

# Integración de Webots y Qiskit para la experimentación con circuitos cuánticos como controladores robóticos

*Integration of Webots and Qiskit for experimentation with quantum circuits as robotic controllers*

*Integração de Webots e Qiskit para experimentação com circuitos quânticos como controladores robóticos*

Diego Carlos Luna-Márquez <sup>1,(\*)</sup>

Recibido: 10/10/2024

Aceptado: 10/10/2024

**Resumen.** - En la actualidad, dos áreas de importancia tecnológica y económica han experimentado avances importantes y acelerados: la robótica y la computación. En este último caso, la investigación en torno al enfoque cuántico ha sido notable. En relación con la robótica, el simulador robótico Webots se ha utilizado en la investigación y la implementación de robots en entornos reales y permite manipular el sistema simulado mediante controladores escritos en el lenguaje de programación Python. Esto permite la interacción con otros entornos y sistemas programados en el mismo lenguaje. Dentro de esta premisa, se ha experimentado con la implementación de controladores robóticos mediante circuitos cuánticos desarrollados en la plataforma de programación Qiskit. Todo ello se ha llevado a cabo en el entorno de simulación Webots. Efectos como la generación ideal de números aleatorios a partir de eventos cuánticos, entrelazamiento y superposición brindan posibilidades de simulación, aprendizaje e investigación en ambas áreas. En este trabajo se muestra una aproximación a estos controladores cuánticos. Se presentan los avances alcanzados y algunas posibilidades de trabajo futuras.

**Palabras clave:** cibernética; computación cuántica; robótica cuántica.

---

(\*) Corresponding Author.

<sup>1</sup> Doctorante, Departamento de Ciencias Computacionales, Tecnológico Nacional de México/Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico - TecNM/CENIDET (México), diego.luna18ca@cenidet.edu.mx, ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0009-9746-8411>

**Summary.** - Currently, two areas of technological and economic importance have experienced significant and accelerated advances: robotics and computing. In the latter case, research into the quantum approach has been remarkable. In relation to robotics, the Webots robotic simulator has been used in the research and implementation of robots in real environments and allows the simulated system to be manipulated by controllers written in the Python programming language. This allows interaction with other environments and systems programmed in the same language. Within this premise, we have experimented with the implementation of robotic controllers using quantum circuits programmed in the Qiskit programming platform. All this has been carried out in the Webots simulation environment. Effects such as ideal random number generation from quantum events, entanglement and superposition provide possibilities for simulation, learning and research in both areas. In this paper we show an approach to these quantum controllers. The progress achieved and some possibilities for future work are presented.

**Keywords:** cibernetics; quantum computing; quantum robotics.

**Resumo.** - Atualmente, duas áreas de importância tecnológica e econômica têm experimentado avanços significativos e acelerados: robótica e computação. No último caso, a pesquisa sobre a abordagem quântica tem sido notável. Em relação à robótica, o simulador robótico Webots tem sido usado na pesquisa e implementação de robôs em ambientes reais e permite que o sistema simulado seja manipulado por controladores escritos na linguagem de programação Python. Isso permite a interação com outros ambientes e sistemas programados na mesma linguagem. Dentro dessa premissa, experimentamos a implementação de controladores robóticos usando circuitos quânticos programados na plataforma de programação Qiskit. Tudo isso foi realizado no ambiente de simulação Webots. Efeitos como geração de números aleatórios ideais a partir de eventos quânticos, emaranhamento e superposição fornecem possibilidades de simulação, aprendizado e pesquisa em ambas as áreas. Neste artigo, mostramos uma abordagem para esses controladores quânticos. Os progressos alcançados e algumas possibilidades para trabalhos futuros são apresentados.

