

Guía Visual: Algoritmo de Grover en IBM Quantum Composer

Jorge Luis Pitalúa Pantoja

28 de noviembre de 2025

1. Introducción

Este documento guía paso a paso la construcción de circuitos cuánticos para el algoritmo de Grover utilizando exclusivamente la interfaz gráfica de arrastrar y soltar (drag-and-drop) del IBM Quantum Composer.

El objetivo es implementar búsquedas en bases de datos no estructuradas de 2 y 3 Qubits sin necesidad de escribir código.

2. Herramienta Fundamental: La Compuerta Z Multicontrolada

En el Composer no existe un bloque único prefabricado para una compuerta Z con muchos controles. Para construirla (necesaria tanto en el Oráculo como en el Difusor), siga estos pasos:

1. Busque el bloque azul con la letra **Z** (Pauli Z).
2. Arrástrelo y suéltelo sobre la línea del qubit que servirá como objetivo (el de más abajo en el grupo).
3. Haga **clic derecho** sobre el bloque Z que acaba de colocar.
4. En el menú desplegable, seleccione **Add Control**. Aparecerá un punto negro conectado a una línea.
5. Repita el proceso de Add Control tantas veces como qubits de control necesite.

3. Caso 1: Búsqueda en 2 Qubits (Objetivo $|11\rangle$)

Configuración: Usaremos las líneas $q0$ y $q1$.

3.1. Paso 1: Inicialización

Para crear la superposición inicial:

- Arrastre una compuerta **H** (Hadamard) a la línea $q0$.
- Arrastre una compuerta **H** a la línea $q1$.
- Arrastre el bloque vertical gris **Barrier** para separar esta sección.

3.2. Paso 2: El Oráculo (Marca el $|11\rangle$)

- Coloque una compuerta **Z** en $q1$.
- Haga clic derecho sobre ella y añada un control conectado a $q0$ (esto crea una compuerta CZ).
- Coloque una **Barrier**.

3.3. Paso 3: El Difusor (Amplificación)

Este bloque invierte las probabilidades. La secuencia visual en las líneas $q0$ y $q1$ es:

1. Coloque compuertas **H** en ambos qubits.
2. Coloque compuertas **X** (color cian) en ambos qubits.
3. Repita la construcción de la **CZ** (Z en $q1$ con control en $q0$).
4. Coloque compuertas **X** en ambos qubits.
5. Coloque compuertas **H** en ambos qubits.
6. Coloque una **Barrier**.

3.4. Paso 4: Medición

Arrastre el bloque negro **Measurement** al final de ambas líneas. Al ejecutar, la probabilidad del estado 11 será cercana al 100 %.

4. Caso 2: Búsqueda en 3 Qubits (Objetivo $|111\rangle$)

Configuración: Usaremos las líneas $q0$, $q1$ y $q2$.

Nota importante: Para 3 qubits (8 estados posibles), se requieren visualmente **2 repeticiones** de la secuencia Oráculo-Difusor para obtener una probabilidad alta.

4.1. Construcción de Bloques

A. Inicialización

- Coloque compuertas **H** en $q0$, $q1$, $q2$.
- Coloque una barrera.

B. Oráculo para $|111\rangle$

- Arrastre una **Z** a la línea $q2$.
- Haga clic derecho y añada dos controles (conéctelos a $q0$ y $q1$).
- Coloque una barrera (Opcional).

C. Difusor de 3 Qubits

- Columna de **H** en las tres líneas.
- Columna de **X** en las tres líneas.
- **Z Multicontrolada:** Z en $q2$ con controles en $q0$ y $q1$.
- Columna de **X** en las tres líneas.
- Columna de **H** en las tres líneas.
- Coloque una barrera.

4.2. Ensamblaje Final

Para completar el circuito en el pentagrama: 1. Construya el bloque A. 2. Construya el bloque B. 3. Construya el bloque C. 4. **Repita** la construcción del bloque B. 5. **Repita** la construcción del bloque C. 6. Añada bloques de medición al final.

5. Caso 3: Búsqueda de Dos Estados ($|101\rangle$ y $|110\rangle$)

Al buscar 2 soluciones en 3 qubits, la matemática indica que con **una sola iteración** la búsqueda es exacta. No hace falta repetir los bloques.

5.1. Modificación del Oráculo

El difusor es idéntico al caso anterior. Solo cambia la sección del oráculo, que ahora debe marcar dos condiciones:

Para marcar $|101\rangle$ (Binario 5):

- El qubit central ($q1$) es 0. Para que active el control, debemos invertirlo.

- Coloque una **X** en $q1$.
- Coloque la Z multicontrolada (Z en $q2$, controles en $q0, q1$).
- Coloque otra **X** en $q1$ (para deshacer el cambio).

Para marcar $|110\rangle$ (Binario 6):

- El qubit inferior/primer ($q0$) es 0.
- Inmediatamente a la derecha de lo anterior, coloque una **X** en $q0$.
- Coloque otra Z multicontrolada.
- Coloque otra **X** en $q0$.

Tras construir este oráculo doble, añada un único bloque Difusor y mida. Obtendrá 50 % de probabilidad para cada estado buscado.

6. Ejercicio Propuesto: Búsqueda del Estado Base ($|000\rangle$)

6.1. Consigna

Diseñe en el Composer un circuito de Grover para 3 Qubits que encuentre el estado **000**.

