TRABAJO FIN DE GRADO (TFG)

Grado en Pedagogía

Curso 2024/2025

La enseñanza de la física cuántica en educación primaria y secundaria: una revisión sistemática

Autor/a

Sandra Martí Fernández

Tutor/a

Marcos Román González

Línea: 3. Diseño y Análisis de Materiales y Recursos Educativos

Convocatoria: Junio

Índice de contenido

Introducción: motivación y objetivos 5

Revisión de la literatura 8

La física cuántica y su conceptualización 8

Evolución histórica de la educación cuántica en K-12 9

Revisiones previas de la literatura 11

Preguntas de investigación 15

Metodología 15

Criterios de elegibilidad 15

Proceso de recolección de datos 16

Limitaciones 17

Resultados 18

Por qué es importante introducir la física cuántica en la educación obligatoria y formal 18

Cómo se está introduciendo la enseñanza de la física cuántica en K-12 23

Conceptos y contenidos clave (RQ1) 23

Procesos, metodologías y herramientas utilizados (RQ2) 25

Productos, Beneficios, Implicaciones y Perspectivas (RQ3). 40

Discusión 49

Conclusiones 51

Referencias 52

Apéndice 1. Tabla de datos cuantitativos 61

Apéndice 2. Conceptos y contenidos clave a los que hace referencia cada artículo 67

Apéndice 3. Presentación de las metodologías y herramientas empleadas en cada estudio 72

Apéndice 4. PRISMA *checklist* 77

Apéndice 5. Tabla de recursos..... 80

Resumen. Esta revisión sistemática de la literatura tiene como objetivo analizar la investigación existente sobre la enseñanza de la física cuántica en etapas K-12 (educación primaria y secundaria o 5-18 años), siguiendo el protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) y utilizando una muestra de 43 artículos extraídos de la base de datos Scopus. El análisis se centra en responder a tres preguntas clave: qué contenidos de física cuántica se están enseñando, qué metodologías y herramientas se están empleando y qué beneficios y productos educativos se han documentado hasta la fecha, todo ello desde una perspectiva pedagógica y siguiendo un enfoque metodológico cualitativo. Por último, se ha realizado una recopilación de recursos educativos hallados a lo largo de la revisión.

Palabras clave: educación en física cuántica, educación en mecánica cuántica, educación cuántica, revisión sistemática de la literatura, revisión protocolo PRISMA.

Abstract. This systematic literature review aims to analyse existing research on the teaching of quantum physics in K-12 education (5-18 years old), following the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) protocol and using a sample of 43 articles retrieved from the Scopus database. The analysis focuses on addressing three key questions: what quantum physics content is being taught, what methodologies and tools are being used, and what educational benefits and outcomes have been documented so far, all from a pedagogical perspective and using a qualitative methodological approach. Finally, a compilation of educational resources found throughout the review has been made.

Keywords: quantum physics education, quantum mechanics education, quantum education, systematic review of literature, PRISMA protocol review.

Introducción: motivación y objetivos

Cuando ya se creía que quedaba poco que hacer en física, varios científicos obtuvieron resultados contradictorios a lo conocido hasta entonces y propuesto por Newton, Maxwell y otros en sus experimentos. Es entonces, a principios del siglo XX, cuando surgió la nueva teoría de la mecánica cuántica, dando respuesta a dichas contradicciones, aunque en un ámbito diferente: el mundo atómico (Tipler, 1994). Así, la mecánica cuántica se erige como un pilar básico de la física moderna para comprender la naturaleza en la escala de lo diminuto (Bouchée et al., 2022).

No obstante, a pesar de ser uno de los pilares de la física, la teoría cuántica ha sido relegada a causa de su dificultad y la necesaria abstracción matemática para su estudio. En la LOMLOE, ni siquiera se menciona hasta cuarto de ESO y no se estudia con algo de profundidad hasta bachillerato (Real Decreto 217/2022, de 29 de marzo, 2022; Real Decreto 243/2022, de 5 de abril, 2022). Por lo tanto, es posible que el estudiantado que no curse el bachillerato de Ciencias y Tecnología no llegue a conocer la existencia de la física cuántica, ni a ser consciente de que el mundo atómico se comporta de forma muy distinta al mundo macroscópico y constituye la base del avance tecnológico actual.

Dicho panorama aumenta el riesgo de que el alumnado confíe en proclamaciones pseudocientíficas que pueden ser perjudiciales. En el caso de la física cuántica, por ejemplo, existen pseudoterapias que prometen desde eliminar los causantes de enfermedades del cuerpo hasta prevenir el envejecimiento prematuro sobre la base de una comprensión errónea de los fenómenos cuánticos (Cañellas, 2023). Dotar al alumnado de nociones básicas que posteriormente le permitan emplear su pensamiento crítico para discernir este tipo de embustes es una meta muy interesante para el sistema educativo. Aunque, lógicamente, esto debería abordarse desde todas las materias científicas, resulta especialmente relevante si se tiene en cuenta que, según Sciarretta et al. (2024), los principales tipos de creencias pseudocientíficas —las basadas en cuántica, las creencias pseudocientíficas en general y el ideario genérico de la conspiración— están altamente correlacionadas en la muestra de estudiantes analizada. En el caso que nos ocupa, el interés por analizar en mayor profundidad cómo abordar la enseñanza de la cuántica radica responde, entre

otras razones, a la dificultad que presenta tanto para ser comprendida como para ser enseñada, lo que puede contribuir al surgimiento de este tipo de creencias. De hecho, en el mismo estudio, los autores notaron que el alumnado obtuvo puntuaciones más altas en los ítems sobre creencias pseudocientíficas relacionadas con la cuántica que en los relacionados con la pseudociencia general y las teorías de la conspiración, lo cual podría indicar que no están tan familiarizados con los conceptos y términos utilizados en las afirmaciones pseudocientíficas relacionadas con la cuántica. Otro hallazgo de este estudio fue una correlación negativa entre la familiaridad con los conceptos cuánticos y la creencia en afirmaciones pseudocientíficas.

Por otro lado, no hay que olvidar que la física cuántica propició el surgimiento de una parte importante de la tecnología actual: desde las placas solares, hasta los componentes de los ordenadores y algunos tratamientos médicos, muchos de los cuales se basan en principios cuánticos. Sin embargo, el panorama no ha cambiado demasiado desde que Blanco Otano (2008) afirmara, ya en el año 2008, que es una materia reservada a algunas especialidades de 2º de Bachillerato. Sin embargo, en la región de Bavaria, Alemania, la física cuántica se encuentra en el currículum obligatorio de ciencias y un proyecto australiano de enseñanza mostró que “los conceptos de la ‘Física de Einstein’ son inteligibles para estudiantes de 14-16 años y que el programa incrementó significativamente el interés de las chicas en la física” (Stadermann et al., 2019, p. 13). Existen numerosos programas públicos y privados que incentivan la educación cuántica a los que se hará referencia más adelante.

Un tercer pilar de la importancia de incluir la física cuántica en el currículo es el surgimiento de la computación y las tecnologías cuánticas, la temática de una gran parte de la literatura analizada. Según Kaur y Venegas-Gomez (2022), es necesario fortalecer el enlace entre la academia y la industria, que cada vez requiere de más profesionales formados en tecnologías cuánticas. Educar a profesionales desde la educación obligatoria podría ser una clave para hacer frente a esta demanda, que actualmente se nutre en un porcentaje muy alto de doctores, dada la escasez de formación previa en la materia.

Por lo tanto, y según diversos estudios, resulta cada vez más necesario dotar al profesorado de herramientas que les permitan promover procesos de

enseñanza-aprendizaje y evaluarlos en este campo en concreto. Se erigen las cuestiones de cómo llevar este tema a la educación obligatoria, si realmente es posible hacerlo y cómo se puede evaluar.

Estos planteamientos constituyen argumentos de peso y motivación suficiente para profundizar la investigación en educación cuántica. Es por ello por lo que el propósito de esta revisión sistemática de la literatura será analizar las tres preguntas de investigación expuestas en el punto 4 en referencia a los contenidos de física cuántica que se están introduciendo y se han introducido hasta ahora, los procesos, metodologías y herramientas que se utilizan y los productos ocasionados, así como los beneficios encontrados y las perspectivas de futuro. Previamente, se realizará una revisión conceptual y contextual de la educación cuántica.

Revisión de la literatura

La física cuántica y su conceptualización

¿Qué es la física cuántica y por qué es tan difícil comprenderla? Aunque no es el objetivo de la revisión, para una mejor comprensión de ésta por parte del público de diversos perfiles académicos, se ha considerado incluir una breve introducción conceptual.

"La física cuántica es el estudio de la materia y la energía al nivel más fundamental", de sus propiedades y comportamientos (California Institute of Technology, s. f.). Su dificultad radica especialmente en el hecho de que dichos comportamientos son contraintuitivos según las leyes de la física clásica (o newtoniana). Una de las características de la física de partículas es que, a una determinada frecuencia, las partículas tienen una cantidad discreta y determinada de energía, es decir, que no se puede dividir en partes más pequeñas. Por otro lado, algunos de los principios, que son los que hacen difícil relacionarla con sistemas que nos resulten familiares por sus diferencias con el mundo clásico, son los siguientes:

- **La dualidad onda partícula:** los experimentos mostraron que las partículas se pueden comportar como partículas *y* como ondas, según la estrategia utilizada para medirlas. Sin embargo, hoy en día se ha comprendido que éstas no son partículas ni ondas, sino que son objetos cuánticos difíciles de conceptualizar.

- La superposición cuántica: las partículas tienen la característica de encontrarse en distintos estados cuánticos a la vez, con distintas probabilidades de que al observarlas se muestren en uno u otro estado.

- Principio de incertidumbre: dos propiedades de un objeto cuántico no se pueden conocer con precisión al mismo tiempo (por ejemplo: la posición y la velocidad).

- Entrelazamiento cuántico: se trata de un fenómeno que ocurre cuando dos o más objetos cuánticos están conectados de tal manera que se pueden considerar un solo sistema, sin importar la distancia que les separe.

Conceptualizar los fenómenos cuánticos plantea dificultades notables, de hecho, quizá aún ni siquiera existan los términos adecuados para hacerlo fuera del formalismo matemático, que predomina en la descripción, observación y estudio de la física cuántica. Dicho lenguaje matemático no es precisamente sencillo y requiere del dominio de ecuaciones diferenciales, operaciones con números complejos y con operadores lineales en espacios de Hilbert, entre otros (Stadermann et al., 2019). En resumen, su complejidad es demasiado elevada para un nivel inferior al de graduado en física o matemáticas. Entonces, ¿qué contenidos de física cuántica son apropiados y cómo debería abordarse su enseñanza?

En esta revisión sistemática de la literatura se presentarán las diversas maneras en las que se puede introducir la cuántica en etapas K-12 (primaria y secundaria o 5-18 años), que van más allá de su formalismo matemático e incluso se adentran en el campo histórico y filosófico.

Evolución histórica de la educación cuántica en K-12

Antes de embarcarse en una revisión de la literatura sobre la educación cuántica, cabe preguntarse en qué estado se encuentra la cuestión y cuándo comenzó a ser una preocupación, para poder situar en el tiempo este proceso de investigación.

