



Instituto tecnológico de estudios superiores Monterrey

Computación cuántica para todos

Grupo 101

Profesor: Germán Domínguez Solís

Evidencia. Quantum Computing

Equipo Dr. Poncho Cuántico:

Daniela Cruz Álvarez A00572205

Carlos Gabriel Espinosa Contreras A01198290

Borja Martinez Ramirez A01234311

Arif Morán Velázquez- A01234442

Fernando Aurelio Burgos Sánchez A01236284

15 de septiembre de 2023

1. Introducción

En la intersección de la física y la computación, podemos encontrar a la computación cuántica. A grandes rasgos esta rama de la computación se centra en la aplicación de algunos de los conceptos principales de la mecánica cuántica a la programación. La diferencia fundamental entre la computación clásica y la cuántica, es la sustitución del bit, la unidad básica de la información computacional clásica en favor del qubit, su paralelo cuántico. A diferencia del bit, el qubit no es binario, esta es su característica distintiva, pues puede tomar valores intermedios entre el 0 y el 1, dando lugar a la superposición de estados, el entrelazamiento de qubits, y el mundo probabilístico en general.

Es esta apertura a posibilidades no determinísticas la que permite que los procesos de una computadora cuántica sean paralelizables, en lugar de estrictamente secuenciales, como lo son los procesos computacionales clásicos, y esta nueva libertad permite que muchos procesos aceleran enormemente, aunque también cabe destacar que no todos los procesos son más eficientes cuando llevados a cabo por una computadora cuántica, y algunos incluso pueden llegar a ser más lentos que en su versión clásica. (Amazon, s.f.)

A lo largo de este trabajo buscaremos aplicar la computación cuántica y sus recursos para resolver un problema de optimización, similar al problema del viajero. En el problema del viajero clásico, el objetivo es encontrar la ruta más corta para que un viajero visite una lista de ciudades, sin repetir ninguna. Pero este no es exactamente el problema que se presentó para este trabajo, este es más similar a los problemas que enfrentan día a día empresas de transporte alrededor del mundo, pues el objetivo es encontrar el conjunto de rutas que minimice la distancia recorrida por una flota de camiones, al momento de tener que entregar paquetes alrededor de una ciudad, región o incluso una nación completa. (Amazon, s.f.).

2. Tecnologías de Vanguardia

Según Zapata (2021) la capacidad computacional se ha duplicado cada dos años, desde que salió el primer ordenador. Sin embargo, a pesar de las continuas

mejoras de estos tipos de ordenadores, tienen un gran limitante que es que tienen que resolver los problemas en secuencia, lo que tiene como consecuencia que conforme el tamaño del problema aumenta, lo hace igual el tiempo que toma encontrar la solución. Por lo que, se han ideado estrategias en las que ponen a trabajar computadoras en paralelo que trabajan en sincronía para disminuir las limitantes que tienen pero esto no ha solucionado el problema de raíz. Ésto debido a que las computadoras clásicas sólo tiene dos estados para representar la información (0 y 1) lo que genera un gran retraso, por ejemplo, en el campo de simulaciones científicas o encriptación aunque se tengan equipos super potentes.

Es ahí donde las computadoras cuánticas entran, ya que la principal diferencia que tienen es que generan la información a partir de 1s y 0s de forma paralela; por lo que, las tareas complejas se ejecutan en el mismo equipo y segmento de tiempo, lo que acelera la significativamente el tiempo de procesamiento. (Zapata, 2021). Estas, según Zuñiga (2017) tienen base en la física cuántica, a diferencia de las computadoras clásicas, cuyos circuitos siguen las leyes de la física clásica, según las cuales solo pueden estar en un estado a la vez.

A diferencia de las computadoras clásicas que usan bits, las computadoras clásicas usan qubits (bits cuánticos), los cuales pueden tomar el valor 0 ó 1, o cualquier combinación de esos valores de manera simultánea. Asimismo, los qubits, para retener información y ser útiles, deben cumplir con dos propiedades, las cuales son superposición y entrelazado cuántico. (Zuñiga, 2017).

