



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

MAESTRIA EN CIENCIAS DE LA COMPUTACION

**ALGORITMO CUÁNTICO PARA SEGMENTACIÓN
DE IMÁGENES**

**TESIS PARA OBTENER EL TITULO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN**

P R E S E N T A

LIC. MARIO MOCTEZUMA MENDOZA

ASESORES DE TESIS

DR. GUILLERMO DE ITA LUNA

DR. LUIS CARLOS ALTAMIRANO ROBLES

PUEBLA, PUE.

OCTUBRE 2025

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Doctor Guillermo de Ita Luna, por ser mi asesor e ilustrarme en la presentación de este proyecto de tesis. Al Doctor Luis Carlos Altamirano Robles por mostrarme el camino hacia mi conocimiento e interés por la computación cuántica para así desarrollar mi trabajo de investigación. Agradezco también a todos mis profesores por impartirme su conocimiento durante mi estancia en la Maestría del Posgrado en Ciencias de la Computación.

Como becario 1291009 de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, SECIHTI, quedo muy agradecido por su valioso apoyo.

Contenido

AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN	iv
1 INTRODUCCIÓN	5
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO	7
1.2.1 OBJETIVOS GENERALES.....	7
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
2 PRELIMINARES.....	8
2.1 ESTADO DEL ARTE.....	8
2.2 MARCO TEÓRICO	10
2.2.1 RNN .VS. ENTROPÍAS CUÁNTICAS	11
2.3 NOTACIONES Y CONCEPTOS DE CÓMPUTO CUÁNTICO	13
3 ALGORITMOS	18
3.1 METODOLOGÍA.....	18
3.2 IMPLEMENTACION DEL ALGORITMO.....	28
4 AMBIENTE DE TRABAJO.....	31
4.1 INFRAESTRUCTURA.	31
4.2 HERRAMIENTAS DE COMPARATIVA	32
5 EJECUCIÓN DEL ALGORITMO.....	34
5.1 TIEMPO DE EJECUCIÓN	40
5.2 MÉTRICAS DE EVALUACIÓN	41
6 CONCLUSIONES.....	63
BIBLIOGRAFÍA.....	64

RESUMEN

La computación cuántica se basa en la mecánica cuántica. Entre los predecesores de la teoría de la física cuántica se pueden mencionar a Richard Feynman, Albert Einstein, Enrico Fermi, Erwin Schrödinger, Paul Dirac, Peter Higgs y François Englert [7]. En tanto que entre los impulsores de la computación cuántica se puede mencionar a David Deutsch, Richard Jozsa [1], Richard Cleve, Artur Ekert, Chiara Macchiavello y Michele Mosca [8].

Se puede mencionar que ya desde 1998 se han presentado diferentes algoritmos basados en ecuaciones cuánticas, que ha derivado en desarrollar la computación cuántica desde un punto de vista computacional.

La tecnología cuántica contempla el desarrollo de procesos híbridos, dejando claro que no se aplica la mecánica físico-química cuántica, más bien, se realiza la simulación de computación cuántica. En la computación cuántica híbrida se hacen simulaciones a través de internet, por ejemplo, usando servidores de qiskit IBM, así como algunas plataformas como NVIDIA [9]

En el área del procesamiento de imágenes se han desarrollado algunos prototipos de algoritmos cuánticos para trabajar con imágenes digitales, aunque no es común tener implementaciones para el trabajo cotidiano. Actualmente se están construyendo bibliotecas estables para elaborar algoritmos cuánticos que permitan segmentar imágenes en Python. Entre estas utilerías se pueden mencionar cirq, scqubits, Qiskit, Tensorflow Quantum, entre otras librerías que manejan la mecánica cuántica.

Palabras Claves: Qiskit, Tensorflow Quantum, IBM Quantum, Google Quantum, Mecánica Cuántica, Nvidia Quantum, Computación Cuántica.

1 INTRODUCCIÓN

La Inteligencia Artificial (IA) tiene una amplia presencia en el desarrollo de la computación. La IA ha creado diferentes productos que están siendo utilizados actualmente en las áreas productivas. Sin embargo, desde la década de los 80's, se generó aparte de amplias expectativas sobre la misma, una alta incertidumbre sobre los alcances que tendría ésta [10].

Así como la incertidumbre sobre los alcances y limitaciones de la IA, la línea del Cómputo Cuántico (CC) también tiene una alta incertidumbre sobre su potencialidad y limitación de su alcance.

Algunos países del mundo como Suiza, Estados Unidos, Rusia, Japón y China, destacan en el conocimiento de la mecánica cuántica y la capacidad para aplicarlo en desarrollos tecnológicos, que además han logrado la evolución de la computación cuántica, pero ésta se detuvo alrededor de la década de los 2000, la teoría de la computación cuántica se retomó en la primavera de 2019 y hasta la fecha hay más desarrollos de esta investigación [11].

Se mencionan las álgebras cuánticas (mecánica clásica) como herramientas de desarrollo de este tema, además de las ecuaciones de bosón de Giggs [33], y se considera que éstas son las adecuadas para desarrollar el procesamiento de qubit's de entrelazamientos, es decir, la nueva mecánica moderna, en sustitución de la mecánica clásica, ya que esta mecánica implica un término conocido como la gravedad.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La motivación para realizar esta investigación surgió en la Facultad de Ciencias de la Computación, a partir de una tarea relacionada con el problema del agente viajero cuántico, este problema implica comprender el entrelazamiento de múltiples rutas para encontrar la forma más eficiente de llegar a un destino; sin embargo, se considera un problema relativamente simple.

En un curso de Cómputo Reconfigurable, se exploraron temas teóricos y prácticos sobre simuladores virtuales utilizando Qiskit y TensorFlow-Quantum, durante el desarrollo de la idea para esta tesis, se consideraron diversos problemas de Teoría Computacional y Lógica Computacional [2], incluyendo el problema SAT, las Leyes de Fourier, el Procesamiento Digital de Imágenes [3], los Grafos Cuánticos y problemas que simulan escenarios de la vida real. Aunque la literatura existente sobre algunos de estos temas es limitada, se profundizó en el problema R3 MAX SAT, el cual se basa en la 'Ecuación de la Banana', finalmente, a partir de la tarea inicial, se decidió desarrollar un algoritmo cuántico de segmentación de imágenes como tema de tesis [5].

1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO

Se definieron los objetivos específicos y generales para realizar el seguimiento del trabajo de tesis, incluyendo su desarrollo e implementación.

1.2.1 OBJETIVOS GENERALES

Desarrollar un algoritmo cuántico para la segmentación de imágenes. El algoritmo propone mejorar la calidad del pixel de la imagen a través del entrelazamiento de datos, así como usando metodologías de mecánica cuántica moderna, a diferencia de la mecánica clásica.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Procesar la imagen
- 2) Modelar un algoritmo cuántico de segmentación de imágenes

Aplicar mecánica cuántica moderna que fundamente el desarrollo del algoritmo cuántico a implementar

2 PRELIMINARES

Este capítulo se centrará en los antecedentes para el desarrollo y diseño del algoritmo cuántico para segmentación de imágenes. Además, esta revisión bibliográfica del estado del arte.

2.1 ESTADO DEL ARTE

Algunos antecedentes de trabajos anteriormente mencionados que se usaron de referencia, se presentan en la Tabla 1 (proviene de 'imagen.net'), como base de desarrollo de evaluación del top de error del 0.05 de segmentación como se observa en la tabla 1. En la tabla 2, se hace referencia a los avances actuales en desarrollo de segmentación de imágenes cuánticas [67].

Hay una serie de esfuerzos en el desarrollo de algoritmos sobre segmentación de imágenes, los más representativos se presentan en la Tabla 1.

Nombre del algoritmo	funcionalidad	Numero de capas	Error en el algoritmo	Desarrollador
Letnet 1998	Cifrar firmas	60 mil capas	Tiene muchos errores, aunque no sean encontrados	Yan le Cum
Alex net 2012	Procesar imágenes	60 millones de parámetros	15% de errores	Alex Krizhevzky
ZFnet 2013	Procesar imagenes	19 millones de parámetros	14.8%	Zeiler & Fergus
VGGnet 2014	Imágenes de juegos	138 millones de parametros	7.3%	Simonyan, Zisserman
GoogleNet Tensorflow(2015)	Redes neuronales convolucionales profundas	4 millones	6.6%	Google
Resnet (2016)	Redes Neuronales	2/500 mil parámetros	2%	Tesorflow/keras Google
Fractalnet (2017)	Imágenes con mecánicas	500 a menos parámetros	1.5%	Google, François

Tabla 2.1. Comparativa de los algoritmos de inteligencia artificial, usando machine learning, cortesía de la información Googlenet Challenge usando segmentación de imagen por capas.

La Tabla 2 describe conceptos de trabajo sobre los algoritmos basados en la mecánica cuántica o mención de la misma Tabla 1, con el objetivo de demostrar algún funcionamiento. Sin embargo, no hay una descripción detallada, lo que puede

ser de suma importancia, el problema es que solo la gran parte de estos artículos mencionan teoría con resultados, pero sin evidencia sobre los resultados.

Antecedentes	Nombre del artículo	Algoritmos	descripción	Evaluación
2009	Image processing using quantum computing and reverse emergence. <i>Int. J. Nano Biomater</i> [16].	Berstein	aplico algoritmo de imágenes	60% de veracidad y excelentes definiciones
2012	An image encryption scheme based on quantum logistic map. <i>Commun. Nonlinear Sci</i> [17].	Agente Viajero, RNN Convolución	aplico los algoritmos tradicionales de machine learning	65% ya que este está basado en el agente viajero
2014	Histogram-based segmentation of quantum images. <i>Theoret. Comput. Sci</i> [19].	gradientes degradados con ecuaciones de Fourier	mecánica cuántica aplicada en la imagen	99% de veracidad sin mostrar resultado
2015	Image segmentation on a quantum computer. <i>Quantum Inf. Process</i> [21].	Control de Hadamard como base.	aplicó las mecánicas de control	99% de veracidad, aunque sin resultados
2015	Quantum image encryption algorithm based on image correlation decomposition [22].	Ninguno algoritmo solo mecánicas	Solamente describe mecánicas	80% uso machine learning
2015	Quantum image scaling using nearest neighbor interpolation. <i>Quantum Inf. Process.</i> [23].	Solo mecánicas y espacios vectoriales	Utiliza espacios vectoriales en R	99% aunque es teórico
2019	Imaging quantum spin Hall edges in monolayer WTe ₂ [28].	Algoritmos de Deutsch-Jozsa	abarca una parte de trabajo, es solo teoría.	100% veracidad, aunque se debe de implementar en qiskit y TensorflowQ
2020	Natural Quantum Gradient [30].	Modelos en gravitación de mecánica cuántica moderna	Abarca la gran parte de demostración del algoritmo para qiskit y manejo de los algoritmos	100% de veracidad ya que este esta basados en la computación híbrida usando retro propagación
2020	The dual-threshold quantum image segmentation algorithm and its simulation. <i>Quantum Information Processing</i> [31] [32].	Machine learning y redes de convolución en Qubits	solamente aplica modelos híbridos.	99% es referente a la información que se trabaja actualmente en la computación cuántica.
2021	A quantum-clustering optimization method for COVID-19 CT scan image segmentation [34].	Entrelazos Qubits control de hadamard	sistema híbrido de machine learning	100% porque describe detalle de la imagen
2022	Quantum Machine Learning with Quantum Image Representations. <i>2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering</i> [42].	Mecánica de imagen	solo es teoría, pero sin resultados experimentales	96% ayuda en excelente la matemática, falta trabajo de campo.

2023	Predicting Gibbs-State Expectation Values with Pure Thermal Shadows [45].	Mecánica cuántica moderna usando métodos de boson de gibbs	Teoría confusa, aunque algo fácil de leer para modelar una parte del algoritmo	100% verídica, aunque no fue fácil entender ya que esta viene de una implementación en desarrollo 2025 apenas se está viendo.
2023	A Review of Quantum Gradient Descent [46].	Mecánica cuántica moderna y modelo matemático	Teoría confusa de leer, pero si sigues los números es fácil de aprender	Está en desarrollo con los siguientes artículos, aunque cada uno es diferente en cuanto a demostraciones matemáticas
2024	3-D Quantum-Inspired Self-Supervised tensor Network for volumetric segmentation of medical images [49].	Menciona los algoritmos cuánticos, utiliza mecánica moderna	muestra resultados esperados	100% pero el detalle es que se enfoca a la parte medica
2024	Advances in Quantum Imaging with Machine Intelligence [51]	Este menciona avances de segmentación y ciencia de datos	Solo prototipos sin ejemplos, sin resultados	Menciona qiskit y Tianyan pero no hay una confianza
2025	Learning quantum Gibbs states locally and efficiently [59]	Este esta basado en mecánica moderna	Son solo demostraciones algebraicas de mecánica cuántica moderna	Este queda pendiente en el desarrollo de investigación sobre la teoría computación cuántica moderna.

Tabla 1.2. Descripción de artículos anteriores y de trabajos mencionados durante el desarrollo.

2.2 MARCO TEÓRICO

Se utilizó el algoritmo cuántico de segmentación de imágenes en su desarrollo con el uso de servidores cuánticos de IBM, aunque por el momento, son simulaciones que se ejecutan en una maquina personal con tarjeta gráfica.

Es posible tener acceso a una computadora cuántica (CC) en online, ya que una CC física tendrá el costo aproximado de 9 millones de dólares [53]. Aunque actualmente se encuentran en laboratorios con altos grados de congelación para trabajar con el entrelazamiento de qubits.

Mientras tanto, D-Wave que es una empresa de Estados Unidos, logró desarrollar algunas computadoras de 2 qubits a un precio de 11 mil dólares, pero como tal, aún

no se desarrolló su producción para su venta. Esta empresa se dedica solo a la producción hacia empresas privadas [61].

Con respecto a la BUAP, por el momento no cuenta con el servicio de una computadora de este nivel, solo en el IPN – Cinvestav se tiene acceso a una computadora híbrida cuántica.

2.2.1 RNN .VS. ENTROPÍAS CUÁNTICAS

El aprendizaje automático y el diseño de la mecánica cuántica presentan diferencias fundamentales, el primero se basa en redes neuronales convolucionales (RNN), mientras que el diseño de la mecánica cuántica exhibe similitudes con el modelo atómico nuclear. Estas diferencias implican que, si bien existen algunas analogías entre las convoluciones, no son isomorfas y difieren en su estructura de entrada/salida en comparación con el perceptrón, el cual solo tiene entradas con respecto a uno sólo de sus parámetros “x”.

En mecánica cuántica, no hay un nodo de inicio definido; el sistema procesa los datos con mayor detalle, además, mientras que el perceptrón opera con bits, la entropía lo hace con qubits, un modelo híbrido puede mejorar la manipulación de archivos en el entrenamiento de imágenes, estas diferencias se ilustran en las Figuras 2.1 y 2.2, donde se observa la distinción entre una ecuación lineal y los entrelazamientos de desplazamiento vectorial característicos de la mecánica cuántica.

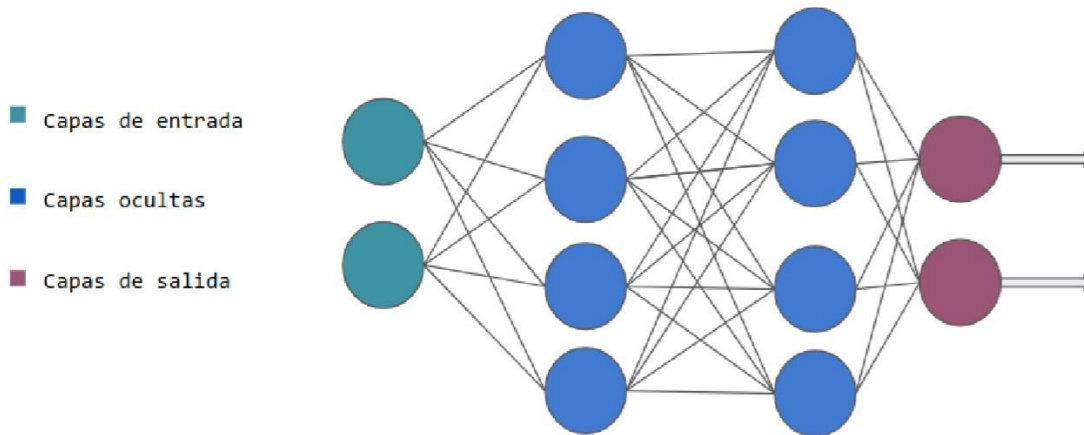


Figura 2.1. Cortesía de TensorFlow una red neuronal con capas de un perceptrón entradas X y salida Y [68].

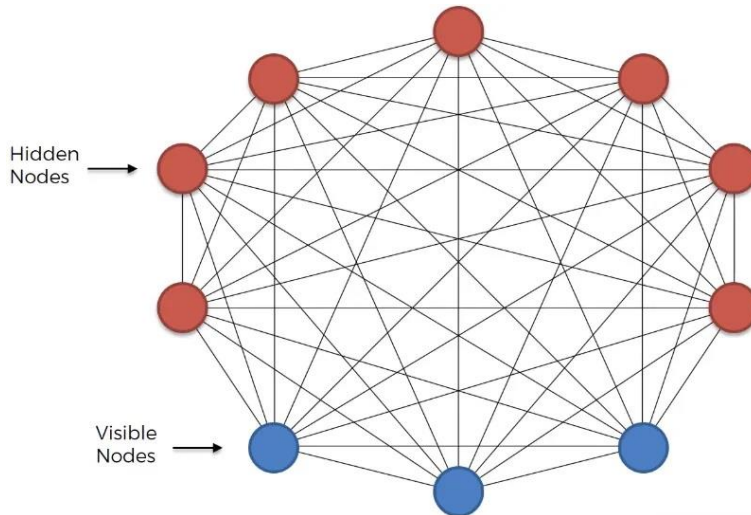


Figura 2.2. Red convolucional cuántica (similar al diseño atómico), su posicionamiento es muy diferente a la RNN, para saber dónde comienza la superposición de Orto normalización de imagen (cortesía de Gforce Nvidia) [64]

Se implementaron modificaciones en el aprendizaje automático cuántico, la Figura 2.1 representa una convolución basada en Inteligencia Artificial, mientras que la Figura 2.2 muestra un desarrollo en un contexto diferente, donde el comportamiento del qubit en el proceso es menos definido, debido a las múltiples interacciones entre los elementos durante la lectura de los datos.

2.3 NOTACIONES Y CONCEPTOS DE CÓMPUTO CUÁNTICO

Para comprender el comportamiento de las demostraciones de la mecánica cuántica clásica con las transformadas de Fourier, vamos a introducir los símbolos a usar:

I = imagen

H = Hadamard/ Hilbert control

\otimes = es la Orto-normalización de la matriz de la imagen, es decir millones de multiplicaciones por "milisegundos" de operaciones entre valores absolutos (valores positivos).