Según Stadermann et al. (2019), cuya investigación ya se ha citado antes por tratarse de un análisis de calidad, ampliamente citado y publicado en una revista de notable prestigio, la introducción de la física cuántica en el currículum de Países Bajos en 2014 fue muy controvertida, puesto que los equipos docentes se preguntaban si estudiantes de secundaria serían capaces de entender conceptos tan complejos. Algo similar ocurrió cuando se introdujo en el currículo portugués en 2005, lo cual llevó a un análisis de varios países europeos para examinar qué contenidos se estaban enseñando en los distintos currículums (Lobato y Greca, 2005). Estas autoras ya acusaban la importancia de su introducción en la educación obligatoria y planteaban entonces la pregunta que hoy sigue vigente, que no es si los contenidos forman parte o no del currículo o si deberían enseñarse, sino *cómo* hacerlo a un nivel que el alumnado pueda comprender.

Así, el tema de la educación cuántica ha ido experimentando un crecimiento significativo, con un aumento de artículos publicados al respecto del 6.9% anual desde el año 2000 al 2021 (Bitzenbauer, 2021), con un impacto especialmente significativo en Estados Unidos. Por lo tanto, la comunidad científica es consciente de la relevancia de investigar sobre educación cuántica, aunque aún existe mucho potencial, especialmente en Europa.

De hecho, la Unión Europea fundó la *Quantum Flagship* (Quantum Flagship, s. f.-b), un tipo de proyecto muy similar al que ya se llevó a cabo con el Grafeno y al Proyecto del Cerebro Humano. Este último ha sido clave para el desarrollo de modelos que han permitido avances en los campos de la medicina y la computación, participando en el desarrollo de la inteligencia artificial tal y como la conocemos hoy (Rada, 2023). Uno de los pilares de la *Quantum Flagship* es la educación. La Unión Europea, como pilar de la segunda revolución cuántica, afirma que la educación es un eje crucial para que haya personas formadas capaces de impulsar la industria cuántica y una sociedad que sea consciente de la cuántica y esté abierta a sus posibles repercusiones (Quantum Flagship, s. f.-a). Para ello, han creado un Marco Europeo de Competencias para las Tecnologías Cuánticas y una comunidad llamada *QTEdu*[1] para fomentar la educación cuántica.

Por último, las Naciones Unidas han proclamado el 2025 como el Año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas[2] para sensibilizar al público general sobre la importancia de la cuántica y su impacto en diversos aspectos de la realidad y de la vida. Incitan, asimismo, a participar ayudando a otros a aprender más sobre cuántica o aprendiendo más uno mismo.

Por lo tanto, la cuántica no solo tiene un papel cada vez más relevante en la vida humana, sino que además están surgiendo numerosas iniciativas para que se convierta en un tipo de conocimiento presente en la sociedad. Para ello, es imprescindible trabajar en la manera de trasladarla adecuadamente al campo educativo.

[1] https://qtedu.eu/
[2] https://quantum2025.org/es/

Revisiones previas de la literatura

La cantidad de revisiones sistemáticas previas es reducida y está centrada en la computación cuántica, tal y cómo se puede observar en la Tabla 1. No es el caso de Haron y Halim (2023), que resulta muy útil por concentrar estudios empíricos, aunque limite su búsqueda a 2017-2022. Entre sus hallazgos se destaca el hecho de que la enseñanza de la física cuántica se lleva a cabo especialmente a través de experimentos y con la ayuda de apoyos informáticos, lo cual hace necesario que se cuente con una infraestructura digital suficiente en la escuela.

El artículo de He et al. (2021), aunque breve, recoge conceptos, estrategias y metodologías empleadas y revela que los conceptos de la física de Einstein se pudieron enseñar desde edades tan tempranas como 7º grado (1º de Educación Secundaria Obligatoria en España).

Por otro lado, la tesis de Shittu (2023) congrega información relevante de manera sistemática. Aunque se centra en la computación cuántica, sus hallazgos incluyen algunos puntos clave. Por un lado, que la investigación con relación a esta materia está aún en sus momentos iniciales. Además, afirma que la computación cuántica requiere de una aproximación interdisciplinaria e implica la colaboración de investigadores en campos como la física, la computación, las matemáticas y la educación. Por otro lado, asegura que la computación cuántica es compleja y abstracta, por ello se deben sentar las bases conceptuales en lugar de centrarse solamente en la resolución de problemas y también hace referencia a la necesidad de utilizar apoyos informáticos. Algunos de estos apoyos incluyen simuladores, juegos, laboratorios virtuales o cursos en línea. Menciona las estrategias pedagógicas empleadas, entre las cuales predominan las que cuentan con un enfoque práctico y afirma que cada vez abundan más los recursos digitales gracias a la expansión de la computación cuántica en los últimos años. Entre las limitaciones que recalca en su estudio, se encuentran la necesidad de un currículum estandarizado, en lugar de la práctica actual en la que cada educador debe buscar sus propias estrategias y decidir qué contenidos enseñar. Esta falta de estandarización puede dificultar el desarrollo de estrategias efectivas de enseñanza y evaluación. Un currículum que, según afirma, debería desarrollarse entre educadores, investigadores y expertos de la

industria. La dificultad de acceso a ciertos recursos digitales necesarios y la necesidad de entrenar al profesorado para la enseñanza de la computación cuántica son otras dos limitaciones que menciona.

Por último, la revisión de Yusuf y Román-González (2024), aunque aún en proceso de publicación, sigue un procedimiento sistemático para responder a varias cuestiones de corte pedagógico, como las razones para introducir la computación cuántica en K-12, el análisis de los conceptos, herramientas y metodologías empleados y los resultados obtenidos. Es una investigación de especial relevancia para el campo educativo y complementaria a la presente investigación, aunque más centrada en la computación cuántica que en la física cuántica en general.

Por lo tanto, la presente revisión se considera relevante porque recoge todos los artículos publicados en la base de datos seleccionada y no excluye aquellos que no hablan de computación cuántica, como se observa en otras revisiones. Asimismo, cuenta con un enfoque eminentemente pedagógico y cualitativo y sigue un procedimiento sistemático de recogida de datos.

Tabla 1.

Revisiones previas de la literatura.

Autores	País	Título	Nº artículos	Objetivo	Diferencias con la presente revisión
(Yusuf y Román-González, 2024)	Nigeria-España	A systematic review of Quantum Computing in K-12 education: A call for increased training and research rigor	38	Analizar las razones para introducir la computación cuántica en K-12, los conceptos que se están introduciendo, las herramientas y plataformas utilizadas, las metodologías y los resultados obtenidos, así como la calidad de la investigación.	Se centra en la computación cuántica.
(Shittu, 2023)	Finlandia	Systematic review on teaching quantum computing within k-12 levels	50	Analizar los estudios sobre la enseñanza de la computación cuántica en niveles K-12.	Se centra en la computación cuántica (principal criterio de búsqueda), no en la física cuántica en general.

(Lee y Yoon, 2023)	Corea del sur	A systematic literature review on secondary quantum physics education	-	Comparar las tendencias de investigación para derivar implicaciones sobre la investigación a nivel doméstico.	Se trata de un estudio que se centra más en los datos cuantitativos y refleja las necesidades en el propio país. No es de acceso abierto.
(He et al., 2021)	USA	A systematic literature review on secondary quantum physics education	29	Analizar la literatura existente en referencia a la enseñanza de la computación cuántica en K-12.	Revisión sencilla y basada en computación cuántica. Aunque su objetivo es analizar el estado de la enseñanza de conceptos cuánticos en general, centran su búsqueda en la computación cuántica.
(Haron y Halim, 2023)	Malasia	Teaching Quantum Physics at Secondary Schools: A Systematic Literature Review	24	Analizar hasta qué nivel se ha introducido la física cuántica en la escuela secundaria, qué métodos de enseñanza se han utilizado y qué retos se han enfrentado.	Búsqueda limitada a 2017-2022 y estudios empíricos exclusivamente. Utilizan bases de datos diversas: Scopus, WOS y Google Scholar.

Preguntas de investigación

Dado el enfoque pedagógico de la revisión, se han seleccionado tres preguntas de investigación centradas en este ámbito, a saber:

- **RQ1**: ¿Qué contenidos de física cuántica se introducen en la etapa K-12?

- **RQ2**: ¿Qué procesos, metodologías y herramientas se utilizan para introducir dichos contenidos?

- **RQ3**: ¿Qué productos se han creado, qué beneficios se han observado y qué perspectivas hay en el horizonte?

Metodología

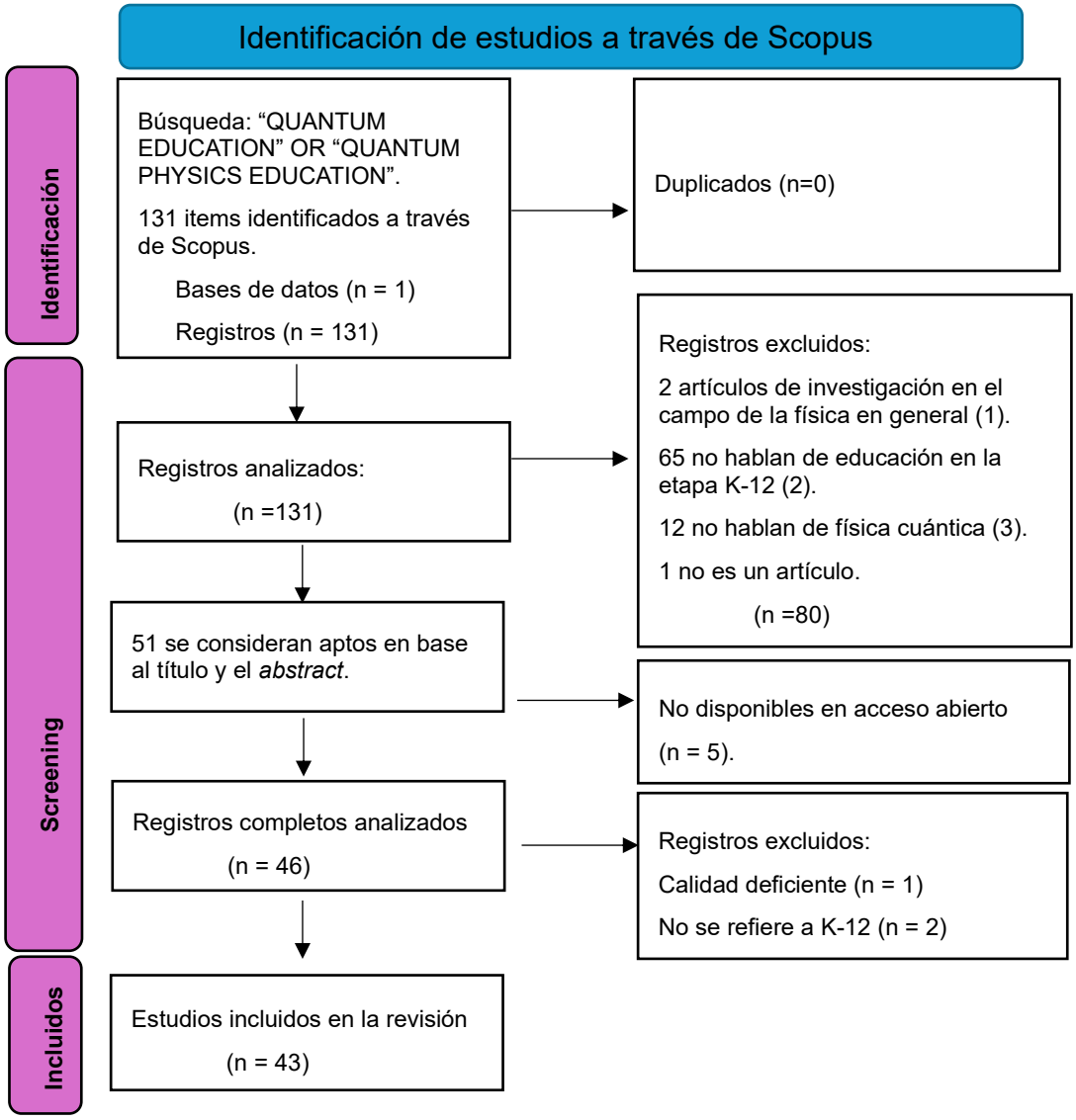
La metodología empleada sigue el protocolo PRISMA (Sánchez-Serrano et al., 2022) y se emplea la *checklist* (Apéndice 4) facilitada por los autores a lo largo del proceso para sistematizar la investigación de manera más exhaustiva.

