

Algoritmos para el análisis de sistemas dinámicos complejos en la era de la Inteligencia Artificial y la Computación Cuántica

Palabras Clave: Algoritmos, sistemas dinámicos complejos, Inteligencia Artificial, Computación Cuántica

Tema: Integración de algoritmos de inteligencia artificial para el estudio de sistemas dinámicos complejos y para el diseño de dispositivos inteligentes en el área de fotónica, con un enfoque aplicado.

Número de Plaza: 30763-56

Javier Orduz

Enero 4, 2026

Índice general

Resumen Ejecutivo	2
Introducción	3
Problema	3
Objetivos y Metas	5
Pregunta de Investigación	6
Hipótesis	6
Justificación	6
Metodología	6
Objeto de Investigación	7
Marco teórico	7
Cronograma y tabla de resultados	11
Bibliografía	14

Resumen Ejecutivo

Los sistemas dinámicos complejos abordan una variedad de temas por mencionar algunos dinámicas de fluidos, problemas con dinámica anómala, problemas de optimización, entre otros. Este tipo fenómenos involucran, por lo general, ecuaciones diferenciales no lineales y las soluciones, usualmente, son no analíticas, es decir, se apela a métodos alternativos para solucionar el problema. Una forma es usar métodos computacionales, en otras palabras algoritmos (remitirse a la definición de Algoritmo). Este proyecto de investigación se centra en los algoritmos clásicos y cuánticos que se pueden usar para el análisis de sistemas dinámicos complejos y que tengan cercanía con la Inteligencia Artificial para implementarse en dispositivos inteligentes o en problemas de fotónica. La pregunta que se busca responder es ¿Pueden los algoritmos cuánticos y clásicos de la IA implementarse para el análisis de sistemas dinámicos complejos y tener aplicaciones en dispositivos inteligentes?

Las aplicaciones de este tipo de investigación son amplias y de alto impacto. Entre ellas se encuentran áreas estratégicas como la ciberseguridad y la criptografía, el estudio de sistemas dinámicos asociados a fenómenos naturales, la industria farmacéutica, así como la modelación de poblaciones, la propagación de virus y otros temas estrechamente vinculados con la salud pública. Asimismo, estos enfoques resultan relevantes para el análisis de problemas en finanzas y economía. Otras áreas que también se enriquecen son la ciencias ciencias sociales y la ingeniería.

La implementación de este proyecto y su continuo avance beneficia a la institución a través de la formación de recursos humanos capacitados. Las siguientes generaciones de investigadores serán pioneras en temas de vanguardia y que vienen a ser relevantes para el desarrollo de la sociedad mexicana. También abre nuevas líneas de investigación promueven que la institución sea parte del desarrollo conocimiento y la mantiene dentro de los *rankings* mundiales de instituciones líderes. Esto beneficia al país a través de la alineación con otros gobiernos que buscan el desarrollo de la sociedad a través del desarrollo de la ciencia y la implementación de la tecnología para la solución de problemas. Finalmente, a través de la implementación de este proyecto se mantiene e incrementa el número de publicaciones y participaciones en eventos científicos y divulgativos.

En conjunto, estos tópicos abordan desafíos actuales de gran importancia para el país, ya que contribuyen a la comprensión, prevención y toma de decisiones informadas en contextos complejos, con el potencial de generar un impacto positivo y tangible en la sociedad.

Introducción

La era actual de la Inteligencia Artificial (IA) está adquiriendo un matiz interesante al incorporar la computación cuántica (CC) en diversos contextos. Con esto se busca mejorar los tiempos de procesamiento y el espacio de almacenamiento reservado, en términos de ciencias de la computación, temas relacionados con la teoría de la complejidad. La IA funciona mediante algoritmos y requiere análisis matemáticos avanzados; algunos temas, como cálculos, análisis vectorial, ecuaciones diferenciales, álgebra lineal, estadística y matemática discreta, forman parte de los que se abordan al estudiar los algoritmos de la IA. Al incorporar computación cuántica, se incluyen otros conceptos que provienen de la mecánica estadística, de la mecánica cuántica, del análisis funcional, del álgebra tensorial y del análisis de Fourier. Esta no pretende ser una lista completa de temas, pero da una idea de los temas involucrados al realizar esta unión entre IA y CC. También, se espera tener distintos enfoques para proponer distintas soluciones a un problema.

Actualmente, las expectativas son altas y se espera que la computación cuántica mejore nuestros sistemas computacionales actuales. Estos sistemas, entre otras cosas, funcionan con diferentes propósitos. Uno de ellos es solucionar y simular sistemas o modelos científicos complejos que describen la naturaleza o predecir potenciales riesgos asociados a la economía, las finanzas, las ciencias de la salud, el arte, el lenguaje y las ciencias sociales [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8]

La IA ha tenido dos inviernos (entre 1974-1980 y 1985-2000, aproximadamente), es decir, periodos en los que se abandonó debido a limitaciones al enfrentar algunos tipos problemas [9]. Actualmente, la IA está avanzando constantemente y beneficia de manera recíproca de las tecnologías emergentes. Los artículos que promueven este tema *Quantum Machine Learning* como una herramienta poderosa para una potencial revolución de nuestros sistemas computacionales [10], [11].