Esta notación se usará al describir las ecuaciones de la mecánica cuántica sobre el espacio vectorial \mathbb{R}^3 formado por qubits. La misma notación usada en el procesamiento de una imagen, con el propósito de obtener una solución óptima usando la transformada de Fourier (otro estilo diferente al 'machine learning'). A continuación, se muestra la ecuación conocida comúnmente como ecuación de la Banana.

$$|I(\theta)\rangle = \frac{1}{2^n} \sum_{i=0}^{2^{2n}-1} (\cos(\theta i)|0\rangle + \sin(\theta i)|1\rangle) \otimes |i\rangle \quad (2.3.1)$$

Con parámetros:

$$\theta i \in [0, \frac{\pi}{2}], i = 0, 1, 2, \dots, 2^{2n} - 1 \quad (2.3.2)$$

Aplicando la transformada del control/puerta de Hadamard $H = I \otimes H \otimes 2I$, donde se considera la matriz de identidad 2D y a H como la puerta/control de Hadamard, en $|0\rangle \otimes 3$, lo que produce el estado $|H\rangle$.

En la siguiente fórmula para llegar al proceso Ortonormal, se ocupan las leyes de Fourier sobre el espacio \mathbb{R}^3 , es decir, se considera espacios vectoriales para demostrar un movimiento de entrelazamiento cuántico.

Axioma Cuántico: estado probabilístico que tiende a ser discreto, variable aleatoria y continuó que contiene como métodos de algebra lineal y geometría analítica incluyendo ecuaciones diferenciales para desarrollar el axioma cuántico.

Al considerar el entrelazamiento de imagen, en este caso i es la imagen $V(i \rightarrow t)$, denota el potencial basado en el axioma cuántico, el cual se usará como una fórmula para la reconstrucción de la imagen. En la práctica este proceso se describe como: $V(input \rightarrow data) < 00|10 > + \dots + < 01|11 >$

Los tres cubits iniciales son 01=1, 10=2 y 11=3 son los tres números qubits

$$01\rangle = 1$$

$$10\rangle = 2$$

$$11\rangle = 3$$

Y también se describe a través de la siguiente fórmula:

$$(I \otimes H^{\otimes 2})|0^{\otimes 3}\rangle = \frac{1}{2} |0\rangle \otimes R_3 \sum_{i=0}^3 |i\rangle = |H\rangle. (2.3.3)$$

El estado $|0\rangle$ se inicializa con tres qubits y se aplica una operación de Hadamard sobre los dos primeros qubits. El tercer qubit es un qubit auxiliar (siempre arroja un residuo 1). En el segundo paso, se aplican rotaciones controladas en el estado $|H\rangle$ según lo definido por:

$$R_i = (I \otimes \sum_{j=0, j \neq i}^3 |j\rangle \langle j|) + Ry(2\theta_i) \otimes |i\rangle \langle i|. (2.3.4)$$

Donde Ry es equivalente a una función de matriz de entrelazamiento trigonométrico en R_3

$$Ry(2\theta_i) = \begin{pmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) \end{pmatrix} (2.3.5)$$

La ecuación anterior define una matriz de rotación. Las rotaciones controladas se aplican en sucesión correspondiente al número de píxeles, como el caso en la ecuación (2.3.4), corresponde a una operación unitaria de R definida como:

$$R|H\rangle = \prod_{i=0}^3 R_i |H\rangle. (2.3.6)$$

La ecuación (2.3.1) es el estado que se obtiene después de aplicar la transformada de Hadamard. Ahora, los operadores de rotación controlada se aplican en sucesión de la siguiente manera comenzando en R_0 y hasta R_3 :

$$\begin{aligned}
 R_0|H\rangle &= I \otimes \sum_{i=0, i \neq 0}^3 |i\rangle \langle i| + R_y(2\theta_0) \otimes |0\rangle \langle 0| \left(\frac{1}{2} |0\rangle \otimes \sum_{i=0}^3 |i\rangle \right) \\
 &= \frac{1}{2} \left[|0\rangle \otimes \sum_{i=0, i \neq 0}^3 |i\rangle \langle i| + (\cos(\theta_0)|0\rangle + \sin(\theta_0)|1\rangle) \otimes |0\rangle \right]. \quad (2.3.7)
 \end{aligned}$$

En R_1 :

$$\begin{aligned}
 R_1(R_0|H\rangle) &= (I \otimes \sum_{i=0, i \neq 1}^3 |i\rangle \langle i| + R_y(2\theta_1) \otimes |1\rangle \langle 1|) \frac{1}{2} (|0\rangle \otimes \sum_{i=0, i \neq 0}^3 |i\rangle \langle i| + (\cos(\theta_0)|0\rangle \\
 &\quad + \sin(\theta_0)|1\rangle) \otimes |0\rangle) \\
 &= \frac{1}{2} (|0\rangle \otimes \sum_{i=0, i \neq 0, 1}^3 |i\rangle \langle i| + (\cos(\theta_0)|0\rangle \sin(\theta_0)|1\rangle) \otimes |0\rangle + (\cos(\theta_1)|0\rangle + \sin(\theta_1)|1\rangle) \\
 &\quad \otimes |1\rangle). \quad (2.3.8)
 \end{aligned}$$

En R_2

$$\begin{aligned}
 R_2(R_1R_0|H\rangle) &= (I \otimes \sum_{i=0, i \neq 2}^3 |i\rangle \langle i| + R_y(2\theta_2) \otimes |2\rangle \langle 2|) \frac{1}{2} (|0\rangle \otimes \sum_{i=0, i \neq 0, 1}^3 |i\rangle \langle i| \\
 &\quad + (\cos(\theta_0)|0\rangle + \sin(\theta_0)|1\rangle) \otimes |0\rangle + (\cos(\theta_1)|0\rangle + \sin(\theta_1)|1\rangle) \otimes |1\rangle) \\
 &= \frac{1}{2} (|0\rangle \otimes \sum_{i=0, i \neq 0, 1, 2}^3 |i\rangle \langle i| + (\cos(\theta_0)|0\rangle + \sin(\theta_0)|1\rangle) \otimes |0\rangle + (\cos(\theta_1)|0\rangle + \sin(\theta_1)|1\rangle) \\
 &\quad \otimes |1\rangle + (\cos(\theta_2)|0\rangle + \sin(\theta_2)|1\rangle) \otimes |2\rangle). \quad (2.3.9)
 \end{aligned}$$

Al aplicar R_3 se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned}
 R_3(R_2R_1R_0|0\rangle) &= (I \otimes \sum_{i=0, i \neq 3}^3 |i\rangle \langle i| + R_y(2\theta_3) \otimes |3\rangle \langle 3|) \frac{1}{2} (|0\rangle \otimes \sum_{i=0, i \neq 0, 1, 2}^3 |i\rangle \langle i| \\
 &\quad + (\cos(\theta_0)|0\rangle + \sin(\theta_0)|1\rangle) \otimes |0\rangle + (\cos(\theta_1)|0\rangle + \sin(\theta_1)|1\rangle) \otimes |1\rangle \\
 &\quad + (\cos(\theta_2)|0\rangle + \sin(\theta_2)|1\rangle) \otimes |2\rangle) \\
 &= \frac{1}{2} (|0\rangle \otimes \sum_{i=0, i \neq 0, 1, 2, 3}^3 |i\rangle \langle i| + (\cos(\theta_0)|0\rangle + \sin(\theta_0)|1\rangle) \otimes |0\rangle + (\cos(\theta_1)|0\rangle + \sin(\theta_1)|1\rangle) \\
 &\quad \otimes |1\rangle + (\cos(\theta_2)|0\rangle + \sin(\theta_2)|1\rangle) \otimes |2\rangle + (\cos(\theta_3)|0\rangle + \sin(\theta_3)|1\rangle) \\
 &\quad \otimes |3\rangle). \quad (2.3.10)
 \end{aligned}$$

El segundo término de la ecuación 2.3.10 da como resultado una segmentación de gradiente degradado para eliminar el fondo de la imagen sobre la suma en \mathbb{R}^3 , es decir $\sum_{i=0}^3 |i\rangle$. Lo que genera representaciones numéricas de dos estados de qubits de los cuatro estados posibles de entrelazamientos cuánticos, 0,1,2,3, que describe las capas uniformes del desarrollo. Los cuatro estados de qubits de entrelazamiento cuántico, son:

$$|0\rangle = |00\rangle$$

$$|1\rangle = |01\rangle$$

$$|2\rangle = |10\rangle$$

$$|3\rangle = |11\rangle$$

θ_0 00	θ_1 01
θ_2 10	θ_3 11

$$|I\rangle = \frac{1}{2} [(\cos \theta_0 |0\rangle + \sin \theta_0 |1\rangle) \otimes |00\rangle + (\cos \theta_1 |0\rangle + \sin \theta_1 |1\rangle) \otimes |01\rangle + (\cos \theta_2 |0\rangle + \sin \theta_2 |1\rangle) \otimes |10\rangle + (\cos \theta_3 |0\rangle + \sin \theta_3 |1\rangle) \otimes |11\rangle]$$

Figura 2.3. Se puede observar los entrelazamientos de la ecuación de la banana seleccionando el pixel para nuestro modelo.

Por lo tanto, concluimos que para procesar los datos de entrada en referencia $V(\text{imagen} \rightarrow R_0, R_1, R_2, R_3)$ en el espacio, se considerará el valor $\frac{1}{2}$ como ambiguo, ya que también existe la posibilidad de que se vea como $\frac{1}{\sqrt{\text{ambiguo}}}$, este proceso se aplicará cuando existe un ruido en la imagen.

La Figura 2.4, sintetiza la idea de que cada pixel en una imagen puede ser representado mediante qubits para que posteriormente, se les aplique la ecuación de la banana, con la intención de hacer el procesamiento cuántico de la imagen de entrada.

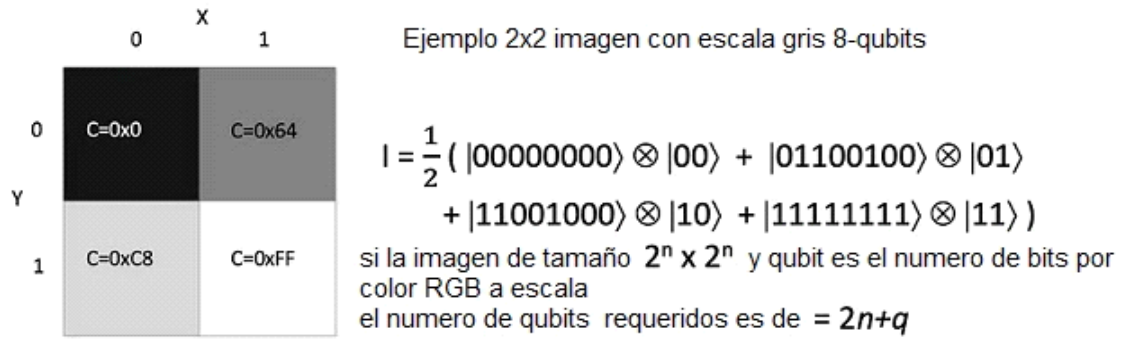


Figura 2.4. Muestra como los qubits se asocian con los pixeles a procesar para posteriormente, aplicar la ecuación de la banana.

3 ALGORITMOS

El servicio de la computadora cuántica se usa a través de un servidor online que ofrece *IBM*, el cual será necesario para el desarrollo de los algoritmos cuánticos. Sin embargo, estos servicios son de acceso limitado para desarrolladores que pagan por usar la misma plataforma de *IBM*, el costo era de 99 dólares la hora, este servicio se paga con tarjeta de débito o crédito durante el uso del servidor cuántico, *qiskit* renovará su programación, plataformas y servidores el 5 de julio del 2025, todos los demás servidores quedarán obsoletos, véase la página oficial de *qiskit* en:

<https://docs.quantum.ibm.com/announcements/product-updates/2024-9-20-backend-run> [64]

Se anunció en la página arriba mencionada, que para el 5 de julio 2025, iniciaría una nueva implementación de *IBM*, sobre nuevos desarrollos, sin embargo hay pocas computadoras cuánticas que se pueda utilizar por el costo del servidor que es de \$99 dólares por 15 minutos y entre ellas se encuentra la computadora cuántica *Kyv*, además entre las computadoras cuánticas alternativas que ofrecen el servicio de la programación y algoritmos cuánticos online es *Tianyan504* o la máquina virtual de *Google quantum (Google Colab GPU hybrid 4 núcleos)* e *IBM*, este servidor está limitado en los cambios que sucedieron a inicios del año 2025 [65].

Es conveniente usar dichos servidores a las 2:00 a.m. hora de la ciudad de México, puesto que se puede obtener compilación y ejecución de los equipos de manera eficaz, mientras que en el transcurso del día, algunas empresas usan dichos ordenadores cuánticos, lo que ralentiza las ejecuciones sobre los mismos. Se puede mencionar que uno de los clientes más frecuente es la empresa *Amazon*.

3.1 METODOLOGÍA

Para explicar el diseño del algoritmo de procesamiento de imágenes, se presentan las diferencias clave al considerar una función ortonormal sobre la imagen, comparando la mecánica cuántica clásica con la moderna.

Los modelos de aprendizaje automático están basados en la ecuación de energía cuántica de entropía en imágenes, las dos vertientes del contexto son las siguientes: la primera es abordar sobre la mecánica clásica del bosón de Giggs, la segunda vertiente es la mecánica moderna del bosón de Giggs basados en los agujeros negros y la gravedad.

Para propósitos de mostrar el diseño del algoritmo, primero se indican algunas diferencias con la mecánica clásica, al considerar la función ortonormal sobre la imagen a procesar.

i) Mecánica Clásica

Para este caso, en la ecuación de la banana hay 3 términos que se suman considerando el espacio \mathbb{R}^3 vectorial como: $\mathbb{R}^3 = \partial\theta_\mu$

Se define $\mu(\text{pixeles}) = 1, 2, 3$, donde el 0 es valor $|\frac{1}{\sqrt{2}}|$ ambiguo

$$P_{\mu 123} = \partial\phi_1 \frac{1}{3} + \partial\phi_2 \frac{2}{3} + \partial\phi_3 \frac{3}{3} (\tau_{123} + \omega_{123}) \text{ en } \mathbb{R}^3 \quad (3.1.1)$$

ii) Mecánica moderna

$$E\theta = - \left(\sum_{i < j} \theta_{ij} i < j \quad si \quad sj + \sum_i \hat{\theta} \quad si \right) \quad (3.1.2)$$

Por los nodos de $\{si\}$ lineales y los parámetros $\{\theta_{ij}\}$, $\{\hat{\theta}_i\}$ esta probabilidad nos da como resultado una configuración lineal de si

$$P(v) = \frac{e^{-E(v)}}{Z} \quad (3.1.3)$$

Normalizando el factor se obtiene la siguiente función sustituyendo en u

$$z = \sum_u e^{-u} \quad (3.1.4)$$

En la imagen nos muestra el desarrollo de la función Z

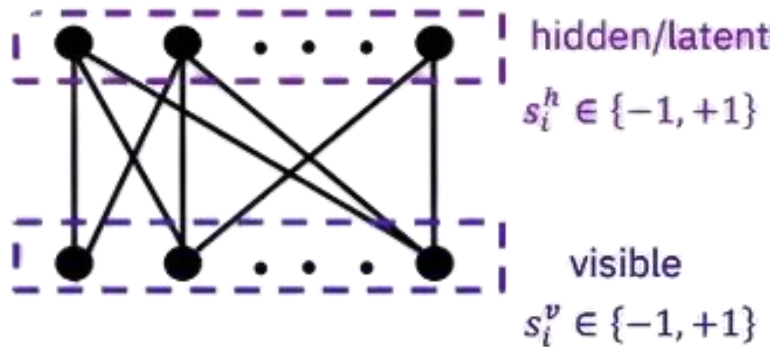


Figura 3.1. Muestra las capas ocultas del algoritmo, aunque es similar a la entropía del perceptrón, libera la imagen con los qubits

Usando el modelo de entropía cuántica como una nueva metodología de desarrollo sobre la mecánica cuántica moderna, nos basamos en el modelo de la máquina de Boltzmann, en el que se muestra la siguiente definición con respecto a la demostración de la configuración lineal de s_i .

Notación a utilizar:

v = estados de qubits binarios e imaginarios.

P = probabilidad de distribución para el entrenamiento de la imagen.

$Data$ = datos de la máquina de Boltzmann de desarrollo y significado del pixel a guardar (convolución) o tratamiento de imagen.

Definiendo los conceptos básicos retomando las definiciones de ecuaciones del capítulo 2.3

θ = representará a las capas ocultas que se multiplican y que permitirán derivar el dato que nos interesa.

i y j son los entrelazamientos de datos. Se puede considerar a i como el equivalente a h en los datos de capa oculta. j es equivalente a v que son los estados qubits binarios, pero son visibles y se representan en el encapsulado $z = h$. v son los datos marginales (banales) equivalentes a una convolución del perceptrón W_{ab} de acuerdo a la retro propagación de entropía.

$P(v)$ representa la probabilidad de distribución subyacente dada del entrenamiento de la imagen a procesar.

Función de pérdida de la ecuación a demostrar Cross entropía clásica cuántica

$$\min_{\theta_{ij}, \theta_i} L = - \sum_V P^{datos}(v) (\text{Log} P^{1,2,3}(v)) \quad (3.1.5)$$

La Figura 3.2 ilustra un ejemplo al reemplazar los bits por qubits, usados en el procesamiento de una imagen en una red cuántica.

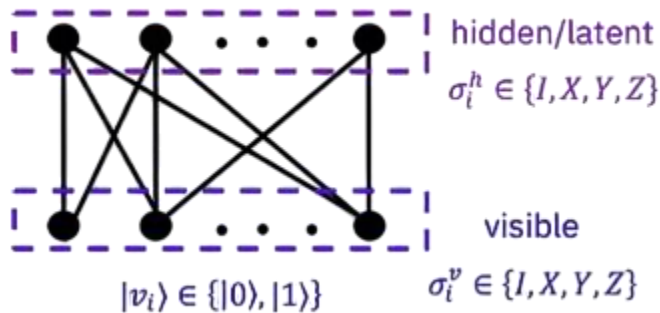


Figura 3.2. Esta imagen representa la entropía de los qubits para su uso en redes cuánticas.

Se define la conectividad Hamiltoniana mediante la siguiente ecuación:

$$H_{\theta} = - \left(\sum_{i < j} \theta_{ij} O_i O_j + \sum_i \hat{\theta}_i O_i \right) \quad (3.1.6)$$

Por operaciones de Pauli en $\{O_i\}$ y los parámetros de los datos nodos $\{\theta_{ij}\} \{\hat{\theta}_i\}$ La Mecánica Cuántica y la Evolución Cuántica en Tiempo Imaginario (QITE).

En los últimos años, la computación cuántica ha impulsado el desarrollo de nuevos algoritmos para resolver problemas complejos en la física moderna a través de los Agujeros Negros y la Gravedad (Gravitiy Bosson Gibbs). Uno de estos métodos es la Evolución Cuántica en Tiempo Imaginario (QITE).

Este algoritmo, a diferencia de los métodos tradicionales de la mecánica cuántica, utiliza la simulación en tiempo imaginario para calcular el estado fundamental de un sistema de un nuevo concepto de la Computación Cuántica y la Física Moderna.

La probabilidad de configuración visible en qubits $|v\rangle$ (banales)

P= probabilidad

Q= qubits

B = visible

M = (medida)

P^{qbm} = interpretación de bosón de Gibbs

Tr = Trivial e imaginario

Aplicando la mecánica moderna de bosón de Gibbs de estados, se define la fórmula.

$$P^{qbm}(v) = Tr[\Lambda_v P^{gibbs}] \quad (3.1.7)$$

El estado cuántico es:

$$P^{gibbs} = \frac{e^{-H}}{Z} \quad (3.1.8)$$

En mecánica cuántica clásica $Z = Tr[e^{-H}]$.

