Performance de circuitos cuánticos de baja profundidad para problemas de regresión

Sofía Perón Santana

Nicolás Legnazzi, Federico Ribetto, Omar Osenda

CONICET

UNC Universidad Nacional de Córdoba

I F E G

FAMAF Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación

Qué es el QCL?

Marco de trabajo híbrido para implementar Machine Learning en circuitos cuánticos de baja profundidad

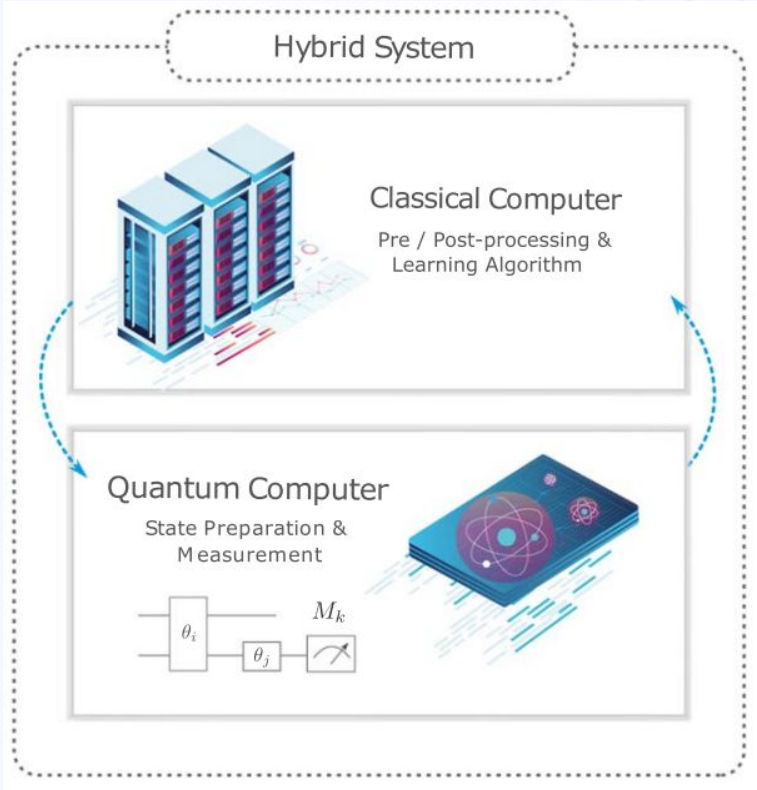
Quantum circuit learning

K. Mitarai, M. Negoro, M. Kitagawa, and K. Fujii
Phys. Rev. A **98**, 032309 – Published 10 September 2018

Qué es el QCL?

Marco de trabajo híbrido para implementar Machine Learning en circuitos cuánticos de baja profundidad

Combina implementación de un circuito cuántico parametrizado con procesamiento y optimización clásicos



Qué es el QCL?

Marco de trabajo híbrido para implementar Machine Learning en circuitos cuánticos de baja profundidad

Combina implementación de un circuito cuántico parametrizado con procesamiento y optimización clásicos

Bajo número de compuertas aplicado a cada qubit (en comparación a otros algoritmos) resultando más fácil su implementación en hardware.