En las siguientes páginas se exponen algunos problemas en los que están tecnologías, conceptos, modelos y teorías toman un papel alternativo y que brindan posibles soluciones. Se exponen los objetivos, metas y cronograma y resultados asociados a este proyecto de investigación.

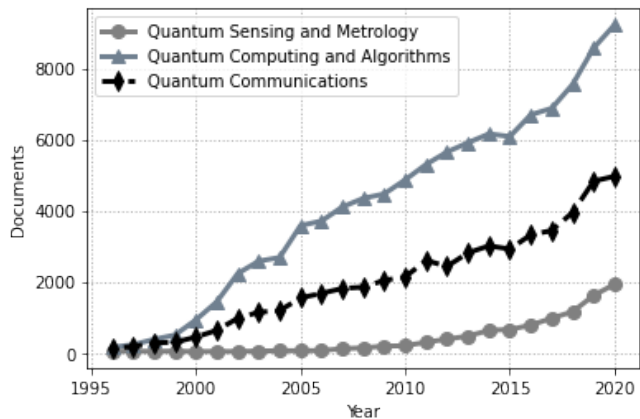


Figura 1: Número de publicaciones sobre CC en y temas relacionados [1].

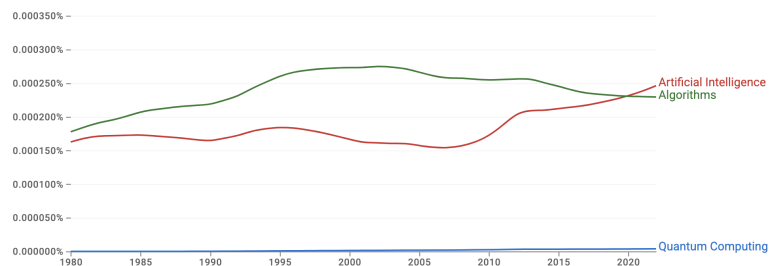


Figura 2: Parámetros: *Smoothing* =10, Idioma: Inglés.

Problema

Actualmente hay una comunidad de científicos desarrollando algoritmos clásicos y cuánticos para solucionar diferentes problemas. En México hay escases de investigadores en estas áreas por razones como las siguientes: no hay programas formales que ofrezcan temas como inteligencia artificial, algoritmos, teoría de la computación clásica y cuántica, el grupo de investigadores se centra en otras regiones del mundo donde ofrecen diferentes beneficios y los investigadores buscan estar cerca de las industrias o los gobiernos que están abiertos a recibir e implementar nuevas tecnologías. Esto beneficia la transferencia de conocimiento y acelera el desarrollo del país.

El concepto de algoritmo (ver def. Algoritmo 0.0.2) es importante en el contexto de la AI y de la CC, su análisis en implementación es una área activa, las aplicaciones de los algoritmos es amplia y se espera que impacte el desarrollo social y económico de las comunidades en las siguientes décadas. En este

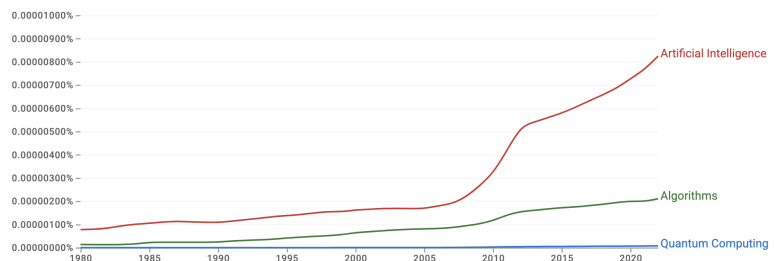


Figura 3: Parámetros: *Smoothing = 10*, Idioma: Español.

proyecto nos centramos explorar, analizar y probar los “Algoritmos para el análisis de sistemas dinámicos complejos en la era de la Inteligencia Artificial y la Computación Cuántica”. Esta implementación es una de las alternativas que la comunidad científica explora y en la que una variedad de compañías invierte tiempo, dinero y recurso humano.

La CC trae conceptos de la mecánica cuántica y de la computación, los une con la idea de estudiar cómo se puede tomar ventaja de fenómenos físicos que ocurren a una escala el hardware y software pueden interactuar. Esta área nació hace unas cuatro décadas y se ha tenido avance significativo en los últimos años. Esta área ha incrementado es actualmente de interés y su número de publicaciones se ha incrementado ver la figura 1.

Una primera búsqueda de las palabras clave en inglés y español arroja resultados que requieren interes y bosquejan el futuro de estos temas. Las figuras 2 y 3 muestra la tendencia de las palabras clave de este proyecto basado en los *Books Ngram Viewer* de Google ¹ usando millones de libros digitalizados. Estas figuras comparan entre el idioma inglés y español las palabras clave y, además, describe la evolución de estas mismas palabras, dado el incremento en el número de compañías de tecnologías emergentes en computación cuántica ² se espera que en las siguientes décadas este comportamiento cambie significativamente y que haya más interés general, que los conceptos se popularicen y que haya más científicos en estas áreas, además que los gobiernos promuevan iniciativas y desarrollo tecnológico en estas áreas.