Si se quiere agilizar el proceso en el se necesiten correr varias secuencias, entonces la computación cuántica es necesaria o se puede utilizar, por ejemplo, según Silva (s.f.) los problemas de optimización tienden a consumir muchos recursos computacionales en poco tiempo, por lo que, los fenómenos de superposición, paralelismo cuántico y tunelamiento cuántico, hacen a las computadoras cuánticos excelentes candidatos para resolver estos problemas. Asimismo, para problemas químicos de reacciones y finanzas, son excelentes simuladores para interpretar los datos.

En el área de Ingeniería, ya se está usando la computación cuántica en la Física, con la finalidad de simular el comportamiento de las partículas elementales y

otros componentes fundamentales del universo. Gracias al gran poder de esta tecnología los científicos pueden simular eventos que ocurren a las escalas mas pequeñas, así pueden estudiar la manera en la que interactúan entre ellas, incluso se puede usar para simular fenómenos astronómicos como son los agujeros negros, la formación de estrellas y el *Big Bang*. (Frąckiewicz, 2023).

La computación cuántica tiene varias implicaciones éticas, una de las mayores preocupaciones es la ciberseguridad, ya que se ha demostrado que el algoritmo de Shor puede romper los sistemas de encriptación actuales, si no se desarrollan protocolos de encriptación a prueba de la computación cuántica es cuestión de tiempo en que gente mal intencionada tenga acceso a esta tecnología y puedan hackear nuestros sistemas de seguridad actuales. (Buchholz. & Ammanath, 2022). La capacidad aumentada de procesamiento de datos de la computación cuántica, potencialmente permitirá que se creen algoritmos de Inteligencia Artificial que puedan tener una mayor cantidad de datos de entrada y esto podría causar que las empresas tengan un mayor deseo de recolectar datos personales de la gente, actualmente esto ya es una preocupación. (Rakhade, 2020).

La computación cuántica es el siguiente salto para el humano, es una tecnología que nos traerá beneficios en múltiples ciencias como son la Biología, la Química, la Física, la Medicina, las Finanzas, entre otras. La manera en la que podemos maximizar su potencial es en definitiva la preparación, necesitamos estar listos para este salto, se requiere tener programadores de algoritmos para este sistema de las diferentes ciencias, investigadores de materiales como son los superconductores, apoyo económico de las organizaciones e instituciones. (IBM, s.f.).

4. Explicación del funcionamiento de los sistemas computacionales (35 puntos)

Explica el funcionamiento de las computadoras cuánticas:

- Qbits

Unidad básica operacional de una computadora cuántica. La computadora utiliza a los qubits para realizar algoritmos multidimensionales. (IBM, n.d.)

- Superposición (interferencia)

Fenómeno físico que permite colocar información en un qubit que contiene en un estado de superposición, es decir una combinación de todas las configuraciones posibles del qubit. Los grupos de qubits en superposición pueden crear espacios computacionales complejos y multidimensionales. Los problemas complejos pueden representarse de nuevas formas en estos espacios.

En un entorno de qubits entrelazados colocados en estado de superposición, hay funciones de probabilidades. Estas son las probabilidades de los resultados de una medición del sistema. Estas funciones de probabilidad, existen dos tipos de interferencia, es decir, pueden acumularse unas a otras cuando muchas de ellas alcanzan su punto máximo en un resultado particular, o anularse entre sí cuando interactúan picos y valles. Ambas son formas de interferencia. (IBM, n.d.).

- Entrelazado

Efecto que correlaciona el comportamiento de dos cosas separadas incluso a grandes distancias. Cuando dos cúbits se entrelazan, los cambios en uno de ellos impactan directamente en el otro. (IBM, n.d.).

- Circuitos cuánticos (operaciones)

Un circuito cuántico es una rutina computacional que consiste en operaciones cuánticas coherentes sobre datos cuánticos, como los qubits. Es una secuencia ordenada de puertas, mediciones y restablecimientos cuánticos, que puede estar condicionada a la computación clásica en tiempo real. (IBM, n.d.).

- ¿Qué enfoque de aprendizaje automático cuántico utilizaste: CC, CQ, QC, QQ?