Algunos elementos a usar de la mecánica moderna, se presenta en las siguientes definiciones:

Probabilidad de distribución: son las distribuciones binomiales, Poisson y discretas, consisten en utilizar variables aleatorias y discretas, básicamente es una descripción matemática que muestra qué tan probable es que ocurra cada uno de los posibles resultados en un experimento aleatorio.

Entrenando las variables de la matriz de imagen $\{\theta_{ij}\}\{\hat{\theta}_i\}$ se demuestra una probabilidad de distribución discreta. El método se basará en un modelo cuántico de agujeros negros y con gravedad convolucional en fase de \mathbb{R}^3 , planteada a través

de la ecuación de la mecánica cuántica de la banana en \mathbb{R}^3 y considerando el bosón de Gibbs para la segmentación del vacío (agujero negro).

Función de pérdida entropía de IA (Cross Entropy).

De acuerdo a la mecánica cuántica clásica, se tendría que:

$$\min_{\theta_{ij}, \theta_i} L = - \sum_v P^{datos}(v) (\text{Log} P^{1,2,3}(v)) \quad (3.1.9)$$

Le ec. 3.1.9 se implementa para hacer incidir la probabilidad de muestreo de un estado cuántico con la probabilidad de muestreo de un conjunto de datos clásicos.

Y de acuerdo con la Mecánica cuántica moderna se obtiene la siguiente ecuación (3.1.10).

$$P^{qbm}(v) = \text{Tr}[\Lambda_v P^{gibbs}] \quad (3.1.10)$$

Las anteriores ecuaciones 3.1.7 hasta 3.1.9 codifica las probabilidades clásicas de un estado cuántico en un rango de 1, lo que permite desarrollar las siguientes ecuaciones:

$$QITE = \sum_i \theta_i h_i$$

QITE= *Quantum Imaginary Time Evolution*

Var= variaciones de imagen

Retomando los entrelazamientos de Schrödinger

$$\frac{d|\psi(\tau)\rangle}{dt} = -(H - E_t)|\psi(\tau)\rangle \quad (3.1.11) \quad (\text{sustituyendo en la Ecuación 3.1.8, para delimitar contornos y bordes})$$

$$|\psi(\tau)\rangle = \frac{e^{-H(\tau)}}{c(\tau)} |\psi(0)\rangle \quad (3.1.12) \quad \text{queda la entropía Cuántica como resultado}$$

Orto normalizando la ecuación de entropía:

$$C(t) = \sqrt{\text{Tr}[e^{-2H(\tau)} |\psi(o)\rangle \langle \psi(0)|]} \quad (3.1.13)$$

Mientras que la gravedad de entropía de Gibbs, se mide como:

$$\text{VarQITE: } |\tilde{\psi}(\vec{\omega}(\tau))\rangle = V(\vec{\omega}(t)|\psi_{in}) \quad (3.1.14)$$

In= entrada de datos.

$\vec{\omega}$ = es la multiplicación con transformada de *Laplace* en la imagen.

τ = tiempo relativo, aunque en realidad solo importa el trabajo de la imagen.

Se considera toda la ecuación relativamente a los agujeros negros de Gibbs de entropía que es similar al perceptrón.

Idea en concreto: aproximar el estado de convolución a un estado de evolución.

La variación principal de Mclachlan, en la primera Interacción <1>

$$\delta \left\| \left(\frac{d}{d\tau} + H + E_\tau \right) |\tilde{\psi}(\vec{\omega}(\tau))\rangle \right\| = 0 \quad (3.1.15)$$

da un sistema de ecuaciones lineales.

$$A_{ij} = \text{Re} \left(\frac{\partial \langle \tilde{\psi}(\vec{\omega}(\tau)) | \partial |\tilde{\psi}(\vec{\omega}(\tau)) \rangle}{\partial \omega_i} \frac{\partial |\tilde{\psi}(\vec{\omega}(\tau)) \rangle}{\partial \omega_j} \right) \quad (3.1.16)$$

La matriz de ecuaciones lineales se representa en una reducción con respecto de la matriz de imagen A_{ij} .

$$A \vec{\omega}(\tau) = C \quad (3.1.17)$$

Expandiendo a la ecuación de C al sustituir con respecto de i .

$$C_i = \frac{1}{2} \frac{\partial \langle \tilde{\psi}(\vec{\omega}(\tau)) | \partial |\tilde{\psi}(\vec{\omega}(\tau)) \rangle}{\partial \omega_i} \quad (3.1.18)$$

Regresando a la forma de Euler, haciendo explícito $\vec{\omega}(\tau)$ con respecto a la siguiente ecuación (3.1.19).

$$\vec{\omega}(\tau) \simeq \vec{\omega}(\tau - \delta\tau) + \dot{\vec{\omega}}(\tau - \delta\tau)\delta\tau \quad (3.1.19)$$

Basándose en el modelo de la complejidad polinómica, se obtiene:

$$O(m(k + m)) \quad (3.1.20)$$

Definiendo a m y k :

$m = \#$ de vértices (parámetro de entrada)

$k = \#$ de parámetros en H , que corresponde a los nodos cuánticos en la operación Hadamard, y con respecto a la imagen basada en las librerías Networkx y Rustworkx, como referencia al diseño de impresión del circuito de control cuántico [41].

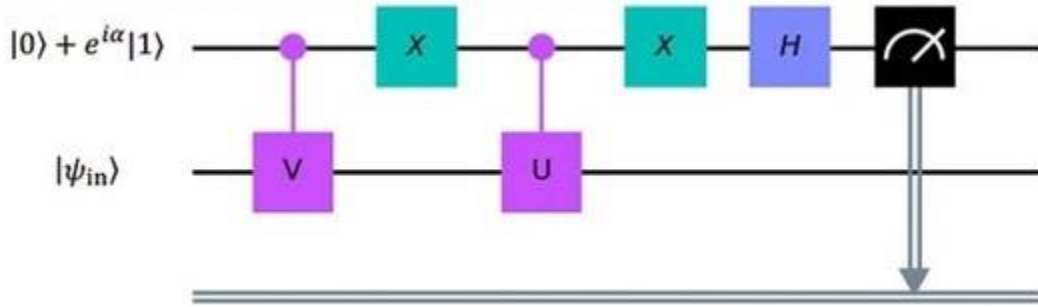


Figura 3.3. Aquí demuestra una mecánica de impresión de nodos H y vértices cuánticos con respecto lo mencionado $O(m(k+m))$.

En la Figura 3.3 se observa la impresión del control basado en Mclachlan a través de los algoritmos hechos desde una IBM Server Quantum Online.

La siguiente función (3.1.21) muestra un P-Bosón de Gibbs, normalizando las funciones de gravedad que nos muestra la ecuación de un estado objetivo.

$$p_{gibbs} = \frac{e^{-H_A/K_B T}}{Z} \quad (3.1.21)$$

Normalizando: $Z = Tr[e^{-H_A/K_B T}]$ (3.1.22)

Al aplicar el método de orto normalización cuántica, se obtiene:

$$\tau = \frac{1}{2K_B T} \quad (3.1.23)$$

$$H_{AB} = H_A \otimes H_B \quad (3.1.24)$$

$$|\tilde{\psi}(0)\rangle_{AB} = (|00\rangle + |11\rangle)^{\otimes n} \Rightarrow Tr_B [|\tilde{\psi}(0)\rangle\langle\tilde{\psi}(0)|_{AB}] = Imagen \frac{1}{2^n} \quad (3.1.25)$$

$$|\tilde{\psi}(\tau)\rangle = \frac{e^{-H_{AB}\tau}}{c(\tau)} |\tilde{\psi}(\omega(0))\rangle \quad (3.1.26)$$

Lo que muestra un entrelazamiento cuántico, al aplicar la ecuación de Dirac, el resultado es:

$$\tilde{\rho}_{gibbs} = Tr[|\tilde{\psi}(\tau)\rangle\langle\tilde{\psi}(\tau)|] \quad (3.1.27)$$

Lo que define la función de gravedad con respecto de L en pérdida.

$$L = - \sum_v P^{datos}(v) (Log P^{1,2,3}(v)) = - \sum_v P^{datos}(v) (Tr[\Lambda_v \tilde{\rho}_{gibbs}]) \quad (3.1.28)$$

Se define la función de gravedad con respecto al gradiente.

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = - \sum_v P_v^{datos} \frac{\partial Tr[\Lambda_v \tilde{\rho}_{gibbs}]}{\partial \theta_i} \quad (3.1.29)$$

Y se sustituye por el Método Golden Thompson $-\frac{\partial H}{\partial \theta_i}$ (3.1.30)

$$\frac{\frac{\partial Tr[\Lambda_v \tilde{\rho}_{gibbs}]}{\partial \theta_i}}{Tr[\Lambda_v \tilde{\rho}_{gibbs}]} = \frac{Tr[\Lambda_v \tilde{\rho}_{gibbs} \partial e^{-H} / \partial \theta_i]}{Tr[\Lambda_v e^{-H}]} - \frac{[\partial e^{-H} / \partial \theta_i]}{Tr[e^{-H}]} \quad (3.1.31)$$

Obteniendo como función de pérdida a:

$$L = - \sum_v P^{datos}(v) (Log P^{1,2,3}(v)) = - \sum_v P^{datos}(v) (Tr[\Lambda_v \tilde{\rho}^{gibbs}(\vec{\omega}(\tau))]) \quad (3.1.32)$$

Lo que puede expresarse como una pérdida de gradiente (ambiguo irreal)

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = - \sum_v P_v^{datos} \frac{\partial Tr[\Lambda_v \tilde{\rho}_{gibbs}]}{\partial \theta_i} \quad (3.1.33)$$

En el diseño de algoritmos de procesamiento de imágenes, se cambia la pérdida de gradiente haciéndolo interactivo con el método QITE

$$\frac{\partial Tr[\Lambda_v \tilde{\rho}_{gibbs}]}{\partial \theta_i} = \frac{\partial Tr[\Lambda_v \tilde{\rho}_{gibbs}]}{\partial(\vec{\omega}(\tau))} \frac{\partial(\vec{\omega}(\tau))}{\partial \theta_i} \quad (3.1.34)$$

Obteniendo un gradiente de parámetros ω, τ, r cuánticos con entrelazados de Qubits:

$$\frac{\partial Tr [\Lambda_v \tilde{\rho}_{gibbs}]}{\partial \theta_i} = \frac{\partial \langle \tilde{\psi}(\tau) | \Lambda_v | \tilde{\psi}(\tau) \rangle}{\partial (\vec{\omega}(\tau))} \quad (3.1.35)$$

Al usar un gradiente Hamiltonianos (H) en 3 variables ω, τ, r que se ortonormaliza en el espacio \mathbb{R}^3 con transformada de Fourier, se construye un método que considera las integraciones por partes, además del conjunto $A\dot{\vec{\omega}}(\tau) = C$ y de Euler $\vec{\omega}(\tau) \simeq \vec{\omega}(\tau - \delta\tau) + \dot{\vec{\omega}}(\tau - \delta\tau)\delta\tau$ (3.1.36).

$AH(\omega) \equiv A(\omega), AH(\omega) \equiv A(\omega)$ donde H se sustituye por Tr obteniéndose:

$$c = \sqrt{2\theta\sqrt{2}\tilde{p}_{gibbs}} \quad (3.1.37)$$

Lo que es equivalente por sustitución: $a = \frac{1}{\sqrt{2p^{gibbs}}}$ (3.1.38)

$$cA\langle 1,2,3 \rangle = \frac{1}{\sqrt{2p^{gibbs}}} \int_{-\infty}^{\infty} Tr [\dot{\vec{\omega}}(\tau - \delta\tau)\delta\tau] \partial\omega + \iiint_1^3 Tr [\Lambda_v \tilde{\rho}_{gibbs} \langle \tilde{\psi}(\tau) | \Lambda_v | \tilde{\psi}(\tau) \rangle] \partial\theta_i(\vec{\omega}(\tau)) \quad (3.1.39)$$

El resultado final al recorrer sobre $i = 1,2,3$.

$$= \frac{1}{\sqrt{2p^{gibbs}}} \int_{-\infty}^{\infty} Tr [\Lambda_v \tilde{\rho}_{gibbs} \langle \tilde{\psi}(\tau) | \Lambda_v | \tilde{\psi}(\tau) \rangle] \delta\tau \partial\theta_i(\vec{\omega}(\tau)) \quad (3.1.40).$$

En conclusión, la ecuación 3.1.40 es una ecuación de onda de eliminación de contornos de imagen, sobre la eliminación de mínimos detalles, lo que es la base para el método VarQITE.

3. 2 IMPLEMENTACION DEL ALGORITMO

Se desarrolló el algoritmo QITE en *python* para definir el concepto del Bosón de Gibbs. Los pasos principales del algoritmo, son:

Primero se presenta el pseudocódigo en base a 4 pasos:

- 1.- Se Inicializa en $H_{\text{estado}|\theta\rangle}$ en la variable inicial θ
- 2.- Se define QITE (*python*) para preparar el $p_{\omega}^{\text{gibbs}}$ y el cómputo de $\frac{\partial \omega}{\partial \theta}$ del estado H_{θ}
- 3.- Compueto del resultado de $\frac{\partial P_{\text{gibbs}}}{\partial \theta}$
- 4.- Se repite actualmente en θ_{inicial} aplicando los pasos del 1 a 4, de acuerdo al método de mecánica moderna definido en pseudocódigo.

El pseudocódigo implementado en Python es el siguiente:

```
Def VarQITE(H_,db,bmax,lanczos=False,psi0=None,omega=None,ncheck=1, Mclachlan = True):
```

```
if(Pauli):
    N      = H_[0][2].shape[1]
    nbit   = int(np.log2(N))
    hdiag  = np.zeros(N,dtype=complex)
    for i in range(N):
        hdiag[i] = Hii(H_,i)
        print i,hdiag[i]

precond = lambda x,e, *args: x/(hdiag-e+1e-4)

def hop(c_):
    return Hpsi(H_,c_)

if(psi0 is None):
    i0      = np.argmin(hdiag)
    psi0    = np.zeros(N,dtype=complex)
    psi0[i0] = 1.0

from pyscf.lib import Mclachlan
epsm0,Um0 = Mclachlan (hop,psi0,precond)
else:
    Hm      = Hmat(H_)
    N       = Hm.shape[0]
    nbit    = int(np.log2(N))
    eps,U   = SciLA.eigh(Hm)
    m0      = np.argmin(eps)
    epsm0   = eps[m0]
    Um0     = U[:,m0]
    zeta    = np.exp(-db*(eps-epsm0))
```

```

fide = 1.0

fout = open('VarQITE.out','w')
fout.write("FCI gs energy %.6f \n" % epsm0)
fout.write("FCI gs wfn \n")
print_state(Um0,nbit,fout)

psi_QITE = psi0[:]

nbeta = int(bmax/db)+1
hvect_LANZ = np.zeros(nbeta+1)
svect_LANZ = np.zeros(nbeta+1)

xv = None
fout.write("VarQITE\n")
for ib in range(nbeta):
    ea,ev = Hmoms(H_,psi_QITE)
    hvect_LANZ[ib] = ea

    if(omega is None): fide = fidelity(psi_QITE,Um0)
    else: fide = LA.norm(psi_QITE[omega])**2

    if(lanczos):
        ea_ = Lanczos_QITE(hvect_LANZ[:ib+1],svect_LANZ[:ib+1],db)
        fout.write("%.6f %.6f %.6f %.6f %.6f \n" % (ib*db,ea,ev,fide,ea_))
    else:
        fout.write("%.6f %.6f %.6f %.6f \n" % (ib*db,ea,ev,fide))
    fout.flush()

    if(ncheck>0): check=(ib%ncheck==0)
    else: check=False
    psi_QITE,dnorm,xv = QITE_step(H_,psi_QITE,db,xv,check)
    svect_LANZ[ib+1] = svect_LANZ[ib]+np.log(dnorm)

fout.write("VarQITE gs wfn \n")
print_state(psi_QITE,nbit,fout)
dump_state(psi_QITE,nbit,'qite.psi')
dump_lanz_vecs(hvect_LANZ[:nbeta],svect_LANZ[:nbeta],'qlanz.vecs')

fout.close()

```

En conclusión, la implementación del algoritmo es efectiva específicamente en la fase Beta, en contraste, la fase Alfa produce resultados similares a los obtenidos mediante la retro propagación, un método que actualmente se encuentra implementado en herramientas de segmentación de imagen de software como Adobe Photoshop, estas herramientas ofrecen la segmentación de imágenes en formatos .jpg o .png, con un nivel de compresión que permite realizar el diseño de forma manual en unas pocas horas, es importante destacar que en el diseño de la imagen para estas aplicaciones se generan usando inteligencia artificial.

Sin embargo, al utilizar el entrelazamiento en la fase Beta, se logra una mayor nitidez y precisión en la información extraída en la fase Gama, la herramienta de selección se enfoca al fondo (background) de la imagen, y en esta fase se aplican las ecuaciones de Dirac o la mecánica clásica de entrelazamientos, por lo tanto, se recomienda emplear la segmentación haciendo referencia al Estado Bosón de Gibbs en la función Beta del algoritmo de mecánica cuántica moderna en VarQite.

4 AMBIENTE DE TRABAJO

Se elaboro la implementación de trabajo en la tesis, fundamentada en los objetivos, en este capítulo se aborda la infraestructura que compone su desarrollo.

4.1 INFRAESTRUCTURA.

Equipo & software	Especificación
Lenovo Ideapad Gaming 3	Intel i5 procesador de 12 Núcleos 4 son del procesador y 8 son de la tarjeta Gráfica Gforce RTX 4700.
Sistema Operativo Windows 10	Como infraestructura estable para programar códigos y algunos softwares estables, además de que no hay o existan errores de sistema y guardar los trabajos de tesis.
Python la versión Reciente 3.12.5	Librerías cuánticas de Cirq, scqubit, qiskit, TensorFlowQ
Servidor web (IBM Quantum) computadora cuántica de servidor	Esta plataforma se trabaja a las 2 am, porque existe poco tráfico para trabajar los algoritmos en la nube, pero desde mayo 2024 se encuentra en remodelación ya que se suspendió el servicio temporalmente
Google Quantum. Computadora cuántica de servicio similar a Google Colab	Al igual que su antecesor qiskit y Google colab, este funciona mejor a las 2am, aunque por el momento acepta los trabajos con qiskit

Tabla 4.1.. Infraestructura de trabajo de Tesis.

La comparativa muestra el algoritmo de imagen. Por supuesto, no existe un trabajo o documento para segmentar con evidencias, pero cuando se trabajan algunos experimentos de imagen, en la tabla 4 se muestra los antecedentes que están hechos con algoritmos de IA, sin embargo, al observar el degradado de la imagen, se observa que dichos procesamientos tienen basura en los contornos de la imagen.

4.2 HERRAMIENTAS DE COMPARATIVA

Pagina	Calidad
Remove bg	RemoveBg pésimo porque saca la imagen sin segmentación solo el objeto, pero el tamaño la reduce al quitar el fondo y hace que se vea pixelado.
Adobe Photoshop	En esta herramienta se tiene que seleccionar y agregar o borrar para que se extraiga el fondo en .png, lo que requiere un promedio de 10 horas de proceso manual para sacar el pixel de la imagen.
Paint 3d	Al igual que Photoshop, esta herramienta requiere de horas para extraer la imagen, además este hace una segmentación, pero, al igual que adobe no genera imágenes de calidad, ya que hay ruido en las imágenes obtenidas.
Photoroom	Deja la imagen del mismo tamaño, es similar a lo que se presenta en esta tesis, sin embargo, en el pixelado, al igual que Paint 3d, también te deja ruido.
Adobe Remove Express	Al igual que sus anteriores, con esta herramienta se obtiene imágenes inestables, por lo que no es una herramienta recomendable.