El problema que este proyecto busca estudiar se basa la exploración y testeo de los algoritmos más relevantes y que tengan cercanía o aplicación en el análisis de sistemas dinámicos complejos bajo la mirada de la Inteligencia Artificial y la Computación Cuántica. Estos temas como se muestras en las figuras 2 y 3 tienden a ser relevantes en las políticas del país y contribuyen al posicionamiento y desarrollo de México. Las aplicaciones de este tipo de investigaciones

¹Hemos omitido sistemas dinámicos complejos porque es un concepto que dado su tecnicismo, su tendencia se mantiene muy baja y cercano al concepto de CC y en la gráfica no resulta significativa. Liga: <https://books.google.com/ngrams/>.

²En México ya se cuenta con una compañía de computación cuántica que está en proceso de formación qaldas.com que colabora la iniciativa fundada en 2021 qmexico.com.

son amplias, por mencionar algunas, la ciberseguridad/cryptografía, los sistemas dinámicos (fenómenos naturales), la industria farmacéutica, la modelación de poblaciones, virus y otras temas asociados a la salud, las finanzas y la economía. Incluso estos temas involucran temas de seguridad nacional y requiere el desarrollo de políticas estratégicas. Estos tópicos son de relevancia para el país y pueden definir e impactar en la sociedad actual y las siguientes generaciones.

Objetivos y Metas

En esta sección se comparten el objetivo general, los objetivos específicos, y las metas de este proyecto de investigación, Estos objetivos y metas se cumplan progresivamente durante los primeros cinco años de este proyecto.

Objetivo General

Probar algoritmos para el análisis de sistemas dinámicos complejos en la era de la Inteligencia Artificial y la Computación Cuántica.

Objetivo particulares

1. Seleccionar los algoritmos cuánticos y clásicos que tengan potencial aplicación en el análisis de sistemas complejos.
2. Medir el funcionamiento de los algoritmos bajo la perspectiva de la teoría de complejidad.
3. Evaluar los algoritmos más usados en la actualidad en el contexto de IA y CC para el análisis de sistemas complejos.
4. Explicar conceptos de IA y CC que tengan potenciales aplicaciones en fotónicos y otros sistemas dinámicos complejos.
5. Proponer soluciones a problemas de sistemas complejos de áreas y aplicaciones en fotónica e implementación en dispositivos inteligentes.

Metas

1. Definir los algoritmos cuánticos y clásicos que tengan potencial aplicación en el análisis de sistemas complejos.
2. Planear una taxonomía para los algoritmos y sus posibles aplicaciones en dispositivos inteligentes.
3. Publicar resultados en revistas internacionales y el impacto del trabajo en la comunidad científica.
4. Fortalecer la visibilidad y reconocimiento del CFATA como unidad de investigación activa y de vanguardia.
5. Graduar estudiantes de posgrado con líneas terminales en IA, CC con aplicaciones en la solución de problemas de sistemas complejos e implementación en dispositivos inteligentes.
6. Promover la CFATA-UNAM como una institución de vanguardia a través de la participación y organización de eventos científicos y de divulgación, fortaleciendo la difusión del conocimiento y la vinculación académica.
7. Planear líneas de investigación en IA y CC con aplicaciones en diferentes áreas que promuevan al CFATA-UNAM como una institución activa en temas actuales de investigación.

-
8. Preparar documentación de conceptos de IA y CC que funcionen como materiales de consulta para las siguientes generaciones de científicos y que muestren las líneas que la sociedad mexicana sigue en las siguientes décadas.

Pregunta de Investigación

La pregunta que se busca responder es

¿Pueden los algoritmos cuánticos y clásicos de la IA implementarse para el análisis de sistemas dinámicos complejos y tener aplicaciones en dispositivos inteligentes?

Para responder esta pregunta se requiere explicar una serie de conceptos, evaluar diferentes metodologías, seleccionar los algoritmos que pueden tener un mejor funcionamiento bajo los conceptos de la teoría de la complejidad; asimismo se desea proponer algunas aplicaciones e implementaciones en dispositivos inteligentes. Esto puede impulsar el desarrollo de hardware de nueva generación y orientar estrategias clave para el diseño y adopción de tecnologías futuras.

