Introducción a la Computación Cuántica con Qiskit

1st Mexican NISQ Era Quantum Computing Opportunities School
https://indico.cern.ch/event/1276587/

Luis Villaseñor
Profesor Visitante
CIIEC-BUAP
Profesor de Asignatura
ENES Morelia UNAM

16/Junio/2023

Contenido

1. Introducción a la Mecánica Cuántica
1.1 Superposición de Estados Cuánticos
1.2 Entrelazamiento Cuántico
1.3 Interferencia y Medición

2. Introducción a la Computación Cuántica
2.1 Superposición con 1 Qubit
2.2 Superposición con 2 Qubits
2.3 Computación Cuántica vs Clásica
2.4 Implementación de los Qubits
2.5 Ejemplos de Tecnologías

3. Compuertas Cuánticas

4. Introducción a Python y a la Programación Cuántica con Qiskit

5. Algoritmos Cuánticos

6. Parte Práctica

Parte Práctica

1. Introducción a Qiskit
1.1 Instalación de Qiskit
1.2 Tutoriales de Qiskit

2. Programación Cuántica usando Qiskit
2.1 Repaso de Compuertas Cuánticas
2.2 Un Primer Circuito Cuántico Arbitrario
2.3 Circuito Cuántico para Superposición Simétrica
2.4 Uso de una Computadora Cuántica Real de IBM Quantum Experience
2.5 Cálculo de Valores de Expectación de Operadores

3. Entrelazamiento de 2 Qubits. Estados de Bell
3.1 Ejemplo de Suma de Espines para 2 Electrones con Qiskit

4. Entrelazamiento de 3 Qubits. Estado GHZ
4.1 Estado GHZ con Ruido Simulado Acorde con una Computadora Real
4.2 Estado GHZ en una Computadora Real

Parte Práctica

5. Teleportación Cuántica

5.1 Sustento Matemático del Protocolo de Teleportación Cuántica

5.2 Teleportación Cuántica en una Computadora Real

6. Desigualdad de Bell

6.1 Predicción de EPR

6.2 Predicción de la Mecánica Cuántica

6.3 Prueba de Bell en una Computadora Cuántica Simulada Ideal

6.4 Prueba de Bell en una Computadora Cuántica Simulada con Ruido

6.5 Prueba de Bell en una Computadora Cuántica Real

7. Prueba de GHZ (Greenberger–Horne–Zeilinger). Contradicción entre la MC y una Teoría Local de Variables Ocultas

Parte Práctica con Jupyter Notebook en Google Colab

En el siguiente link podrán descargar el material del taller

https://github.com/lvillasen/Escuela-Computacion-Cuantica-2023

1. Mecánica Cuántica

Rama de la Física que explica la materia
y la energía a nivel atómico y sub-atómico.
Surgió en las primeras 3 décadas del siglo pasado

La materia, la energía, el momento angular,
la carga, el momento lineal de las partículas
sub-atómicas están cuantizados

Reunión Solvay de 1927

Cuanto de Energía de Planck para un Fotón

$$E = h\nu$$

h = 6.6262 x 10^{-34} J•s
v = frequency (Hz)

Longitud de Onda de de Broglie

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}$$

Ecuación de Schrodinger

$$\left[\frac{-\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V\right]\Psi = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\Psi$$

Para una partícula libre

$$\psi(\mathbf{r},t) = Ae^{i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}-\omega t)} = Ae^{i(\mathbf{p}\cdot\mathbf{r}-Et)/\hbar}$$

Interpretación de la Función de Onda

$$\rho(\mathbf{r},t) = \psi^*(\mathbf{r},t)\psi(\mathbf{r},t) = |\psi(\mathbf{r},t)|^2$$

Condición de Normalización

$$\int_{\text{all space}} |\psi(\mathbf{r},t)|^2 d^3\mathbf{r} = 1$$

1.1 Mecánica Cuántica. Superposición de Estados

Para un sistema cuántico de 2 estados

Ket $$|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

Bra $$\langle\Psi| = \alpha^*\langle 0| + \beta^*\langle 1|$$

alfa y beta son números complejos

Al medir $|\psi\rangle$ siempre se obtiene $|0\rangle$ o $|1\rangle$

(colapso de la función de onda)

Condición de normalización

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

Ejemplo de un sistema de 2 estados es el espin del electrón

Representación matricial

Ket $$|0\rangle = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}, \quad |1\rangle = \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}$$