Criterios de elegibilidad

Dada la limitación de tiempo, se seleccionó Scopus como única fuente de datos, en la que se introdujeron los términos de búsqueda “quantum education” OR “quantum physics education”. Dicha búsqueda inicial, realizada en julio de 2024, arrojó 131 resultados, a los cuales se aplicaron los siguientes criterios de inclusión: artículos que hicieran referencia a la enseñanza de la física cuántica y a la etapa K-12. Por otro lado, los criterios de exclusión aplicados fueron: artículos que no hicieran referencia a la etapa K-12, artículos relacionados exclusivamente con el campo de la física y no de la educación y artículos que no mencionaran la física cuántica. No se aplicó ninguna restricción de fechas o idiomas a la búsqueda. El proceso de búsqueda se ha resumido en un diagrama para mayor claridad que se puede observar en la figura 1.

Figura 1.

Diagrama de flujo de trabajo para la selección de artículos.



Proceso de recolección de datos

Para llevar a cabo la recolección de datos se siguió un proceso de tres pasos principales. En primer lugar, se exportaron los 131 resultados a una tabla de Excel y se descartaron aquellos que no cumplían con los criterios de inclusión y exclusión mediante el análisis del título y el resumen y, cuando fue necesario, utilizando el buscador PDF para localizar términos clave. Esta tarea se realizó manualmente debido al número reducido de artículos. Después, al obtener la muestra final de resultados, se volcaron todos ellos en una tabla para reflejar sus

datos cuantitativos más relevantes (Apéndice 1), es decir, título, autores, fuente, *abstract*, SJR, SNIP, nº de citas y tipo de artículo.

Una vez hecho lo anterior se procedió a la recolección de datos de la muestra en sí, volcando la información recogida de los artículos en una tercera tabla en la que se recogían el título, la información relacionada con las preguntas de investigación y algunos otros datos relevantes encontrados, esta vez mediante una lectura exhaustiva de cada artículo. Durante esta etapa también se detectaron algunos artículos que no eran de acceso abierto y otros que no cumplían con los criterios de inclusión y que no se habían detectado anteriormente. Por ejemplo, uno de los artículos que se consideró que cumplía los criterios de inclusión por mencionar *baccalaureate*, resultó referirse a los estudios de grado y no a los de Bachillerato, como se concluyó inicialmente.

Mediante el uso de esta tabla y del subrayado con código de colores de cada artículo, se recabó toda la información posible para responder las preguntas de investigación. El método seguido para presentar la información y responder a cada una se detalla en sus respectivos apartados.

Por último, tras completar la revisión, se recopilaron en la tabla del Apéndice 5 todo tipo de recursos hallados a lo largo del proceso, con el objetivo de facilitar su consulta. Dichos recursos se han clasificado bajo las siguientes categorías: sitios web, hardware y software, simuladores, aplicaciones y juegos, cursos, comunidades e iniciativas.

Limitaciones

Una de las principales limitaciones durante la recolección de datos fue la amplia variedad de tipologías de artículos que se encontraron, lo cual dificultó la recogida de información, su clasificación y su análisis.

Resultados

Los resultados se extrajeron de la muestra final de 43 artículos. Para su análisis, además del apoyo de las preguntas de investigación, se ha incluido un apartado previo que recopila las observaciones de los distintos autores acerca de la importancia de incluir la física cuántica en la educación preuniversitaria. Esta decisión se ha tomado porque en prácticamente la totalidad de artículos se analiza, en una medida u otra, dicho tema.

Por qué es importante introducir la física cuántica en la educación obligatoria y formal

Son muchos los adjetivos que pueden describir la organización de un currículum educativo, pero ‘simple’ no es uno de ellos. Resulta peligroso afirmar a la ligera que un determinado saber es ‘importante’ sin ciertos conocimientos sobre educación y diseño de currículum. Sin embargo, hay numerosas razones para considerar relevantes los contenidos sobre física cuántica y para otorgarles más peso del que poseen actualmente en la educación preuniversitaria.

La física cuántica ya forma parte del currículum español y la revisión de la literatura ha revelado varios argumentos que respaldan su inclusión en la educación secundaria. Por ejemplo, Gray-Donald (2007) afirma que el alumnado al que no se presente correctamente la física cuántica se adentrará en un mundo adulto en el que el paradigma científico habrá cambiado y no dispondrá del conocimiento necesario al respecto, además, la física clásica estará tan arraigada en su marco cognitivo que le será más difícil comprender el universo cuántico. Plunkett et al. (2020) destaca que es posible enseñar los fundamentos de la computación cuántica a edades más tempranas y que las técnicas aprendidas pueden transferirse a la computación clásica. También alerta sobre la necesidad futura de profesionales en la industria cuántica, que sería beneficioso formar desde ahora para hacer frente a esta demanda. Kaur y Venegas-Gomez (2022) recalcan que las tecnologías cuánticas están muy presentes en el panorama mundial, hasta el punto de que se están llevando a cabo esfuerzos para promover su desarrollo. De hecho, se espera que la segunda generación de tecnologías cuánticas tenga un potencial disruptivo, influya significativamente en la vida diaria y requiera programas formativos para

formar a profesionales del futuro (Bitzenbauer, 2021). Sin embargo, volviendo a las palabras de Kaur y Venegas-Gomez (2022), las organizaciones se están encontrando con un "cuello de botella cuántico", dado que existe un "número reducido de académicos bien formados y talento profesional especializado en ciencias y tecnologías cuánticas" (p. 1).

Bitzenbauer (2021) también se refiere a su importancia desde un punto de vista epistemológico, así como a su utilidad para reflexionar sobre el rol de los modelos en la ciencia. Añade, asimismo, algunos datos importantes sobre la investigación en este campo: los artículos publicados sobre educación cuántica han crecido significativamente, especialmente en Estados Unidos, así que el interés al respecto es creciente por parte de organismos públicos y privados. La investigación, según analiza el autor, cuenta con dos grandes áreas, una que se dedica a reconstruir contenidos para su enseñanza y otra que se enfoca en la investigación empírica sobre su enseñanza, dos pilares interconectados.

El aprendizaje de la historia y filosofía de la física cuántica y su relación con la "naturaleza de la ciencia" (*Nature of Science* en inglés) son otro punto clave a este respecto. La cuántica es una herramienta formidable para mostrar al estudiantado la importancia del pensamiento crítico y de cómo la ciencia puede evolucionar a lo largo de la historia, aunque esto signifique el cambio y la progresión de teorías antes tomadas como factibles. Ser conscientes de la falsabilidad de la ciencia, así como de las maneras en que ésta, en muchas ocasiones, no es lo que parece a primera vista, es un aprendizaje altamente valioso. La física cuántica proporciona numerosas oportunidades de aprender cómo se desarrolla el conocimiento científico y cómo funciona su investigación (Dayou y Markus, 2024). Además, las reconstrucciones, experimentos o controversias históricas parecen "alentar interesantes discusiones filosóficas entre estudiantes y apoyar su comprensión de la física cuántica" (Bouchée et al., 2022, p. 193). Esta parcela de la ciencia resulta especialmente eficaz a la hora de alentar este tipo de reflexiones y discusiones por parte del alumnado, promoviendo el desarrollo de su pensamiento crítico y la comprensión de la naturaleza de la ciencia para convertirles, no en "potenciales científicos y científicas", sino en personas (Holincheck et al., 2024, p. 3).

Por otro lado, la dificultad y abstracción inherentes a la física cuántica justifican la necesidad de investigar metodologías y herramientas adecuadas para su enseñanza. El estudiantado distorsiona en muchas ocasiones el carácter no determinístico de la física cuántica para relacionarlo con su conocimiento clásico previo. Por ello, sin una perspectiva adecuada, podrían generar modelos mentales inexactos o incorrectos sobre ésta (Rodriguez et al., 2020).

En palabras de Bouchée et al. (2022), “la abstracción de la física cuántica suele encontrarse en el origen de las dificultades conceptuales de los estudiantes”, que pivotan “hacia lo que ya saben para interpretar los fenómenos cuánticos, como el confiar en su sentido común o en el pensamiento clásico” (p. 183). El nuevo marco de pensamiento que conforma la física cuántica requiere, por su parte, una reestructuración extensa del antiguo.

> “Explorar las razones de la experimentada naturaleza abstracta de la física cuántica permitirá comprender mejor el origen de las dificultades conceptuales de los estudiantes, las luchas que éstos tienen para superar estas dificultades conceptuales y los problemas a los que se enfrentan los profesores para apoyar el desarrollo conceptual de la física cuántica por parte de los estudiantes” (Bouchée et al., 2022, p. 184).

Los autores profundizan en el proceso de construcción de significado que experimenta el alumnado al aprender física cuántica y recalcan la importancia de las ideas previas. Sin un marco conceptual adecuado, esta construcción podría presentar carencias significativas, dado que los estudiantes tratarían de interpretar el nuevo conocimiento con su marco actual: las asunciones, conocimientos y creencias previas constriñen sus procesos de pensamiento y guían sus estrategias de razonamiento, influyendo en sus dificultades conceptuales. En consecuencia, si falla este proceso de construcción de conocimiento, razonarán basándose en experiencias personales, desinformación que escuchan, inadecuaciones pedagógicas, lenguaje no verbal, analogías inapropiadas o sus asunciones epistemológicas. Algunas dificultades conceptuales que enumeran Bouchée et al. (2022) son la construcción de un vínculo entre el formalismo matemático y la realidad física, la interpretación de fenómenos contraintuitivos, la transición de un punto de vista determinista a uno probabilístico y las limitaciones del lenguaje a la hora de describir la física

cuántica. El breve tiempo dedicado en la educación secundaria a tratar la física cuántica podría resultar escaso para que los estudiantes reconstruyan su modelo mental y desarrollen una comprensión conceptual suficiente de la física cuántica. No sin razón Montagnani et al. (2023) afirman que “enseñar y aprender mecánica cuántica es uno de los desafíos más demandantes educacional y conceptualmente hablando para profesores y estudiantes” (p. 2).

Chiofalo et al. (2022) alertan sobre el enfoque tradicional y excesivamente descriptivo, basado en una reconstrucción histórica de los hitos en la interpretación de la cuántica, sin prestar suficiente atención a su vertiente conceptual e interpretativa, es decir, su significado y comprensión. Esta perspectiva puede derivar en formas de pensamiento semiclásico, que distorsionan la comprensión de los fenómenos cuánticos y de la naturaleza de la ciencia. Utilizar la cuantización como una solución a distintos problemas interpretativos según han ido apareciendo históricamente, no proporciona un perspectiva global de la teoría cuántica, que es necesaria para su adecuada comprensión (Montagnani et al., 2023).