Hipótesis

Los algoritmos para el análisis de sistemas dinámicos complejos en la era de la Inteligencia Artificial y la Computación Cuántica son relevantes para proponer soluciones a problemas actuales y futuros dado el contexto de las tecnologías emergentes que pueden mejorar y traer vulnerabilidades para nuestros sistemas actuales. En el contexto de la IA y la CC, estos algoritmos pueden traer beneficios en tiempo de ejecución y en almacenamiento, que son conceptos estudiados por la teoría de la complejidad. Esto puede beneficiar la implementación de estos algoritmos en dispositivos inteligentes actuales. Sin embargo, hay retos de hardware y software que se abordan desde diferentes perspectivas. Adicionalmente, hay limitaciones fundamentales asociadas a los conceptos provenientes de la física, la computación y las matemáticas actuales que incluso rayan en la filosofía. Para el beneficio de este proyecto, nos centraremos en los algoritmos más populares de IA y de un dos de los más famosos algoritmos de computación cuántica: Grover y Shor. Entre otras cosas porque pueden potenciar la criptografía cuántica que, entre otras cosas, es un tema muy apasionante y con un potencial enorme para futuros proyectos.

Justificación

Este proyecto de investigación prueba diferentes algoritmos provenientes en IA y CC y evalúa el tiempo y el espacio, que son conceptos relevantes para la teoría de complejidad; esto se lleva para el análisis de sistemas dinámicos complejos. Se estima el impacto en dispositivos inteligentes de esta manera los algoritmos clásicos y cuánticos se exploran en el software y hardware con el propósito de encontrar potenciales retos y oportunidades para explorara en futuros proyectos.

Metodología

La intención de este proyecto es probar algoritmos de IA y de CC, se propone una fusión de paradigmas clásicos y cuánticos [1], [12] y se realiza una fase de evaluación de algoritmos, medición o comparación entre las perspectivas clásicas y cuánticas, selección de los paradigmas que muestren mayores beneficios, propuesta de soluciones a problemas y análisis de aplicaciones;

y explicación de conceptos de IA y CC para futuras aplicaciones en fotónicas y otros sistemas complejos (ver figura 4). Este enfoque permite realizar cinco fases de trabajo y de esta manera alcanzar las metas propuestas. Por resaltar que la fusión entre los paradigmas clásicos se puede dar de diferente formas: usando hardware cuántico y software clásico o usando hardware clásico y software cuántico. Exploraremos varias alternativas, pero se buscará la más viable esto dependerá de los recursos de personal, económicos y de infraestructura.

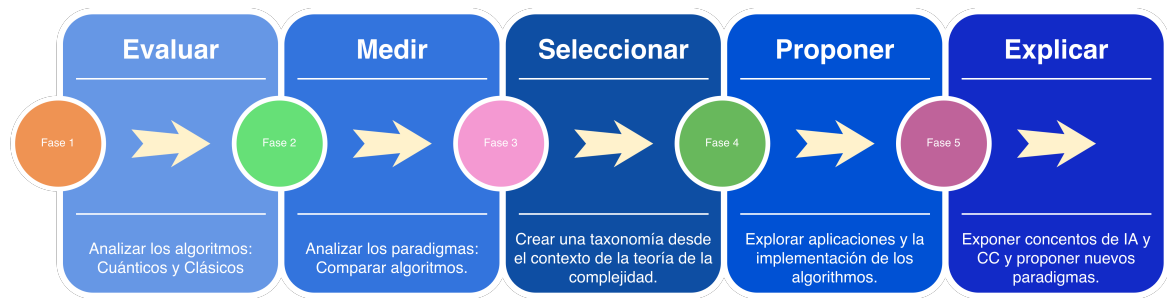


Figura 4: Fases del proyecto que soporta la metodología .

Este proyecto permite una variedad de aplicaciones e implementaciones, en principio, el camino a seguir es netamente teórico con implementaciones en software. En las primeras etapas se incluyen los siguientes algoritmos: Algoritmo de Grover y algoritmo de Shor para la solución de ecuaciones diferenciales de problemas asociados a sistemas dinámicos. Futuros trabajos y proyectos tendrán temas de criptografía cuántica, dispositivos inteligentes con aplicaciones en fotónica, además de otros temas de interés en sistemas de dinámica compleja. a partir del tercer año se implementan etapas de colaboración con otros grupos e investigadores para realizar implementaciones en dispositivos inteligentes y dispositivos que involucren fotónica un poco más cercanos a hardware.

Objeto de Investigación

El objeto de investigación es una probar una serie de diferentes algoritmos provenientes de la IA y de la CC aplicados a la modelación y la solución de ecuaciones no lineales asociados a sistemas complejos, con énfasis en la eficiencia desde la perspectiva de teoría de la complejidad y su posible implementación en dispositivos inteligentes.

Marco teórico

En este capítulo se encuentran diferentes conceptos fundamentales que funcionan como base del proyecto de investigación. Se usa el modelo de Turing, por lo tanto definimos la máquina de Turing

Definición 0.0.1 (Máquina de Turing). Una máquina de Turing es una 7-tuple, $(Q, \Sigma, \Gamma, \delta, q_0, q_{\text{accept}}, q_{\text{reject}})$, donde Q, Σ, Γ son todos conjuntos finitos y

1. Q es el conjunto de estados,
2. Σ es el alfabeto de entrada que no contiene el símbolo de *blank*, \sqcup ,
3. Γ es el alfabeto de la cinta, donde $\sqcup \in \Gamma$ y $\Sigma \subseteq \Gamma$,
4. $\delta : Q \times \Gamma \longrightarrow Q \times \Gamma \times \{L, R\}$ es la función de transición,
5. $q_0 \in Q$ es el estado inicial,
6. $q_{\text{accept}} \in Q$ es el estado aceptado y

-
7. $q_{\text{reject}} \in Q$ es el estado rechazado, donde $q_{\text{reject}} \neq q_{\text{accept}}$.