Bra $$\langle 0| := \begin{pmatrix}1 & 0\end{pmatrix}$$

$$|\psi\rangle = \begin{pmatrix}\alpha\\\beta\end{pmatrix}$$

Bra $$\langle 1| := \begin{pmatrix}0 & 1\end{pmatrix}$$

Gato de Schrodinger

$|cat\rangle = \alpha$ $+ \beta$

Producto Tensorial

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

$$|\Phi\rangle = \gamma|0\rangle + \delta|1\rangle$$

$$|\Psi\rangle|\Phi\rangle = |\Psi\rangle \otimes |\Phi\rangle = |\Psi\Phi\rangle$$

$$\begin{aligned}|\Psi\Phi\rangle &= \big(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle\big) \otimes \big(\gamma|0\rangle + \delta|1\rangle\big)\\ &= \alpha\gamma|00\rangle + \alpha\delta|01\rangle + \beta\gamma|10\rangle + \beta\delta|11\rangle\end{aligned}$$

1.1 Mecánica Cuántica. Superposición de Estados

Para un sistema cuántico de 4 estados. Por ejemplo un sistema compuesto de dos subsistimos de 2 estados cada uno

$$|\psi\rangle = \alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle$$

La medición de este sistema tiene 2^2 resultados posibles y se representa como la superposición de esos 4 estados base

Condición de normalización

$$|\alpha_{00}|^2 + |\alpha_{01}|^2 + |\alpha_{10}|^2 + |\alpha_{11}|^2 = 1.$$

Representación matricial

$$|00\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, |01\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, |10\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \text{and } |11\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$|a\rangle = a_{00}|00\rangle + a_{01}|01\rangle + a_{10}|10\rangle + a_{11}|11\rangle = \begin{bmatrix} a_{00} \\ a_{01} \\ a_{10} \\ a_{11} \end{bmatrix}$$

En general un sistema cuántico compuesto por n subsistimos de 2 estados c/use representa como la superposición de 2^n estados base.
Una medicación
colapsa su función de onda a uno de esos estados base

1.2 Mecánica Cuántica. Entrelazamiento Cuántico

Dos partículas o dos qubits están entrelazados cuando la medición de uno determina instantáneamente el estado cuántico del otro sin importar a qué distancia estén entre si.

Estados de Bell

$$|\Phi^{\pm}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle \pm |11\rangle) \qquad |\Psi^{\pm}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle \pm |10\rangle)$$

Ejemplo de Estados Entrelazados que no son Estados de Bell

$$|\psi\rangle = \cos(\theta)|00\rangle + \sin(\theta)|11\rangle$$

Paradoja EPR en 1935

A. Einstein B. Podolsky N. Rosen

Desigualdad de Bell en 1964

Los estados factorizarles NO están entrelazados

Producto Tensorial

$$|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$
$$|\Phi\rangle = \gamma|0\rangle + \delta|1\rangle$$

$$|\Psi\rangle|\Phi\rangle = |\Psi\rangle \otimes |\Phi\rangle = |\Psi\Phi\rangle$$

$$|\Psi\Phi\rangle = (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) \otimes (\gamma|0\rangle + \delta|1\rangle)$$
$$= \alpha\gamma|00\rangle + \alpha\delta|01\rangle + \beta\gamma|10\rangle + \beta\delta|11\rangle$$

1.3. Desigualdad de Bell

Desigualdad de Bell en 1964

Brian Green

https://www.youtube.com/watch?v=UZiwtfrisTQ

A popular exposition of Bell's theorem can be found in N.D.Mermin, "Bringing home the atomic world: Quantum mysteries for anybody", Am. J. Phys. 49, 940-3 (1981). An expanded version of this paper can be found as Ch.12 in N.D.Mermin, Boojums all the way through (Cambridge U.P., Cambridge, 1990). See also N.D.Mermin, "Is the moon there when nobody looks? Reality and the quantum theory", Phys. Today 38 (4), 38-47 (1985).