Tabla 4.2. Aplicaciones de segmentación y extracción



Figura 4.1. Comparativa de la cuántica y photoroom en la misma imagen, aunque lo cuántico casi sale el mismo resultado, el borde con IA tiene errores. (Cortesía del algoritmo Cuántico, cortesía de photoroom).

Esta sección presentó parte del desarrollo realizado con elementos de la Tabla 4.2 y la Figura 4.1, mostrando los resultados de los algoritmos de segmentación. Sin embargo, ninguna de estas herramientas utiliza la infraestructura detallada en la Tabla 4.1.

La mecánica moderna se fundamenta en la ecuación del bosón de Higgs. El estudio de esta teoría incluye el análisis de agujeros negros y el concepto de entropía (análogo a las redes neuronales en el ámbito computacional). Además, se apoya en la mecánica de espacios vectoriales, lo que implica la aplicación de principios de geometría analítica y de álgebra lineal, junto con las leyes de Fourier, que permite

analizar el comportamiento de la constante, aparte de la ecuación de Laplace Z en fase de Beta, y su enfoque en el contorno de la imagen. La implementación de VarQITE, el modelo de algoritmo cuántico de imágenes con circuitos cuánticos, facilita el procesamiento de imágenes.

5 EJECUCIÓN DEL ALGORITMO

Como resultado del desarrollo, se ejecutaron en servidores cuánticos. Para el uso de estos servidores, un primer paso consiste en crear el usuario. Se puede acceder a los servidores siempre y cuando estén disponibles y no haya tráfico de internet. Se recomienda acceder a las 2 a.m. (hora de México) para evitar la congestión de la red.

Processor Name	Processor Type	Qubits	2Q error (best/layered)	CLOPS
ibm_marrakesh	Heron r2	156	7.40e-4/4.06e-3	180K
ibm_fez	Heron r2	156	1.46e-3/4.78e-3	180K
ibm_torino	Heron r1	133	1.47e-3/9.24e-3	200K
ibm_brisbane	Eagle r3	127	3.16e-3/1.49e-2	30K
ibm_kyiv	Eagle r3	127	3.74e-3/1.51e-2	30K
ibm_kawasaki	Eagle r3	127	3.54e-3/1.77e-2	29K
ibm_sherbrooke	Eagle r3	127	2.73e-3/1.80e-2	30K
ibm_brussels	Eagle r3	127	3.31e-3/2.02e-2	37K
ibm_quebec	Eagle r3	127	2.58e-3/2.19e-2	32K
ibm_nazca	Eagle r3	127	3.16e-3/1.49e-2	30K
ibm_renselaer	Eagle r3	127	3.74e-3/1.51e-2	30K
ibm_strasbourg	Eagle r3	127	2.73e-3/1.80e-2	30K

Figura 5.1. Servidores de computadoras cuánticas en línea, (en julio 2025 qiskit dejara de funcionar).

Se utilizan los siguientes ordenadores cuánticos en línea: Kawasaki y Brussels, se pueden acceder a las 2 a.m., ya que es el momento en que están disponibles. El costo por hora de los servidores cuánticos es de aproximadamente 2000 pesos.

Processor Name	Processor Type	Qubits	2Q error (best/layered)	CLOPS
ibm_brisbane	Eagle r3	127	3.16e-3/1.49e-2	30K
ibm_kyiv	Eagle r3	127	3.74e-3/1.51e-2	30K
ibm_sherbrooke	Eagle r3	127	2.73e-3/1.80e-2	30K

Figura 5.2. Imagen de los 3 servidores cuánticos gratuitos, de noche o en la madrugada funcionan excelente.

Por ejemplo, Brisbane es considerado el peor ordenador cuántico, porque tiene datos en picada (se cae con frecuencia) y solo se puede usar durante un tiempo

limitado. Empresas como Amazon y Google usan los servidores todo el día y pagan por un servicio ilimitado.

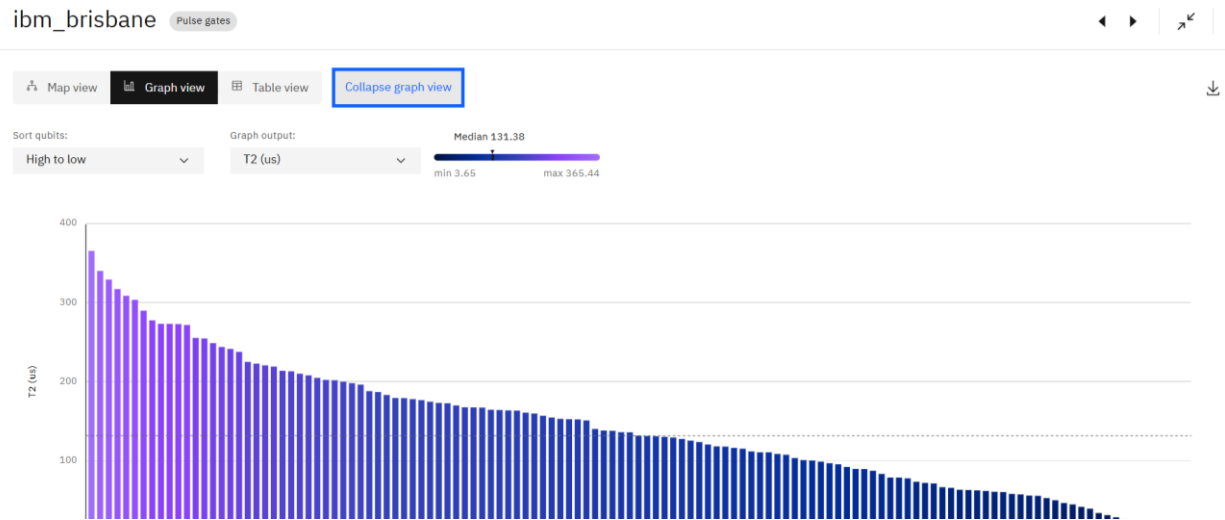


Figura 5.3. Ejecuciones de qubits a las 2am la velocidad que inicia y como termina. Cortesía de Qiskit ibm.

```

1 from qiskit import QuantumCircuit
2 qasm = """
3 OPENQASM 2.0; include "qelib1.inc"; gate rzx(param0) q0,q1 { h q1; cx q0,q1; rz
(param0) q1; cx q0,q1; h q1; } gate ecr q0,q1 { rzx(pi/4) q0,q1; x q0; rzx(-pi/
4) q0,q1; } qreg q[127]; creg c[2]; rz(pi/2) q[0]; sx q[0]; rz(-pi) q[1]; sx q
[1]; rz(-pi) q[1]; ecr q[0],q[1]; x q[0]; measure q[0] -> c[0]; measure q[1] ->
c[0]; sx q[1]; rz(-pi) q[1]; measure q[0] -> c[1]; reset q[0]; measure q[1] -> c
[1]; reset q[1];
4 """
5 circuit = QuantumCircuit.from_qasm_str(qasm)

```

```

1 from qiskit_ibm_runtime import QiskitRuntimeService
2
3 service = QiskitRuntimeService(
4     channel='ibm_quantum',
5     instance='ibm-q/open/main',
6     token='***'
7 )
8 job = service.job('cx2kthhttpsjg0085n0h0')
9 job_result = job.result()
10

```

Figura 5.4. Ejecuciones de códigos de algoritmos cuánticos en imágenes en un servidor cuántico en el internet, muestra el uso a las 2am. Cortesía de IBM implementación de algoritmo cuántico

Para instalar se escribe: `%pip install Qiskit`, en los ordenadores cuánticos y se realiza la compilación vía web.

La Figura 5.4, muestra un manual del servidor cuántico usado como herramienta (actualmente ya se ha realizado otra modificación). Los resultados en la Figura 5.5,

se obtuvieron usando *Matplotlib* para el entrenamiento de ambas mecánicas: la clásica y la moderna.

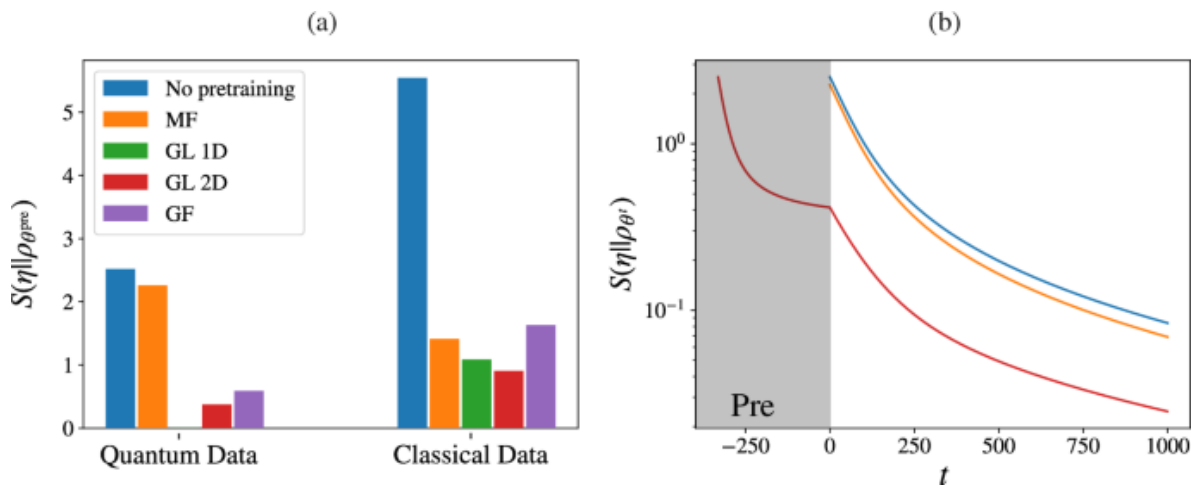


Figura 5.5. Comparativa del algoritmo cuántico de desarrollo comparando (Cortesía de Qiskit uso de su servidor)

El desarrollo del bosón de Gibbs, como se muestra en la gráfica de la Figura 5.5, permite una comparativa entre la mecánica cuántica moderna y la clásica. Se demuestra que el algoritmo VarQITE es superior a la mecánica cuántica clásica, ya que la última es lenta y presenta picos muy altos.

Es importante notar que el comportamiento del bosón de Gibbs se puede observar en un GIF animado, generado en Python, que se encuentra en la Figura 5.6.

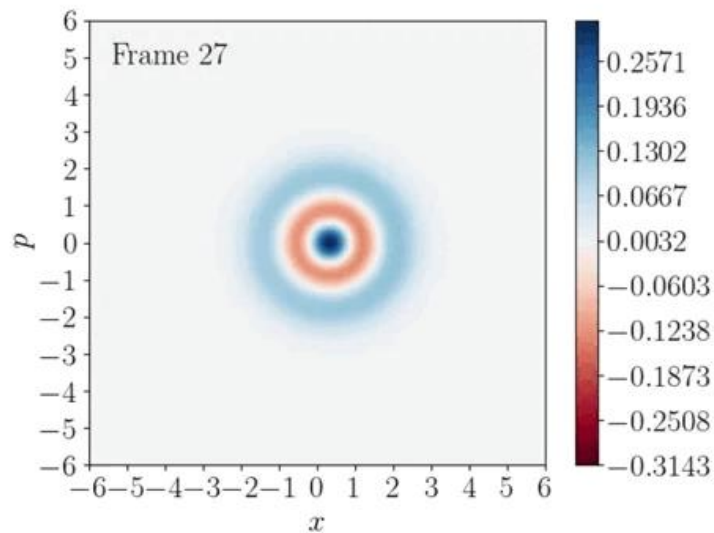


Figura 5.6. Demuestra la ejecución de un bosón de gibbs con la mecánica moderna (python result.), este método puede eliminar todo lo que sean valores y removerlos a tal grado que la segmentación es bruta y no deja bien la Figura, o elimina toda una Figura.



Figura 5.8. Se tiene en la imagen original, una extraída del algoritmo de la segmentación de imagen con mecánica clásica, y la última es con bosón de Gibbs la extracción de la imagen, aún tiene detalles.

En las Figuras 5.6 y 5.8 se observan los posicionamientos de ambos diseños de algoritmos cuánticos y se muestran las superposiciones de los entrelazamientos con las fórmulas de la mecánica cuántica basados en la esfera de bloch.

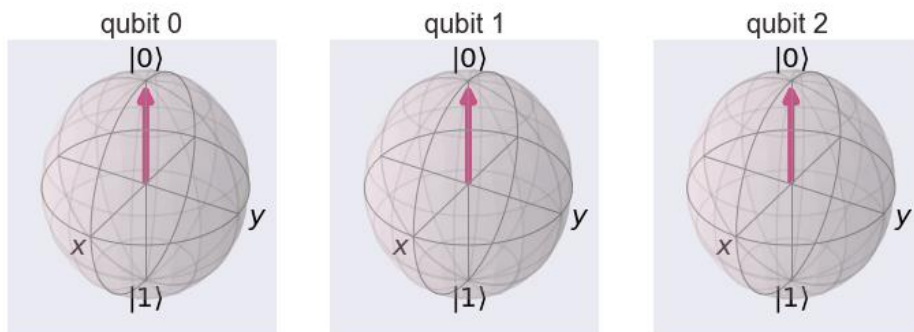


Figura 5.8. Juego de entrelazamientos de qubits en espacio vectorial en \mathbb{R}^3 bloch sphere.

Este desarrollo se realizó en qiskit online, también se trató de implementar en Tianyan 504 Quantum Machine Chinese online server, página de referencia (<https://qc.zdxlz.com/login?lang=en>) en el que se muestra el error y se ilustra en las Figuras 5.9 y 5.10 [63].

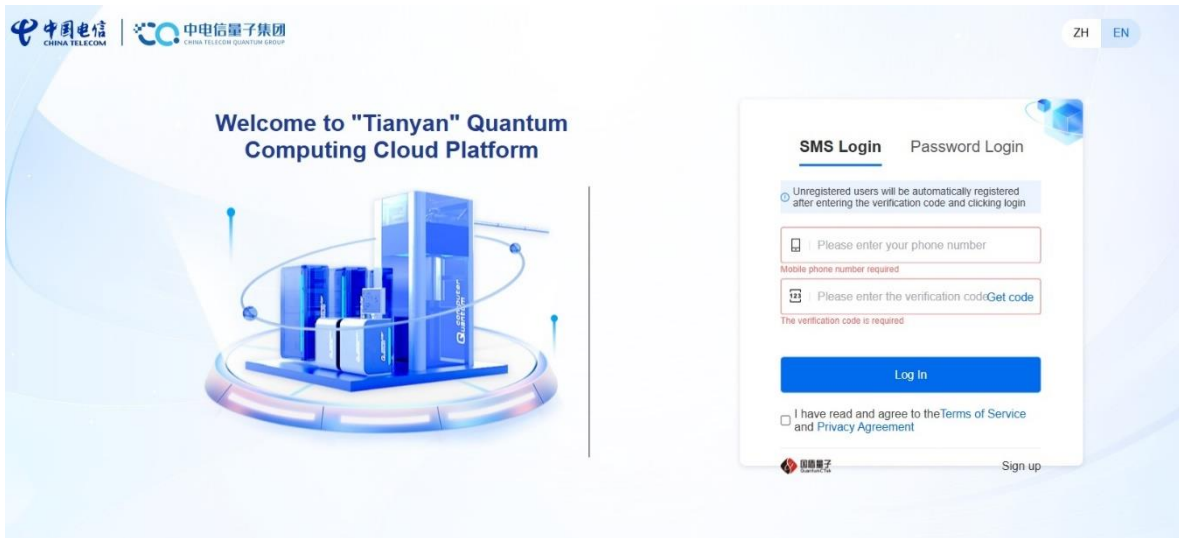


Figura 5.9. En la página del servidor cuántico chino, tal como se observa que pide número y código Chino. (Cortesía Tianyan 504 competer quantum).

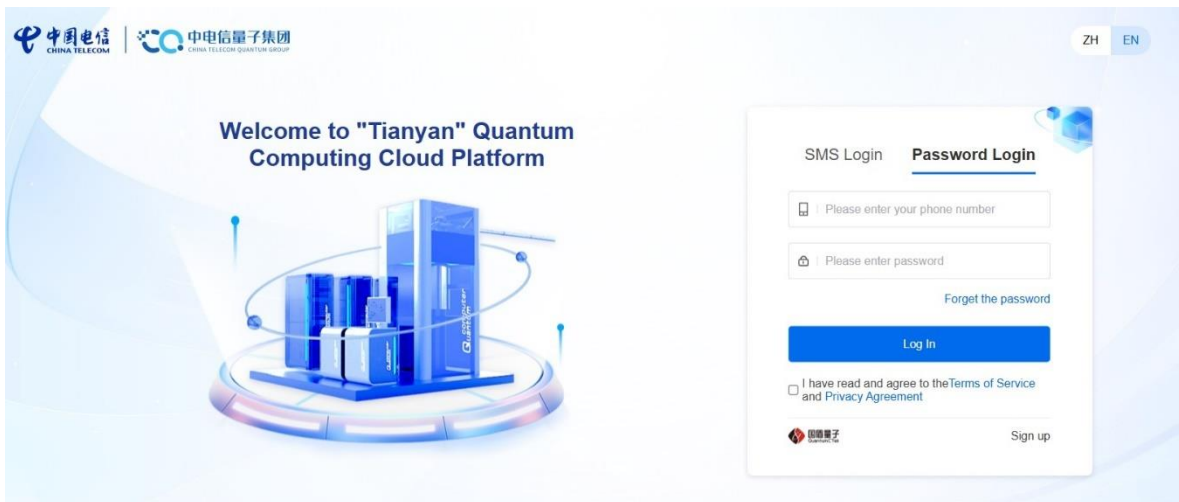


Figura 5. 10. En la página es el servidor cuántico Chino, tal como se observa pide ahora número Chino. (Cortesía Tianyan 504 Computer Quantum).

El servidor cuántico chino opera en dos plataformas: Visual Studio y Python (versiones 3.10 y superiores) y utiliza la librería cqlib, que facilita la programación en su entorno. Al examinar el contenido de cqlib, se observa que su implementación se basa en la infraestructura de NetworkX.

NetworkX es una herramienta de Python que emplea grafos para resolver algoritmos discretos mediante árboles, grafos o diseños de electrónica. Su contraparte, Rustworkx (usada por Qiskit), es una herramienta similar, ya que ambas están desarrolladas en el lenguaje C y utilizan librerías de animación como *GLUT 3D*.

Aunque se programan de manera diferente, se pueden combinar para obtener excelentes controles y circuitos cuánticos.

Como se muestra en la Figura 3.3 del capítulo 3, se aprecia el circuito junto con el desarrollo del bosón de Gibbs en la programación, utilizando dichas herramientas.