**Palavras-chave:** cibernética; computação quântica; robótica quântica.

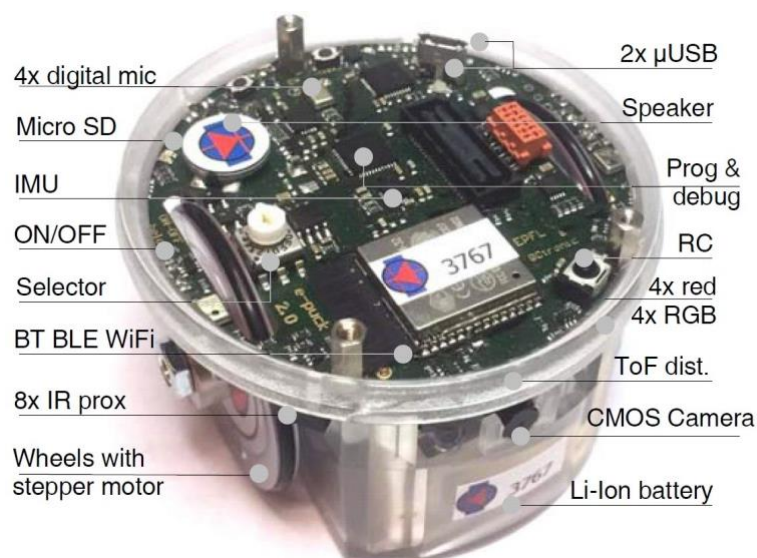


Figura I. Robot diferencial e-puck.

**1. Introducción.** - Existen diversas definiciones de la palabra *robot*. Algunas de ellas destacan el requerimiento de que un robot debe ser un sistema físico y actuar sobre sí mismo u otro sistema físico (1). No obstante, autores como Bräunl (2) consideran que el aspecto crítico en un sistema robótico es el software. Éste último es el acercamiento que se observa en el presente documento.

Webots es un simulador robótico con licencia Apache 2. Siendo un simulador basado en software, los elementos implementados y desarrollados dentro del mismo se considerarán siempre como simulados, con las implicaciones que ello representa, tales como la disponibilidad de un ambiente controlable y controlado, limitaciones prácticas y/o intrínsecas del motor de física, etc.

Existen varias categorías de robots descritas en la literatura (1)(3)(4). En este trabajo se considerarán únicamente los robots móviles terrestres desplazados por ruedas, particularmente se utilizará la simulación del robot-vehículo *e-puck*, incluido de manera predeterminada en Webots.

**2. Simulador robótico Webots.** - Webots es un simulador 3D multi sistema operativo de fuente abierta (licencia Apache 2) para robótica móvil. Fue creado originalmente por Olivier Michel en la *École Polytechnique Fédérale de Lausanne* (EPFL) en 1996 y es utilizado en la industria, en entornos educativos y en la investigación (5). Webots contiene por defecto una amplia cantidad de robots, sensores, actuadores y muy diversos objetos, pudiendo incorporarse más elementos mediante su descripción en el lenguaje VRML. En Webots es posible utilizar diferentes lenguajes para la programación de controladores, se optó por utilizar Python, por la factibilidad de interacción con Qiskit.

En Webots, se llama *controlador* a un subsistema de control que permite modificar tanto el ambiente simulado con un *controlador supervisor*, así como el comportamiento del propio robot mediante un *controlador regular*.

**2.1. Robot e-puck.** - En este trabajo se ha utilizado el robot *e-puck*. La concepción original (física) de dicho robot también fue desarrollada por la EPFL. Entre otras características, es un robot con desplazamiento diferencial mediante ruedas e incluye 8 sensores de proximidad, acelerómetro, giroscopio, cámara, un encoder (sensor de posición) por rueda, 8 sensores de luz, etc. El hardware y el software a bordo son de fuente abierta<sup>2</sup>. La simulación del robot *e-puck* encontrada en Webots fue realizada por Cyberbotics Ltd. Un diagrama con algunos de los componentes del robot se muestra en la figura I.

