

**Computación Cuántica**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Universidad de Antioquia**  
**2022-1**

**Práctica No.4**  
**Teletransportación Cuántica y Codificación Superdensa**

**Realización:** En parejas.

**Fecha de Entrega:** lunes 22 de agosto del 2022.

**Valor:** La evaluación de la esta práctica tiene un valor equivalente a dos Prácticas de Laboratorio.

**1. Asignación de un estado cuántico**

A fin de realizar la presente práctica de laboratorio, identifique su apellido en la **Tabla 1**, y tome nota del estado cuántico asignado, y de la pareja de bits clásicos  $b_1b_0$  requeridos para el circuito cuántico definido a continuación.

Apellidos	Estado cuántico	$b_1b_0$
Arbeláez - Arroyave	$ \phi\rangle = \frac{3}{8} 000\rangle + \frac{\sqrt{3}+2i}{8} 001\rangle - \frac{3}{8} 010\rangle - \frac{\sqrt{3}+2i}{8} 011\rangle - \frac{3}{8} 100\rangle - \frac{\sqrt{3}+2i}{8} 101\rangle + \frac{3}{8} 110\rangle + \frac{\sqrt{3}+2i}{8} 111\rangle$	10
Bernal - Cadavid	$ \phi\rangle = \frac{1}{8} 000\rangle + \frac{3-\sqrt{6}i}{8} 001\rangle + \frac{1}{8} 010\rangle + \frac{3-\sqrt{6}i}{8} 011\rangle - \frac{1}{8} 100\rangle - \frac{3-\sqrt{6}i}{8} 101\rangle - \frac{1}{8} 110\rangle - \frac{3-\sqrt{6}i}{8} 111\rangle$	11
Giraldo - Gómez	$ \phi\rangle = \frac{1}{4\sqrt{2}} 000\rangle + \frac{3-\sqrt{5}i}{8} 001\rangle + \frac{1}{4\sqrt{2}} 010\rangle + \frac{3-\sqrt{5}i}{8} 011\rangle + \frac{1}{4\sqrt{2}} 100\rangle + \frac{3-\sqrt{5}i}{8} 101\rangle + \frac{1}{4\sqrt{2}} 110\rangle + \frac{3-\sqrt{5}i}{8} 111\rangle$	01
González - Marmolejo	$ \phi\rangle = \frac{1}{8} 000\rangle + \frac{\sqrt{3}(2+i)}{8} 001\rangle + \frac{1}{8} 010\rangle + \frac{\sqrt{3}(2+i)}{8} 011\rangle - \frac{1}{8} 100\rangle - \frac{\sqrt{3}(2+i)}{8} 101\rangle - \frac{1}{8} 110\rangle - \frac{\sqrt{3}(2+i)}{8} 111\rangle$	10
Martínez - Mesa	$ \phi\rangle = \frac{1}{2\sqrt{2}} 000\rangle + \frac{1+i}{4} 001\rangle - \frac{1}{2\sqrt{2}} 010\rangle - \frac{1+i}{4} 011\rangle + \frac{1}{2\sqrt{2}} 100\rangle + \frac{1+i}{4} 101\rangle - \frac{1}{2\sqrt{2}} 110\rangle - \frac{1+i}{4} 111\rangle$	00
Moreno - Orbes	$ \phi\rangle = \frac{1}{4} 000\rangle - \frac{\sqrt{3}}{4} 001\rangle + \frac{1}{4} 010\rangle - \frac{\sqrt{3}}{4} 011\rangle + \frac{1}{4} 100\rangle - \frac{\sqrt{3}}{4} 101\rangle + \frac{1}{4} 110\rangle - \frac{\sqrt{3}}{4} 111\rangle$	01

