido impondrá serias limitaciones a lo que los dispositivos cuánticos pueden lograr en el corto plazo.

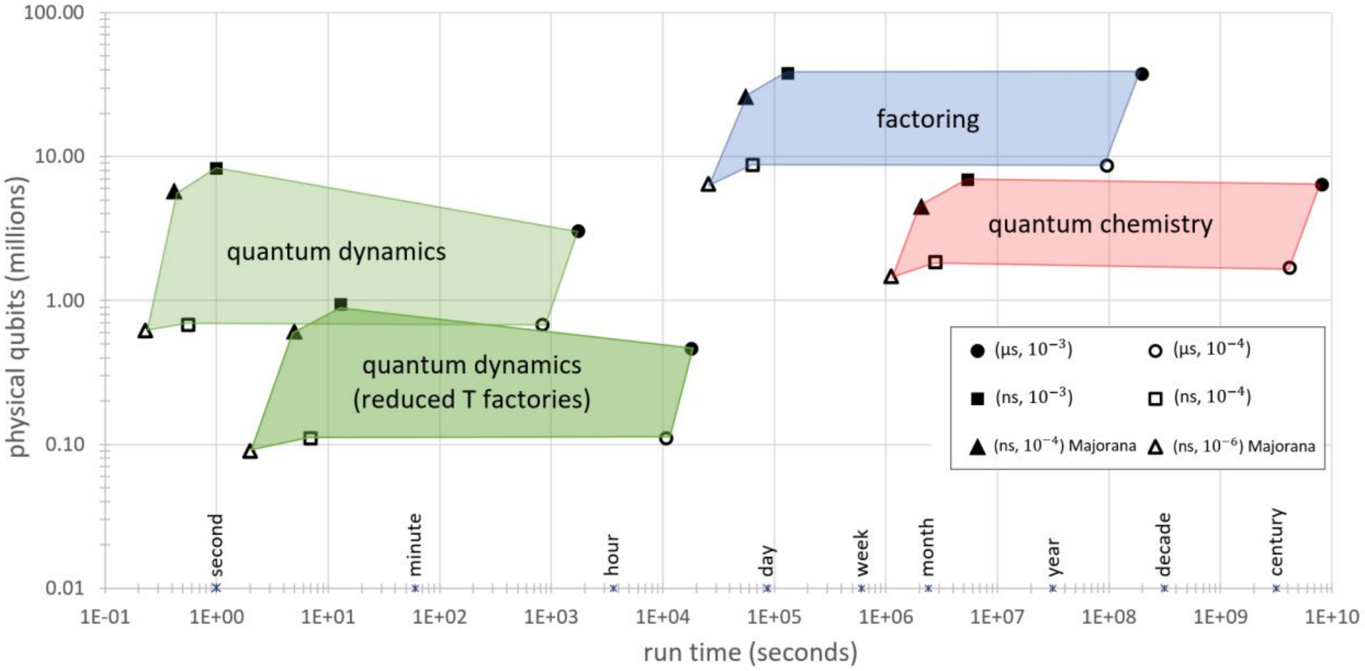


# Quantum Computers: What We Need and What We Have




https://metriq.info/Progress

# Quantum Computers: What We Need and What We Have

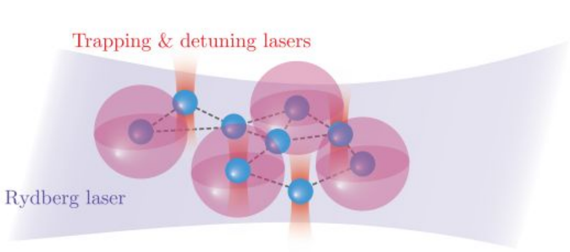


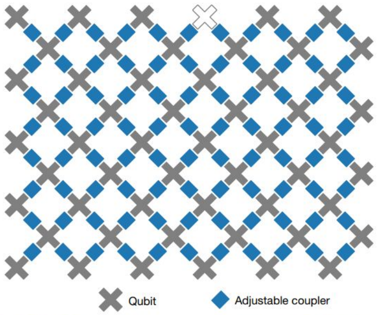

https://arxiv.org/abs/2211.07629

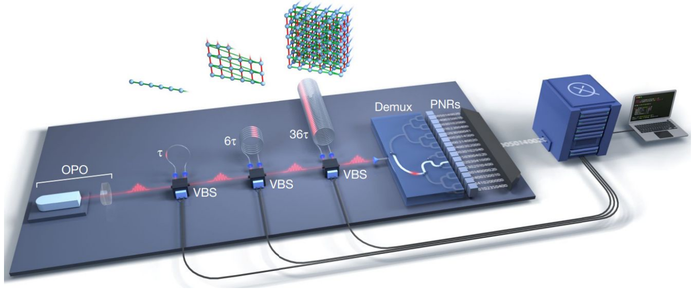
# Quantum Hardware

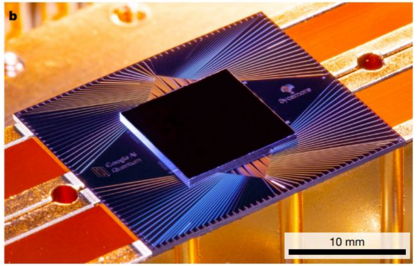
En este momento no existe una tecnología preferida para qubits:

- Fotones
- Iones atrapados
- Superconductores
- Atomos neutros
- Y muchos mas …



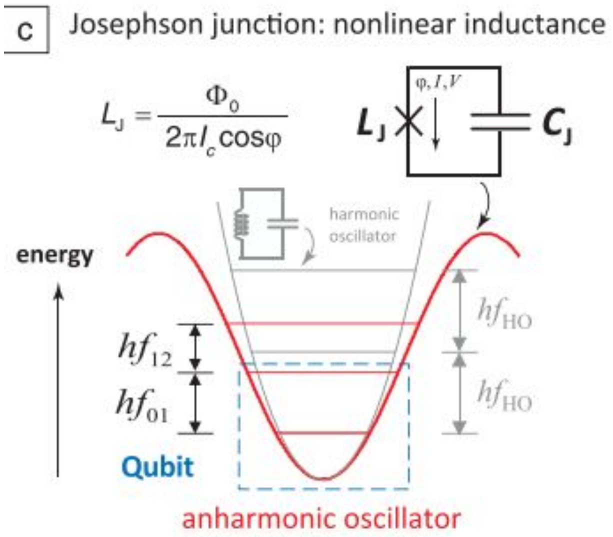



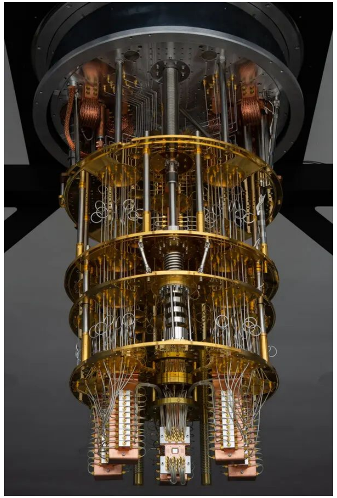




*Uno de los problemas que comparten todas estas tecnologías es que es complicado aislar suficientemente los qubits del efecto de ruido externo, esto significa que **errores en una computadora cuántica son inevitables.***

# Superconductors qubits

- Transmon qubits
- La superconductividad es la propiedad de ciertos materiales de conducir electricidad sin resistencia cuando se enfrían por debajo de una temperatura crítica.



IBM

rigetti

Google

IQM

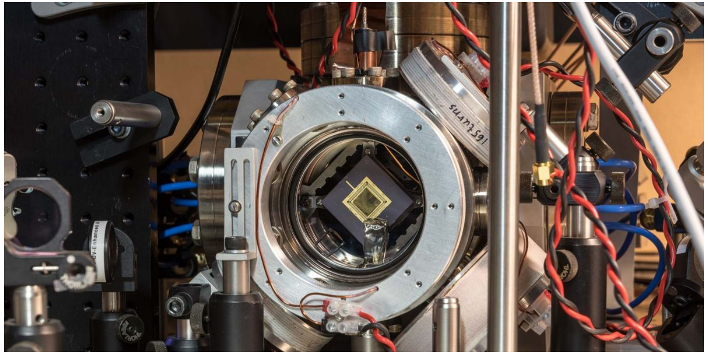
# Ion-trap qubits

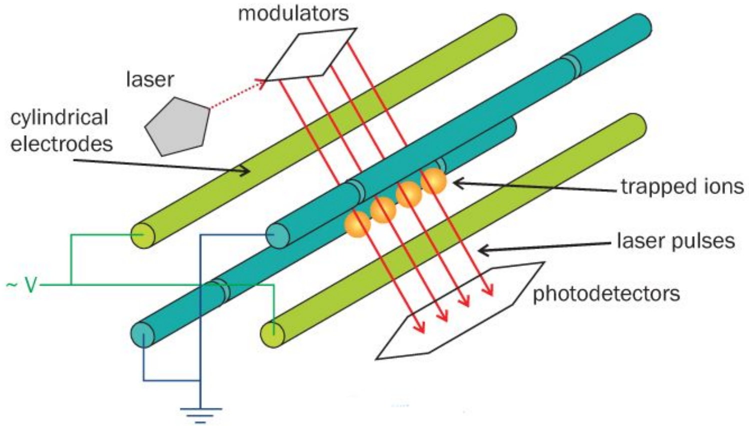
- Los qubits son iones atrapados por campos eléctricos y manipulados con láseres.