El algoritmo realizado sigue un esquema, QC, cuántico clásico, ya que se utilizan algoritmos cuánticos para resolver el problema, pero el cómputo de la solución en base a los algoritmos cuánticos se lleva a cabo utilizando una

computadora clásica, esto provoca que los problemas puedan ser resueltos pero con la limitante de no tener la capacidad de procesamiento necesaria, la cual se puede conseguir utilizando el cómputo cuántico también para el procesamiento de la solución del problema. (Puga, 2020).

- ¿Qué tipos de aprendizaje automático empleaste: supervisado, no supervisado, semi-supervisado?

Se utilizó un aprendizaje automático de tipo supervisado, ya que se le dio al sistema la información ya organizada y etiquetada para que solamente la utilizara al momento de requerirse, se le dio información como diferentes ciudades y la distancia entre ellas, de tal forma que pudiera utilizar esta información para la creación del grafo que se utiliza para la resolución del problema. (Hewlett Packard Enterprise, n.d.)

- ¿Qué modelos predictivos generaste: regresión, clasificación, agrupación, recomendación, detección de anomalías?

Se realizaron varias pruebas utilizando el algoritmo que desarrollamos, y con los resultados obtenidos de dichas pruebas realizamos una regresión lineal para ver cómo es que se comporta al variar la cantidad de ciudades y el número de vehículos utilizados en las pruebas, en base a esa regresión pudimos ver como llegado cierto número de vehículos, empieza a ser cada vez menos eficiente agregar vehículos a los recorridos, y que este número de vehículos se ve directamente relacionado con el número de las ciudades a visitar. (Amazon Web Services, Inc., n.d.)

- ¿Tuviste problemas para generar el modelo con los datos?

Si, uno de los principales problemas al realizar el algoritmo fue el saber cómo plantear el problema y cómo buscar la solución más óptima para este problema, ya que el problema requería que exploremos muchas variantes del problema y compararlas todas para poder encontrar el camino más óptimo, pero este camino evidentemente no era la mejor forma de resolver el problema. Para generar el modelo de los datos tuvimos que

investigar esos datos manualmente en internet, lo que nos llevó a un proceso largo de investigación para poder adquirir la información más precisa y veraz.

- ¿Cómo los resolviste?

Para resolver este problema aprovechamos la librería de qiskit llamada `qiskit_optimization.applications`, ya que dicha librería tiene la capacidad de crear y resolver problemas del tipo Vehicle Routing, que es el tipo de problema al que nos enfrentamos, así que nuestra solución fue que crear instancias de este problema variando el número de ciudades y el número de vehículos para recorrer las ciudades, y después convertir estos problemas a ecuaciones cuadráticas utilizando un método llamado quadratic program, y finalmente esta ecuación cuadrática era resuelta al mínimo utilizando un VQE (variational quantum eigensolver), de esta forma podíamos llegar al resultado del problema planteado anteriormente, con esto solo quedaría realizar varias pruebas cambiando los parámetros iniciales hasta llegar a la solución que más nos convenga, el detalle en nuestra solución fue que para resolver dichas ecuaciones cuadráticas utilizamos el procesamiento de una computadora clásica, y por tanto los recursos no eran suficientes para versiones más grandes del problema, si pudiéramos resolver dichas ecuaciones traduciendo a lenguaje de máquina cuántica se podría resolver cualquier versión, grande o chica, del problema. (IBM, n.d.-b)

- ¿Qué resultados arrojó el análisis? (incluye captura de pantalla de cada resultado así como tu interpretación del mismo).

Nosotros hicimos pruebas con un conjunto de 4 ciudades y 2 vehículos para recorrer las ciudades, según los costos que asignamos a cada ruta estas serían las mejores rutas para los 2 vehículos para recorrer las 4 ciudades, en base al primer mapa (fig. 1) de las ciudades y los costos de los caminos se puede observar que efectivamente son las mejores rutas considerando que ambos vehículos tienen que partir de la misma ciudad de origen (fig. 2). En total, sumando los costos sombreados en colores, se da un costo total de 248, ya que el amarillo sería de ida y vuelta, y el azul-morado da un recorrido circular. Si nosotros intentamos otra combinación de

recorridos nos da un valor del costo mayor al que mencionamos, así que podemos confirmar que se resolvió el problema satisfactoriamente para estas 4 ciudades.

