



DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PÁGINA WEB PARA LA ENSEÑANZA DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA - QUANTUM COMPUTING INAN

Kevin Jofroit Joven Noriega

Estudiante de Ingeniería Electrónica
Universidad del Valle, Cali-Colombia



El conocimiento es de todos

Minciencias



DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

Grupo de Investigación computación cuántica

Tutoría a cargo del Dr. Sabre Kais

Universidad de Purdue

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

Grupo de Investigación Bionanoelectrónica

Tutoría a cargo del Dr. Jaime Velasco

Universidad del Valle

Ministerio de Ciencia

Tecnología e Innovación

Gobernación del Valle del Cauca

Instituto Financiero para el Desarrollo del

Valle del Cauca INFIVALLE

Universidad Santiago de Cali

Pasantía Internacional "Nexo Global Valle del Cauca"

Santiago de Cali, Colombia

27 de marzo de 2022

COMITÉ EDITORIAL DE LA UNIVERSIDAD SANTIAGO DE CALI

Carlos Andrés Pérez Galindo

Rector

Claudia Liliana Zúñiga Cañón

Directora General de Investigaciones

Edward Javier Ordóñez

Editor

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

Juan Diego Tovar Cardenas

librosusc@usc.edu.co



El conocimiento
es de todos

Minciencias

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA PÁGINA WEB PARA LA ENSEÑANZA DE LA COMPUTACIÓN CUÁNTICA – QUANTUM COMPUTING INAN

Design and implementation of a website for teaching quantum computing – Quantum Computing INAN

Kevin Jofroit Joven Noriega

Estudiante de Ingeniería Electrónica
Universidad del Valle, Cali-Colombia

 kevin.joven@correounivalle.edu.co

Resumen. Este documento presenta el diseño, estructura y desarrollo de una página web para la enseñanza de computación cuántica llamada Quantum Computing INAN (In a Nutshell). La cual posee los temas mas conocidos en la computación cuántica. Los temas son impartidos de manera lineal, de modo que el usuario podrá entender desde los primeros indicios hasta el estado actual de la computación cuántica.

Palabras clave: computación cuántica, enseñanza.

Abstract. This document presents the design, structure, and development of a web page for teaching quantum computing called Quantum Computing INAN (In a Nutshell). Which has the best-known topics in quantum computing. The topics are taught in a linear way, so that the user will be able to understand from the first indications to the current state of quantum computing.

Keywords: quantum computing, teaching.

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día la computación cuántica ha logrado sustanciales avances en diferentes campos de la ciencia y la tecnología (Kishor Bharti, 2022). Dichas aplicaciones abarcan desde la simulación de partículas, sistemas cuánticos, problemas de optimización usando métodos cuánticos o híbridos, comunicación cuántica, etc. Sin embargo, estos conocimientos para ser adquiridos requieren un conocimiento previo de algebra lineal, fundamentos de mecánica cuántica para ser desarrollados. Debido a que es un tema recientemente abarcado y está en continuo desarrollo no se tienen suficientes herramientas en la universidad para poder enseñarlas de una manera correcta y eficiente. Algunas

universidades recientemente están abriendo cursos de maestría enfocados específicamente a la computación cuántica. Muchas de las universidades que se enfocan en carreras en STEAM tienen programas o grupos de investigación de doctorado o postdoctorado para hacer investigación de computación cuántica y sus diferentes especializaciones. También se ha hecho un análisis sobre un pensum que abarcaría una carrera de pregrado en la computación cuántica (Asfaw, 2021). Ya que la computación cuántica tendrá un impacto significativo los siguientes años en materia de investigación y desarrollo se requiere que los estudiantes de pregrado tengan un conocimiento básico sobre las

posibles aplicaciones e investigaciones que se pueden lograr en el mismo, así como también ganar un direccionamiento para su futuro profesional en esta área del conocimiento. La principal idea de este trabajo es el diseño, estructuración y desarrollo de un framework para una página web para la enseñanza de la computación cuántica a estudiantes de primeros semestres en cualquier universidad del mundo mientras sirve de apoyo para los futuros cursos de enseñanza a la misma.

