

INTRODUCCIÓN AL CONCEPTO DE SUPERPOSICIÓN  
EN MECÁNICA CUÁNTICA MEDIANTE LOS  
FUNDAMENTOS DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

ELIAS SANTIAGO RODRIGUEZ VELASQUEZ

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL  
BOGOTÁ D.C.

INTRODUCCIÓN AL CONCEPTO DE SUPERPOSICIÓN  
EN MECÁNICA CUÁNTICA MEDIANTE LOS  
FUNDAMENTOS DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA

ELIAS SANTIAGO RODRIGUEZ VELASQUEZ

ASESORA: SANDRA BIBIANA AVILA TORRES

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL  
BOGOTÁ D.C.

## Contenido

INTRODUCCIÓN .....	5
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
OBJETIVOS.....	9
Objetivo General:.....	9
Objetivos específicos .....	9
ANTECEDENTES .....	9
MARCO TEÓRICO.....	10
METODOLOGÍA.....	12
CAPITULO I: ABORDAJE DEL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN EN FÍSICA .....	13
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN EN LA MECÁNICA CLÁSICA .....	13
1.2 PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN EN LA MECÁNICA CUÁNTICA .....	16
1.3 DIFERENCIAS ENTRE EL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN EN MECÁNICA CLÁSICA Y EN MECÁNICA CUÁNTICA. ....	22
CAPITULO II: LA COMPUTACIÓN.....	23
2.1 COMPUTACIÓN CLÁSICA. ....	23
2.2 COMPUTACIÓN CUÁNTICA.....	29
2.3 RELACIÓN E IMPORTANCIA ENTRE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA Y LA ENSEÑANZA DE LA MECÁNICA CUÁNTICA. ....	34
CAPÍTULO III: ENSEÑANZA DEL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN, GUÍA DIDÁCTICA..	36
CONSIDERACIONES FINALES .....	40
CONCLUSIONES .....	41
REFERENCIAS .....	42
ANEXO: GUÍA DIDÁCTICA PARA LA ENSEÑANZA DEL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN. ....	46
OBJETIVO .....	46
MARCO EXPLICATIVO.....	46
1. PERSPECTIVA CLÁSICA .....	46
ACTIVIDAD 1.....	47
2. PERSPECTIVA CUÁNTICA.....	48
ACTIVIDAD 2.....	50
PREGUNTAS DE REFLEXIÓN.....	51
MATERIAL AUDIOVISUAL DE APOYO (opcional) .....	51
CUESTIONARIO DE RETROALIMENTACIÓN.....	52



## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. TABLAS DE VERDAD PARA LAS COMPUESTAS LÓGICAS DESCRITAS.....	26
--	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. SE MUESTRA EL FENÓMENO DE INTERFERENCIA DE LAS ONDAS DE MANERA CONSTRUCTIVA AL COSTADO IZQUIERDO Y DESTRUCTIVA AL COSTADO DERECHO. (INGENIERIZANDO, 2023).....	15
FIGURA 2. EL FENÓMENO DE INTERFERENCIA DE LA LUZ PRESENTA EN LAS ZONAS DE COLOR ROJO LA INTERFERENCIA CONSTRUCTIVA Y LAS LÍNEAS NEGRAS LA DESTRUCTIVA (THOMPSON, 2016).....	16
FIGURA 3. SE OBSERVAN LAS POSICIONES ESPACIALES DONDE SE PUEDE ENCONTRAR AL ELECTRÓN DENTRO DE LOS DIFERENTES ORBITALES (VIOLI, 2019) .....	21
FIGURA 4 REPRESENTACIÓN DEL ENTRELAZAMIENTO DE DOS FOTONES (ROSENBLUM, 2016) .....	31
FIGURA 5 EJERCICIOS EN LOS CUALES SE PUEDE EVIDENCIAR LA SUPERPOSICIÓN DE FUERZAS EVIDENCIANDO LA FUERZA DE FRICCIÓN JUNTO CON LA DE TENSIÓN EN UNA CUERDA, AL IGUAL QUE LA SUMATORIA DE LAS FUERZAS DE TENSIÓN SOBRE UN MISMO CUERPO, AUTORÍA PROPIA. ....	47
FIGURA 6. OBJETOS QUE SE PUEDEN UTILIZAR PARA LA ACTIVIDAD UNO CUYAS CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS FUNCIONAN PARA LA CONSTRUCCIÓN DE FIGURAS EN DOS DIMENSIONES, TOMADO DE UN JUEGO DE MESA LLAMADO TETRIS DESCONOCIENDO EL AUTOR. ....	48
FIGURA 7. COMPARACIÓN DE REPRESENTACIONES DE LOS VALORES POSIBLES QUE PUEDEN TENER UN BIT Y UN QUBIT, AUTORÍA PROPIA. ....	49
FIGURA 8. COMBINACIONES DE LOS COLORES PRIMARIOS, AUTORÍA PROPIA.....	50
FIGURA 9. DUPLICACIÓN DE LA COMBINACIÓN DE CADA ALUMNO, AUTORÍA PROPIA .....	51

## INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se construye una propuesta de guía didáctica para realizar una introducción al principio de superposición a través de la computación cuántica, por tal motivo la metodología utilizada para la investigación de este documento es la titulada documental, la cual busca recopilar información de diferentes formas de bibliografía.

De esta manera, a lo largo del documento se realiza el abordaje teórico del principio de superposición, siendo el primer capítulo aquel apartado donde se encuentra toda esta descripción fenomenológica, empezando desde la mecánica clásica y cómo el científico inglés sir Isaac Newton fue quien propuso en primera instancia dicho principio para la descripción de interacciones de fuerzas y movimientos de los sistemas, junto a esto, se aborda los fenómenos naturales donde también se evidencia dicho principio como lo son las ondas y sus respectivos fenómenos de interferencia. En la segunda parte del capítulo se realiza el cambio de perspectiva a la mecánica cuántica y se explica cómo se define un estado desde los principios que propone Dirac, logrando así el paso a la fenomenología de este principio en las partículas y abordando 3 autores diferentes como lo son Dirac, Feynman y Spines, todo esto para dar un cierre comparativo entre ambas corrientes con respecto a la naturaleza de los sistemas que abordan.

En el segundo capítulo se encuentra la explicación del funcionamiento de las computadoras clásicas y cuánticas, este desarrollo se genera para que el lector tenga un entendimiento básico acerca de estos dos tipos de máquinas y físicamente cómo se comportan, además de mostrar las diferencias en los procesos de cada una y cómo la computación cuántica es pertinente y viable para generar el entendimiento del principio de superposición de estado en estudiantes de educación media.

Por último, en el tercer capítulo se presenta la definición de lo que es una guía didáctica, las metodologías que puede tener y las áreas en las cuales se puede emplear, junto a esto se presenta la idea y organización de la guía propuesta por el autor para ser llevada al aula de educación media.

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El colegio es un ambiente de aprendizaje, crecimiento y desarrollo de los estudiantes en muchos ámbitos de la vida y del saber; tales como las relaciones interpersonales, el descubrimiento de nuevas habilidades, el reconocimiento de la naturaleza del medio ambiente y la humana, entre muchos otros. Es por esto por lo que la etapa del colegio es importante para la formación del ciudadano, porque allí pasa gran parte de su tiempo y convive con una diversidad de personas, a lo cual se le puede denominar una microsociedad, construida para preparar a los estudiantes en función a la sociedad externa a este ambiente. Como consecuencia de esto, hay que tener en cuenta la importancia que en el colegio se brinden las herramientas correctas para que los estudiantes sean ciudadanos óptimos para la sociedad en la que vivimos, como lo dice en su artículo Carlos Valerio: El rol de la escuela *“es introducir a las nuevas generaciones en los patrones culturales de la sociedad y prepararlos para su recreación.”* (Valeriano, 2003). De la mano con lo anterior se busca mejorar la sociedad para un avance beneficioso en todos los ámbitos que la componen.

Si se dirige el enfoque en la parte del desarrollo de nuevas habilidades y más aún en el campo de la ciencia, específicamente en la física, se puede dar cuenta que este proceso se ve restringido; dado lo expuesto anteriormente, el colegio debe formar ciudadanos competentes para la sociedad en la cual viven. Sin embargo, temas en esta disciplina como lo son las teorías de la física moderna, no se les da la importancia, relevancia y estudio adecuado en la educación media. Un ejemplo de esto se puede evidenciar con los estándares básicos de competencias en Ciencias Naturales, los cuales mencionan que los estudiantes de décimo y undécimo deben estar en la capacidad explicar *“la estructura de los átomos a partir de diferentes teorías”* (Ministerio de Educación Nacional, 2004), es claro que no se genera una restricción que dé cuenta desde cuál y hasta cuál teoría es óptimo abordar la estructura de los modelos atómicos, lo más convencional es que se pueda llegar hasta el modelo de Bohr, en una introducción muy básica asemejándolo con el modelo planetario, ignorando las condiciones de cuantización de este modelo y otros modelos más precisos como el modelo cuántico de Schrödinger. Por tanto, se presentaría un limitante ya que, dando lugar cronológicamente el modelo de Schrödinger fue planteado en 1927 y el modelo de Bohr fue propuesto en 1913, donde se puede afirmar que tuvo un período de evaluación y corrección ante las insuficiencias de la teoría predecesora a él y por tanto brinda una perspectiva de la

naturaleza más actualizada y acorde con los aportes de la ciencia y avances en tecnología actual.

Este ejemplo en el que se muestra la forma en que se restringe, ignora o simplemente se pasa por encima la enseñanza de los modelos cuánticos del átomo, presenta la manera en que se limita la enseñanza de la física moderna, lo cual genera “*una crisis, ya que deliberadamente se excluye a los estudiantes de secundaria de las investigaciones de ciencia y tecnología actuales*” (González, Muñoz Burbano, & Solbes, 2020), como lo dice González, E.M., Muñoz Burbano, Z.E. y Solbes, J. en su artículo *La enseñanza de la física cuántica: una comparativa de tres países*. Esta crisis claramente se refleja en lo que se presenta en las aulas de Colombia y, en consecuencia, en las habilidades que adquieren los nuevos ciudadanos que están enfrentando a la realidad y los requerimientos que tiene la sociedad actual, una sociedad globalizada, y los cuales tienen en sus manos el futuro de esta.

La propuesta del presente trabajo se plantea para tratar un tema tanto laboral como investigativo, donde se dé la posibilidad de revisar las bases de la computación cuántica, para generar una introducción a los temas de la física moderna y poder potenciar el objetivo de la educación media que se está presentando con anterioridad.

Debido a que el funcionamiento de la computación cuántica a diferencia de la antecesora (que se denominará computación clásica), presenta la existencia de los denominados QUBIT los cuales son bits cuánticos. Esto significa que se trabaja con compuertas que no solamente dejan pasar estímulos con una de las categorías del lenguaje que se utilizan convencionalmente (el sistema binario con unos y ceros), sino que presentan la particularidad de estar en una superposición de estados, cosa que podemos denominar que es tanto 1 como 0.

De esta manera, al abordar la superposición de estados, se permite cumplir lo propuesto en los estándares básicos de competencias en Ciencias Naturales con el abordamiento de uno de los principios necesarios para entender el modelo atómico que se menciona con anterioridad propuesto por Schrödinger, lo cual, además es un pilar en la física cuántica.

La computación cuántica presenta nuevos retos ya que, en la actualidad un ordenador cuántico es sumamente grande, muy parecido a un computador de principios de la era



computacional del siglo XX, además tiene una alta demanda de procesos y requiere de enfriamiento a temperaturas muy cercanas al cero absoluto, un electroimán para producir los campos magnéticos necesarios para organizar a los QUBITS, frecuencias precisas, sistemas aislados, entre otros. Sin embargo, se ha avanzado en la programación haciendo uso del hardware clásico para poner en funcionamiento el software propio de la computación cuántica.

Sin embargo, más allá de su estructura poco minimalista, este sistema que utiliza la física cuántica es realmente novedoso y necesario para los procesos que a la computación clásica le toman demasiado trabajo. Un ejemplo claro de ello es la eficiencia que tiene la computación clásica en repartir un número muy grande en factores primos, similar a si se deseara tomar un camino entre 1.000.000, como lo señala Marcos López:

“De cara a poder utilizar computadoras para encontrar el camino óptimo necesitamos digitalizar 1.000.000 de opciones, lo que implica traducirlas a lenguaje de bits para el computador clásico y a *Qubits* para el computador cuántico. Mientras que una computadora clásica necesitaría ir uno por uno analizando todos los caminos hasta encontrar el deseado, en una computadora cuántica se aprovecha del proceso conocido como paralelismo cuántico que le permite considerar todos los caminos a la vez.”. (López, 2019).