1.3 Mecánica Cuántica. Interferencia y Medición

1801 Thomas Young

Lo que se esperaría clásicamente para partículas

Lo que se observa. Las partículas interfieren como ondas pero se Observan como partículas

Images Public Domain: by Inductiveload, Modified

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

Al medir $|\psi\rangle$ siempre se obtiene $|0\rangle$ o $|1\rangle$

(colapso de la función de onda)

Para saber más sobre Mecánica Cuántica

http://www.librosmaravillosos.com/

Premio Nobel de Física 2022, La contribución y sus implicaciones
José Luis Lucio. CIIEC-BUAP

https://www.facebook.com/CiiecBuap/videos/1195263281058560/

2. Introducción a la Computación Cuántica

Nueva manera de hacer cómputo usando las leyes de la mecánica cuántica para resolver problemas demasiado complejos para las computadoras tradicionales a través de la Superposición, el Entrelazamiento y la Interferencia Cuántica

Hay varios modelos de computación cuántica: Circuitos Cuánticos, máquina de Turing Cuántica, Recocido (Annealing) Cuántico y Computación Cuántica Adiabática.

Veremos Circuitos Cuánticos en detalle.

Matemático Ruso Yuri Manin en 1980

Algoritmo de Factorización de Shor en 1994

Richard Feynman en 1981

Physics of Computation Conference Endicott House MIT May 6-8, 1981

2.1 Computación Cuántica. Superposición con 1 Qubit

Un qubit es un sistema cuántico con dos estados

descrito por la superposición de los 2 estados $|0\rangle$ y $|1\rangle$

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad |\psi\rangle = \begin{pmatrix}\alpha\\ \beta\end{pmatrix}$$

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \qquad |0\rangle = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} \quad |1\rangle = \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}$$

alfa y beta son números complejos

Al medir $|\psi\rangle$ **siempre se obtiene** $|0\rangle$ **o** $|1\rangle$

(colapso de la función de onda)

Otras bases posibles para representar el estado de Superposición de un qubit son:

$$|+\rangle = \frac{|0\rangle+|1\rangle}{\sqrt{2}} \quad |-\rangle = \frac{|0\rangle-|1\rangle}{\sqrt{2}} \qquad |R\rangle = \frac{|0\rangle+i|1\rangle}{\sqrt{2}} \quad |L\rangle = \frac{|0\rangle-i|1\rangle}{\sqrt{2}}$$

$$|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1\\1\end{pmatrix} \quad |-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1\\-1\end{pmatrix}$$

Esfera de Bloch

$$|\psi\rangle = cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + e^{i\varphi}sin\frac{\theta}{2}|1\rangle$$

Beckers, Arnout & Tajalli, Armin & Sallese, Jean-Michel. (2019). A Review on Quantum Computing: Qubits, Cryogenic Electronics and Cryogenic MOSFET Physics.

2.2 Computación Cuántica. Superposición con 2 Qubits

La medición de 2 qubits tiene 2^2 resultados posibles y se representa como la superposición de esos 4 estados base

$$|00\rangle = |0\rangle \otimes |0\rangle = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}1\\0\\0\\0\end{pmatrix}$$

$$|01\rangle = |0\rangle \otimes |1\rangle = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}0\\1\\0\\0\end{pmatrix}$$

$$|10\rangle = |1\rangle \otimes |0\rangle = \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}0\\0\\1\\0\end{pmatrix}$$

$$|11\rangle = |1\rangle \otimes |1\rangle = \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}0\\0\\0\\1\end{pmatrix}$$

$$|0\rangle \otimes |1\rangle = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}1 \cdot \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}\\ 0 \cdot \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}1\cdot 0\\1\cdot 1\\0\cdot 0\\0\cdot 1\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}0\\1\\0\\0\end{pmatrix}$$

$$|\psi\rangle = \alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle$$

$$|\alpha_{00}|^2 + |\alpha_{01}|^2 + |\alpha_{10}|^2 + |\alpha_{11}|^2 = 1$$

$$|a\rangle = a_{00}|00\rangle + a_{01}|01\rangle + a_{10}|10\rangle + a_{11}|11\rangle = \begin{bmatrix}a_{00}\\a_{01}\\a_{10}\\a_{11}\end{bmatrix}$$

En general un sistema de n qubits se representa como la superposición de 2^n estados base y una medicación colapsa su función de onda a uno de esos estados base

2.3 Computación Cuántica vs Clásica

Classical vs Quantum Computing Terms

Source: Caltech Entrepreneurs Forum, Feb 23, 2019

	Classical	Quantum
Basic Unit	Binary Bit (1 or 0)	**Qbit** (vector)
Computing	Logical Operation	**Unitary** Operation
Description	Truth Table (True/False)	**Unitary** Matrix
Direction	Most Gates Run Forward	Gates are Reversible
Copying	Easy	Impossible
Noise	Minimal w/Error Correction	**Quantum Error Correction** (Very Difficult)
Storage	n-bit storage holds 1 value. from 0 to 2**n - 1	n-qbits storage holds 2**n values
Computation	n-bit processor = 1 operation	n-qbit processor = 2**n operations