Adicionalmente, hay otros conceptos que se deben discutir como la máquina de Turing no determinística y determinística. Estos y una revisión de conceptos asociados a la teoría de la computación cuántica y clásica se expondrán durante las actividades de desarrollo del proyecto.

Definición 0.0.2 (Algoritmo). A continuación se encuentran una lista de definiciones de diferentes fuentes.

1. Informalmente, un algoritmo es un procedimiento computacional bien definido que toma algún valor, o conjunto de valores, como una entrada y produce algún valor, o conjunto de valores, como salida. En otras palabras un algoritmo es por lo tanto una secuencia de pasos computacionales que transforman la entrada en salida [13].
2. Informalmente hablando, un algoritmo es una colección de simples instrucciones que llevan a cabo una tarea. En la vida cotidiana, los algoritmos son llamados procedimientos o recetas [14].
3. Desde una perspectiva muy simple, un algoritmo es una lista finita, secuencial y ordenada cuya meta es solucionar un problema.
4. *“An algorithm is usually a higher level description which is not quite formal; it is assumed that the details of what to do precisely will be filled in by people using it, or programmers who transform the algorithm into an actual program, the implementation of the algorithm”* [15].

En este documento se considera la tercera definición (def. 0.0.2 viñeta 3) que brinda una generalización sencilla, pero que debe sustentarse en las otras definiciones para incluir otros tecnicismos. La definición 0.0.2-viñeta 4 requiere una revisión previa de otros conceptos. En otras palabras el concepto de Algoritmo es enriquecido por otras áreas incluyendo la misma computación cuántica.

Definición 0.0.3 (Complejidad de tiempo). La complejidad de tiempo de una máquina determinística de Turing, M , es la función $f : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{N}$, donde $f(n)$ es el número máximo de pasos que M usa en cualquier entrada de longitud n . Si $f(n)$ es la complejidad de tiempo de M , decimos que M corre en el tiempo $f(n)$ y que M es una $f(n)$ máquina de tiempo de Turing. [14, Pág. 276]

Definición 0.0.4 (Complejidad de espacio). La complejidad de espacio de una máquina de Turing M es la función $f : \mathcal{N} \rightarrow \mathcal{N}$, donde $f(n)$ es el número máximo de celdas de la cinta M que escanea cualquier entrada de longitud n . Si la complejidad de espacio de M es $f(n)$, entonces decimos que M corre en espacio $f(n)$ [14, Pág. 331].

Definición 0.0.5 (IA, ML y DL). En las siguientes líneas se presentan las definiciones para estos tres conceptos.

1. IA: El campo de la inteligencia artificial se asocia con entender y construir entidades inteligentes o máquinas que puedan computar como actuar efectivamente y de manera segura en una amplia variedad de nuevas situaciones [9].
2. ML: *Machine learning* es un subcampo de la IA que estudia la habilidad de mejorar el comportamiento basado en la experiencia [9].
3. *Deep Learning* (DL): El término aprendizaje profundo se refiere al aprendizaje automático que utiliza múltiples capas de elementos informáticos simples y ajustables.

Definición 0.0.6 (CC). La computación cuántica es un modelo o paradigma que implementa circuitos reversibles. En palabras de los autores de uno de los libros más famosos del área: “Quantum computation and quantum information is the study of the information processing tasks that can be accomplished using quantum mechanical systems.” [16]

Dentro de este marco de la CC se definen la contraparte de los conceptos clásicos. Estos incluyen conceptos provenientes de la teoría de la computación como Máquina de Turing, algoritmo, entropía, compuertas y otros conceptos que se desarrollarán e implementarán durante otras etapas de este proyecto. Además de estos conceptos se deben discutir la versión cuántica, que requieren una revisión de conceptos fundamentales provenientes de la física, la mecánica estadística, la probabilidad y la matemática discreta [17], [18], [19], [20]. Estos temas se profundizan durante la implementación de este proyecto y se presentarán como parte de las metas (ver viñeta 8 de la subsección Metas) durante la elaboración de reportes, manuales, artículos, tesis y otros materiales.

En la siguiente sección se muestran algunos paradigmas y *frameworks* usados en la computación cuántica para diferentes propósitos.



Figura 5: Paradigmas de la CC [1].

Paradigmas y *Frameworks* para CC

En la CC se han identificado los siguientes paradigmas para realizar computación cuántica. La figura 5 muestra una colección de paradigmas de CC. Para el desarrollo de este proyecto se usa *Quantum Machine Learning*, y *Quantum Logic Gate*.

