



# **Universidad Autónoma del Estado de México**

Centro Universitario UAEM Valle de Chalco

**SIMULACIÓN DE LA COMPUERTA CUÁNTICA CNOT EN IBM-Q**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

***INGENIERO EN COMPUTACIÓN***

**P R E S E N T A N**

NEFTALY YETLANEZI CONTRERAS SANTILLAN  
GUSTAVO GONZALEZ QUIRINO

**ASESOR:**

DR. MANUEL ÁVILA AOKI

Revisor: DR. EN C. JUVENAL RUEDA PAZ

Revisora: DRA. EN C. DE LA COMP. MARÍA DE LOURDES LÓPEZ GARCÍA

**VALLE DE CHALCO SOLIDARIDAD, MÉXICO FEBRERO 2022.**



**CUVCH**

# **SIMULACIÓN DE LA COMPUERTA CUÁNTICA CNOT EN IBM-Q**

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1 .....	19
1.1 PLANTEAMIENTO .....	19
1.2 OBJETIVOS .....	20
1.3 HIPÓTESIS .....	20
1.4 METODOLOGÍA.....	20
1.5 IMPORTANCIA.....	21
1.6 ANTECEDENTES. ....	24
CAPITULO 2 .....	29
2.1 COMPUTACIÓN CUÁNTICA .....	29
2.1.1 USOS DE LA COMPUTADORA CUÁNTICA. ....	33
2.1.2 DIFERENCIAS ENTRE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA Y COMPUTACIÓN LA TRADICIONAL.....	38
2.2 QUBIT.....	40
2.3 COMPUERTAS CUÁNTICAS.....	45
2.3.1 COMPUERTA DE HADAMARD.....	47
2.3.2 COMPUERTAS CUÁNTICAS DE UN QUBIT .....	48
2.3.3 COMPUERTAS DE DOS QUBITS.....	50
2.4 ESFERA DE BLOCH.....	54
CAPITULO 3 .....	62
3.1 CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO DE UNA COMPUTADORA CUÁNTICA.....	62
3.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE IBM QUANTUM COMPOSER. ....	66
CAPITULO 4 .....	70

4.1 ACCESO A IBMQ.....	70
4.2 COMPONENTES DE IBMQ .....	77
4.3 APLICACIÓN DE COMPONENTES EN SIMULACIÓN DE LA COMPUERTA CUÁNTICA C-NOT.....	87
4.4 PRESENTACIÓN DE GRAFICAS SOBRE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LA COMPUERTA CUÁNTICA CNOT EN IBMQ.....	96
CONCLUSIONES .....	103

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Circuitos internos de una computadora cuántica (Laureano Cornejo, 2019).....	29
Ilustración 2 Microchip de una computadora cuántica (Javier Pastor, 2016) ....	30
Ilustración 3 Refracción de ondas en una computadora cuántica(Vicente Moret, 2013).....	31
Ilustración 4 IBM Quantum: Q System (HPC wire, 2019).....	32
Ilustración 5 Cilindro de la computadora cuántica (Nico Velez, 2020) .....	32
Ilustración 6 Análisis de datos de una computadora cuántica (Docline, 2020) .	34
Ilustración 7 Velocidad de procesamiento de datos (Arsys, 2020).....	35
Ilustración 8 Computación cuántica en el descubrimiento de nuevos fármacos (Alberto Iglesias, 2021) .....	36
Ilustración 9 Cambio de estrategias en IBM (Economía digital, 2020) .....	39
Ilustración 10 Uso de qubits como unidad básica de información(Iberdrola, 2021) .....	40
Ilustración 11 Cambio hacia el ordenador cuántico (Araceli Venegas, 2016) ...	42
Ilustración 12 Salto de bits a qubits (BBVA, 2019).....	43
Ilustración 13 Matriz unitaria multiplicada por vector de estado. ....	45
Ilustración 14 Demostración de un qubit en un diagrama de circuito.....	45
Ilustración 15 Demostración condensada de n qubits en un diagrama de circuito .....	45
Ilustración 16 Ejemplo de la representación de compuertas lógicas cuánticas en un diagrama de circuito.....	46
Ilustración 17 Diagrama de circuito de una compuerta NOT cuántica. ....	46
Ilustración 18 Matriz de la compuerta de Hadamard.....	47
Ilustración 19 Demostración de fórmula de aplicación de una compuerta NOT a un qubit genérico.....	48
Ilustración 20 Correspondencia de la compuerta NOT aplicada en un qubit genérico sobre el eje X .....	48

Ilustración 21 Alternativa para la expresión de una compuerta NOT aplicada en un qubit. ....	48
Ilustración 22 Representación de la compuerta Y de Pauli mediante un diagrama de circuito.....	49
Ilustración 23 Operador Z .....	49
Ilustración 24 Diagrama de circuito de la compuerta CNOT cuántica. ....	50
Ilustración 25 Base de Bell.....	51
Ilustración 26 Representación de la combinación que produce la Base de Bell en un diagrama de circuito.....	52
Ilustración 27 Representaciones de las compuertas cuánticas CNOT de forma generalizada en un diagrama de circuito. ....	52
Ilustración 28 Diagrama de circuito de la combinación producida por la tercer compuerta de la ilustración 14 .....	53
Ilustración 29 Vista pantalla principal IBMQ 2017 .....	67
Ilustración 31 Acceso mediante buscador.....	71
Ilustración 32 Resultado de búsqueda .....	71
Ilustración 33 Pagina principal IBM .....	72
Ilustración 34 Submenús de la página principal del portal IBMQ .....	73
Ilustración 35 Enlace de inicio de sesion para IBMQ .....	74
Ilustración 36 Validacion de cuenta Google para acceso a IBMQ.....	74
Ilustración 37 Politicas de privacidad de IBMQ .....	75
Ilustración 38 Cuestionario de seguridad IBMQ .....	76
Ilustración 39 Panel de bienvenida al acceder a IBMQ.....	77
Ilustración 40 Visualizacion de opciones de simulador usuario 1 .....	78
Ilustración 41 Visualizacion de opciones de simulador usuario 2 .....	78
Ilustración 42 Opciones de inicializacion del simulador .....	79
Ilustración 43 Pantalla principal del simulador .....	80
Ilustración 44 Componentes de simulacion.....	80
Ilustración 45 Tutoriales de composter y documentacion. ....	83
Ilustración 46 Nombramiento de proyecto.....	83

Ilustración 47 Insercion de compuerta de Hadamard.....	84
Ilustración 48 Graficos de medicion de resultados.....	84
Ilustración 49 Editor de código openQASM. ....	85
Ilustración 50 Colocación de compuerta CNOT .....	87
Ilustración 51 Disco de fase qubit q0 .....	88
Ilustración 52 Disco de fase qubit q1 .....	89
Ilustración 53 Inserción de segunda compuerta de Hadamard .....	89
Ilustración 54 Colocación de medición para resultados en estado 0.....	90
Ilustración 55 Colocación de medición para estado 1 .....	91
Ilustración 56 Colocación de una tercera compuerta de Hadamard.....	92
Ilustración 57 Colocación de estado de medición en estado 1 .....	93
Ilustración 58 Botón para ejecución de resultados.....	94
Ilustración 59 Listado de servidores para ejecución de programa .....	94
Ilustración 60 Parámetros adicionales para ejecución de simulación .....	95
Ilustración 61 Parámetros configurados para ejecución.....	95
Ilustración 62 Resultado gráfico con una compuerta de Hadamard.....	96
Ilustración 63 Modelado en una esfera de bloch con una compuerta de Hadamard .....	96
Ilustración 64 Resultado gráfico con una compuerta de Hadamard y la compuerta cuántica CNOT.....	97
Ilustración 65 Modelado de una esfera de bloch en conjunto a una compuerta de Hadamard y la compuerta cuántica CNOT .....	97
Ilustración 66 Resultado gráfico con dos compuertas de Hadamard y la compuerta cuántica CNOT.....	98
Ilustración 67 Modelado de una esfera de bloch en conjunto de dos compuertas de Hadamard y la compuerta cuántica CNOT.....	98
Ilustración 68 Resultado gráfico con dos compuertas de Hadamard, una compuerta cuántica CNOT y un componente de medición con estado 0.....	99

Ilustración 69 Modelado de una esfera de bloch en conjunto de dos compuertas de Hadamard, una compuerta cuántica CNOT y un componente de medición en estado 0 .....	99
Ilustración 70 Resultado gráfico con dos compuertas de Hadamard, una compuerta cuántica CNOT y un componente de medición en estado 1 .....	100
Ilustración 71 Modelado de un esfera de bloch en conjunto de dos compuertas de Hadamard, una compuerta cuántica CNOT y un componente de medición en estado 1 .....	100
Ilustración 72 Resultado gráfico con 3 compuertas de Hadamard y una compuerta cuántica CNOT.....	101
Ilustración 73 Modelado de una esfera de bloch en conjunto con 3 compuertas de Hadamard y una compuerta cuántica CNOT .....	101
Ilustración 74 Resultado gráfico con 3 compuertas de Hadamard, una compuerta cuántica CNOT y un componente de medición en estado 1 .....	102
Ilustración 75 Modelado de una esfera de bloch en conjunto con 3 compuertas de Hadamard, una compuerta cuántica CNOT y un componente de medición en estado 1 .....	102



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparativa entre bit y qubit .....	38
Tabla 2 Catalogo de compuertas de IBMQ .....	82
Tabla 3 Comandos basicos de OpenQASM .....	86

## ÍNDICE DE DIAGRAMAS Y MAPAS

Diagramas 1 Acceso a IBMQ .....	63
Diagramas 2 Propuesta de simulación.....	64
Diagramas 3 Casos de uso Implementación.....	65
Mapa Conceptual 1 Descripción general de IBMQ (Contreras, 2021).....	66

## RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se realizó la simulación de la compuerta cuántica CNOT en IBMQ, si bien para poder alcanzar el entendimiento de esta simulación es requerido dar a conocer al lector aspectos que engloban los antecedentes que corresponden a la computación cuántica haciendo mención de los predecesores que incursionaron en la temática y que son los pilares de esta. Otro de los puntos a destacar dentro de este trabajo es introducir al lector a familiarizarse con el marco conceptual que engloba a esta simulación, si bien es comprensible que los conceptos vistos a lo largo del desarrollo de este trabajo contienen cierto nivel de dificultad debido a la conjunción entre los campos de la física, mecánica cuántica y computación. En dicho caso las presencias de conceptos propios de cada uno de estos campos sugieren una gama extensa de conocimiento que en este trabajo se sintetizó y dirigió hacia la temática de interés tomando los elementos necesarios para la correcta comprensión del tema.

Además de esclarecer el contenido teórico y práctico, una de las partes esenciales de este trabajo es también dar a conocer la importancia de esta implementación dado que la correcta ejecución de esta simulación es un paso más a esta nueva área de conocimiento que ofrece todo un mundo de nuevas posibilidades y alcances que podrán ser dirigidos hacia diferentes enfoques que son también mencionados a lo largo de la presentación de este trabajo.

# CAPÍTULO 1

## 1.1 PLANTEAMIENTO

El computo cuántico es fundamental para el desarrollo de tecnología e incluso para la resolución de problemas. En este caso particular se observa la función de una de las compuertas estables, la CNOT dentro de la computadora cuántica IBM-Q disponible para cualquier usuario dentro de la red, y con ello se establecerá el desarrollo de esta con 2 qubits.

La pregunta de investigación que surge es la siguiente:

¿De qué manera se puede simular en IBM-Q la compuerta CNOT mediante novedosos circuitos cuánticos?

## 1.2 OBJETIVOS

- General.
  - Simular en IBM-Q la estructura de las compuertas de Hadamard en la compuerta cuántica CNOT.
- Específicos.
  - Estudiar el comportamiento un conjunto de compuertas de Hadamard en conjunto a la compuerta cuántica CNOT.
  - Estructurar de forma apropiada las compuertas de Hadamard sucesivamente para la evaluación y comparación de resultados finales.
  - Analizar la implementación de 2 qubits en un ambiente grafico desarrollado por IBM Quantum Composer.

## 1.3 HIPÓTESIS

Construcción de operaciones básicas de qubits basadas en la conjunción de compuertas de Hadamard y una compuerta CNOT.

## 1.4 METODOLOGÍA

Esta será básicamente de los siguientes tres tipos:

- Analítica matemática basada en las propiedades de las matrices de Hadamard.
- Documental basado en consulta de artículos especializados y libros.
- Exploratoria basada en consulta con especialistas.

## 1.5 IMPORTANCIA

La computación cuántica puede generar cierta confusión dada la terminología que maneja, al no ser tan usuales de escuchar estos términos y ver su nula mención dentro de la computación tradicional con solo la palabra cuántico vienen a la mente términos que competen a una rama diferente a la computación. Como se sabe las computadoras comunes codifican la información en bits dando como resultado un valor de 0 o 1; estos dos actúan de diferente manera uno en estado de encendido y otro de apagado, gracias a estas instancias se pueden conducir las funciones de un equipo de cómputo. Por otro lado, las computadoras cuánticas están basadas en qubits que funcionan de acuerdo a 2 principios básicos de la física cuántica: superposición y entrelazamiento cuántico.

Cuando opera por el lado de la superposición indica que cada qubit puede entrar en estado de 0 o 1 al mismo tiempo y cuando opera por entrelazamiento quiere decir que por qubit en una superposición puede correlacionarse entre sí, el estado uno (0 o 1) podrá depender del estado de otro. Gracias a esto los qubits pueden actuar como conmutadores sofisticados permitiendo a las computadoras cuánticas resolver problemas de mayor complejidad.

Al implementar estos principios básicos una computadora cuántica puede procesar una gran cantidad de cálculos de forma simultánea; si se ve desde una perspectiva diferente mientras una computadora tradicional trabaja con 0 y 1 una cuántica tendrá gran ventaja a usar 0 o 1 y superposiciones de 0 y 1. Las tareas que se consideran imposibles para una computadora de uso ordinario, para una computadora cuántica se logran resolver rápidamente y eficientemente. Como es visto esta es una línea de la informática que utiliza la parte de la física que estudia las partículas atómicas y subatómicas con el propósito de superar las limitaciones de la computación tradicional.

Cuando se generan inmensas cantidades de datos se necesita más que nunca disponer de un sistema capaz de procesar esos mismos datos a mayor velocidad, es ahí donde entran las computadoras cuánticas con nuevos estándares sobre el cálculo y proceso de datos, se podrán realizar cálculos complejos que en la actualidad una computadora clásica tardaría miles de años en cuestión de minutos u horas.

Hasta el día de hoy, la computación cuántica ha sido un campo que no se ha observado mucho en el mundo real, pero podría dejar a su tiempo completamente obsoletos muchos sistemas de cifrado actual, y a muchas otras aplicaciones. De hecho, según Fujitsu, a partir del 2019 observamos el despegue de la tecnología cuántica para solucionar una serie de problemas que con arquitecturas tradicionales son imposibles, como el descubrimiento de materiales, o la optimización del riesgo ante una posible crisis financiera (Gala Irina, 2019).

Considerada como la computación del mañana grandes empresas como IBM y Microsoft han anunciado importantes investigaciones y avances. IBM presentó la primera computadora cuántica de 20 qubits, conocida como Q System One diseñada para usos comerciales y por su lado Microsoft que, en colaboración de estudiantes de la universidad de Copenhague, abrirá las puertas de un laboratorio de materiales cuánticos para desarrollar la primera computadora cuántica estable en el mundo.

Viéndolo desde otra perspectiva una computadora cuántica puede elegir o evaluar una situación en todos sus aspectos o solo parte de ella considerando las posibles soluciones con una precisión sin precedentes. Las computadoras cuánticas actuales procesan tareas pequeñas que requieren pocos qubits pero necesitan que no exista mucha interferencia ya que mediante esto el margen de error de cualquier estudio realizado será exitoso al ser procesado a escala cuántica.

Por su parte, se calcula que dentro de los próximos 40 años el mercado de la computación cuántica será de decenas de miles de millones de dólares, ello se debe a que esta tecnología impactará a todas las ramas del conocimiento humano.

Las principales ventajas de la computación cuántica son las siguientes:

1. Tiene muchas aplicaciones en situaciones de la vida diaria que se podrían solucionar en un instante.
2. La computación cuántica permite avanzar en la investigación en química, de acuerdo con un estudio realizado por Intel.
3. Apoya a la búsqueda y desarrollo de fuentes alternativas de energía. Algunas empresas como Dubai Electricity and Water Authority actualmente lidera la investigación.
4. Puede ser de gran ayuda para frenar el cambio climático.
5. Se pretende que sea la clave para el desarrollo del aprendizaje automático y la inteligencia artificial.
6. El algoritmo cuántico es ideal para la implementación del algoritmo de Grover. Es decir, las búsquedas de soluciones más rápidas y efectivas (Morriño, 2020).

En la actualidad no se debe subestimar esta tecnología y comenzar a tomarla en cuenta para la solución de problemas de mayor complejidad. Las empresas más importantes en desarrollo tecnológico están en una carrera y no se detendrán hasta que estos ordenadores sean una realidad para el uso común.

## 1.6 ANTECEDENTES.

Desde el comienzo de las primeras máquinas mecánicas para calcular hasta poco después de la primera revolución industrial comenzó el interés hacia la producción de un salto cualitativo, esto conllevó a que muchos matemáticos se interesaran en él, como es el caso del famoso matemático británico Charles Babbage, quien, inspirado por el telar de Joseph Marie Jacquard, propuso en teoría la primera calculadora automática digital de uso general, conocida como Máquina Analítica (Martínez, 2011).

Teniendo en cuenta los comienzos de las máquinas analíticas, podemos mencionar el impulso del matemático inglés Alan Mathison Turing, quien desarrolló una abstracción mental de un ordenador tan profunda que entraña los principios generales de cualquier computador que haya sido construido, dicha abstracción es conocida como “La máquina de Turing” (Mateu, 2020).

El primer registro de materialización electrónica de esta la máquina de Turing fue el computador ENIAC, un “Integrador y calculador numérico electrónico”, desarrollado por la Universidad de Pennsylvania en 1946. Una máquina de 30 toneladas con un rendimiento de 20000 flops (operaciones de coma flotante por segundo).

Entrando en los inicios de la computación cuántica fue aproximadamente en los años 1900 con las investigaciones de científicos como Planck al introducir el cuanto de energía con el fin de poder describir las propiedades espectrales de la radiación tomando como métrica un proceso de distancias discretas o cuantización y Einstein adentrándose en el estudio de la energía, las moléculas y los átomos, estos dos referentes fueron los pioneros en de la física cuántica.



Haciendo una aproximación de tiempo partiendo del año de 1900 se considera que ya existía un modelo teórico de la computación cuántica que había sido producto de una extensa y basta investigación correspondiente a varios años; dada esta situación se presentan diversos motivos bajo los cuales no se ha podido dar paso a poder abrir las puertas por completo al mundo cuántico al cual nos acerca la computación cuántica, llámese por romper algunos paradigmas de la computación tradicional.

Entre las aportaciones que dieron pie a los inicios de la revolución cuántica tenemos a científicos como Maxwell, Bohr y Feynman quienes dieron paso a ser partícipes de este campo como también es el caso de Newton quien mediante ecuaciones matemáticas describió y predijo el movimiento de los planetas así descubriendo que los fenómenos del mundo son fundamentalmente predecibles. Por su parte James Clerk Maxwell, hizo uso de ecuaciones matemáticas para poder resumir la electricidad y el magnetismo, dichas ecuaciones tuvieron un gran impacto en el desarrollo de la tecnología en el siglo xx (Reyes, 2021).

Por su parte Niels Bohr en el año de 1923 dio paso a la definición de la estructura del átomo por medio de ecuaciones sencillas explico las propiedades de estos usando así la mecánica cuántica.

Si bien en el año de 1925 se formuló una de las primeras teorías completas de la mecánica cuántica por parte de Erwin Schrödinger quien formulo una ecuación que dio a los científicos una forma para poder comprender todos los fenómenos cuánticos anteriores y así mismo proporcionó una forma sistemática de poder explorar el mundo atómico para la obtención de nuevos e inexplorados efectos cuánticos, dicha ecuación lleva el mismo nombre de este científico.

Posteriormente en 1985, David Deutsch describió el primer computador cuántico de tipo universal con la capacidad de simular cualquier otro computador cuántico (principio de ChurchTuring ampliado), esto abrió el camino para el desarrollo de algoritmos cuánticos que son basados en este modelo de máquina cuántica. Un caso de ejemplo es el de David Deutsch y Richard Jozsa en el año 1992, el algoritmo de Simon's en 1994 y cerrando con dos de los más famosos, el algoritmo de búsqueda de Grover y el algoritmo de factorización de enteros propuesto por Shor.

De esta forma en el año 1998 Isaac Chuang del Laboratorio Nacional de los Alamos, Neil Gershenfeld del Instituto de tecnología de Massachusetts (MIT), y Mark Kubinec de la Universidad de California desarrollaron el primer computador cuántico que funcionaba a 2 qubits, haciendo uso de técnicas de resonancia magnética nuclear. Este computador tenía la capacidad de tener datos de entrada y proporcionar datos de salida.

La computación e información cuántica si bien se ha visto como una extensión de la información, en las cuales se hace uso de los fenómenos de la mecánica cuántica como una herramienta para el procesamiento de la información. Dicho esquema fue propuesto por Richard Feynman y David Deutsch durante la década de los ochenta, ellos imaginaron la idea de poder explorar los grados de libertad de los sistemas cuánticos como una nueva forma para realizar el procesamiento de la información.

Haciendo referencia a la compuerta de Hadamard es posible destacar su importancia al efectuar paralelismo cuántico, ya que al quedar en un estado superpuesto cualquier algoritmo que se calcule sobre el resultado de la

compuerta de Hadamard se efectuara para todas las posibles configuraciones de entradas, ya que esta compuerta existe en su versión de 1 qubit de n qubits.

Si bien en los sistemas de cómputo ordinarios la unidad mínima de información es el bit, en la teoría de la computación este elemento tiene su similar denominado bit cuántico o qubit. Este elemento del cómputo cuántico es descrito como un objeto matemático con ciertas propiedades particulares, por ejemplo, este contiene una realidad física la cual es representada como un sistema cuántico de dos estados, si bien la forma de tratar esta realidad es de manera abstracta en todo sentido, dando como resultado una teoría general de la computación e información que no es dependiente del sistema físico que es usado para su implementación.

En la actualidad existen diversos esquemas que pueden describir los estados de un sistema cuántico, siendo así el más conveniente y conciso el descrito por la notación Dirac; esta se ha convertido en uno de los estándares aplicados en la física moderna. Dicho modelo es un estado cuántico representado por un vector, denotado por  $| \rangle$  denominado ket; las operaciones sobre estos se realizan a través de operadores que son transformaciones lineales que actúan sobre el ket.

En esta competencia por lograr la cima del campo cuántico, diversas empresas se han dado a la tarea de desarrollar procesadores cuánticos. Los más relevantes son los siguientes:

- Intel con un procesador cuántico de prueba con una capacidad de 49 qubit con el nombre de “Tangle Lake”,
- D-wave Systems y Google con “Bristlecone”, un procesador con capacidad de 72 qubits basado en Quantum Annealing.
- Por ultimo está el procesador “Sycamore” con una capacidad de 54 qubits. Si bien con este Google afirmaba haber logrado la supremacía cuántica, muestreando la salida de un circuito cuántico pseudoaleatorio.

Si bien IBM dando un salto hacia la disposición directa para el uso de un ordenador cuántico en el mes de mayo de 2016 este anuncio el lanzamiento de IBM Q, quien fue su primer computador cuántico de 5 qubits de acceso libre a cualquier persona experta o no en el tema. Un años después en mayo de 2017, IBM anuncio la introducción de dos nuevos procesadores en su computadora cuántica:

- El primero es un procesador de 16 qubit quien permitiría realizar experimentos de mayor complejidad que su antecesor el procesador de 5 qubit.
- El segundo es el prototipo de un procesador cuántico comercial de 17 qubit, diseñado con una arquitectura que garantice una potencia del doble de la disponible en la nube con acceso público en la actualidad.