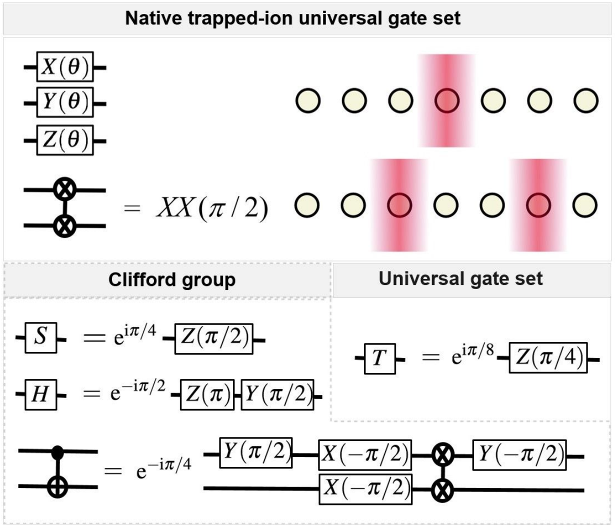
IONQ

AQT

QUANTINUUM

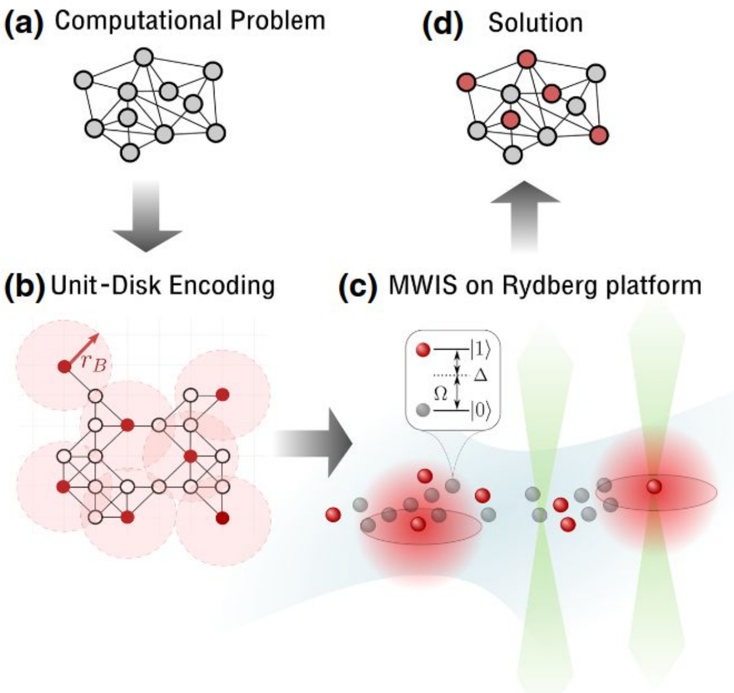


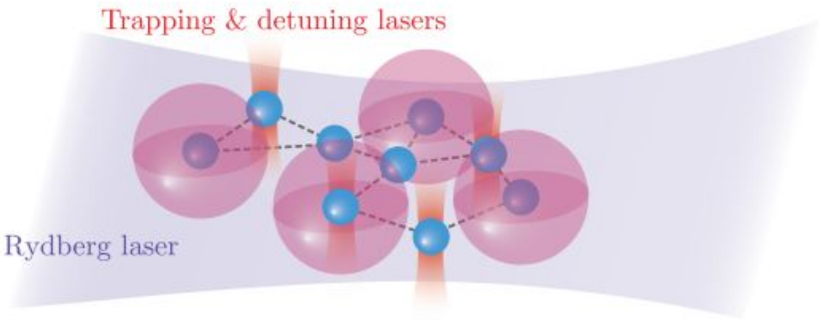


# Neutral Atoms qubits

- Basado en arrays configurables de átomos neutros individuales. Los arrays puede verse como un registro, donde cada átomo desempeña el papel de un qubit.
- Analog or digital quantum computing




PASQAL

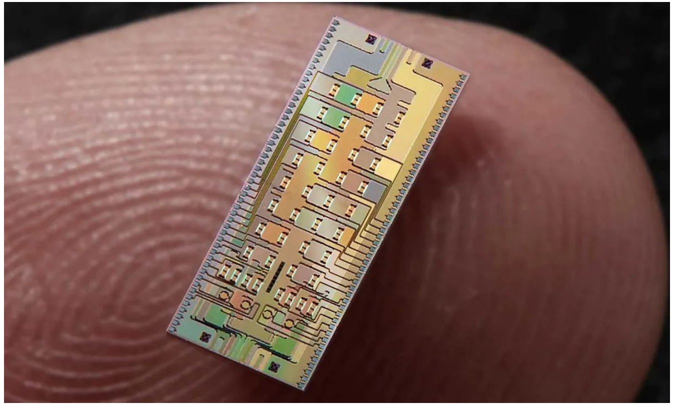
|QuEra⟩ Computing Inc.