Es por esto por lo que los retos que presenta este nuevo funcionamiento computacional para las nuevas generaciones desde el hardware y el software, la pertinencia a la teoría científica actual y el futuro en el campo investigativo en el cual se desenvolverá en poco tiempo la sociedad, para la presente investigación se propuso la siguiente pregunta problema:

¿De qué manera se pueden utilizar los principios fundamentales de la computación cuántica, como una herramienta pedagógica para la introducción al principio de superposición de estados con estudiantes de educación media?

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General:**

Elaborar una guía didáctica que utilice descripciones de la computación cuántica de manera accesible, para la introducción del concepto de superposición en estudiantes de educación media.

### **Objetivos específicos**

- Exponer el formalismo cualitativo y cuantitativo del concepto de superposición respecto a la bibliografía consultada.
- Presentar las bases del funcionamiento de la computación clásica y de la computación cuántica basada en el principio de superposición.
- Diseñar una propuesta de guía didáctica que muestre de forma cualitativa el concepto de superposición basándose en la información recopilada y analizada acerca del funcionamiento de la computación cuántica para generar la introducción a este principio en los estudiantes de educación media.

## **ANTECEDENTES**

Para los antecedentes se hizo una revisión en diferentes repositorios respecto a los trabajos presentes que estén enfocados hacia la computación cuántica y/o la superposición de Estado. Se encontraron trabajos que indirectamente tienen relación con alguno de los dos temas de interés para que den aportes frescos y recientes en la construcción del marco teórico junto con los análisis y planteamientos que puedan estructurar en sus trabajos.

### **La enseñanza de la Física Moderna en la educación básica: una aproximación desde el principio de incertidumbre.**

Este trabajo de grado de la Universidad Pedagógica Nacional fue realizado por Henry Grajales Echeverry en el año 2017. Lleva a cabo un recorrido histórico en temas de la física moderna partiendo desde el siglo XIX hasta los principios del siglo XX, buscando dar un acercamiento a los estudiantes al cambio de la física clásica a la física moderna. Este trabajo de grado es pertinente dado que presenta un enfoque hacia la pedagogía y el cómo se pueden

implementar temas de física moderna en la educación media, por lo tanto, representa un acercamiento al tema de interés en el aula, teniendo en cuenta los errores que se puedan llegar a cometer y de esta manera intentar evitarlos.

### **La actividad experimental como estrategia para el acercamiento al concepto de medición de un sistema cuántico.**

Este segundo antecedente es un trabajo de grado de la Universidad Pedagógica Nacional publicado en el año 2021, presenta de forma práctica algunas estrategias para mejorar la comprensión de temas que tienen un razonamiento abstracto, comúnmente visto en la mecánica cuántica y como se está enfocando desde conceptos que involucran a un observador, la medición y las soluciones a problemas de la mecánica cuántica llevadas al entorno escolar. El autor, Jhonny Flórez Tovar, representa un componente de gran ayuda para la fabricación de la guía, basándose en la experiencia de los estudiantes, ya que se puede tomar como referencia para el uso de ejemplos experimentales en relación con el principio que se desea trabajar.

### **Computadoras cuánticas.**

La tesis de doctorado presentada por César Miguel en la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires en el año 2002, da un estudio disciplinar sobre la computación cuántica. Presenta algunos de los obstáculos que tiene dicho funcionamiento y unas posibles soluciones a estos, allí aborda resultados experimentales para trabajar la resonancia magnética nuclear en líquidos y como utilizar las moléculas y los espines para generar Qubits, por dicho abordaje es útil este trabajo para el desarrollo de este documento al momento de presentar el comportamiento y uso de los Qubits, donde se aborda el funcionamiento de la computación cuántica.

## **MARCO TEÓRICO**

En la naturaleza, de acuerdo con las teorías contemporáneas de la física, las partículas como los electrones o los fotones se encuentran en estados o configuraciones de las propiedades que los componen, estas propiedades hacen referencia a cualquier característica observable, entre ellas puede ser, la ubicación en el espacio, la dirección de su espín, entre otras. Es en

esta naturaleza donde tienen simultáneamente la probabilidad de hallarse en distintos lugares a la vez y con la probabilidad de tener diferentes velocidades, esto equivale a que los lugares en los cuales se puede encontrar la partícula tengan una probabilidad estadística de ser encontradas allí, por ende, este comportamiento de sus características se puede denominar una superposición, dado que en algunos casos la probabilidad puede ser la misma que esté en un estado o en otro. (Martinez, 2022)

Lo anteriormente mencionado se fundamenta a través de un experimento mental que se ha usado ampliamente para ilustrar cómo podemos hacernos a una idea de dicha superposición, el cual se denomina el gato de Schrödinger. Este experimento contiene 5 elementos importantes: una caja cerrada, un gato, un recipiente con veneno, una cantidad de uranio y un dispositivo que se activa con la radiación producida si algún átomo de uranio decae. La idea de este experimento es que dentro de la caja cerrada esté el gato, el uranio, el veneno y el dispositivo que se activa por la radiación del decaimiento de un átomo de uranio; si el uranio emite radiación y el dispositivo detecta esto, lo que hará es liberar el veneno y por ende mataría al gato, pero también está la posibilidad que el uranio no decaiga y por tanto no se emita radiación, por consiguiente el dispositivo no libera el veneno, resultando que el gato pueda vivir, esto quiere decir que hay una probabilidad del 50% que el gato se encuentre vivo y 50% de que el gato se encuentre muerto. Así que, al estar dependiendo de la acción del estado del uranio, este sistema tendría la particularidad de estar en un estado cuántico y sin algún observador que interfiera en él, dentro de la caja no sucede una u otra opción, sino que suceden ambas al mismo tiempo tanto el uranio emite radiación como no lo hace, y en consecuencia el gato está vivo y muerto. Al momento de abrir la caja y ver qué es lo sucedido se está obligando al sistema a quedar en alguna de estas 2 opciones, forzando así el sistema a decantarse por uno de los dos resultados. (López Solano, 2015)

Este experimento fue propuesto en 1935 por el físico Erwin Schrödinger de manera netamente mental, por lo que afortunadamente no se sacrificó la vida de ningún felino, sin embargo, *“Su intención era demostrar las paradojas e interrogantes a los que llevaba la física cuántica. En lugar de acabar con la física cuántica, se convirtió en el experimento más famoso.”* (López Solano, 2015) lo cual quiere decir que se buscaba dar a conocer el lado

contraintuitivo de la teoría cuántica, por suerte para la corriente de la cuántica, lo que causó fue una gran herramienta para la explicación del principio de superposición de estados.

Por tal motivo, aquí es donde el principio de superposición entra a jugar un papel importante para describir la naturaleza física del mundo de lo atómico y, por consiguiente, en el presente trabajo se realiza el abordaje de este principio.

## **METODOLOGÍA**

El presente trabajo se desarrolló a través de la metodología documental la cual *“es una de las técnicas de la investigación cualitativa que se encarga de recolectar, recopilar y seleccionar información de las lecturas de documentos, revistas, libros, grabaciones, filmaciones, periódicos, artículos resultados de investigaciones, memorias de eventos, entre otros; en ella la observación está presente en el análisis de datos, su identificación, selección y articulación con el objeto de estudio”* (Reyes-Ruiz, 2020) esto con el fin de tomar documentos básicos de la mecánica clásica y cuántica para su análisis y de esta manera proponer una guía didáctica la cual se desarrolla utilizando la metodología activa descrita en el tercer capítulo de este documento.

Fase 1: Investigación fuentes de referencia para la construcción del marco teórico utilizando la teoría documental.

Fase 2: Análisis de la información obtenida a través de la metodología documental para el uso de la computación cuántica en un lenguaje más simple pero preciso.

Fase 3: Elaboración de la guía didáctica usando ejemplos prácticos y concisos a través de la metodología activa.

## **CAPITULO I: ABORDAJE DEL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN EN FÍSICA**

El principio de superposición en la física hace referencia a una propiedad fundamental de un sistema que se desee estudiar, independientemente si es de la mecánica clásica o de la cuántica. La diferencia que tienen estas dos radica en la definición de la palabra “estado”, porque, en la mecánica clásica tiene que ver con la determinación numérica precisa de sus características observables, mientras que, en la cuántica está relacionado con la probabilidad que tienen dichas características para definirse en un valor numérico, más adelante al describir de manera detallada este principio se abordará esta definición de estado propiamente basándose en la descripción dada por Paul Dirac.

Por lo tanto, en el desarrollo de este primer capítulo se llevará a cabo una descripción del principio de superposición pasando por algunas de las teorías de la mecánica clásica, los ejemplos en los cuales se puede encontrar y lo útil que es para la resolución de problemas lineales, para luego contrastar con la forma en que se presenta este principio en física cuántica donde se abordará su uso y cómo varía en comparación con la mecánica clásica.

### **1.1 DESCRIPCIÓN DEL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN EN LA MECÁNICA CLÁSICA**

Partiendo de la idea anterior, para dar desarrollo a este primer apartado, es necesario definir lo que es el principio de superposición en la mecánica clásica, a lo cual se puede decir que es *“una herramienta matemática que permite descomponer un problema lineal o de otro tipo en dos o más subproblemas más sencillos, de tal manera que el problema original se obtiene como "superposición" o "suma" de estos subproblemas más sencillos”* (Raymundo Barrales Guadarrama, 2014). Lo cual quiere decir que este principio se origina para dar una facilidad al estudio de los problemas que tengan un comportamiento lineal y poder estudiarlos como un conjunto de acontecimientos sucesivos.

Históricamente quien propuso formalmente este principio fue sir Isaac Newton en su obra titulada “Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica”, donde al describir sus leyes de la fuerza hace una aclaración en los axiomas del movimiento, tal que: *“La cantidad de movimiento que se obtiene tomando la suma de los movimientos hechos en una dirección y la diferencia de los realizados en sentido contrario, no cambia por la acción de los cuerpos*

entre sí" (Newton, 1725), esto lo propone para demostrar la definición de la superposición de los movimientos, cosa que un movimiento neto en una dirección se conforma de otros sub movimientos o una combinación lineal de otros movimientos. De igual manera en su obra esto no solo lo define para la cantidad de movimiento, sino también para otras variables físicas como la fuerza, la velocidad entre otras. Es por esto que este principio se ha utilizado en múltiples teorías de la física como en mecánica de ondas o electromagnetismo, puesto que en estos como los movimientos que describe Newton presentan una característica lineal en su comportamiento.

Continuando con la idea anterior, en el electromagnetismo, cumpliendo la condición que el problema tenga un comportamiento lineal, se puede utilizar el principio de superposición, por tal motivo, por ejemplo se puede hablar desde una situación como la siguiente: *“Cuando dos o más cargas ejercen simultáneamente fuerzas sobre otra carga, se encuentra que la fuerza sobre ésta es la suma vectorial de las fuerzas ejercidas individualmente por cada carga, es decir, se satisface el principio de superposición. Matemáticamente, la fuerza eléctrica neta se expresa como  $\vec{F}_E = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$ ”* (Gutiérrez Fallas, 2017). Entonces, este principio tiene lugar en la descripción del fenómeno para volver el problema más fácil de calcular en pequeñas partes y al final se realiza una suma vectorial para dar solución a la situación planteada. Es importante aclarar que en este ejemplo se pueden tratar de manera independiente las fuerzas  $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$ ; desde la teoría electromagnética cada una de estas fuerzas se puede hallar sin necesidad de recurrir a alguna de las otras, y también son estados susceptibles a ser observados sin que esto genere cambios en los demás estados de fuerza del sistema.

Otro de los ejemplos en los cuales se puede evidenciar la superposición es en física de ondas. Principalmente se establece que se pueden encontrar diferentes tipos de ondas como lo son las mecánicas (por ejemplo, las ondas sonoras) y las electromagnéticas (la luz), donde se establece una superposición de ondas en el fenómeno de la interferencia (véase en la Figura 1). En este fenómeno, al encontrarse dos ondas, estas se superponen modificando su amplitud de manera que puedan combinarse de forma constructiva o destructiva. Al suceder esto, se genera una nueva onda que puede ser más grande o pequeña que las dos originales.

Un ejemplo para resaltar en acústica es cuando se está en una autopista donde el sonido que generan los carros interactúa de manera destructiva y constructiva aleatoriamente en el ambiente, al no tener un orden en las perturbaciones, encontrándose solamente ruido completamente caótico. Por el contrario, en un concierto de alguna orquesta filarmónica, donde diferentes instrumentos con diversas tonalidades generan perturbaciones de manera distinta, la guía de un maestro permite que las perturbaciones se combinen en un sonido armonioso y agradable para el oído humano, sobre todo entendible y reconocible.