El concepto de *framework* es un concepto ampliamente usado en áreas como la computación y la ingeniería y se refiere a una plataforma reusable, que contiene bibliotecas e interfaces que permiten el desarrollo y la ingeniería de manera sistemática y eficiente. En el cuadro 1 se muestran algunos frameworks usados en la CC y que serán usados para el desarrollo y la implementación de este proyecto.

Cuadro 1: En la tabla se muestran el lenguaje de programación, el paradigma de computación cuántica y la descripción de cada herramienta de computación cuántica.

Herramienta	Lenguaje	Modelo	Descripción del <i>framework</i>
Cirq	Python	Compuertas discretas	Una biblioteca para crear, manipular y optimizar circuitos cuánticos de Escala Intermedia Ruidosa (NISQ), que posteriormente pueden ejecutarse en computadoras cuánticas y simuladores.
dwave-system	Python	Temple cuántico	Una API para utilizar el sistema D-Wave como un muestreador dentro del ecosistema de software D-Wave Ocean, ya sea de forma directa o a través de los solucionadores híbridos basados en la nube de Leap.

Continúa en la siguiente página.

Cuadro 1, continuación.

Herramienta	Lenguaje	Modelo	Descripción del <i>framework</i>
FermiLib	Python	Compuertas discretas	Un conjunto de software de código abierto que facilita la creación y prueba de algoritmos para simulaciones de computación cuántica de sistemas fermiónicos.
Qbsolv	C	Temple cuántico	Un solucionador de descomposición que divide un problema grande de optimización binaria cuadrática no restringida (QUBO) en partes para obtener un valor mínimo.
QGL.jl	Julia	Compuertas discretas	Un compilador QGL con un enfoque en el rendimiento.
Qiskit.js	JavaScript	Compuertas discretas	Kit de Ciencia de la Información Cuántica para JavaScript.
Qrack	C++	Modelo de compuertas discretas	Un framework completo para la construcción de procesadores cuánticos virtuales universales, acelerado mediante GPU.
Quirk	JavaScript	Compuertas discretas	Un simulador de circuitos cuánticos basado en navegador con funcionalidad de arrastrar y soltar. Una herramienta didáctica para experimentar y aprender sobre circuitos cuánticos pequeños.
Strawberry Fields	Python	Compuertas continuas	Una biblioteca en Python para el desarrollo, optimización e implementación de computadoras cuánticas fotónicas.

El cuadro 1 muestra las herramientas, los lenguajes de programación usados, el paradigma y una breve descripción del *Framework* para la CC. Algunos de estos servicios o productos requieren pago, este proyecto y o otros buscarán coleccionar fondos de diferentes organismos públicos y privados.

Tipos de bits cuánticos, qbits/qubits

En esta subsección se muestran posibles opciones para implementar los qbits. En esta búsqueda de un sistema físico adecuado para implementar operaciones de lógica cuántica se muestran opciones con sistemas fotónicos, esto muestra su relevancia en las nuevas tecnologías. En la Tabla 2 se analizan tres opciones principales de tecnología de qubits para la construcción de una computadora cuántica [1].

Cuadro 2: En la tabla se presenta una comparación de tres tecnologías de qubits: iones atrapados, superconductivos y fotónicos, basada en sus operaciones y propiedades fundamentales.

Qubit de ion atrapado [21], [22]	Qubit superconductorivo [23], [24]	Qubit fotónico [25], [26]
Para producir qubits, se utilizan láseres para ionizar átomos y atraparlos en potenciales eléctricos. El estado de los qubits se mide posteriormente mediante un láser adicional.	Los qubits se crean combinando un resonador superconductorivo con un inductor no lineal para formar un átomo artificial.	El estado comprimido (la luz funcionando como qubit) se crea mediante la distribución de luz láser a un arreglo de dispositivos de compresión (dispositivos microscópicos compuestos por resonadores de anillo relativamente pequeños).
Se pueden generar qubits estables utilizando la tecnología de iones atrapados, y la formación de estados entrelazados es sencilla. Trabajar con un gran número de qubits en este sistema es desafiante, y la implementación de un algoritmo cuántico completo es aún más compleja. La decoherencia es un problema difícil de resolver.	La construcción y medición precisa de qubits mediante tecnología superconductoriva es sencilla. Estos qubits operan en una escala de tiempo de nanosegundos y presentan tiempos de decoherencia cortos. Los qubits deben enfriarse cerca del cero absoluto para funcionar, y la computación está sujeta al ruido cuántico.	Los qubits son considerablemente más estables en la tecnología fotónica y permiten entrelazar fácilmente un gran número de fotones. Es posible realizar computación a temperatura ambiente, pero el sistema es menos tolerante a fallos y la corrección de errores resulta más compleja. De acuerdo con esta técnica, se alcanza la supremacía cuántica.