Figura 1. Grafo de las distancias entre las ciudades

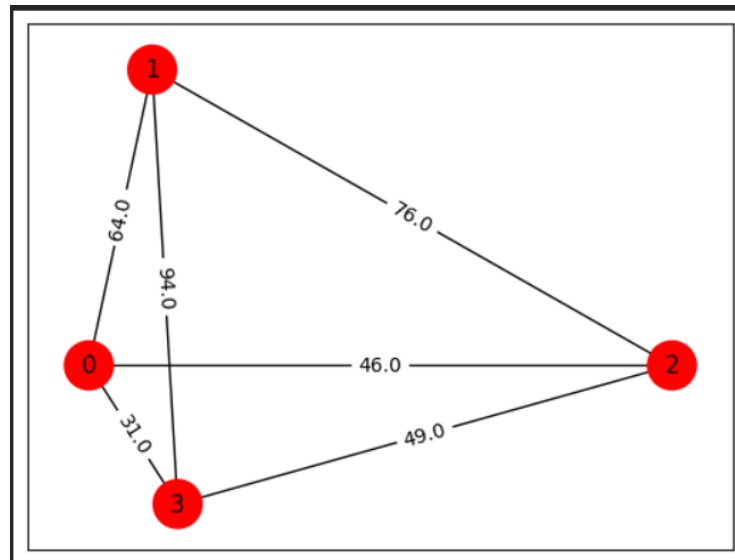
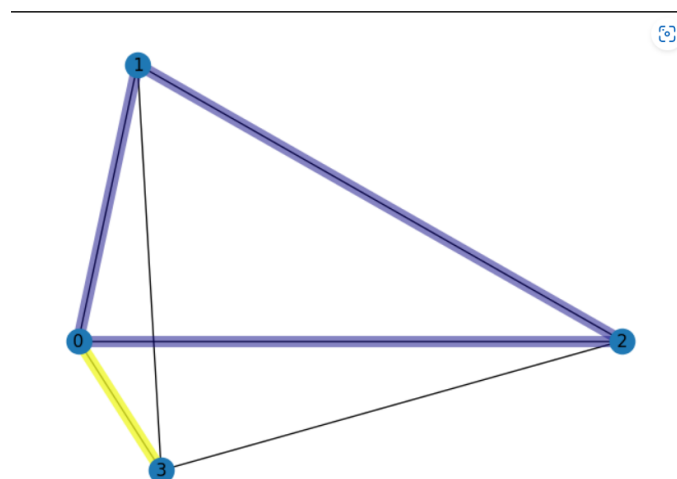


Figura 2. Optimización de las rutas para cubrir todas las ciudades.



```
Iteration: 650 , value: (-32443.489489109616+0j)
fval=248.0, x_0_1=0.0, x_0_2=1.0, x_0_3=1.0, x_1_0=1.0, x_1_2=0.0, x_1_3=0.0, x_2_0=0.0, x_2_1=1.0, x_2_3=0.0, x_3_0=1.0, x_3_1=0.0, x_3_2=0.0, st
atus=SUCCESS
```

- ¿Los resultados del modelo tienen sentido o hay incoherencias que necesitan una mayor exploración?

Los resultados que obtuvimos de nuestro modelo son coherentes y si tienen sentido, pero aún así requieren de una mayor exploración, ya que nuestro modelo solamente funciona para versiones pequeñas del problema, se tendría que revisar cómo poder llevar a cabo el procesamiento del resultado en una computadora cuántica, para que podamos realizar pruebas con versiones del problema más grandes y de forma más rápida.

5. Conclusión (15 puntos) (Individual)

Realiza tu reflexión final sobre tu evidencia, para ello responde detalladamente los 3 puntos siguientes:

Arif:

- ¿Qué hiciste bien y qué hubieras hecho mejor para obtener un mayor aprendizaje de la unidad de formación?

A lo largo de esta semana considero haber hecho bien, el investigar un poco fuera de clases, por otro lado, considero que algo mal fue que no , hacía preguntas de dudas que tenía. Asimismo considero que pude haberme preparado de mejor manera tanto para la clase como para el hackaton, ya que en muchas veces me veía desconocido del contenido y no me resultaba fácil de entender y aplicar.