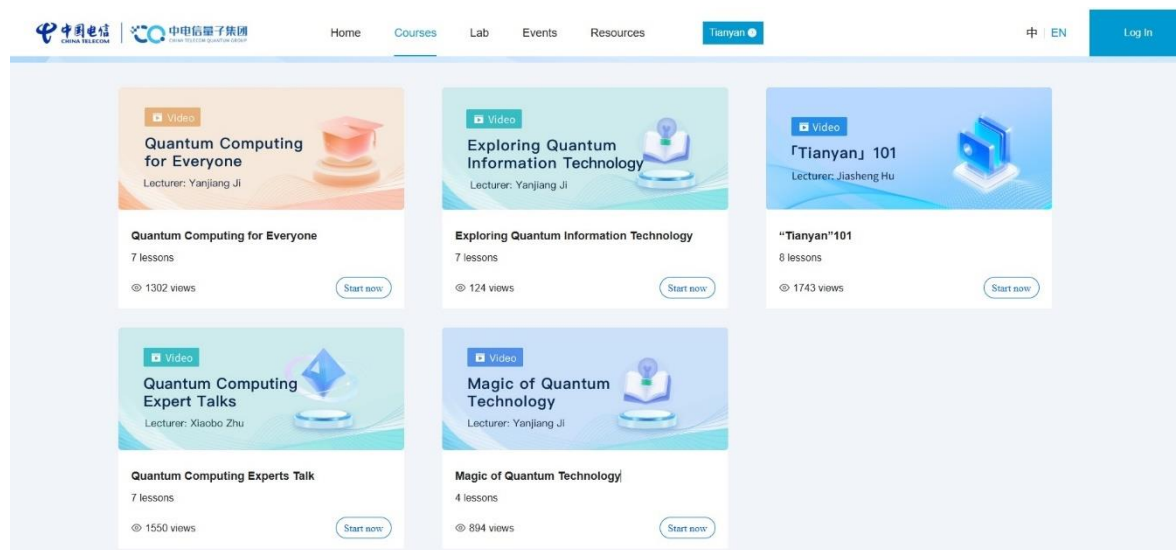


Figura 5.11. Ofrece cursos para usar dichos servidores Tianyan 504 como otros modelos de la computación híbrida por el momento que se usan, claro si observas estos cursos solo están en chino mandarín (cortesía de Tianyan 504 quantum).

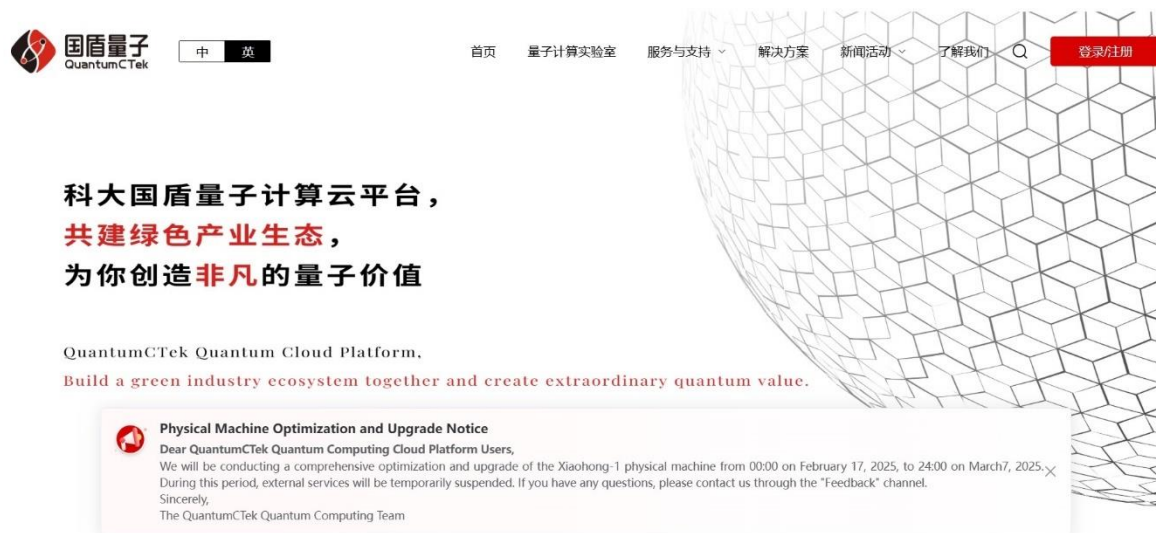


Figura 5.12. Se observa la otra parte que ofrece los servicios cuánticos como producto de desarrollo, aunque no hay nada de formas de pago o desarrollar si abre cada ventana del navegador, no hay mucha información y solo son textos futurísticos para entorpecer para encontrar el servidor cuántico chino (Cortesía de Tianyan 504)

5.1 TIEMPO DE EJECUCIÓN

La ejecución de los algoritmos cuánticos en una computadora convencional y en un servidor cuántico es muy distinta. Se analiza el tiempo basándose en el mismo algoritmo, como se muestra en las Figuras 5.13 y 5.14.

En la Figura 5.13 se aprecia que un servidor cuántico ejecuta el algoritmo en 2 segundos. Por otro lado, la Figura 5.14 muestra que una computadora convencional tarda entre 2 y 8 minutos en procesar el mismo algoritmo. El tiempo de procesamiento de la computadora convencional varía según el tamaño del píxel; por ejemplo, una Figura de 64 megapíxeles puede tardar hasta 8 minutos.

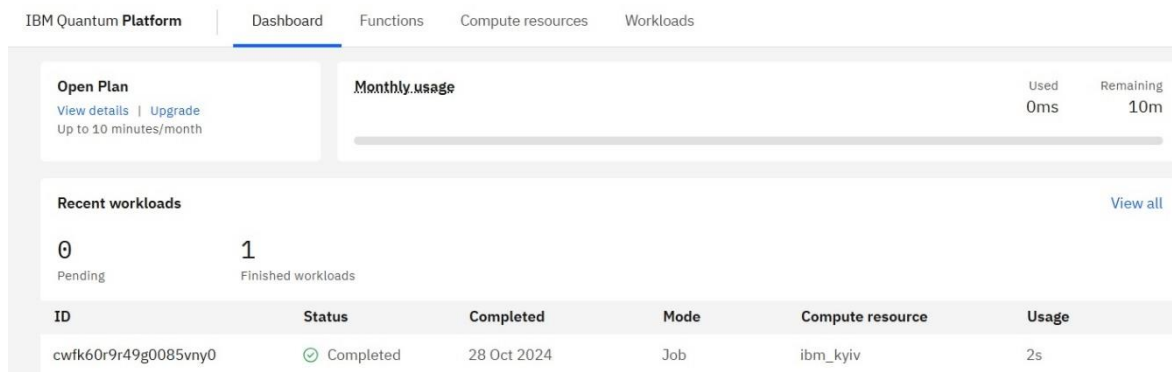


Figura 5.13 Se observa el tiempo de ejecución del algoritmo fue cuando ya estaba implementado el mismo antes de que suspendieran el servicio en este año 2025.

Tiempo de ejecución: 87.55926775932312 segundos

Figura 5.14 El tiempo de ejecución 1:37 segundos, en algunas imágenes el tiempo fue hasta 8 minutos, aclarando que después de terminar dicha ejecución se reinicia la computadora para evitar riesgos de parpadeo.

En ambas figuras se describe el tiempo de ejecución. En un servidor cuántico, cada Figura que se sube a la nube se ejecuta entre 2 y 9 segundos, incluso si la Figura es grande, demostrando su eficacia.

Por otro lado, cuando se trabaja con una computadora convencional, se recomienda ejecutar los programas como administrador para evitar daños en los componentes como la memoria de gráficos, el procesador y los gráficos integrados.

La matemática y la ejecución de los algoritmos son complejas para una computadora convencional, lo que explica el por qué se requieren tarjetas gráficas

Geforce para su desarrollo, las computadoras convencionales no pueden hacer trabajos cuánticos.

Los resultados de la computadora convencional gamer se muestra en la Figura 5.15.

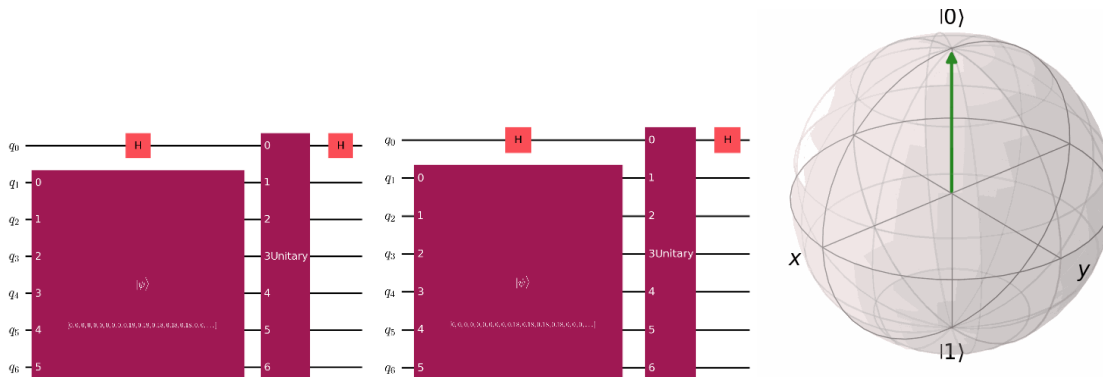


Figura 5.15 Se observan las impresiones del control de Hadamard, Heisenberg se nota en la vista la diferencia de tamaños que tiene cada uno, Se basa en el modelo de Mclachlan. Este método ayuda la impresión de nuestro código, por su respectivo circuito cuántico, además de la esfera cuántica en movimiento, es la estructura de entropía cuántica.

5.2 MÉTRICAS DE EVALUACIÓN

Para evaluar nuestra propuesta, se implementaron 5 algoritmos diferentes, entre ellos, el MSE: $mse = \frac{1}{n} \sum (y_1 - y_2)^2$. Otra implementación es la del perceptrón $y = \sum (w * b + x(imagen))$. Así como la de *K-means*, ya que estos algoritmos son los más adecuados para evaluar las imágenes.

Además de poder evaluar errores del resultado de trabajo de campo, para determinar si la evaluación es correcta, se obtuvieron ceros o números negativos. Por otra parte, si el resultado es 1, esto indica que hay algunos errores en la segmentación de la Figura.

Sin embargo, algunos filtros de error; conocidos como *accuracy*, no son perfectos debido a la programación en *Scikit-learn*, *TensorFlow* y *Keras*. Además, se añadió la división falsa (*lambda*) y la morfología (*beta*) para ver con exactitud el resultado de la Imagen, se obtuvo 0's en algunos casos y 1's también.

Evaluación 1 Ver *Figura 5.16* Ejemplo con Figura en movimiento

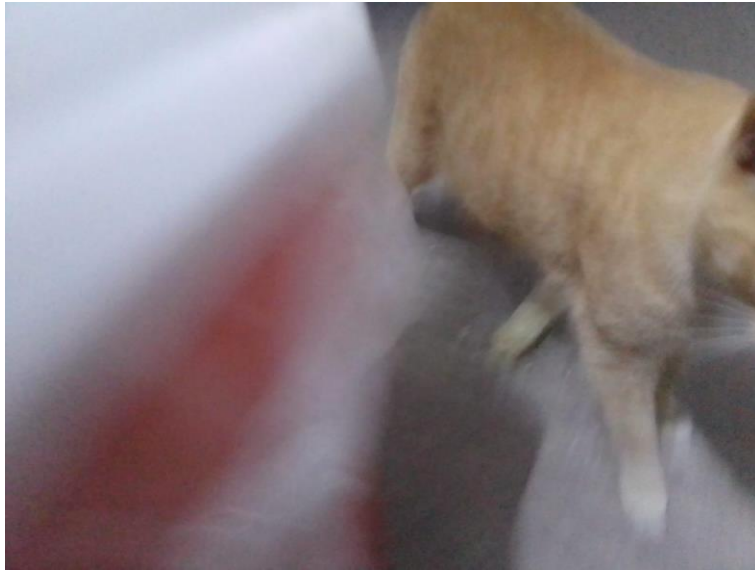


Figura 5.16. Foto original (cortesía de Carlos Andrés Compañero de maestría)



Figura 5.17. Resultado de muestra con IA



Figura 5.18. Resultado con muestra cuántica de segmentación a la Figura 5.16.

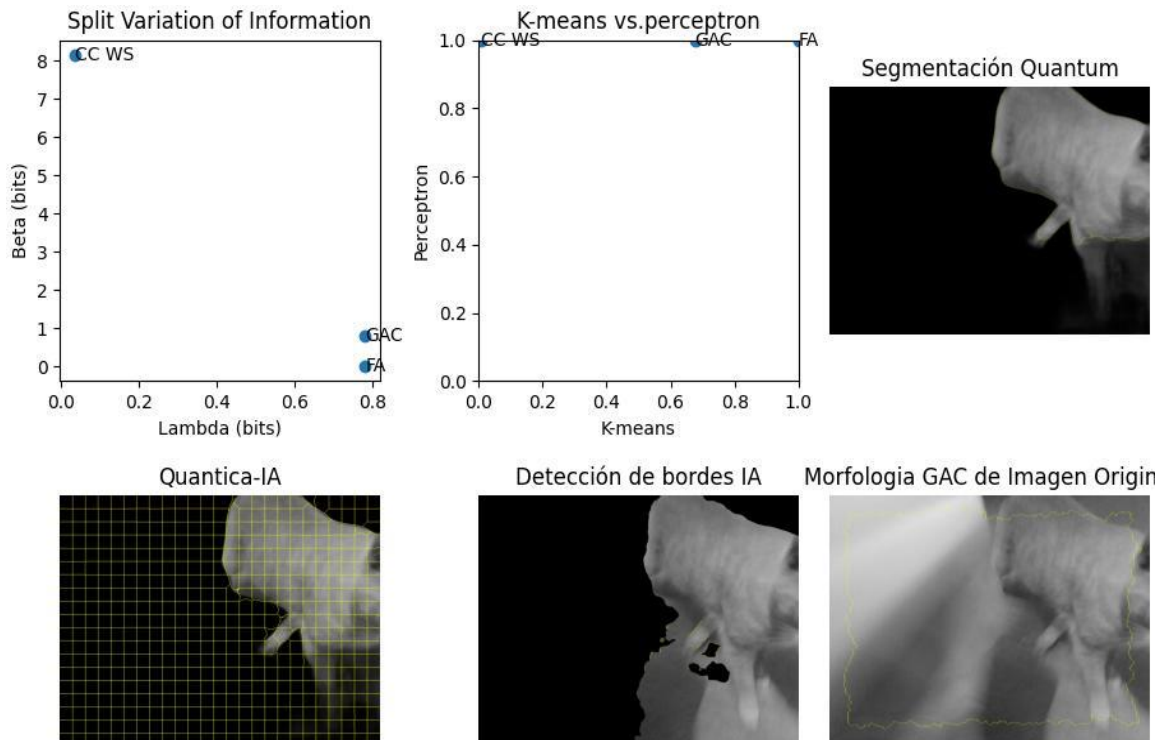


Figura 5.19. Resultado de segmentación de Figura calculado con 5 algoritmos, incluyendo el MSE.

1.- Método: Cuántico

Erro Random RMS: 0.9822709448640803

K-means: 0.008943810220219573

Perceptrón: 1.0

Lambda: 8.136438558819393

Beta: 0.03433634943406241

2.- Método: IA

Erro Random RMS: 0.00022131771309819026

K-means: 0.9995574625151877

Perceptrón: 1.0

Lambda: 0.026583068699082845

Beta: 0.7822583374482526

3.- Método: Figura Original Morfología

Erro Random RMS: 0.1932190150437666

K-means: 0.6761382233978572

Perceptrón: 1.0

Lambda: 0.8149367482378421

Beta: 0.7800856187002968

Resultados del algoritmo MSE

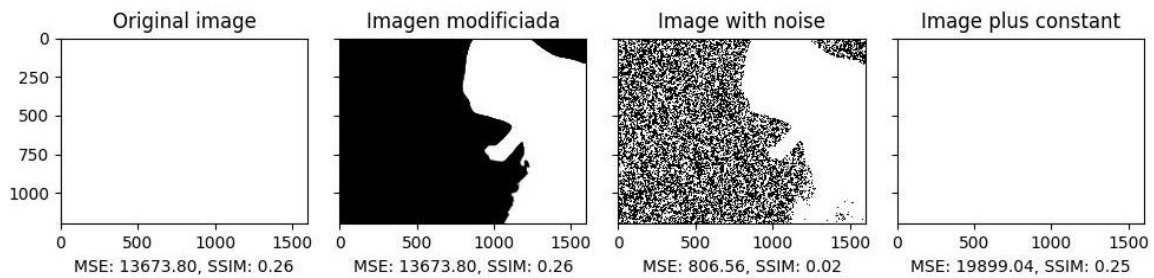


Figura 5.20 La primera imagen no se muestra figura debido a que tiene demasiado ruido, sin embargo, la Figura modificada es la imagen Cuántica, con resultado 0 que quiere decir que está perfecto, vemos que resalta la imagen en comparación de otros modelos.

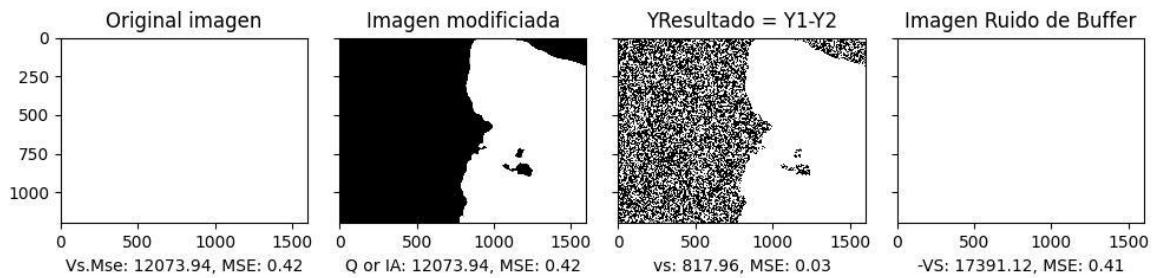


Figura 5.21. En el algoritmo de IA nos da una evaluación, pero el algoritmo Cuántico aún tiene más calidad, aunque ya con mínimas diferencias, puesto que el resultado de IA tiene más entrenamiento de Figura con ruido.

Evaluación 2 de la Figura 5.22 Diente de Leon.



Figura 5.22. Ejemplo 2: Foto de diente de león (captura de foto en casa).



Figura 5.23. resultado de muestra con IA, se muestra que borró todo a su alrededor, dejando sólo la imagen del diente de león



Figura 5.24. Resultado con muestra cuántica de segmentación de Imagen.