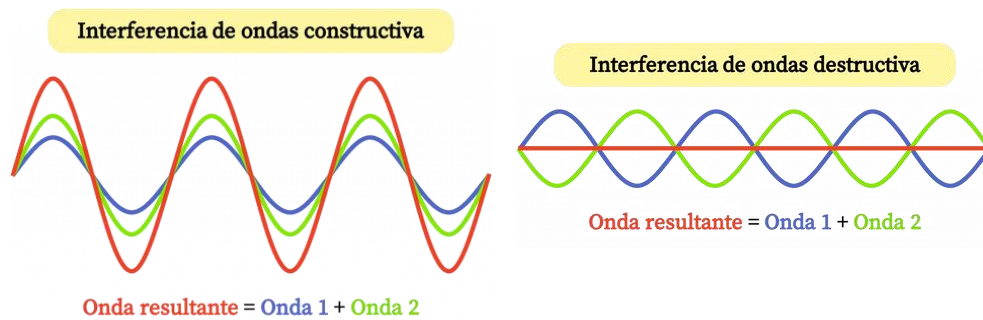


Figura 1. Se muestra el fenómeno de interferencia de las ondas de manera constructiva al costado izquierdo y destructiva al costado derecho. (Ingenierizando, 2023)

Al igual que el ejemplo con las ondas sonoras, en las ondas electromagnéticas también se presenta la superposición como interferencia; teniendo luz monocromática se puede evidenciar con el experimento que llevó a cabo el físico inglés Thomas Young en el siglo XIX: “Young hizo pasar un haz de luz por dos rendijas y vio que sobre una pantalla se producía un patrón de interferencias, una serie de franjas brillantes y oscuras alternadas.” (Barriga Carrasco, 2021), por tal motivo esto se puede observar en la Figura 2, donde las franjas brillantes son aquellas que presentan una interferencia constructiva o una superposición de las ondas, concordando ya sea las crestas o valles de las ondas, mientras que las franjas oscuras presentan una interferencia destructiva o una superposición entre una cresta y un valle.



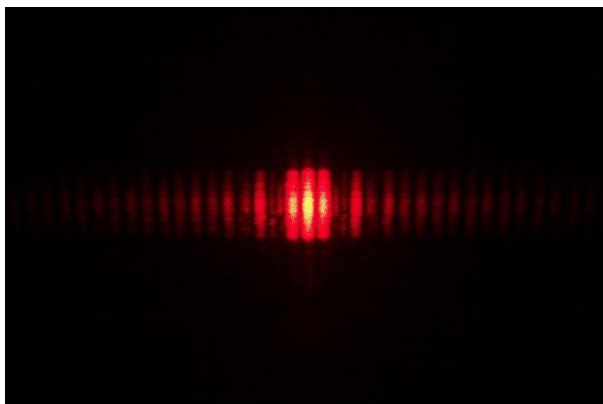


Figura 2. El fenómeno de interferencia de la luz presenta en las zonas de color rojo la interferencia constructiva y las líneas negras la destructiva (THOMPSON, 2016)

En pocas palabras y recogiendo los ejemplos presentados anteriormente, se puede establecer que el principio de superposición nació y se ha utilizado en la mecánica clásica como una manera de representar la naturaleza de los sistemas de forma secuencial, en la cual se puede descomponer los sucesos en partes más pequeñas para lograr una solución matemática más sencilla, esto con el objetivo de poder estudiar el sistema a partir de las partes que lo componen. Además, en algunos de los fenómenos, como en el caso de las ondas, muestra de forma natural la superposición del estado de dos o más sistemas que dan como resultado un estado final que se puede describir como una combinación lineal de los estados iniciales. No obstante, la representación de los sistemas al momento de entrar al campo de la mecánica cuántica presenta un comportamiento distinto al propuesto aquí para la mecánica clásica y es por ello, que el principio de superposición cambia en su interpretación desde esta teoría, lo cual se presentará a continuación.

## 1.2 PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN EN LA MECÁNICA CUÁNTICA

Continuando con la descripción del principio de superposición y teniendo en cuenta que se dieron algunos ejemplos para establecer lo que representa en mecánica Clásica, es pertinente para el presente trabajo abordarlo desde el formalismo de la física cuántica para dar evidencia de otra representación de la naturaleza que este mismo puede tomar. Por tanto, se partirá por mencionar la diferenciación entre los estados de un sistema clásico y uno cuántico con base en lo descrito en el libro de Paul Dirac “The Principles Of Quantum Mechanics”.

Aquí Dirac aclara que en la mecánica clásica el denominado estado de los objetos se puede determinar “*dando el valor numérico de todas las coordenadas y velocidades de los diversos*

*componentes del sistema en un instante de tiempo quedando así completamente determinado el movimiento de todo el sistema” (Dirac, 1958), por lo tanto, el principio de superposición en la física clásica, desde esta perspectiva, toma el movimiento de todo el sistema desde una observación pasiva que permite dar valores de posición y velocidad en las coordenadas medibles, para dar una construcción del estado de forma que se componga de las pequeñas partes en que se pueda dividir. Además, el sistema queda completamente determinado, consecuentemente, si se quiere dar cuenta de la totalidad o de solo alguna de las coordenadas no hay problemas en la descripción o la observación.*

En contraste, para la mecánica cuántica Dirac establece que:

*“el estado de un sistema atómico tiene que caracterizarse por menos datos o por datos más imprecisos que un conjunto completo de valores numéricos de todas las coordenadas y velocidades en un instante de tiempo particular... Puede definirse el estado de un sistema como un movimiento inalterado restringido por tantas condiciones o datos como sea posible teóricamente sin que se interfieran o que se contradigan mutuamente” (Dirac, 1958).*

En este apartado, Dirac establece un concepto que difiere claramente de la mecánica clásica y es la imprecisión. El estado en mecánica cuántica ya no puede tenerse de manera precisa con el conjunto completo de valores como en clásica, por tanto, hay un limitante en la cantidad de datos que se pueden obtener. Con esta definición de lo que es un estado en la mecánica cuántica, también se hace notable la necesidad, para su explicación y entendimiento, del principio de superposición diferente al establecido para la mecánica clásica. Para los sistemas cuánticos se va a tener una variedad de estados posibles los cuales van a interactuar entre sí para combinarse en un solo estado el cual está compuesto por las diferentes probabilidades de estos.

Otro punto importante sobre el estado y la superposición en mecánica cuántica es que al observar, es decir, al interactuar el ser humano con el sistema no van a obtenerse resultados secuenciales y por tanto no se presenta un comportamiento con un orden determinado, en palabras de Dirac:

*“La naturaleza no clásica del proceso de superposición se pone claramente de manifiesto al considerar dos estados A y B, tales que exista una observación que aplicada al sistema en el estado A dé siempre el resultado particular a y aplicada al sistema en el estado B dé siempre el mismo resultado particular b distinto de a. ¿Cuál será el resultado de la observación aplicada al sistema en el estado resultante de la superposición? La respuesta es que unas veces obtendremos el resultado a y otras el b, según una ley probabilística que depende únicamente de los ‘pesos’ relativos de A y B en el proceso de superposición. En ningún caso obtendremos un resultado distinto de a o b. El carácter intermedio del estado formado por la superposición reside en el hecho de que la probabilidad de obtener un resultado particular en una observación es intermedia entre las probabilidades correspondientes a los estados de partida, y no en que el mismo resultado sea intermedio entre los resultados correspondientes a dichos estados.” (Dirac, 1958)*

La anterior definición de superposición muestra que, en la mecánica cuántica, los sistemas que se desean estudiar no tienen una naturaleza definida totalmente, la superposición en este caso no implica que se pueda obtener el estado del sistema como la suma de sus partes, las cuales puedan definirse de manera separada y luego combinarse linealmente para dar cuenta del estado resultante, sino que por el contrario el estado en superposición se mantiene de esta forma hasta que se mide o se observa; la superposición en mecánica cuántica no implica un estado producto de la combinación lineal de sus partes que se pueda caracterizar y observar independientemente en cada una de estas, sino que al observarse se obtendrá como resultado únicamente uno de los estados de la superposición, es así como en este caso la superposición nos muestra el carácter probabilístico de obtener en la medición uno u otro estado. Además, se debe adicionar que el estado posee una inherente incertidumbre entre dos variables como las que nombra Dirac respecto al caso clásico: la posición y la velocidad, en donde ya no es posible obtener el valor numérico de sus características medibles, como se menciona en el principio de incertidumbre de Heisenberg (García, 2019).

En consecuencia, al momento de observar el sistema lo que se genera es que se perturbe su estado natural, lo que lo lleva a exhibir un valor específico para que el ser humano pueda medirlo. El resultado de la medición realizada se va a dar de forma aleatoria (dependiendo

del peso relativo de la probabilidad que tenga), generando que existan diferentes estados los cuales al coexistir presenten una probabilidad y así formen el estado de superposición que caracteriza el estado del sistema antes de la medición u observación.

Ahora, para analizar un poco más lo que representa el estado de superposición en mecánica cuántica se trae lo propuesto por Feynman, quien plantea dos experimentos mentales, uno con balas y otro con ondas, con el fin de compararlos para ver su comportamiento al momento de atravesar una doble rendija dando las descripciones desde lo que se observa en mecánica clásica. Puntualmente llega a establecer que las balas siguen una trayectoria definida, igual que su posición y velocidad, y que la probabilidad con la que llegan a una pantalla se puede medir en función de la posición de partida, mientras que con las ondas se interfieren unas con otras, lo cual quiere decir, al momento de llegar al otro extremo presenta una intensidad mayor o menor en la pantalla dependiendo de la interferencia que presenta en el trayecto al atravesar las dos rendijas (Feynman, Leighton, B, Sands, & Heras, 1971).

Dicha comparación la realiza para poder hablar del comportamiento dual de los electrones al momento de pasar por una doble rendija similar y poder describir lo siguiente acerca de la probabilidad de su posición espacial:

*“(1) La probabilidad de un evento en un experimento ideal, está dada por el cuadrado del valor absoluto de un número complejo que se llama la amplitud de probabilidad:*

$$\begin{aligned} P &= \text{probabilidad} \\ \emptyset &= \text{amplitud de probabilidad} \\ P &= |\emptyset|^2 \end{aligned}$$

*(2) Cuando un evento puede tener lugar de varias maneras, la amplitud de probabilidad es la suma de las amplitudes de probabilidad de cada manera considerada independientemente. Hay interferencia:*

$$\begin{aligned} \emptyset &= \emptyset_1 + \emptyset_2 \\ P &= |\emptyset_1 + \emptyset_2|^2 \end{aligned}$$

*(3) Si se monta un experimento que es capaz de determinar qué manera es la que se tiene en cuenta efectivamente, la probabilidad del evento es la suma de las probabilidades de cada alternativa. Se pierde la interferencia*

$$P = P_1 + P_2$$
 (Feynman, Leighton, B, Sands, & Heras, 1971)

Por el comportamiento dual de los electrones entre ondas y corpúsculos, Feynman establece que la superposición en mecánica cuántica está dada por una serie de amplitudes de probabilidad de los estados, siendo estos números complejos que representan la contribución de cada estado posible del sistema a la probabilidad total de observar un resultado específico. Por lo tanto, las amplitudes de probabilidad se combinan y estas generan un estado resultante en el cual pueden existir múltiples estados simultáneamente antes de una medición de la característica que se desee medir, en el caso del ejemplo que propone, vendría siendo el agujero por el cual atraviesa el electrón o si pasa por ambos, teniendo en cuenta que si se mide por cual va atravesar, el electrón cambiará su comportamiento y se definirá únicamente por uno de los dos agujeros.

Por último, para redondear la idea del estado cuántico resultante al expresarlo con el principio de superposición de estado, María Carolina Spinel describe lo siguiente:

*... éste se puede expresar como superposición de otros estados, esto no quiere decir que el sistema se encuentre en cada uno de los estados de la superposición, de hecho, el sistema se encuentra en el estado resultado de la superposición. Aunque el principio de superposición nos permite predecir la probabilidad de que el sistema se encuentre en uno de los estados de la superposición, el sistema se podrá encontrar en uno de estos estados solamente después de realizar una observación o medición de los observables asociados a los estados que se superponen. (Spinel, 2009)*

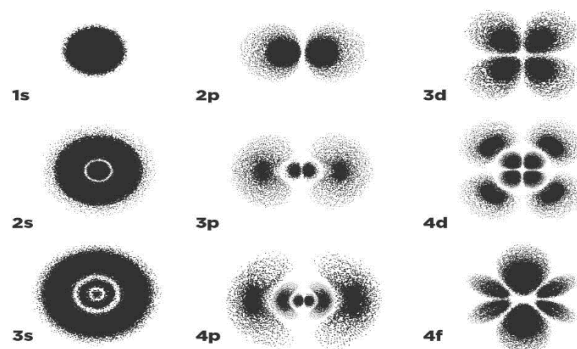
Esta propuesta de Spinel es necesaria para aclarar lo que es la idea de la superposición de los estados, debido a que se puede asumir de forma errónea que el sistema se encuentra en todos los estados al mismo tiempo, mas no, como un estado resultado en el cual se combinan las probabilidades de los estados que lo componen.