Lovisetti et al. (2023) reflexionan, no solo sobre la importancia de introducir la física cuántica desde edades tempranas, sino también sobre la necesidad de investigar y repensar el modo de hacerlo. Recalcan que es imprescindible dedicar esfuerzos “en una reconstrucción didáctica efectiva en la conducción del estudiantado hacia un cambio conceptual adecuado” (p. 2), y que este camino debe ser construido con coherencia interna. La simplificación, fruto de la modelización, no debería ser el punto de partida, sino la meta de un largo proceso de aprendizaje bien estructurado. Si se presentan modelos simplificados sin una correcta adquisición del marco conceptual subyacente a la teoría, el alumnado podría llegar a interpretaciones erróneas y construir ideas distorsionadas. Además, la física cuántica no debería tratarse como una teoría aislada, sino que se puede beneficiar de un enfoque interdisciplinario, incorporando la integración de contextos formales, no formales e informales: desde cuentos para niños, vídeos, obras de teatro, juegos, libros, cómics, dibujos animados, hasta arte, música, filosofía y poesía, pueden facilitar la apropiación de los conceptos cuánticos y favorecer una comprensión cultural más profunda de esta teoría.

En línea con esto, el trabajo de Holincheck et al. (2024) recoge las experiencias de una variedad de docentes de primaria y secundaria que participaron en un taller sobre la enseñanza de física cuántica y la describieron como una manera de aventajar a sus estudiantes y de llamar su atención, gracias a su novedad y su utilidad en el futuro. No obstante, también expresaron su preocupación por carecer del tiempo y la formación necesarios para introducirla en sus clases, lo cual reincide, una vez más, en la utilidad de investigar sobre su didáctica; sobre la manera de introducirla en el currículo de manera que haya ciertos estándares; y sobre los recursos disponibles.

La literatura científica ya comienza a hacer referencia al concepto de la alfabetización cuántica y a los esfuerzos realizados para promoverla (Chiofalo et al., 2024; Foti et al., 2021; Kaur y Venegas-Gomez, 2022). Está claro que los nuevos paradigmas científicos y tecnológicos requieren una aproximación pedagógica apropiada y que la alfabetización del alumnado en aquellos más relevantes es imprescindible tanto para su progreso como para el progreso tecnológico de la propia humanidad. El conocido pensamiento computacional se dirige hacia a un nuevo paradigma, holístico y caracterizado por una manera de pensar y operar difusa, la cuántica (Román-González et al., 2025). Como se ha visto y se verá, su aprendizaje no se basta de la adquisición conceptual, sino que requiere una reformulación de los marcos mentales presentes hasta ahora y un cuestionamiento de su didáctica. Por esta razón, la alfabetización cuántica en etapas tempranas, así como ya lo es la digital, es imprescindible si se desea aumentar la concienciación del público general y construir una fuerza de trabajo suficiente en relación a las necesidades futuras (Kaur y Venegas-Gomez, 2022).

En resumen, existen sobradas razones para justificar la importancia de una mayor profundización en la física cuántica durante las etapas preuniversitarias, tanto en la investigación como en la acción pedagógica:

- La construcción de un futuro con suficientes profesionales preparados para las tecnologías venideras, muchas de las cuales estarán basadas en la cuántica.
- Tal y como se mencionaba en la introducción, evitar la adopción de creencias pseudocientíficas por parte del estudiantado.

- El creciente interés de la comunidad científica por la investigación sobre educación cuántica.
- La comprensión del mundo desde las distintas dimensiones de la realidad a nivel científico y epistemológico.
- La dificultad de la física cuántica hace necesario investigar sobre su didáctica y la insuficiencia de recursos sobre metodologías apropiadas que sustituyan la usual aproximación desde enfoques más tradicionales. Es clave que existan ciertos estándares e itinerarios dentro de un campo de tal complejidad para que su enseñanza resulte efectiva en distintos momentos del desarrollo.

Cómo se está introduciendo la enseñanza de la física cuántica en K-12

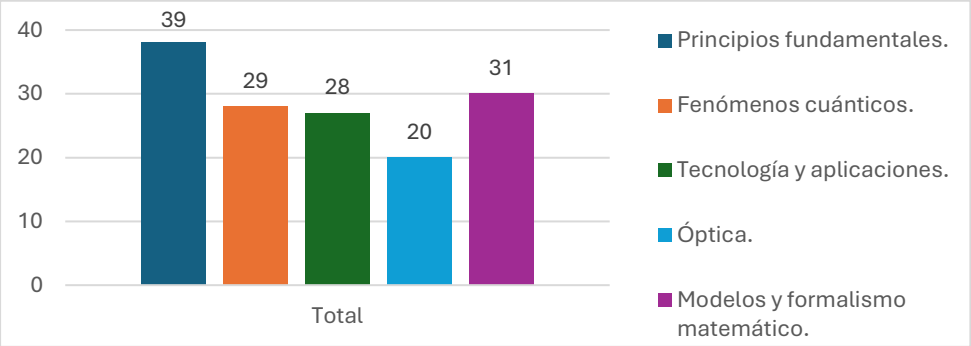
A continuación, se proceden a presentar los resultados extraídos de los estudios mediante la respuesta a las tres preguntas de investigación.

Conceptos y contenidos clave (RQ1)

La muestra de artículos trata una variedad de contenidos clave que se están enseñando actualmente en la educación formal, no formal e informal. Para sistematizar la recogida de información, el Apéndice 2 recopila dichos contenidos en parcelas más amplias de conocimiento y especifica qué artículos hacen referencia a cada una de estas parcelas. El gráfico 1 describe la frecuencia de aparición de cada tema según el número de artículos que lo mencionan.

Gráfico 1.

Frecuencia de aparición de conceptos y contenidos.



En los criterios de clasificación temática se han incluido también las temáticas que los autores proponen tratar por ser adecuadas para la etapa K-12 aunque no se indicara directamente su uso actual. La distribución es la siguiente:

- Principios fundamentales: conceptos relacionados con la base teórica y filosófica de la física cuántica. Son los conceptos y principios básicos fundamentales que constituyen el modelo estándar. Incluyen la superposición, el entrelazamiento, la dualidad onda-partícula, la función de onda, el principio de incertidumbre de Heisenberg, la longitud de onda de De Broglie, el colapso de la función de onda y la medición cuántica, la no localidad, el indeterminismo y la naturaleza probabilística de la cuántica, la cuantización de la energía, el cambio de paradigma científico y sus interpretaciones desde la perspectiva epistemológica o filosófica.

- Fenómenos cuánticos: representados a través de experimentos como el de la doble rendija, aquellos que utilizan láseres, la interferencia cuántica, la polarización de la luz, el efecto túnel, los experimentos de Bell y Hardy y los experimentos ideales o simulados como el de la suma de caminos o el pozo de potencial cuántico.

- Tecnologías cuánticas y aplicaciones: incluye los conceptos ligados a desarrollos tecnológicos y aplicaciones prácticas como la computación cuántica, que a su vez incluye los qubits, las puertas cuánticas, la criptografía cuántica, la distribución de claves cuánticas, el *Machine Learning* cuántico y la corrección de errores cuánticos.

- **Óptica**: todos aquellos conceptos relacionados con la luz, la excitación del campo cuántico electromagnético o fotón, la polarización, la ondulación, la interacción de la luz y la materia, los espectros atómicos, la dispersión y la electrodinámica cuántica. Se ha optado por separar este campo porque en muchos artículos se introduce la cuántica a partir de fenómenos ópticos, así que adquiere especial relevancia en la conceptualización de otros principios y fenómenos.

- **Modelos y formalismo matemático:** lenguaje cuántico formal y sus modelos, lo cual engloba los estados cuánticos, los operadores y la lógica cuántica, el álgebra booleana, los modelos didácticos visuales y conceptuales,

la correspondencia entre física clásica y cuántica y el formalismo contra la intuición.

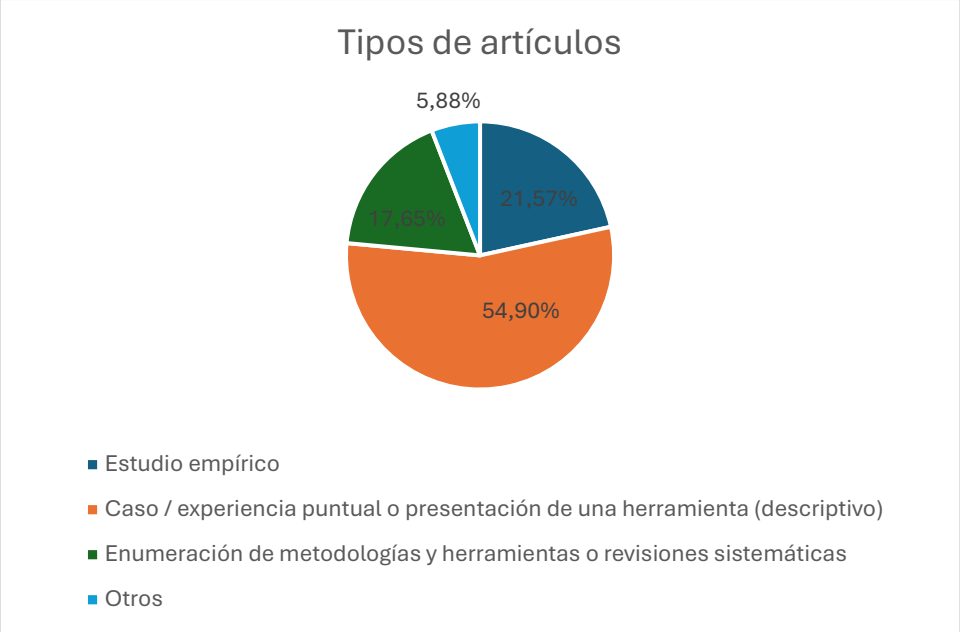
Como se puede observar, los conceptos que se están enseñando actualmente, abarcan una amplia variedad de contenidos de la física cuántica, pero a un nivel básico y en consonancia con el nivel de matemáticas y física adquirido en cada etapa. Dichos conceptos se distribuyen de manera similar entre los artículos, siendo los principios fundamentales los más frecuentes, aunque la razón es obvia: para enseñar física cuántica se debe hacer referencia a sus principios básicos. Según las observaciones de las investigaciones, la adquisición de dichos conceptos es posible por parte de los estudiantes.

No obstante, Lovisetti et al. (2023) plantean una presentación de dichos conceptos que sea lógica, ordenada, coherente y acorde a la construcción del conocimiento previo. Según este artículo, la introducción de conceptos cuánticos no debería seguir un orden histórico, ni tender a la excesiva simplificación, sino que el alumnado debería comprender una serie de axiomas que se van presentando de manera sistemática y secuencial, con dificultad incremental, para que pueda construir una teoría de manera coherente con pilares sólidos y modelos mentales apropiados, no confusos. También están a favor de la construcción de una didáctica de la física cuántica, tal y como se hace en otras materias y en la propia presentación de la física clásica, y no conciben la presentación aleatoria de conceptos. Este artículo es el único que hace hincapié en la aproximación didáctica de los contenidos, es decir, argumenta que éstos no se pueden decidir en función de su relevancia para la investigación física, sino que se deberían analizar desde una perspectiva didáctica, teniendo en cuenta la manera en que funciona el desarrollo de los estudiantes y en que aprenden.

Procesos, metodologías y herramientas utilizados (RQ2)

Para analizar la pregunta de investigación 2 se ha preparado una clasificación de artículos que permita analizarlos en porciones más reducidas (Apéndice 3). La clasificación se ha realizado teniendo en cuenta el tipo de presentación que hace el artículo de la educación cuántica y se ha dividido en cuatro bloques. El primer bloque agrupa los estudios empíricos: aquellos artículos que, de una manera sistematizada, utilizan una muestra para obtener

datos sobre ella, incluyendo enfoques descriptivos, cualitativos o estudios de caso. En el segundo bloque se han recopilado aquellos artículos que versan sobre un caso o experiencias puntuales y aquellos en los que se describe una herramienta o metodología en particular. Por otro lado, en el tercer bloque se encuentran los artículos que enumeran varias metodologías o herramientas y las revisiones sistemáticas y bibliométricas de la literatura. También se ha reservado un cuarto bloque a los artículos que no cumplían con ninguna de las clasificaciones mencionadas anteriormente.