Algoritmo

Aprendizaje Supervisado

Input → **Modelo** → **Output**

Datos $\{x_i\}$

Etiquetas $\{f(x_i)\}$

Red Neuronal

$$y_i = y(x_i, \theta)$$

$$f(x_i) \simeq y_i$$

¿Cómo? Optimizando θ → **Pesos**

Algoritmo

Aprendizaje Supervisado

Input → Modelo → Output

Datos $\{x_i\}$

Etiquetas $\{f(x_i)\}$

Red Neuronal

$y_i = y(x_i, \theta)$

$f(x_i) \simeq y_i$

¿Cómo? Optimizando θ → **Pesos**

Quantum Circuit Learning

$|\psi_{in}(x_i)\rangle$

Se codifican como estados cuánticos

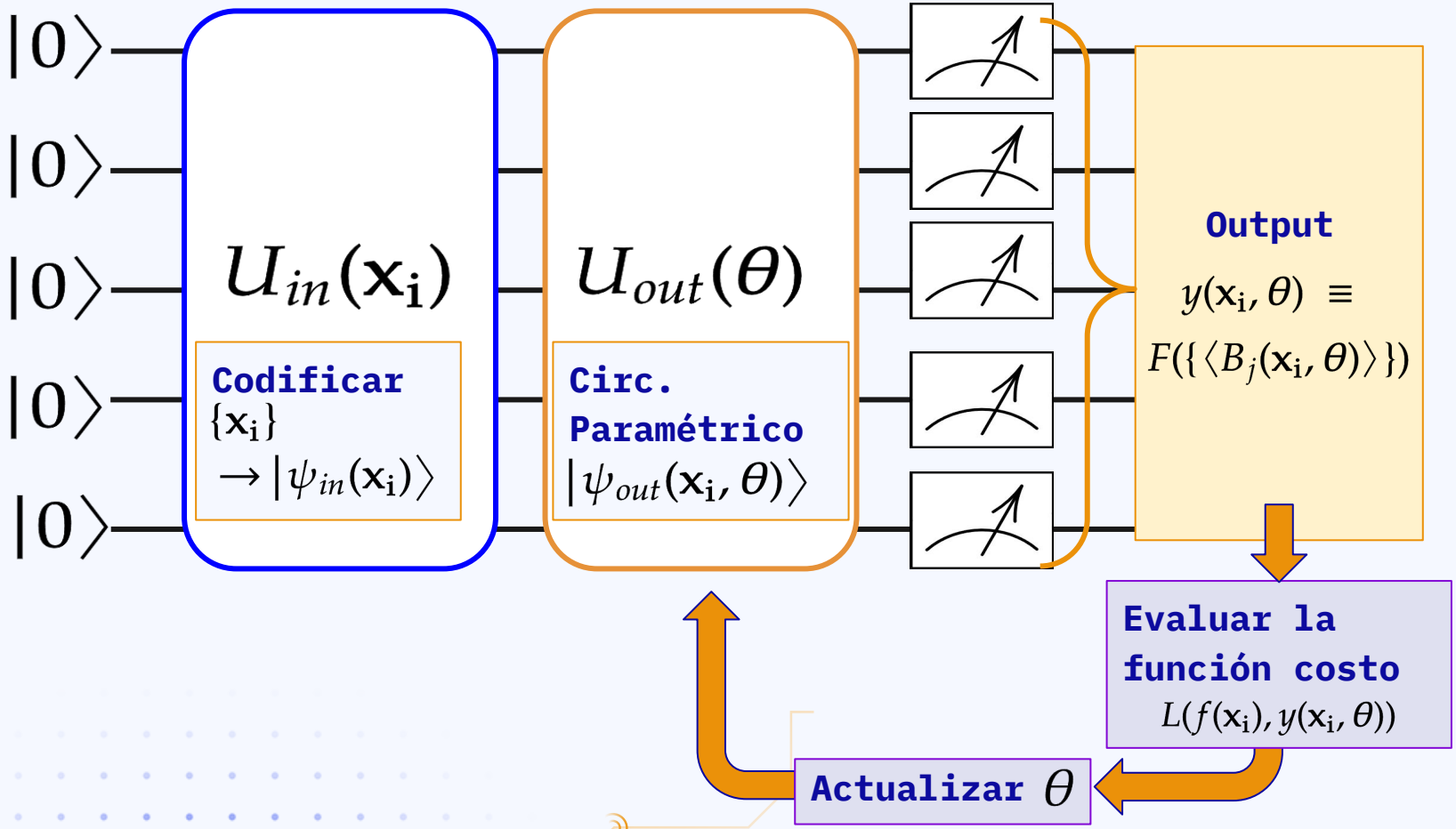
Circuito Cuántico Parametrizado

Función de valores de expectación

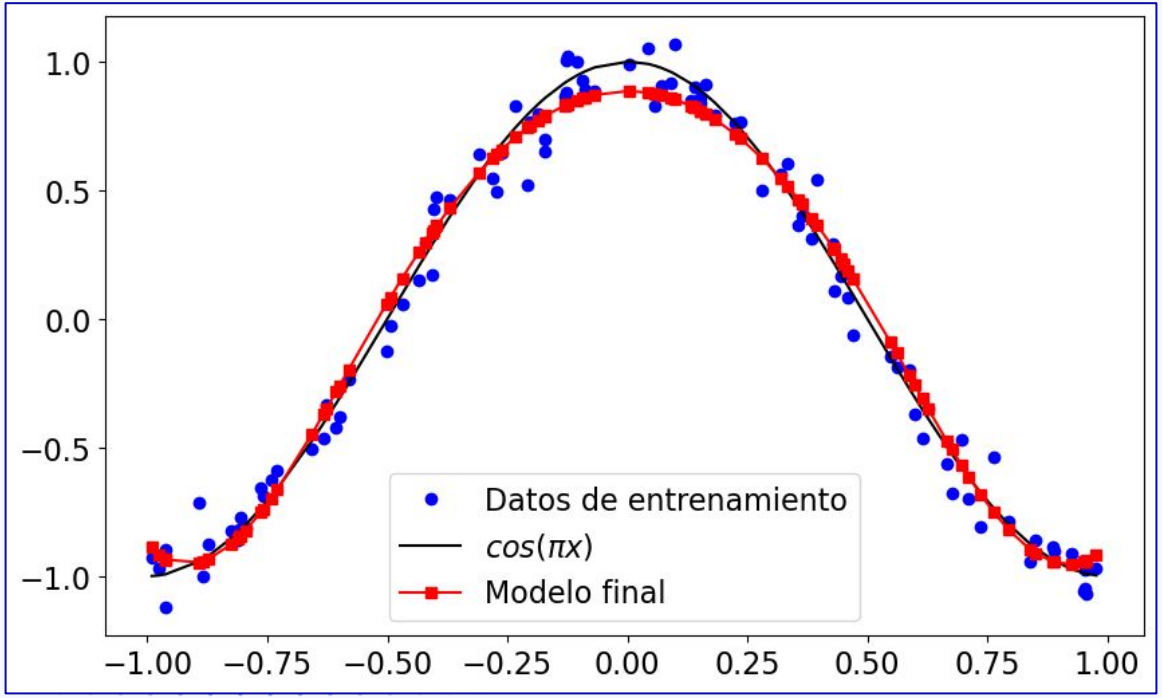