<sup>2</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/E-puck\\_mobile\\_robot](https://en.wikipedia.org/wiki/E-puck_mobile_robot)

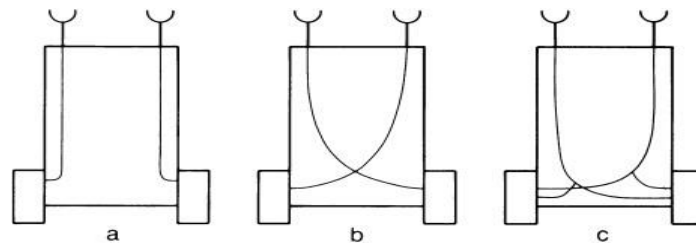


Figura II. Tres tipos simples de robots de Braitenberg con dos sensores y dos motores. a) los motores están conectados a su sensor respectivo, considerando la orientación; b) conexión cruzada; c) ambos motores reciben datos de los dos sensores (6).

**3. Vehículos de Braitenberg.** - En 1984 el neurocientífico y ciberneta Valentino Braitenberg publicó el influyente libro *Vehicles. Experiments in Synthetic Psychology* (6). Allí describió sistemas de control robótico basados en controladores simples y que presentaban comportamientos sencillos y considerados naturales como miedo, agresión y amor. A estos mecanismos se les conoce como *vehículos de Braitenberg*. Se muestran tres de estos vehículos en la figura II y dos posibles comportamientos en la figura III.

La importancia de estos vehículos es la demostración de un sistema medianamente complejo de comportamiento mediante sensado y circuiterías muy simples. Estos comportamientos pueden ser simulados en el entorno Webots y controlados mediante circuitos cuánticos.

**4. Computación cuántica.** - Diversos autores han reconocido los límites de representación y cálculo de la computación clásica y han descrito modelos de computación basados en mecánica cuántica (7; 8; 9; 10; 11; 12). Anterior a ello, Von Neumann realizó una descripción rigurosa de la mecánica cuántica utilizando espacios de Hilbert (13). Esta formulación ha sido heredada hacia la computación cuántica y se encuentra resumida en las siguientes ideas.

Un estado cuántico es un vector complejo  $d$ -dimensional en un espacio de Hilbert  $H$ . La computación cuántica basada en circuitos y qubits emplea un espacio de Hilbert de dimensión 2. No obstante que existe un infinito número de dicho par vectorial, en el presente documento utilizaremos únicamente los que conforman la llamada *base computacional*  $\{|0\rangle$  y  $|1\rangle\}$ .

En dicho modelo de circuitos, la unidad mínima de información es llamada *qubit*. Un factor clave de los estados cuánticos es su capacidad de encontrarse en una superposición cuántica, matemáticamente expresada como una combinación lineal de estados base. En el caso de la base computacional, estos vectores ortonormales son:

$$|0\rangle = [1 \ 0]^T, \quad |1\rangle = [0 \ 1]^T, \quad (1)$$

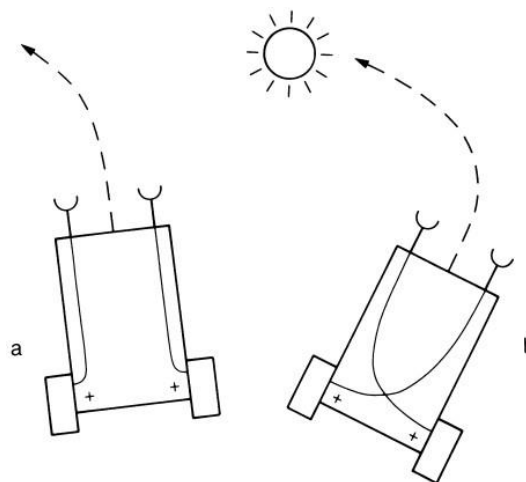


Figura III. Dos comportamientos diferentes correspondientes a señales excitatorias (+) o inhibitorias (-). a) el robot se aleja de la fuente de luz, “miedo”; b) el robot se aproxima a la fuente, “amor” (6).

así que su superposición está definida como:

$$|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle, \quad (2)$$

donde  $|\psi\rangle$  es un qubit,  $|i\rangle$  con  $i = \{0,1\}$  es llamada un ket de vectores base  $i$ ; los coeficientes  $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$  son llamados amplitudes de probabilidad y deben estar normalizados en concordancia con la regla de Born dada por:

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1. \quad (3)$$

Esta forma de expresar vectores y sus operaciones es llamada notación de Dirac: un ket representa el vector vertical  $v$  con elementos complejos, mientras un bra es el conjugado complejo del correspondiente ket:

$$\langle v| = (|v\rangle^*)^\top = |v\rangle^\dagger, \quad (4)$$

donde el símbolo *dagger*  $\dagger$  es la secuencia de operaciones de conjugación y transposición.