Orozco - Osorno	$ \phi\rangle = \frac{1}{4} 000\rangle + \frac{\sqrt{2}+i}{4} 001\rangle + \frac{1}{4} 010\rangle + \frac{\sqrt{2}+i}{4} 011\rangle + \frac{1}{4} 100\rangle + \frac{\sqrt{2}+i}{4} 101\rangle + \frac{1}{4} 110\rangle + \frac{\sqrt{2}+i}{4} 111\rangle$	00
Restrepo - Santa	$ \phi\rangle = \frac{\sqrt{3}}{4} 000\rangle + \frac{1+\sqrt{3}i}{8} 001\rangle - \frac{\sqrt{3}}{4} 010\rangle - \frac{1+\sqrt{3}i}{8} 011\rangle - \frac{\sqrt{3}}{4} 100\rangle - \frac{1+\sqrt{3}i}{8} 101\rangle + \frac{\sqrt{3}}{4} 110\rangle + \frac{1+\sqrt{3}i}{8} 111\rangle$	11
Valencia - Vásquez	$ \phi\rangle = \frac{3}{8} 000\rangle + \frac{2-\sqrt{3}i}{8} 001\rangle - \frac{3}{8} 010\rangle - \frac{2-\sqrt{3}i}{8} 011\rangle + \frac{3}{8} 100\rangle + \frac{2-\sqrt{3}i}{8} 101\rangle - \frac{3}{8} 110\rangle - \frac{2-\sqrt{3}i}{8} 111\rangle$	10
Viana - Zuluaga	$ \phi\rangle = \frac{1}{4\sqrt{2}} 000\rangle + \frac{\sqrt{5}+3i}{8} 001\rangle + \frac{1}{4\sqrt{2}} 010\rangle + \frac{\sqrt{5}+3i}{8} 011\rangle + \frac{1}{4\sqrt{2}} 100\rangle + \frac{\sqrt{5}+3i}{8} 101\rangle + \frac{1}{4\sqrt{2}} 110\rangle + \frac{\sqrt{5}+3i}{8} 111\rangle$	01

**Tabla 1:** Asignación de estados cuánticos y bits clásicos, de acuerdo con su primer apellido o el de su compañero(a).

## 2. (10%) Implementación del estado asignado

2.1. Analice el estado asignado, y factorícelo en tres *qubits* explícitos  $|Q_2\rangle$ ,  $|Q_1\rangle$  y  $|Q_0\rangle$ , tal que  $|\phi\rangle = |Q_2\rangle|Q_1\rangle|Q_0\rangle = |Q_2Q_1Q_0\rangle$ .

- Puede realizar esta factorización usando el producto Kronecker estudiado en los tutoriales de **Qiskit**.
- Indique su procedimiento utilizado para realizar dicha factorización.

2.2. Implemente en la plataforma **Qiskit** los tres factores  $|Q_2\rangle|Q_1\rangle|Q_0\rangle$  del estado cuántico asignado, usando la función ***initialize()*** disponible en dicha plataforma. Esta función permite crear una matriz de múltiples rotaciones sobre el estado base  $|0\rangle|0\rangle|0\rangle$ .

Para entender bien el concepto de compuertas de rotación y el uso de la función ***initialize()***, siga el siguiente *Notebook* disponible en el Tutorial del **Qiskit**:

[https://github.com/Qiskit/Qiskit-tutorials/blob/master/tutorials/circuits/3\\_summary\\_of\\_quantum\\_operations.ipynb](https://github.com/Qiskit/Qiskit-tutorials/blob/master/tutorials/circuits/3_summary_of_quantum_operations.ipynb)

2.3. Evalúe la ***fidelidad*** de las rotaciones obtenidas, usando la función ***state\_fidelity()***, descrita en dicho *Notebook*.

### 3. (60%) Diseño e implementación de Circuito Cuántico

3.1. (15%) Dado estos tres *qubits* de su estado asignado, diseñe un circuito cuántico que:

3.1.1. mediante *teletransportación cuántica* le transmita a “**Bob**” la información del *qubit*  $|Q_0\rangle$ . Para ello puede considerar la superposición disponible en el *qubit*  $|Q_1\rangle$  de su estado asignado.

3.1.2. mediante *codificación cuántica superdensa* le envíe a “**Bob**” los bits clásicos asignados  $b_1b_0$ , usando para ello el *qubit*  $|Q_2\rangle$  del estado cuántico asignado.