A continuación, se procede a analizar los datos más relevantes de cada tipología. Mientras que la pregunta de investigación 1 trataba de responder qué se enseña, en esta pregunta se busca respuesta a cómo se están enseñando dichos contenidos.

Estudios empíricos. Aproximadamente el 21% de los artículos analizados son estudios empíricos cualitativos o mixtos. Se debe tener en cuenta que algunos de los casos de la sección 2 se han englobado también en esta sección porque a pesar de ser descripciones de casos puntuales o herramientas particulares, se ha empleado algún tipo de metodología de análisis de datos propia de los estudios empíricos. Los tamaños de la muestra de los estudios analizados se encuentran entre N=16 y N=120 (en la tabla del Apéndice 3 se detalla el tamaño de cada uno de ellos).

Los estudios revisados describen metodologías como:

- El uso de actividades experimentales realizadas por el alumnado en el laboratorio siguiendo un proceso de aprendizaje guiado y secuenciado en distintas fases (Sutrini et al., 2019);
- La enseñanza reflexiva (*inquiry based learning*), también mediante un aprendizaje guiado y secuenciado en fases (Rodriguez et al., 2020);
- El uso de videojuegos para aumentar la motivación y aprender de manera intuitiva al hacer uso de estrategias de resolución de problemas y exploración, así como de obras de teatro y analogías para favorecer la comprensión (Chitransh et al., 2022);
- La combinación de clases magistrales con juegos como el tres en raya cuántico, experimentos con polarizadores y vídeos sobre conceptos cuánticos (Chiofalo et al., 2022);
- La unión de clases magistrales, discusiones, resolución de problemas, la enseñanza de las aplicaciones tecnológicas en el mundo real, el aprendizaje activo y los materiales digitales como soporte (Bouchée, Thurlings, et al., 2023);
- El desarrollo previo de modelos mentales para una comprensión conceptual más efectiva (Ubben et al., 2023);
- Los ejercicios guiados junto con discusiones que invitan a la reflexión conjunta, breves introducciones teóricas seguidas de prácticas con software y simuladores de fenómenos cuánticos creados a tal fin, la experimentación con láseres, exploración y observación directa de ciertos fenómenos, especialmente con luz y el uso de polarizadores (Ivory et al., 2023);
- Torneos con juegos que simulan algunos fenómenos cuánticos (Montagnani et al., 2023).

Por otro lado, Lovisetti et al., (2023) proponen una reconstrucción educacional de la mecánica cuántica que “presente los aspectos formales y conceptuales” […] “de manera plausible y comprensible” (p. 4), incluyendo asimismo otras áreas como la poesía, literatura y filosofía. Los autores proponen una perspectiva unificadora y tienen como objetivo construir un marco formal axiomático que sea accesible para el alumnado, de manera que no haya una

fragmentación de modelos y conceptos aislados, sino que se formen una visión global de la teoría cuántica. Su metodología se basa en inducir, para luego poder introducir, los principios fundamentales de la mecánica cuántica, de manera que posteriormente se pueda establecer una estructura axiomática formal y lógicamente organizada que el alumnado pueda comprender y establecer como marco mental que siente la base de la comprensión de la teoría cuántica. Para hacer esto, primero se inducen los principios mediante la experimentación, a través de la cual también se van introduciendo algunos formalismos matemáticos. Esto se hace de manera lineal y empleando una dificultad progresiva para que los axiomas introducidos primero sirvan de base para los sucesivos.

Este último caso es especialmente digno de análisis porque trata la teoría cuántica desde una perspectiva eminentemente didáctica. En lugar de presentar secuencias de aprendizaje sobre temas concretos para introducir algunos temas de interés, trata de formar una reconstrucción de la mecánica cuántica desde la perspectiva educacional como paradigma para su enseñanza. Según el equipo de investigación, esta metodología evitaría la fragmentación de modelos y la adquisición de ideas confusas sobre la cuántica por parte del estudiantado (Lovisetti et al., 2023).

Para llevar esto a cabo, se proponen metodologías interdisciplinarias que combinen arte, filosofía y ciencia, teniendo en cuenta que el alumno es un sujeto que vive en sociedad, la cual influye significativamente en su percepción de la ciencia y de la física cuántica. Por ello, recomiendan algunas herramientas como cuentos para niños, obras de teatro científicas, vídeos, exhibiciones científicas, juegos, libros educacionales, cómics, dibujos animados o actividades sociales, que propicien un entorno que conduzca hacia la apropiación de la teoría (Lovisetti et al., 2023).

El estudio de Holincheck et al. (2024) también recoge algunas metodologías, herramientas y actividades interesantes, como las actividades extracurriculares, los recursos online, los viajes a laboratorios en universidades y la metodología *Quantum Picturalism*, de la que se hablará más adelante. Por otro lado, hace referencia a algunas recomendaciones para la educación en computación cuántica como relacionarla con situaciones cotidianas, utilizar

estrategias de aprendizaje activo, centrarse en la parte conceptual y alinear contenidos y estándares curriculares. También menciona el enfoque práctico de cara a hacer los contenidos más accesibles y habla de dos estudios de la misma autora: uno de ellos identificaba una trayectoria inicial para aprendices jóvenes (Franklin, Palmer, Landsberg, et al., 2020) y el otro desarrolló recursos curriculares para analizar el concepto de reversibilidad cuántica en estudiantes de tercer curso (Franklin, Palmer, Jang, et al., 2020). Estas metodologías forman parte del marco teórico del estudio, pero la parte clave de éste es su análisis de la percepción docente mediante una muestra de 49 profesores de primaria y secundaria que revela que, aunque consideran que la cuántica es un tema relevante, no se sienten preparados o no tienen tiempo de enseñarla. Por lo tanto, se recalca la importancia de dos aspectos clave: la formación del profesorado y la estandarización de los contenidos.

Experiencias y casos puntuales. Este bloque engloba el mayor número de artículos de la muestra, un 54,9% del total. Algunos de los estudios de este bloque se solapan con los del anterior, dado que son estudios empíricos sobre una metodología o herramienta en particular. Sin embargo, aquí el análisis se centrará en los artículos de carácter descriptivo, sin una muestra ni un análisis sistemático de datos, que presentan casos particulares y propuestas metodológicas o herramientas concretas.

Uno de los enfoques más singulares es el de Giliberti (2019), en el que un grupo de físicos crea las lecciones aumentadas (*augmented lectures*), que mediante una **representación teatral** se aproximan a la física cuántica de una manera divertida e interactiva. Los autores indican que dichas lecciones podrían formar parte de una actividad multidisciplinar que conecte física y filosofía, arte, o utilizarse en el aula como una actividad reflexiva. Esta propuesta combina la poesía, la música y la danza desde una perspectiva lúdica y no formal, aunque rigurosa, para aproximar la física a la población general.

En la línea de las **actividades extracurriculares**, Silberman (2022) diseñó una presentación educativa modificable que recoge varias herramientas e integra teoría, práctica y recursos externos para ampliar el acceso a la física cuántica por parte del estudiantado. Por su parte, Khodaeifaal, (2022), desarrolló un programa de ciencias para hacer tangibles, comprensibles y accesibles

conceptos matemáticos complejos, como aquellos de la física cuántica, mediante el aprendizaje activo, desde una perspectiva práctica y centrada en sus estudiantes a través de simulaciones *PhET*[3] (*Physics Education Technology Interactive Simulations*), *Phyphox*[4] o vídeos de *YouTube*[5]. Además, hace recaer un peso significativo sobre la retroalimentación del estudiantado, las creencias sobre sus propias competencias, sobre su modo de pensar y sobre sus cogniciones individuales.

El papel de peso del entorno digital en la enseñanza y la promoción de la cuántica también se refleja en la **plataforma** *Qplaylearn*[6], un sitio online interactivo donde los estudiantes pueden aprender física cuántica. Se fundamenta en una metodología de tres pasos: construcción de intuición y compromiso, comprensión de conceptos cuánticos de una manera sencilla pero rigurosa y la adquisición formal mediante el lenguaje matemático. Combina diversas modalidades de aprendizaje (jugar, descubrir, aprender), para que el estudiantado seleccione la aproximación con la que se sienta más cómodo (Foti et al., 2021).

Por otro lado, en el campo de la **computación cuántica** es común el uso de juegos para el aprendizaje, reforzando así la metodología de *aprender haciendo* tan extendida en el aprendizaje de la informática. Por ejemplo, mostrando la lógica booleana para luego transferir este conocimiento a la cuántica mediante juegos de mesa y videojuegos de manera que el alumnado desarrolle circuitos y puertas cuánticas simulados (Perkowski y Liu, 2021). Otra aproximación similar es la del proyecto descrito por Tucker (2023) sobre un curso piloto anual en computación cuántica que sigue una secuencia de experimentación, exploración matemática, la técnica del *aprendizaje justo a tiempo*, que consiste en ir introduciendo conceptos a medida que se requieren para continuar, y el uso de la polarización para estudiar conceptos cuánticos. Lo anterior se utiliza para introducir la información, la medida, la criptografía y las transformaciones cuánticas, los estados Multi-Qubit, el entrelazamiento y los algoritmos cuánticos y sus aplicaciones. Se trata, una vez más, de un

[3] https://phet.colorado.edu/
[4] https://phyphox.org/
[5] https://youtube.com/
[6] https://qplaylearn.com/

aprendizaje que se basa en la observación (simulaciones), la experimentación y la puesta en práctica mediante proyectos de programación, con una base conceptual y matemática. En Taiwán, para superar la barrera idiomática, se ha creado una red de aprendizaje sobre cuántica en chino. En el campo de la computación cuántica también se ha investigado el uso de las "Instrucciones Programadas", el sistema personalizado de instrucción, la instrucción directa, la instrucción asistida por ordenador y el análisis aplicado a la conducta, metodologías que han sido probadas como efectivas en poblaciones como niños, universitarios y personas con neurodivergencias (Wolf y Araiba, 2023). Los autores, sin embargo, se centran en el aprendizaje mediante instrucciones programadas, basadas en el enfoque conductual de Skinner, que consisten en presentar objetivos muy concretos y separados en fragmentos muy breves, medibles, proporcionando *feedback* inmediato, progresivos y que lleven al dominio del objetivo principal de aprendizaje. No obstante, este enfoque es algo controvertido en la comunidad científica por su aproximación exclusivamente conductual.

Una actividad muy extendida ya entre la **computación** clásica y que comienza a hacer presencia en la computación cuántica son los *hackatons (hacking marathons)*. En estos eventos, que duran varios días, los participantes deben crear un proyecto, de principio a fin, que funcione (Maldonado-Romo y Yeh, 2022). En este caso, se llevaron a cabo talleres introductorios sobre cuántica, seguidos del proyecto en sí. Un nivel introductorio de cuántica y programación era suficiente para participar y aproximadamente el 2% de los participantes (220) eran docentes y alumnos de secundaria.