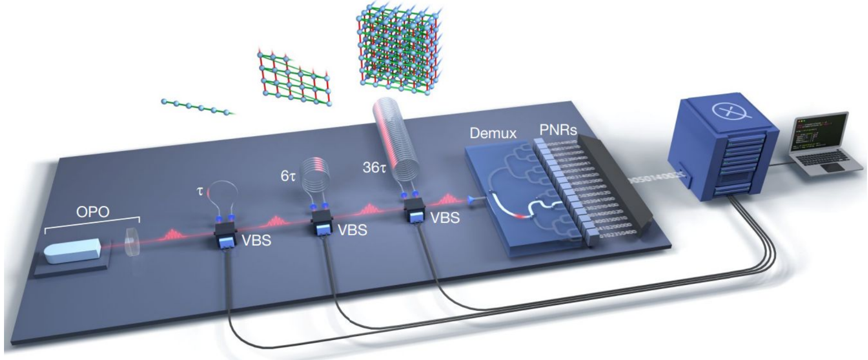
# Photonics qubits

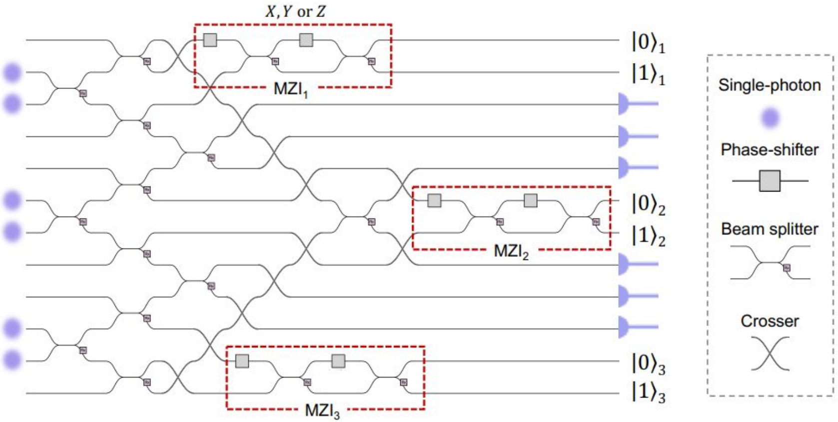
PsiQuantum

QUANDELA

XANADU

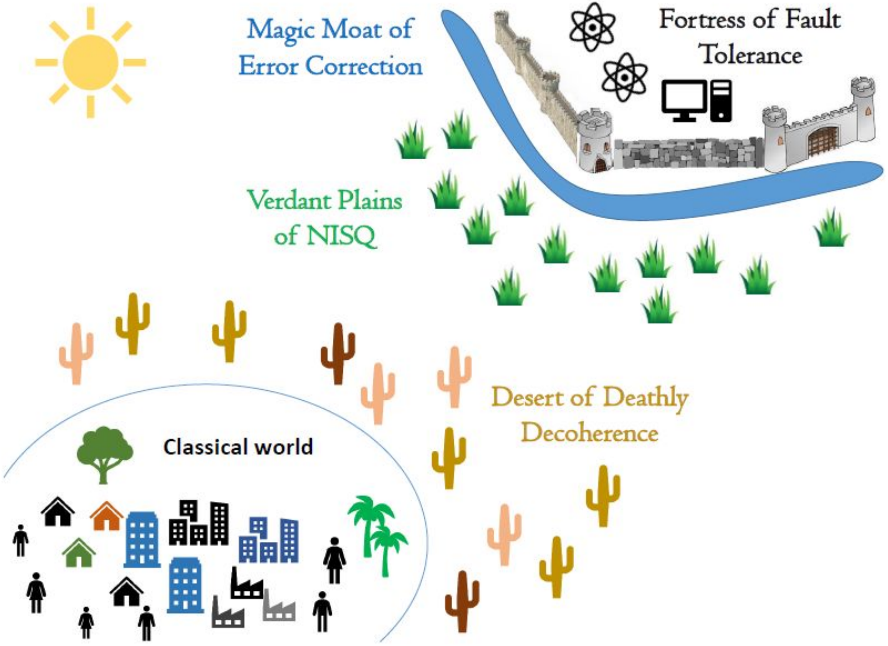




# Fault-tolerant Quantum Computing

- Tolerante a fallos (Fault-tolerant, FT) tiene como objetivo suprimir las tasas de error de algoritmos cuánticos arbitrarios
- Principios que garantizan fallas corregibles que no se propagan demasiado rápido a través de los circuitos hasta convertirse en errores lógicos incorregibles.
- Useful computation factoring (**RSA 2048**) requires ~ **10^10 gate operations**
- Asumiendo operaciones de 2 qubits con una fidelidad ~99.99% (tipicamente), 1 error por 1000 operaciones, esto lleva a **10 ^7 errores**.