El documento esta estructurado de la siguiente manera. Primero se explica y resalta los trabajos ya existentes y sus metodologías implementadas en antecedentes. Segundo, se explica el nacimiento de la computación cuántica y la explicación de muchos de sus fenómenos en el marco teórico. Tercero, se detalla el desarrollo de la pagina web y la estructura en relación con los temas que contiene y la metodología de enseñanza que se usa en la misma. Finalmente, se dejan conclusiones respecto al trabajo desarrollado y algunos trabajos futuros a implementar, así como también el reconocimiento a los actores que hicieron este trabajo posible.

2. ANTECEDENTES

En la actualidad existen variados cursos de introducción a la computación cuántica, así como también páginas web que se especializan en ofrecer dicha información teóricamente. Tal es el caso de IBM, el cual posee cursos de introducción a la computación cuántica con su lenguaje de programación Qiskit (J. R. Wootton, 2021). Además, posee el libro electrónico orientado a la enseñanza de conocimiento de la computación cuántica a un nivel intermedio para los usuarios.

Otro ejemplo, es la página web *Quantum Computing for the very curious* (Nielsen, 2019), la cual también se enfoca en la enseñanza de la computación cuántica desde un enfoque histórico y teórico.

Todos estas paginas web previamente mencionadas están escritas en inglés, idioma que se opto por implementar en el diseño de la pagina web. Ya que, con esto los estudiantes se podrán introducir a los términos y conceptos que este campo contiene. Donde muchos de ellos se encuentran en el idioma inglés.

3. MARCO TEÓRICO

Desde la frase ya conmemorada del físico Richard Feynmann en la cual expresa la necesidad de arquitecturas cuánticas para poder simular fenómenos cuánticos; *"Nature isn't classical, dammit, and if you want to make a simulation of nature, you'd better make it quantum mechanical, and by golly it's a wonderful problem, because it doesn't look so easy."* A partir de ese momento se investiga-

ron avances en el campo de la cuántica para desarrollar lo que hoy conocemos como computadores cuánticos y tener un nuevo campo de investigación llamada computación cuántica.

La computación clásica tiene sus limitaciones en términos de recursos ya que está limitada a memoria y procesamiento de información.

Sin embargo, la computación cuántica soluciona alguna parte de esos inconvenientes, pero deja sobre la mesa otros problemas que requieren un mejor conocimiento sobre la realidad que nos rodea.

La computación clásica se basa bajo el concepto de la lógica binaria. Dicha lógica corresponde al estado encendido y apagado, o como se trabaja actualmente el estado 0 y estado 1 llamados bits.

Con esto en mente se requiere cambiar el estado de los bits a voluntad aplicando cierto tipo de operaciones, estas operaciones son representadas por medio de compuertas lógicas.

Las compuertas lógicas cambian el estado de los bits de entrada para una cierta lógica. Así, si tenemos un numero N de bits y queremos que se sume ese número con el mismo podemos aplicar compuertas las cuales modificaran el estado de los bits de salida.

Las compuertas clásicas mas comunes son la denominada AND, OR, NOT y XOR. Dichas compuertas implementan una particular lógica sobre los bits de entrada y generan un resultado en base a la lógica de la compuerta. Ahora bien, podemos escribir todas las compuertas clásicas en termino de una sola compuerta. Esto se le conoce como una compuerta universal, la cual, usando solo una estructura especifica se puede diseñar el resto de las compuertas clásicas. La compuerta NAND es considerada la compuerta universal de la computación clásica, la cual es la unión de dos compuertas clásicas, AND y NOT permitiendo en la practica el diseño de una sola compuerta clásica.

Una vez diseñado la lógica de las compuertas lo siguiente es darle paso a una estructura más compleja. La lógica combinación y secuencia es la unión de muchas compuertas. En el primer caso tenemos compuertas sin memoria, mientras que en el segundo caso se tiene la posibilidad de tener una lógica que dependa de un estado posterior llamado secuencial.

Seguido de esto se logra el desarrollo de estructuras mas complejas que utilizan muchas unidades de procesamiento y de aritmética. Logrando con esto el desarrollo actual de los procesadores, los cuales día a día se incrementan en complejidad para ofrecer mas computo y optimizando el tamaño.



Los logros de la computación clásica son incontables y seguirán en constante desarrollo, logrando cada vez mas mejorar la calidad de vida de las personas. Sin embargo, también ha dejado a la vista las limitaciones de esta en términos de simulaciones y procesamiento.