- ¿Qué crees que puedas mejorar para tus futuros proyectos de Quantum Computing?

Luego de haber tenido esta experiencia, considero que puedo mejorar en mi práctica fuera de clase. Otro principal limitante a lo largo de la semana tec, fue que debía enfocarme en realizar las actividades y el entregable, y por lo mismo no podios adentrarme en entender los todos los conceptos. Esto considero trunco y dificulta mi aprendizaje; sin embargo, en un futuro planeo trabajar y leer los recursos de qiskit con calma.

- ¿Qué fue lo que más te gustó de esta Semana Tec?

Entre las cosas que más disfruté en la semana tec fue el haber tenido la oportunidad de aprender y aplicar conceptos de la mecánica cuántica en la computación , sino el haber tenido la oportunidad de hacerlo con una de las empresas pioneras IBM. Me gustó y disfruté el acompañamiento del Dr. Wagner. Asimismo, fue para mí muy satisfactorio el no solo ver los conceptos y aplicarlos en simuladores, sino el haber tenido la oportunidad de ejecutar los programas en hardware real.

Fer:

- ¿Qué hiciste bien y qué hubieras hecho mejor para obtener un mayor aprendizaje de la unidad de formación?

Creo que lo que hice bien durante la semana tec fue prestar atención durante el taller previo al hackathon para intentar comprender cómo funciona la computación cuántica, así como las compuertas que se utilizan internamente en las computadoras cuánticas, lo que pude haber hecho mejor fue investigar un poco sobre el tema previamente para no llegar tan improvisado a la clase, ya que, aunque la clase se llama computación cuántica para todos, realmente si convendría más tener algo de conocimiento previo, porque durante la semana tec las explicaciones son muy rápidas y es complicado entender todos los conceptos al mismo paso que lleva el instructor.

- ¿Qué crees que puedas mejorar para tus futuros proyectos de Quantum Computing?

Seguir investigando por mi cuenta sobre cómo funciona la computación cuántica y cómo utilizar qiskit para desarrollar proyectos, aunque el tener que esperar días para poder utilizar el hardware cuántico también fue una limitante para esta semana tec por los límites de tiempo, pero ya por fuera de la semana tec me será posible esperar pacientemente a que mis proyectos puedan ser procesados por computadoras cuánticas reales, o de igual manera, podría utilizar frecuentemente los simuladores para no tener que hacer las filas de espera.

- ¿Qué fue lo que más te gustó de esta Semana Tec?

Me gustó que si exploramos más a detalle el funcionamiento de las compuertas lógicas utilizadas por las computadoras cuánticas, las propiedades de los qubits y como estos se utilizan para resolver problemas, me gusto el nivel de detalle al que entramos, aunque realmente no entendía muy bien las bases matemáticas de los conceptos, pero se me hace muy interesante esta nueva área de la computación cuántica, lo que no me gusto es que realmente comprendí solamente los conceptos y de forma un poco superficial, hubiera preferido que para ser evaluado en estas cosas, el curso hubiera sido de mayor tiempo.

Borja:

- ¿Qué hiciste bien y qué hubieras hecho mejor para obtener un mayor aprendizaje de la unidad de formación?

A mi parecer, el principal éxito de esta semana tec no fue individual, si no, colaborativo, pues creo que como equipo generamos una gran dinámica de trabajo que nos permitió a todos participar activamente en diferentes ángulos que potencialmente nos ayudarían a resolver el problema en cuestión. Por otra parte, también estoy muy orgulloso de una aportación que si bien, por cuestiones de tiempo no logramos implementar en la versión final del proyecto, con algo más de tiempo quizá podría haber permitido una diferencia considerable. Este aporte era un algoritmo que consistía en: primero construir un grafo de n ciudades, luego dividirlo en clusters del tamaño máximo que nuestros recursos computacionales nos permitieran, después asignar un camión a cada uno de estos clusters, y finalmente evaluar el problema para cada uno de estos cluster, obteniendo resultados que si bien, son locales y por lo tanto difícilmente sería su verizon más eficiente, nos permiten evaluar en muchas más ciudades de las que podríamos de cualquier otra manera.