# Corrección de errores clásicos

- Información clasica - “0” or “1”
- El principio básico de corrección de errores es que el número de bits utilizados para codificar **información es aumentado**
- El ejemplo más sencillo de un código de corrección de errores es el **código de repetición de tres bits**, el codigo que duplica cada bit - 0 → 000, 1 —> 111
  - Ejemplo: Un mensaje tiene un error de bit-flip durante la transmisión tal que se recibe **“010”**. En este escenario, el destinatario podrá inferir que el mensaje es **“000”** con voto mayoritario.

$$\mathcal{B} = \{0,1\} \xrightarrow{three-bit\ \ encoding} C_3 = \{000, 111\},$$

Codigo: **EECC-D4-5568**

# Desafíos de Quantum Error Correction (QEC)

- El **teorema de no clonación** para estados cuánticos

- Qubits son susceptibles a **bit-flips y phase-flips**. Códigos QEC deben de ser diseñados para detectar ambos errors simultáneamente.

- Toda medición de los qubits como parate de corrección de errores deber hacerse con cuidado para no causar que la **función de onda colapse** y se elimine la información codificada.

Codigo: **EECC-D4-5568**

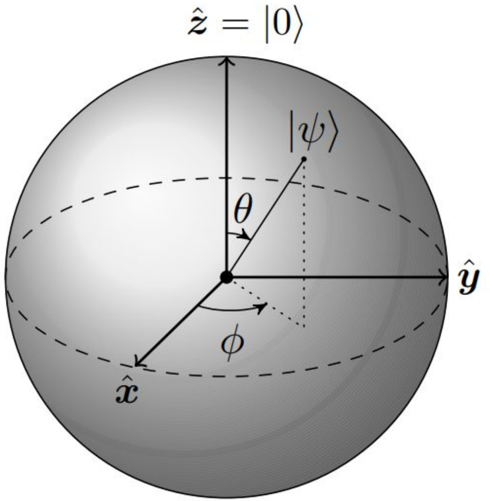
# Representación de errores cuánticos

- Qubit: $|\psi\rangle = \alpha\,|0\rangle + \beta\,|1\rangle\,, \quad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$

$$|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}\,|0\rangle + e^{i\phi}\sin\frac{\theta}{2}\,|1\rangle\,, \quad |\cos\tfrac{\theta}{2}|^2 + |e^{i\phi}\sin\tfrac{\theta}{2}|^2 = 1$$

- Errores que causa una rotación del qubit de un punto a otro pueden ser descritos por una operación unitaria $U(\delta\theta, \delta\phi)$

$$U(\delta\theta, \delta\phi)\,|\psi\rangle = \cos\frac{\theta+\delta\theta}{2}\,|0\rangle + e^{i(\phi+\delta\phi)}\sin\frac{\theta+\delta\theta}{2}\,|1\rangle\,,$$



# Representación de errores cuánticos

- Pauli Basis: $$\mathbb{1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} 0 & -\mathrm{i} \\ \mathrm{i} & 0 \end{pmatrix}, \quad Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

$$U(\delta\theta, \delta\phi)\,|\psi\rangle = \alpha_I \mathbb{1}\,|\psi\rangle + \alpha_X X\,|\psi\rangle + \alpha_Z Z\,|\psi\rangle + \alpha_Y Y\,|\psi\rangle$$

$$U(\delta\theta, \delta\phi)\,|\psi\rangle = \alpha_I \mathbb{1}\,|\psi\rangle + \alpha_X X\,|\psi\rangle + \alpha_Z Z\,|\psi\rangle + \alpha_{XZ} XZ\,|\psi\rangle\,.$$

- Todo **error coherente** puede ser descompuesto a una suma del set {I,X,Z,XZ}
- Un código de corrección de errores que tenga la habilidad de corregir errores descritos por las **matrices de Pauli X y Z** podrá corregir cualquier error coherente.
- Este efecto, conocido como la digitalización de errores, es crucial para el éxito de codigos cuanticos de corrección de errores

# Tipos de errores cuánticos

- 2 errores cuánticos fundamentales que necesitan ser detectados por codigos cuanticos
- Errores tipo-X (Bit-flips): $X|0\rangle = |1\rangle$ and $X|1\rangle = |0\rangle$

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

- Errores tipo-Z (Phase-flip): $Z|0\rangle = |0\rangle$ and $Z|1\rangle = -|1\rangle$

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

# Codigo de dos qubits

- La etapa de codificación del código de dos qubits, actuando sobre un estado general, tiene la siguiente acción: $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \xrightarrow{\text{two-qubit encoder}} |\psi\rangle_L = \alpha|00\rangle + \beta|11\rangle = \alpha|0\rangle_L + \beta|1\rangle_L$

$$|0\rangle_L = |00\rangle \text{ and } |1\rangle_L = |11\rangle \qquad |\psi\rangle_L = \alpha|00\rangle + \beta|11\rangle \neq |\psi\rangle \otimes |\psi\rangle$$