De esta manera al analizar lo que dice Dirac, Feynman y Spinel, se puede presentar una postura frente al principio de superposición de estados en mecánica cuántica, la cual será la que se mantendrá a lo largo de este documento: el principio de superposición describe un estado de un sistema previo a una medición, en el cual se encuentran las amplitudes de probabilidad calculables para definir los estados característicos medibles del sistema en la superposición,

con la propiedad que al interactuar (observar - medir) con este estado el sistema optará de forma aleatoria por uno solo de los estados característicos, para un sistema idéntico previo a la interacción, no se pierde la probabilidad de dicho estado, además de no ser secuencial ni tener un comportamiento repetitivo frente a diversas mediciones consecutivas.

Finalmente, esta naturaleza se puede evidenciar con el comportamiento de los electrones en el átomo, partiendo de la ecuación propuesta por Schrödinger en el año 1926, se describe dicho comportamiento como una onda en algo denominado como orbital, lo cual se puede definir de la siguiente manera:

*“Un orbital atómico es una ecuación que representa la probabilidad de encontrar electrones en una zona particular del espacio. Estas regiones pueden pensarse como nubes con formas muy características, dadas por el nivel de energía específico que representen. El electrón no está ahí o acá, está en algún lugar que puede ser cualquiera del espacio pero con una probabilidad que cambia en función del tipo de orbital. Esa probabilidad es un número: cerca de 0% si el electrón ahí casi seguro no está, y cerca de 100% si casi seguro que sí. Sólo sumando las probabilidades de todo el espacio nos da 100%” (Violi, 2019)*



*Figura 3. Se observan las posiciones espaciales donde se puede encontrar al electrón dentro de los diferentes orbitales (Violi, 2019)*

Por lo tanto, dependiendo de sus orbitales o niveles de energía, en la Figura 3 se muestra el átomo de Hidrógeno con las zonas donde es más probable que se encuentre el electrón, destacando con una coloración negra. Se observa que algunas de estas regiones tienen la misma intensidad de color o inclusive sea mayor en estas zonas que en otras, concluyendo

que la probabilidad de encontrar al electrón allí sea igual o superior en comparación con las otras zonas menos intensas, dando a entender que, en su estado natural sin interacción con un observador, el sistema se encuentra en una superposición de estados de posición para el electrón, no obstante, si el ser humano perturba dicho comportamiento lograría afectar la existencia de estas nubes, generando que el electrón se ubique en un punto de esta región del espacio de forma aleatoria de acuerdo con el nivel de probabilidad que posea .

### **1.3 DIFERENCIAS ENTRE EL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN EN MECÁNICA CLÁSICA Y EN MECÁNICA CUÁNTICA.**

De esta manera para darle un cierre a este capítulo es necesario remarcar la diferencia que posee el principio de superposición entre la mecánica cuántica y la mecánica clásica, comenzando con la observación que en ambas corrientes este principio describe la naturaleza del sistema para lograr dar un entendimiento, pero con la diferencia que en la clásica el sistema posee un comportamiento lineal dando una medición precisa, con valores certeros y una solución matemática más sencilla desglosando en partes más simples a los sistemas, mientras que en la cuántica posee un comportamiento probabilístico de cómo se puede presentar el estado del sistema al momento de ser medido, por lo tanto, la esencia del principio viene siendo la misma en ambas corrientes pero con la diferencia que en una logra dar valores determinados de forma específica, mientras que en otra refleja la incertidumbre intrínseca de la naturaleza en el mundo cuántico al momento de la medición.

## CAPITULO II: LA COMPUTACIÓN

Una computadora hace referencia a un dispositivo tecnológico el cual cumple el rol de almacenar y procesar información de manera eficiente. En la sociedad, las computadoras permiten dar solución a problemas de tipo matemático, lógico, lingüístico, entre otros, además de generar conexiones entre las personas que se encuentran a distancias muy largas, también se usan para diseñar productos para su consumo, en pocas palabras, es un instrumento necesario para casi todas las actividades que desarrolla la sociedad de hoy en día. En este capítulo se abordarán dos categorías principales las cuales se denominan las computadoras clásicas y las computadoras cuánticas, a lo largo del desarrollo de este capítulo se mencionará lo que es una computadora tanto clásica como cuántica, lo que las compone, como funcionan, sus diferencias en los sistemas que utilizan, además de los beneficios y retos que presentan estas, por último, se hará una comparación entre ellas para dar un cierre claro de las diferencias y los campos en los cuales se desempeñan mejor estas categorías, todo esto con el fin de mostrar el funcionamiento de las tecnologías a las cuales la sociedad actual tiene acceso y por el cual se puede introducir al estudiantado a temas de la física moderna.

### 2.1 COMPUTACIÓN CLÁSICA.

Partiendo de la idea anterior, para dar desarrollo a esta primera parte del segundo capítulo, es necesario definir lo que es una computadora formalmente de la siguiente manera: “*A computer is a physical device that helps us process information by executing algorithms. An algorithm is a well-defined procedure, with finite description, for realizing an information-processing task. An information-processing task can always be translated into a physical task*” (Kaye, Laflamme, & Mosca, 2006) por lo tanto, en unas pocas palabras se puede definir que una computadora es una pieza tecnológica la cual utiliza procedimientos lógicos a través de una descripción delimitada para llevar a cabo tareas de procesamiento de información.

Con la definición de lo que es una computadora ahora hay que enmarcar las partes que la componen, básicamente se puede realizar en tres grandes grupos, los primeros son los dispositivos de entrada, los cuales serían el mouse, el teclado, un escáner, una cámara web o cualquier otro tipo de dispositivo con los cuales un usuario introduce información a la computadora. El siguiente grupo se denominan dispositivos de salida en los cuales se



encuentra la pantalla e incluso las impresoras, debido a que a través de ellos las computadoras muestran los resultados del procesamiento de información.

Por último, se encuentran los dispositivos que procesan y manipulan la información suministrada por el usuario, por ende, allí se ubica lo que es la unidad central de procesamiento o también denominado procesador, la memoria y las compuertas lógicas. El procesador es la *“Unidad funcional de una computadora u otro dispositivo electrónico, que se encarga de la búsqueda, interpretación y ejecución de instrucciones”* (Real Academia Española, 2022), la memoria, *“Dispositivo físico, generalmente electrónico, en el que se almacenan datos e instrucciones para recuperarlos y utilizarlos posteriormente.”* (Real Academia Española, 2022) y las compuertas lógicas, las cuales son pequeños circuitos que manejan señales de voltaje basándose en operaciones lógicas.

Con esto se puede mencionar que el funcionamiento que tiene el procesador es recibir la información proporcionada por un usuario a través de un dispositivo de entrada, para poder procesarla y utilizar una serie de instrucciones por medio de un lenguaje específico de la computación, para que sea almacenada en la memoria y sus dispositivos de almacenamiento, por último, dar una respuesta de dicho proceso en el dispositivo de salida para que el usuario obtenga una respuesta.

Ahora bien, para dar una explicación más formal a este procesamiento de información se debe aclarar la manera en que el procesador realiza los cálculos necesarios para cumplir con su labor, esto lo hace a través de compuertas lógicas como se mencionó anteriormente y lo hace con señales de voltaje, a las señales de voltaje se le denominan Bits siendo definidos como la *“unidad de medida de información equivalente a la elección entre dos posibilidades igualmente probables”* (Real Academia Española, 2022) lo cual quiere decir que un Bit es la unidad mínima de información que se define en un lenguaje binario como 1 o 0, pero que representa el paso de una señal eléctrica o el impedimento de la misma dado por la compuerta lógica.

De esta manera las compuertas lógicas funcionan con la interacción de una cantidad de Bits, en este documento se explica las que lo hacen con dos Bits, pero dependiendo de la arquitectura pueden manejar una cantidad mayor.

De acuerdo con lo anterior, las compuertas lógicas se presentan con diferentes comportamientos pero siguiendo operaciones básicas como lo son la suma y la multiplicación (este procedimiento se verá en la Tabla 1), sin embargo, al estar en un código binario se ven regidas a seguir el algebra de Boole la cual *“fue un intento de utilizar las técnicas algebraicas para tratar expresiones de la lógica proposicional”* (Brunete, San Segundo, & Herrero, 2020) en esta se busca principalmente minimizar el lenguaje a solo dos valores (1 y 0) haciendo relaciones entre ambas como se denominan en las compuertas lógicas que se abordarán en seguida.

Por lo tanto, la primera compuerta lógica se le denomina AND y su funcionamiento se basa en la multiplicación, lo cual quiere decir que en las entradas que tenga un 0 el resultado será 0, mientras que si ambas entradas tienen un valor de 1 su resultado será 1, en otras palabras, para que el resultado tenga un paso de corriente se debe tener la entrada de dos corrientes o visto de manera lógica, el resultado será verdadero solo si las dos entradas son verdaderas (Universidad Nacional Autónoma de México, 2018).

La siguiente compuerta se le denomina OR y utiliza la suma como operación lógica, allí se comporta igual que la anterior, suma los valores de entrada y solo para los dos Bits que tengan valor 0 tendrá un resultado de 0, en los demás se tendrá un resultado de 1, lo cual en la salida solo será falsa si ambas entradas son falsas. (Universidad Nacional Autónoma de México, 2018)

Las dos siguientes se basan en la misma operación que las compuertas AND y OR, sin embargo, son la negación (lo opuesto) de estas, por lo tanto, su comportamiento es inverso con respecto a la entrada y salida de los valores, estas se denominan NAND y NOR, como si estuvieran negando a las dos primeras compuertas. (Universidad Nacional Autónoma de México, 2018)

La siguiente se denomina XNOR y funciona usando una equivalencia lógica en sus entradas, lo cual se traduce en que, si las entradas son iguales, el resultado tendrá un valor de 1, mientras que si son diferentes el resultado valdría 0, por lo tanto, para que el resultado sea verdadero ambas entradas deben ser verdaderas o falsas, de lo contrario será falso. (Universidad Nacional Autónoma de México, 2018)

Por último, la compuerta XOR funciona de manera contraria a la que se utiliza la equivalencia, es decir, si los valores de entrada son iguales, el valor de salida será 0 o falso, mientras que, si son diferentes, el valor de salida será 1 o verdadero. (Universidad Nacional Autónoma de México, 2018)

*Tabla 1. Tablas de verdad para las compuestas lógicas descritas.*

Compuerta	Valor de entrada	Valor de entrada	Valor de salida
<b>AND</b>	0	0	0
	0	1	0
	1	0	0
	1	1	1
<b>OR</b>	0	0	0
	0	1	1
	1	0	1
	1	1	1
<b>NAND</b>	0	0	1
	0	1	1
	1	0	1
	1	1	0
<b>NOR</b>	0	0	1
	0	1	0
	1	0	0
	1	1	0
<b>XNOR</b>	0	0	1
	0	1	0
	1	0	0
	1	1	1
<b>XOR</b>	0	0	0
	0	1	1
	1	0	1
	1	1	0

Lo anteriormente mencionado hace parte de lo que se denomina el hardware, una palabra utilizada para enmarcar los componentes físicos de una computadora, ahora, en la descripción anterior del funcionamiento del procesador se hace referencia a unas instrucciones en un lenguaje específico de la computación, esto hace referencia a lo que es el software, el cual se define como el *“conjunto de programas, instrucciones y reglas para ejecutar ciertas tareas en una computadora”* (Real Academia Española, 2022). Los programas son un conjunto de algoritmos, los cuales son *“un conjunto de instrucciones definidas, ordenadas y acotadas para resolver un problema, realizar un cálculo o desarrollar una tarea”* (Maluenda, 2021) por lo tanto, los algoritmos son un paso a paso para cumplir el procesamiento y son la esencia de la programación de una computadora.

Para estos algoritmos existen diferentes tipos como lo son los de búsqueda o los de ordenamiento, de igual manera existen otros tipos como los de probabilidad o de programación dinámica, pero para fines pertinentes de este documento solo se abordarán dos para ilustrar la naturaleza que tiene la computación clásica y el motivo por el cual se denomina de esta manera.

Comenzando con los algoritmos de búsqueda se pueden definir como aquellos que *“localizan uno o varios elementos que presenten una serie de propiedades dentro de una estructura de datos”* (Maluenda, 2021) de esta manera el algoritmo en un conjunto de datos va comparando las propiedades que tienen con las solicitadas por el usuario hasta encontrar el solicitado, la forma en que lo hace puede ser secuencial, la cual es ir comparando uno a uno los datos hasta encontrar el solicitado, o de forma binaria, lo cual es que divide los datos y ubica el dato del medio para comparar con el solicitado, si no corresponde vuelve a segmentar los datos en grupos cada vez más pequeños hasta poder encontrar el solicitado.