1. Determine cuántas iteraciones visuales (Oráculo + Difusor) necesita.
2. Construya el Oráculo específico para detectar tres ceros.

6.2. Solución Guía

1. Número de Iteraciones: Al buscar 1 solo estado entre 8 posibles, debe construir **2 veces** la secuencia Oráculo-Difusor.

2. Construcción del Oráculo ($|000\rangle$): La compuerta Z controlada se activa por defecto con unos (1). Para detectar ceros (0), debemos usar compuertas X como "puentes".

Pasos visuales para el Oráculo:

- **Paso 1:** Cree una columna de compuertas **X** en las tres líneas ($q0, q1, q2$). Esto convierte temporalmente el 000 en 111.
- **Paso 2:** Coloque la compuerta **Z Multicontrolada** (Z en $q2$, controles en $q0, q1$). Ahora el sistema detectará la condición correcta.
- **Paso 3:** Cree otra columna de compuertas **X** en las tres líneas para devolver los qubits a su estado original.

Resumen del flujo visual: Inicialización \rightarrow [X-X-X \rightarrow MCZ \rightarrow X-X-X] \rightarrow Difusor \rightarrow [X-X-X \rightarrow MCZ \rightarrow X-X-X] \rightarrow Difusor \rightarrow Medición.

7. Ejercicio 2: Búsqueda de Estado Mixto ($|010\rangle$)

Este ejercicio entrena la capacidad de discriminar qué qubits necesitan inversión lógica dentro del Oráculo.

7.1. Consigna

Objetivo: Construir el circuito de Grover de 3 Qubits para encontrar el número 2 decimal (binario **010**).

Nota: Asuma el orden visual estándar de IBM: $q0$ (arriba), $q1$ (medio), $q2$ (abajo). Por lo tanto, busquemos $q0 = 0, q1 = 1, q2 = 0$.

1. Determine el número de iteraciones visuales necesarias.
2. Diseñe el Oráculo específico donde solo los ceros activen la condición de inversión.

7.2. Solución Guía

1. Número de Iteraciones: Seguimos buscando 1 solución en un espacio de 8. Se requieren **2 repeticiones** de la secuencia (Oráculo + Difusor).

2. Construcción Visual del Oráculo ($|010\rangle$): El objetivo es que la compuerta multicontrolada "vea" puros unos (111) solo cuando la entrada sea (010).

■ **Pre-procesamiento (Las X):**

- Arrastre una compuerta **X** a la línea superior ($q0$) \rightarrow (El 0 se vuelve 1).
- **NO** coloque nada en la línea media ($q1$) \rightarrow (El 1 ya es correcto).
- Arrastre una compuerta **X** a la línea inferior ($q2$) \rightarrow (El 0 se vuelve 1).

■ **La MCM-Z:**

- Arrastre la **Z** a $q2$.
- Añada controles conectados a $q0$ y $q1$.

■ **Post-procesamiento (Deshacer):**

- Coloque compuertas **X** nuevamente en $q0$ y $q2$ para limpiar el estado.

Resultado Visual: Verá compuertas X solo en las líneas "externas" (arriba y abajo) rodeando a la Z controlada.

8. Ejercicio 3: Desafío de 4 Qubits ($|1111\rangle$)

Este ejercicio introduce una mayor complejidad computacional y visual, requiriendo el uso de 4 líneas del pentagrama.

8.1. Consigna

Objetivo: Implementar el algoritmo de Grover para encontrar el estado $|1111\rangle$ (todos unos) en un sistema de 4 Qubits ($N = 16$ estados posibles).

1. **Cálculo de Iteraciones:** Calcule $\frac{\pi}{4}\sqrt{16}$. ¿Cuántas veces debe repetir visualmente los bloques ahora?
2. **Construcción de la Z con Triple Control:** Implemente una compuerta que afecte a 4 líneas.
3. **Adaptación del Difusor:** Construya el difusor generalizado para 4 qubits.

8.2. Solución Guía

1. Cálculo de Iteraciones:

$$k \approx \frac{\pi}{4}\sqrt{16} = \frac{\pi}{4}(4) = \pi \approx 3,14$$

Redondeando al entero más cercano, debe construir **3 iteraciones** (3 veces Oráculo + 3 veces Difusor). Si solo hace 2, la probabilidad será insuficiente.

2. Instrucciones de Construcción:

A. Inicialización (4 Líneas)

Use las líneas $q0, q1, q2, q3$. Coloque compuertas **H** en las cuatro.

B. Oráculo para $|1111\rangle$

- Arrastre una **Z** a la línea inferior ($q3$).
- Haga clic derecho \rightarrow *Add Control*. Repita esto **3 veces**.
- Conecte los controles a $q0, q1$ y $q2$.
- *Resultado:* Una barra vertical que conecta 4 puntos/cajas.

C. Difusor de 4 Qubits

- Columna de **H** en las 4 líneas.
- Columna de **X** en las 4 líneas.
- **MCM-Z de 4 vías:** Repita la construcción del paso B (Z en $q3$ con 3 controles).
- Columna de **X** en las 4 líneas.
- Columna de **H** en las 4 líneas.

D. Ejecución

- Repita los bloques B y C hasta tener un total de 3 pares.
- Añada medición a las 4 líneas.
- Al simular, observe el histograma: hay 16 barras posibles, pero la correspondiente a 1111 (o 15 decimal) será la dominante.