- ¿Qué crees que puedas mejorar para tus futuros proyectos de Quantum Computing?

Definitivamente tengo mucho espacio para crecer en el mundo de la computación cuántica, pues este curso apenas fue introductorio, e incluso hay muchos conceptos del curso que aún no entiendo ni controlo a la perfección. Además, apenas soy capaz de combinar códigos clásicos con códigos cuánticos, y creo que esa habilidad podría llegar a permitirme mejorar enormemente como programador

- ¿Qué fue lo que más te gustó de esta Semana Tec?

La oportunidad de trabajar con computadoras cuánticas de primer nivel, y la introducción a muchos recursos abiertos con los que podría trabajar en el futuro y el planteamiento de un problema interesante y retador.

Carlos:

- ¿Qué hiciste bien y qué hubieras hecho mejor para obtener un mayor aprendizaje de la unidad de formación?

Antes de la semana tec me adentre en el contexto de la computación cuántica, el primer día preste atención y estaba familiarizado con los temas, sin embargo, el segundo día se sintió como un salto de 1 semana de un curso intensivo, porque los temas se volvieron enormemente más complicados de

lo que habíamos estado viendo. Siento que la experiencia del Hackathon fue muy buena pero no pienso que valga la pena cambiarla por dos días de clase, hubiera sido mejor en el fin de semana. Después de vivir esta experiencia considero que debí haber estudiado conceptos más complicados de la computación cuántica, ya que no pude seguir el ritmo de las cosas nuevas que comenzamos a ver.

- ¿Qué crees que puedas mejorar para tus futuros proyectos de Quantum Computing?

Creo que debo reforzar mi conocimiento de algoritmos variacionales para poder crear mejores algoritmos cuánticos, al igual me gustaria saber mas sobre como funciona esto a más bajo nivel. Necesito aprender a trabajar mejor en equipo, es muy difícil delegar las actividades cuando se habla de programación, también a hacer código que este autodocumentado, como nombrar las variables y funciones de la manera más descriptiva, hacer funciones de manera en la que no se les tengan que estar haciendo cambios en el futuro.

- ¿Qué fue lo que más te gustó de esta Semana Tec?

Lo que más me gustó fueron los recursos que nos proporcionaron, como una de las notebooks en las que se toca el tema de la química computacional. Definitivamente seguiré tratando de sacarle el máximo provecho a estos recursos, ya que siempre me ha interesado realizar simulaciones de química para predecir bajo qué condiciones ciertas reacciones son posibles, o las propiedades de ciertas moléculas. Lo que me llevo de esta semana tec es un gran entusiasmo por continuar en este rumbo, ha sido mi mayor acercamiento a soluciones de problemas reales por medio de la computación cuántica. Antes de esta semana no tenía ni idea de como estos circuitos podrían resolver problemas.

Daniela:

- ¿Qué hiciste bien y qué hubieras hecho mejor para obtener un mayor aprendizaje de la unidad de formación?

Gracias a conocimientos previos obtenidos pudimos determinar correctamente la forma de resolver el problema; sin embargo, no tuvimos la oportunidad de correrlo con más ciudades; porque, la computadora cuántica contaba con largas horas de espera. Principalmente considero que la forma de usar los códigos dados en clase y adaptarlos al problema fue lo que hicimos bien; sin embargo, no se comprendía del todo los códigos y cómo modificar ciertas cosas para tener un código que diera resultados mejores. Considero, que hubiéramos corrido los códigos en todas las computadoras de

los compañeros para poder determinar en cual se corría mejor, así cómo dividir mejor el trabajo y no desesperarse por hacer largas filas para esperar a que corrieran muchísimas más ciudades de las que una computadora clásica puede hacer. Asimismo, comprender mejor cómo cambiar los resultados cuánticos a interpretaciones clásicas.

- ¿Qué crees que puedas mejorar para tus futuros proyectos de Quantum Computing?