Es aquí donde la computación cuántica toma un rol importante en los problemas que la computación clásica no puede tratar de la manera correcta o tomaría un demasiado tiempo en ser corridos.

Primero se desarrolla los mismos conceptos que en la computación clásica. Empezando por la unidad de información en la computación cuántica llamada Qubit o "*quantum bit*". Como en la computación clásica, el Qubit también se le puede asociar un estado de encendido y apagado logrando hacer lógica con ella. El Qubit también posee un estado intermedio el cual es la combinación del estado apagado y encendido el cual se le considera un estado de superposición. En este estado el Qubit se comporta como partícula cuántica mostrando los fenómenos descritos con la mecánica cuántica. Este particular fenómeno permite el desarrollo de una nueva lógica que exponencial los estados a los que se pueden acceder en comparación a la computación clásica.

Siguiendo con esta idea se tiene la necesidad de cambiar el estado de los Qubits para lograr hacer lógica con los mismos. Las compuertas cuánticas son las análogas a la computación clásica, en donde se cambiar el estado de uno o muchos Qubits permitiendo hacer estructuras más complejas sobre ellos.

Con la computación cuántica se puede lograr hacer lo mismo de la computación clásica en donde también permite hacer algoritmos cuánticos mas eficientes que los clásicos. Uno de los casos más icónicos es relacionado con la seguridad información de la clave publica y clave privada.

Este algoritmo permite la seguridad de los datos utilizados en internet. Mientras que para un computador clásico le tomaría un tiempo impráctico, como años o siglos, para un computador cuántico le tomaría un menor tiempo en comparación al clásico rompiendo así el esquema actual de seguridad. El algoritmo de Shor por esta aplicación es uno de los más conocidos en el campo debido a su gran mejora teoría respecto a los clásicos.

Actualmente se están desarrollando algoritmos clásicos que hagan frente al algoritmo de Shor, dichos algoritmos se conocen como post-cuánticos. Para cuando se tengan computadores cuánticos capaz de ejecutar el algoritmo de Shor con el suficiente número de Qubits para romper la encriptación.

Es debido a su gran complejidad física de diseñar computadores cuánticos reales que el desarrollo de algoritmos cuánticos se limita a una cantidad pequeña de Qubits.

Hoy en día existen implementaciones muy eficientes y escalables, desarrollas por empresas o centros de investigación avanzados. Dentro de las arquitecturas para el diseño de computadores cuánticos se encuentra los computadores basados en circuitos superconductores, circuitos basados en fotones y circuitos basados en trampa de iones, entre muchas otras implementaciones.

Cada una de las arquitecturas para construir computadores cuánticos presenta sus ventajas y desventajas respecto a las demás arquitecturas, debido a que todavía no se tiene la versión mas eficiente, escalable y precisa para el diseño de los computadores cuánticos. Esto hace que se use cierto tipo de arquitectura dependiendo de la investigación a realizar.

Finalmente, cada uno de los temas requiere de un conocimiento bien fundamentado de los conceptos básico de la computación cuántica, de modo que la idea principal de la pagina web es la enseñanza de este nuevo campo para personas que recién empiezan su trayectoria.

4. DISEÑO, ESTRUCTURA Y DESARROLLO DE LA APLICACIÓN WEB

Quantum computing INAN, tiene como objetivo tener un enfoque educativo y visual sobre los conceptos de la computación cuántica, base teórica, principales circuitos, algoritmos cuánticos, y aplicaciones de esta.

La principal idea es que esta herramienta posee un método de enseñanza diferente a los demás con ayudas visuales en formato *Pixel Art* (Silber, 2017), tanto para todos los circuitos cuánticos como para los conceptos que estos abarcan.

La página web contiene una base de datos para el almacenamiento de los usuarios que en ella frecuenta. Además, debido a su diseño puede ser fácilmente adaptable y expandible para futuras versiones de esta, esto con el propósito de agregarle más funcionalidades.

La página web se puede dividir en varios capítulos a tratar y cada uno de ellos con diferentes temas de esta.

Dichos temas se relacionan con el marco teórico ya previamente desarrollado, de modo que al final de la pagina web se espera que los usuarios tengan una visión global del campo de la computa-

ción cuántica, tales como: sus aplicaciones, el estado actual y futuros retos a superar.