Las tecnologías de qubits basadas en iones atrapados, circuitos superconductivos y fotónica se diferencian por el sistema físico que utilizan para representar la información cuántica. Los qubits de iones atrapados emplean átomos controlados con láseres y campos eléctricos, mientras que los superconductivos se basan en circuitos electrónicos que funcionan como átomos artificiales. En cambio, los qubits fotónicos utilizan estados de la luz, donde los fotones actúan como portadores de información. Estas aproximaciones ofrecen ventajas y retos distintos en términos de control, escalabilidad y condiciones de operación. La cuadro 2 muestra más detalles sobre las diferentes formas de producir qubits.

Cronograma y tabla de resultados

El cronograma de actividades se muestra en el cuadro 3:

Cuadro 3: Cronograma de actividades por cinco años.

Actividad	Años 1–5 (Meses)									
	1		2		3		4		5	
	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
Reportes institucionales										
Envío de manuscritos para evaluación por pares y posterior publicación en revistas internacionales.										
Envío de contribuciones para evaluación y participación en eventos nacionales e internacionales.										
Envío de aplicaciones para participar en comités organizadores y científicos de eventos como talleres, congresos, conferencias.										
Revisor de artículos de revistas científicas y de divulgación.										
Dirección de tesis, envío de trabajos a los jurados y desarrollo de trabajos de investigación.										

El cronograma propuesto traza una hoja de ruta estructurada para los próximos cinco años, enfocada en el desarrollo gradual de herramientas avanzadas para probar los algoritmos clásicos de IA y cuánticos relevantes para el análisis de sistemas dinámicos complejos. Desde la recopilación y preparación de la información hasta la integración de modelos cuánticos, el plan equilibra actividades de investigación teórica con fases prácticas de diseño e implementación. Cuando sea posible, dependiendo del caso de estudio, se implementarán *dashboards* interactivos, que permitirán visualizar los resultados, explorar dinámicamente la información y monitorear el desempeño de las implementación del sistema. Esta combinación entre desarrollo científico e interfaces visuales facilitará no solo el análisis técnico en profundidad, sino también la comunicación efectiva de los avances del proyecto a audiencias tanto especializadas como generales.

La cuadro 4 muestra los resultados a cinco años. Se consideran resultados como participación de la comunidad vinculación interna y colaboraciones externas; vinculación con iniciativas privadas, posicionamiento de la institución e incremento de publicaciones. En el mismo cuadro se expresan los parámetros para medir el éxito las actividades. Adicionalmente hay actividades de investigación y, posiblemente, docencia que no están asociadas a este proyecto de investigación pero que se reportarán ante las autoridades competentes.

Cuadro 4: Resultados propuestos por cinco años. La tercera columna indica el periodo en meses.

Resultado / Producto	Actividades clave	0-9	10-19	20-29	30-39	40-49	50-60	Parámetros para medición
Participación de la comunidad	Difusión interna; invitación a divisiones; registro; logística de asistencia y constancias.							Número de asistentes; de participantes activos; de divisiones, programas o instituciones representadas
Vinculación interna	Coordinación con enlaces divisionales; integración de estudiantes y académicos; asignación de roles (moderación, apoyo, relatoría)							Número de roles asignados y confirmados
Colaboración con instituciones externas	Invitación a ponentes externos (incluye modalidad en línea); confirmaciones; cartas de participación; coordinación técnica (híbrido)							Número de instituciones participantes; de cartas de intención o convenios
Vinculación con iniciativa privada	Contacto con aliados; definición de apoyos (difusión, logística, materiales); gestión de cartas de apoyo o patrocinio							Número de aliados estratégicos; monto o valor de apoyos; Número de cartas de apoyo emitidas
Posicionamiento	Estrategia de comunicación; actualización de sitio/materiales; notas y difusión institucional; evidencias post-evento							Número de menciones institucionales; alcance en redes; de visitas al sitio; # notas o publicaciones de difusión
Incremento de publicaciones	Levantamiento de línea base; integración de productos derivados; registro en repositorios; reporte semestral							Número de publicaciones; de productos registrados en repositorios; reporte emitido