Continuando con los algoritmos de ordenamiento se pueden agrupar como aquellos que *“Reorganizan los elementos de un listado según una relación de orden.”* (Maluenda, 2021) estos lo que buscan es ordenar el conjunto de datos para que la tarea del algoritmo de búsqueda, o de un usuario que desea revisar los datos, sea más eficiente y por tal motivo se realizan de distintas formas basándose en la comparación, de estas formas puede ser agrupando los datos para organizarlos con relación a si son mayores o menores que un dato elegido para posteriormente hacer lo mismo con los demás datos, a esto se le denomina

ordenamiento rápido. También se realiza la comparación de manera uno a uno los datos con el siguiente para intercambiar posiciones, si no se encuentran en el orden que solicitó el usuario, a este se le denomina ordenamiento de burbuja.

Se supone que se tiene un pequeño conjunto de datos numéricos que se desean ordenar, para esto se llevará a cabo el ordenamiento de burbuja previamente explicado. Los datos que se desean ordenar se encuentran de la siguiente manera: 8,6,7,3,2. El algoritmo compara uno a uno los datos y los va cambiando de posición según el orden deseado, en este caso será de menor a mayor, por ende, el primer paso es comparar el dato 1 con el dato 2 y en caso tal intercambiar sus posiciones, como es el número 8 mayor que el 6, las posiciones cambian, posterior a esto, se compara el nuevo dato 2 con el siguiente y repitiendo el proceso hasta comparar todos los datos, en una primera vuelta los datos quedarían de la siguiente manera: 6,7,3,2,8. No obstante este nuevo ordenamiento no ha cumplido por completo el orden que se solicita, por lo tanto, el algoritmo deberá volver a aplicarse tantas veces sea necesario hasta que se cumpla con esto.

De esta manera se aborda de forma general estos dos tipos de algoritmos y sus ejemplos, sin embargo, es necesario aclarar que los presentados allí no son los únicos ejemplos de algoritmos que se encuentran en la computación, ya que, el campo de los algoritmos es bastante amplio, no obstante, con los abordados hasta este punto se puede llegar a la siguiente conclusión:

El funcionamiento de una computadora clásica se basa en la manera que operan sus algoritmos, por lo tanto, se puede afirmar que el funcionamiento de una computadora clásica se basa en una forma secuencial de solucionar los problemas o llevar a cabo los procesos, por lo tanto, la denominación de clásica en su nombre hace referencia a que su naturaleza es igual a la evidenciada en el primer capítulo cuando se aborda el principio de superposición de estado en la mecánica clásica.

## 2.2 COMPUTACIÓN CUÁNTICA

Tomando como referencia el ejemplo anterior del ordenamiento de datos, es claro concluir que la solución de dicho problema requiere de un tiempo lo suficientemente considerable, dado por la secuencialidad del funcionamiento, no obstante, este ejemplo podría solucionarse en un tiempo menor gracias a un cambio en el funcionamiento de las computadoras, las denominadas computadoras cuánticas. Como su nombre lo indica, estas computadoras tienen un comportamiento que se rige por lo establecido en la mecánica cuántica, más precisamente en el estado de superposición que tienen las partículas.

*“Las ideas esenciales de la computación cuántica surgieron en los primeros años de la década de 1980 de la mente de Paul Benioff que trabajaba con ordenadores tradicionales (máquinas de Turing) a los que hacía operar con algunos de los principios fundamentales de la mecánica cuántica. Entre 1981 y 1982 Richard Feynman proponía el uso de fenómenos cuánticos para realizar cálculos computacionales y exponía que, dada su naturaleza, algunos cálculos de gran complejidad se realizarían más rápidamente en un ordenador cuántico.”* (Moret Bonillo, 2013)

Con este panorama y el objetivo de alcanzar un rendimiento más eficiente, es requerido resaltar, al igual que en la sección anterior, el funcionamiento de estas computadoras para comprender y respaldar la idea mencionada. En este sentido, al realizar un abordaje de su eficiencia, es pertinente señalar que la arquitectura de las computadoras cuánticas es similar notablemente con las computadoras clásicas. Ambas poseen dispositivos de entrada y salida, procesadores y memoria, sin embargo, donde radica la divergencia significativa es en la tecnología empleada para el procesamiento de información.

Partiendo por comparar la unidad mínima de información definida con anterioridad como Bit, en la computación cuántica funciona de manera diferente, ya que, en esta se denomina como Qubit o un Bit cuántico (termino otorgado por Schumacher en 1995), la diferencia entre ambos tiene lugar en su naturaleza, esto debido a que *“un qubit representa ambos estados simultáneamente, un “0” y un “1” lógico, dos estados ortogonales de una sub partícula atómica, ... El estado de un qubit se puede escribir como  $|0\rangle, |1\rangle$ , describiendo su múltiple estado simultáneo”* (Figuerola, Rentería, & Bustillo, 2008), lo cual representa que

un Qubit matemáticamente se establece como un vector columna compuesto por dos valores, 1 y 0. No obstante, al definirse de manera física se considera como un estado cuántico, por ejemplo “*un espín de electrón que apunta arriba o abajo, o un espín de fotón con polarización horizontal o vertical.*” (Figuroa, Rentería, & Bustillo, 2008), donde se puede tener la superposición en estos estados, esto quiere decir que su representación de estado estaría descrita de la siguiente manera  $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ , por lo tanto, el Qubit presenta una probabilidad de estar en el valor 1 y otra en el valor 0, dando como resultado una superposición entre ambos.

Esta superposición, previamente mencionada, establece que al momento de interactuar dos Qubits se conjugan en un vector, lo cual lleva a definir que, “*Un vector de dos qubits, representa simultáneamente, los estados 00, 01, 10 y 11; un vector de tres qubits, representa simultáneamente, los estados 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, y 111; y así sucesivamente. Es decir, un vector de n qubits, representa a la vez  $2^n$  estados.*” (Figuroa, Rentería, & Bustillo, 2008), lo que implica que, a diferencia de su contraparte clásica, los Qubits se operan de manera paralela para almacenar y procesar la información suministrada, sin embargo, es necesaria una compuerta para llevar a cabo esto.

Es por ello por lo que:

*“Una compuerta de dos qubits en especial interesante, es la conocida como “U controlada”, [Steane97]  $|0\rangle\langle 0| \otimes I + |1\rangle\langle 1| \otimes U$  son operadores actuando sobre dos qubits, donde I es la operación de identidad sobre un qubit, y U es una compuerta. El estado del qubit U es controlado mediante el estado del qubit I.”* (Figuroa, Rentería, & Bustillo, 2008).

Lo cual indica que la operación entre el estado y la identidad es el producto tensorial, por tal motivo, representa el producto de n estados básicos simples que componen el estado básico de n Qubits. Un ejemplo preciso es “*el NOT controlado (CNOT) es:  $|00\rangle \rightarrow |00\rangle; |01\rangle \rightarrow |01\rangle; |10\rangle \rightarrow |11\rangle; |11\rangle \rightarrow |10\rangle$ ”* (Figuroa, Rentería, & Bustillo, 2008). Esta operación destaca que si el elemento de control (el primer Qubit) es 0, el estado queda igual, mientras que, si el elemento de control es 1 se debe variar el estado del elemento objetivo (el segundo Qubit).

Aparte de esta, existen otras compuertas como lo son la puerta de Fredkin, la X, la de intercambio, entre otras. Estas, como se mencionó anteriormente, se encargan de relacionar a los Qubit para que el proceso de almacenamiento y procesamiento de información sea de manera simultánea, lo cual representa que las compuertas tengan un comportamiento reversible, en palabras más técnicas, que utilizando los valores de salida se puedan obtener los valores de entrada, diferencia notable con su contraparte clásica.

Este comportamiento simultáneo en las compuertas, a la hora de establecer el hardware para una computadora cuántica, se da gracias a un fenómeno físico, el denominado entrelazamiento cuántico:

*“El entrelazamiento es la propiedad por la que dos entidades cuánticas, como los átomos, están conectados de tal manera que sus estados cuánticos individuales no pueden describirse independientemente. Por lo tanto, cuando se produce un cambio en una de las entidades, la otra modifica su estado para preservar la relación entre ambas, sin importar la distancia que les separe.” (Urdaneta, 2022)*

Es decir que, el entrelazamiento cuántico consiste en que dos sistemas se encuentran vinculados frente a sus estados, lo cual indica, que uno de los sistemas se ve afectado por el estado que tenga el otro, un ejemplo es el caso de dos fotones generados por el decaimiento de dos niveles energéticos de un electrón ( $f_1$  y  $f_2$ ), allí  $f_1$  y  $f_2$  saldrán en direcciones opuestas, ya que poseen una misma magnitud pero debe estar en diferente sentido para así mantener el momento angular previo al decaimiento, y con una polarización aleatoria debido a que la naturaleza no tiene preferencias en esto, como se esquematiza en la Figura 4.

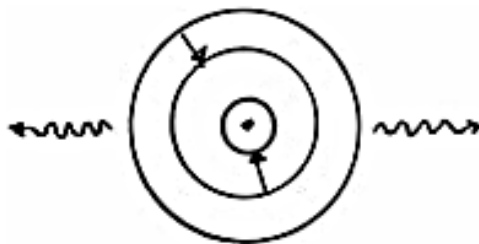


Figura 4 Representación del entrelazamiento de dos fotones (Rosenblum, 2016)

En este caso se cumple que, sin importar la distancia entre ellos, al momento de medir la polarización de  $f_1$ ,  $f_2$  responderá en función al estado de polarización que tenga  $f_1$ , lo cual



quiere decir, que tendrá una polarización vertical si  $f_1$  tiene una polarización horizontal y viceversa, no obstante, no siempre se dará en esta configuración, ya que, si es de forma diagonal dependerá de su inclinación para saber que probabilidad hay que sea opuesto o no, pero si estuviese medido de forma diagonal sería opuesta en una dirección diagonal diferente, esto es como si los sistemas de alguna manera que el ser humano no conoce (a días de estar desarrollado el documento presente), logran comunicarse para establecer un estado con respecto al medido (Rosenblum, 2016) .

Con respecto a lo anterior, en las compuertas cuánticas se presenta una superposición en sus estados, pero a la vez un entrelazamiento, lo cual quiere decir que, para llevar a cabo el proceso del almacenaje de la información en las computadoras cuánticas, los Qubits en medio de la superposición individual, se encuentran entrelazados interactuando entre sí para tener vías de comunicación más eficientes que las que se encuentran en la computación clásica (Moret Bonillo, 2013)

No obstante, esto simplemente se refiere a este proceso de almacenaje de información, ya que el proceso de lectura o medición de los Qubits altera su estado natural de incertidumbre y entrelazamiento, por lo cual obliga a que se establezca su valor dependiendo de su probabilidad.

Ahora bien, el proceso de lectura de la información está a cargo de los algoritmos, de igual manera que en la computación clásica, sin embargo, aquí presentan una particularidad: todos los algoritmos cuánticos son probabilísticos, lo cual quiere decir que *“Mediante un muestreo aleatorio de la entrada llega a una solución que puede no ser totalmente óptima, pero que es adecuada para el problema planteado”* (Maluenda, 2021), lo que implica que estos algoritmos toman un valor de entrada y al procesar la información, dan un valor de salida diferente cada vez que se utiliza, de esta manera evitan en ocasiones llevar a cabo vías de solución erróneas o demasiado extensas.

Algunos de estos algoritmos son el de Shor y el de Deutsch-jozsa. Para comenzar, el algoritmo de Shor se enfoca en lo siguiente:

*“Shor’s quantum algorithm for factorization of large integers. Let  $p, q$  be two large secret prime numbers, and  $N = pq$  be their product. Our goal is to determine the*

*values of  $p$  and  $q$ , given the value of  $N$ . Solving this problem will break RSA cryptosystem. As we have seen, we can determine  $p$  and  $q$  if, in addition to  $N$ , we know the order of the group  $\mathbb{Z}_N^*$  of invertible remainders mod  $N$ .” (Billig, 2018)*

Es así como este algoritmo se encarga de descomponer un número  $N$  en sus factores primos, no obstante, para realizar este proceso,  $p$  y  $q$  deben ser números diferentes, primos y no pueden ser múltiplos de  $N$ , por ende, ser menores a  $N$ , esta restricción limita las posibilidades en un intervalo entre 2 (que es el primer número primo) y  $N - 2$ . En el funcionamiento secuencial de la computación clásica encontrar las combinaciones de números primos correcta para saber cuáles componen el número  $N$  demandaría un tiempo cada vez mayor en función a la cantidad de cifras que tenga  $N$ , mientras que, en el sistema cuántico al poder combinar de forma paralela los posibles valores de  $p$  y  $q$ , este proceso tiene una eficiencia mucho mayor.