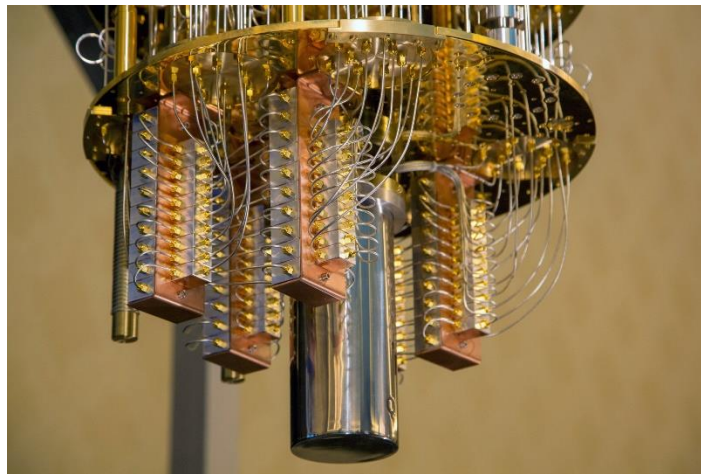
También a partir del 2017 IBM explico que ordenadores cuánticos funcionan a través de átomos y no de circuitos como los clásicos. Además, que no son basados en bits si no en qubits que pueden adoptar un estado de 0 y 1 y un estado de ambos a la vez, lo cual proporciona mayor velocidad de procesamiento.

Haciendo un enfoque educativo se destaca el trabajo de Anirban Pathak, quien en mayo del año 2018 publicó material para su clase de mecánica cuántica, soportando sus resultados en el computador cuántico IBMQ-Yorktown utilizando 2 qubits. En dicho documento, Pathak explicó con brevedad como generar una cuenta IBM, el procedimiento para abrir el programa, la implementación de compuertas lógicas cuánticas básicas y la forma de poder visualizar estos resultados.

## CAPITULO 2

### 2.1 COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Es una rama de la computación basada en los principios de la superposición y el entrelazamiento cuántico para el desarrollo de computadoras muy distintas a las tradicionales (ilustración 1). Estas máquinas, serán capaces de almacenar más estados por unidad de información y operar con algoritmos mucho más eficientes a nivel numérico.



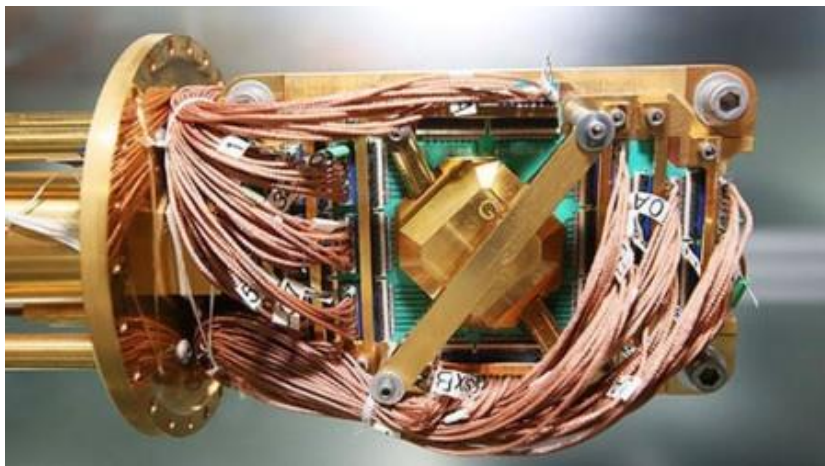
*Ilustración 1 Circuitos internos de una computadora cuántica (Laureano Cornejo, 2019)*

La nueva generación de superordenadores aprovechara el conocimiento de la mecánica cuántica (parte de la física que estudia las partículas atómicas y subatómicas), para poder superar las limitaciones de una computadora convencional.

Pero las leyes de la física también tienen complicaciones dentro de la computación cuántica ya que impone limitaciones al relacionarse con el calor disipado por los ordenadores ya que este es inherente tal como explico Rolf W.

*"En toda operación lógicamente irreversible que manipula información, como la reinicialización de memoria, hay aumento de entropía, y una cantidad asociada de energía es disipada como calor" (Rolf W. Landauere, 1960).*

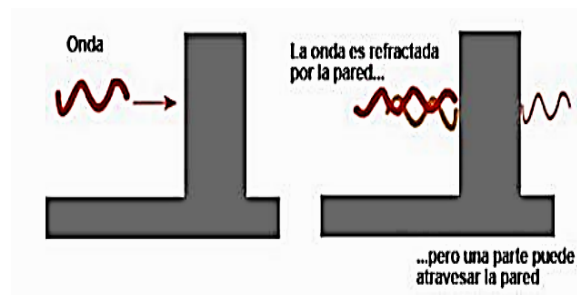
Esto nos hace recordar que uno de los principales problemas actuales de los superordenadores de alta velocidad es la eliminación de calor que se produce durante el funcionamiento. Por otro lado, mientras siga evolucionando la tecnología aumenta la escala de integración y se incluyen más transistores en un mismo campo. Ya que estos ordenadores avanzados realizan problemas a mayor escalabilidad y de coherencia, permite realizar múltiples operaciones y eliminar el efecto túnel que afecta a la programación actual en la escala nanométrica.



*Ilustración 2 Microchip de una computadora cuántica (Javier Pastor, 2016)*

Un ejemplo sencillo es la creación de microchips (ver ilustración 2), ya que mientras más chico sea mayor velocidad de procesamiento se alcanza, pero hay un límite en el cual dejan de funcionar. Cuando estos microchips llegan a una escala nanométrica los electrones se escapan del canal por el que circulan llamado túnel un fenómeno cuántico.

Esto quiere decir que si una partícula normal se encuentra con un obstáculo es común que no pueda atravesarlo y rebote, pero a diferencia de las partículas cuánticas estas presentan un comportamiento ondulatorio esto provoca que parte de los electrones atraviese las paredes en las que se encuentra confinado. En la siguiente imagen se puede mostrar una descripción grafica de esta situación.



*Ilustración 3 Refracción de ondas en una computadora cuántica (Vicente Moret, 2013)*

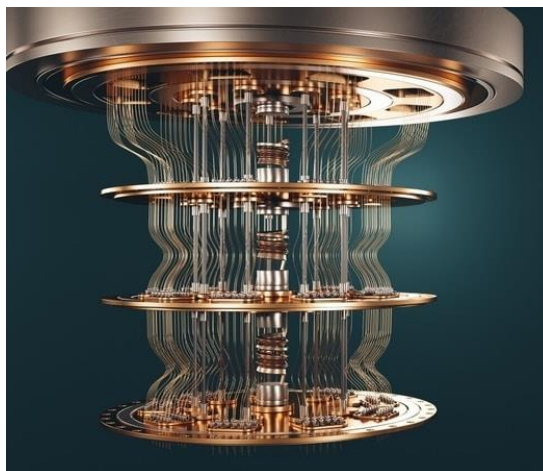
En el año 2000 en IBM (International Business Machines, que es una corporación multinacional de tecnología informática y consultoría con sede en Nueva York), se diseñó un computador cuántico de 5- qubits capaz de ejecutar un algoritmo de búsqueda de orden que forma parte del algoritmo de Shor. Este algoritmo se ejecutaba en un simple paso cuando en un computador tradicional requería numerosas iteraciones. Ese mismo año, científicos de Los Álamos anunciaron el desarrollo de un computador cuántico de 7-qubits.



*Ilustración 4 IBM Quantum: Q System (HPC wire, 2019)*

Ya en el año 2017 IBM presentó la primera computadora cuántica de uso comercial (ver ilustración 4), diseñada con un chip cuántico de 20 qubits. Este chip para su funcionamiento, requiere estar aislado de cualquier ruido y necesita materiales hiperconductores y fríos a una temperatura de 273 grados centígrados bajo cero.

Las condiciones del funcionamiento de la computadora cuántica se detallan en mejor forma más adelante en los diversos apartados de este documento.



*Ilustración 5 Cilindro de la computadora cuántica (Nico Velez, 2020)*



Para lograrlo se creó una caja de cristal de museo que logra aislar al sistema de cualquier condición externa y en el centro se construyó un cilindro plateado que es el refrigerador que mantiene el sistema a la temperatura antes mencionada. La computadora está conectada a la nube de IBM y trabaja mediante un software de código abierto llamado Qiskit. La computadora vive dentro del cilindro (ver ilustración 5).

Podemos contrastar la diferencia entre los inicios de la computadora cuántica y el avance que se ha logrado a través del tiempo, actualmente existe un prototipo de 49 qubits.

### **2.1.1 USOS DE LA COMPUTADORA CUÁNTICA.**

Con la implementación de este tipo de tecnología se podrá desarrollar el diseño de nuevos materiales en lugar de descubrirlos, el modelado de riesgo financiero ya que son problemas que se tratan de forma aproximada y no exacta; una de las industrias que se podrían ver beneficiadas de la computación cuántica es la farmacéutica, ya que actualmente la simulación de moléculas químicas para el desarrollo de nuevos medicamentos tiene los siguientes inconvenientes:

*"Hoy día es casi imposible simular la molécula de agua, que son dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, muy simple. Pero es algo que las computadoras de hoy día no pueden simular. Esperamos que más con esta tecnología podamos simular moléculas más complicadas para el desarrollo de fórmulas químicas", dijo.*

*"Las farmacéuticas se pasan hasta cinco años generando nuevas formulaciones para atacar enfermedades y existe esperanza de que esta tecnología ayude a simular las formulas químicas y acelerar el proceso de creación de medicinas", agregó. (Gabriela Cruz Thompson 2017).*

Poder trabajar en la simulación química e interacción entre moléculas para generar medicamentos podría acelerar los procesos al grado de no tener que experimentar con personas o animales los fármacos para tenerlos listos.



*Ilustración 6 Análisis de datos de una computadora cuántica (Docline, 2020)*

IBM busca generar más casos de usos posibles para la computadora cuántica mientras que los usos principales para las computadoras se numeran a continuación:

### **1. Procesamiento de grandes series de datos.**

Los ordenadores cuánticos están diseñados para manejar grandes volúmenes de datos, además de descubrir patrones y detectar anomalías de manera extremadamente rápida. Las sucesivas iteraciones de los diseños de ordenadores cuánticos y mejoras en el código de corrección de errores cuánticos, están permitiendo a los desarrolladores sacar cada vez más provecho del potencial de los bits cuánticos. Al mismo tiempo, permiten optimizar dicho potencial para resolver todo tipo de problemas a los que se enfrentan las empresas en la toma de decisiones

## 2. Velocidad de resolución de problemas complejos.

Los ordenadores cuánticos son capaces de resolver en cuestión de segundos cálculos que a un ordenador actual le llevaría años. Con la computación cuántica, los desarrolladores pueden realizar simultáneamente múltiples cálculos a partir de datos de entrada múltiples. Los ordenadores cuánticos son fundamentales para procesar datos que las empresas generan a diario.



*Ilustración 7 Velocidad de procesamiento de datos (Arsys, 2020)*

## 3. Mejora de los modelos y la visión de negocio.

Para disponer de un mejor marco de datos, las empresas ahora necesitan modelos complejos con un potencial de procesamiento suficiente para modelar las situaciones más complejas. La creación de mejores modelos con tecnología cuántica permitirá acelerar muchos procesos.

En el sector salud permitirá recortar enormemente los ciclos de desarrollo de tratamientos de enfermedades (ver ilustración 8), como en el caso del

COVID-19 acortando el ciclo de investigación, pruebas de seguimiento y tratamiento del virus.



*Ilustración 8 Computación cuántica en el descubrimiento de nuevos fármacos (Alberto Iglesias, 2021)*

Por otro lado, en el sector bancario, ayudará a reducir los casos de implosión financiera, o a mejorar la cadena logística del sector manufacturero.

#### **4. Integración de múltiples series de datos.**

Para manejar e integrar múltiples series de datos de distintas fuentes, los ordenadores cuánticos también ofrecen gran ayuda, acelerando los procesos y facilitando el análisis. La capacidad para manejar volúmenes de información tan compleja hace de la computación cuántica la opción ideal para resolver problemas comerciales en un amplio abanico de campos.

## **5. Finanzas**

Las empresas optimizarían aún más sus carteras de inversión y mejorarían los sistemas para la detección del fraude y la simulación.

## **6. Salud**

Este sector se beneficiaría en el desarrollo de nuevos medicamentos y tratamientos personalizados genéticamente, así como en la investigación del ADN.

## **7. Ciberseguridad**

La programación cuántica conlleva riesgos, pero también avances para la encriptación de datos, como el nuevo sistema Quantum Key Distribution (QKD). Esta nueva técnica para el envío de información sensible utiliza señales luminosas para detectar cualquier intromisión en el sistema.

## **8. Movilidad y transporte**

Compañías como Airbus utilizan la computación cuántica para diseñar aviones más eficientes. Además, los qubits permitirán avances notables en los sistemas de planificación del tráfico y la optimización de rutas (Ortega, 2019).

## 2.1.2 DIFERENCIAS ENTRE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA Y COMPUTACIÓN LA TRADICIONAL

Existen diversas diferencias entre la computación cuántica y la tradicional son dos mundos prácticamente paralelos con algunas similitudes y numerosas diferencias la una de la otra, el más resaltado es el uso del qubit frente al bit. Sin embargo, cada una utiliza un tipo de señal para poder enviar una respuesta al ordenador es por eso que tenemos 3 aspectos relevantes en cuanto a sus diferencias:

- **Lenguaje de programación**

### Cantidad de información (o datos) obtenida

Unidad	Bit	Qubit
2	2	4
3	3	8
4	4	16
5	5	32
6	6	64
7	7	128
8	8	256
9	9	512
10	10	1024
11	11	2048
12	12	4096
13	13	8192
<b>n</b>	<b>N</b>	<b>2<sup>n</sup></b>

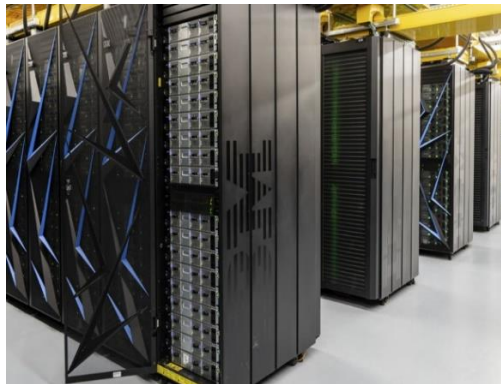
• *Tabla 1 Comparativa entre bit y qubit*

Mientras que la computación cuántica no contiene en sí un código propio para programar esta recurre al desarrollo e implementación de algoritmos específicos. Por otra parte, la computación tradicional cuenta con lenguajes como Java, SQL o Python.

- **Funcionalidad**

Una computadora cuántica no es una herramienta para uso cotidiano, como un ordenador personal. Estas supercomputadoras son tan complejas que solo tienen usos específicos en ámbitos como corporativo, científico y tecnológico.

- **Arquitectura**



*Ilustración 9 Cambio de estrategias en IBM (Economía digital, 2020)*

Cuando nos referimos a la composición de un ordenador cuántico este es más sencillo que el de uno convencional ya que no tiene memoria ni procesador. Este tipo de equipos se limitan a un conjunto de qubits que sirven de base para su funcionamiento (ver ilustración 9).

## 2.2 QUBIT

Un qubit corresponde a la unidad básica de información en la informática cuántica y se caracteriza por tener la capacidad de estar en una combinación de sus estados. A si como un bit binario es la unidad básica de información en la computación clásica, un qubit es la unidad básica de información en la computación cuántica. La computación cuántica está permitiendo nuevos descubrimientos en campos como la asistencia sanitaria, la energía, los sistemas ambientales, los materiales inteligentes, etc



*Ilustración 10 Uso de qubits como unidad básica de información(Iberdrola, 2021)*

La informática cuántica utiliza como unidad básica de información el qubit (ver ilustración 10), en lugar del bit convencional. La principal característica de este sistema alternativo es que admite la superposición coherente de unos y ceros, los dígitos del sistema binario sobre los que gira toda la computación, a diferencia del bit, que solo puede adoptar un valor de uno o cero.

Esta particularidad de la tecnología cuántica hace que un qubit pueda ser cero y uno a la vez, y además en distinta proporción. La multiplicidad de estados posibilita que un ordenador cuántico de apenas 30 qubits, por ejemplo, pueda



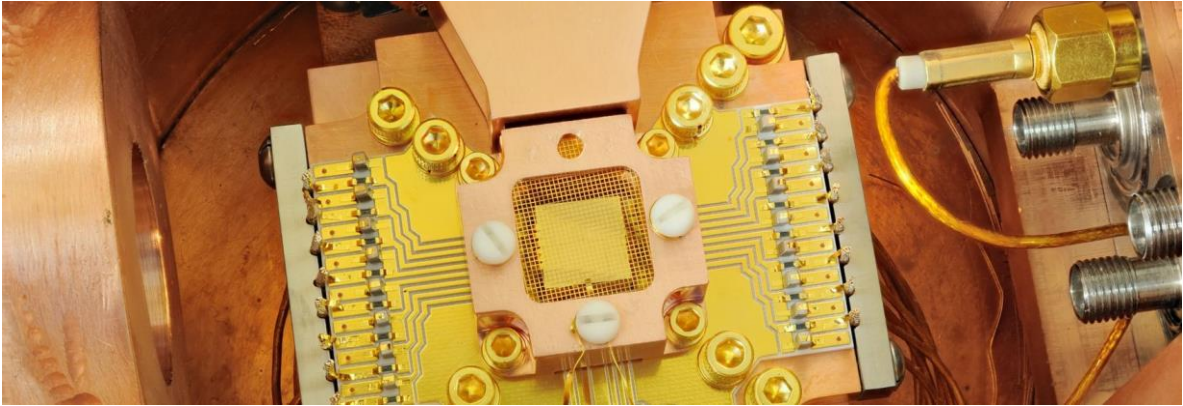
realizar 10 billones de operaciones en coma flotante por segundo, es decir, unos 5,8 billones más que la videoconsola PlayStation más potente del mercado. Los qubits se representan mediante una superposición de varios estados posibles.

Un qubit utiliza los fenómenos de superposición de la mecánica cuántica para lograr una combinación lineal de dos estados. Un bit binario clásico solo puede representar un único valor binario, como 0 o 1, lo que significa que solo puede estar en uno de dos estados posibles. Sin embargo, un qubit puede representar un 0, un 1 o cualquier proporción de 0 y 1 en la superposición de ambos estados, con una probabilidad determinada de ser un 0 y una probabilidad determinada de ser un 1.

La superposición proporciona a los equipos cuánticos una capacidad de cálculo superior ya que permite que los algoritmos cuánticos procesen la información en una fracción del tiempo que se tardaría incluso en los sistemas clásicos más rápidos para solucionar determinados problemas.

- La cantidad de información que un sistema de qubits puede representar aumenta de manera exponencial. La información que 500 qubits pueden representar fácilmente no sería posible ni con más de  $2^{500}$  bits clásicos.
- Un equipo clásico tardaría millones de años en encontrar los factores primos de un número de 2048 bits. Los qubits podría realizar este cálculo en solo unos minutos.

Hay muchas implementaciones físicas de qubits. Mientras los equipos clásicos utilizan los conocidos chips de silicio, los qubits (a veces denominados "qubits de equipos cuánticos") pueden estar hechos de iones atrapados, fotones, átomos artificiales o reales, o cuasipartículas. En función de la arquitectura y los sistemas de qubits, algunas implementaciones necesitan que los qubits se mantengan a temperaturas cercanas al cero absoluto.



*Ilustración 11 Cambio hacia el ordenador cuántico (Araceli Venegas, 2016)*

## **Superposición, interferencia y entrelazamiento**

La superposición permite que los algoritmos cuánticos utilicen otros fenómenos de la mecánica cuántica, como la interferencia y el entrelazamiento. Juntos, la superposición, la interferencia y el entrelazamiento crean una capacidad de cálculo que puede solucionar problemas con una velocidad exponencialmente más rápida que la de los equipos clásicos.

### **Interferencia**

Una consecuencia de la superposición es la interferencia. Los estados de los qubits pueden interferir entre sí, porque cada estado se describe mediante una amplitud de probabilidad, igual que las amplitudes de las ondas.

La interferencia constructiva mejora la amplitud, mientras que la interferencia destructiva la anula. Estos efectos se usan en los algoritmos de cálculo cuántico y es lo que los diferencia fundamentalmente de los algoritmos clásicos. La interferencia se utiliza junto con el entrelazamiento para permitir la aceleración cuántica que promete la computación cuántica.

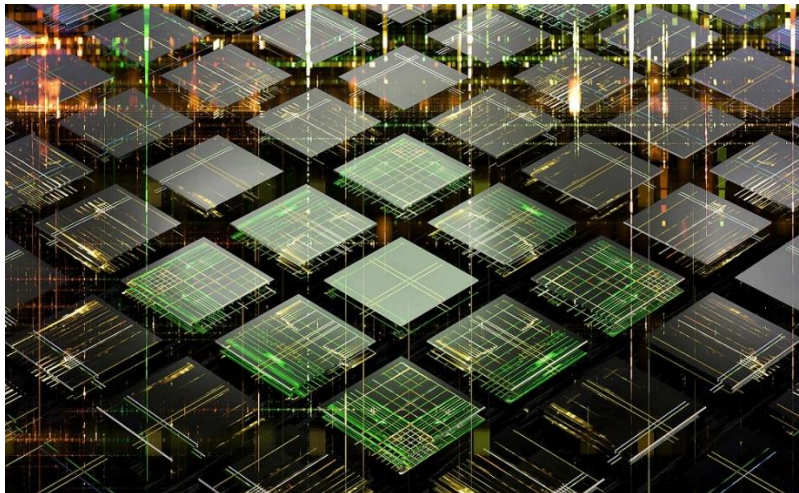
## Entrelazamiento

Varios qubits pueden presentar entrelazamiento cuántico; los qubits entrelazados siempre se correlacionan entre sí para formar un único sistema, incluso cuando están infinitamente alejados uno de otro, la medición del estado de uno de los qubits nos permite conocer el estado del otro, sin necesidad de medirlo directamente.

El entrelazamiento es necesario para cualquier cálculo cuántico y no se puede realizar de forma eficaz en un equipo clásico. Las aplicaciones incluyen la factorización de números grandes (algoritmo de Shor) y la solución de problemas de búsqueda (algoritmo de Grover).

## El futuro de los qubits

A medida que avanzan las tecnologías cuánticas, estamos más cerca de encontrar soluciones a algunos de los problemas más difíciles del mundo. Aunque este nuevo paradigma tiene un potencial increíble, la computación cuántica se encuentra aún en desarrollo.



*Ilustración 12 Salto de bits a qubits (BBVA, 2019)*

## **Los qubits son frágiles**

Uno de los principales obstáculos de la computación cuántica es la naturaleza frágil de los qubits. El entrelazamiento del sistema de qubits con su entorno, incluida la configuración de las mediciones, podría alterar fácilmente el sistema y producir no coherencia. Por tanto, se están desarrollando actualmente avances en la construcción de hardware de computación cuántica y los métodos de corrección de errores.

## **Los qubits topológicos son más estables**

Para solucionar el problema de la fragilidad, Microsoft utiliza qubits topológicos, que se estabilizan manipulando su estructura y rodeándolos con compuestos químicos que los protegen frente a la contaminación externa. Los qubits topológicos están protegidos del ruido gracias a las propiedades topológicas de las cuasipartículas, lo que hace que el hardware cuántico de Microsoft sea más resistente a los errores. Esta mayor estabilidad ayudará a los equipos cuánticos a escalar su capacidad para realizar cálculos más largos y complejos, y así poder alcanzar soluciones más complejas (Investigación y Ciencia, 2014).