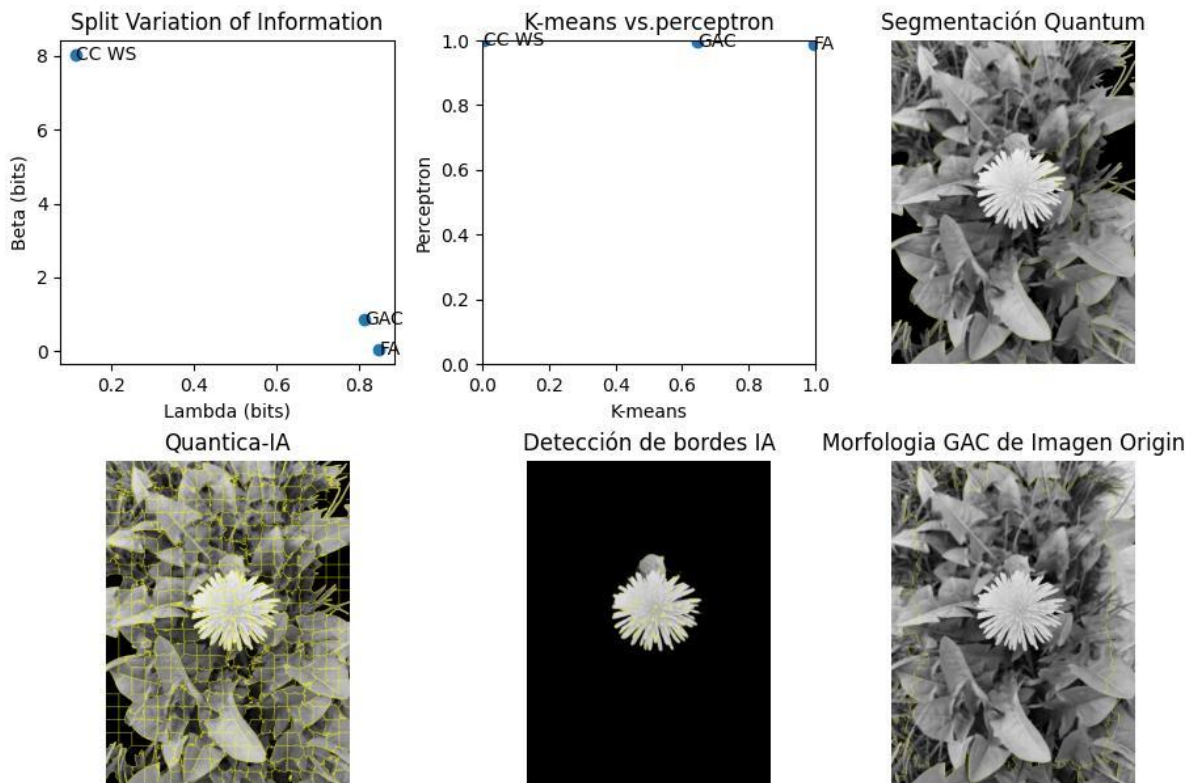


Figura 5.25. Segmentación de 5 algoritmos RMS, K-Means, Perceptrón, Lambda, Beta División Falsa

- 1 Método: Quantico
 - Erro Random RMS: 0.9937110010193051
 - K-means: 0.0031544217549029866
 - Perceptrón: 0.9996788077072777
 - Lambda: 8.021437780949563
 - Beta: 0.1135279452979577
- 2 Método: IA
 - Erro Random RMS: 0.00836580204114623
 - K-means: 0.9936726875975755
 - Perceptrón: 0.9896040549975667
 - Lambda: 0.03916257049492762
 - Beta: 0.8497683418574979
- 3 Método: Figura Original Morfología
 - Erro Random RMS: 0.21702442320444926
 - K-means: 0.6452514524730579
 - Perceptrón: 0.995446156602586
 - Lambda: 0.8507223395841279
 - Beta: 0.8146092586854656

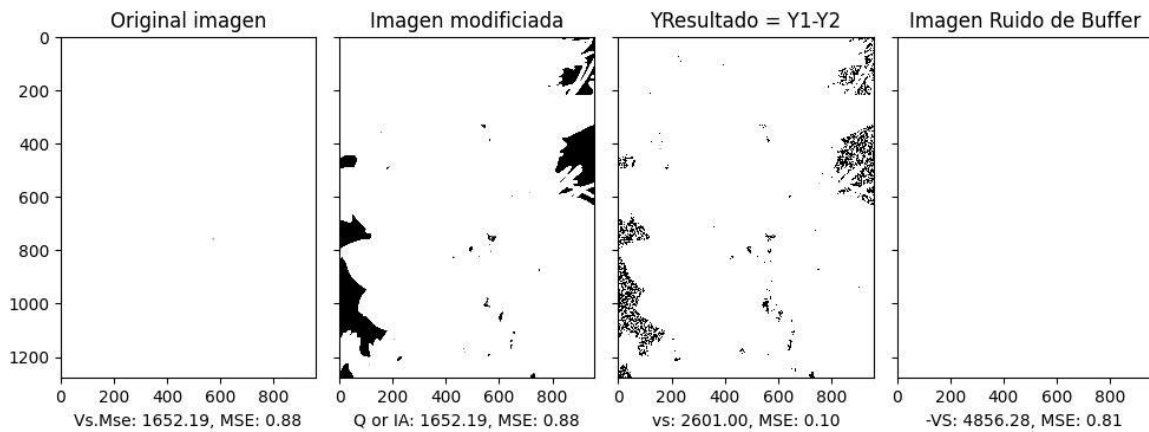


Figura 5.26. Al tener una evaluación de 0.10, indica que el resultado del algoritmo es perfecto.

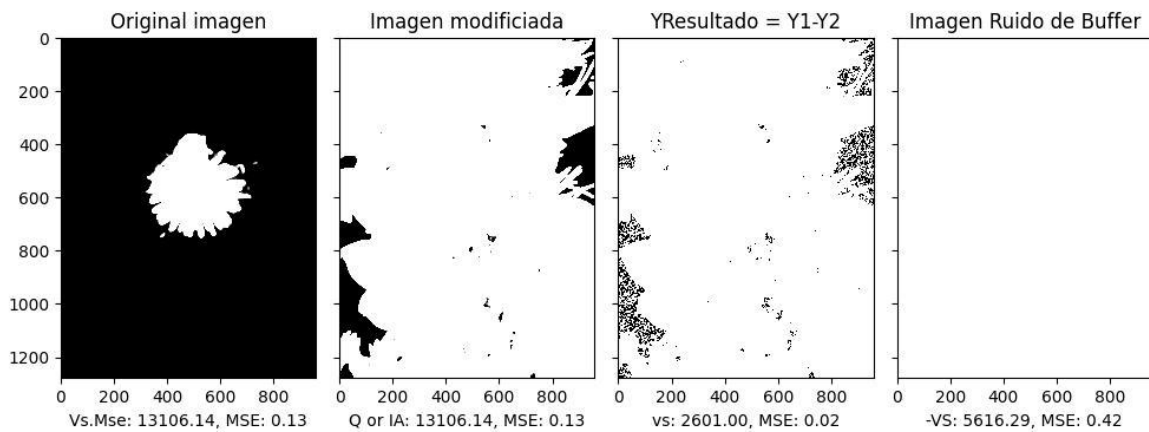


Figura 5.27. Al obtener un resultado de 0.02 (es negativo) quiere decir que nuestro algoritmo tiene mejores resultados.

Ejemplo 3: Figura 5.28 Gato Android



Figura 5.29. Gato en movimiento, imagen con ruido (Cortesía de Carlos Andrés, compañero de maestría).



Figura 5.30. Figura generada usando IA con ruido en los contornos.



Figura 5.31. Resultado con muestra cuántica de segmentación de Imagen.

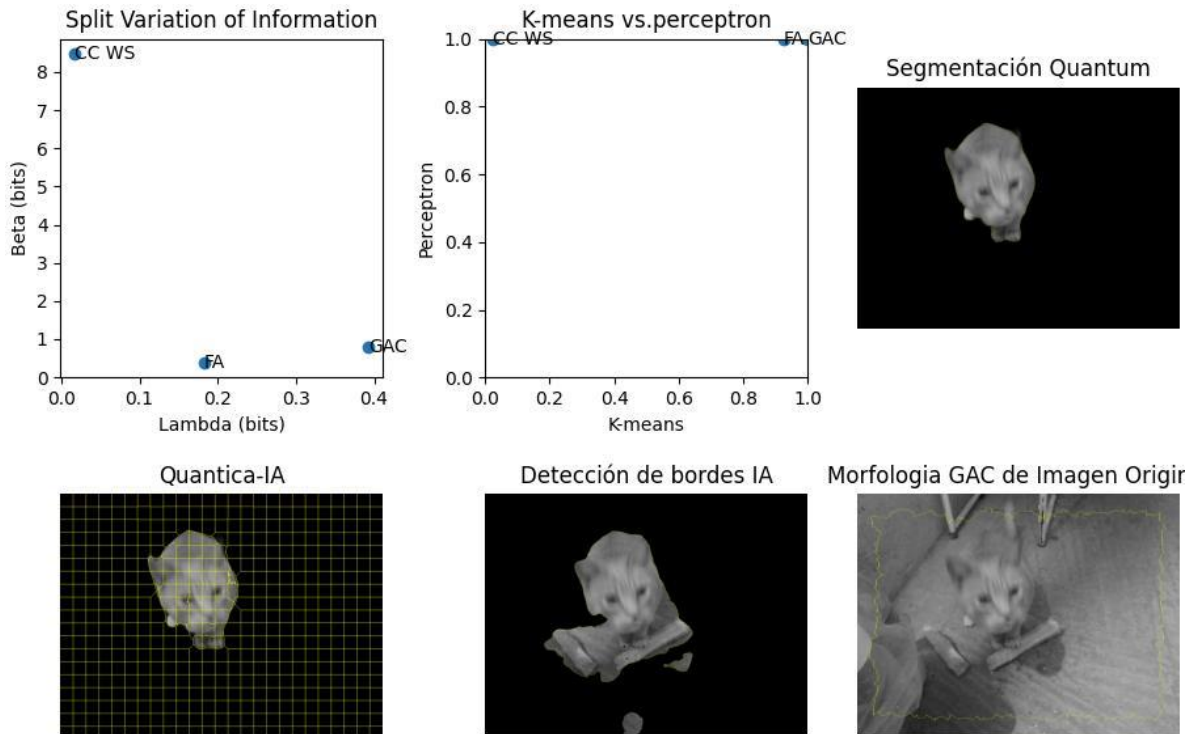


Figura 5.32. Evaluación con los 5 algoritmos como resultado de la segmentación

1 Método: Quantico

Erro Random RMS: 0.954492871068822

K-means: 0.0232833435234237

Perceptrón: 1.0

Lambda: 8.467945947992705

Beta: 0.017708739437472636

2 Método: IA

Erro Random RMS: 0.03881451119214385

K-means: 0.9252715267760357

Perceptrón: 1.0
 Lambda: 0.3947313456893583
 Beta: 0.18287238372954048
 3 Método: Figura Original Morfología
 Erro Random RMS: 0.0
 K-means: 1.0
 Perceptrón: 1.0
 Lambda: 0.7839583178253642
 Beta: 0.39217684680276904

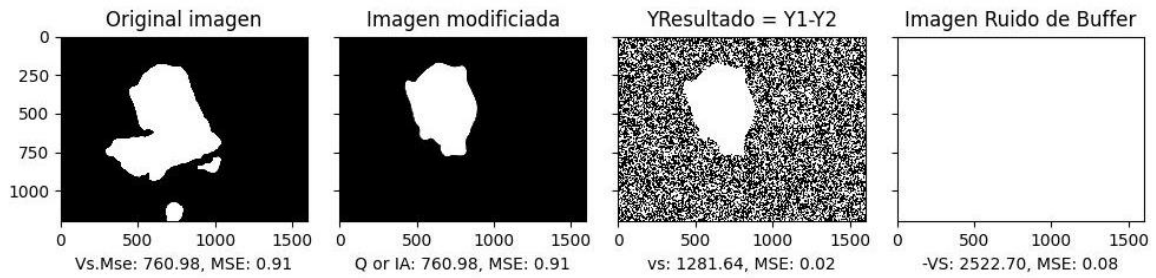


Figura 5.33. Evaluación $mse = YQ - YIA = 0.02$ muy negativa la Figura es decir es excelente resultado

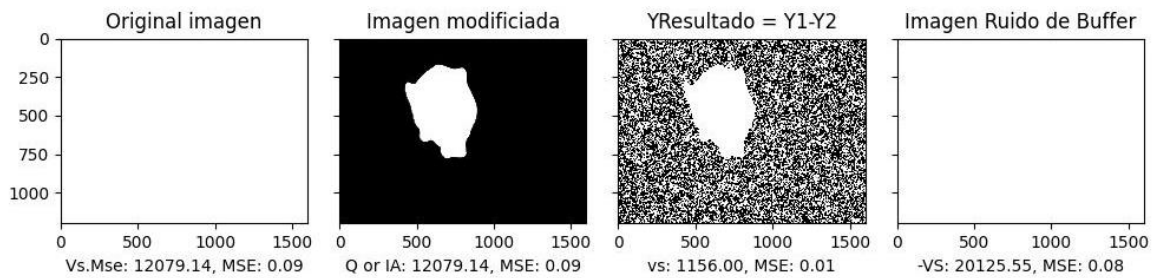


Figura 5.34. Evaluación $mse = YQ - Y foto$ es decir que aquí es muy debajo es 0.01 es perfecto el resultado

Ejemplo 4: Figura 5.35 – Foto de Gato (Tilín)



Figura 5.35. Foto de gato (Tilín).



Figura 5.36. Resultado de muestra con IA.



Figura 5.37. Resultado con muestra cuántica de segmentación de Imagen.

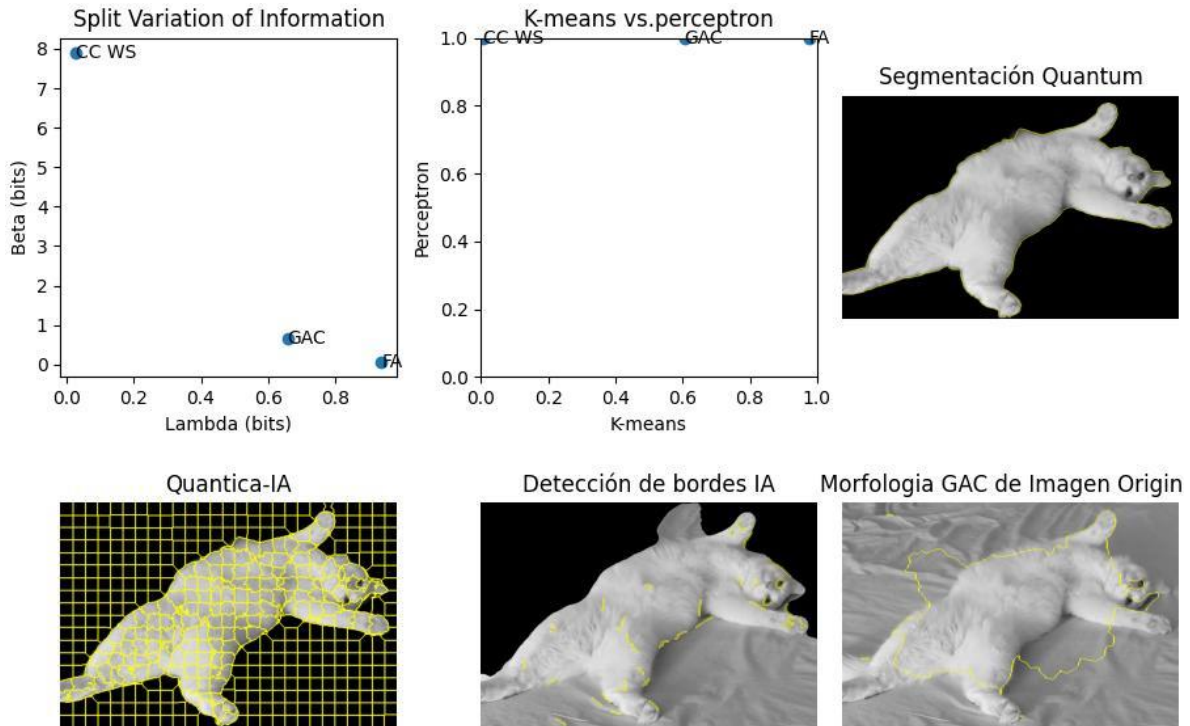


Figura 5.38. Evaluación de 5 algoritmos con sus respectivos resultados en CMD Cuántico, IA, Original.

1 Método: Quantico

Erro Random RMS: 0.9862320442371635
 K-means: 0.0069316955200590885
 Perceptrón: 1.0
 Lambda: 7.8902863026577865
 Beta: 0.026242741584704077

2 Método: IA

Erro Random RMS: 0.011916688374409179
 K-means: 0.9764472935147405
 Perceptrón: 1.0
 Lambda: 0.06991466392260638
 Beta: 0.9388536514298089

3 Método: Figura Original Morfología

Erro Random RMS: 0.24550010540035216
 K-means: 0.6057806750302298
 Perceptrón: 1.0
 Lambda: 0.6394084364011167
 Beta: 0.6581474729518598

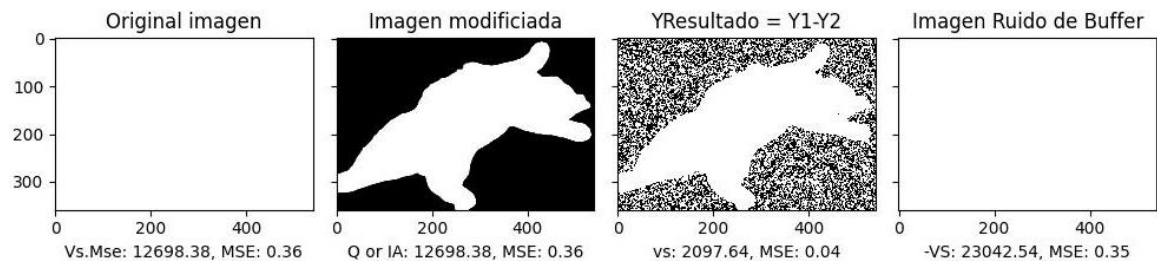


Figura 5.39. $mse = YQ - YIA = 0.04$ es un resultado óptimo de nuestra de segmentación.

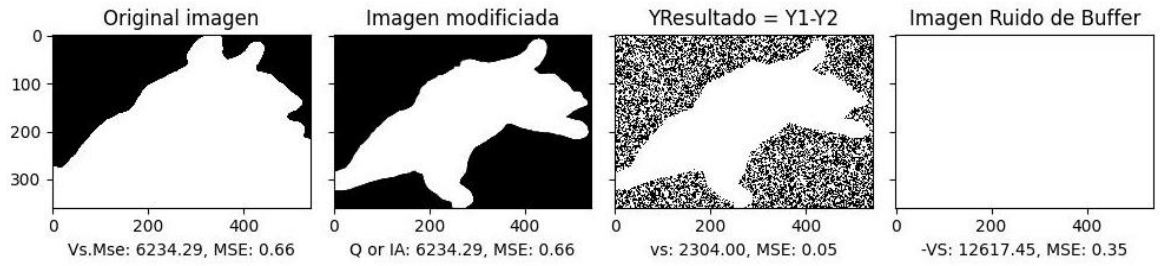


Figura 5.40. $mse = YQ - YIA = 0.05$ es un grado más en la segmentación de evaluación de la Figura 42.

Ejemplo 5: Figura 5.41 - Robot de casa



Figura 5.41. Fotografía de un robot de seguidor de luz.



Figura 5.42 Resultado con muestra cuántica de segmentación de Imagen.