En computación clásica N bits representan un estado de una computadora clásica (un numero entre 0 y 2^N-1)

En computación cuántica N qubits representan 2^N estados en un espacio vectorial de dimensión 2^N en C

2.3 Computación Cuántica vs Clásica

En computación clásica N bits representan un estado
de una computadora clásica (un número entre 0 y 2^N-1)

En computación cuántica N qubits representan 2^N
estados en un espacio vectorial de dimensión 2^N en los complejos

Para N = 3 qubits $$|\psi\rangle = \alpha_0|000\rangle + \alpha_1|001\rangle + \alpha_2|010\rangle + +\alpha_3|011\rangle + \ldots + \alpha_7|111\rangle$$

Para N qubits $$|\psi\rangle = \alpha_0|00000...000\rangle + \alpha_1|00000..001\rangle + \alpha_2|00000..010\rangle + \ldots + \alpha_{2^N-1}|11111..111\rangle$$

Para simular una computadora cuántica de N qubits
en una clásica requerimos al menos una memoria
de 8*2*2^N bytes

Por ejemplo para N = 40 se requieren
17.6 TB
Este número tan alto es una motivación en sí
para desarrollar computadoras cuánticas
para simular procesos cuánticos

2.4 Computación Cuántica. Implementación de los Qubits

Physical support	Name	Information support	$\|0\rangle$	$\|1\rangle$
Photon	Polarization encoding	Polarization of light	Horizontal	Vertical
	Number of photons	Fock state	Vacuum	Single photon state
	Time-bin encoding	Time of arrival	Early	Late
Coherent state of light	Squeezed light	Quadrature	Amplitude-squeezed state	Phase-squeezed state
Electrons	Electronic spin	Spin	Up	Down
	Electron number	Charge	No electron	One electron
Nucleus	Nuclear spin addressed through NMR	Spin	Up	Down
Optical lattices	Atomic spin	Spin	Up	Down
Josephson junction	Superconducting charge qubit	Charge	Uncharged superconducting island (Q=0)	Charged superconducting island (Q=2e, one extra Cooper pair)
	Superconducting flux qubit	Current	Clockwise current	Counterclockwise current
	Superconducting phase qubit	Energy	Ground state	First excited state
Singly charged quantum dot pair	Electron localization	Charge	Electron on left dot	Electron on right dot
Quantum dot	Dot spin	Spin	Down	Up
Gapped topological system	Non-abelian anyons	Braiding of Excitations	Depends on specific topological system	Depends on specific topological system
Vibrational qubit[15]	Vibrational states	Phonon/vibron	$\|01\rangle$ superposition	$\|10\rangle$ superposition
van der Waals heterostructure[16]	Electron localization	Charge	Electron on bottom sheet	Electron on top sheet

Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/Qubit

2.5 Computación Cuántica. Ejemplos de Tecnologías

D-Wave tiene un sistema de 5640 qubits usando su Pegasus chip

Quantum Annealing

Quantum Hamiltonian is an operator on Hilbert space:

$$\mathcal{H}(t) = \mathcal{E}(t)\left[\sum_i a_i\,\sigma_i{}^z + \sum_{i<j} b_{ij}\,\sigma_i{}^z\sigma_j{}^z\right] + \Delta(t)\sum_i \sigma_i{}^x$$

Corresponding classical optimization problem:

$$\mathrm{Obj}(a_i, b_{ij}; q_i) = \sum_i a_i q_i + \sum_{i<j} b_{ij} q_i q_j$$

Source: D-Wave

2.5 Computación Cuántica. Ejemplos de Tecnologías

Se logra la “Supremacía Cuántica” cuando un ordenador cuántico es más rápido en la práctica que un ordenador clásico

nature > articles > article

Article | Published: 23 October 2019

Quantum supremacy using a programmable superconducting processor

Google anunció en Oct/2019 su procesador Sycamore de 53 qubits que toma 200 seg Para resolver un problema que tardaría 10,000 años en una supercomputadora.