## 2.3 COMPUERTAS CUÁNTICAS

Las compuertas cuánticas son utilizadas para la manipulación del estado de uno o más qubits dentro de un sistema cuántico. Esta clase de compuertas son representadas mediante matrices unitarias y se multiplican por el vector de estado de izquierda a derecha como se muestra en la siguiente ilustración.

$$U|\Psi\rangle = \begin{bmatrix} U_{00} & U_{01} \\ U_{10} & U_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{00}\alpha_0 + U_{01}\alpha_1 \\ U_{10}\alpha_0 + U_{11}\alpha_1 \end{bmatrix}.$$

*Ilustración 13 Matriz unitaria multiplicada por vector de estado.*

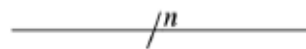
En el modelado de un circuito de una computadora cuántica se representa mediante diagramas de circuitos haciendo uso de esta simbología:

- Una línea representa un qubit, esta se puede etiquetar de acuerdo al estado del qubit.



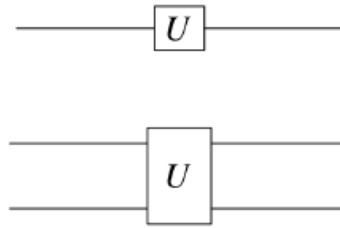
*Ilustración 14 Demostración de un qubit en un diagrama de circuito.*

- Representación condensada en n qubits.



*Ilustración 15 Demostración condensada de n qubits en un diagrama de circuito*

- Representación de una compuerta cuántica genérica.



*Ilustración 16 Ejemplo de la representación de compuertas lógicas cuánticas en un diagrama de circuito.*

En el campo de la mecánica cuántica, la evolución de estados preserva el producto interno del espacio del Hilbert, por lo tanto, en la computación cuántica las compuertas que cambian el estado de los qubits son operadores unitarios y por tanto son reversibles mediante el operador adjunto. Hablando acerca de las mediciones realizadas sobre los qubits, estas se describen con operadores hermiticos, los cuales son auto-adjuntos.



*Ilustración 17 Diagrama de circuito de una compuerta NOT cuántica.*

### 2.3.1 COMPUERTA DE HADAMARD

Esta compuerta es una de las más comunes entre las compuertas cuánticas principales, si bien esta actúa sobre un único qubit y se expresa matemáticamente mediante esta matriz unitaria:

$$\hat{H} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

*Ilustración 18 Matriz de la compuerta de Hadamard*

La matriz de la compuerta de Hadamard actúa sobre un estado  $|\varphi\rangle$  cualquiera como:

$$H \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} a + b \\ a - b \end{bmatrix}$$

Por lo tanto, si se introduce el estado  $|0\rangle$  esta devolverá el estado  $|+\rangle$ , dicho en otras palabras, devuelve la superposición de los estados  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$ . Si se pretende tener una interpretación más visual se puede hacer uso de la esfera de Bloch. La aplicación de la compuerta de Hadamard a un estado es equiparable a una rotación en  $\pi$  radianes sobre el eje X siguiendo una rotación de  $\frac{\pi}{2}$  radianes sobre el eje Y.

### 2.3.2 COMPUERTAS CUÁNTICAS DE UN QUBIT

La compuerta lógica más simple existente tanto en la computación clásica como en la cuántica es aquella que cambia el valor de un bit o qubit, esta es la compuerta NOT o si bien llamada de negación. Aplicando esta compuerta a un qubit genérico se observaría de la siguiente forma:

$$\mathbf{NOT} (\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle) = \beta |0\rangle + \alpha |1\rangle .$$

*Ilustración 19 Demostración de fórmula de aplicación de una compuerta NOT a un qubit genérico*

En base computacional esta compuerta hace correspondencia a la matriz de Pauli para el eje X como se demuestra a continuación:

$$\mathbf{NOT} = \sigma_x = X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

*Ilustración 20 Correspondencia de la compuerta NOT aplicada en un qubit genérico sobre el eje X*

Recordemos que las matrices de Pauli son usadas en la física cuántica en contexto de representar la cantidad de movimiento de rotación contenida en un objeto también llamado momento angular intrínseco o espín. Si se quisiera modelar esta matriz en un diagrama de circuitos se obtendría la forma mostrada en la ilustración 5.

Otra forma de expresar la acción de la compuerta NOT a un qubit genérico es mediante la siguiente expresión:

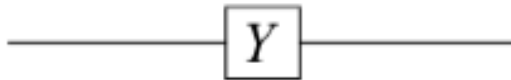
$$\mathbf{NOT} |j\rangle = |j \oplus 1\rangle$$

*Ilustración 21 Alternativa para la expresión de una compuerta NOT aplicada en un qubit.*



Donde  $a \oplus b$  representa el residuo de  $\frac{a+b}{2}$ , a esto se le conoce como *suma de modulo-2*.

Dentro de los operadores del grupo de Pauli también existen compuertas validas como por ejemplo el operador del eje Y representado en un diagrama de esta forma:



*Ilustración 22 Representación de la compuerta Y de Pauli mediante un diagrama de circuito.*

Dicha compuerta tiene un efecto de la siguiente manera:

$$Y |j\rangle = (-1)^j i |j \oplus 1\rangle$$

Ahora bien, el operador o compuerta Z tiene como efecto un cambio de fase que está condicionado directamente al valor del qubit:

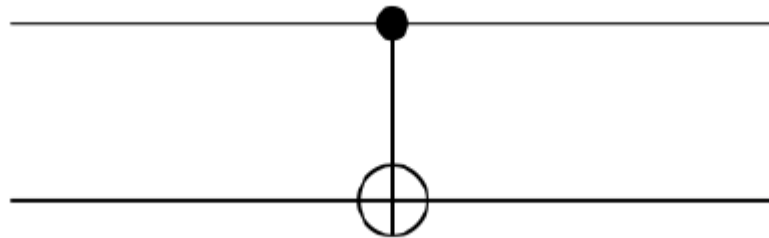
$$Z |j\rangle = (-1)^j |j\rangle$$

*Ilustración 23 Operador Z*

Este operador contiene una representación de circuito idéntica al operador Y, pero con la letra correspondiente. Los grupos de Pauli actúan como rotaciones de valor fijo sobre la esfera de Bloch.

### 2.3.3 COMPUERTAS DE DOS QUBITS

El entrelazamiento cuántico es una propiedad y ventaja fundamental dentro de la computación cuántica, este solo se puede presentar en sistemas de dos o más qubits. Para poder lograr este punto es necesaria la implementación de la compuerta C-NOT cuántica, que es también conocida como negación controlada, el diagrama de circuito de esta compuerta es el siguiente:



*Ilustración 24 Diagrama de circuito de la compuerta CNOT cuántica.*

Esta compuerta trabaja con dos qubits llamados control y objetivo, realizando así la siguiente acción:

$$\text{CNOT} |x\rangle |y\rangle = |x\rangle |x \oplus y\rangle$$

Esta acción tiene el significado de que esta compuerta cambia el valor del qubit objetivo  $|00\rangle$ , si y solo si el qubit control  $|0\rangle$  es  $|1\rangle$ . La notación usada es:

$$|00\rangle = |0\rangle, |01\rangle = |1\rangle, |10\rangle = |2\rangle \text{ y } |11\rangle = |3\rangle$$

Mediante esta es posible obtener los elementos de una matriz de la compuerta en base computacional:

$$(\text{CNOT})_{ab} = \langle a | \text{CNOT} | b \rangle$$

Quedando la matriz de la siguiente forma:

$$\text{CNOT} \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Como se observa en el bloque 2 x 2 derecho inferior de la matriz corresponden al operador NOT. La forma de generar el entrelazamiento cuántico a partir de esta compuerta se realiza de esta forma:

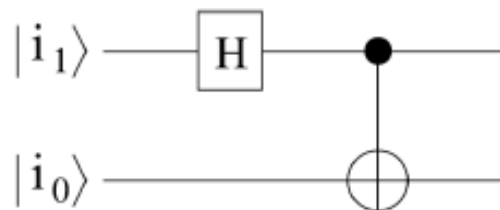
$$\text{CNOT} (\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle) |0\rangle = \alpha |00\rangle + \beta |11\rangle$$

Tomando como punto de partida alguno de los eigenestados de dos qubits, la acción combinada de la compuerta de Hadamard sobre el qubit control y la CNOT genera la llamada Base de Bell de estados entrelazados.

$$\begin{aligned} |00\rangle &\rightarrow |\phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |11\rangle), \\ |10\rangle &\rightarrow |\phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle - |11\rangle), \\ |01\rangle &\rightarrow |\psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle + |10\rangle), \\ |11\rangle &\rightarrow |\psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle - |10\rangle). \end{aligned}$$

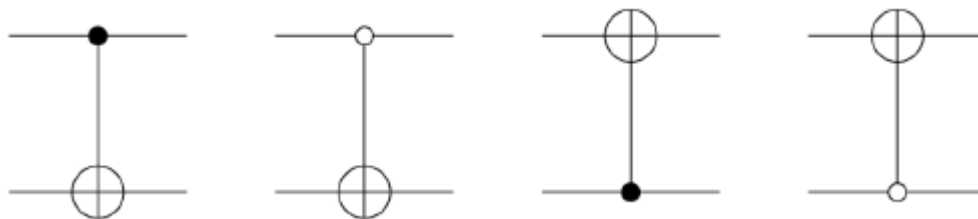
*Ilustración 25 Base de Bell*

Si bien el diagrama de circuito que compete a este proceso es el siguiente:



*Ilustración 26 Representación de la combinación que produce la Base de Bell en un diagrama de circuito.*

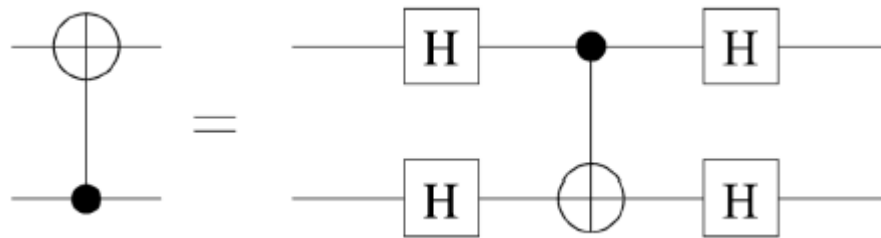
El uso de la compuerta CNOT puede ser generalizado hacia diversas variantes, en las cuales son cambiados los papeles del qubit de control y del qubit de objetivo o si bien es cambiada la condición para la negación. Si bien el diagrama de estas compuertas es el siguiente:



*Ilustración 27 Representaciones de las compuertas cuánticas CNOT de forma generalizada en un diagrama de circuito.*

En esta representación el circuito negro tiene como significado que la condición para el cambio es que el control sea  $|1\rangle$  y el circuito blanco representa la condición de control  $|0\rangle$ .

Si bien la combinación estándar de la compuerta CNOT después ser invertida y al final otra estándar, genera un intercambio  $|xy\rangle \rightarrow |yx\rangle$  llamado compuerta SWAP. La tercera compuerta CNOT mencionada puede ser obtenida a partir de la estándar y compuertas de Hadamard en la combinación siguiente



*Ilustración 28 Diagrama de circuito de la combinación producida por la tercer compuerta de la ilustración 14*

## 2.4 ESFERA DE BLOCH.

En la mecánica cuántica, la esfera de Bloch es una representación geométrica del espacio de estados de un sistema cuántico de dos niveles. Su nombre alude al físico suizo Felix Bloch.

Geoméricamente se trata de una esfera del radio de la unidad en que cada punto de la superficie corresponde a un estado puro del espacio de Hilbert bidimensional, que caracteriza a un sistema cuántico de dos niveles.

Cada par de puntos diametralmente opuestos sobre la esfera de Bloch corresponde a dos estados ortonormales en el espacio de Hilbert, que forman una base del mismo. Tales estados resultan ser autovectores de la proyección del operador de espín  $1/2$  sobre la dirección que determinan los dos puntos. Dicho operador se expresa empleando las matrices de Pauli, y todo sistema cuántico de dos niveles puede equipararse al caso de espín  $1/2$ .

El punto de coordenadas cartesianas  $(0,0,1)$  corresponde al autovector con el autovalor positivo de la matriz de Pauli  $\sigma_z$ , mientras que el punto opuesto  $(0,0,-1)$  corresponde a un autovector con autovalor negativo. En la terminología de computación cuántica, empleada al tratar los qubits, ambos estados se designan por  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$  respectivamente. Estos estados en terminología de espín  $1/2$  pueden designarse por  $|+\rangle$  y  $|-\rangle$ , o “spin arriba” y “spin abajo”.

Lo dicho para los puntos sobre el eje Z vale para los otros ejes empleando en cada caso la matriz de Pauli correspondiente.

Simplificando este concepto, la esfera de Bloch es una representación geométrica de los “estados cuánticos” en la superficie de una esfera unitaria 3D, lo que ayuda a los investigadores a comprender los datos de la superposición dada de un estado cuántico de una manera matemáticamente sólida (Villatoro, 2014).

## Estado cuántico 2D.

La forma más general de representar un estado cuántico de dos niveles (0 y 1) de los cuales podemos representar cualquier superposición.

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

Los estados cuánticos se muestran geoméricamente como vectores. Usamos un tipo específico de notación llamada notación bra-ket en mecánica cuántica para representar vectores en una forma más condensada.

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

Símbolo bra-ket “|>” denota un vector de columna, y se conoce como “ket”. La forma “sujetador” (<|) de un vector es sola la transposición conjugada del original, que se muestra a continuación:

$$\langle 0| = (1 \ 0)$$

$$\langle 1| = (0 \ 1)$$

Esta notación aparece innumerables veces en cálculos más avanzados de la teoría cuántica.

De la formula general, los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  serán 0 y 1 que son los coeficientes de los estados o vectores. Ya que, en computación cuántica, cuando medimos/registramos el valor de un qubit, como el bit, en realidad obtenemos solo un 0 o un 1, la superposición en este caso se vuelve 0 y 1 debido a que terminamos midiendo físicamente. Esto es lo que se conoce como el problema de medición de la mecánica cuántica, donde mientras no observemos un estado cuántico, existe una superposición de valores potenciales, pero tan pronto como lo medimos, sólo vemos un valor específico.

Los matemáticos e investigadores idearon una manera de predecir con cierto grado de precisión lo que medirían dado un estado cuántico asignando probabilidades de medir un 0 o un 1.

Representamos estas probabilidades como coeficientes de los vectores de estado 0 y 1. Esto conduce a un estado cuántico dado (representado por el ket "Psi" en el lado izquierdo de la ecuación) que se puede mostrar como una combinación lineal de los vectores 0 y 1, como se muestra a continuación:

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

$$\alpha \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$

Por lo tanto, con los vectores de estado 0 y 1 y sus correspondientes amplitudes de probabilidad, podemos representar cualquier estado cuántico de dos niveles. Uno podría recordar que la suma total de las probabilidades de cualquier situación debe sumar 1. Si esta suma son números complejos la dificultad del cálculo aumentará debido a sus propiedades aritméticas con "n" involucrados.



Sin embargo, el físico Max Born ideó una regla homónima la cual consiste en cuadrar y luego sumarlos para encontrar 1, como tal:

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

Esto es lo que se conoce como restricción de normalización, ya que todos los sistemas de dos niveles deben obedecer esta cualidad para funcionar como un qubit.

La notación aplicada a los números complejos ( $z$ ) se conoce como “módulo al cuadrado” que se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} z &= x + iy \\ z^* &= x - iy \\ zz^* &= |z|^2 = |z|^2 = x^2 + y^2 \end{aligned}$$

De esta manera se pueden obtener números positivos, probando así la regla de Born. Establecer el módulo cuadrado de  $z$  igual a 1, proporciona un círculo unitario de radio 1 en el plano cartesiano. De esta manera se ve la necesidad de algún tipo de representación circular/esférica.

### Estados cuánticos en 3 Dimensiones.

Los números complejos que son coeficientes de los vectores de estado base 0 y 1, utilizados para representar “amplitudes” (un término que refleja su naturaleza positiva y negativa dado que son complejos) de la probabilidad de medirlos.

Recordando la identidad de Euler:

$$e^{i\theta} = \cos(\theta) + i\sin(\theta)$$

$$\text{Donde } i = \text{sqrt}(-1)$$

Esta fórmula se utilizará para derivar una nueva representación de nuestra fórmula de “estado cuántico”. Las identidades para las coordenadas polares de “x” e “y” para reescribir el número complejo “z” que usamos antes en forma polar, como lo siguiente:

$$x = r\cos(\theta)$$

$$y = r\sin(\theta)$$

$$z = x + iy = r\cos(\theta) + ri(\sin(\theta))$$

$$= r(\cos(\theta) + i\sin(\theta))$$

De esta forma, podemos ver que “r” se multiplica por la mano derecha de la identidad de Euler, por lo que podemos simplificar drásticamente nuestra representación de un número complejo dado  $z_c$ , que tiene su propio ángulo y valor de r:

$$z_c = r_c e^{i\theta_c}$$

Redefiniendo nuestros coeficientes “ $\alpha$ ” y “ $\beta$ ” con la nueva forma polar, ahora tenemos una representación polar de nuestro estado cuántico:

$$|\varphi\rangle = r_\alpha e^{i\theta_\alpha} |0\rangle + r_\beta e^{i\theta_\beta} |1\rangle$$

Vemos en esta representación que el estado cuántico tiene 4 incógnitas, los coeficientes “ $r$ ” y “ $\varphi$ ” de los coeficientes “ $\alpha$ ” y “ $\beta$ ”.

Para reducir la cantidad de variables involucradas para facilitar la visualización de los estados cuánticos. Existe un concepto de computación cuántica conocido como “fase global”, donde si dos estados cuánticos en estado polar difieren solo por un factor de algunos “ $e^{i\Theta}$ ” entonces se consideran indistinguible (por el momento) y puede tratarse como lo mismo matemáticamente (aunque en realidad es un poco más complicado, el concepto general será útil para una variable).

Si se multiplica el estado cuántico por una fase global se define un nuevo estado de “ $\varphi$ ”, donde:

$$|\varphi'\rangle = e^{-i\theta_\alpha} |\varphi\rangle$$

Evaluando la ecuación anterior es:

$$\begin{aligned} |\varphi'\rangle &= e^{-i\theta_\alpha} (r_\alpha e^{i\theta_\alpha} |0\rangle + r_\beta e^{i\theta_\beta} |1\rangle) \\ &= |0\rangle + |1\rangle \\ &= |0\rangle + |1\rangle \end{aligned}$$

De esta manera es posible involucrar tres variables en la ecuación. Luego, si se considera la forma cartesiana de un número complejo  $z = x + iy$  y recordando

que el cuadrado de medir 0 y 1 tiene que ser 1, aplicando la restricción de normalización homónima al estado cuántico da:

$$|\varphi|^2 + |\beta|^2 = 1 \rightarrow |r_\alpha|^2 + |x + iy|^2$$

$$r_\alpha^2 + x^2 + y^2 = 1$$

Recordando el sistema de coordenadas esféricas, que define puntos en función de su ángulo en relación con los ejes x, y y z junto con su distancia desde el origen.

Sabiendo que  $r = 1$ , se representa la forma de un estado cuántico con coordenadas esféricas para obtener una representación del estado cuántico solo en términos de sus ángulos con respecto al eje de la esfera de Bloch

Las coordenadas esféricas se definen como:

$$x = r \sin \theta \cos \phi$$

$$y = r \sin \theta \sin \phi$$

$$z = r \cos \theta$$

Estableciendo  $z = r$ , lo que significa  $r \cos(\theta) = \cos(\theta)$  y reemplazando  $x + iy$  en el estado cuántico  $\varphi'$ , se obtiene:

$$|\varphi' \rangle = z|0 \rangle + (x + iy)|1 \rangle$$

$$= \cos(\theta) |0 \rangle + \sin \theta (\cos \phi + i \sin \phi) |1 \rangle$$

Esto es la identidad de Euler, a la cual se le multiplica por  $\sin(\theta)$  y reemplazando se obtiene:

$$\cos \theta |0 \rangle + e^{i\phi} \sin \theta |1 \rangle$$

Dados los ángulos  $\theta$  y  $\phi$  restringidos como tales:

$$0 \leq \theta \leq \pi, 0 \leq \phi \leq 2\pi$$

Finalmente se obtiene la forma general de un estado cuántico que se encuentra en la esfera de Bloch, usando medios ángulos se obtiene:

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

Teniendo en cuenta que podemos combinar linealmente las kets 0 y 1 para mostrar un estado cuántico vectorialmente:

$$\begin{pmatrix} \cos(\theta/2) \\ e^{i\phi}\sin(\theta/2) \end{pmatrix}$$

De esta manera al tener una ecuación que para desarrollarla necesita dos valores de entrada, se pueden determinar visualmente cualquier estado cuántico normalizado de dos niveles en una esfera 3D.

## **CAPITULO 3**

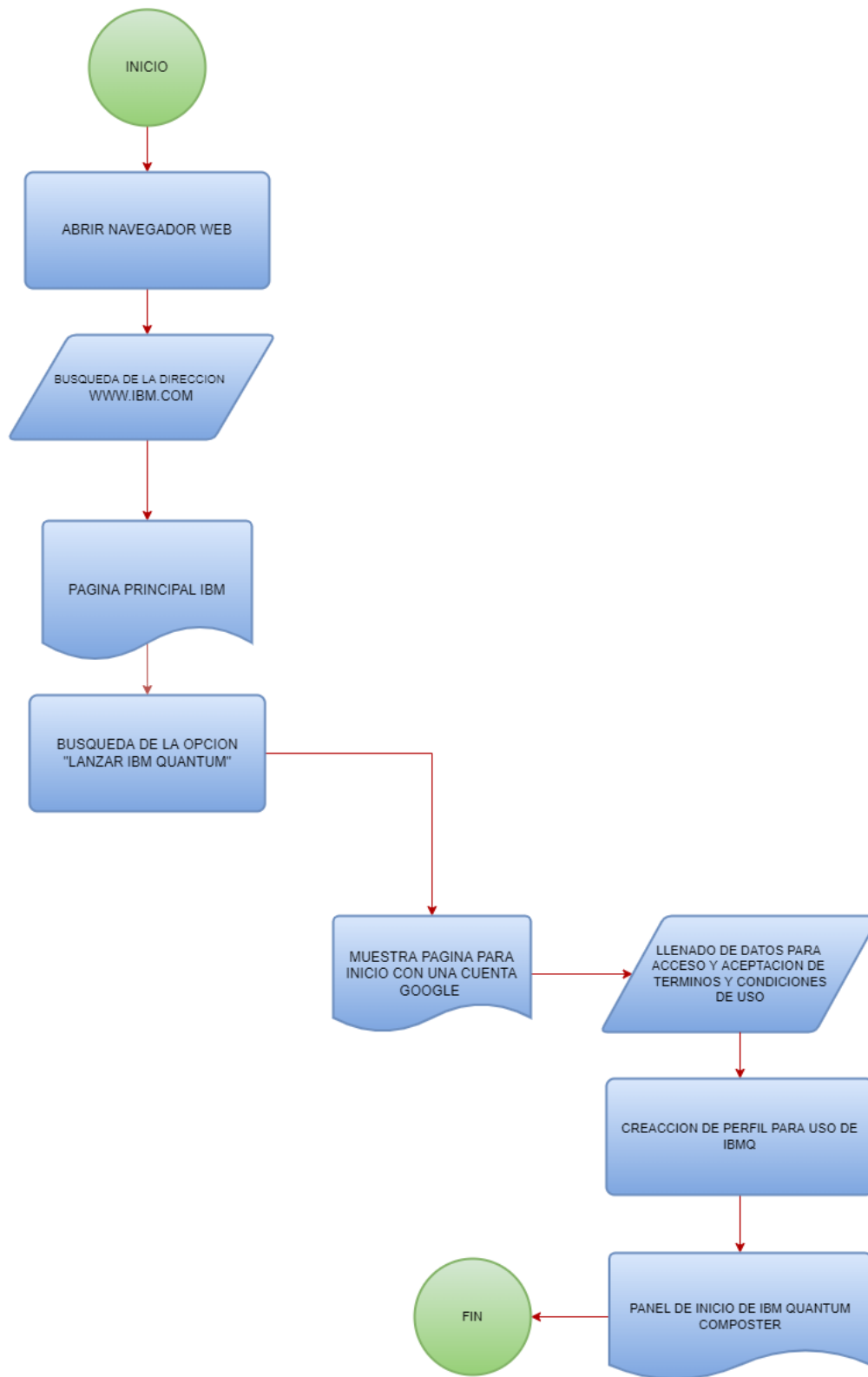
### **3.1 CONDICIONES DE FUNCIONAMIENTO DE UNA COMPUTADORA CUÁNTICA**

Estos ordenadores son extremadamente sensibles y necesitan ciertas condiciones muy concretas de presión, temperatura y aislamiento para funcionar sin errores. La interacción de estas máquinas con partículas externas provoca fallos de medición y el borrado de las superposiciones de estados, de ahí que permanezcan selladas y se tengan que manejar a través de ordenadores convencionales.