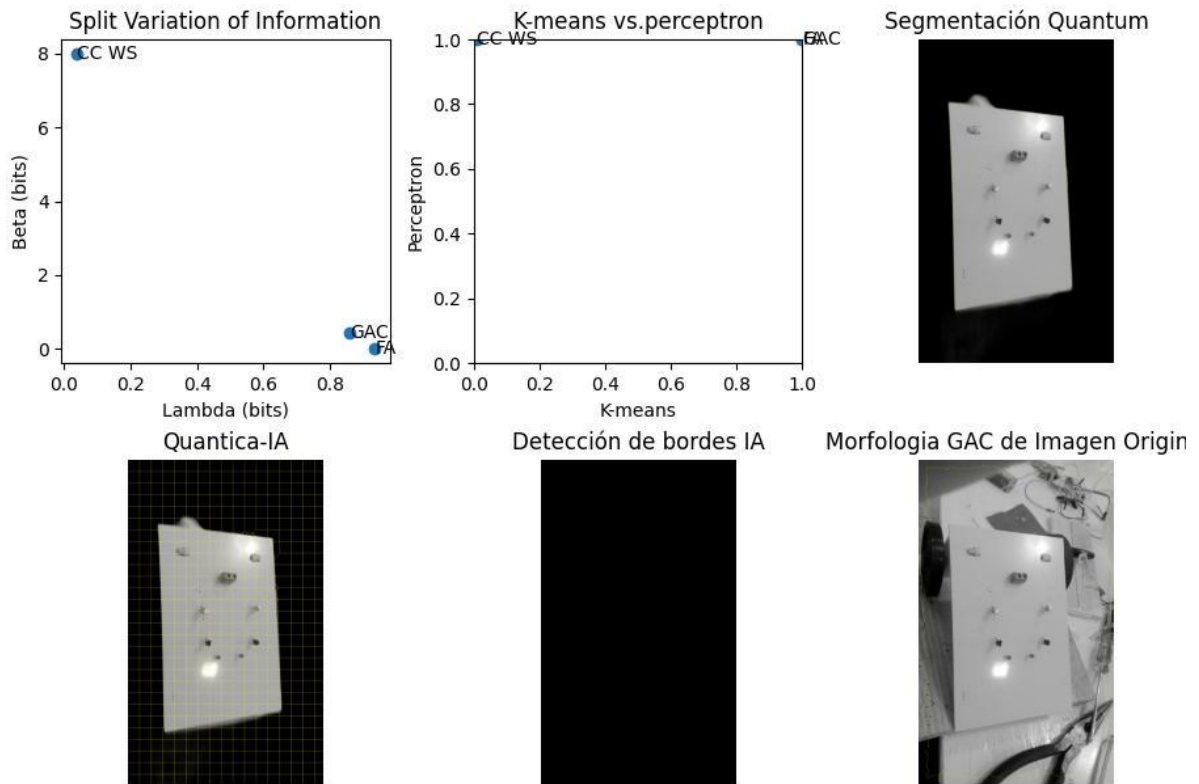


Figura 5.43. Evaluación de segmentación, con resultados a 1 por el ruido de la Figura vacía, y de 0 usando IA.

- 1 Método: Cuántico
 - Erro Random RMS: 0.9879082574951409
 - K-means: 0.006082646147913932
 - Perceptrón: 1.0
 - Lambda: 7.9895769271947
 - Beta: 0.038545165099817036
- 2 Método: IA
 - Erro Random RMS: 0.0
 - K-means: 1.0
 - Perceptrón: 1.0
 - Lambda: 5.600822122852911e-17
 - Beta: 0.9337792175825774
- 3 Método: Figura Original Morfología
 - Erro Random RMS: 0.0
 - K-means: 1.0
 - Perceptron: 1.0
 - Lambda: 0.43345641230121273
 - Beta: 0.8587303349733506

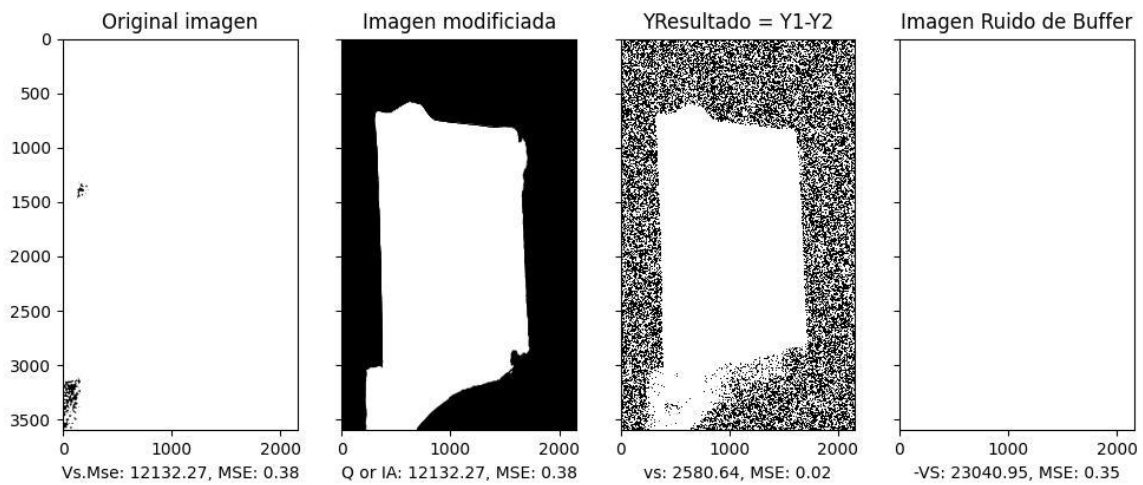


Figura 5.44. Evaluación $mse = YQ$ – Imagen original da el valor optimo 0.02.

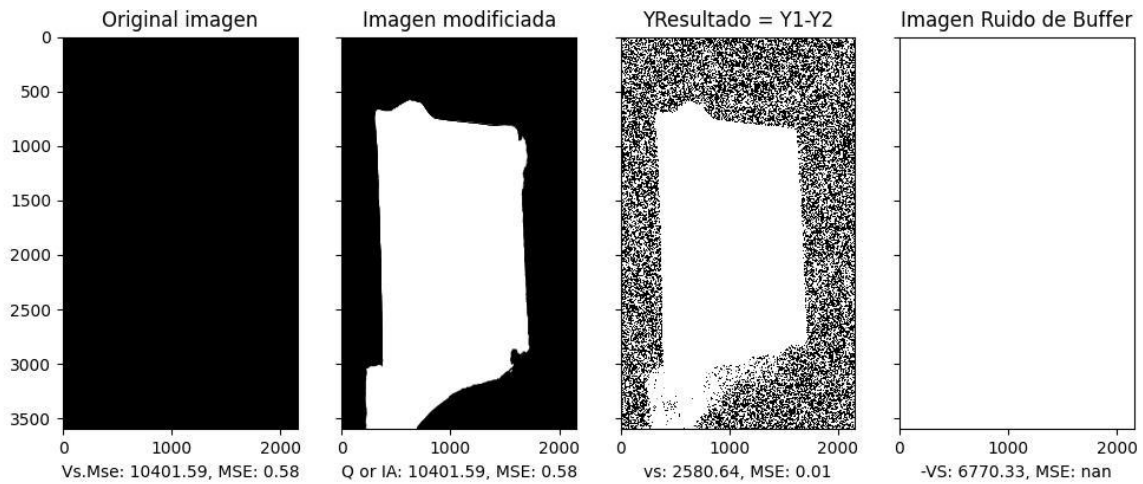


Figura 5.45. $mse = Q - IA$ da un valor óptimo de 0.01, los que indica un resultado excelente.

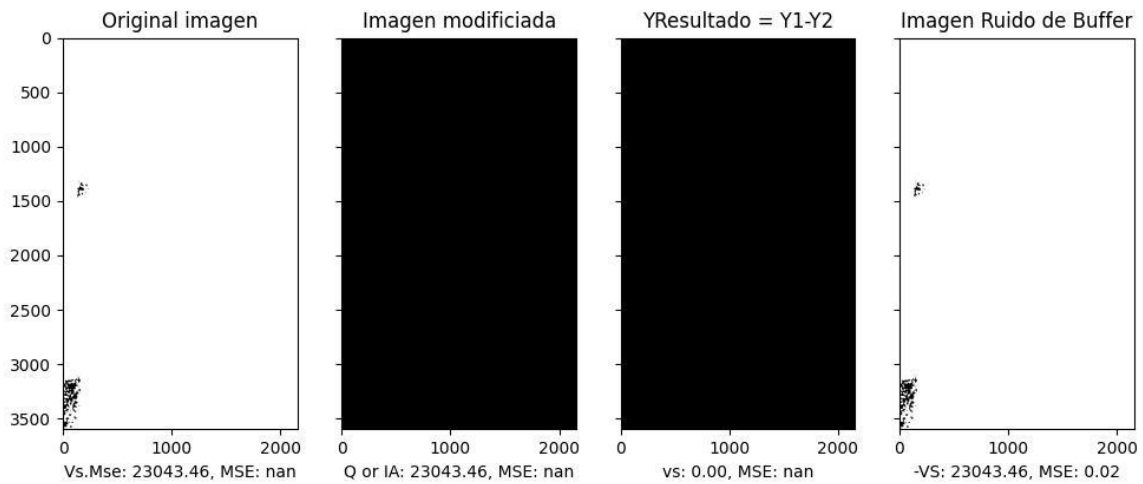


Figura 5.46. $mse = AI$ - Figura original con un caso contrario, presentando errores sin valor - respuesta errónea.

Ejemplo 6: Figura 5.47 – imagen personal



Figura 5.47. Foto en la universidad (BUAP) con una pintura en Oleo (2016).



Figura 5.48. Resultado de muestra con IA con ruido en los bordes



Figura 5.49. Resultado con muestra cuántica de segmentación de Imagen.

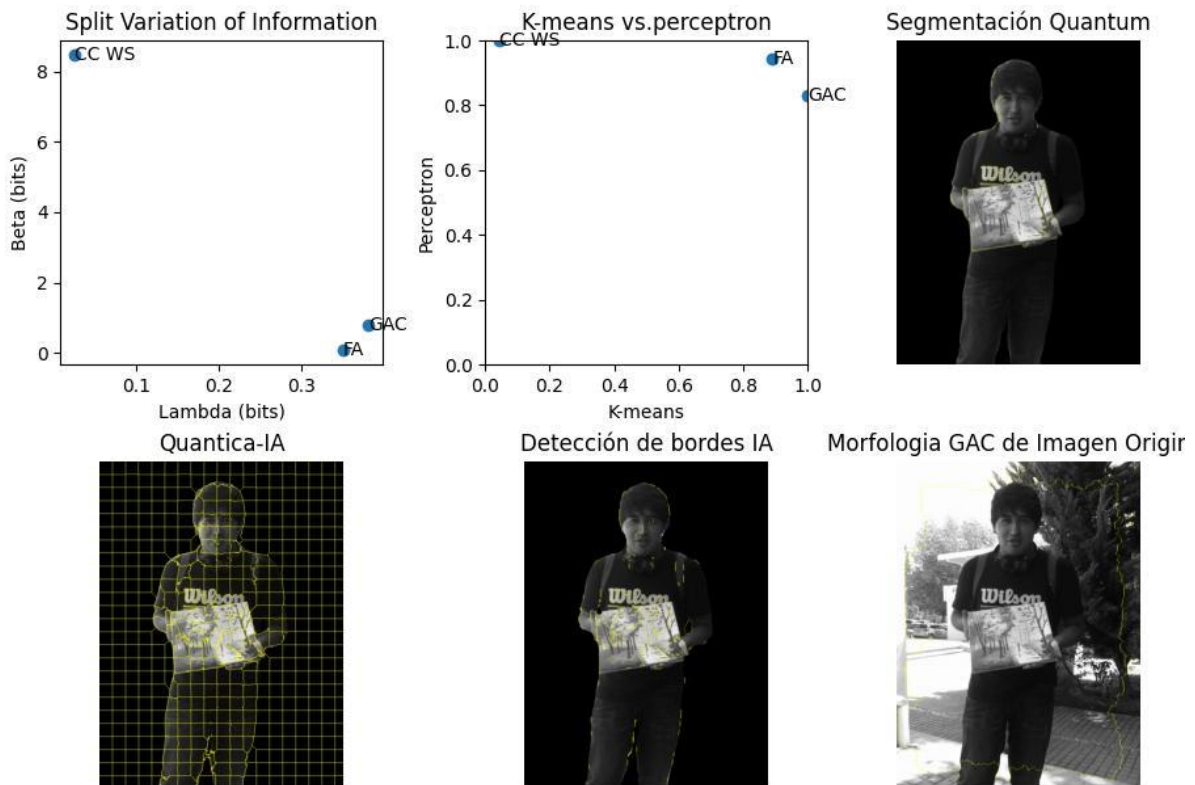


Figura 5.50 Este ejemplo casi obtiene 1's en las 3 métricas de evaluación.

1 Método: Cuántico

Erro Random RMS: 0.9176878890822373
K-means: 0.04292571334177791
Perceptrón: 0.9983020198314508
Lambda: 8.460486294150174
Beta: 0.027040673162211745

2 Método: IA

Erro Random RMS: 0.08356566471116289
K-means: 0.8908033507300671
Perceptrón: 0.9435839706856111
Lambda: 0.08128969865825031
Beta: 0.3496924423148427

3 Método: Figura Original Morfología

Erro Random RMS: 0.09381806965154171
K-means: 0.9999999839882346
Perceptrón: 0.82845764529901
Lambda: 0.7962014079866438
Beta: 0.379939399513111

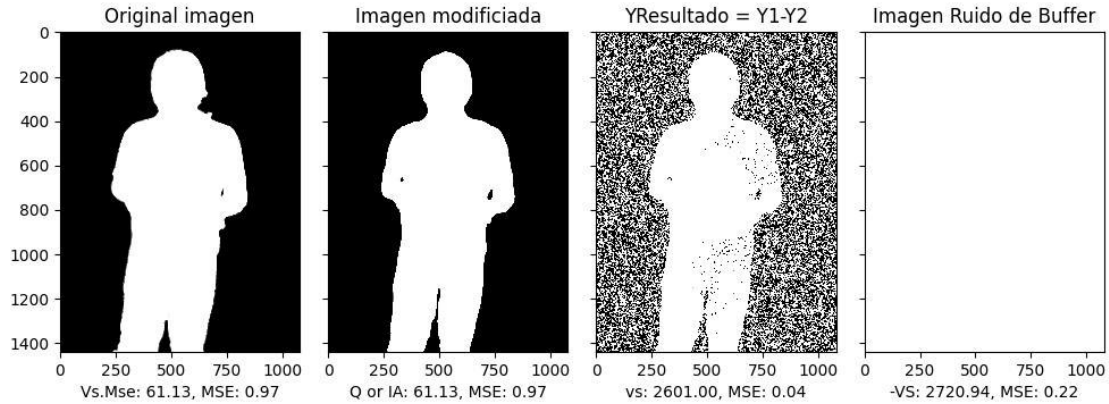


Figura 5.51. $mse = Q - IA$ con resultado de 0.04, indicando que el resultado es óptimo.

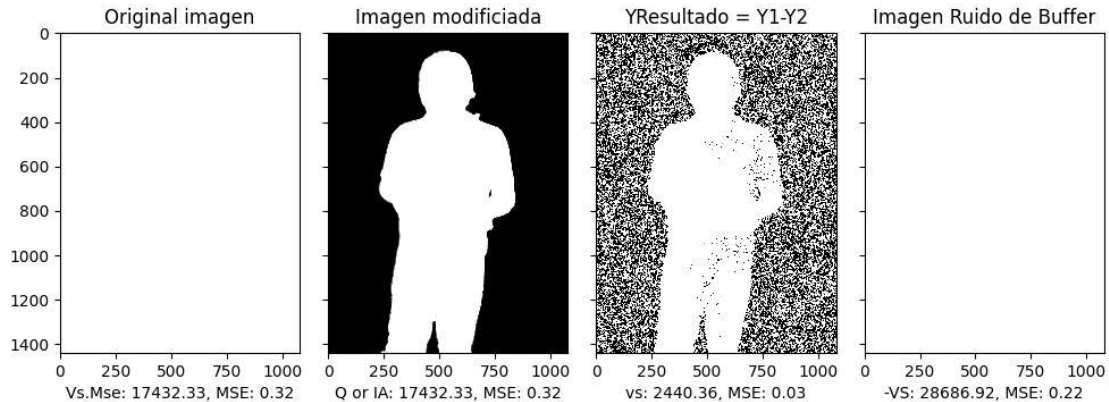


Figura 5.52. $mse = Q - foto$ con resultado de 0.03, que es mejor esta evaluación con respecto a la de $Q-IA$.

Ejemplo 7: *Figura 5.53. Heroína de manga welcome to the outcast's guild*



Figura 5.53. Heroína de manga welcome to the outcasts guild (cortesía Brandon Báez, compañero de maestría).



Figura 5.54.. Resultado de muestra con IA con ruidos en sus alrededores.



Figura 5.55. Resultado con muestra cuántica de segmentación de Imagen.

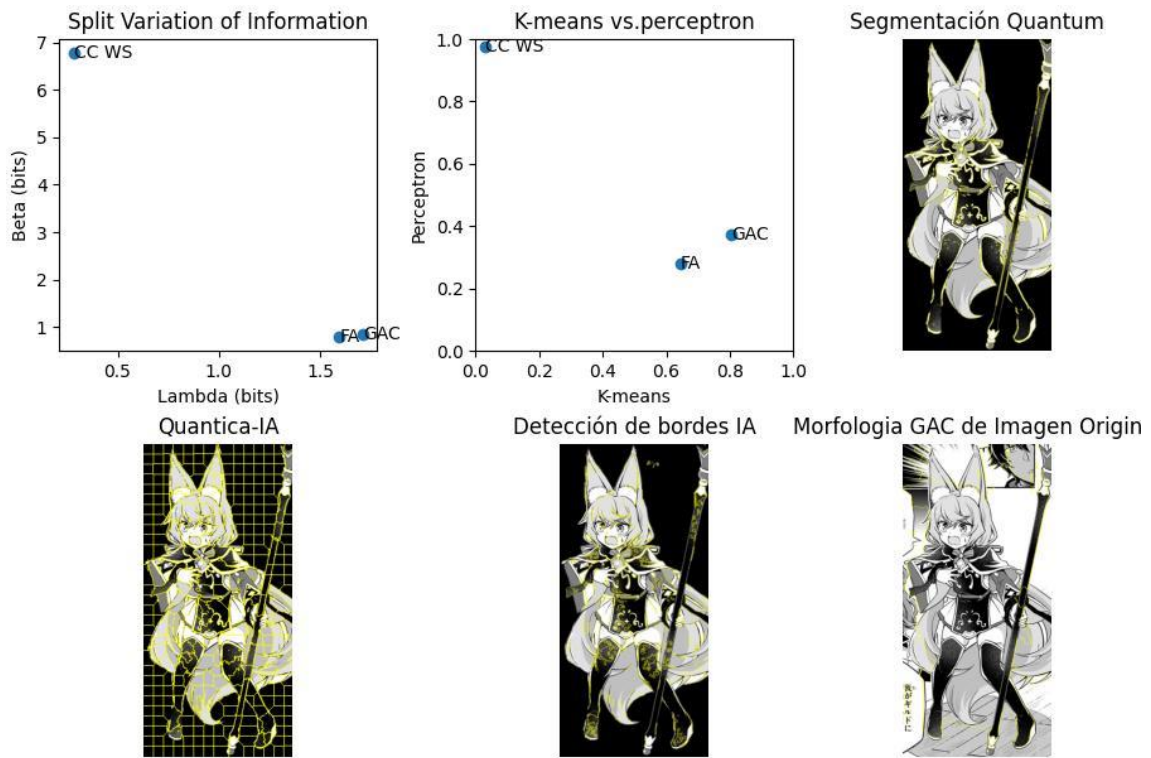


Figura 5.56. Evaluación de la segmentación, evidenciando el funcionamiento de los 5 algoritmos evaluados.