Quantum computational advantage using photons

HAN-SEN ZHONG, HUI WANG, YU-HAO DENG, MING-CHENG CHEN, LI-CHAO PENG, YI-HAN LUO, JIAN QIN, DIAN WU, XING DING, [...], AND JIAN-WEI PAN +14 authors Authors Info & Affiliations

SCIENCE • 3 Dec 2020 • Vol 370, Issue 6523 • pp. 1460-1463 • DOI: 10.1126/science.abe8770

China en Dic/2020 publicó en Science un artículo detallando la solución mediante un computador cuántico en cerca de tres minutos un problema en el que los superordenadores clásicos tardarían 600 millones de años.

2.5 Computación Cuántica. Ejemplos de Tecnologías

IBM logra 433 qubits con su procesador Osprey en noviembre de 2022

IBM planea sus procesadores Condor de 1121 qubits para 2023, los Flamingo de 1386 qubits para 2024 y el procesador Kookaburra de 4.000 qubits para 2025

QC company examples	• Honeywell: Trapped ion • IonQ: Trapped ion • PsiQuantum: Photonics • Xanadu: Photonics • Cold Quanta: Natural atom	• D-Wave: Superconducting • Google: Superconducting • IBM: Superconducting • Intel: Superconducting • Rigetti: Superconducting
Source: Egil Juliussen, January 2022		

3. Compuertas Cuánticas

Las compuertas cuánticas se representan como matrices. Una compuerta que opera sobre n qubits queda representada por una matriz unitaria de 2^n x 2^n. Las operaciones s U son reversibles a diferencia de la computación clásica

Gate	Equation	Matrix	Transform	Notation
Identity (I)	$I = \|0\rangle\langle 0\| + \|1\rangle\langle 1\|$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	$I\|0\rangle = \|0\rangle$ $I\|1\rangle = \|1\rangle$	
Pauli-X (X or **NOT**)	$X = \|0\rangle\langle 1\| + \|1\rangle\langle 0\|$	$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$	$X\|0\rangle = \|1\rangle$ $X\|1\rangle = \|0\rangle$	
Hadamard (H)	$H = \frac{\|0\rangle + \|1\rangle}{\sqrt{2}}\langle 0\| + \frac{\|0\rangle - \|1\rangle}{\sqrt{2}}\langle 1\|$	$\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$	$H\|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(\|0\rangle + \|1\rangle)$ $H\|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(\|0\rangle - \|1\rangle)$	
Controlled-NOT (**CNOT**)	$\mathbf{CNOT} = \|0\rangle\langle 0\| \otimes I + \|1\rangle\langle 1\| \otimes X$	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$	$\mathbf{CNOT}\|00\rangle = \|00\rangle$ $\mathbf{CNOT}\|01\rangle = \|01\rangle$ $\mathbf{CNOT}\|10\rangle = \|11\rangle$ $\mathbf{CNOT}\|11\rangle = \|10\rangle$	
Toffoli (T or **CCNOT**)	$\mathbf{T} = \|0\rangle\langle 0\| \otimes I \otimes I + \|1\rangle\langle 1\| \otimes \mathbf{CNOT}$	$\begin{pmatrix} 1&0&0&0&0&0&0&0 \\ 0&1&0&0&0&0&0&0 \\ 0&0&1&0&0&0&0&0 \\ 0&0&0&1&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&1&0&0&0 \\ 0&0&0&0&0&1&0&0 \\ 0&0&0&0&0&0&0&1 \\ 0&0&0&0&0&0&1&0 \end{pmatrix}$	$\mathbf{T}\|000\rangle = \|000\rangle, \mathbf{T}\|001\rangle = \|001\rangle$ $\mathbf{T}\|010\rangle = \|010\rangle, \mathbf{T}\|011\rangle = \|011\rangle$ $\mathbf{T}\|100\rangle = \|100\rangle, \mathbf{T}\|101\rangle = \|101\rangle$ $\mathbf{T}\|110\rangle = \|111\rangle, \mathbf{T}\|111\rangle = \|110\rangle$	

$$|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$|-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

$$|0\rangle := \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$|1\rangle := \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$X|0\rangle = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = |1\rangle$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix} \qquad Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$Y = -i|0\rangle\langle 1| + i|1\rangle\langle 0| \qquad Z = |0\rangle\langle 0| - |1\rangle\langle 1|$$

4. Introducción a Python y a la Programación Cuántica con Qiskit

Qiskit es un Kit de Desarrollo de Software (SDK) creado por IBM de código abierto para programación cuántica usando Python.