También se presentan los casos de algunos **juegos**, como *Stranded*[7], una aventura de realidad virtual interactiva que presenta la mecánica cuántica de manera sencilla y activa para principiantes (Sreekuttan et al., 2022). Para ello, recurre a puzles que simulan el funcionamiento de las puertas cuánticas y algunos fenómenos como la superposición, el entrelazamiento, la medida o la teleportación cuántica. *Endless Fun in high dimensions*[8] es un juego de cartas digital en el que se puede experimentar con la construcción de bloques de un

[7] https://github.com/jowinjohnchemban/qkrishigame/?tab=readme-ov-file (en desarrollo)
[8] https://zenodo.org/records/4016359

ordenador cuántico (Kopf et al., 2023). En este también se pueden experimentar la superposición, la interferencia y el entrelazamiento cuántico e inicia mediante la introducción de las puertas lógicas cuánticas con las que el jugador debe aumentar el valor de su estado cuántico y disminuir el de sus competidores. Se puede jugar en grupo y aumentar o disminuir la dificultad trabajando en 2 o 3 dimensiones.

Por otro lado, es común el uso de **experimentos** que representan analogías a los fenómenos cuánticos para que el estudiantado pueda visualizarlos “en vivo” y así reducir su abstracción. Estas analogías se valen del uso de modelos que son una representación del mundo cuántico, dada la imposibilidad de una experimentación directa en un entorno educativo. Los fenómenos ópticos son especialmente útiles a este respecto y el uso de la experimentación y las operaciones con polarizadores está ampliamente extendida y aparece en artículos de todas las secciones analizadas (Aehle et al., 2022; Ivory et al., 2023; Lovisetti et al., 2023; Malgieri y Onorato, 2022; Montagnani et al., 2023; Seskir et al., 2022; Silberman, 2023; Tucker, 2023).

Estrechamente relacionado con lo anterior, también se utilizan **simulaciones y visualizaciones**, por ejemplo, *QWalkVis* (en desarrollo) es una aplicación que permite seleccionar las dimensiones, el número de estados y de pasos, para así generar posibles caminos, y está basada en los caminos o paseos aleatorios matemáticos clásicos (Jordon et al., 2023). La comparación entre ambos pretende ayudar al alumnado a visualizar lo que en realidad son complejas operaciones matemáticas para poder comprender su funcionamiento. Es una herramienta que no requiere conocimiento previo y funciona especialmente bien con personas que prefieren una presentación más visual de la información, lo cual suele ocurrir entre principiantes. Por último, el *Quantum Composer*[9] simula sistemas cuánticos introduciendo los datos pertinentes, de manera que permite visualizar algunos fenómenos como el potencial de doble pozo para mostrar cómo funciona el efecto túnel en mecánica cuántica y posteriormente enseñar el formalismo matemático asociado si el nivel lo permite

[9] https://www.quatomic.com/composer/

(Bley et al., 2023). Así, queda manifiesto que las herramientas digitales ocupan una parte muy amplia de la enseñanza cuántica.

Desde una aproximación más teórica, se analizan distintas estrategias para presentar la cuántica a través de las matemáticas. Por ejemplo, How (2022) muestra una introducción a los fundamentos matemáticos requeridos para modelar fenómenos propios de la computación cuántica de manera rigurosa pero inteligible para principiantes, así como un marco de referencia para docentes que permite investigar los efectos de dichas actividades en su alumnado.

Por su parte, Malgieri y Onorato (2022) destacan algunas de las problemáticas que puede presentar la conocida aproximación didáctica de la suma de historias *(sum over paths)* de Richard Feynman, como la posibilidad de que el alumnado malinterprete los caminos –o historias—entendiéndolos como trayectorias clásicas; la dificultad de abordar el enfoque en una dimensión independiente del tiempo frente a la formulación estándar con la función de onda; o su capacidad limitada para introducir conceptos como el espín. Para superar estas dificultades, los autores proponen soluciones como: utilizar estrategias educativas efectivas que permitan discutir problemas independientes del tiempo, como los estados ligados o el efecto túnel; mejorar el tratamiento del principio de incertidumbre, dado su carácter propedéutico respecto a otros conceptos; establecer conexiones con modelos de dos estados, como el espín o la polarización de la luz; emplear simulaciones y tutoriales para apoyar la comprensión mediante visualización; y clarificar la distinción entre las aproximaciones dependientes y no dependientes del tiempo. Entre las aplicaciones prácticas sugeridas en el artículo se incluyen el uso del problema de la partícula en una caja (*particle in a box*), el problema del efecto túnel a través de una barrera cuadrada, así como la relación de incertidumbre entre energía y tiempo desde una aproximación estacionaria, todo ello con el apoyo de simuladores como *GeoGebra*[10] y la introducción, ajustada al nivel del alumnado, de los formalismos matemáticos asociados.

[10] https://www.geogebra.org/

Por último, Dündar-Coecke et al., (2023) presentan el *Quantum Picturalism*[11], una nueva aproximación para representar cálculos matemáticos utilizados en la teoría cuántica y la computación cuántica de manera más visual para el alumnado, lo que reduce el nivel de abstracción y favorece la comprensión. Este método es útil para superar una de las barreras más desafiantes: la complejidad del formalismo matemático abstracto. Además, elimina el requisito de saber operar con álgebra lineal y números complejos y su aplicación también es posible en otros ámbitos, como el *machine learning*, la electrónica, la teoría de juegos o la lingüística. Algunas de sus aplicaciones didácticas incluyen la posibilidad de representar visualmente la teleportación cuántica, esferas de Bloch o determinados algoritmos cuánticos de manera clara e intuitiva. El grupo de investigación ha realizado un estudio empírico de la aplicación de esta metodología en el contexto de la educación secundaria con una muestra de 75 participantes y resultados positivos, pero aún se encuentra en estado de preimpresión.

Por último, el uso de analogías es una herramienta especialmente eficaz, además de empleada y nombrada por varios de los autores para sustentar conceptos, ayudar a visualizarlos y a comprenderlos (Aehle et al., 2022; Bouchée, de Putter-Smits, et al., 2023; Chiofalo et al., 2024; Chitransh et al., 2022; Fitzgerald et al., 2024; Jordon et al., 2023; Lovisetti et al., 2023). Incluso, Fitzgerald et al. (2024) presentan toda una actividad basada en este método, gracias a la cual detallan el funcionamiento de la teleportación cuántica mediante una analogía con *Santa Claus* y su capacidad de llevar regalos a todo el mundo en una noche.

Enumeración de metodologías y herramientas o revisiones sistemáticas. Este apartado comprende 9 artículos, el 17% del total, así que ya se han realizado algunas recopilaciones de las herramientas e investigaciones disponibles, lo cual podría indicar que se están empleando recursos y esfuerzos reales para el avance en este campo a nivel práctico.

Conocer qué demanda el mercado laboral puede ser un punto de partida que analizan Kaur y Venegas-Gomez (2022) en su investigación sobre las

[11] https://quantuminpictures.org/

necesidades educativas en el ecosistema cuántico actual, los caminos óptimos para reducir la brecha entre la academia y la industria y los lugares donde encontrar recursos educativos. Tras su análisis, del que ya se ha hablado en apartados anteriores, detectan, además de las necesidades descritas, una amplia variedad de recursos. Para empezar, los programas académicos, que recalcan que deberían implantarse desde secundaria para cubrir la demanda e iniciar al estudiantado desde edades más tempranas y que así estén preparados para contenidos más complejos en la universidad. Por otro lado, enumeran cursos online disponibles en una multitud de plataformas, como el lanzado por *QURECA*[12], en colaboración con *QuantiFi*[13]: *Quantum for Everyone*[14], los presentes en *edX*[15], *Coursera*[16171819] o *Udemy*[20212223], o la plataforma *SheQuantum*[24]. También recopilan conferencias, talleres y *hackatons*, que sirven para promover relaciones entre personas interesadas en las tecnologías cuánticas. Además, algunos de los juegos y simuladores que aparecen en este artículo son *IBM Hello Quantum*[25], *Quantum Chess*[26], *Virtual lab*[27], *Quantum Moves 2, Quantum cats, Quantum Odyssey*[28], *QuVis*[29] y *spin-Q Gemini*[30]. Por último, se muestran varias comunidades virtuales impulsadas por *QURECA*,

[12] https://www.qureca.com/es/
[13] https://www.quantfi.com/
[14] https://lms.qureca.com/product/quantum-for-everyone-2-0/?v=12470fe406d4
[15] https://acortar.link/gkFi28
[16] https://www.coursera.org/learn/quantum-computing-for-everyone-an-introduction
[17] https://www.coursera.org/specializations/packt-the-complete-quantum-computing-course-for-beginners
[18] https://www.coursera.org/learn/understanding-modern-physics-2-quantum-mechanics-and-atoms
[19] https://www.coursera.org/learn/packt-beginners-guide-to-practical-quantum-computing-with-ibm-qiskit-w6mos
[20] https://www.udemy.com/course/mathematical-foundations-of-quantum-computing/?couponCode=ST7MT290425G2
[21] https://www.udemy.com/course/quantum-computing-kitchen/?couponCode=ST7MT290425G2
[22] https://www.udemy.com/course/quantum-computing-on-aws-for-beginners-amazon-braket/?couponCode=ST7MT290425G2
[23] https://www.udemy.com/course/ai-quantum-computing-mastery-from-zero-to-expert-bootcamp/?couponCode=ST7MT290425G2
[24] https://shequantum.org/
[25] https://www.gameloop.com/game/educational/com.ibm.research.helloquantum
[26] https://quantumchess.net/quantum-chess/
[27] https://lab.quantumflytrap.com/lab?mode=waves
[28] https://www.quarksinteractive.com/quantum-odyssey
[29] https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/
[30] https://www.spinq.cn/

QWorld[31] y *OneQuantum*[32], creadas para concienciar sobre las tecnologías cuánticas mediante talleres, mentorías, eventos y otras actividades.

Plunkett et al. (2020) recopilan algunos de los esfuerzos educativos que se están realizando para facilitar la entrada de profesionales al campo de la computación cuántica. Dentro de la etapa de educación secundaria recalcan que introducir la cuántica en este momento, no solo es posible, sino que puede aumentar el interés del alumnado e incentivarle a elegir trayectorias académicas relacionadas con la cuántica. Por otro lado, reflexionan sobre la dificultad de introducir contenidos más amplios sobre cuántica en institutos porque el currículum suele estar altamente estructurado, sin embargo, la Fundación Nacional de Ciencia de Estados Unidos otorgó una beca de setenta y cinco millones de dólares a tres institutos cuánticos para incentivar la formación de una fuerza laboral que esté preparada para la era cuántica mediante el desarrollo de nuevos planes de estudios en distintas modalidades para todos los niveles educativos. Por último, mencionan la existencia de campamentos de verano como el de la Universidad de Harrisburg sobre computación cuántica.

Por su parte, Bouchée et al. (2022) analizan el origen de las dificultades conceptuales más comunes que presenta el estudiantado de secundaria y las razones por las cuales éstas se extienden en el tiempo. Fruto de su investigación, detectan que dichas dificultades son: “relacionar el formalismo matemático a las experiencias del mundo real”, “interpretar aspectos contraintuitivos propios de fenómenos cuánticos”, “transicionar desde un punto de vista del mundo determinista a uno probabilístico” y “comprender las limitaciones del lenguaje para explicar y expresar fenómenos, conceptos y objetos cuánticos” (p. 186). Para mitigar estas dificultades, proponen el “uso de materiales digitales y la discusión de la historia y filosofía de la física cuántica” (p. 192). Los apoyos digitales más comunes son las simulaciones y animaciones para visualizar fenómenos contraintuitivos y, en el caso de la historia y filosofía, sugieren ayudar al estudiantado a “reflexionar en las diferencias epistemológicas y ontológicas a través de las diferentes interpretaciones filosóficas” (p. 193), mostrar cómo los resultados contraintuitivos han resultado en debates históricos y enfatizar la

[31] https://qworld.net/
[32] https://onequantum.org/

existencia de distintos puntos de vista, así como las limitaciones del lenguaje para hablar de física cuántica.