Los operadores cuánticos describen la evolución de un sistema cuántico cerrado. En el caso de de dimensión finita, éstos son matrices unitarias representando observables físicos como se expresa en la ecuación 5.

$$|\psi(t+1)\rangle = U |\psi(t)\rangle, \quad (5)$$

donde  $U$  es el operador unitario de evolución. En la computación cuántica basada en circuitos, estos operadores se corresponden con compuertas cuánticas.

Al finalizar la evolución, una compuerta de medición obtiene el resultado final del circuito cuántico. Esta operación conlleva la decoherencia del estado cuántico y retorna bits clásicos.

Es de notar que en la mayoría de los algoritmos el circuito cuántico debe ser ejecutado múltiples veces para obtener una distribución estadística de los resultados.

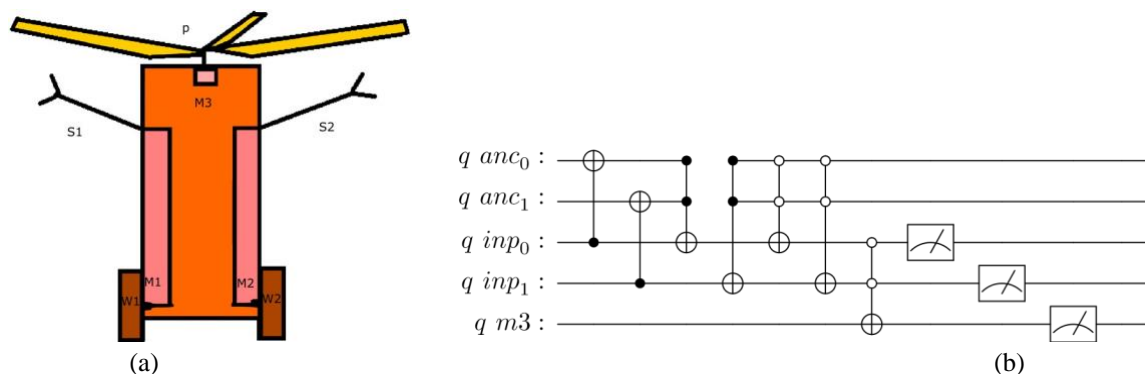


Figura IV: Circuito controlador cuántico para un robot de 3 motores. (a) Representación esquemática; (b) circuito. Los dos qubits superiores representan qubits auxiliares (ancilla), los dos siguientes son los qubits de entrada y el último está conectado al tercer motor, que controla la hélice M3 (14).

**5. Robótica cuántica.** - El principal objetivo de la robótica cuántica es la aplicación de la mecánica, algoritmos y computación cuánticas en el estudio de la robótica (14).

Se han desarrollado dos enfoques hacia la robótica cuántica. En la primera, la inmersión completa de un robot en un sistema cuántico ha sido estudiado mediante la introducción del concepto teórico de *robots cuánticos* por Benioff (15; 16; 17). En esta aproximación, un robot cuántico es un sistema cuántico móvil que incluye una computadora cuántica a bordo y requiere sistemas auxiliares. En estos trabajos se estudió un robot como un sistema de experimentación contrastable con valores teóricos derivados de la mecánica cuántica y se desarrolló la propuesta de una descripción de sistemas basada en mecánica cuántica capaz de ser consciente de su medio ambiente<sup>3</sup>, tomar decisiones y tener inteligencia.

<sup>3</sup> En el artículo seminal de Benioff (15), esta premisa no fue contemplada sino en sus subsiguientes artículos sobre el tema.