- El efecto de la operación es distribuir la información cuántica del estado inicial a través de del estado lógico entrelazado $|\psi\rangle_L$
- Priori to encoding: $|\psi\rangle \in \mathcal{H}_2 = \text{span}\{|0\rangle, |1\rangle\}$
- After encoding: $|\psi\rangle \in \mathcal{H}_4 = \text{span}\{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\}$
- Si el qubit lógico es afectado por un bit-flip en el primer qubit:

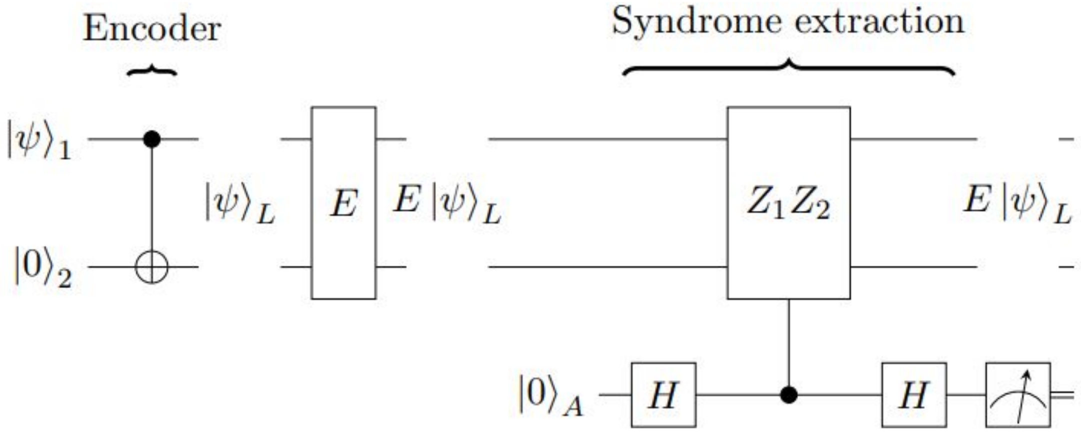
$$X_1|\psi\rangle_L = \alpha|10\rangle + \beta|01\rangle,$$

# Codigo de dos qubits

- El operador ***Z_1 Z_2*** aplicado al estado lógico da +1 eigenvalue

$$Z_1 Z_2 |\psi\rangle_L = Z_1 Z_2(\alpha |00\rangle + \beta |11\rangle) = (+1) |\psi\rangle_L$$

- Operador "estabiliza" el qubit lógico ya que lo deja sin cambios
- El resultado de la medición del qubit ancilla es conocido como "syndrome" y nos dice si el estado lógico tiene un error o no.

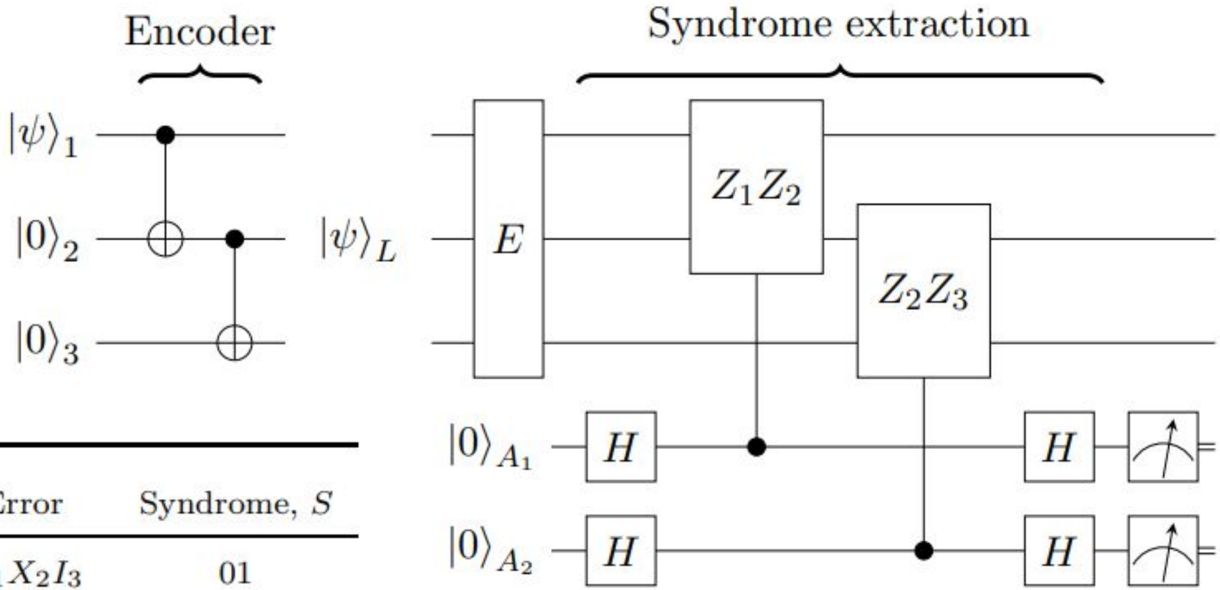



| Error | Syndrome, $S$ |
|---|---|
| $I_1 I_2$ | 0 |
| $X_1 I_2$ | 1 |
| $I_1 X_2$ | 1 |
| $X_1 X_2$ | 0 |