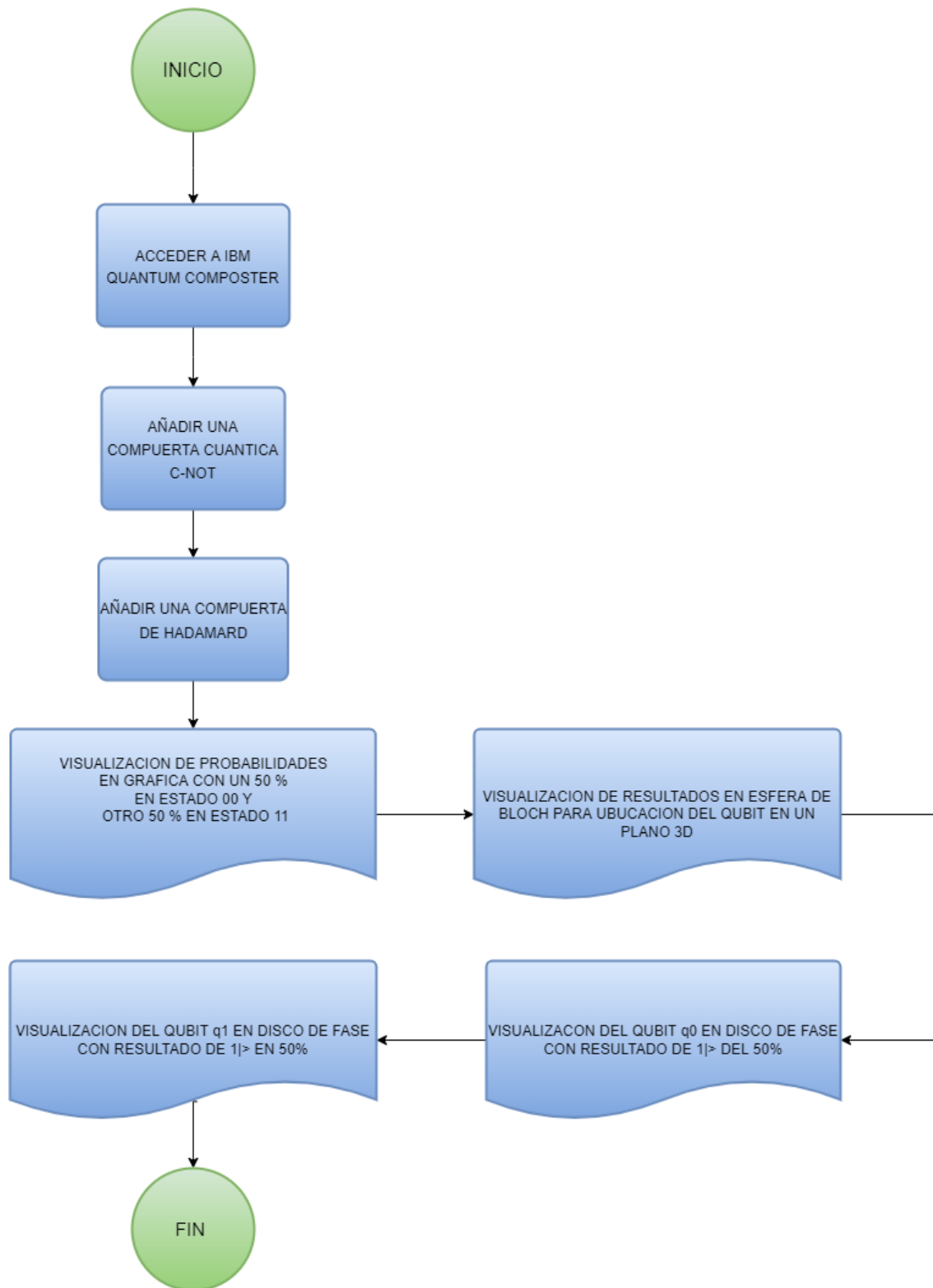
Un ordenador cuántico necesita una presión atmosférica casi inexistente, una temperatura ambiente próxima al cero absoluto (-273 °C) y aislarse del campo magnético terrestre para evitar que los átomos se muevan y colisionen entre sí, o interactúen con el entorno. Además, estos sistemas funcionan durante intervalos muy cortos de tiempo, por lo que la información se termina dañando y no puede almacenarse, dificultando aún más la recuperación de los datos.

### **DIAGRAMAS DE FLUJO**

En la página 63 se mostrará el desarrollo de un diagrama de flujo en donde se muestra el procedimiento para poder acceder a la computadora cuántica IBM Quantum Composer. Así mismo en la página 63 se muestra una propuesta de simulación usando la estructura de un diagrama de flujo.



Diagramas 1 Acceso a IBMQ

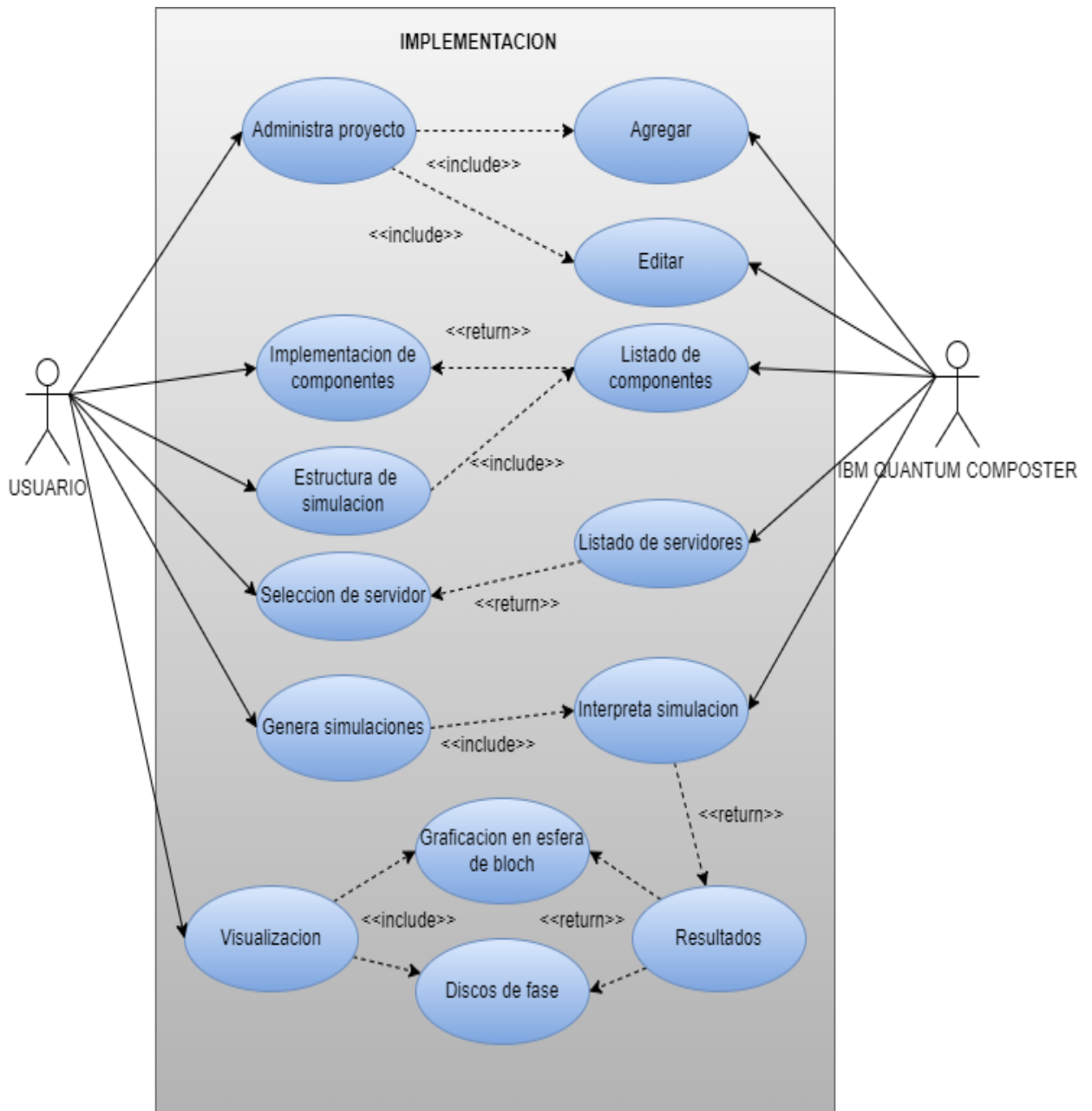


Diagramas 2 Propuesta de simulación



## DIAGRAMA DE CASOS DE USO

A continuación, se muestra un diagrama bajo el cual se realiza la explicación de las tareas que conlleva el usuario y la computadora cuántica IBMQ.

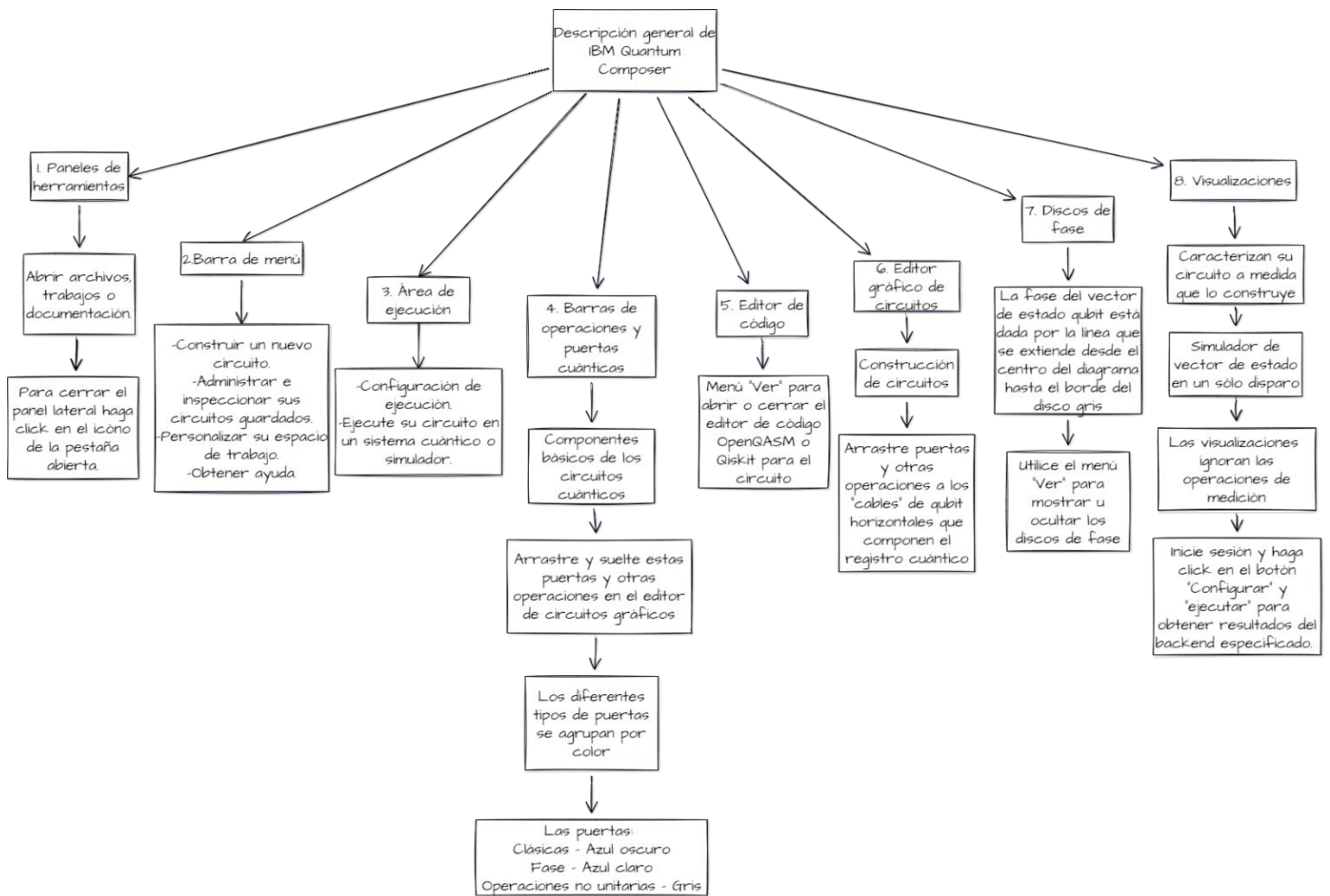


Diagramas 3 Casos de uso Implementación

### 3.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DE IBM QUANTUM COMPOSER.

IBM Quantum Composer tiene un conjunto de herramientas personalizables que le permiten construir visualizar y ejecutar circuitos cuánticos en sistemas cuánticos o simuladores.

**Diagrama de la descripción general de IBM Quantum Composer:**



Mapa Conceptual 1 Descripción general de IBMQ (Contreras, 2021)

- Utilice el menú “Más opciones” (ilustración 29) en cada ventana para acceder a herramientas y acciones adicionales.

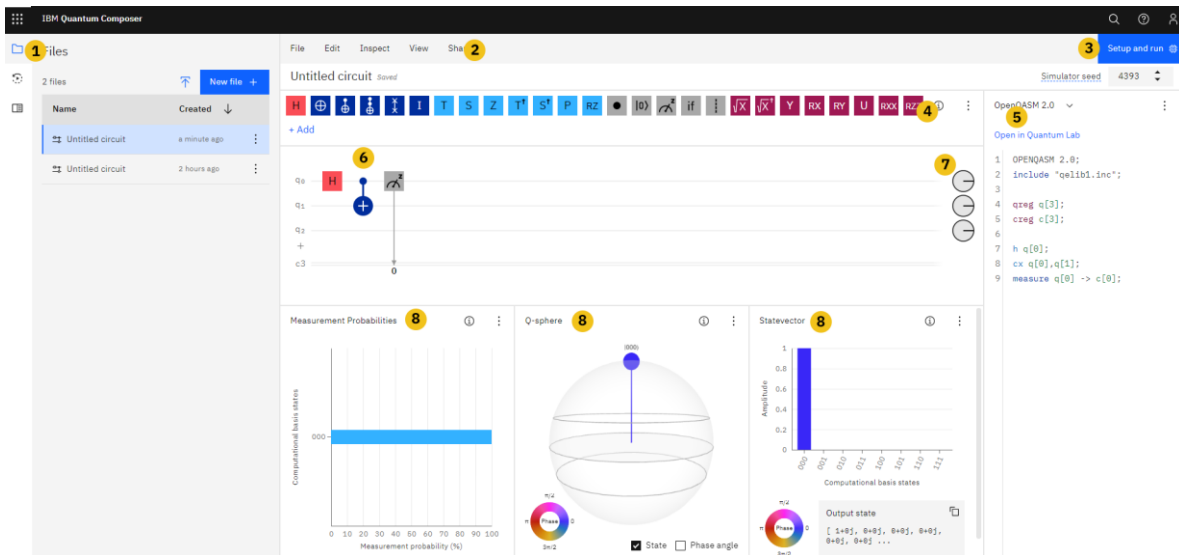


Ilustración 29 Vista pantalla principal IBMQ 2017

## 1. Paneles de herramientas:

- Utilice el panel lateral para ver sus archivos o trabajos, o la documentación.
- Para cerrar el panel lateral, haga clic en el icono de la pestaña abierta.

## 2. Barra de menú:

- Use estos menús para abrir un nuevo circuito, administrar e inspeccionar sus circuitos guardados, obtener ayuda y más.

## 3. Área de ejecución:

- Cambie la configuración de ejecución y luego ejecute su circuito en un sistema cuántico o simulador.

## 4. Barras de operaciones y puertas cuánticas:

- Componentes básicos de los circuitos cuánticos.
- Arrastre y suelte estas puertas y otras operaciones en el editor de círculos gráficos.
- Los diferentes tipos de puertas se agrupan por color:
  - Puertas clásicas: Azul oscuro
  - Puertas de fase: Azul claro
  - Operaciones no unitarias: Gris

### **5. Editor de código:**

- Use el menú “Ver” para abrir o cerrar el editor de código, este le permite ver y editar el código OpenQASM o Qiskit para el circuito.

### **6. Editor gráfico del circuito:**

- Aquí se construye un circuito.
- Arrastre puertas y otras operaciones a los “cables” de qubit horizontales que componen su registro cuántico.
- Para quitar una puerta de un cable, seleccione la puerta y haga clic en la “X”.
- Para editar los parámetros y la configuración de las puertas que admiten la edición, seleccione la puerta en el editor gráfico y haga clic en “Editar”

### **7. Discos de fase:**

- La fase del vector de estado qubit en el plano complejo está dada por la línea que se extiende desde el centro del diagrama hasta el borde del disco.

- El disco gira en sentido antihorario alrededor del punto central.
- Utilice el menú “Ver” para mostrar u ocultar los discos de la fase.

## **8. Visualizaciones:**

- Caracterizan su circuito a medida que lo produce.
- Usan un simulador de vector de estado de un solo disparo, que es diferente del sistema especificado en la Configuración y en la configuración de ejecución.
- Las visualizaciones ignoran cualquier operación de medición que agregue.
- Inicie sesión y haga clic en el botón “Configurar” y “Ejecutar” para obtener resultados del backend especificado.

## CAPITULO 4

### 4.1 ACCESO A IBMQ

Como primer paso para comenzar con la implementación de la compuerta cuántica C-NOT dentro de la computadora cuántica de IBMQ es de importancia aclarar que su uso es adaptable a una gran gama de navegadores web; siendo de esta forma para realizar esta simulación se hizo uso del navegador web google Chrome.

Es importante aclarar que es necesario una buena conexión a internet para que el funcionamiento de la computadora cuántica tenga mejor rendimiento y se pueda observar con más claridad los problemas que el usuario requiera ejecutar. El funcionamiento del simulador consiste en la conexión de la computadora cuántica IBMQ con servidores de IBM que realizan el enlazamiento para proporcionar los recursos de esta a las manos del usuario.

Comenzamos abriendo nuestro navegador desde nuestro equipo de cómputo en este caso Chrome. Una vez seleccionado y posteriormente abierto el navegador colocaremos en la barra de búsqueda "IBMQ", y esperaremos a que cargue la página en cuestión.

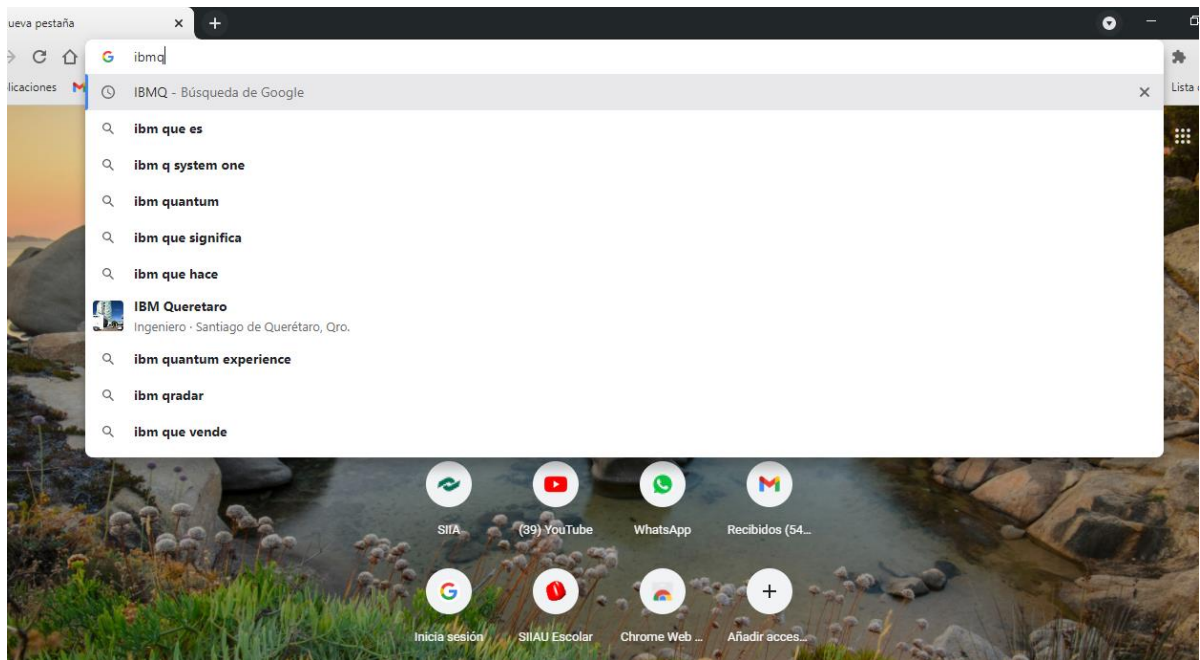


Ilustración 30 Acceso mediante buscador

Ya cargada la búsqueda el navegador lanzara diversos enlaces para acceder a la página de IBM, si bien es importarte seleccionar el enlace correcto, en este caso accedimos al segundo link denominado “Quantum Computing | IBM”.