Sigue el modelo de circuito para la computación cuántica universal y se puede utilizar para cualquier hardware cuántico que use este modelo.

Ejemplos de un programa y un circuito

```python
from qiskit import QuantumCircuit

qc = QuantumCircuit(2, 2)

qc.h(0)
qc.cx(0, 1)
qc.measure([0,1], [0,1])
```

Learn Quantum Computation using Qiskit

https://qiskit.org/textbook/preface.html

Vamos a hacer más ejemplos usando Google Colab

https://github.com/Qiskit/qiskit-tutorials

5. Algoritmos Cuánticos

Algoritmo de Factorización de Shor (1994. En 2001 un grupo de IBM factorizó 15 usando 7 qubits)

Quantum subroutine in Shor's algorithm.

En 2019 se demostró que un ordenador cuántico podría hacer el cálculo de RSA-2048 con solo 20 millones de cúbits en ocho horas

arXiv > quant-ph > arXiv:1905.09749

Quantum Physics

[Submitted on 23 May 2019 (v1), last revised 13 Apr 2021 (this version, v3)]

How to factor 2048 bit RSA integers in 8 hours using 20 million noisy qubits

Craig Gidney, Martin Ekerå

Algoritmo de Búsqueda de Grover (O (N1/2),1996)

Para saber más sobre Algoritmos Cuánticos

quantumalgorithmzoo.org

Quantum Algorithm Zoo

This is a comprehensive catalog of quantum algorithms. If you notice any errors or omissions, please email me at stephen.jordan@microsoft.com. (Alternatively, you may submit a pull request to the repository on github.) Your help is appreciated and will be acknowledged.

arXiv > quant-ph > arXiv:2008.10647

Quantum Physics

[Submitted on 24 Aug 2020]

Fundamentals In Quantum Algorithms: A Tutorial Series Using Qiskit Continued

Daniel Koch, Saahil Patel, Laura Wessing, Paul M. Alsing

6. Parte Práctica

Para esta parte práctica las instrucciones son las siguientes:

- **Clonar el repositorio creado para este Taller con el comando. Si es necesario primero instalar con el comando *sudo apt install git* (linux)**
- ***git clone https://github.com/lvillasen/Escuela-Computacion-Cuantica-2023.git***
- **Copiar el cuaderno de jupyter (con terminación ipynb) a Google Drive**
- **Entrar a la página de Google Drive con un explorador y abrir el archivo en Google Colab**

Para saber más sobre Programación Cuántica

CERN lectures on quantum computing

Noviembre 2020

- Lecture 1/7, Friday 6 November: Introduction
- Lecture 2/7, Friday 13 November: One and two-qubit systems (Part 1)
- Lecture 3/7, Friday 20 November: One and two-qubit systems (Part 2)
- Lecture 4/7, Friday 27 November: Multiqubit systems
- Lecture 5/7, Friday 4 December: Quantum algorithms for combinatorial optimization
- Lecture 6/7, Friday 11 December: Quantum variational algorithms and quantum machine learning
- Lecture 7/7, Friday 18 December: The future of quantum computing

Quantum Computing Workshop 2020

https://github.com/mnp-club/Quantum_Computing_Workshop_2020

Primera Escuela de Computación Cuántica
Octubre 2022

https://www.youtube.com/channel/UCCUrwQCi5EO-L6xWGF1Jh0Q

Quantum-Computing-Collection-Of-Resources

https://github.com/aryashah2k/Quantum-Computing-Collection-Of-Resources

Welcome to Quirk

A drag-and-drop quantum circuit simulator.

https://algassert.com/quirk

Real quantum computers.
Right at your fingertips.

https://quantum-computing.ibm.com/

Open-Source Quantum Development

https://qiskit.org/

Learn Quantum Computation using Qiskit

https://qiskit.org/textbook/preface.html

Google Colaboratory

Understanding Quantum Information & Computation

www.youtube.com/watch?v=0Av89fZenSY&t=0s

Products / Quantum Technologies / Amazon Braket

Amazon Braket Getting Started

https://github.com/aws/amazon-braket-examples

#qiskit #quantumcomputing #learnquantum

Quantum Computing Book Recommendations

Qiskit
100K subscribers
Subscribe

www.youtube.com/watch?v=xpSevVullcQ