$$E|\psi\rangle_L |0\rangle_A \xrightarrow{\text{syndrome extraction}} \frac{1}{2}(\mathbb{1}_1\mathbb{1}_2 + Z_1Z_2)E|\psi\rangle_L |0\rangle_A + \frac{1}{2}(\mathbb{1}_1\mathbb{1}_2 - Z_1Z_2)E|\psi\rangle_L |1\rangle_A$$

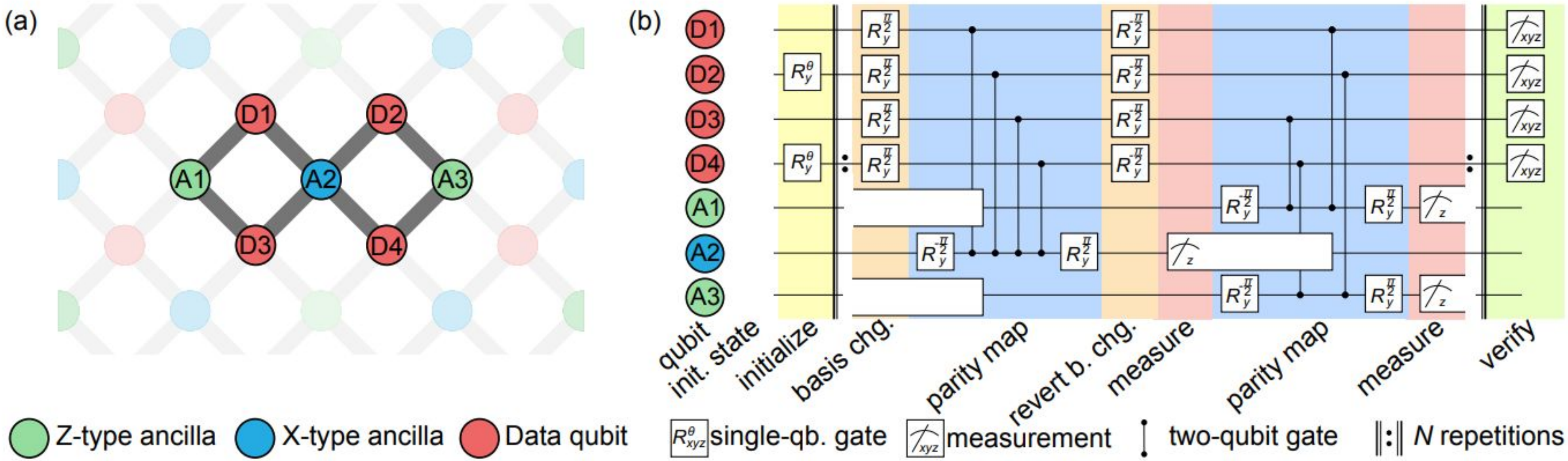
# Codigo de tres qubits

Para crear un código de corrección de errores con la habilidad de detectar y localizar errores, es necesario utilizar múltiples mediciones