El artículo de Ilchev y Kotseva, (2022) investiga las actividades instruccionales que actualmente se sugieren para enseñar física atómica y subatómica en 32 artículos analizados. Algunas de estas actividades son: enlazar los contenidos con el conocimiento previo o con la vida real, interpretar datos, participar en discusiones, trabajar en grupo y proporcionar retroalimentación. Asimismo, resalta que muchos de los artículos analizados ilustran procedimientos prácticos, ya que favorecen la visualización, algunos de los cuales se refieren a procedimientos experimentales y otros a la construcción o diseño de dispositivos en laboratorios.

Siguiendo con las actividades instruccionales, Silberman (2023) muestra varias actividades que ha observado en distintas instituciones, todas ellas extracurriculares. Por ejemplo, un grupo de estudiantes se animó a iniciar un club cuántico en el que se realizaban laboratorios prácticos con la ayuda de polarizadores y láseres. El instituto de Computación Cuántica de la Universidad de Waterloo creó una presentación sobre criptografía cuántica para estudiantes de secundaria mostrando experimentos con luz para enseñar sobre difracción y espectroscopia atómica. Por último, habla de *QxQ (Qubit by Qubit)*[33], una iniciativa online de *The Coding School*[34] junto con *IBM Quantum*[35] que ofrece talleres gratuitos y cursos a varias etapas educativas, entre ellas K-12, utilizando *Qiskit*[36], el software de IBM para trabajar con programación cuántica.

Yendo más allá, German et al., (2023) plantean tres planes curriculares para presentar temas relacionados con las ciencias de la información y tecnologías cuánticas (*QIST*). Aunque se centran en la educación universitaria, mencionan la educación secundaria y explican que es posible presentar conceptos cuánticos con un nivel de instituto en álgebra y trigonometría. También destacan algunos proyectos de éxito como una escuela de verano sobre información, ciencias e ingeniería cuánticas de Virginia Tech y dos cursos MOOC

[33] https://www.qubitbyqubit.org/
[34] https://the-cs.org/
[35] https://quantum.ibm.com/
[36] https://www.ibm.com/quantum/qiskit

de la Universidad de Chicago. Por último, muestran algunos proyectos como el de la Universidad de Waterloo antes mencionado y los talleres para docentes de secundaria de *Quantum for All*[37].

Los artículos restantes hablan sobre algunos de los juegos que han sido creados durante los últimos años para enseñar física cuántica a toda clase de personas (Chiofalo et al., 2024; Seskir et al., 2022). Entre ellos, se encuentran *Hello Quantum / Hello Qiskit* y *Quantum Oddyssey*, cuyo propósito es mostrar el funcionamiento de la computación cuántica. *Particle in a box*[38] y *Psi and Delta*[39] son juegos para aprender física cuántica introductoria de manera colaborativa. *Virtual Lab* y *Virtual optics laboratory*[40] son simuladores que permiten visualizar fenómenos cuánticos. *Qplaylearn* es una plataforma de recursos para llevar la cuántica a todo tipo de usuarios y que consta de vídeos, juegos, descripciones, gráficos y experimentos, entre otros. *Science at home* es una iniciativa que forma parte del proyecto *DigiQ*[41] y que ha creado múltiples juegos, aplicaciones y simuladores, como el *Quantum Composer* u otros anteriormente mencionados. Cabe destacar, por otro lado, el proyecto piloto *QUTE4E*[42], compuesto por varios grupos de investigación cuyo propósito es contribuir a la creación de un ecosistema de aprendizaje para informar a la sociedad sobre tecnologías cuánticas. Aunque no se trata de un juego como tal, es un proyecto de gran envergadura que planea elaborar un programa de contenidos sobre física cuántica y sus aplicaciones, así como identificar agentes, oportunidades, problemáticas y soluciones en la divulgación de la cuántica y promover actividades y discusiones para fomentar la participación.

El artículo de Chiofalo et al. (2024) enumera juegos como *Quantum Moves 2,* sobre estados cuánticos y resolución de problemas*, Quantum Monster,* sobre el comportamiento de partículas fermiónicas*,* y *The Alice challenge*, que convirtió un experimento real de enfriamiento de nubes de átomos en un juego para buscar soluciones de todo tipo por parte de una amplia variedad de público. Es especialmente remarcable su reflexión sobre lo que hace que un juego sea

[37] https://quantumforall.org/
[38] https://qplaylearn.com/game-particle-in-a-box
[39] https://qplaylearn.com/game-psi-and-delta
[40] https://www.vqol.org/
[41] https://digiq.hybridintelligence.eu/
[42] https://qtedu.eu/why-qtedu-csa

cuántico: “un videojuego o juego de ordenador con uno o más fenómenos de la física cuántica embebidos en su mecánica de juego” (p. 4). Asimismo, reflexiona sobre la posibilidad de “cuantizar” juegos clásicos incluyendo en éstos una o varias mecánicas consistentes en un fenómeno cuántico, como la superposición o el entrelazamiento. Como conclusión: los juegos “constituyen el contexto perfecto para permitir que las personas razonen de manera no convencional. Los momentos lúdicos tienen una influencia significativa en el desarrollo de la comprensión de un determinado contenido” (p. 10).

Otros. Este apartado representa los artículos que no encajaban en ninguna de las anteriores categorías y agrupa menos del 6% de artículos. Ninguno de los tres artículos incluidos en este apartado habla de metodologías, más bien, disertan y reflexionan sobre uno u otro aspecto de la situación de la educación cuántica. Gray-Donald (2007) sintetiza y analiza críticamente varios artículos relacionados con las implicaciones educativas de la teoría cuántica centrándose en el dualismo *Either/Or*, la ciencia como paradigma, la metodología de investigación, el caos y la incertidumbre, la no localidad y la espiritualidad. Ferrer (2020) muestra el profundo enlace existente entre la nueva ciencia y la educación integral, relacionando la cuántica con la filosofía. Por último, Purohit et al. (2024) analizan la preparación cuántica (*quantum readiness*) de la sociedad actual y cómo las entidades, organizaciones y personas pueden estar preparadas para el futuro cuántico.

A modo de resumen, los estudios repiten, por lo general, las siguientes metodologías y herramientas:

- **Metodologías activas:** mediante experimentación (*hands-on approach*), especialmente simulando laboratorios de física, reflexión (*inquiry based learning*) y observación, que ayudan a la creación de cierta intuición y a una mejor conceptualización y comprensión de los fenómenos cuánticos. El campo de la óptica sirve de recurso en muchas ocasiones a modo de introducción por compartir muchas características con la física clásica (uso de polarizadores, experimento de la doble rendija, etc.), con la que se puede comparar, y resulta sencilla de llevar al aula.

- **Metodologías y herramientas variadas:** se concluye que la aproximación desde diversos puntos de vista metodológicos (desde introducciones teóricas, hasta experimentación, observación, práctica, reflexión) y el uso de diversas herramientas (juegos, experimentos, simulaciones, vídeos, presentaciones) favorece un aprendizaje más sólidamente arraigado y la comprensión de la física cuántica desde edades cada vez más tempranas.
- **Uso de analogías**, especialmente partiendo de modelos del mundo clásico que introducen al cuántico.
- **Videojuegos y simuladores** para ayudar a visualizar fenómenos tan complejos como los cuánticos y como método adicional de experimentación. En muchas ocasiones sirven para experimentar con la computación cuántica.
- La **introducción de otras disciplinas** como el arte, la música, la filosofía o el teatro y de **actividades extracurriculares** que apelen al lado más emocional del estudiante mediante una concepción positiva de la ciencia por parte de la sociedad.
- La adecuada formación del profesorado.
- La creación de un **marco didáctico apropiado** a diferentes etapas del desarrollo siguiendo ciertos estándares que se pudieran relacionar con el currículum educativo.

Productos, Beneficios, Implicaciones y Perspectivas (RQ3).

En este apartado se han operacionalizado las razones clave para introducir la física cuántica en K-12 expuestas en el epígrafe “Por qué es importante introducirla en la educación obligatoria y formal”, transformándolas en categorías analíticas que permiten clasificar los beneficios, perspectivas e implicaciones identificados para cada una de dichas necesidades. Las categorías extraídas son las siguientes:

Necesidad	Categoría
Construcción de un futuro profesional cuántico	Formación para el futuro laboral y tecnológico

Evitar las pseudociencias	Desarrollo del pensamiento crítico y científico
Interés científico en la educación cuántica	Avance de la investigación educativa en cuántica
Comprensión epistemológica y científica de la realidad	Aportación a la formación epistemológica del alumnado
Complejidad del contenido y necesidad de estándares y metodologías apropiadas.	Necesidad de innovación didáctica estructurada

Formación para el futuro laboral y tecnológico. Empezar desde la educación obligatoria es esencial para incentivar al alumnado con la suficiente prontitud, además, los aprendizajes adquiridos sobre computación cuántica son aplicables a la computación clásica (How, 2022; Plunkett et al., 2020). Atraer a profesores y estudiantes es un punto de partida para atraer al estudiantado a los campos STEM y exponerles a conceptos cuánticos de manera que se encuentren mejor preparados para el futuro (Holincheck et al., 2024).

Eventos como los *hackatons* pueden motivar a sus participantes a ganar confianza en el aprendizaje de la cuántica, motivar y conectar a personas de intereses similares, así como a personas y empresas para potenciales colaboraciones (Maldonado-Romo y Yeh, 2022). También se han documentado experiencias como campamentos de verano para introducir la computación cuántica con resultados excepcionalmente positivos (Ivory et al., 2023).

La computación cuántica es un campo de amplio potencial, pero además es compatible con el aprendizaje de disciplinas del campo de la computación en general, como la ciberseguridad o la programación en distintos lenguajes (Tucker, 2023), es por esta razón que muchos de los esfuerzos relacionados con la educación cuántica se realizan en esta área. No hay que olvidar que la alfabetización digital, la programación y el pensamiento computacional son entes interrelacionados y cuyo aprendizaje se retroalimenta mutuamente. Desde lugares como Taiwán ya se están realizando esfuerzos por acercar la

computación cuántica mediante la traducción al chino de materiales, cursos, libros, vídeos, y contenidos digitales en general (Chang et al., 2023).

Así, aquellas organizaciones que estén listas para el futuro cuántico se aprovecharán de los beneficios potenciales y estarán bien posicionados en la economía cuántica global (Purohit et al., 2024).

Desarrollo del pensamiento crítico y científico. Las discusiones sobre filosofía de la ciencia ayudan a comprender mejor los contenidos científicos, a desarrollar habilidades de pensamiento complejo y comprender mejor la naturaleza de la ciencia (Bouchée et al., 2022). La existencia de distintas interpretaciones en física cuántica y su aparente contradicción con la física clásica debe ser tratada en el aula y su discusión es positiva en el desarrollo del pensamiento crítico y la alfabetización científica, así como una oportunidad más de aprendizaje (Bouchée et al., 2022; Dayou y Markus, 2024).

Asimismo, estudios sobre secuencias de aprendizaje que utilizan recursos PhET (*Physics Education Technology Interactive Simulations*), unidos a la colaboración entre compañeros y compañeras participando activamente en la resolución de problemas, han mostrado mejorar el pensamiento crítico de los estudiantes y su capacidad de resolución de problemas y habilidades de aprendizaje independiente (Khodaeifaal, 2022).