Por otro lado, el algoritmo de Deutsch-Jozsa

*“The Deutsch–Jozsa algorithm solves a problem that is a straight forward generalization of the problem solved by the Deutsch algorithm. The algorithm has exactly the same structure. As with the Deutsch algorithm, we are given a reversible circuit implementing an unknown function  $f$ , but this time  $f$  is a function from  $n$ -bit strings to a single bit... We are also given the promise that  $f$  is either constant (meaning  $f(x)$  is the same for all  $x$ ), or  $f$  is balanced (meaning  $f(x) = 0$  for exactly half of the input strings  $x$ , and  $f(x) = 1$  for the other half of the inputs). The problem here is to determine whether  $f$  is constant, or balanced, by making queries to the circuit for  $f$ ” (Kaye, Laflamme, & Mosca, 2006)*

Para lo anterior hay que aclarar que una salida es constante cuando no importa si su valor de entrada es 0 o 1, el valor de salida será el mismo, mientras que si depende del valor de entrada se denomina balanceada. Por lo tanto este algoritmo lo que busca es dar una determinación de una función que responde a un valor binario, sin embargo, si dicha determinación se llevara a cabo de forma secuencial con un sistema clásico, a medida que se tuviera una cantidad mayor de entradas para comprobar, el tiempo de análisis se incrementaría cada vez más, pero utilizando el proceso en paralelo y superpuesto de los Qubits la eficacia se

incrementa súbitamente y la determinación de esta función se puede realizar en un tiempo muy corto.

De esta manera se aborda de forma general estos dos tipos de algoritmos y sus ejemplos, sin embargo, es necesario aclarar que los presentados allí no son los únicos ejemplos de algoritmos que se encuentran en la computación, ya que, el campo de los algoritmos es bastante amplio, no obstante, con los abordados hasta este punto se puede llegar a la siguiente conclusión.

El funcionamiento de una computadora cuántica se basa en la manera que operan sus algoritmos, por lo tanto, se puede afirmar que el funcionamiento de una computadora cuántica se basa en una forma paralela y probabilística de solucionar los problemas o llevar a cabo el procesamiento de información, por lo tanto, la eficacia de este funcionamiento en comparación con su contraparte clásica es evidente, ya que, su naturaleza utiliza las características vistas en el primer capítulo abordando el principio de superposición para llevar la información a través de menos vías de procesamiento, de todas maneras cabe resaltar que dicha eficacia es pertinente para ciertos ejemplos como el presentado en el algoritmo de Shor, lo que quiere decir que las computadoras clásicas no son obsoletas y su uso es importante en algunas tareas más comunes para el ser humano.

### **2.3 RELACIÓN E IMPORTANCIA ENTRE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA Y LA ENSEÑANZA DE LA MECÁNICA CUÁNTICA.**

La relación entre la computación cuántica y la superposición de estados en mecánica cuántica es esencial para comprender la revolución que está ocurriendo en el campo de la informática y la física moderna en la sociedad con la cual se interactúa actualmente. La computación cuántica se basa en los principios de la mecánica cuántica, incluyendo la superposición, para realizar cálculos de manera más eficiente que las computadoras clásicas.

En mecánica cuántica, la superposición implica que un sistema puede existir en estado resultante del sistema previo a una medición, en el cual se encuentran las amplitudes de probabilidad calculables para definir los estados característicos medibles del sistema en la superposición, a diferencia de la física clásica donde un objeto se encuentra en un estado definido en un momento dado sin importar dicha medición. Esto permite a los sistemas

cuánticos procesar y almacenar información de manera exponencialmente más grande que los sistemas clásicos, ya que pueden considerar todas las posibles combinaciones de estados al mismo tiempo.

La computación cuántica aprovecha esta capacidad de superposición para realizar cálculos de manera paralela, lo que resulta en una velocidad de procesamiento mucho mayor en comparación con las computadoras clásicas para ciertas tareas específicas, como la factorización de números grandes o la simulación de sistemas cuánticos complejos.

Esta relación entre la computación cuántica y la superposición de estados tiene implicaciones importantes para la enseñanza de la física moderna en estudiantes de educación media. Al introducir estos conceptos en el aula, los estudiantes pueden desarrollar una comprensión más profunda de los principios fundamentales de la física cuántica y su aplicación en tecnologías emergentes como la computación cuántica. Al comprender cómo la superposición permite el procesamiento paralelo en la computación cuántica, los estudiantes pueden apreciar mejor las diferencias entre la física clásica y la cuántica, comprender el uso aprovechable de la naturaleza de las partículas y también como las implicaciones de esta diferencia en la tecnología y la sociedad. Además, al aprender sobre la computación cuántica, los estudiantes pueden explorar las posibilidades y los desafíos que esta tecnología presenta para el futuro.

### **CAPÍTULO III: ENSEÑANZA DEL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN, GUÍA DIDÁCTICA.**

Para comenzar este último capítulo de este documento, se debe mencionar que aquí se abordará el apartado que tiene que ver con la guía didáctica que se busca proponer para la enseñanza del principio de superposición de estado basándose en la computación cuántica para dar una explicación proyectada al uso de dicho principio, por lo tanto, aquí se realizará una definición de lo que es una guía didáctica, la metodología que se usará, una comparación entre las metodologías existentes y por último la manera de realizar la guía para su futura implementación.

Entonces, se parte en este capítulo de la definición de Guía didáctica:

*“es el documento que orienta el estudio, acercando a los procesos cognitivos del alumno el material didáctico, con el fin de que pueda trabajarlo de manera autónoma”* (García Aretio, 2014).

Es decir, una guía didáctica es un documento realizado por un docente que busca facilitar el proceso de comprensión de un tema en específico, generando una motivación e intriga en el estudiante para llevarlo a un aprendizaje significativo y que no requiera rigurosamente de un orientador para lograr dicho aprendizaje.

Por lo anteriormente definido acerca de lo que es una guía didáctica, se puede afirmar que al buscar generar un aprendizaje en el grupo de estudiantes la guía didáctica como tal responde a un objetivo claro en una asignatura, por lo tanto, el tipo de guía que sea depende netamente de la asignatura que la esté aplicando, en otras palabras, la guía didáctica simplemente es un documento que busca generar un aprendizaje en algún o algunos estudiantes respondiendo a una metodología que el docente crea pertinente para llevar a cabo su desarrollo.

Es por lo anteriormente mencionado que se dará una definición de algunas metodologías como lo es la tradicional, la Montessori y la metodología activa, aunque estas no son las únicas que existen, se resaltan dados los intereses de este trabajo. Es por esto que se pueden definir respectivamente de la siguiente manera:

La tradicional o expositiva:

*“Se caracteriza por la exposición de contenidos al alumnado. El docente tiene un papel directivo. El alumnado, por su parte, suele ser pasivo y, generalmente se limita a ‘recibir’ los contenidos que transmite el docente. Este conocimiento es formalizado y sistemático. Las fuentes de información que se utilizan son indirectas, no provienen de la experiencia directa de los sujetos” (Jorge, 1997),*

La Metodología Montessori:

*“... es una filosofía de vida que entiende que cualquier ayuda innecesaria, es un obstáculo al desarrollo. Es un cambio que nace primero en cómo los adultos vemos a los niños. Y luego, depende de nosotros, preparar un entorno que provea actividades con propósito en que los niños puedan convertirse en individuos seguros de sí mismos que sepan agregar valor a su sociedad” (Ascencio, Garcés, & Fajardo, 2020)*

Por último, la metodología activa se define como:

*“Alternativa pedagógica que se centra en promover la participación activa de los educandos en el quehacer educativo. Es el proceso didáctico y dinámico que se realiza con la aplicación de técnicas participativas, con uso de abundante material didáctico, juegos educativos y trabajos grupales. El proceso didáctico que la metodología activa implementa es dinámico y participativo, convirtiendo a los estudiantes en verdaderos protagonistas de su propia educación, donde la función fundamental del docente es de guía, orientador y facilitador del aprendizaje” (GARCÍA, 2014).*

Esta última metodología responde a diferentes enfoques pedagógicos como lo son el aprendizaje activo, el enfoque constructivista, el aprendizaje colaborativo, estructura didáctica secuenciada, entre otras. Es importante mencionar estos enfoques debido a que la metodología que se planea utilizar para llevar a cabo la propuesta de guía didáctica es la metodología activa, utilizando algunos de estos enfoques pedagógicos para motivar,

incentivar a los estudiantes de educación media por aprender y generar intriga por el principio de superposición de estado utilizando el funcionamiento de la computación cuántica.

Es por ello por lo que los pasos para construir esta guía didáctica se basan en los mencionados en el documento titulado “La guía didáctica” (García Aretio, 2014), desde allí se extrapola lo siguiente que debe tener esta guía: objetivo de aprendizaje, contenido explicativo, preguntas de reflexión, recursos complementarios, foros de discusión, cuestionarios breves y retroalimentación del proceso. Estos pasos responden de forma directa a la definición que se dio previamente acerca de la metodología activa puesto que presenta espacios de reflexión de los conocimientos compartidos, momentos para la participación de los estudiantes y planteamiento de dudas, material de apoyo extra para la construcción del aprendizaje significativo y claramente un rol como protagonista de su aprendizaje entendiendo el proceso que se lleva a cabo gracias a la orientación docente, facilitando el aprendizaje y entendiendo desde dónde se parte y hasta dónde se llega.

Con estos pasos abordados en el párrafo anterior, en el Anexo se puede apreciar la propuesta de guía didáctica. Allí se encuentra en primer lugar dentro de la guía un objetivo claro tanto para el docente que desee llevarla a cabo en sus clases, como para los estudiantes que la aborden, esto con el fin de dar a conocer la intención de la guía con respecto al aprendizaje del principio de superposición a través del funcionamiento de la computación cuántica. Seguido de esto en los contenidos explicativos es donde se abordará el marco teórico necesario para introducir a los estudiantes de educación media al principio de superposición de estado, Teniendo en cuenta esta descripción del principio y el funcionamiento de las computadoras cuánticas, se plantearán unas preguntas para buscar un estado de reflexión sobre lo que el estudiante ha leído y de esta manera asimilar los saberes que se le están compartiendo.

En cuarto lugar, se proponen una serie de videos que lograrían complementar la guía para generar en el estudiante un panorama más amplio del que se ha logrado hasta dicho punto (este lugar se presenta de forma opcional tanto para el docente como para el estudiante). Seguido a esto lo ideal es que el docente abra un espacio presencial o sincrónico para que los estudiantes planteen sus reflexiones y dudas surgidas frente a la información suministrada en la guía. Para finalizar la guía se plantea un cuestionario el cual busca recopilar lo entendido

por el alumno y la manera que ve el principio de superposición a través del funcionamiento de la computación cuántica, tomando en cuenta que el paso siguiente será cuando el docente realice la respectiva retroalimentación del proceso llevado a cabo.



## CONSIDERACIONES FINALES

Como autor de este documento, al finalizar la recopilación de todo el marco teórico y analizar la información presentada, deseo brindar al lector y/o docente que esté realizando esta lectura unas consideraciones importantes. La guía presentada en este documento tiene una flexibilidad en su composición, esto le permite adaptarse a diferentes métodos de enseñanza como el aula invertida, dando espacio a que el cuestionario se separe para lograr un desarrollo más autónomo en los estudiantes. Además, la guía fomenta el aprendizaje por cooperación entre los estudiantes gracias a sus espacios de discusión guiados por el docente y las actividades que se pueden realizar en grupos. No obstante, es importante tener en cuenta que la guía no está encaminada a la comprensión completa del principio de superposición de estado en mecánica cuántica a nivel universitario o del funcionamiento completo de las computadoras cuánticas, para lograr estos niveles de comprensión se requiere de un estudio más amplio de la población y un desarrollo extenso de actividades en un curso destinado para este fin, ampliando la metodología por ejemplo hacia una secuencia de enseñanza aprendizaje, lo cual no se abordó en esta investigación. El propósito principal de este documento, como el título lo menciona, es proporcionar una introducción a dicho principio de la mecánica cuántica usando un proceso específico como lo es la computación cuántica y la guía se encuentra enfocada a estudiantes de educación media.