1 Método: Cuántico

Erro Random RMS: 0.9378792543698864

K-means: 0.032079834542769116
 Perceptrón: 0.9773899241707893
 Lambda: 6.768449314486596
 Beta: 0.28368943872148433

2 Método: IA

Erro Random RMS: 0.607192566643203
 K-means: 0.6438345332309257
 Perceptrón: 0.2826168662828583
 Lambda: 0.7947126483700832
 Beta: 1.5931847717344403

3 Método: Figura Original Morfología

Erro Random RMS: 0.4893466098630028
 K-means: 0.8056696491981474
 Perceptrón: 0.3737832333514332
 Lambda: 0.8483037978427987
 Beta: 1.70952588805329

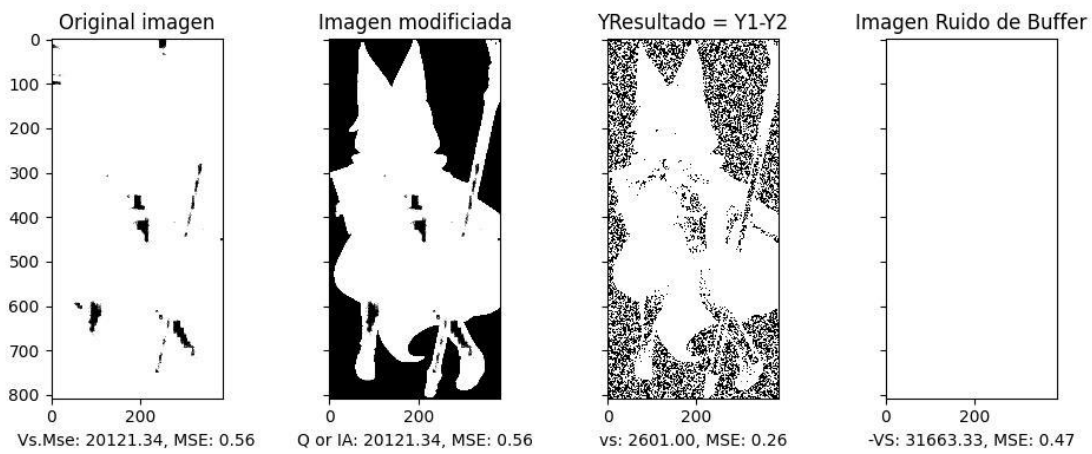


Figura 5.57. Se observa la resta de la $Y_{mse} = YQ - Y_{original}$ da un resultado 0.26

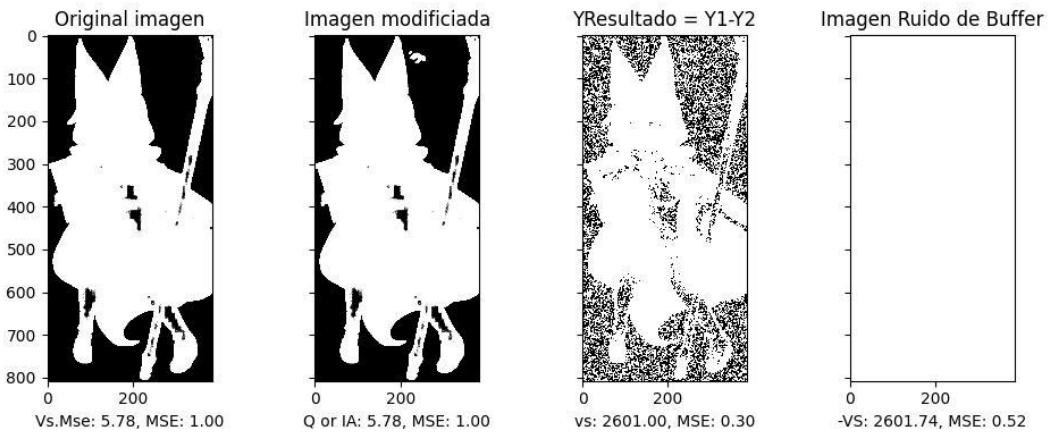


Figura 5.58 En las imágenes se puede observar la resta de la Figura $Y_{mse} = YQ - Y_{IA}$, con un resultado de 0.30.

6 CONCLUSIONES

Este trabajo de investigación teórico-práctico, aborda la implementación de algoritmos cuánticos de segmentación de imágenes. Los algoritmos se implementaron a través de la computación cuántica, aplicando teoría de mecánica cuántica, y se espera para un futuro, desarrollar y aplicar usando computación cuántica moderna, o física moderna y con los nuevos conceptos y teorías sobre los algoritmos cuánticos modernos, así como implementarlos con acceso al hardware de los equipos[61][65].

Este documento muestra el desarrollo de un proyecto de investigación sobre computación cuántica, así como su implementación práctica. El algoritmo resultante se realizó a través de los sistemas de simulación que ofrece IBM. Estos sistemas trabajan con computadoras convencionales con tarjetas de gráficos, puesto que hasta el 5 de julio de 2025 se iniciaría la implementación del ordenador cuántico con acceso en línea, pero su costo ya no sería por hora, sino en lotes de 15 minutos.

Cabe mencionar que este trabajo de investigación, que se desarrolló durante el transcurso de los cursos de maestría, se pudo realizar usando un servidor online, además de la computadora con tarjeta de gráficos *GFORCE*.

El 6 de enero de 2025 en la Mañanera del Pueblo que presenta la presidenta Claudia Sheinbaum, la Dra. Rosaura Ruiz Gutiérrez secretaria en función de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, comentó que: “se continuarán realizando la investigación y formación de especialistas en temas complejos como son las matemáticas de alto nivel, la física cuántica, que hoy son indispensables para las tecnologías actuales como los teléfonos celulares, computadoras, entre otras tecnologías que requieren este tipo de avances”. Lo que da vigencia, y muestra lo estratégico de realizar este tipo de investigaciones, como el que se realizó en este trabajo de tesis de maestría [60].

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Deutsch, D., & Jozsa, R. (1992). Rapid solutions of problems by quantum computation. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 439(1907), 553–558.
<https://doi.org/10.1098/rspa.1992.0167>
- [2] Barenco, A., Benett, C. H., Cleve, R., DiVincenzo, D., Margolus, N., Shor, P., Sleator, T., Smolin, J., & Weinfurter, H. (1995). Elementary gates for quantum computation. *Physical Review A*, 52, 3457–3467.
- [3] Quantum computing. (July, 1997). Andrew Steane, Department of Atomic and Laser Physics, University of Oxford.
- [4] Charles Bennett, Peter W. Shor, *Quantum Information Theory* (September 4, 1998)
- [5] Nielsen, M., & Chuang, I. *Quantum computation and quantum information*. Cambridge University Press. (2000). ISBN 0-521-63503-9. OCLC 174527496.
- [6] Quantum computation and quantum information, WorldCat.org. (2001).
<https://search.worldcat.org/es/title/174527496>
- [7] Rolando, S. B. (s. f.). Computación cuántica. *Revista Boliviana de Física*.
http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892001000200006
- [8] Physics 219 course information. (s. f.).
<https://web.archive.org/web/20190206230543/http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/ph229/#lecture>
- [9] Computación cuántica de NVIDIA. (s. f.). NVIDIA. <https://www.nvidia.com/es-la/solutions/quantum-computing/>
- [10] L. Palacios-Razo ID a, G. H. Sun. (2013). Advancements in quantum computing in Mexico. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/download/11467/10587/>
- [11] Rus, C. (2019, 8 enero). IBM presenta IBM Q System One, el primer ordenador cuántico para uso comercial. Xataka. <https://www.xataka.com/ordenadores/ibm-presenta-ibm-q-system-one-primer-ordenador-cuantico-para-uso-comercial>
- [12] Instituto de Matemáticas de la UNAM. (2019a, 26 de abril). *Curso computación cuántica 1* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=KKwjeJzKezw>
- [13] Instituto de Matemáticas de la UNAM. (2019b, 26 de abril). *Curso de computación cuántica 2* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=Ik4NnZ6NLOk>
- [14] Griffiths, D. J. (2005). Introduction to quantum mechanics. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall. Modelos Atómicos Cuánticos
- [15] Paredes López, M., & Morales Luna, G. B. (2007). *Simulación de Cómputo Cuántico* [Centro de Investigación Y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional]. CINVESTAV.

- [16] Batouche, M. & Meshoul, Souham & Hussaini, A. (2009). Image processing using quantum computing and reverse emergence. *International Journal of Nano and Biomaterials*. 2. 10.1504/IJNBM.2009.027706.
- [17] Akhshani, Afshin & Akhavan Masoumi, Amir & siew-choo, Lim & Hassan, Zainuriah. (2012). An image encryption scheme based on quantum logistic map. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 17. 10.1016/j.cnsns.2012.05.033.
- [18] Moret, V. (2013). *Principios fundamentales de la Computación Cuántica* (1.ª ed., Vol. 1) [Universidad de A Coruña].
- [19] Caraiman, Simona & Manta, Vasile. (2014). Histogram-based segmentation of quantum images. *Theoretical Computer Science*. 529. 46–60. 10.1016/j.tcs.2013.08.005.
- [20] *Computación cuántica*, Nasser Darwish Miranda, (1.ª ed., Vol. 1). (2015). [Universidad de La Laguna, España]
- [21] Caraiman, Simona & Manta, Vasile. (2015). Image segmentation on a quantum computer. *Quantum Information Processing*. 14. 10.1007/s11128-015-0932-1.
- [22] Hua, T., Chen, J., Pei, D. *et al.* Quantum Image Encryption Algorithm Based on Image Correlation Decomposition. *Int J Theor Phys* **54**, 526–537 (2015).
<https://doi.org/10.1007/s10773-014-2245-z>
- [23] Jiang, Nan & Wang, Luo. (2015). Quantum image scaling using nearest neighbor interpolation. *Quantum Information Processing*. 14. 1559-1571. 10.1007/s11128-014-0841-8.
- [24] *Computación Cuántica* (1.ª ed.). (2016). ETS de Ingeniería de Sistemas Informáticos Universidad Politécnica de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid.
- [25] Pastor Díaz, U. (2017). *ALGORITMOS FUNDAMENTALES EN COMPUTACIÓN CUÁNTICA* (1.ª ed.). [Dep. Física Aplicada III Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla España].
- [26] Johansson, N.; Larsson, JÅ. (2017). «Efficient classical simulation of the Deutsch–Jozsa and Simon's algorithms». *Quantum Inf Process* (2017) 16: 233. Bibcode:2017QuIP...16..233J. doi:10.1007/s11128-017-1679-7.
- [27] Peña, R. (2019). *Introducción a los algoritmos cuánticos*. Universidad Complutense de Madrid.
- [28] Shi, Y., Kahn, J., Niu, B., Fei, Z., Sun, B., Cai, X., Francisco, B. A., Wu, D., Shen, Z., Xu, X., Cobden, D. H., & Cui, Y. (2019). Imaging quantum spin Hall edges in monolayer WTe₂. *Science Advances*, 5(2). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat8799>
- [29] Álvarez Carrasco, J., & Díaz Fernández, J. I. (2020). *Computación cuántica con qubits superconductores: la transmisión*. Universidad de Oviedo.
- [30] Stokes, J., Izaac, J., Killoran, N., & Carleo, G. (2020). Quantum Natural Gradient. *Quantum*, 4, 269. <https://doi.org/10.22331/q-2020-05-25-269>

- [31] Yuan, S., Wen, C., Hang, B., & Gong, Y. (2020a). The dual-threshold quantum image segmentation algorithm and its simulation. *Quantum Information Processing*, 19(12). <https://doi.org/10.1007/s11128-020-02932-x>
- [32] Yuan, S., Wen, C., Hang, B., & Gong, Y. (2020b). The dual-threshold quantum image segmentation algorithm and its simulation. *Quantum Information Processing*, 19(12). <https://doi.org/10.1007/s11128-020-02932-x>
- [33] Qiskit. (2021, October 5). *Lecture 10.1 - Advanced QML Algorithms* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=yzcWlz5pfOs>
- [34] Singh, P., & Bose, S. S. (2021). A quantum-clustering optimization method for COVID-19 CT scan image segmentation. *Expert Systems With Applications*, 185, 115637. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115637>
- [35] *Introducción A La Computación Cuántica* (1.^A Ed.). (2022). [Facultad De Matemáticas Universidad Complutense De Madrid]. Universidad Complutense De Madrid.
- [36] Juan Cano Pradas, J., & Dieulefait, L. V. (2022). *Algunas variantes del algoritmo cuántico de Shor*. Universidad de Barcelona.
- [37] Iglesias González, S. (2022). *Computación cuántica: el algoritmo de Shor*. Universidad Santiago de Compostela.
- [38] Carvajal, A. G., Gutiérrez, J. H., & Villegas, J. A. J. (2022). *Simulador de computación cuántica de altas dimensiones*. <https://doi.org/10.22517/9789587226539>
- [39] Contreras Santillan, N. Y., & Gonzalez Quirino, G. (2022). *Simulación de la Compuerta Cuántica Cnot en Ibm-Q*. Universidad Autónoma del Estado de México.
- [40] Sabry, F. (2022). *Computación cuántica: ¿Por qué es tan difícil explicar de qué se trata la computación cuántica?* One Billion Knowledgeable.
- [41] Treinish, Matthew & Carvalho, Ivan & Tsilimigkounakis, Georgios & Sá, Nahum. (2022). rustworkx: A High-Performance Graph Library for Python. *Journal of Open Source Software*. 7. 3968. 10.21105/joss.03968 https://www.researchgate.net/figure/Quantum-circuit-and-its-equivalent-representation-as-a-DAG-of-instructions-built-by_fig1_365059456.
- [42] Nguyen, T., Paik, I., Sagawa, H., & Thang, T. C. (2022). Quantum Machine Learning with Quantum Image Representations. *2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*. <https://doi.org/10.1109/qce53715.2022.00142>
- [43] Pitsch, C., Walter, D., Gasparini, L., Bürsing, H., & Eichhorn, M. (2023). 3D quantum ghost imaging. *Applied Optics*, 62(23), 6275. <https://doi.org/10.1364/ao.492208>
- [44] Markidis, S. (2023). Programming Quantum Neural Networks on NISQ Systems: An Overview of Technologies and Methodologies. *Entropy*, 25(4), 694. <https://doi.org/10.3390/e25040694>
- [45] Coopmans, L., Kikuchi, Y., & Benedetti, M. (2023). Predicting Gibbs-State Expectation Values with Pure Thermal Shadows. *PRX Quantum*, 4(1). <https://doi.org/10.1103/prxquantum.4.010305>

- [46] Deschamps, J. (2023). *Computación cuántica: circuitos y algoritmos*. Marcombo.
- [47] *COMPUTACIÓN CUÁNTICA y LA IA: ¿PARADOJA o PARADIGMA MUNDIAL?* (2023). Abner Alejandro Campos Diaz.
- [48] Peral García, D., Cruz Benito, J., & García Peñalvo, F. J. (2023). *Desarrollo de herramientas y métodos automatizados para la simulación y mejora de procesos de computación cuántica basados en inteligencia artificial* [Expert Systems and Applications Laboratory - ESALAB, Faculty of Science, Universidad de Salamanca]. Universidad de Salamanca.
- [49] Konar, D., Bhattacharyya, S., Gandhi, T. K., Panigrahi, B. K., & Jiang, R. (2024). 3-D Quantum-Inspired Self-Supervised tensor Network for volumetric segmentation of medical images. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 1–14. <https://doi.org/10.1109/tnnls.2023.3240238>
- [50] Coopmans, L., Benedetti, M. On the sample complexity of quantum Boltzmann machine learning. *Commun Phys* **7**, 274 (2024). <https://doi.org/10.1038/s42005-024-01763-x>
- [51] Cameron Cianci, Lea F. Santos, Victor S. Batista. Subspace-Search Quantum Imaginary Time Evolution for Excited State Computations. *Journal of Chemical Theory and Computation* 2024, 20 (20) , 8940-8947. <https://doi.org/10.1021/acs.jctc.4c00915>
- [52] Chien-Hung Cho, Jheng-Wei Su, Lien-Po Yu, Ching-Ray Chang, Pin-Hong Chen, Tzu-Wei Lin, Shin-Hong Liu, Tsung-Hui Li, Ying-Yuan Lee. Efficient Exploration of Phenol Derivatives Using QUBO Solvers with Group Contribution-Based Approaches. *Industrial & Engineering Chemistry Research* **2024**, 63 (10) , 4248-4256. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c03331>
- [53] González, A. (2024, 1 octubre). *El ordenador cuántico más potente del mundo cuesta 90 millones de euros y, a diferencia de una patata,...* 3DJuegos. <https://www.3djuegos.com/juegos/doom/noticias/ordenador-cuamico-potente-mundo-cuesta-90-millones-euros-a-diferencia-patata-le-imposible-ejecutar-doom#:~:text=Elden%20Ring-.El%20ordenador%20cu%C3%A1ntico%20m%C3%A1s%20potente%20del%20mundo%20cuesta%2090%20millones,le%20es%20imposible%20ejecutar%20Doom>
- [54] *Application of Quantum Machine Learning in a Higgs Physics Study at the CEPC*. (s. f.). <https://arxiv.org/html/2209.12788v2>
- [55] Jover Galtier, L. C., & Hernando Carrillo, F. J. (2024). *Códigos: clásicos y cuánticos*. Universidad Jaime I, Valencia España.
- [56] Jiménez Jiménez, J. J., Regueira Fernández, A., & Sánchez Vélez, J. J. (2024). *Computación cuántica: circuitos y algoritmos* (1.ª ed.) [Universidad Complutense de Madrid]. Marcombo.
- [57] Rodríguez, D. (2024). *MANUAL DE COMPUTACIÓN CUÁNTICA: Introducción, Fundamentos y Aplicaciones Prácticas*. Diego Rodríguez.

- [58] Portugal, R. (2024). Algoritmos cuánticos básicos. *arXiv [Quant-Ph]* . Recuperado de <http://arxiv.org/abs/2201.10574>
- [59] Chen, C., Anshu, A., & Nguyen, Q. T. (2025, April 3). *Learning quantum Gibbs states locally and efficiently*. arXiv.org. <https://arxiv.org/abs/2504.02706>
- [60] Sheinbaum Pardo Claudia, mañanera 6 de Enero 2025 SECIHTY y SEP <https://www.youtube.com/watch?v=O35dnBmqen0> min 36:55 mención sobre la Computación Cuántica a todas las licenciaturas del país
- [61] *D-Wave Quantum | Quantum Realized*. (s. f.). <https://www.dwavequantum.com/>
- [62] *Fujitsu Quantum : Fujitsu Global*. (s. f.). FUJITSU Research And Development. <https://www.fujitsu.com/global/about/research/technology/quantum/>
- [63] 中电信“天衍”量子计算云平台. (s. f.). <https://qc.zdxlz.com/home?lang=en>
- [64] *Qiskit | IBM Quantum Computing*. (s. f.). <https://www.ibm.com/quantum/qiskit>
- [65] *Home*. (s. f.). RTX. <https://www.rtx.com/>
- [66] Acha, M. (2025). *Computación cuántica: La carrera final ha comenzado*. RedUSERS.
- [67] Moctezuma Mendoza, M. (2022). Sistema de Control Para Robot Autónomo. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- [68] *TensorFlow Quantum*. (s. f.). TensorFlow. <https://www.tensorflow.org/quantum?hl=es-419>