$y(x_i, \theta) \equiv F(\{\langle B_j(x_i, \theta)\rangle\})$

¿Cómo? Optimizando θ → **Parámetros del circuito**

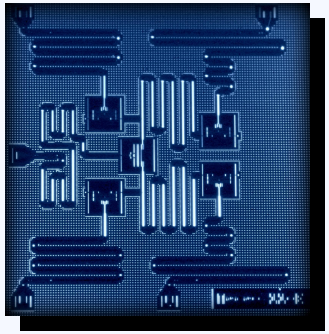
Algoritmo

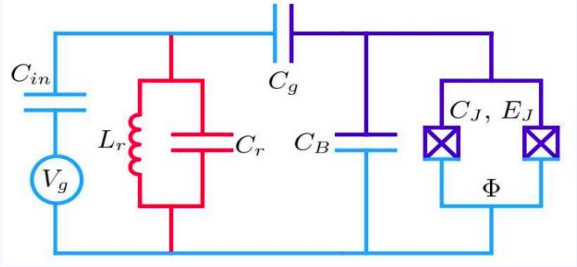

$|0\rangle$
$|0\rangle$
$|0\rangle$
$|0\rangle$
$|0\rangle$
$U_{in}(\mathbf{x_i})$
Codificar
$\{\mathbf{x_i}\}$
$\rightarrow |\psi_{in}(\mathbf{x_i})\rangle$
$U_{out}(\theta)$
Circ.
Paramétrico
$|\psi_{out}(\mathbf{x_i}, \theta)\rangle$
Output
$y(\mathbf{x_i}, \theta) \equiv$
$F(\{\langle B_j(\mathbf{x_i}, \theta)\rangle\})$
Evaluar la
función costo
$L(f(\mathbf{x_i}), y(\mathbf{x_i}, \theta))$
Actualizar θ

Aplicación: ajuste de funciones (regresión)