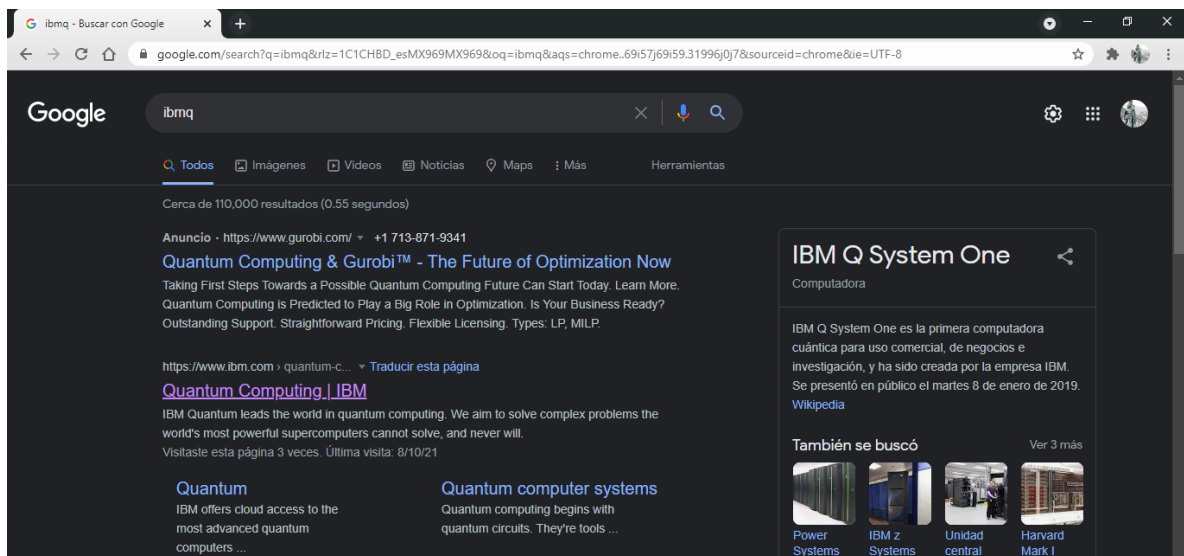
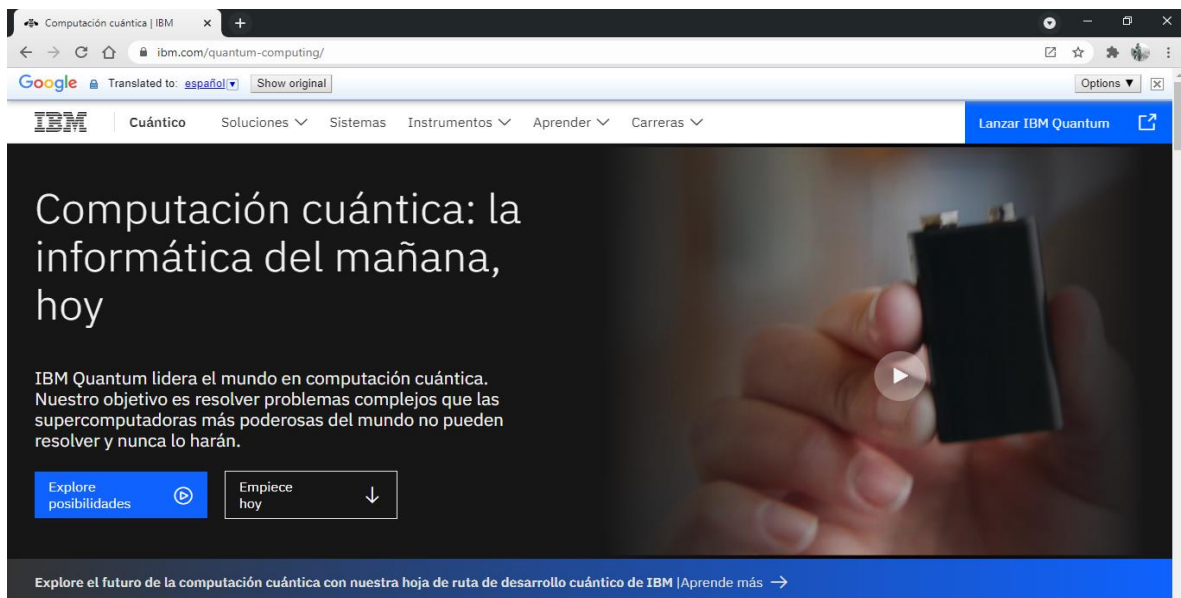


Ilustración 31 Resultado de busqueda

Cuando se ingresa a la página de IBM Q aparecerá la siguiente pantalla principal con diversas opciones. IBMQ ofrece una página completa para poder comprender más el funcionamiento de la computadora cuántica.



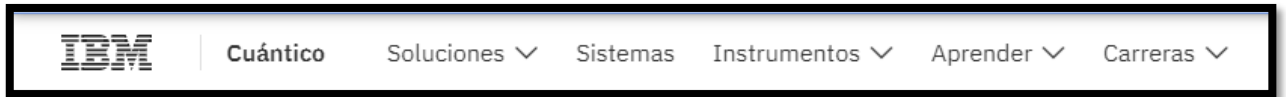
*Ilustración 32 Pagina principal IBM*

En la parte superior contamos con cinco menús desplegables los cuales son:

- Soluciones. Este submenú ofrece opciones para el manejo de IBMQ en empresas, desarrolladores e investigadores.
- Sistemas. Describe las aplicaciones que puede ofrecer IBMQ
- Instrumentos. Ofrece una gama de herramientas y servicios de IBMQ.
- Aprender. Introduce al usuario al mundo de la computación cuántica dando a conocer definiciones, estudios y simuladores.



- Carreras. En este apartado IBM ofrece pasantías y un catálogo de carreras que ofrece la misma.



*Ilustración 33 Submenús de la página principal del portal IBMQ*

Abordando el cómo se inicializa la computadora cuántica IBMQ, como primer paso debemos ir a la opción “Lanzar IBM Quantum”, una vez que hayamos ingresado la página nos abrirá una nueva ventana en donde nos solicitará ingresar a la computadora cuántica haciendo uso de alguna cuenta, ya sea perteneciente al portal de IBM o si bien mediante las cuentas usuales como lo son Google y Twitter. No obstante, antes de ingresar totalmente a la computadora cuántica existen ciertos parámetros de seguridad que debemos cumplir, esto con el fin de protegerla de ataques cibernéticos mediante bots o alguna otra forma de amenaza.

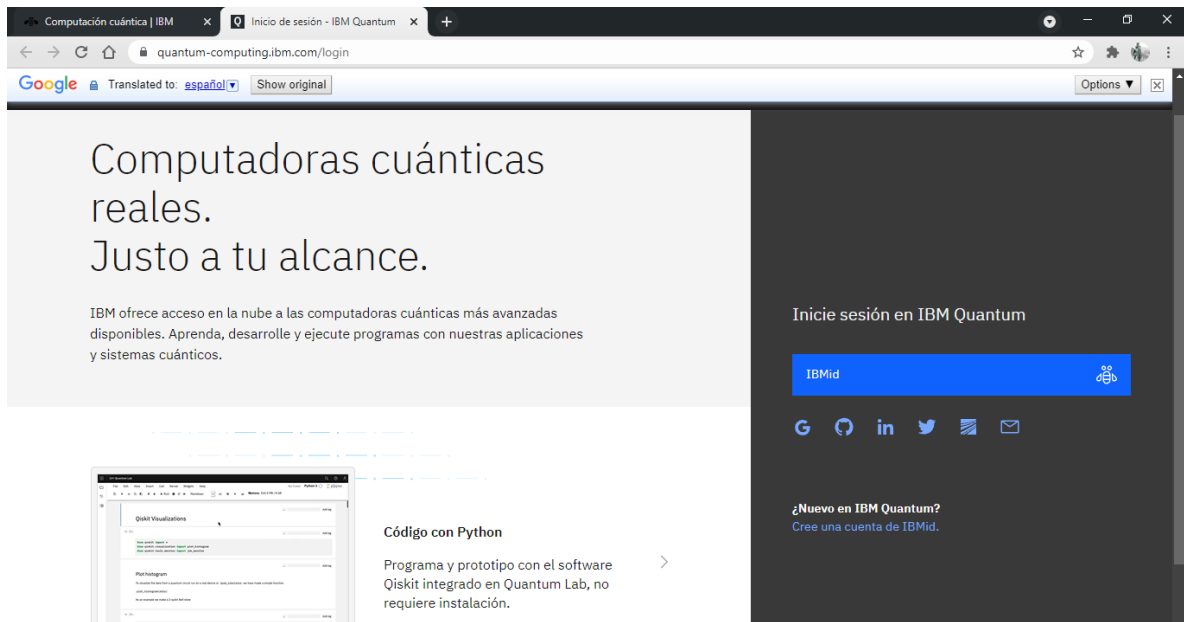


Ilustración 34 Enlace de inicio de sesión para IBMQ

Si bien el primer cerco de seguridad que deberemos pasar debido a que se hizo uso de una cuenta google que es externa a IBM será el dar la autorización para poder acceder mediante esta, como se puede visualizar en la ilustración 7.

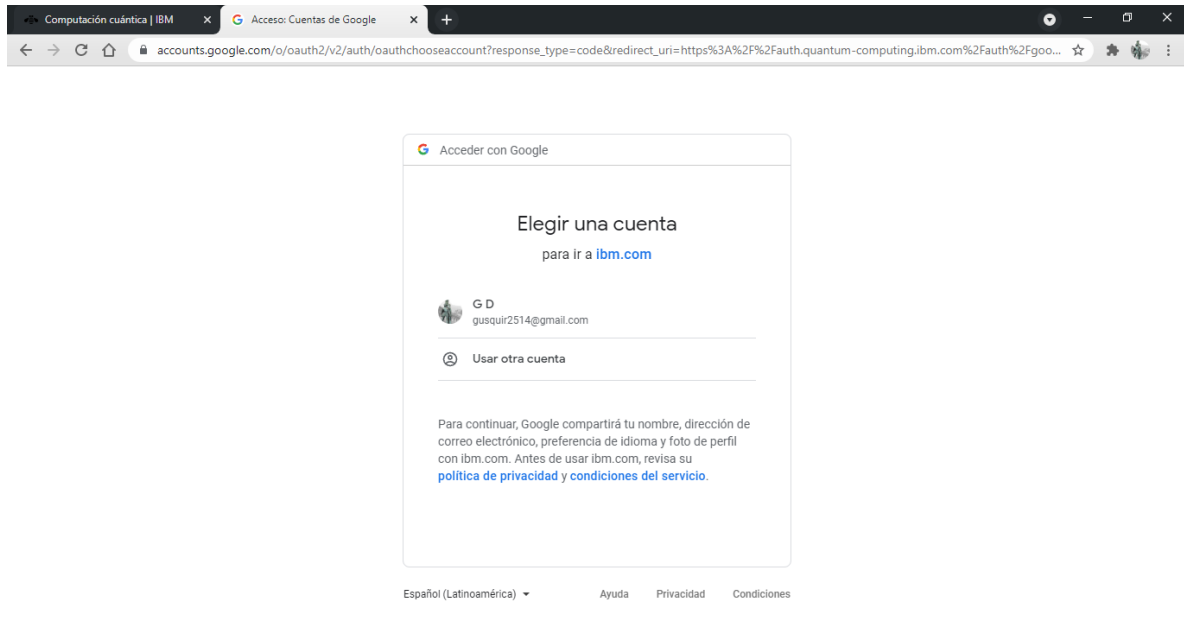
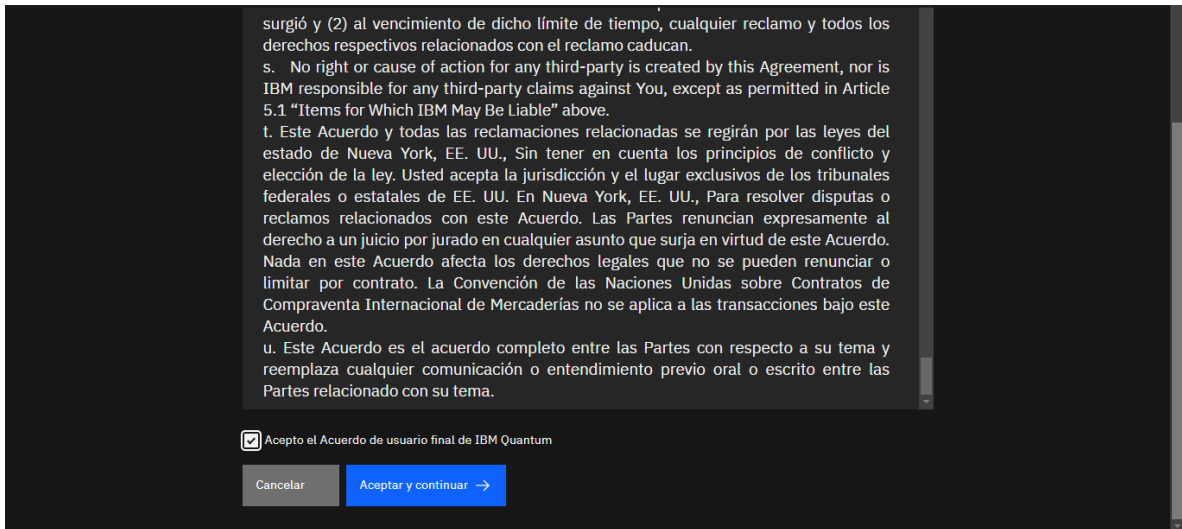


Ilustración 35 Validación de cuenta Google para acceso a IBMQ

Como siguiente paso se procede a la aceptación de las políticas de privacidad y el acuerdo de usuario que tenemos al acceder a IBMQ.

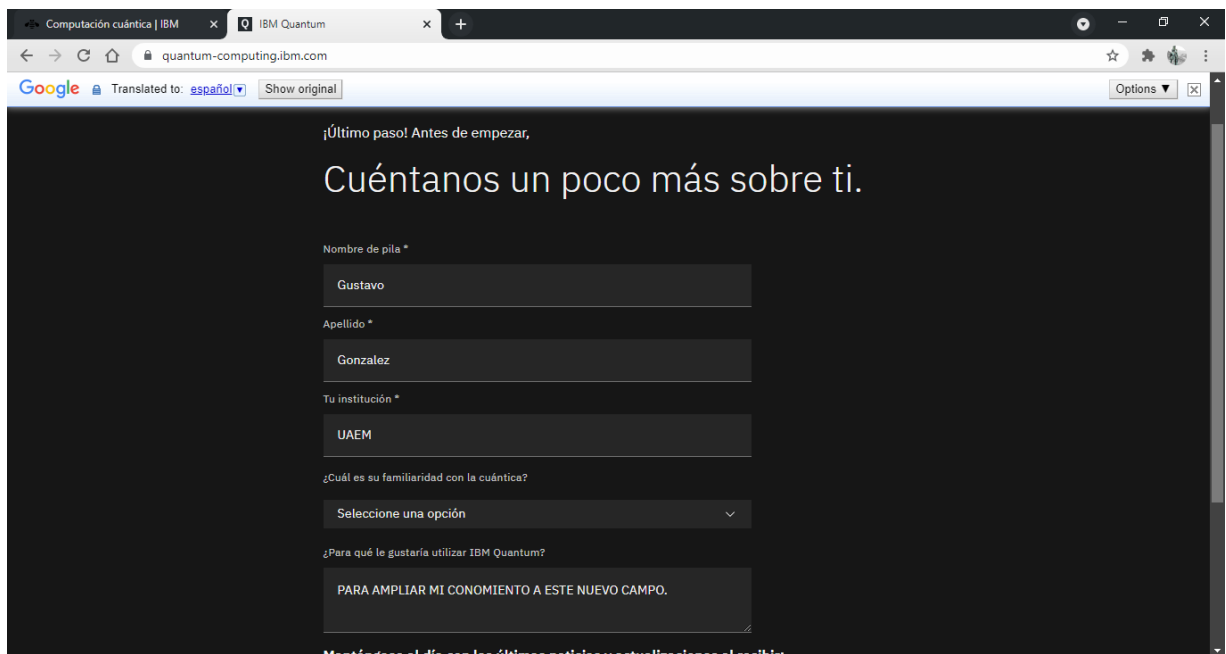


*Ilustración 36 Políticas de privacidad de IBMQ*

Al final de los diferentes cercos de seguridad que maneja IBMQ para poder iniciar con su uso, es el llenado de un formulario en donde se solicitaran los siguientes datos:

- Nombre
- Apellido
- Institución
- Familiaridad
- Uso

Responder a este formulario es de vital importancia no solo por ser un cerco de seguridad sino también para poder ofrecer nosotros como usuarios, un fidedigno uso de este computador cuántico.

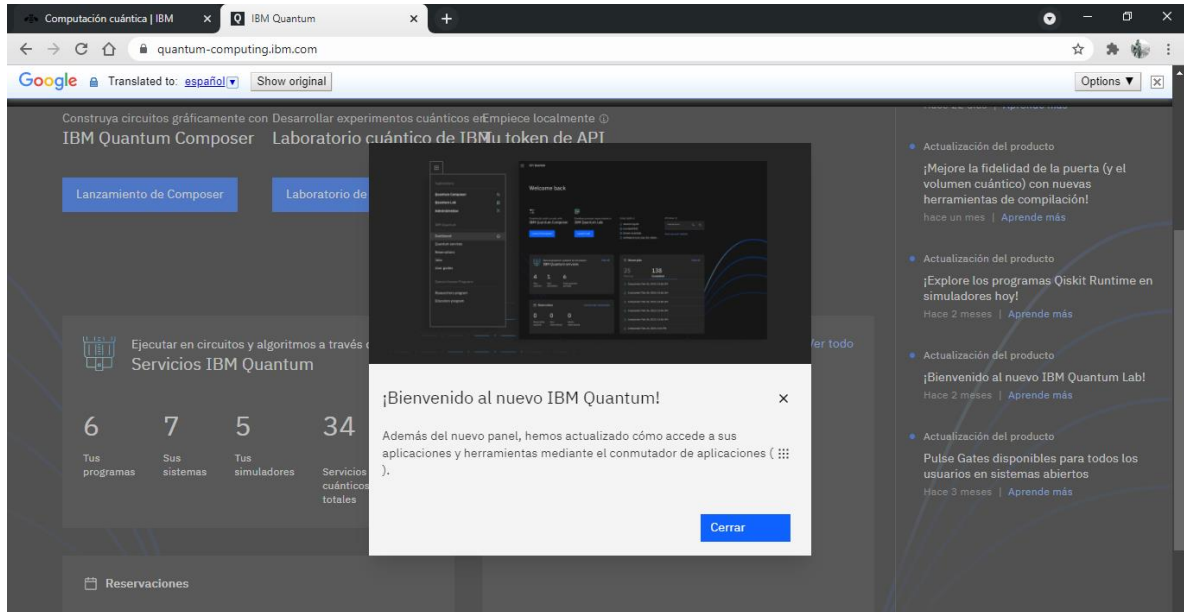


*Ilustración 37 Cuestionario de seguridad IBMQ*

Al concluir con el formulario nos permitirá el acceso a nuestro perfil dentro de la computadora cuántica.

## 4.2 COMPONENTES DE IBMQ

La computadora nos dara la bienvenida y nos indicara como acceder a nuestras aplicaciones y herramientas de una manera mas facil y sencilla.



*Ilustración 38 Panel de bienvenida al acceder a IBMQ*

Ya dentro de nuestro perfil creado dentro de IBMQ nos desplegara diversas opciones para comenzar a utilizar la computadora cuantica; de lado derecho encontramos las notificaciones recientes, esto incluye noticias relevantes sobre IBM y su computador cuantico. En la parte inferior derecha podemos encontrar dos opciones:

- Lanzamiento composer:

Nos permite crear circuitos graficamente mediante IBM Quantum Composter.

- Laboratorio de lanzamiento:

Permite desarrollar experimentos cuanticos mediante codigo dentro de IBM u token de API

En este caso nosotros seleccionamos Lanzamiento de composer ya que nuestra representacion sera graficamente.

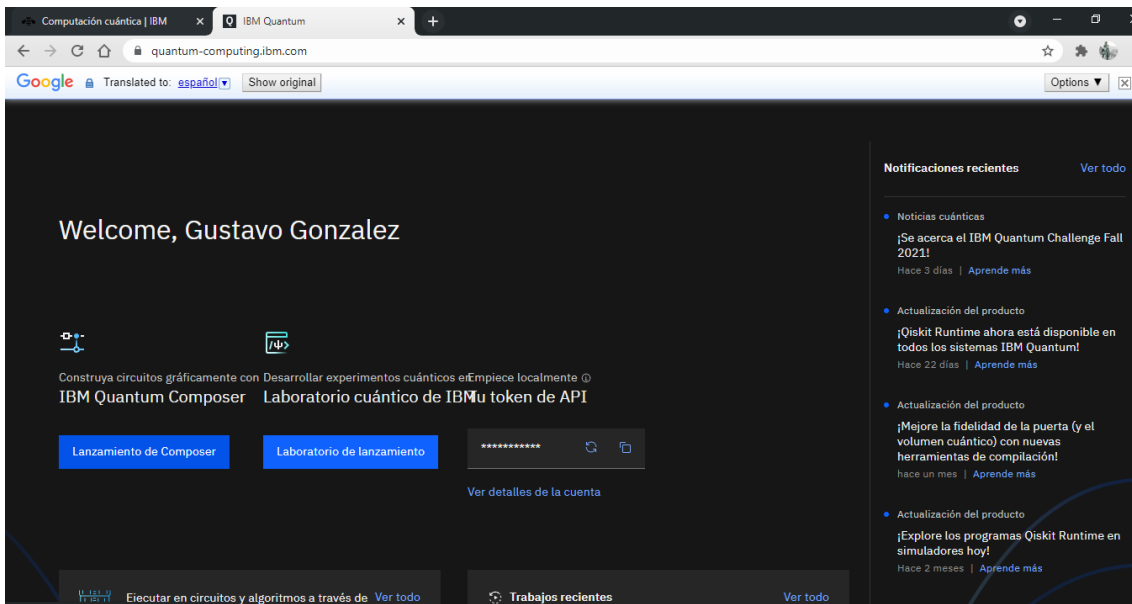


Ilustración 39 Visualizacion de opciones de simulador usuario 1

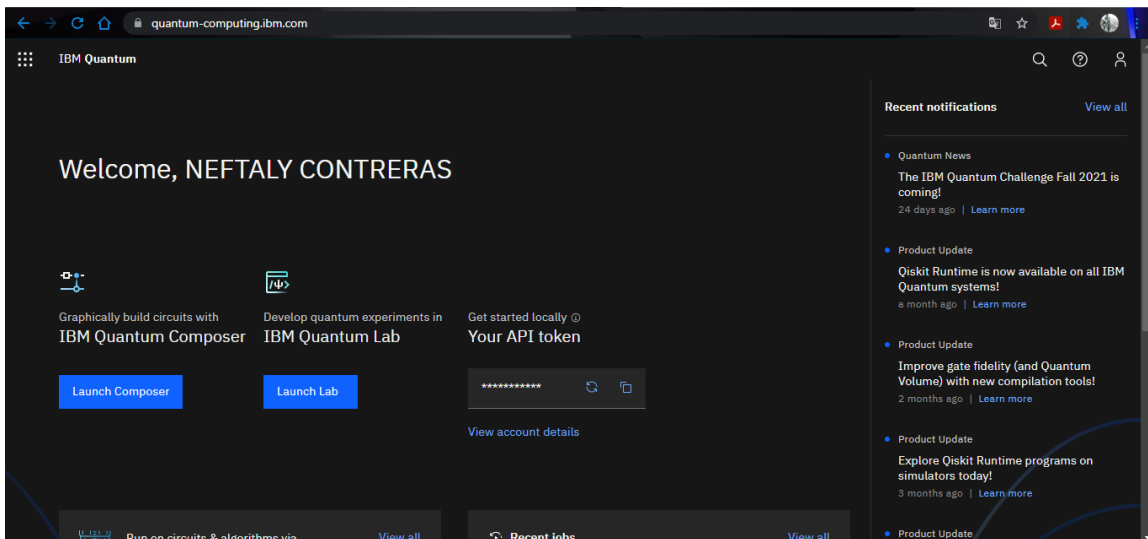
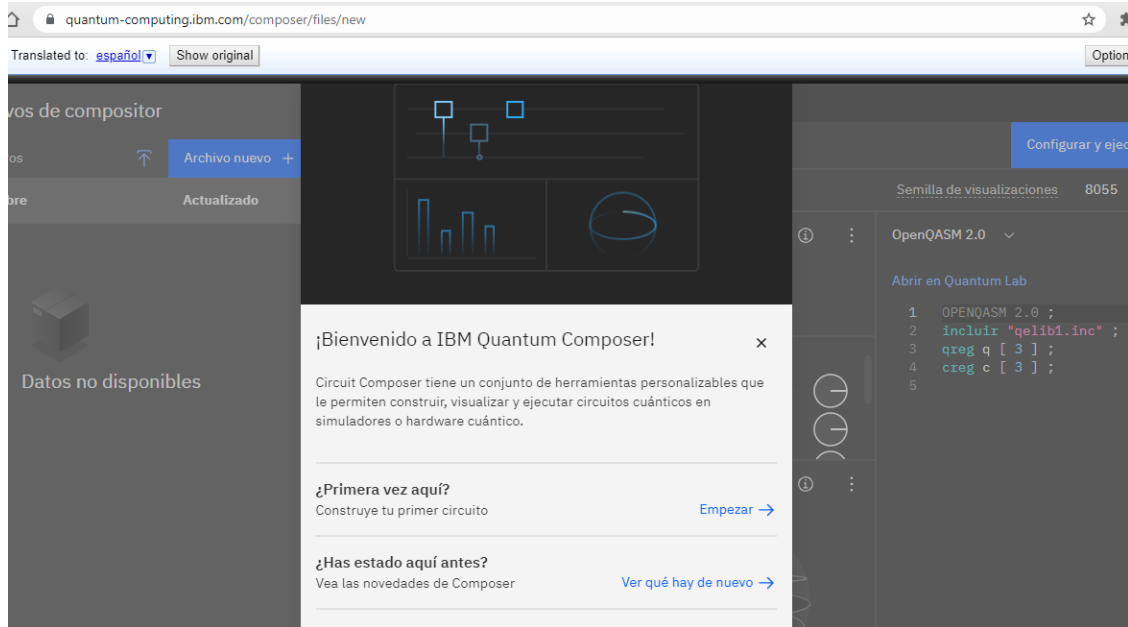


Ilustración 40 Visualizacion de opciones de simulador usuario 2

Al acceder la computadora cuántica realizara una pregunta indicando si es la primera vez que ingresas al sistema o si ya se ha accedido con anterioridad.