Como función adicional la página web cuenta al final de cada capítulo una sección de referencias y circuitos prácticos. En los cuales las referencias son enlaces externos que le ofrecen al estudiante información adicional en caso de querer indagar mejor en ella. La parte de los circuitos prácticos se apoya en un software online llamado *Quirk* (Gidney, s.f.), el cual se puede hacer uso de una interfaz para diseñar circuitos cuánticos de una cantidad considerable de Qubits o bits cuánticos. *Quirk* es usado debido a que representa y permite la visualización de los estados de los Qubits a medida que pasas a través del circuito cuanto y como se modifica su estado al final de este.

Las siguientes figuras 1,2 y 3 muestran las ventanas principales que contiene la pagina web. Las cuales se conforman de entrada de usuario y registro del usuario Figura 1 y 2. Dicha información es almacenada en una base de datos para hacer el proceso de autenticación. La Figura 3 muestra la ventana de información que hace referencia a los circuitos que se diseñan y a las referencias con las cuales se elaboró.

Figura 1. Ventana de entrada de usuarios.

The screenshot shows a web page with the title "QUANTUM COMPUTING IN A NUTSHELL". Below the title is the text "Please login or register to begin the aventure." There are three input fields for "Username:", "Email:", and "Password:". Below these fields are two buttons: "Login" and "Register".

Figura 2. Ventana de registro de usuarios.

The screenshot shows a registration form with the title "REGISTER TO BEGIN YOUR HISTORY". The form includes input fields for "Username:", "Email:", and "Age:". There are two dropdown menus for "Current Status:" (with "Enthusiastic" selected) and "Previous Knowledge:" (with "None" selected). Below these is a "Password:" input field and a "Register" button.

Figura 3. Ventana de información sobre circuitos y referencias sobre el tema a tratar.

The screenshot shows two columns of links. The left column is titled "Circuit Links" and contains a link for "Quantum Full Adder". The right column is titled "Information Links" and contains three links: "Classical Adder", "Quantum Full Adder", and "Quirk Quantum Simulator".

4.1 Capítulo 1: Conceptos básicos

Este capítulo corresponde a los primeros temas de la página web, los cuales buscan introducir al estudiante desde una perspectiva historia y el cómo la computación cuántica puede ser una de las posibles tecnologías del futuro cercano.



Además, corresponde a temas de álgebra lineal básica y algunas técnicas que se pueden usar más adelante, tales son los casos del producto interno, producto externo y producto tensorial.

Este capítulo pretende introducir al usuario sobre los conceptos previos para abordar la computación cuántica, por lo que busca dar una revisión histórica de los principios de la clásica y de los logros de esta. Así como también se mencionó en el marco teórico, dar una breve explicación sobre el por qué hacer un salto a la computación cuántica y las limitaciones de la clásica.

En las figuras 4 y 5 se muestran parte del contenido y de las imágenes alusivas a la página web.

Figura 4. Tema 1 - Conceptos básicos de computación cuántica.

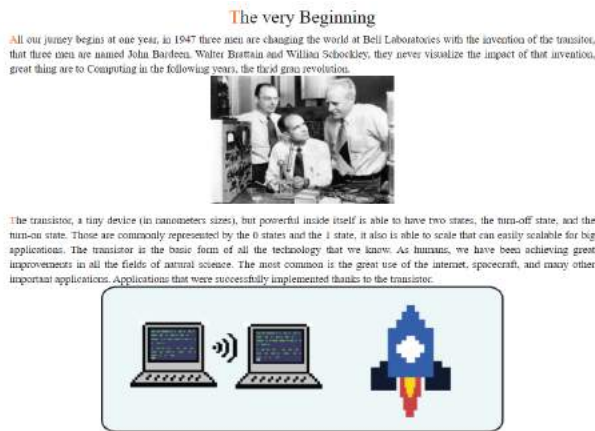
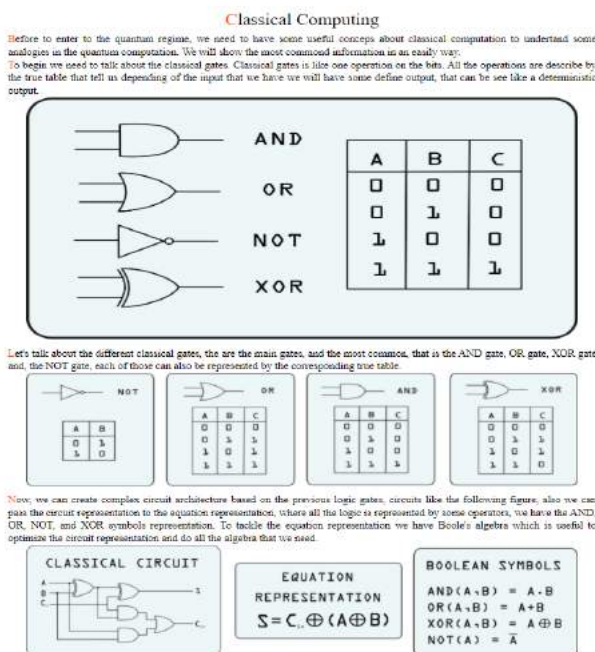