En el segundo enfoque, todos los elementos físicos de un robot regular, tales como sensores y efectores, se consideran como parte de un sistema clásico, es decir, como un sistema macro que obedece las leyes newtonianas y el cuál no es necesario describirlo mediante teoría cuántica para ser analizado/operado. En éste, los elementos de control son implementados mediante circuitos cuánticos (18)(19)(14). Éste ha sido el enfoque adoptado para la experimentación descrita. Para este caso, (18) ha propuesto el término *robot controlado cuánticamente*, mismo que se adoptará en el presente trabajo.

La unidad de control (el circuito cuántico) puede encargarse de procesar tanto los datos sensados como determinar las acciones intermedias o finales a realizar por los actuadores. Como se ha descrito, han sido implementados únicamente circuitos de decisión y actuación.

**6. Avances.** - Para demostrar la interoperabilidad entre Webots y Qiskit, se han implementado circuitos de control robótico propuestos por diversos autores en trabajos anteriores. Por ejemplo, se implementó el circuito controlador del artículo (14). Éste fue diseñado para controlar tres motores, incluyendo el correspondiente a un rotor que le permite elevarse del suelo cuando la entrada al circuito es  $|11\rangle$ . Tal circuito se muestra en la figura IV y el código respectivo, por propósitos educativos y demostrativos, se desarrolla a continuación:

```
from qiskit import QuantumCircuit, QuantumRegister
from qiskit import ClassicalRegister, transpile
from qiskit_aer import AerSimulator

q_anc = QuantumRegister(2, 'q_anc')
q_inp = QuantumRegister(2, 'q_inp')
q_m3 = QuantumRegister(1, 'q_m3')

c_m1m2 = ClassicalRegister(3, 'c_m1m2')

qc = QuantumCircuit(q_anc, q_inp, q_m3, c_m1m2)

# input |00>
qc.cx(q_inp[0], q_anc[0])
qc.cx(q_inp[1], q_anc[1])

qc.ccx(q_anc[0], q_anc[1], q_inp[0])
qc.ccx(q_anc[0], q_anc[1], q_inp[1])

# (ctrl_state=0) == activo en 0
qc.ccx(q_anc[0], q_anc[1], q_inp[0], ctrl_state=0)
qc.ccx(q_anc[0], q_anc[1], q_inp[1], ctrl_state=0)

qc.ccx(q_inp[0], q_inp[1], q_m3, ctrl_state=0)

qc.measure(q_inp, c_m1m2[0:2])
qc.measure(q_m3, c_m1m2[2])

sim = AerSimulator()
qc_trans = transpile(qc, sim)
job = sim.run(qc_trans)
counts = job.result().get_counts(qc_trans)

print(counts)
```

También se implementó el circuito desarrollado en (18) y mostrado en la figura V; éste es un circuito para un estado de entrelazamiento Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ). El mismo permitió controlar los dos motores del robot *e-puck* para obtener un movimiento aleatorio basado en las mediciones del circuito.



La captura de pantalla de la figura VI muestra el circuito anteriormente descrito, siendo ejecutado en el simulador Webots.

**7. Conclusiones y trabajo futuro.** - Se presentan algunos avances preliminares y funcionales en la intersección de la robótica y la computación cuántica, desarrollados en las plataformas Webots y Qiskit, respectivamente. El simulador Webots ha permitido integrar los circuitos cuánticos desarrollados en la plataforma para programación cuántica Qiskit y utilizarlos como controladores del robot *e-puck*, demostrando la viabilidad del enfoque.