*Ilustración 41 Opciones de inicializacion del simulador*

Si como usuarios indicamos que es nuestra primera vez dentro de la computadora esta nos dará una pequeña introducción sobre su funcionalidad y como construir un circuito básico. Ya que composer tiene un conjunto de herramientas personalizables nos ayudara a visualizar, construir y ejecutar circuitos cuánticos en simuladores cuánticos.

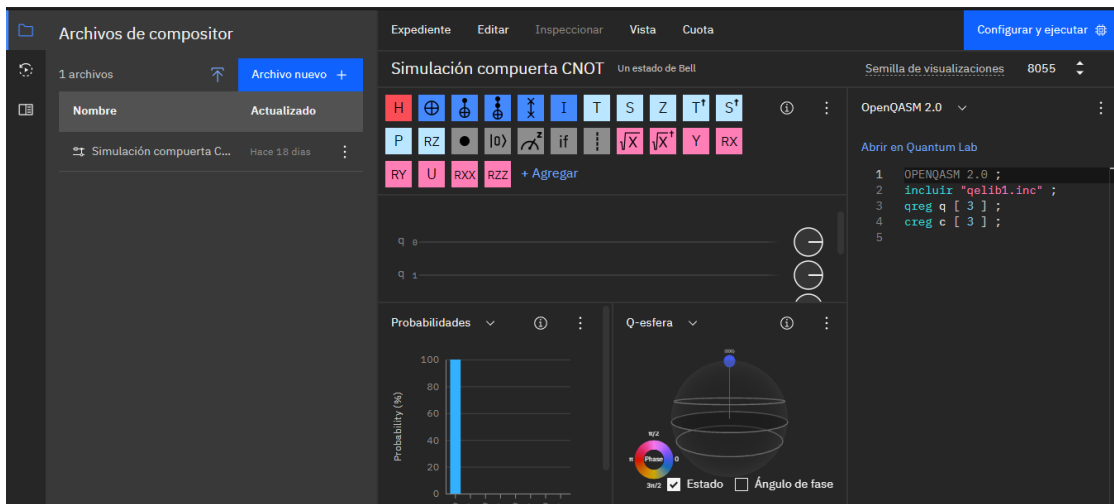


Ilustración 42 Pantalla principal del simulador

Dentro de la computadora cuántica IBMQ nos encontramos con las compuertas y las operaciones cuánticas que manipulan los qubits estos son considerados los componentes básicos para el desarrollo de circuitos cuánticos de manera gráfica.



Ilustración 43 Componentes de simulación



En la siguiente tabla se describen uno a uno los componentes esenciales para el funcionamiento de la computadora cuántica IBMQ.

ICONO	DESCRIPCION
	Compuerta de Hadamard
	Compuerta NOT
	Compuerta CNOT
	Compuerta de toffoli
	Compuerta SWAP
	Compuerta de identidad
	Compuerta T
	Compuerta S
	Compuerta Z
	Compuerta tdg
	Compuerta sdg
	Fase
	Compuerta RZ
	Modificador de control
	Reiniciar


	Operación de medición
	
if	Operación if
⋮	Barrera
$\sqrt{X}$	Compuerta SX
$\sqrt{X}^\dagger$	Compuerta SXdg
Y	Compuerta Y
RX	Puerta RX
RY	Puerta RY
U	Compuerta U
RXX	Compuerta RXX
RZZ	Compuerta RZZ
+ Agregar	Agregar operación personalizada

Tabla 2 Catalogo de compuertas de IBMQ

IBMQ ofrece una serie de documentos y tutoriales para poder dar los primeros pasos en la implementación de las compuertas de un circuito cuántico, así como una mejor explicación en cuanto al funcionamiento y el tras fondo de las operaciones que realiza la computadora para poder arrojar un resultado.

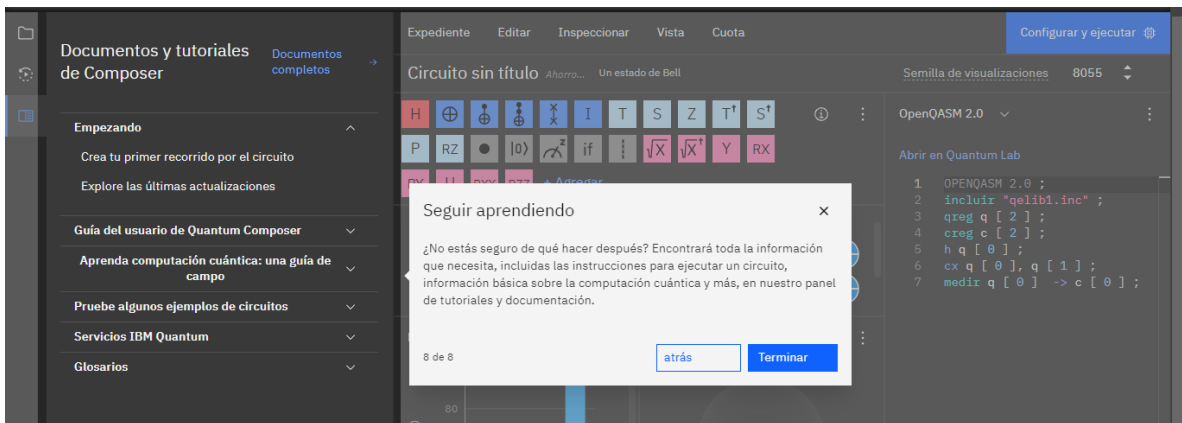


Ilustración 44 Tutoriales de composer y documentacion.

Como primer paso para dar inicio con la simulación el sistema de IBMQ solicitará que se coloque un nombre a la simulación que se desea generar. Esto puede visualizarse en la ilustración 46.

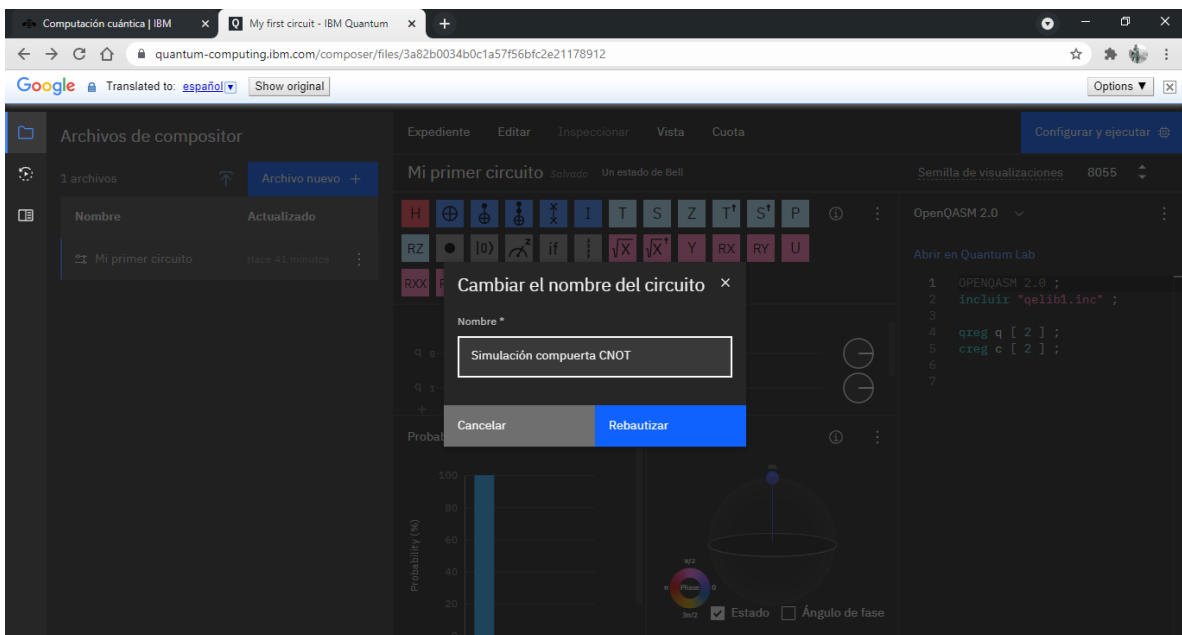


Ilustración 45 Nombramiento de proyecto

Como siguiente paso realizaremos la composición de un estado de Bell el cual genera un estado particular de dos qubits entrelazados al máximo. Siendo así como primer paso arrastraremos una compuerta de Hadamard al primer cable del qubit q0.

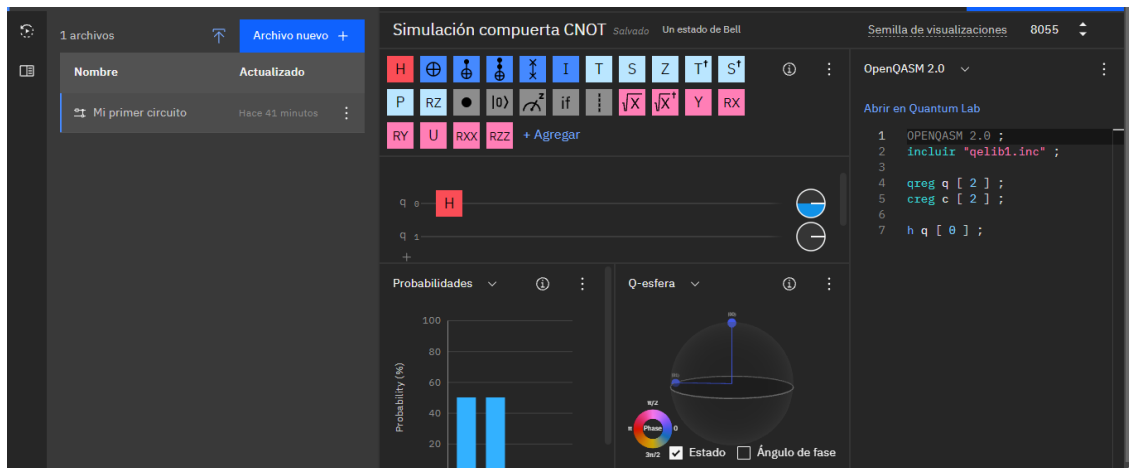


Ilustración 46 Insercion de compuerta de Hadamard

Para poder notar los cambios conforme vallamos agregando compuertas, tenemos a las visualizaciones ubicadas en parte inferior de nuestra pantalla las cuales mostraran lo que está sucediendo en una computadora cuántica antes de medir su circuito estas se actualizarán cada vez que se agregue una operación a un qubit; en este momento se podrá ver el efecto de la compuerta de Hadamard que colocamos, en este punto el qubit está en superposición.

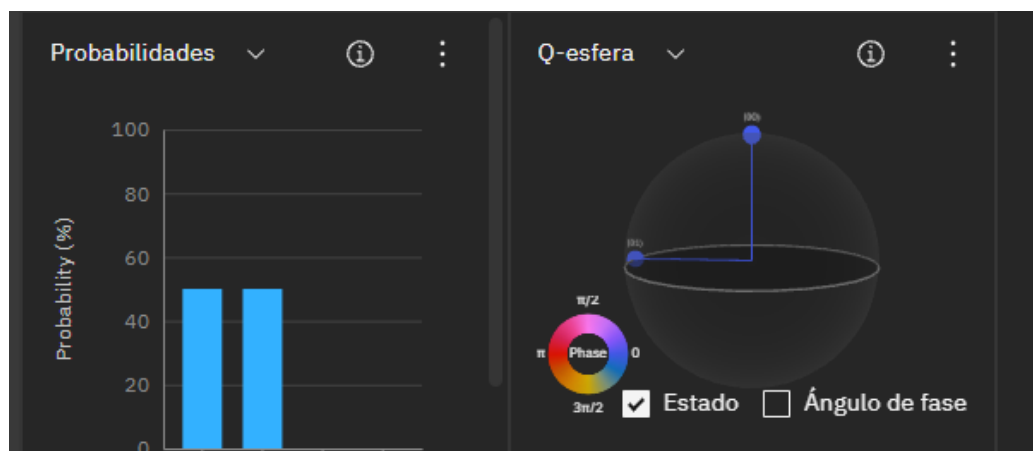
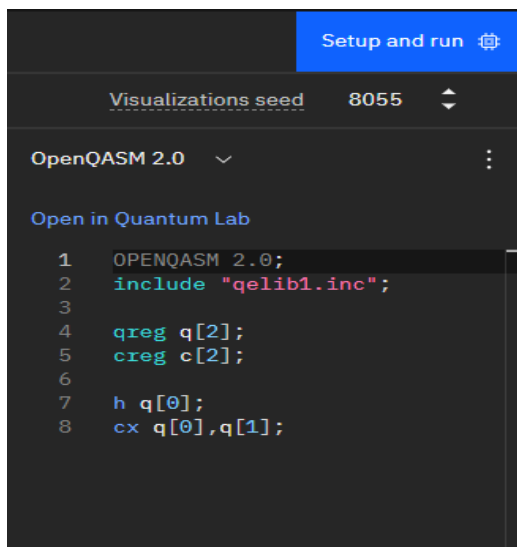


Ilustración 47 Graficos de medicion de resultados

Es importante recalcar que al realizar la simulación los resultados en la gráfica nos indicaran la probabilidad de resultado de un circuito cuántico, en este caso

también la inclinación de la esfera de bloch nos indicara en qué dirección se inclinara el resultado. Dentro de la computadora cuántica no son mostrados los procedimientos matemáticos que se requieren o que realiza el computador para obtener los resultados; simplemente se basa en ellos para poder generar una solución al problema que se presenta o a la simulación que se realiza.



```
1 OPENQASM 2.0;
2 include "qelib1.inc";
3
4 qreg q[2];
5 creg c[2];
6
7 h q[0];
8 cx q[0],q[1];
```

*Ilustración 48 Editor de código openQASM.*

Al igual que la esfera de bloch el editor de código openQASM 2.0 ubicado en el costado derecho de la computadora cuántica se editará automáticamente a medida que se agregan operaciones al circuito. Por igual parte en caso de modificar el código se reflejará automáticamente en la parte grafica; Este código está basado en Python y te puede dar opciones para implementarlo en más aplicaciones.

Para que el usuario pueda comprender mejor el código en la siguiente tabla colocaremos las funciones básicas y el funcionamiento para poder generar nuestra simulación si se necesitan obtener más referencias se puede consultar el glosario de operaciones OpenQASM. Para poder definir nuestras propias

operaciones es necesario leer el archivo "Crear operaciones" y por ultimo si deseamos aprender mas sobre el lenguaje empleado dentro de la computadora cuántica se pondrá consultar el articulo Open Quantum Assembly. La tabla de declaraciones de lenguaje la describiremos a continuación.

Declaración	Descripción
<b>OpenQASM 2.0;</b>	El formato se encuentra en OpenQASM
<b>qreg name[size];</b>	Declarar un qubit con nombre
<b>Creg name[size];</b>	Declarar un registro con nombre
<b>Include "filename";</b>	Abrir y analizar otro archivo fuente
<b>Gate name(params)qargs;</b>	Declaración de compuerta unitaria
<b>Opaque name(params)qargs;</b>	Declaración de compuerta opaca
<b>//comment text</b>	Comentarios
<b>U(theta,phi,lambda)qubit\ qreg;</b>	Puertas integradas de un solo qubit
<b>CX qubit\ qreg,qubit\ qreg;</b>	Compuerta Cnot incorporada
<b>Measure qubit\ qreg-&gt;bit\ creg;</b>	Se reciben las mediadas en base
<b>Reset qubit\ qreg;</b>	Preparador de qubits
<b>Gatename(params)qargs;</b>	Puerta unitaria definida por el usuario
<b>If(creg==int) qop;</b>	Condicional de la operación cuántica
<b>Barrier qargs;</b>	Evita transformaciones en la línea de origen

*Tabla 3 Comandos basicos de OpenQASM*

### 4.3 APLICACIÓN DE COMPONENTES EN SIMULACIÓN DE LA COMPUERTA CUÁNTICA C-NOT.

A continuación, vamos a Enredar dos qubits esto quiere decir que agregaremos nuestra compuerta cuántica CNOT ya que la compuerta actúa en 2 qubits. Colocaremos la compuerta a lado derecho de nuestra compuerta de Hadamard previamente colocada en este punto el qubit está enredado.

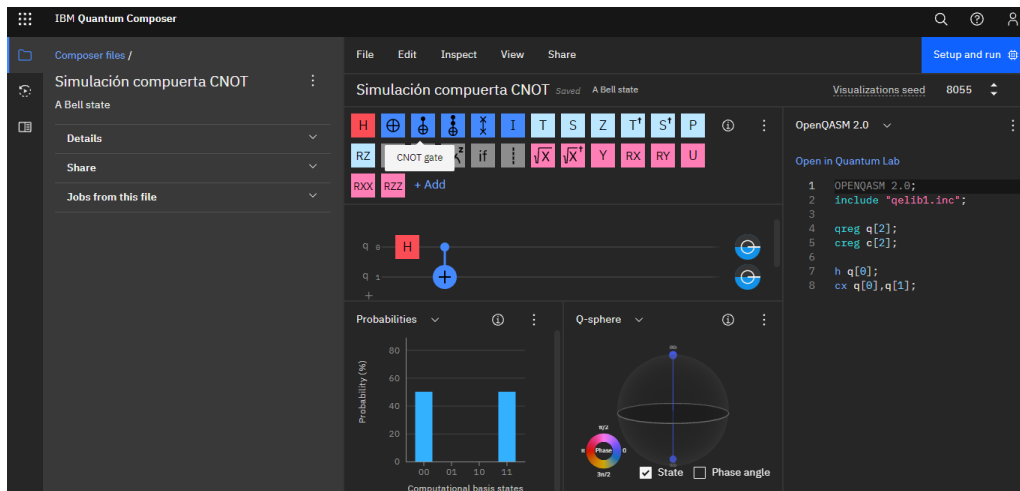


Ilustración 49 Colocación de compuerta CNOT

Al verificar la gráfica nos percatamos que hay una probabilidad del 50% que el resultado sea 00 y otro 50% que el resultado sea 11, al igual que la esfera de bloch nos indica en donde se encuentra nuestro qubit y las posibilidades de resultado. Con esto podemos observar que las computadoras cuánticas no solo nos pueden arrojar un resultado, sino que cuantifica en probabilidades. Otro lugar donde podemos observar el resultado es el disco de fase donde de acuerdo a la guía de campo donde un estado de un solo qubit es representado por:

$$|\psi\rangle = \sqrt{1-\rho}|0\rangle + e^{jP}\sqrt{\rho}|1\rangle,$$

Donde  $p$  es la probabilidad de que nuestro qubit este en  $|1\rangle$ , dando un ejemplo en caso de  $p = 0$ , el qubit lo encontraremos en  $|0\rangle$  y  $p = 1$  el qubit lo estará en  $|1\rangle$ .

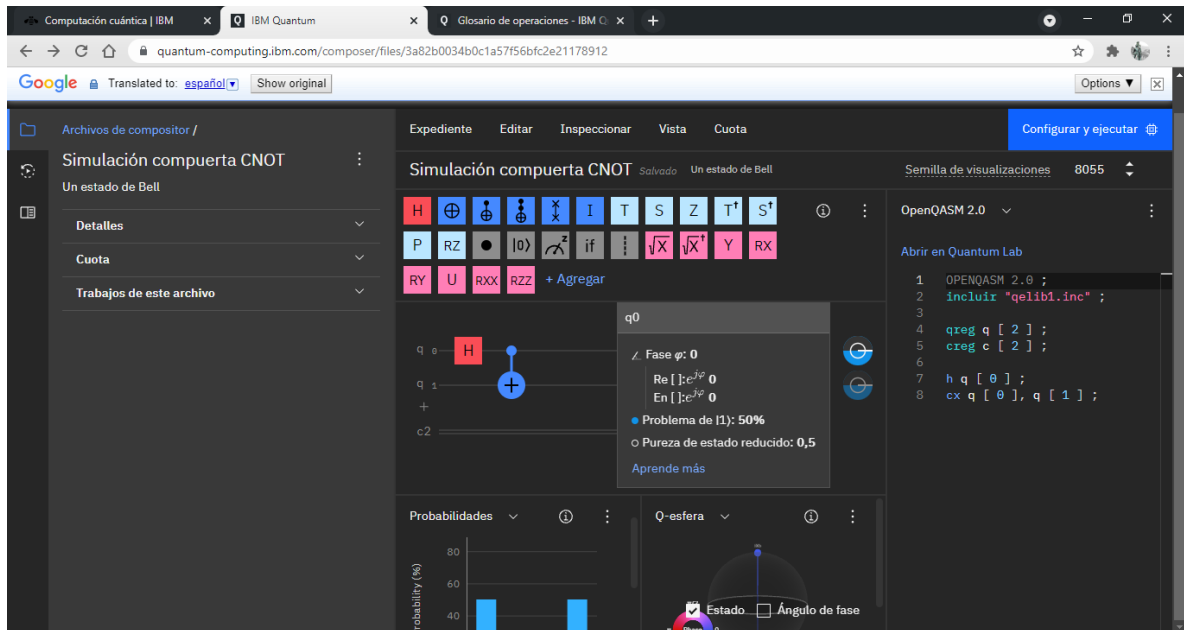


Ilustración 50 Disco de fase qubit  $q_0$

En nuestro caso  $p = 1/2$  ya que nuestro qubit es una mezcla de 50/50 que a diferencia de un computador normal esta proporcionara una fase cuántica. Dentro del disco de la fase final de cada qubit IBMQ proporcionara el estado local de cada uno al final del cálculo.

Para poder observar con más detenimiento las probabilidades dentro de la fase podemos observar el disco azul que se encuentra en el costado derecho de nuestra simulación, esto nos representa el porcentaje en que nuestro qubit está en estado  $|1\rangle$  mientras más se rellene el círculo de azul el resultado se inclinara por el estado  $|1\rangle$ .



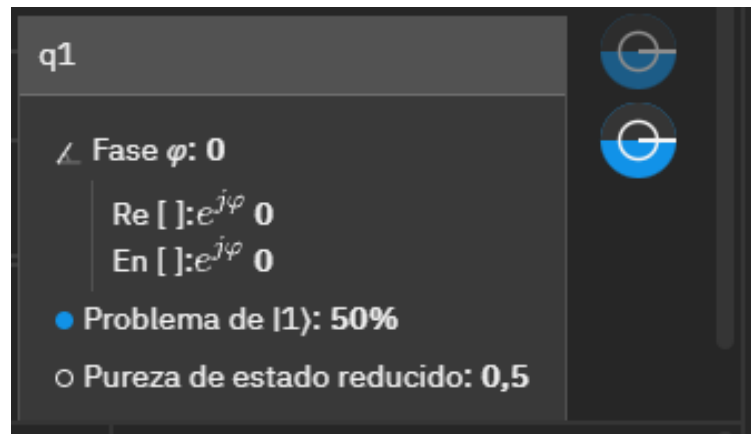


Ilustración 51 Disco de fase qubit q1

Cada una de las esferas de fase nos indicara la inclinación del resultado, en el caso de la segunda esfera nos arrojará resultados cuando el estado este en  $|0\rangle$  al igual que la primer esfera se rellenara de color azul mientras más se incline al resultado estando en  $|0\rangle$ .