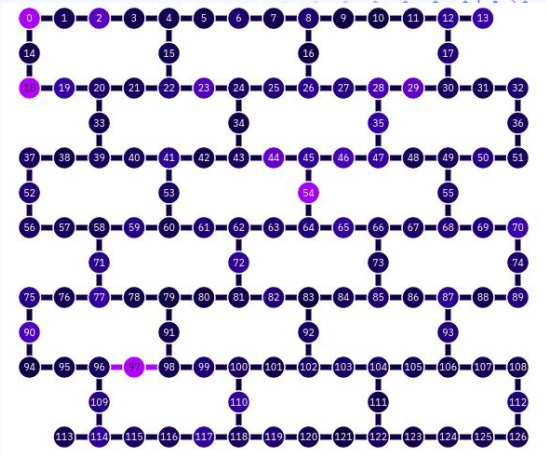


Hardware usado: IBM Brisbane



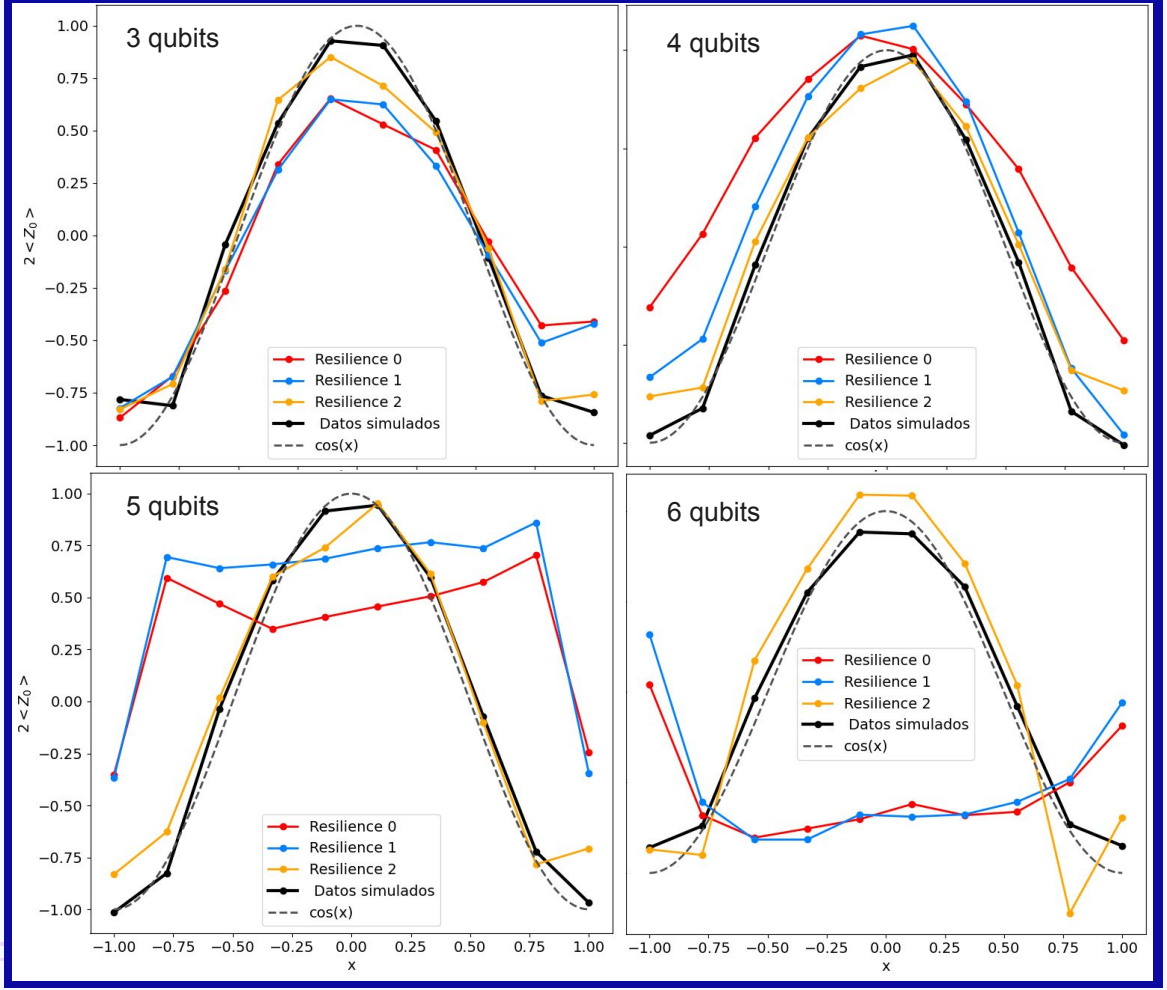


Transmón: Cooper pair box + inductancias y capacitancias



Resilience	Definition	Technique
0	No mitigation	None
1 [Default]	Minimal mitigation costs: Mitigate error associated with readout errors	Twirled Readout Error eXtinction (TREX) measurement twirling
2	Medium mitigation costs. Typically reduces bias in estimators, but is not guaranteed to be zero-bias.	Level 1 + Zero Noise Extrapolation (ZNE) and gate twirling

https://docs.quantum.ibm.com/guides/configure-error-mitigation



N	Resil.	MSE exp.	MSE ajuste