Figura 5. Tema 2 - Conceptos básicos de la computación cuántica.



4.2 Capítulo 2: Introducción a la computación cuántica

En este capítulo se enseñan las primeras bases de la computación cuántica. Dichas bases hacen referencia a la notación que se va a tener en cuenta, la nomenclatura que se va a manejar en la misma y algunos conceptos claves. Además, se dan a conocer las primeras compuertas cuánticas y la notación de Dirac, junto con algunos circuitos básicos esenciales en la computación cuántica y su análogo clásico como el Full-Adder.

Este capítulo y sus temas pretenden dar una imagen panorámica respecto a los conceptos básicos de la computación cuántica para tener las herramientas necesarias para abordar los conceptos más adelante presentados.

Las figuras 6 y 7 muestran parte de la información proporcionada en el Capítulo 2 de la página web.

Figura 6. Tema 5 - Introducción a la computación cuántica.

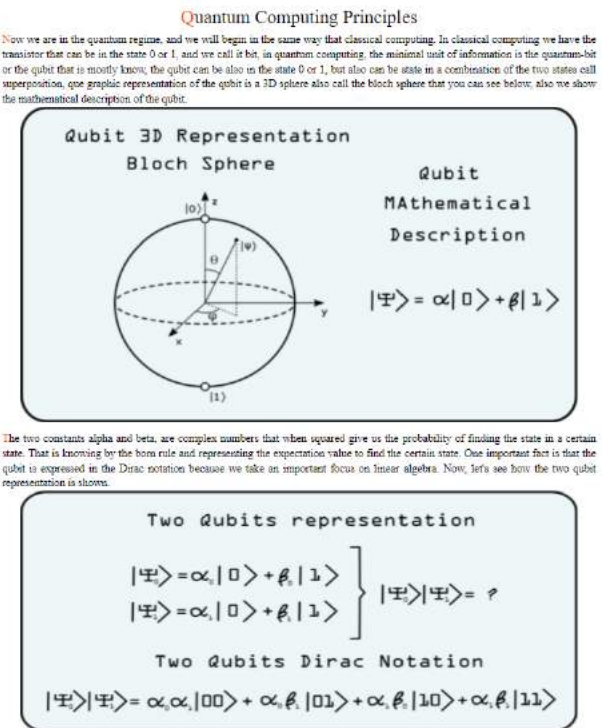
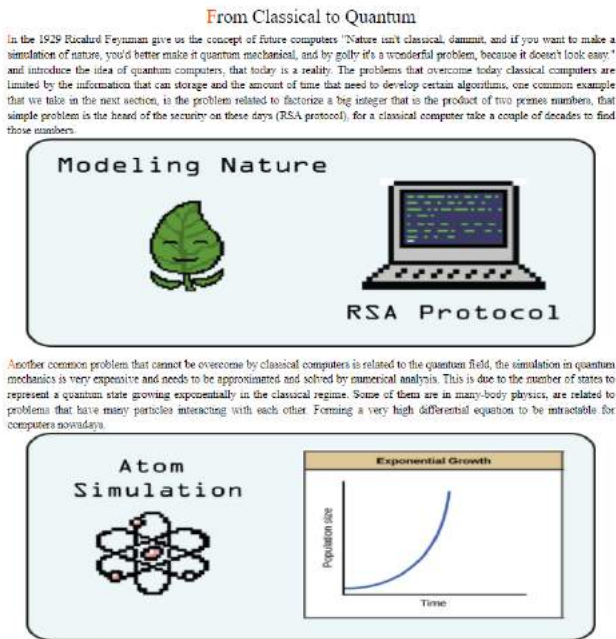


Figura 7. Tema 3 - Introducción a la computación cuántica.