Continuando con la simulación procederemos a insertar otra compuerta de Hadamard para poder visualizar el comportamiento de resultados dado que al agregar una compuerta más incrementara el número de resultados que puede generar la simulación.

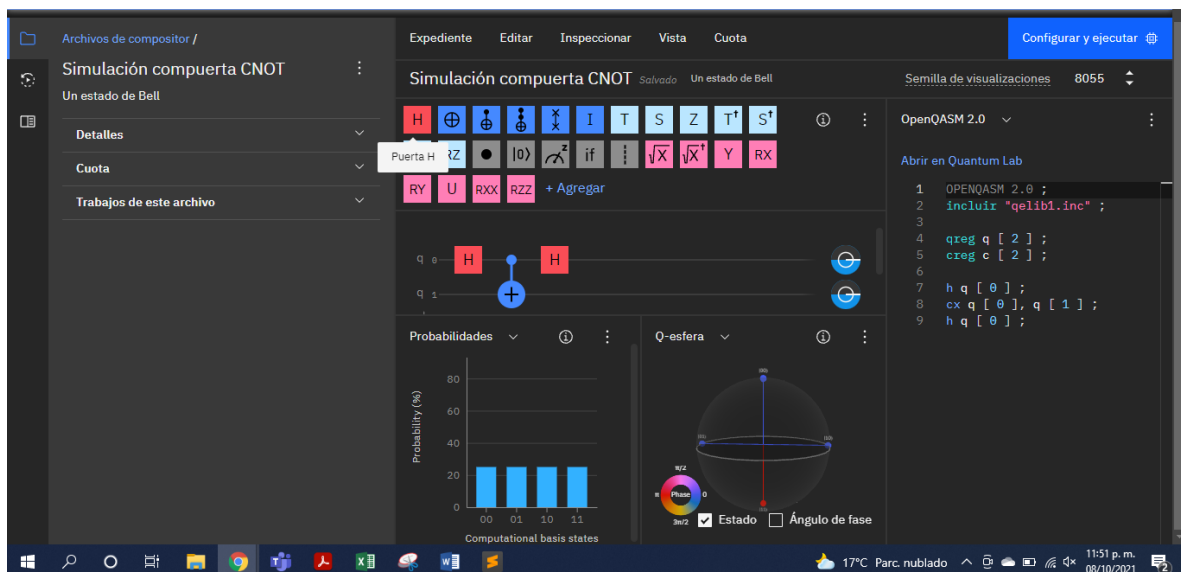


Ilustración 52 Inserción de segunda compuerta de Hadamard

Como se puede observar las mediciones previamente definidas sufrirán un cambio significativo debido a que cada vez que se agrega una compuerta de Hadamard se multiplica la probabilidad de resultados en este caso y debido a que la compuerta CNOT trabaja con dos qubits incrementara los resultados de dos en dos. En este caso tanto para el estado en 1 y en 0 tenemos un equilibrio dentro de los resultados siendo las probabilidades serán iguales para cada uno de estos ya sea de la forma 00, 01, 10 o 11.

Si se desea medir la inclinación de un estado ya se en 0 o 1 agregaremos un circuito de medición como se puede ver en la ilustración 54. Primero se inclina la medición hacia el estado 1 arrojando como resultado las probabilidades dentro de los estados 00 y 10, cada uno con 50% de probabilidad de ser el resultado correcto para nuestra problemática; como se puede observar en el disco de fase la inclinación en estado 0 nos indica una mayor probabilidad de que  $e^{jp}$  sea en un 50% 1 dentro del primer qubit.

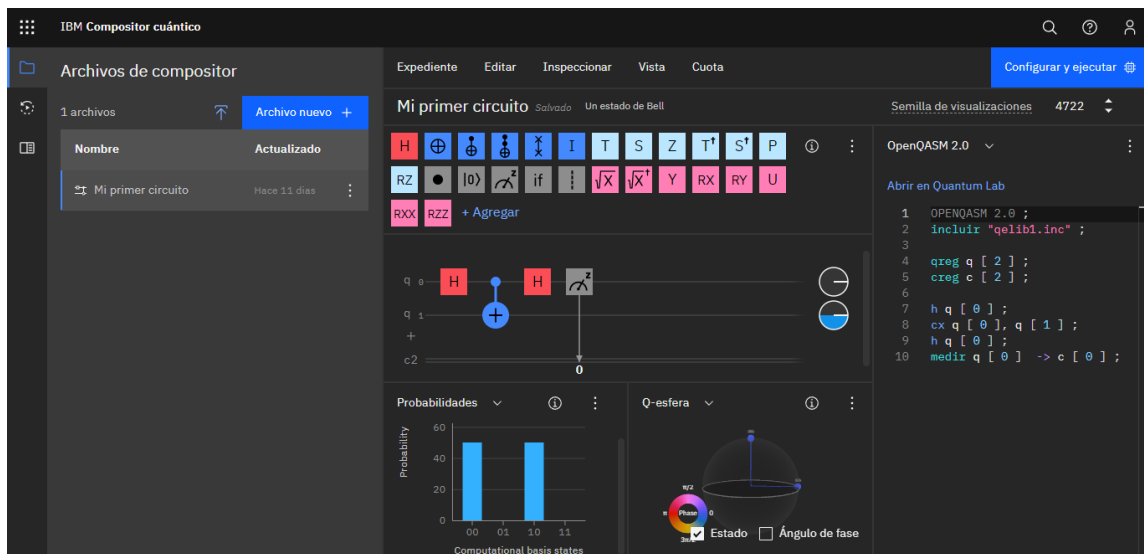


Ilustración 53 Colocación de medición para resultados en estado 0

Es claro que cada modificación dentro de cada qubit afectara el resto de las mediciones, ya sea el código, la esfera de bloch o la gráfica de probabilidad. Es de importancia considerar estos efectos cuando se esté realizando una simulación debido a que si no se es lo suficientemente cuidadoso los resultados pudiesen salir deficientes y afectar el trabajo en cuestión.

Otro factor que se debe considerar a la hora de simular es la correcta eliminación de componentes ya que si estos no se eliminan adecuadamente los resultados futuros podrían contener error de gravedad.

El resultado de la medición se registra como un bit clásico en el registro clásico, el cable vertical que conecta la operación de medición al cable inferior muestra la información 0 o 1 que influye desde el qubit hasta el registro clásico. Como se observa en la imagen anterior el cable influyo sobre el estado 0 así que obtuvimos valores dependientes de 0.

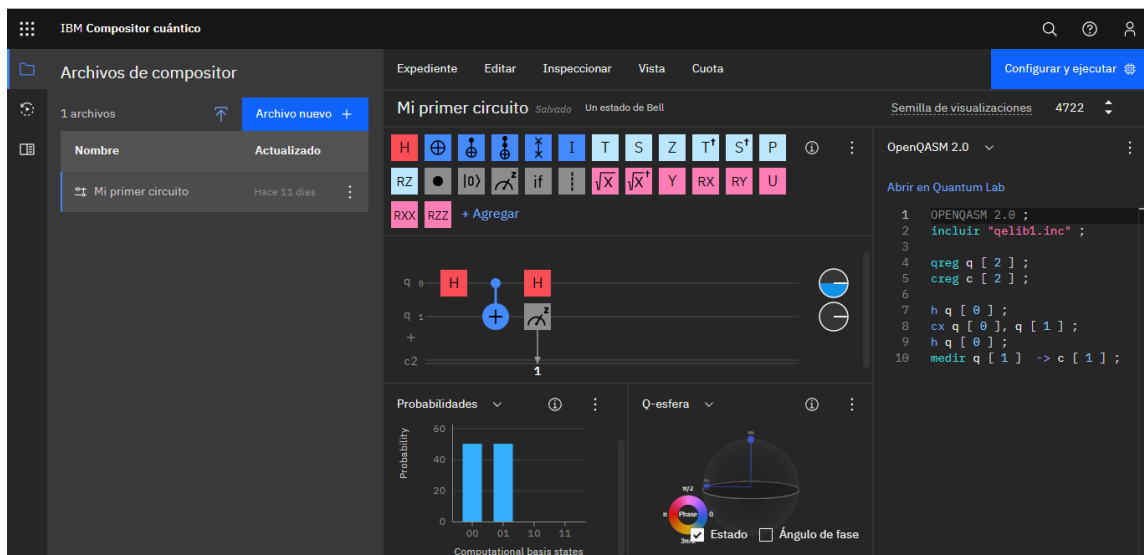


Ilustración 54 Colocación de medición para estado 1

En la ilustración 55 se muestra la medición en estado 1. Dada esta condición los resultados dependerán de 1 obteniendo como resultados 00 y 01 con una probabilidad del 50% cada uno, en este punto el qubit se encuentra en superposición. Dentro del código podemos observar que la función medir ofrece poder visualizar bajo que estados se está realizando la medición. Otro punto importante que debemos considerar es que una vez agregado alguna función predefinida el editor de código no permitirá hacer alguna modificación, solo permitirá agregar más funciones predefinidas.

Agregando una matriz (compuerta de Hadamard) adicional en el qubit 1 el disco de fase refleja que el qubit se encuentra en estado. Cabe destacar que se pueden realizar diversas simulaciones dentro de la computadora cuántica y observar los diversos resultados y probabilidades que esta nos ofrece ya que la compuerta cuántica CNOT trabaja sobre dos qubits, no podemos trabajar más estados y se limita un poco la generación de resultados.

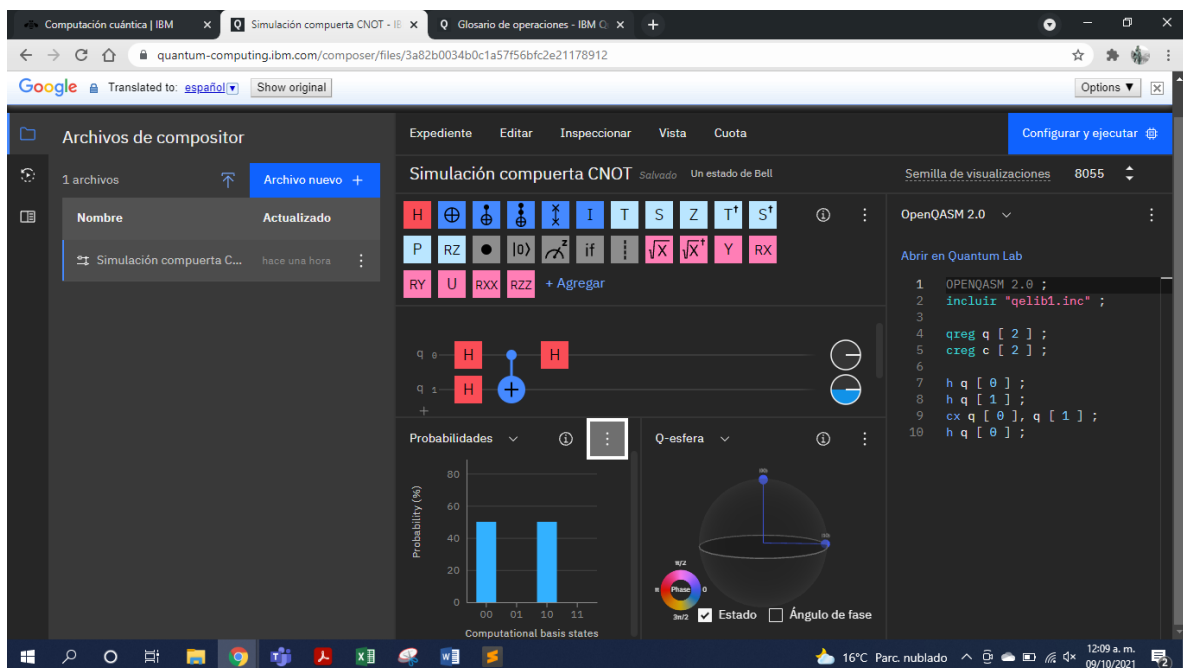


Ilustración 55 Colocación de una tercera compuerta de Hadamard.

La simulación de la compuerta CNOT es uno de los primeros pasos para dar comienzo a la resolución de problemáticas dentro de la computadora cuántica, cabe destacar que si se quiere llevar a un resultado específico es necesario adentrarse a las probabilidades y funciones que nos ofrece dentro de sus componentes. En la ilustración 56 podemos observar que ocurre con nuestra compuerta al agregar otra compuerta de Hadamard, si bien el procedimiento de colocación de este nuevo elemento dentro de nuestra simulación es otra posibilidad de resultado.

Para poder reflejar distintos resultados se agregó otra medición para ahora 3 compuertas de Hadamard y una compuerta CNOT que al igual se sigue manejando dentro de dos qubits y la medición colocada en 1; podemos observar los distintos cambios tanto en el disco de fase como en la gráfica y la esfera de Bloch dando por resultado solo una probabilidad 10.

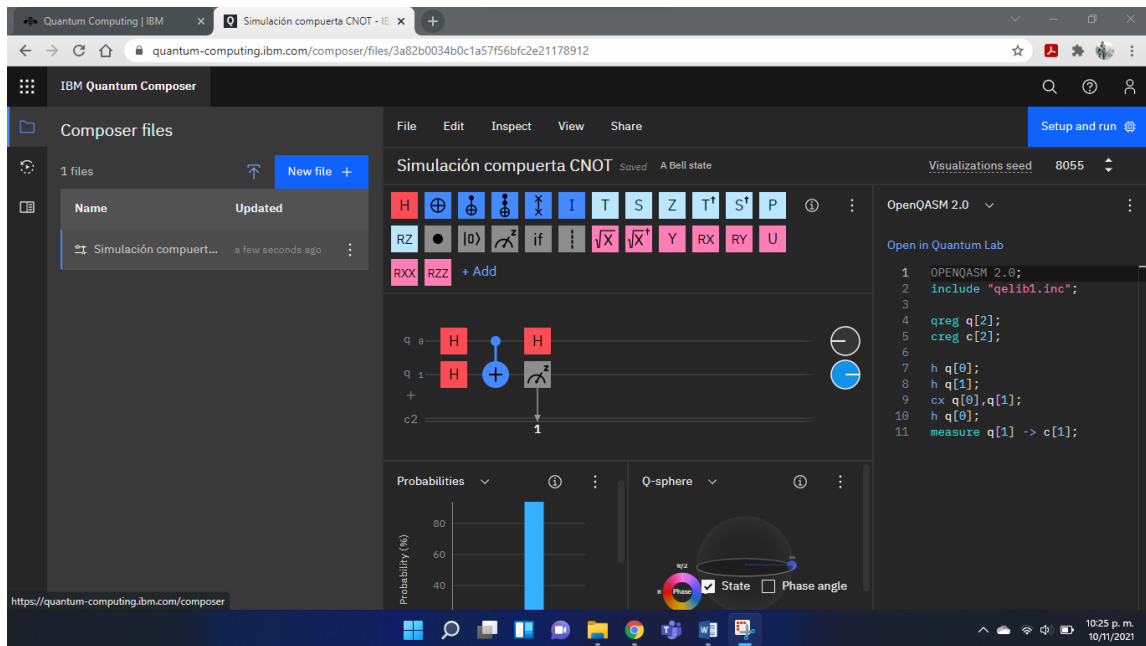


Ilustración 56 Colocación de estado de medición en estado 1

Hay diversas representaciones que se pueden realizar partiendo de esta simulación agregando más componentes basados en los mismos principios que tiene la computación cuántica.

Como último punto de esta simulación es importante la ejecución de los resultados de esta; para poder dar paso a la ejecución de nuestro circuito cuántico ya estructurado con todos los componentes requeridos procedemos a direccionarnos a la parte superior derecha al botón llamado “configura y ejecutar”.

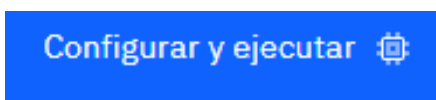


Ilustración 57 Botón para ejecución de resultados.

Dicho botón desplegará un submenú con los siguientes apartados:

En el paso 1 se despliegan una serie de opciones mostrando los servidores disponibles mediante los cuales podemos ejecutar nuestro circuito cuántico. Cada opción muestra el estado del servidor ya sé que este se encuentre en estado “en línea”, “en línea: cola en pausa” o si bien fuera de línea.

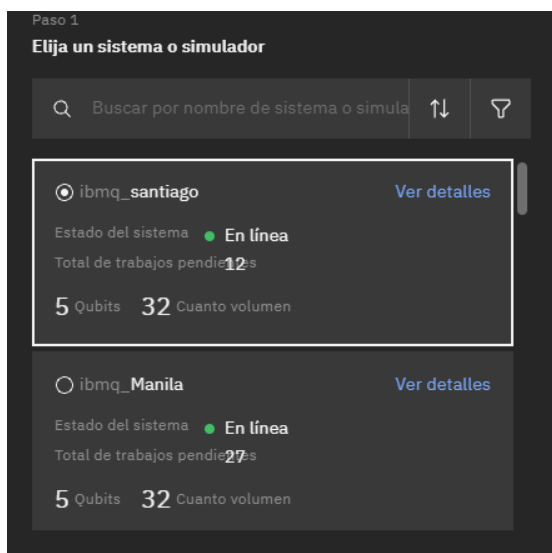


Ilustración 58 Listado de servidores para ejecución de programa

En el paso 2 el compilador solicitara que indiquemos el proveedor y los disparos; estos parámetros serán bajo los cuales se va ejecutar la simulación. Como parte final de estas configuraciones el sistema solicitara nombrar al trabajo.

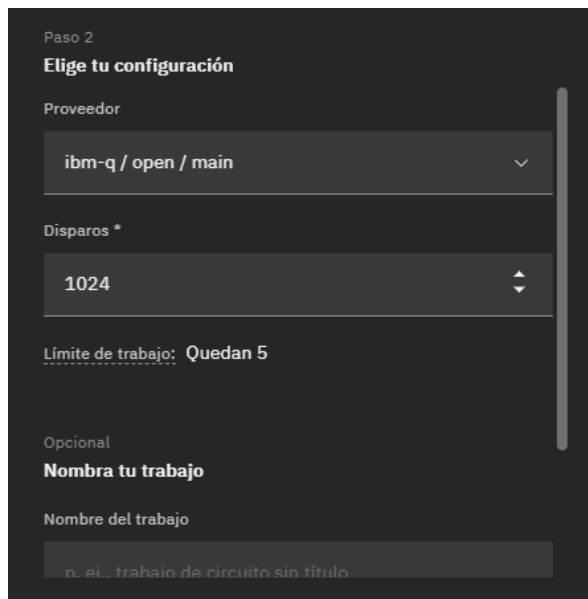


Ilustración 59 Parámetros adicionales para ejecución de simulación

Una vez colocadas las configuraciones adecuadas daremos paso a la ejecución de nuestro proyecto.

Cabe destacar que tenemos un total de 5 trabajos para ejecutar.

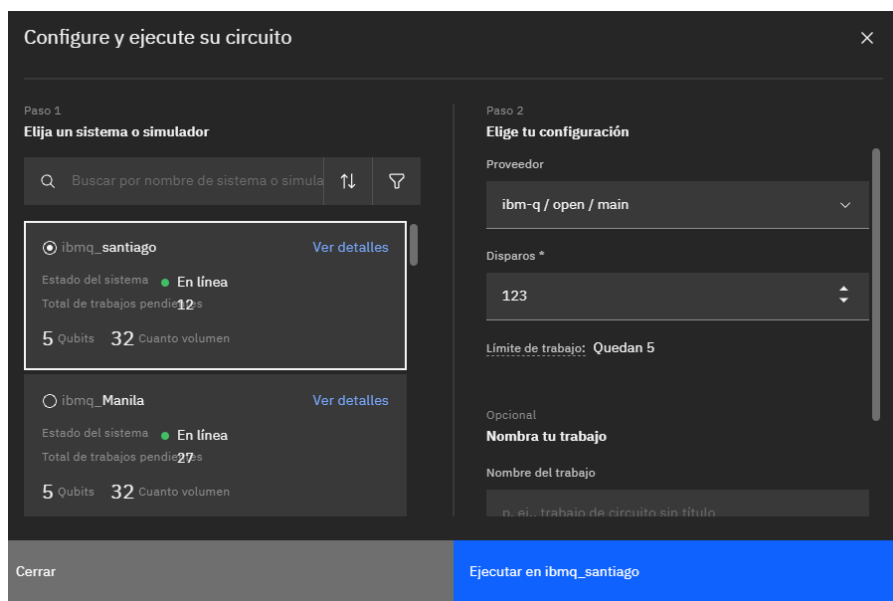


Ilustración 60 Parámetros configurados para ejecución

#### 4.4 PRESENTACIÓN DE GRAFICAS SOBRE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE LA COMPUERTA CUÁNTICA CNOT EN IBMQ

Representación gráfica y esfera de bloch de resultado con una compuerta de Hadamard.

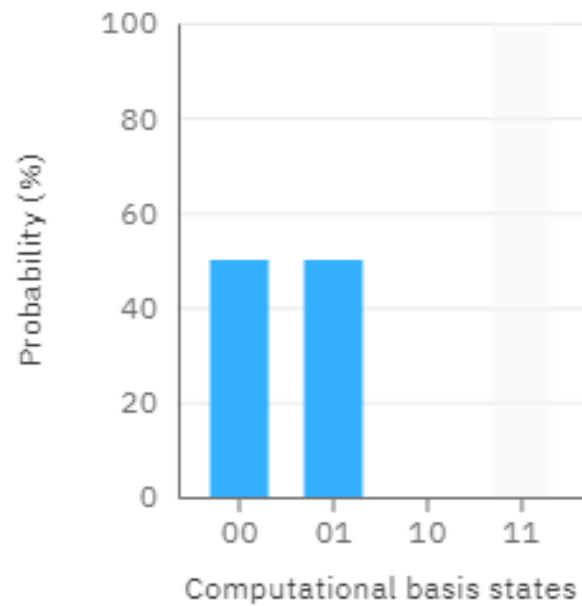


Ilustración 61 Resultado gráfico con una compuerta de Hadamard

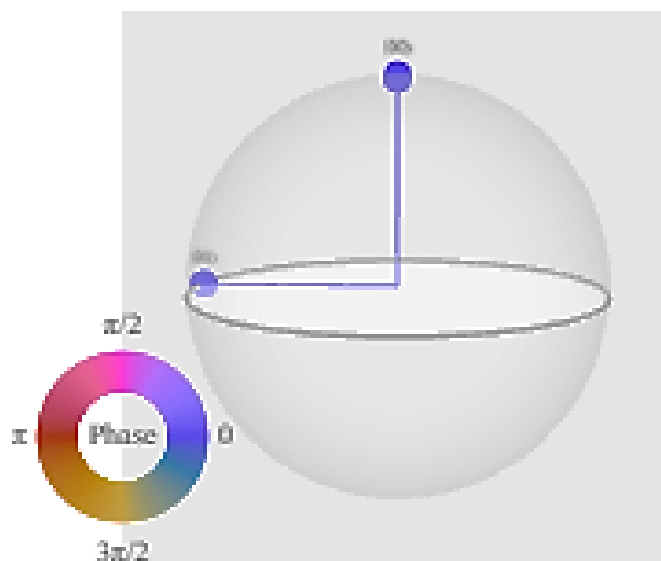


Ilustración 62 Modelado en una esfera de bloch con una compuerta de Hadamard



Representación gráfica y esfera de bloch de resultado con una compuerta de Hadamard y la compuerta cuántica CNOT.