3	0	0.07	0.02
	1	0.06	
	2	0.009	
4	0	0.3	0.006
	1	0.04	
	2	0.02	
5	0	0.6	0.004
	1	0.7	
	2	0.01	
6	0	1	0.001
	1	1	
	2	0.04	

Podemos modelar teóricamente el ruido?

Reconstrucción del proceso

Todo proceso cuántico

$$\rho_i \xrightarrow{\mathcal{C}} \widetilde{\rho}_i$$

tiene una representación de Kraus

$$\widetilde{\rho}_i = \sum_j K_j \rho_i K_j^\dagger$$

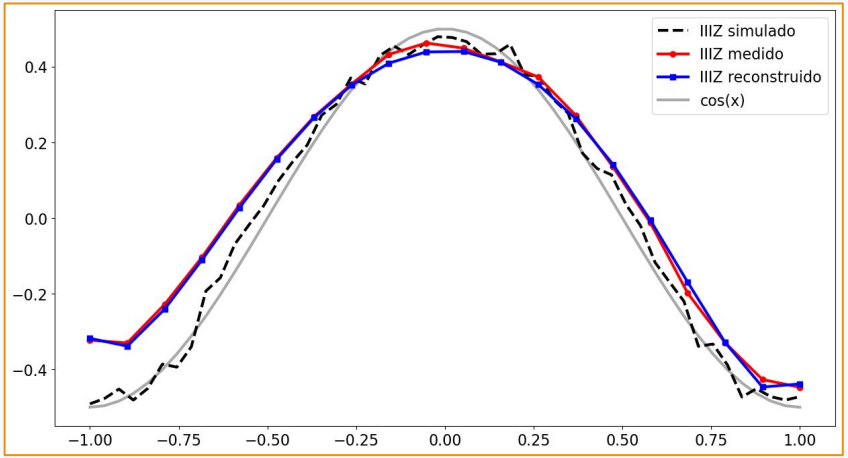
Tomografía de Procesos Cuánticos

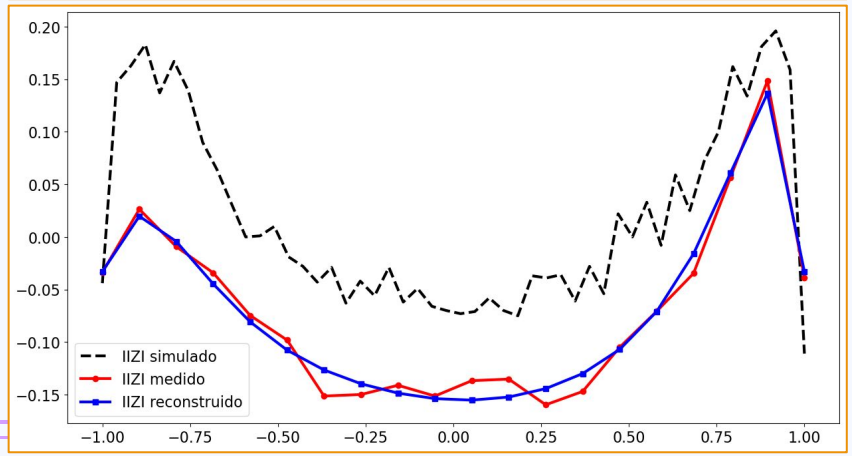
Aprendiendo los operadores de Kraus

$$\mathcal{L}\left[\sum_{ij}\left(M_{ij} - \widetilde{M}_{ij}\right)^2\right] = \mathcal{L}[\{K_j\}]$$