3.1.3. Demuestre matemáticamente la información recibida por “**Bob**” en su circuito diseñado.

3.1.4. Presente un gráfico que delimite claramente la etapa del circuito de teletransportación cuántica, y la etapa del circuito de codificación superdensa en su circuito completo.

Para el diseño de este circuito, considere que los tres qubits del estado cuántico asignado le pertenecen a “**Alice**”, de modo que la transmisión de información para “**Bob**” se realizará en dos nuevos qubits inicializados cada uno en  $|0\rangle$ . Con ello entonces, su circuito tendrá en total **al menos 5 líneas de qubits**.

3.2. (5%) Implemente en la plataforma **Qiskit** su circuito resultante, teniendo en cuenta los tutoriales estudiados en clase sobre *Teletransportación Cuántica* y *Codificación Superdensa*, compartidos a continuación:

<https://Qiskit.org/textbook/ch-algorithms/teleportation.html>

<https://Qiskit.org/textbook/ch-algorithms/superdense-coding.html>

3.3. (10%) Realice la simulación en **Qiskit** de su circuito implementado:

3.3.1. Mida el estado cuántico recibido por “**Bob**”, y de la misma manera como se indica en el anterior *Tutorial*, evalúe si las amplitudes de los *kets*  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$  corresponden según lo esperado.

- Compare explícitamente el qubit final recibido por “**Bob**”, con el qubit inicial que le fue asignado para esta Práctica de Laboratorio.
- 3.3.2. Igualmente determine si los dos bits clásicos recibidos por “**Bob**”, también corresponden a sus bits  $b_1b_0$  asignados en la **Tabla 1**.
- 3.3.3. En su informe, presente sus comparaciones entre la información recibida por “**Bob**” en la simulación realizada en **Qiskit**, y la información esperada según su demostración matemática descrita en el **ítem 3.1.3**.
- 3.4. **(15%)** Realice ahora la ejecución real de su circuito en uno de los procesadores cuánticos encontrados en el proveedor **ibm-q-education/uni-antioquia-1** disponible para los estudiantes del presente curso en la UdeA.
- 3.4.1. En dicha ejecución real, mida el estado cuántico recibido por “**Bob**”, y evalúe si las amplitudes de los *kets*  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$  corresponden según lo esperado.
- 3.4.2. Determine también si los dos bits clásicos recibidos por “**Bob**” corresponden según lo esperado.
- 3.4.3. Compare esta información recibida por “**Bob**” en la ejecución real, con la información recibida en la simulación realizada en el **ítem 3.3**. Calcule la tasa de error de esta información recibida.
- 3.5. **(15%)** A fin de reducir la tasa de error presentada, realice ahora una **mitigación del error** en la medida final de su circuito, usando las funciones ***complete\_meas\_cal()*** y ***completeMeasFitter()*** disponibles en la biblioteca **qiskit.utils.mitigation** disponible en **Qiskit**.
- 3.5.1. Presente los histogramas comparativos que indiquen la mejora en las distribuciones de probabilidad esperadas.
- 3.5.2. Calcule nuevamente las tasas de error de la información recibida por “**Bob**” en cada caso.

**Observación:** Dados los múltiples circuitos que requieren ser enviados y ejecutados en los procesadores cuánticos reales de IBM, considere el uso de la reserva de alguno de los

procesadores cuánticos disponibles para el curso. Para ello, solicítele al profesor la reserva de un *backend* de IBM para un día y hora específica.

#### **4. (30%) Informe**

- 4.1. Presente su solución a la presente Práctica de Laboratorio adjuntando “*pantallazos*” de los resultados obtenidos.
- 4.2. Analice los resultados presentados en el circuito implementado, e interprete los datos obtenidos.
- 4.3. Presente sus conclusiones generales del trabajo realizado en esta Práctica de Laboratorio.
- 4.4. Presente citas y referencias de la bibliografía adicional utilizada.