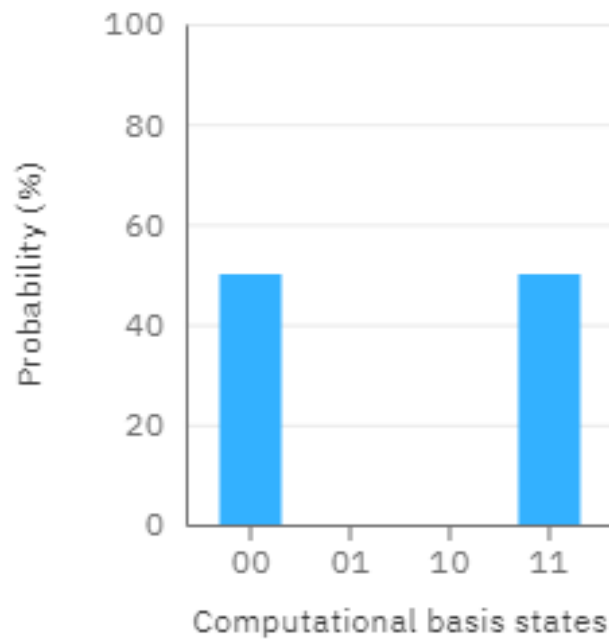


Ilustración 63 Resultado gráfico con una compuerta de Hadamard y la compuerta cuántica CNOT

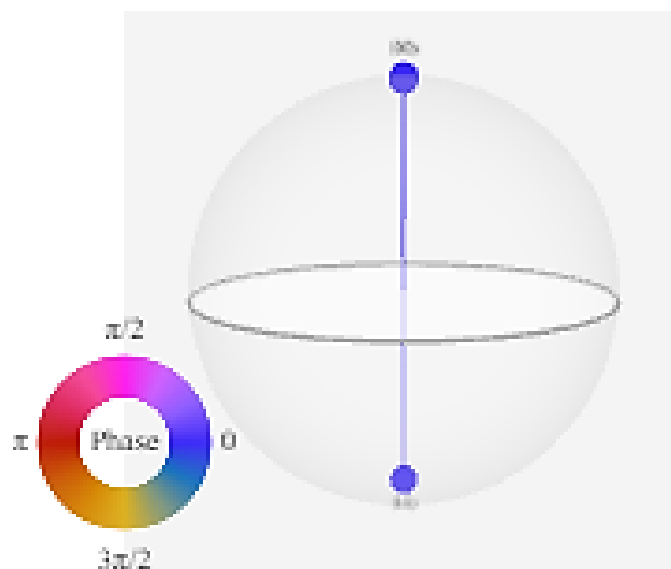


Ilustración 64 Modelado de una esfera de bloch en conjunto a una compuerta de Hadamard y la compuerta cuántica CNOT

Representación gráfica y esfera de bloch de resultado con dos compuertas de Hadamard y la compuerta cuántica CNOT.

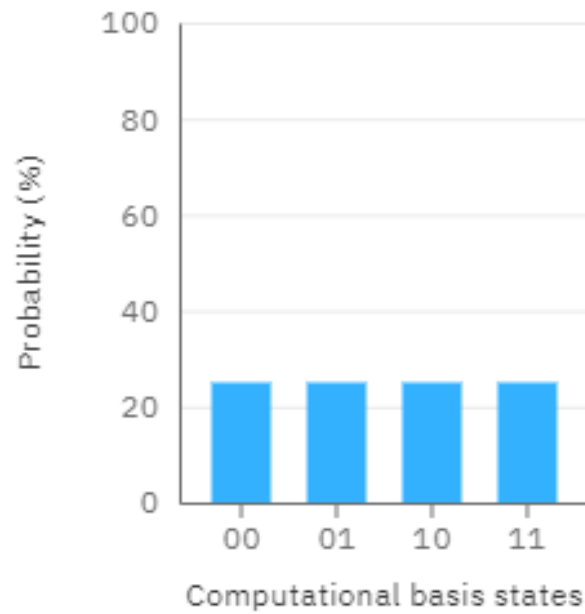


Ilustración 65 Resultado gráfico con dos compuertas de Hadamard y la compuerta cuántica CNOT

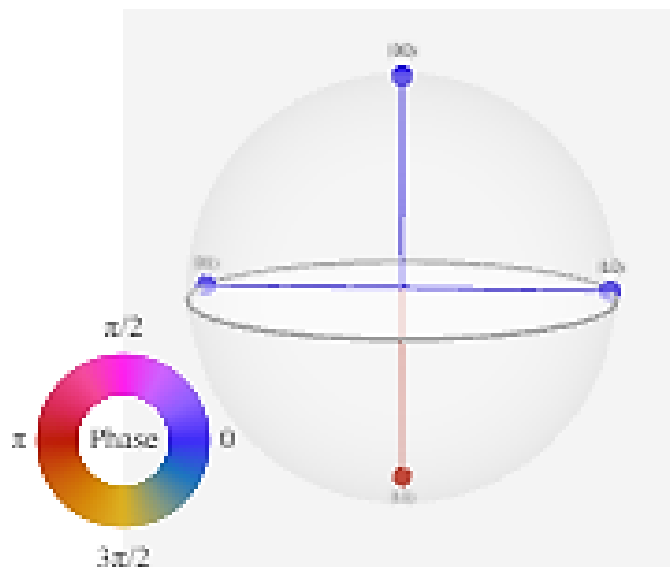
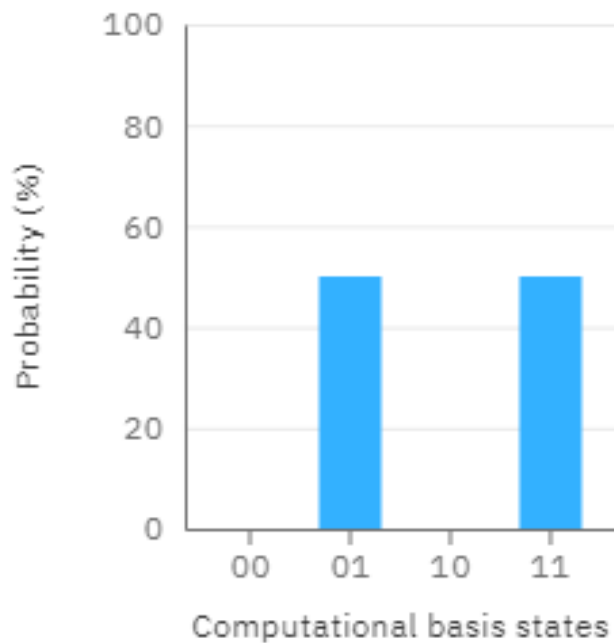
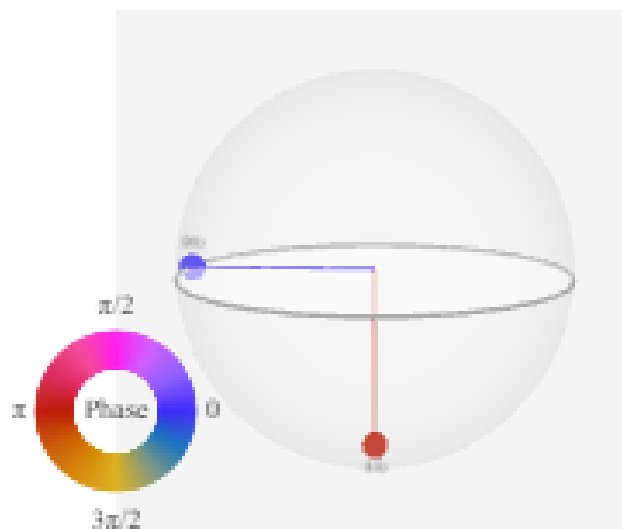


Ilustración 66 Modelado de una esfera de bloch en conjunto de dos compuertas de Hadamard y la compuerta cuántica CNOT

Representación gráfica y esfera de bloch de resultado con dos compuertas de Hadamard, la compuerta cuántica CNOT y un componente de medición con estado 0.

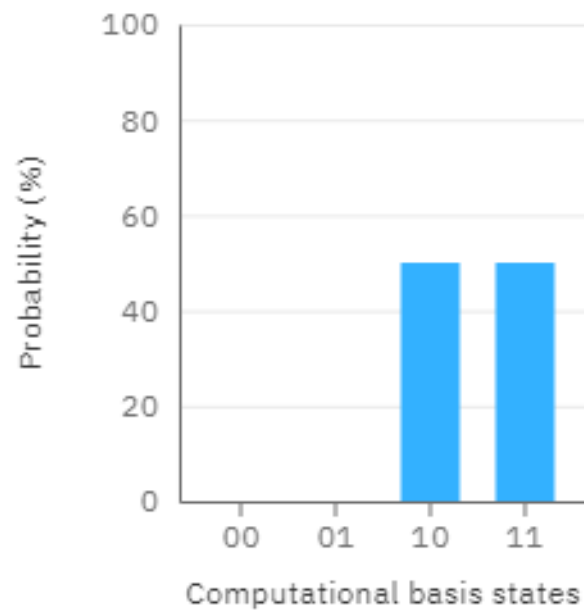


*Ilustración 67 Resultado gráfico con dos compuertas de Hadamard, una compuerta cuántica CNOT y un componente de medición con estado 0*

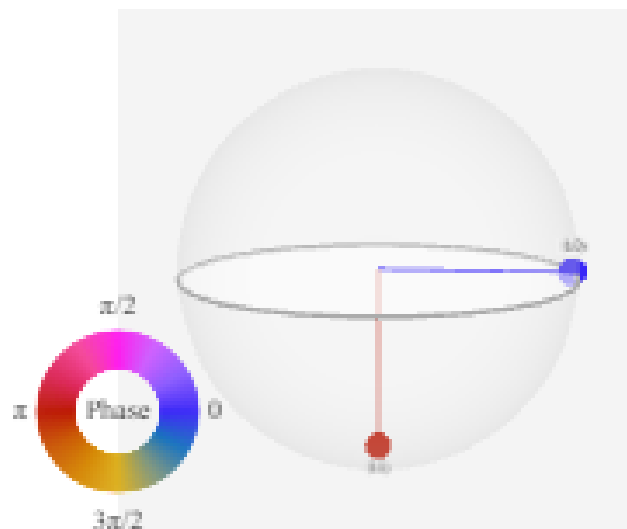


*Ilustración 68 Modelado de una esfera de bloch en conjunto de dos compuertas de Hadamard, una compuerta cuántica CNOT y un componente de medición en estado 0*

Representación gráfica y esfera de bloch de resultado con dos compuertas de Hadamard, la compuerta cuántica CNOT y un componente de medición con estado 1.



*Ilustración 69 Resultado gráfico con dos compuertas de Hadamard, una compuerta cuántica CNOT y un componente de medición en estado 1*



*Ilustración 70 Modelado de un esfera de bloch en conjunto de dos compuertas de Hadamard, una compuerta cuántica CNOT y un componente de medición en estado 1*

Representación gráfica y esfera de bloch de resultado con tres compuertas de Hadamard y la compuerta cuántica CNOT.

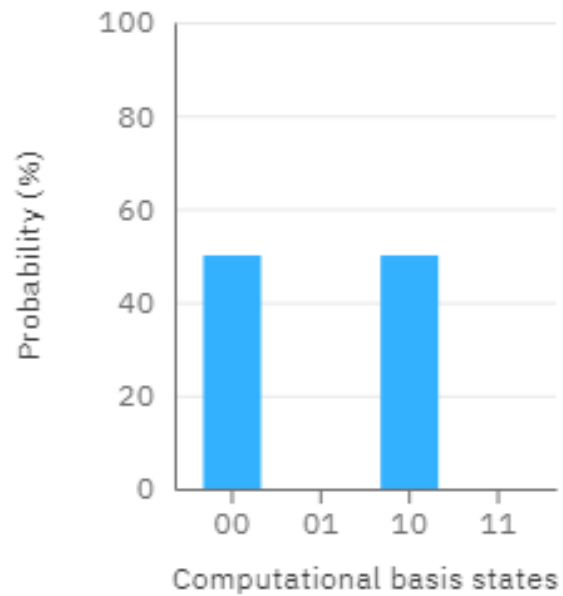


Ilustración 71 Resultado gráfico con 3 compuertas de Hadamard y una compuerta cuántica CNOT

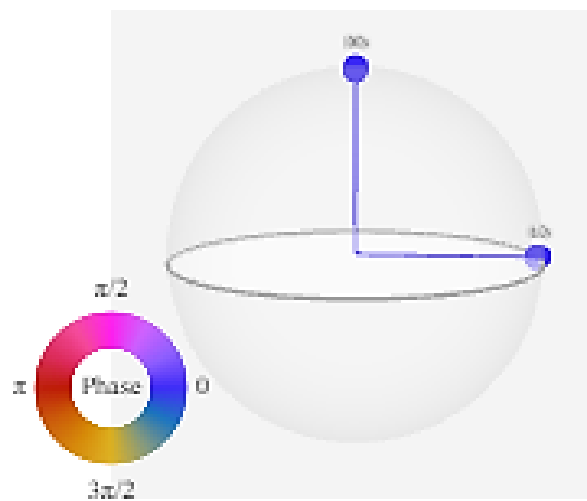
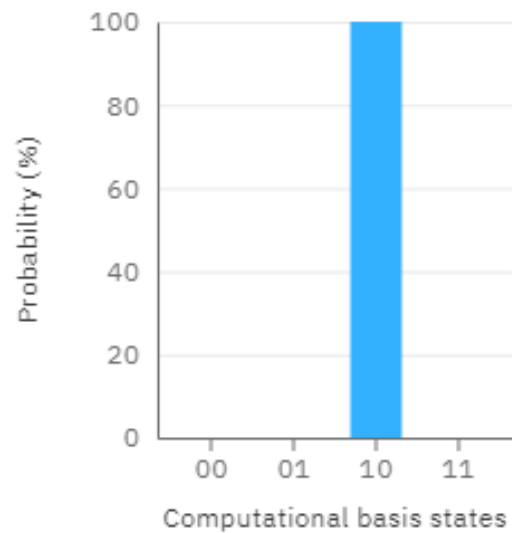
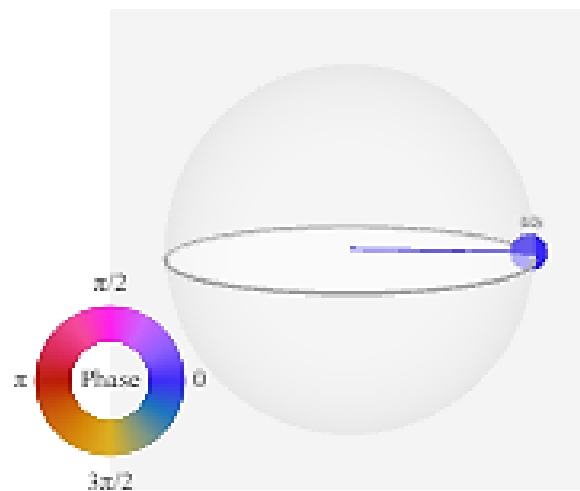


Ilustración 72 Modelado de una esfera de bloch en conjunto con 3 compuertas de Hadamard y una compuerta cuántica CNOT

Representación gráfica y esfera de bloch de resultado con tres compuertas de Hadamard, una compuerta cuántica CNOT y un componente de medición en estado 1.



*Ilustración 73 Resultado gráfico con 3 compuertas de Hadamard, una compuerta cuántica CNOT y un componente de medición en estado 1*



*Ilustración 74 Modelado de una esfera de bloch en conjunto con 3 compuertas de Hadamard, una compuerta cuántica CNOT y un componente de medición en estado 1*

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se abordaron temáticas que tienen un gran impacto e importancia en la nueva escala a la cual apunta la computación para poder proporcionar una gama de mayor envergadura de posibilidades y aplicaciones en diversos campos donde en estos momentos existen limitantes de resultados. Particularmente en la introducción a los contenidos y definiciones para la comprensión del tema se destacaron aspectos básicos como lo fue la definición de la computación cuántica y si bien se dio a conocer algunos predecesores de dicha rama con el fin de expresar al lector un punto de origen y si bien dar paso a una inducción a la historia que rodea a la computación cuántica. Otro de los apartados que fue de vital importancia es el marco conceptual que encapsulo las definiciones y en cierta forma hechos ocurridos en la actualidad que tienen relación con el desarrollo de la computación cuántica. Tomando en cuenta estas dos partes también se comprendió que los conceptos propios de este campo en desarrollo no son de uso común y por lo tanto se realizó una síntesis lo más clara posible para tomar la esencia del tema y así llevar una línea de mayor comprensión.

La presentación de resultados se visualizó mediante la simulación de la compuerta cuántica CNOT así dando a conocer una serie de opciones que la computadora cuántica IBMQ ofrece al público en general para poder obtener conocimiento sobre la computación cuántica. Un punto destacado del portal de IBM es que tiene diversos apartados en donde define paso a paso los conceptos esenciales para entrar en el mundo de la computación cuántica y si bien comenzar a hacer uso del simulador.

Cabe destacar que el uso del simulador puede tener aplicaciones en el área de investigación debido a su facilidad de uso mediante el acceso web; claramente el objetivo bajo el cual se utilice el simulador también dependerá del área o temática bajo la cual se pretenda aplicar su funcionalidad.

## REFERENCIAS

- Acevedo, J. (2017). Computación cuántica, compuertas o circuitos cuánticos. Recuperado el 21 de noviembre de 2020. De <https://josueacevedo.medium.com/computaci%C3%B3n-cu%C3%A1ntica-compuertas-o-circuitoscu%C3%A1nticos-27910f5338c8>
- Badillo, L. (2021). ¿Qué es una computadora cuántica? Se acerca un cambio de paradigma. Recuperado el 14/09/21. De <https://tecreview.tec.mx/2021/04/28/tecnologia/que-es-una-computadora-cuantica/>
- Bardales, E. (2020). Implementación de compuertas cuánticas usando óptica cuántica. Recuperado el 04/04/21. De [https://ecfm.usac.edu.gt/sites/default/files/2021-02/Tesis\\_Eduardo\\_Bardales.pdf](https://ecfm.usac.edu.gt/sites/default/files/2021-02/Tesis_Eduardo_Bardales.pdf)
- Castro, J. (2004). Compuertas de 2 Qubits. Recuperado el 19 de diciembre de 2020. De <http://www.icitcr.ac.cr/~jcastro/libro/libro/node25.html>
- Coy, C. (2020). Implementación de circuitos cuánticos y propuesta experimental para compuertas cuánticas. Recuperado el 20 de junio de 2021. De <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/20224/Implementaci%25C3%25B3n-Circuitos-Cu%25C3%25A1nticos-Coy-Carlos-3744-2021.pdf>
- Duarte, J. (2014). "Emulación en el hardware de circuitos cuánticos basados en compuertas Toffoli". Revista facultad de ingeniería. Núm. 71 (2015): 25-36. Recuperado el 17 de diciembre de 2020. De <http://www.redalyc.org>
- Galvez, P. (2017). La computación cuantica: La realidad que revolucionara el mundo empresarial. Recuperado el 08/11/21. De <https://www.ibm.com/blogs/think/es-es/2017/07/27/qubits-un-nuevo-mundo-empresarial/>
- Garcia, J. (2016). Computación cuántica. Recuperado el 21/04/21. De [https://www.etsisi.upm.es/sites/default/files/curso\\_2015\\_16/MASTER/MCTC\\_CCyCN\\_TextoCC.pdf](https://www.etsisi.upm.es/sites/default/files/curso_2015_16/MASTER/MCTC_CCyCN_TextoCC.pdf)
- Gutiérrez, G. (2013). Qubit la unidad fundamental del futuro informático y tecnológico. Recuperado el 1 de mayo de 2021. De <https://www.fayerwayer.com/2013/09/qubit-la-unidad-fundamental-del-futuro-informatico-ytecnologico/>
- IBM Quantum. (2016). Computadora cuántica IBM Quantum. Recuperado el 02/10/21. De <https://quantum-computing.ibm.com/docs/>
- Investigacion y Ciencia. (2014). Qubits robustos. Recuperado el 08/11/2021. De <https://www.investigacionyciencia.es/noticias/qubits-robustos-12294>



- Mahecha, J. (2015). Simulación de compuertas lógicas cuánticas universales mediante un modelo de código torico. Recuperado el 02/09/21. De [https://www.researchgate.net/publication/276206672\\_Simulacion\\_de\\_compuertas\\_logicas\\_cuanticas\\_universales\\_mediante\\_un\\_modelo\\_de\\_codigo\\_torico](https://www.researchgate.net/publication/276206672_Simulacion_de_compuertas_logicas_cuanticas_universales_mediante_un_modelo_de_codigo_torico)
- Marin, P. (2014). Simulación de compuertas lógicas cuánticas universales mediante un modelo de código torico. Recuperado 02/05/21. De <http://www.revistacubanadefisica.org/RCFextradata/OldFiles/2014/Vol31-N1E/RCF-31-1E-E057.pdf>
- Martinez, N.(2011). Jacquard, el tejedor informatico. Recuperado el 29/01/2022. De <https://www.rtve.es/noticias/20110923/jacquard-tejedor-informatico/463573.shtml>
- Moret, V. (2013). Fundamentales de computación cuántica. Recuperado el 27/12/20. De <http://www.lidiagroup.org>
- Mateu, J.(2020). Maquina de Turing: Qué es y cómo funciona. Recuperado el 12/12/2021. De <https://psicologiyamente.com/cultura/maquina-de-turing>
- Olvera, R. (2019). Simulación de la compuerta cuántica Control NOT en una computadora cuántica de diamante de dos qubits. Recuperado el 09/11/21. De <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/105218>
- Ortega, O.(2019). ¿Qué es y para que sirve una computadora cuántica?. Recuperado el 11/10/2021. De <https://www.elfinanciero.com.mx/tech/que-es-y-para-que-sirve-una-computadora-cuantica/>
- Ortiz, E. (2017). Construyendo compuertas cuánticas con IBM's cloud quantum computer. Recuperado el 11/08/21. De <https://jci.uniautonoma.edu.co/2017/2017-7.pdf>
- Pastor, J. (2020). IBM dobla la capacidad de su computador cuántico, pero aún tardaremos en ver resultados prácticos. Recuperado el 17/04/21. De <https://www.xataka.com/investigacion/ibm-dobla-capacidad-su-computador-cuantico-tardaremos-ver-resultados-practicos>
- Paz, J. (2016). Circuitos cuánticos: Computación cuántica. Recuperado el 10 de enero de 2021. De <http://users.dr.uba.ar>
- Reyes, M. (2021). Evolucion de la computación cuántica y los retos para la seguridad. Recuperado el 11/11/2021. De <https://ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoinactiva/article/view/330/1070>
- Riquelme, R. (2019). ¿Para qué sirve la primera computadora cuántica comercial IBM? Recuperado el 02/11/21. De <https://www.eleconomista.com.mx/tecnologia/Para-que-sirve-la-primera-computadora-cuantica-comercial-de-IBM-20190120-0003.html>
- Ruiz, C. (2014). Computación cuántica. Recuperado el 19 de enero de 2021. De <http://www.fisicafundamental.net/misterios/computacion.html>

Schmidt, F. (2019). ¿Para que sirve en realidad una computadora cuántica?. Recuperado el 10/09/21. De <https://www.dw.com/es/para-qu%C3%A9-sirve-en-realidad-una-computadora-cu%C3%A1ntica/a-50991735>

Pérez, V. (2017). Como funciona la computación cuántica, explicado de manera sencilla. Recuperado el 27 de enero de 2021. De <https://www.google.com/amp/s/es.gizmodo.com/como-funciona-la-computacioncuantica-explicado-de-man-1796976460/amp>

Villatoro, F. (2015). Una compuerta cuántica CNOT implementada con silicio. Recuperado el 15 de febrero de 2021. De <https://francis.naukas.com/2015/10/15/una-compuerta-cuantica-cnot-implemetada-con-silicio/>