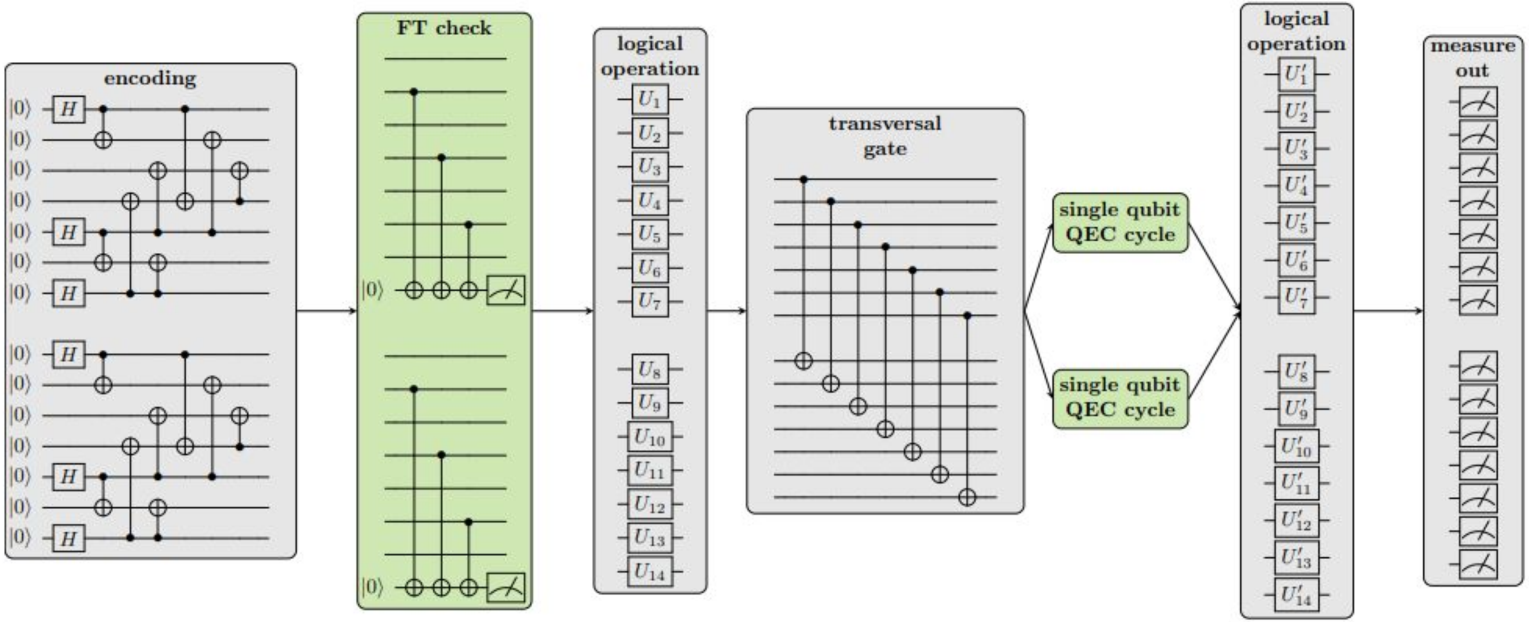

| Error | Syndrome, $S$ | Error | Syndrome, $S$ |
|---|---|---|---|
| $I_1I_2I_3$ | 00 | $X_1X_2I_3$ | 01 |
| $X_1I_2I_3$ | 10 | $I_1X_2X_3$ | 10 |
| $I_1X_2I_3$ | 11 | $X_1I_2X_3$ | 11 |
| $I_1I_2X_3$ | 01 | $X_1X_2X_3$ | 00 |

# Ejemplo surface code




Seven qubit surface code. (a) The surface code consists of a two-dimensional array of qubits. Here the data qubits are shown in red an the ancilla qubits for measuring X-type (Z-type) stabilizers in blue (green). The smallest surface code consists of seven qubits indicated by the data qubits D1-D4 and the ancilla qubits A1-A3.

# Ejemplo experimental QEC con Ion-traps




The circuit used for testing the different instantiations of the color code CNOT gate

https://arxiv.org/abs/2208.01863

# Ejemplo experimental QEC con Ion-traps

- Aplicación de una operación CNOT con QEC: Promedio experimental de **fidelity bounds [0.9957, 0.9963] or an error rate of ~ 4 x 10^ -3**
- Aplicación de una operación CNOT sin QEC: **[0.9850, 0.9903] or an error rate of ~ 1.0 x 10^ -2**

| Circuit description | Label | FT SPAM | QEC rounds | X-basis fidelity | Z-basis fidelity | Bell fidelity | Avg. fidelity bounds |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| non-FT SPAM | **SPAM1c** | no | N/A | 0.9847(8) | 0.9852(9) | - | - |
| FT SPAM | **SPAM2c** | yes | N/A | 0.99939(15) | 0.99959(13) | - | - |
| non-FT QEC | **QEC1c** | yes | 1 syn. extract. | 0.970(2) | 0.988(1) | - | - |
| FT QEC | **QEC2c** | yes | 1 FT QEC cycle | 0.9711(31) | 0.9914(8) | - | - |
| FT CNOT | **CNOT1c** | yes | none | 0.9978(5) | 0.9985(4) | 0.9940(7) | [0.9957, 0.9963] |
| FT CNOT + non-FT QEC | **CNOT2c** | yes | 1 syn. extract. | 0.942(3) | 0.971(2) | 0.914(4) | [0.9216, 0.9373] |
| FT CNOT + FT QEC | **CNOT3c** | yes | 1 FT QEC cycle | 0.917(9) | 0.976(2) | 0.921(5) | [0.8983, 0.9436] |

https://arxiv.org/abs/2208.01863

# Conclusiones

- Toda operación en hardware real tendrá ruido cuántico
- Protocolos de QEC necesitan un número muy grande de qubits para operar eficientemente
- Se necesita entender el ruido de tu dispositivo NISQ para obtener una aplicación útil
- En dispositivos NISQ es muy útil aplicar Mitigación de errores
- Progreso exponencial en el hardware se está haciendo actualmente
- *Tiempos emocionantes para estar trabajando en computación cuántica!!*

Codigo: **EECC-D4-5568**