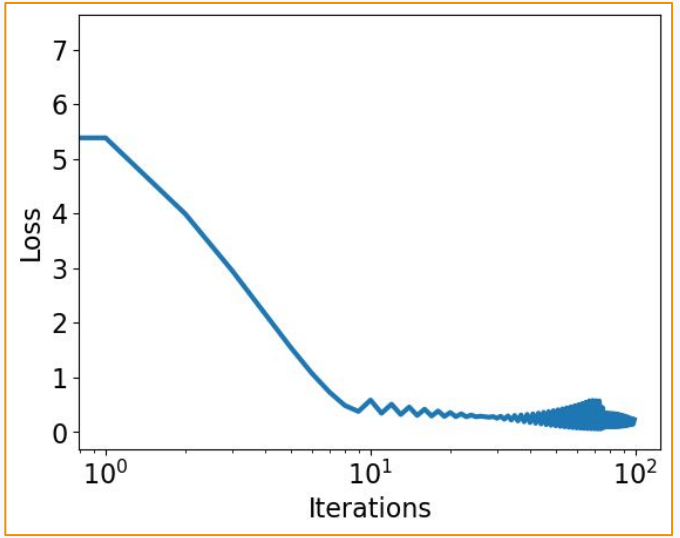
$$M_{ij} = Tr(\rho_i O_j) \qquad \widetilde{M}_{ij} = Tr\left(\widetilde{\rho}_i O_j\right)$$

Reconstrucción del proceso





4 qubits – resilience 1



Podemos invertir este proceso?

Podemos invertir este proceso?

Necesitamos el estado cuántico resultante del circuito

Tomografía de estados cuánticos

$$\mathcal{F}\left(\text{Mediciones}\right) \rightarrow \widetilde{\rho}$$

Medimos sobre el conjunto completo de observables de Pauli

$$\widetilde{\rho} = \sum_{\alpha_i} \frac{Tr\left(\sigma_1^{\alpha_1} \otimes \sigma_2^{\alpha_2} \otimes \ldots \otimes \sigma_N^{\alpha_N} \rho\right) \sigma_1^{\alpha_1} \otimes \sigma_2^{\alpha_2} \otimes \ldots \otimes \sigma_N^{\alpha_N}}{2^N}$$

Construimos la matriz densidad

$$\alpha_i = 0, 1, 2, 3$$

Tomografía de estados cuánticos

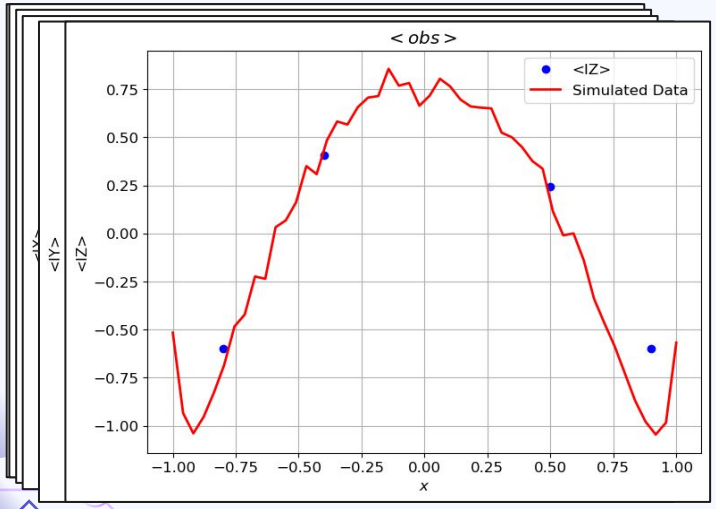
4^N OBSERVABLES

2 qubits → 16 observables

3 qubits → 64 observables

4 qubits → 256 observables

Resilience 0



$\tilde{\rho}_i$

Chequeamos:

- **Tr(ρ) = 1**
- **Autovalores positivos**
- **Tr($ρ^2$) < 1**

ESTAMOS ACÁ

Conclusiones - Propuestas

- **Hacen falta más mediciones**
- **Medidas de entrelazamiento**
- **Dependencia con la arquitectura del circuito**

Muchas Gracias!