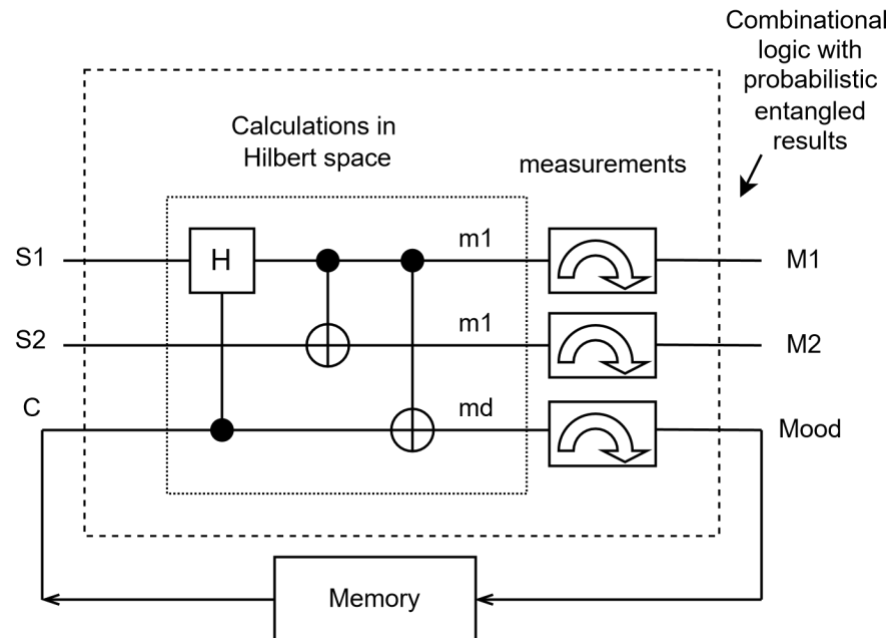


Figura V. Diagrama lógico de autómata cuántico. Sistema de control utilizado en (18).

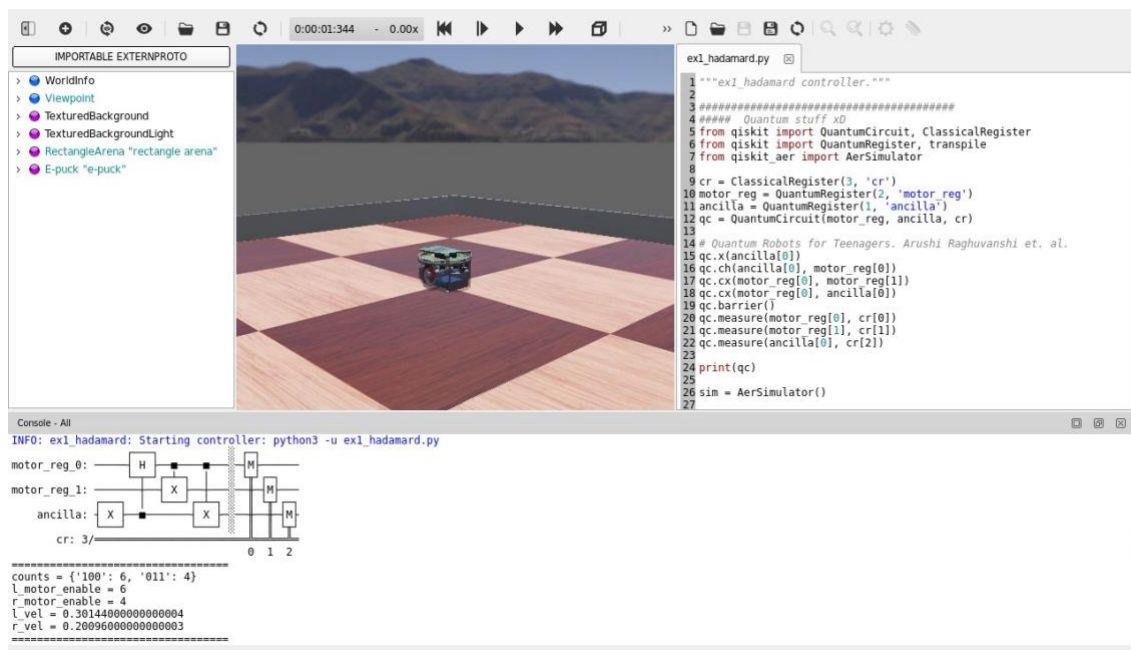


Figura VI. Entorno de simulación Webots, ejecutando un circuito cuántico GHZ como controlador de los motores del robot *e-puck* simulado.

La continuación de este trabajo se orientará a circuitos y robots más complejos simulados y que permitan ser usados tanto como herramienta de aprendizaje accesibles como en investigación posterior con el enfoque de la mostrada

interacción multidisciplinaria entre la robótica y la computación cuántica. Una posibilidad en este respecto se centraría en la versión cuántica del aprendizaje guiado por refuerzo (*Quantum Reinforcement Learning*, QRL) para aportar alguna inteligencia al agente robótico sobre la toma de decisiones y aprendizaje.