Bibliografía

- [1] O. Ayoade, P. Rivas y J. Orduz, “Artificial Intelligence Computing at the Quantum Level”, *Data*, vol. 7, n.º 3, 2022, ISSN: 2306-5729. DOI: 10.3390/data7030028. dirección: <https://www.mdpi.com/2306-5729/7/3/28>.
- [2] J. Orduz, S. Rastogi y E. Baker, *An introduction to quantum natural language processing and a study case*, International Conference on Machine Learning Conference: LatinX in AI (LXAI) Research Workshop 2022, Baltimore, Maryland USA. https://research.latinxinai.org/papers/icml/2022/pdf/poster_1.pdf, 2022. dirección: [5Curl%7Bhttps://jaorduz.github.io/files/2022/QNLP_Paper_Shubhangi_Orduz_Baker.pdf%7D%7D](https://jaorduz.github.io/files/2022/QNLP_Paper_Shubhangi_Orduz_Baker.pdf).
- [3] J. Orduz, “Mathematical Foundations for Modern Cryptography in the Quantum Era”, en *Computational Science and Computational Intelligence*, H. R. Arabnia et al., eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, págs. 204-212, ISBN: 978-3-031-94956-2. DOI: 10.1007/978-3-031-94956-2_16.
- [4] S. N. Tisha, M. S. Rahman y J. Orduz, “Quantum Machine Learning for Heart Disease Detection: A Case Study”, en *Computational Science and Computational Intelligence*, H. R. Arabnia et al., eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2025, págs. 58-66, ISBN: 978-3-031-94940-1.
- [5] Rahaman, Md Shahidur, and Islam, Agm, and Orduz, Javier., “Quantune: An Automatic Music Generation Using Quantum Computing”, en *LatinX in AI (LXAI) Research at ICML 2024*, <https://icml.cc/virtual/2024/38089>, 2024. dirección: [%7Bhttps://openreview.net/forum?id=0QaxgMx4bR%7D](https://openreview.net/forum?id=0QaxgMx4bR).
- [6] F. Tennie, S. Laizet, S. Lloyd y L. Magri, *Quantum Computing for nonlinear differential equations and turbulence*, 2024. arXiv: 2406.04826 [physics.flu-dyn]. dirección: <https://arxiv.org/abs/2406.04826>.
- [7] L. Kim, S. Lloyd y M. Marvian, *Hamiltonian Quantum Generative Adversarial Networks*, 2024. arXiv: 2211.02584 [quant-ph]. dirección: <https://arxiv.org/abs/2211.02584>.
- [8] P. Mironowicz et al., *Applications of Quantum Machine Learning for Quantitative Finance*, 2024. arXiv: 2405.10119 [quant-ph]. dirección: <https://arxiv.org/abs/2405.10119>.
- [9] Stuart Russell, Peter Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach, Edition [4th Ed]* (Pearson Series in Artificial Intelligence), 4.ª ed. Pearson, 2020, ISBN: 9780134610993; 0134610997.
- [10] J. Biamonte et al., “Quantum machine learning”, *Nature*, vol. 549, n.º 7671, págs. 195-202, sep. de 2017, ISSN: 1476-4687. DOI: 10.1038/nature23474. dirección: <http://dx.doi.org/10.1038/nature23474>.

-
- [11] J. Orduz-Ducuará, “Conceptos de aprendizaje automático cuántico para físicos: Quantum Machine Learning concepts for Physicists”, *Tecnología Educativa Revista CONAIC*, vol. 8, n.º 2, págs. 71-75, 2021. DOI: <https://doi.org/10.32671/terc.v8i2.212>.
 - [12] Orduz, J. and Rivas, P. and Baker, E., “Quantum Machine Learning Foundations and Applications: A Succinct Literature Review”, en *International Conference on Scientific Computing*, To be published soon: <https://www.springer.com/series/11769>, Springer, Transactions on Computational Science and Computational Intelligence, July de 2021.
 - [13] Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, Clifford Stein, *Introduction to Algorithms*, 4.^a ed. The MIT Press, 2022, ISBN: 9780262046305; 026204630X.
 - [14] Michael Sipser, *Introduction to the Theory of Computation*, Third edition. Cengage Learning, 2013, ISBN: 9781285401065; 1285401069; 9781133187790; 113318779X.
 - [15] Pudlák, Pavel, *Logical foundations of mathematics and computational complexity: A gentle introduction*. Springer, 2013.
 - [16] M. A. Nielsen e I. L. Chuang, *Quantum computation and quantum information*. Cambridge university press, 2010.
 - [17] P. Kaye, R. Laflamme y M. Mosca, *An introduction to quantum computing*. OUP Oxford, 2006.
 - [18] N. S. Yanofsky y M. A. Mannucci, *Quantum computing for computer scientists*. Cambridge University Press, 2008.
 - [19] C. Kittel, *Elementary statistical physics*. Courier Corporation, 2004.
 - [20] O. P. Ronald Graham Donald Knuth, *Concrete mathematics: a foundation for computer science*. Addison-Wesley Professional, 1994.
 - [21] C. D. Bruzewicz, J. Chiaverini, R. McConnell y J. M. Sage, “Trapped-ion quantum computing: Progress and challenges”, *Appl. Phys. Rev.*, vol. 6, n.º 2, pág. 021314, 2019.
 - [22] R. Blatt y C. F. Roos, “Quantum simulations with trapped ions”, *Nature Physics*, vol. 8, n.º 4, págs. 277-284, 2012.
 - [23] P. Krantz et al., “A quantum engineer’s guide to superconducting qubits”, *Appl. Phys. Rev.*, vol. 6, n.º 2, pág. 021318, 2019.
 - [24] H.-L. Huang, D. Wu, D. Fan y X. Zhu, “Superconducting quantum computing: A review”, *Sci. China Inf. Sci.*, vol. 63, n.º 8, págs. 1-32, 2020.
 - [25] P. Kok et al., “Linear optical quantum computing with photonic qubits”, *Rev. Mod. Phys.*, vol. 79, n.º 1, pág. 135, 2007.
 - [26] A. Nicolas et al., “A quantum memory for orbital angular momentum photonic qubits”, *Nature Photonics*, vol. 8, n.º 3, págs. 234-238, 2014.