Debo de mejorar en muchos aspectos, principalmente fortalecer mis bases en la computación cuántica y no cerrarme siempre a lo clásico, ya que hay que cambiar el pensamiento computacional clásico para poder comprender que se puede optimizar todo cuando entiendes la superposición y el entrelazamiento cuántico. Es un área muy nueva y todavía falta mucho por mejorar y mucho por crear, actualmente correr los códigos en las computadoras cuánticas es muy costoso y difícil, pero poco a poco la tecnología va a ir desarrollándose más hasta que llegue un punto donde va a ser más accesible para todos. Sin embargo, para llegar a eso hay que entender lo que estamos programando y saber cómo aplicarlo a problemas reales, y abrir la mente a nuevas formas de programar.

- ¿Qué fue lo que más te gustó de esta Semana Tec?

Lo que más me gustó de la Semana Tec fue la posibilidad de poder aprender con personas con una gran experiencia en la computación cuántica, personas que se dedican a eso. Participar en las sesiones con las personas de IBM y tener la posibilidad de tener acceso a las computadoras cuánticas, a los códigos y a los links donde puedes hacer autoaprendizaje. Me gusto poder tener una guía que nos diera el camino para entender cómo a partir de circuitos y qubits, puedes resolver problemas reales. Considero, que no fue fácil y que muchas veces no sabía de lo que estaba hablando el profesor, fue una nueva forma de aprender a la que no estaba acostumbrada, pero que guía mucho al autoaprendizaje y aprender haciendo.

Referencias

Amazon. (s. f.). *¿Qué es la computación cuántica?* Amazon Web Services.

Recuperado 15 de septiembre de 2023, de

<https://aws.amazon.com/es/what-is/quantum-computing/>

Amazon Web Services, Inc. (n.d.). *¿Qué es el análisis predictivo? - Explicación del*

análisis predictivo - AWS. Retrieved September 16, 2023, from

<https://aws.amazon.com/es/what-is/predictive-analytics/>

Buchholz, S. & Ammanath, B. (2022). Quantum computing may create ethical risks for businesses. It's time to prepare.

<https://www2.deloitte.com/uk/en/insights/topics/cyber-risk/quantum-computing-ethics-risks.html>

Frąckiewicz, M. (2023). The Role of Quantum Computing in Particle Physics and Cosmology

<https://ts2.space/en/the-role-of-quantum-computing-in-particle-physics-and-cosmology/>

Hewlett Packard Enterprise. (n.d.). ¿Qué es el aprendizaje automático? | Glosario.

HPE LAMERICA. Retrieved September 16, 2023, from

<https://www.hpe.com/lamerica/es/what-is/machine-learning.html#:~:text=Los%20cuatro%20modelos%20principales%20de,y%20el%20aprendizaje%20de%20refuerzo>

IBM. (n.d.-b). *Vehicle Routing — Qiskit Optimization 0.5.0 documentation*. Qiskit.

Retrieved September 16, 2023, from

https://qiskit.org/ecosystem/optimization/tutorials/07_examples_vehicle_routing.html

IBM. (s.f.). What is quantum computing?

<https://www.ibm.com/topics/quantum-computing>

IBM. (n.d.). *What is Quantum Computing? | IBM*. Retrieved September 15, 2023,

from <https://www.ibm.com/topics/quantum-computing>

IBM. (n.d.-a). *Quantum Circuits (qiskit.circuit) - Qiskit 0.44.1 documentation*. Qiskit.

Retrieved September 15, 2023, from

<https://qiskit.org/documentation/apidoc/circuit.html>

Rakhade, K. (2020). Shor's Algorithm (for Dummies).

<https://kaustubhrakhade.medium.com/shors-factoring-algorithm-94a0796a13b1>

[1](#)

Silva, A. (s.f.). Cuando el Futuro nos Alcance: ¿En qué podemos utilizar computadoras

cuánticas?<https://sg.com.mx/revista/58/cuando-el-futuro-nos-alcance-en-que-podemos-utilizar-computadoras-cuanticas>

Zapata, J. ; Brenes, E. & Rodríguez B. (2021). ¿Es La Computación cuántica el fin de la computación clásica?.

<http://dspace.ulead.ac.cr/repositorio/handle/123456789/131>

Zuñiga, L. (2017). De los bits a los qubits; computación cuántica.

https://revistas.tec.ac.cr/index.php/investiga_tec/article/download/3294/2982