**Agradecimientos.** - Agradezco al comité organizador del CLEI/TLISC por la oportunidad de presentar este trabajo en el congreso y al profesor José Luis Ramírez Alcántara (CENIDET) por su apoyo en la realización del presente trabajo. Mi más profunda y personal gratitud a Karina P. Zaldívar G. por ser siempre mi modelo de trabajo y dedicación.



## Referencias

- [1] F. R. Cortés, *Robótica. Control de robots manipuladores*, F. J. R. Cruz, Ed. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., 2011.
- [2] T. Bräunl, *Robot Adventures in Python and C*. Springer Nature Switzerland AG, 2020.
- [3] M. M. Tadej Bajd and M. Muni, *Introduction to Robotics*. Springer Dordrecht, 2013.
- [4] Z. Cai, *Robotics: From Manipulator to Mobilebot*. World Scientific, 2023.
- [5] O. Michel, “Webots: Professional mobile robot simulation,” *Journal of Advanced Robotics Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 39–42, 2004. [Online]. Available: <http://www.ars-journal.com/International-Journal-of-Advanced-Robotic-Systems/Volume-1/39-42.pdf>
- [6] V. Braitenberg, *Vehicles*. MIT Press, 1984.
- [7] P. Benioff, “The computer as a physical system: A microscopic quantum mechanical hamiltonian model of computers as represented by turing machines,” *Journal of Statistical Physics*, vol. 22, no. 5, pp. 563–591, 05 1980. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/BF01011339>
- [8] “Quantum mechanical models of turing machines that dissipate no energy,” *Physical Review Letters*, vol. 48, pp. 1581–1585, 06 1982. [Online]. Available: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.48.1581>
- [9] S. Wiesner, “Conjugate coding,” *SIGACT News*, vol. 15, no. 1, p. 78–88, 01 1983. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/1008908.1008920>
- [10] Y. I. Manin, *Computable and Uncomputable*. Steklov Institute, 1980.
- [11] R. Feynman, “Simulating physics with computers,” *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 21, 1982.
- [12] D. Deutsch and R. Penrose, “Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer,” *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, vol. 400, no. 1818, pp. 97–117, 1985. [Online]. Available: <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspa.1985.0070>
- [13] J. V. Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics: New Edition*. Princeton University Press, 2018.
- [14] S. Mahanti, S. Das, B. K. Behera, and P. K. Panigrahi, “Quantum robots can fly; play games: an ibm quantum experience,” *Quantum Information Processing*, vol. 18, no. 7, p. 219, 5 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11128-019-2332-4>
- [15] P. Benioff, “Quantum robots and quantum computers,” *Physical Review A*, vol. 58, no. 2, p. 893–904, Aug. 1998. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.58.893>
- [16] “Quantum robots and environments,” *Physical Review A*, vol. 58, no. 2, p. 893–904, Aug. 1998. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.58.893>
- [17] *Space searches with a quantum robot*, ser. Contemporary Mathematics. American Mathematical Society, 2007, vol. 305, pp. 1–12.

- [18] A. Raghuvanshi, Y. Fan, M. Woyke, and M. Perkowski, “Quantum robots for teenagers,” in *37th International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL’07)*, 2007, pp. 18–18.
- [19] S. Pradhan, A. Padhi, and B. K. Behera, “Design and simulation of an autonomous quantum flying robot vehicle: An ibm quantum experience,” 2022.

**Nota contribución de los autores:**

1. Concepción y diseño del estudio
2. Adquisición de datos
3. Análisis de datos
4. Discusión de los resultados
5. Redacción del manuscrito
6. Aprobación de la versión final del manuscrito

DCLM ha contribuido en: 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

**Nota de aceptación:** Este artículo fue aprobado por los editores de la revista Dr. Rafael Sotelo y Mag. Ing. Fernando A. Hernández Goberti.