## CONCLUSIONES

Para finalizar este documento lo que se puede recoger y evidenciar como conclusiones es que:

- Al momento de hacer el estudio sobre el formalismo del concepto de superposición, se evidencia que la notación entre la descripción clásica y cuántica no varía en gran magnitud, esto debido a que ambas corrientes describen su naturaleza como la composición de un estado final. Sin embargo, en los detalles de dicha composición es donde cambia de una composición determinista y secuencial a una probabilística y simultánea, esta diferencia se puede hacer evidente a la hora de presentar los bits y Qubits y las respectivas compuertas clásica y cuántica, lo cual da una alternativa para el abordaje desde cada teoría y las diferencias conceptuales de la superposición en física moderna versus la física clásica.
- Las computadoras presentan funciones mayormente útiles para el procesamiento de información, no obstante, su funcionamiento es rico en conocimientos teóricos de la física que se pueden llevar a un aula de educación media sin perder el énfasis de la fenomenología y mucho menos las matemáticas.
- A su vez, que plantear material didáctico flexible de este estilo responde de forma asertiva a diferentes métodos de enseñanza, desde lo tradicional hasta los más modernos como el aula invertida, esto con el fin de ajustarse a la planificación docente que se tenga en un curso de física sin necesidad de romper con el estilo que lleve el maestro encargado del grupo estudiantil y buscando en primer lugar el aprendizaje de nuevos conocimientos en las personas jóvenes que se encuentran en la educación media.
- Por último, se puede dar respuesta a la pregunta problema mostrando como evidencia que es posible proponer un documento en el cual se genere la introducción al principio de superposición de estado utilizando los principios de la computación cuántica, sin embargo, es necesario llevar esta propuesta al aula para evaluar que tan viable es y cuan efectiva resulta frente a la población de educación media.

## REFERENCIAS

- Arroyo, J. C. (23 de 04 de 2020). *INGENIOXYZ*. Recuperado el 13 de 02 de 2023, de INGENIOXYZ: <https://ingenioxyz.com/articulos/20200423-que-es-el-principio-de-superposicion-y-cuando-se-puede-aplicar-resistencia-de-materiales>
- Ascencio, L., Garcés, N., & Fajardo, Z. (2020). La aplicación del método Montessori en la educación infantil ecuatoriana. *SATHIRI*, 15, 122-131. doi:15. 122-131. 10.32645/13906925.935
- Barriga Carrasco, M. D. (7 de DICIEMBRE de 2021). *El experimento más bello de la física cuántica*. Recuperado el 29 de 08 de 2023, de BBC NEWS MUNDO: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-59563136#:~:text=El%20experimento%20de%20la%20doble%20rendija%20es%20un%20experimento%20realizado,luz%20estaba%20formada%20por%20part%C3%ADculas>.
- Billig, Y. (2018). *QUANTUM COMPUTING for High School Students*. Ottawa, Ontario, Canada: Qubit Publishing. Obtenido de <http://qubitpublishing.com>
- Brunete, A., San Segundo, P., & Herrero, R. (2020). *Introducción a la Automatización Industrial*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado el 23 de 09 de 2023, de [https://bookdown.org/alberto\\_brunete/intro\\_automatica/](https://bookdown.org/alberto_brunete/intro_automatica/)
- Coello, C. A. (2004). *Breve historia de la computación y sus pioneros*. Fondo de Cultura Económica de España. Recuperado el 25 de 04 de 2023
- Dirac, P. A. (1958). *The Principles of Quantum Mechanics* (4 ed.). (A. Montes, Trad.) Inglaterra: Oxford.
- Feynman, R., Leighton, B. R., Sands, M., & Heras, C. A. (1971). *The Feynman Lectures on Physics Quantum Mechanics* (Vol. III). (J. M. Carlos Alberto Heras, Trad.) Bogotá: FONDO EDUCATIVO INTERAMERICANO, S. A. Recuperado el 30 de 10 de 2023
- Figuerola, J., Rentería, W., & Bustillo, C. (2008). Arquitecturas Computacionales Cuánticas. *Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación*, 127, 15. Recuperado el 08 de 10 de 2023, de <https://www.repositoriodigital.ipn.mx/bitstream/123456789/8510/1/ARQUITECTURAS%20COMPUTACIONALES%20CUANTICAS.pdf>
- García Aretio, L. (2014). La Guía Didáctica. *Contextos universitarios mediados*(14,5), 14.
- García, J. (31 de 01 de 2019). *Principio de Incertidumbre de Heisenberg*. Obtenido de Hiberus: <https://www.hiberus.com/crecemos-contigo/principio-de-incertidumbre-de-heisenberg/>
- GARCIA, J. E. (2 de 04 de 2013). *LA HORA CERO*. Recuperado el 27 de 04 de 2022, de LA HORA CERO: <http://lahoracero.org/que-es-el-espin-de-una-particula/>
- GARCÍA, M. A. (2014). METODOLOGÍA ACTIVA COMO HERRAMIENTA PARA EL APRENDIZAJE DE LAS OPERACIONES BÁSICAS EN MATEMÁTICA MAYA. *UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR*.

- Gartner, C. J. (28 de 06 de 2013). La noción del Estado Cuántico. *Revista de Ciencias*, 15. Recuperado el 9 de 09 de 2023, de <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/entities/publication/1698dc7d-a292-4c06-96da-e2b6ad76c02e>
- González, E., Muñoz Burbano, Z., & Solbes, J. (2020). La enseñanza de la física cuántica: *Góndola, enseñanza y aprendizaje de las ciencias*.
- Gordejuela, L. M. (10 de 03 de 2014). *Los Mundos de Brana*. Recuperado el 2023 de 09 de 1, de <https://losmundosdebrana.com/2014/03/10/radiacion-de-cuerpo-negro-y-catastrofe-ultravioleta/>
- Gutiérrez Fallas, D. (2017). *Resumen sobre la Ley de Coulomb*. Obtenido de <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/13354/Ley%20de%20Coulomb.pdf?sequence=1>
- ingenierizando. (27 de 09 de 2023). Obtenido de ingenierizando: <https://www.ingenierizando.com/cinematica/interferencia-de-ondas-fisica/>
- Ingenierizando. (27 de 09 de 2023). Obtenido de Ingenierizando: <https://www.ingenierizando.com/cinematica/interferencia-de-ondas-fisica/>
- Jorge, C. H. (1997). Metodologías de enseñanza y aprendizaje en altas capacidades. 20. Obtenido de <https://gtisd.webs.ull.es/metodologias.pdf>
- Kaye, P., Laflamme, R., & Mosca, M. (2006). *An Introduction to Quantum Computing*. Oxford, England: Oxford University Press UK. Recuperado el 2023 de 09 de 18
- López Solano, A. B. (10 de 04 de 2015). Física cuántica y emociones. Barcelona, Barcelona, España: Universitat de Barcelona.
- López, M. A. (31 de 05 de 2019). *conocimiento abierto*. Recuperado el 30 de 04 de 2022, de blogs.iadb: <https://blogs.iadb.org/conocimiento-abierto/es/como-funciona-la-computacion-cuantica/>
- Maluenda, R. (21 de 01 de 2021). *profile*. Recuperado el 25 de 09 de 2023, de profile: <https://profile.es/blog/que-es-un-algoritmo-informatico/>
- Martinez, M. (28 de 07 de 2022). *nobbot*. Recuperado el 30 de 04 de 2022, de <https://www.nobbot.com/superposicion-cuantica/>
- Ministerio de Educacion Nacional. (2004). Estándares Básicos de Competencias en ciencias naturales y ciencias sociales. Colombia. Obtenido de [https://www.mineduacion.gov.co/1780/articulos-81033\\_archivo\\_pdf.pdf](https://www.mineduacion.gov.co/1780/articulos-81033_archivo_pdf.pdf)
- Montoya, L. (20 de 11 de 2020). *Historia-Biografía*. Obtenido de <https://historia-biografia.com/cristiano-ronaldo/>
- Moret Bonillo, V. (2013). *Principios Fundamentales de Computación Cuántica*. Coruña: Departamento de Computación. Facultad de Informática. Recuperado el 27 de 04 de 2022
- Muller, D. A. (2014). How To Make a Quantum Bit [Grabado por D. A. Muller]. [youtube]. Recuperado el 30 de 04 de 2022, de <https://www.youtube.com/watch?v=zNzzGgr2mhk>

- Newton, s. I. (1725). *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. (casc, Ed., & E. Rada, Trad.) Londres: Lectulandia. Recuperado el 17 de 09 de 2023
- olympics. (26 de 04 de 2022). Obtenido de <https://olympics.com/es/atletas/mariana-pajon>
- olympics. (26 de 04 de 2022). Obtenido de <https://olympics.com/es/atletas/caterine-ibarguen>
- Pascual Estapé, J. A. (28 de Febrero de 2021). *Computer hoy*. Recuperado el 28 de 06 de 2023, de Computer hoy: <https://computerhoy.com/noticias/tecnologia/eniac-primer-ordenador-cumple-75-anos-820235>
- Raymundo Barrales Guadarrama, V. R. (12 de MARZO de 2014). *Circuitos Eléctricos: Teoría y Práctica* (Vol. 1). Mexico, Mexico: Grupo Editorial Patria . Recuperado el 17 de 09 de 2023
- Real Academia Española. (2022). *Diccionario de la lengua española* (Vol. 23). REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. Recuperado el 19 de 09 de 2023, de <https://dle.rae.es>
- Reyes-Ruiz, L. &. (2020). La investigación documental para la comprensión ontológica del objeto de estudio. *Universidad Simón Bolívar*, 4.
- Ron, J. M. (2001). Historia de la física cuántica. En J. M. Ron, *Historia de la física cuántica* (pág. 548). Barcelona , España: Crítica.
- Rosenblum, B. &. (2016). *El Enigma Cuántico: El secreto mejor guardado de la física contemporánea* . Barcelona: Tusquets Editores S.A.
- Santamaría, J. C. (2020). SOBRE EL PROBLEMA DEL CALOR ESPECÍFICO EN EL SIGLO XIX: UNA MIRADA DESDE LA ENERGÍA CONTINUA Y DISCRETA. En J. C. Santamaría, *SOBRE EL PROBLEMA DEL CALOR ESPECÍFICO EN EL SIGLO XIX: UNA MIRADA DESDE LA ENERGÍA CONTINUA Y DISCRETA* (pág. 25). Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional. Recuperado el 9 de 11 de 2022
- Spinel, M. C. (2009). *Introducción al formalismo de la mecánica cuántica no relativista*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. doi:978-958-719-257-5
- THOMPSON, A. (4 de 11 de 2016). Obtenido de Popular Mechanics : <https://www.popularmechanics.com/science/a23710/double-slit-theory-everything/>
- Universidad Nacional Autónoma de México. (2018). *Grupo de Investigación en Sistemas Inteligentes*. (F. d. Cuautitlán, Editor) Recuperado el 16 de 10 de 2023, de Compuertas lógicas: <https://virtual.cuautitlan.unam.mx/intar/sistdig/compuertas-logicas/>
- Urdaneta, I. (14 de 07 de 2022). *RESONACE SCIENCE FOUNDATION*. Obtenido de RESONACE SCIENCE FOUNDATION: <https://es.resonancescience.org/blog/record-de-distancia-en-entrelazamiento-cuantico-mas-de-33-km>
- Valeriano, E. G. (2003). La escuela un escenario de formación y socialización para la construcción de identidad moral. *Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales, Niñez y Juventud*,. Recuperado el 3 de abril de 2022
- Violi, I. L. (2019). El átomo es lo que es. En I. L. Violi, *El átomo es lo que es* (Vol. 1, págs. 20-29). El Gato y La Caja. Obtenido de

[https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/173860/CONICET\\_Digital\\_Nro.33296c9f-66ef-4776-9222-42875fe6faac\\_B.pdf?sequence=6&isAllowed=y](https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/173860/CONICET_Digital_Nro.33296c9f-66ef-4776-9222-42875fe6faac_B.pdf?sequence=6&isAllowed=y)

## ANEXO: GUÍA DIDÁCTICA PARA LA ENSEÑANZA DEL PRINCIPIO DE SUPERPOSICIÓN.

### OBJETIVO

Identificar el formalismo del principio de superposición mediante una explicación del funcionamiento de la computación cuántica, facilitando así una introducción comprensiva a este concepto.

### MARCO EXPLICATIVO

Para comenzar esta guía didáctica, el docente debe abrir una sesión para que los estudiantes lean y pongan en práctica las actividades propuestas a continuación, con anterioridad debe solicitar a los estudiantes el material requerido para cumplir con las actividades y estar receptivo al buen cumplimiento de estas.

#### 1. PERSPECTIVA CLÁSICA

Para comenzar esta guía es imperativo abordar el surgimiento del principio de superposición desde la perspectiva de la mecánica clásica, cuyo énfasis es el comportamiento de los cuerpos del mundo circundante al ser humano. Este principio fue propuesto por, seguramente el científico más famoso de la historia, el cual es sir Isaac Newton, él lo propone en su obra más grande titulada “*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*”, de donde se enseñan sus tres leyes. Allí él define tanto movimientos de cuerpos como interacciones de fuerzas, por lo tanto, describe este principio como pequeños movimientos de un movimiento final o una sumatoria de fuerzas en una fuerza neta, lo cual se puede escribir de la siguiente manera:  $\vec{F}_T = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$ , (véase el ejemplo en la Figura 5), por lo tanto en una pequeña frase, desde la mecánica clásica, se puede definir el principio de superposición como una descomposición de partes que componen un comportamiento final de los cuerpos, cabe aclarar que esta composición final no requiere de una repartición equivalente entre los factores que la componen.