4.2 Capítulo 3: Circuitos y Algoritmos cuánticos

Por último, el capítulo 3 dedicado a los circuitos y algoritmos cuánticos muestra los circuitos básicos en la computación cuántica, tal es el caso del circuito de entrelazamiento, el circuito de GHZ (Greenberger-Horne-Zeillinger), y la transformada cuántica de Fourier. En los temas dedicados a los algoritmos cuánticos se dan a conocer los algoritmos más comunes y mejores conocidos, tal es el caso del algoritmo de Deutsch Jotza (Jozsa, 1992), Grover (Grover, 1996) y el algoritmo de factorización de Shor (Shor, 1994). Finalmente concluye con una introducción al desarrollo físico de las computadoras cuánticas usando la tecnología de circuitos superconductores de IBM (Philip Krantz, 2019).

5. CONCLUSIONES

Quantum Computing INAN es una aplicación web la cual tiene por objetivo enseñar la computación cuántica principalmente por medios visuales a través de figuras hechas con temática Pixel Art. Dando además información en cada capítulo para que el lector pueda indagar a fondo sobre cada tema en específico.

6. FUTUROS TRABAJOS

Quantum Computing INAN se puede expandir tanto como sea posible. Se quiere que para futuras versiones de la página web tenga un diferenciador de categoría, en la cual se pueda introducir si la aplicación va a ser usada por un curso entero y otorgar permisos al profesor de este para monitoria a sus estudiantes.

Además, se espera que las imágenes y los circuitos cuánticos posean movimiento en formato de GIF para hacer más intuitivo el aprendizaje.

7. RECONOCIMIENTOS

Este trabajo fue desarrollado bajo el apoyo del programa Nexo Global Valle del Cauca, el cual, es financiado por el fondo de Ciencia, Tecnología e Innovación del Departamento del Valle del Cauca y la Gobernación del Valle del Cauca, en un trabajo mancomunado entre el instituto Financiero del Valle - INFIVALLE, la Universidad Santiago de Cali, el Ministerio de Ciencia y Tecnología de Colombia, Purdue University, y como participante beneficiario del programa la Universidad del Valle.

REFERENCES

- Asfaw, A. B. (2021). Building a Quantum Engineering Undergraduate Program. *arXiv preprint arXiv:2108.01311*.
- Gidney, C. (n.d.). *Quirk*. Retrieved from My Quantum Circuit Simulator: Quirk: <https://algassert.com/2016/05/22/quirk.html>
- Grover, L. K. (1996). A fast quantum mechanical algorithm for database search. *Proceedings of the Twenty-eighth Annual ACM Symposium on Theory of Computing.*, 212-219.
- J. R. Wootton, F. H. (2021). Teaching quantum computing with an interactive textbook. *IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, 385-391.
- Jozsa, D. D. (1992). Rapid solutions of problems by quantum computation. *Proceedings of the Royal Society of London*, 553-558.
- Kishor Bharti, A. C.-L.-L.-K.-C.-G. (2022). Noisy intermediate-scale quantum algorithms. *Rev. Mod. Phys.*, 94.
- Nielsen, A. M. (2019). *Quantum Computing for the Very Curious*. Retrieved from <https://quantum.country/qcvc>
- Philip Krantz, M. K. (2019). A Quantum Engineer's Guide to Superconducting Qubits. *Applied Physics Reviews* 6, 021318.



Shor, P. (1994). Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. *Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. IEEE Comput. Soc. Press*, 124-134.

Silber, D. (2017). *Pixel Art for Game Developers*. CRC Press.

Cita recomendada

Joven Noriega, K. J. (2022). Diseño e implementación de una página web para la enseñanza de la computación cuántica - *Quantum Computing INAN. Nexo Global. Artículos de reflexión*, pp. 1-9.