De acuerdo con lo anterior, se puede ejemplificar de forma puntual lo que es el principio de superposición en mecánica clásica, ya que, se puede evidenciar en los ejercicios tradicionales

que el lector de este documento está acostumbrado a resolver y ver en la materia de física, como por ejemplo, cuando se quiere saber la velocidad final de una persona que está corriendo dentro de un tren en movimiento, o cuando dos ondas sonoras se encuentran e interactúan entre sí generando una onda más grande o más pequeña que ellas en consecuencia de la interferencia que presenten, incluso al analizar algún cuerpo suspendido en el aire por diferentes cuerdas en el cual interactúan dichas fuerzas entre sí.

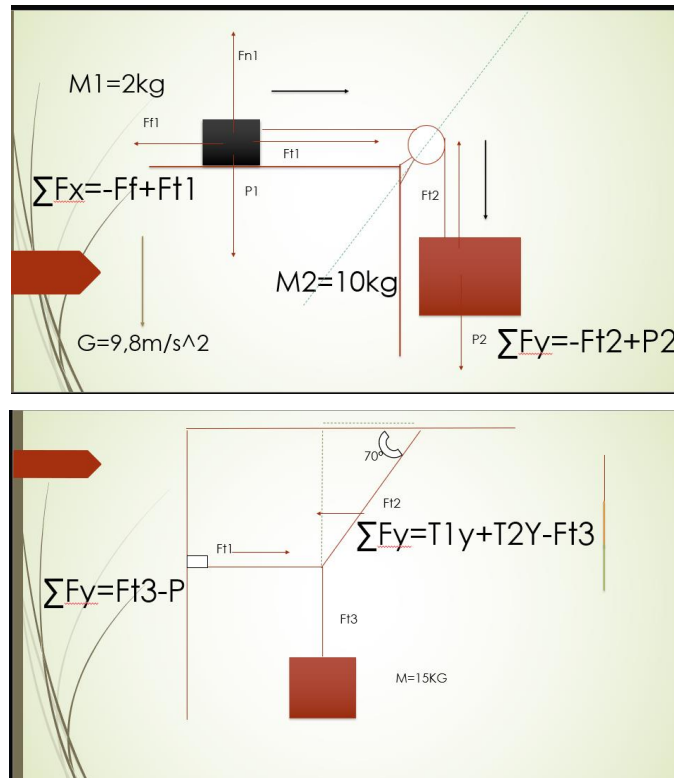


Figura 5 Ejercicios en los cuales se puede evidenciar la superposición de fuerzas evidenciando la fuerza de fricción junto con la de tensión en una cuerda, al igual que la sumatoria de las fuerzas de tensión sobre un mismo cuerpo, autoría propia.

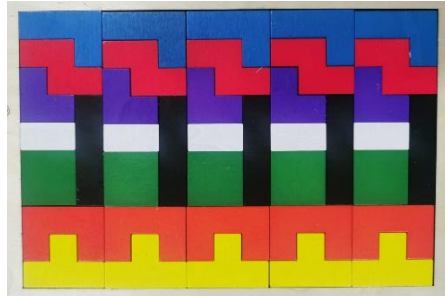
## ACTIVIDAD 1

Para esta actividad, es necesario incorporar una serie de objetos que compartan características similares entre forma y color, esto se debe realizar con el fin de hacer grupos por características para que se puedan construir figuras más grandes.

- Forma: seleccionar los objetos que compartan la misma figura geométrica
- Color: agrupar los objetos que tengan los mismos colores
- Combinación: establecer cuales objetos comparten forma y color



De esta manera, el docente debe orientar la actividad hacia la construcción de diferentes figuras como flechas, casas, entre otras que disponga y crea pertinente que se puedan realizar con los objetos (ejemplo de objetos en la Figura 6 ), se evidencia que los objetos se agrupan para generar conjuntos y figuras resultantes que comparten sus características intrínsecas pero que a su vez se pueden desglosar en sus componentes, esto generando así la visualización del principio de superposición desde la perspectiva de la mecánica clásica.



*Figura 6. Objetos que se pueden utilizar para la actividad uno cuyas características intrínsecas funcionan para la construcción de figuras en dos dimensiones, tomado de un juego de mesa llamado Tetris desconociendo el autor.*

## 2. PERSPECTIVA CUÁNTICA

Ahora bien, entendiendo de donde viene el principio de superposición y evidenciando que desde los inicios de la física se ha tenido la idea que en la naturaleza de los sistemas existe la superposición, es necesario para cumplir el objetivo de esta guía abordar la forma en que se ve el principio de superposición desde la mecánica cuántica.

Es por ello que al momento de definir el principio de superposición en la mecánica cuántica es pertinente mencionar que los sistemas en los cuales se enfoca son sistemas cuánticos, como por ejemplo en las teorías contemporáneas las partículas, en estos sistemas las características medibles no presentan valores certeros, si no valores probabilísticos, lo cual quiere decir, que características intrínsecas de un sistema como lo son la posición o la velocidad, no se les puede dar un valor numérico preciso. Esto no quiere decir que no se puedan medir, lo que pasa en la naturaleza es que estas características se les asocia una nube de probabilidad ante los valores que podrían tener. Es por ello que al tener un conjunto de valores para alguna característica si se mide, se obliga al sistema a definirse en uno solo, lo cual será de forma aleatoria pero regido por la probabilidad que tenga ese valor.

Para ejemplificar la definición anterior se puede usar claramente la unidad mínima de información la cual es el Bit, pero como se desea ejemplificar la parte cuántica es necesario que sea un Qubit. Si se define el valor que puede tener un Bit es sencillo, ya que este solo tiene dos posibilidades siendo 1 y 0 las únicas opciones, sin embargo, estas son las opciones determinadas y precisas que tiene un Bit de manera clásica, ya que, él representa el paso o no de un impulso eléctrico, al momento de convertir un Bit en algo cuántico (denominándolo Qubit), el 1 y el 0 no son las únicas opciones se poseen para darle valor, ya que este al ser una partícula presenta en sus características medibles la superposición, por ello las opciones dependen de que tan probable sea el valor 1 junto con el valor 0, lo cual se puede escribir de la manera presentada en la Figura 7, donde A y B son el valor de dicha probabilidad del 1 y el 0, mientras que X es el estado resultante de dicha superposición.



Figura 7. Comparación de representaciones de los valores posibles que pueden tener un Bit y un Qubit, autoría propia.

Con la ejemplificación realizada anteriormente se puede abordar y entender el motivo por el cual a las computadoras que utilizan Bits se les denomina clásicas, mientras que las que utilizan Qubits se denominan cuánticas, no obstante, se debe aclarar en esta guía que la computación cuántica utiliza el principio de superposición para procesar la información, pero para que sea leída y entendida es necesario forzar al Qubit a definirse en uno de los valores que tiene, todo esto a través de una serie de algoritmos y compuertas lógicas que se han planteado a lo largo de la historia.

## ACTIVIDAD 2

Para esta actividad se busca un entendimiento de lo abordado previamente en el apartado de lo cuántico y el funcionamiento de la computación cuántica, para esto se busca realizar una analogía con las combinaciones de los colores que se conocen en las artes con pintura, por lo tanto, el docente debe pedir a los estudiantes llevar dos pinturas cada una de un color primario.

Esta analogía lo que busca es lograr establecer la composición de uno de los colores secundarios como los estados 1 y 0 de un Qubit, mientras que el color secundario sería el estado resultante, descrito de la siguiente manera  $|V\rangle = |A_z\rangle + |A_m\rangle$ , siendo para este caso, V es el verde,  $A_z$  es el azul,  $A_m$  es amarillo. Continuando con la analogía, los valores de la probabilidad sería las cantidades de los colores primarios y estos afectarían el estado resultante haciendo que tenga una tonalidad distinta.

Ahora, con una organización parecida a la presentada en la Figura 8 con las pinturas que tengan los estudiantes, se debe pedir que dupliquen la ecuación de colores que tengan, como se ve en Figura 9, esto con el fin que puedan agrupar en parejas las posibles combinaciones que tienen de colores primarios, sin importar que se repitan, pero diferenciando entre los colores como si fueran color 1 o color 2.

Se debe realizar una comparación entre las combinaciones de parejas que se obtuvieron con respecto a las que se obtienen si no se duplica la ecuación de colores como se presenta en la Figura 9.

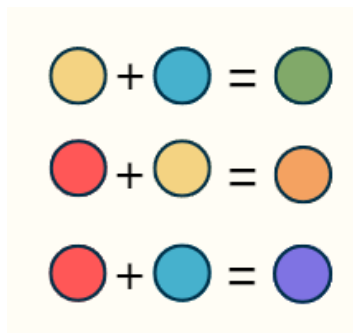


Figura 8. Combinaciones de los colores primarios, autoría propia

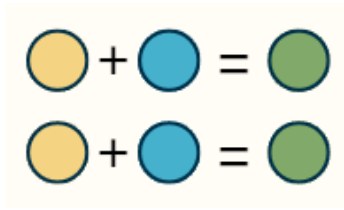


Figura 9. Duplicación de la combinación de cada alumno, autoría propia

Con esta actividad lo que se busca es que desde una experiencia sensible y cercana al estudiante comprenda que al interactuar dos Qubits estos en una compuerta cuántica presentan 4 combinaciones posibles, a diferencia de los Bits que presentan 1 por sus valores definidos.

Es importante que el docente reafirme que es una analogía y que en los colores no se presenta una combinación cuántica de estados como se propone en la computación cuántica.

## PREGUNTAS DE REFLEXIÓN

Las preguntas de esta sección se deben llevar a cabo por el estudiante de manera aparte para que genere un proceso de reflexión acerca de lo abordado en los dos apartados anteriores y las actividades desarrolladas con base en estos.

- a) ¿Qué valor debería tener A para que el estado resultante del Qubit se garantice en el estado 1?
- b) Si la probabilidad de ambos valores es igual, ¿qué valor se obtendrá como resultado?
- c) ¿Es lo mismo tener una superposición de fuerzas y tener una superposición de posición?

El docente debe abrir un espacio de discusión entre los mismos alumnos y posteriormente con él para compartir lo abordado, las dudas e inquietudes que se presenten luego del punto de reflexión y los comentarios acerca de la guía que surjan en los estudiantes.

## MATERIAL AUDIOVISUAL DE APOYO (opcional)

Este material audiovisual está propuesto de forma opcional debido a que presenta un abordaje general de lo que es el principio de superposición en mecánica cuántica, no obstante, brinda una explicación de forma más amplia generando en el estudiante una visión más clara de lo que se aborda en la primera sesión.

Video 1: [Este Experimento te Dejará LOCO | La Doble Rendija \(youtube.com\)](#)

Video 2: [¿Puede algo estar en dos sitios a la vez? - La superposición cuántica \(youtube.com\)](#)

## CUESTIONARIO DE RETROALIMENTACIÓN

Este último apartado de la guía debe realizarse en una sesión por aparte, ya que, en este se evaluará que tanto ha funcionado el abordaje del marco explicativo y las actividades propuestas en la sesión con el docente y la sesión de dialogo frente a las preguntas de reflexión que se plantean en esta guía, por último y realmente necesario, se debe realizar una retroalimentación de los resultados obtenidos con estas preguntas para que el estudiante sea consciente del proceso de aprendizaje que tuvo con esta guía.

1. ¿Cómo se puede interpretar el principio de superposición en la mecánica clásica?
2. ¿En qué tipo de sistemas se enfoca el principio de superposición en la mecánica cuántica?
3. ¿Por qué las características medibles en sistemas cuánticos no presentan valores certeros?
4. ¿Qué significa que las características intrínsecas de un sistema cuántico tienen valores probabilísticos?
5. ¿Cuál es la importancia de la nube de probabilidad en la medición cuántica?
6. ¿Por qué se menciona que el sistema se define de forma aleatoria durante la medición cuántica?
7. ¿Cómo se asocia una nube de probabilidad a las características cuánticas como la posición o la velocidad?
8. ¿Qué sucede cuando se mide una característica cuántica y cuál es la consecuencia para el sistema?
9. ¿Por qué el 1 y el 0 no son las únicas opciones para darle valor a un Qubit cuántico?
10. ¿Qué determina el valor de un Qubit cuántico según la explicación dada?
11. ¿Cómo influye la probabilidad en el proceso de medición en la mecánica cuántica?
12. ¿Cuál es el papel de la probabilidad en la definición de la superposición de un sistema
13. ¿Qué representa A y B en la ecuación de superposición mencionada?