Además, la retroalimentación al estudiante puede ser valiosa a la hora de que tome conciencia de las falacias en sus presuposiciones y se sienta más receptivo a utilizar distintas estrategias para la comprensión (Bouchée, Thurlings, et al., 2023). Hacer preguntas clave, bien pensadas y relacionadas con lo que van aprendiendo puede ayudar a que despierten su pensamiento crítico y movilicen recursos cognitivos para responder (Ivory et al., 2023).

Avance de la investigación educativa en cuántica. Fruto de la investigación, han surgido multitud de proyectos relacionados con la educación cuántica. Por ejemplo, *Qplaylearn* (Foti et al., 2021), *PhET* (*Physics Education Technology Interactive Simulations*) (Bouchée, de Putter-Smits, et al., 2023; Dayou y Markus, 2024; Ivory et al., 2023; Khodaeifaal, 2022), *TANTIT* (Giliberti, 2019), el *Games Project* y el *Theatre Project* (Chitransh et al., 2022), *Stranded* (Sreekuttan et al., 2022), *QTEdu* (Chiofalo et al., 2022; Kaur y Venegas-Gomez,

2022; Lovisetti et al., 2023; Seskir et al., 2022), *Hello Qiskit, Hello Quantum, Particle in a box, Psi and Delta, Virtual Lab, Quantum Oddyssey, Science at home, Virtual Optics Laboratory* (Seskir et al., 2022), diversos cursos online, conferencias, talleres, hackatons y comunidades (Kaur y Venegas-Gomez, 2022), *OnRamps*[43] (Tucker, 2023), *QWalkVis* (Jordon et al., 2023), *Qubit by Qubit* (Purohit et al., 2024), *the National Quantum Initiative*[44] y la *National Q-12 Education Partnership*[45] en Estados Unidos (Holincheck et al., 2024).

Aportación a la formación epistemológica del alumnado. La cuántica despertó nuevas formas de ver la educación: desde una educación local, causal, lineal, determinista y objetiva, tras su aparición, muchos autores fueron proponiendo el trasvase de los principios cuánticos al terreno educativo, asumiendo que se pueden tomar de referencia principios como la dualidad, el caos, la no localidad, el carácter holístico, el pensamiento crítico y la espiritualidad (Gray-Donald, 2007). Aun así, sigue siendo imprescindible hacerlo desde la rigurosidad científica, con respeto hacia la complejidad de un tema para lo cual los profesionales de la educación deberían estar correctamente formados.

El paradigma cuántico cambiará el futuro de la economía, la tecnología y la educación, con profundas implicaciones filosóficas y pedagógicas (Ferrer, 2020), por lo tanto, es imprescindible mantener una mentalidad abierta y reflexionar más allá del pensamiento lógico y lineal para cuestionar lo que ya se conoce. Eso es precisamente lo que hace la física cuántica y la razón por la cual también puede convertirse en una fuente de análisis filosófico sobre las múltiples formas de conocimiento (racional, intuitivo, espiritual).

La comprensión de la función y del valor de la física cuántica en el mundo del estudiante puede favorecer su motivación y la del profesorado. Discutir aplicaciones tecnológicas actuales fomenta la alfabetización científica y la comprensión conceptual, lo cual aumenta la percepción de relevancia y su interés (Bouchée, Thurlings, et al., 2023).

[43] https://onramps.utexas.edu/
[44] https://www.quantum.gov/
[45] https://q12education.org/

Necesidad de innovación didáctica estructurada. Los estudios muestran que es posible enseñar y comprender física cuántica en educación secundaria cuando se sigue una secuencia estructurada, sistemática y se emplean las metodologías adecuadas. El estudiantado de 17-18 años de secundaria ha mostrado ser capaz de comprender los contenidos conceptuales y resolver problemas relacionados con el enfoque de la suma de historias de Feynman y con la yuxtaposición de las teorías ondulatoria y cuántica de la luz (Sutrini et al., 2019). También pueden comprender el rol de la frecuencia y la intensidad de la luz e interpretar correctamente el efecto fotoeléctrico (Rodriguez et al., 2020). Estudiantes de octavo y noveno grado (2º y 3º curso de Educación Secundaria Obligatoria en España) comprendieron los principios de las ondas y de la luz con un currículo especialmente diseñado para introducir la cuántica desde dicha perspectiva (Khodaeifaal, 2022). Además, las ideas sobre computación cuántica son accesibles a estudiantes de secundaria (How, 2022). Un grupo de estudiantes de 16 a 19 años fue capaz de hablar sobre superposición y entrelazamiento, aunque encontró mayor dificultad en los estados y las propiedades cuánticas (Chiofalo et al., 2022). Jóvenes de 11 a 18 años aumentaron su curiosidad e interés por la profundización en su aprendizaje gracias a la construcción de algoritmos para computadoras cuánticas (Holincheck et al., 2024).

Asimismo, los juegos y videojuegos pueden motivar, encender la curiosidad y contribuir a una mayor eficiencia en los procesos de aprendizaje (Foti et al., 2021), desarrollar la intuición relacionada con los comportamientos cuánticos (Montagnani et al., 2023), y posibilitar la presentación de contenidos más avanzados y complejos (Kopf et al., 2023; Perkowski y Liu, 2021) así como a aumentar el aprecio por las ciencias cuánticas (Chitransh et al., 2022). En asociación con otras actividades, pueden aumentar la participación, el compromiso, y ayudar a superar dificultades conceptuales gracias a su enfoque más operativo y visual. Además, la propia meta del juego puede convertirse en una meta de aprendizaje (Chiofalo et al., 2022). Por otro lado, existen juegos para aprender sobre experimentación, medida, computación cuántica y su programación y resolución de problemas (Seskir et al., 2022). El juego motiva y activa procesos de aprendizaje al conectarlos con habilidades simbólicas,

trabajar con la abstracción mediante la acción y desarrollar memoria lógica, además de tratarse de una situación generalmente agradable, lo cual aumenta la motivación (Chiofalo et al., 2024).

El uso de materiales digitales, por su parte, beneficia la comprensión conceptual (Bouchée et al., 2022). Las simulaciones son especialmente eficaces para apoyar la comprensión y simplificar el aprendizaje, así como para permitir el avance personalizado al ritmo de cada estudiante (Khodaeifaal, 2022) y, gracias al uso de otros materiales de apoyo, servir para visualizar conceptos abstractos y comprenderlos (Bouchée, de Putter-Smits, et al., 2023). Algunas oportunidades para utilizar materiales digitales son las discusiones para explorar conceptos o fenómenos y los métodos interactivos de evaluación para proporcionar retroalimentación rápida que favorezca el aprendizaje y haga relucir las dificultades o permita un cambio de enfoque por parte del docente en caso de ser necesario. De hecho, la evaluación ha demostrado incrementar la participación y la comprensión (Bouchée, Thurlings, et al., 2023).

Emplear una diversidad de métodos, especialmente participativos, parece tener resultados positivos en los “logros de aprendizaje, la autoeficacia, las concepciones sobre el aprendizaje, la alfabetización científica, la actitud y la detección de concepciones erróneas” (Ilchev y Kotseva, 2022, p. 118). Incluir la participación del alumnado, incluso mediante creaciones propias, de manera multidisciplinar, ha mostrado opiniones muy positivas de sus participantes (Giliberti et al., 2024). Además, presentar los contenidos con otras formas de expresión menos convencionales, como el teatro, la poesía, la música, la danza o el arte puede despertar la curiosidad e incentivar la motivación por aprender (Bouchée, Thurlings, et al., 2023; Giliberti, 2019).

La experimentación también ofrece numerosos beneficios, por ejemplo, una comprensión más profunda del funcionamiento de los objetos cuánticos o comparar los fenómenos cuánticos y clásicos mediante observación (Aehle et al., 2022). Estos experimentos suelen realizarse con polarizadores y láseres, por ser accesibles y permitir una amplia variedad de actividades (Silberman, 2023).

La enseñanza y aclaración del funcionamiento de los modelos en física cuántica es otra manera de favorecer la comprensión y evitar concepciones erróneas, además, facilita el tránsito de la visión clásica hacia la cuántica y ayuda a comprender mejor ciertos aspectos de la naturaleza de la ciencia (Ubben et al., 2023). En línea con esto, las analogías también se emplean por su capacidad para transmitir conceptos complejos, enriquecer el aprendizaje, permitir múltiples perspectivas y estimular al estudiantado. Aun así, deben utilizarse con sumo cuidado para no caer en una simplificación excesiva o concepciones erróneas (Aehle et al., 2022; Bouchée, de Putter-Smits, et al., 2023; Chiofalo et al., 2024; Chitransh et al., 2022; Fitzgerald et al., 2024; Jordon et al., 2023; Lovisetti et al., 2023).

El conocido método de la Suma de Historias de Feynman, por ejemplo, permite la construcción de modelos mentales consistentes, detallados e integrados de la dualidad onda partícula y del comportamiento de la luz, evita las concepciones deterministas e híbridas y conecta la óptica de rayos con la teoría cuántica de la luz. Además, contribuye a una comprensión más profunda de los fenómenos cuánticos. A nivel matemático, permite la reflexión utilizando un lenguaje formal, pero simple, que favorece la comprensión. A nivel conceptual, ofrece una representación clara de la dualidad onda partícula y a nivel de integración de conocimiento, presenta una perspectiva unificadora de la naturaleza de la luz (Malgieri y Onorato, 2022).

Por otro lado, identificar las causas de las dificultades conceptuales del alumnado puede ser una herramienta clave para desarrollar y evaluar la eficacia de los planes de estudio en física cuántica, la progresión de su aprendizaje, las estrategias didácticas empleadas y las actividades implementadas, puesto que permiten analizar si los estudiantes superan dichas dificultades y avanzan hacia un marco conceptual adecuado (Bouchée et al., 2022).

El *Quantum Picturalism*, un lenguaje diagramático para realizar cálculos de una manera más visual, “presenta un nuevo fundamento conceptual para aprender física y ciencia” con el foco situado en una “comprensión holística de la relación entre eventos y procesos” (Dündar-Coecke et al., 2023, p. 7). Además de simplificar el formalismo, es capaz de mejorar las habilidades de razonamiento sobre sistemas cuánticos. Se trata una herramienta de gran

potencial cuya efectividad se está investigando actualmente y sus objetivos principales son democratizar el acceso de estudiantes de secundaria a la cuántica e investigar si ésta es accesible en esta etapa.

Como se ha comentado al principio del apartado, diseñar, planificar y seguir una secuencia de aprendizaje coherente con el desarrollo del alumnado es clave para obtener buenos resultados (Fitzgerald et al., 2024; Montagnani et al., 2023). Se habla incluso de una estructura axiomática a nivel más global que permita seguir un camino didáctico concreto, un estándar que guíe la enseñanza de la cuántica y su puesta en práctica ha obtenido resultados muy positivos (Lovisetti et al., 2023). Para ello, es imprescindible la formación del profesorado, de manera que sepan cómo introducir la cuántica en sus clases, quienes ya muestran una actitud positiva y proactiva, pero notan falta de preparación por tratarse de un tema de alta complejidad (Holincheck et al., 2024). Talleres como el de Holincheck et al. (2024) han mostrado resultados positivos, tanto en docentes como en estudiantes.

En resumen, los artículos analizados han demostrado que:

- Existen beneficios, productos y perspectivas futuras en relación con cada una de las razones planteadas al principio cuando se enseña física cuántica en las etapas K-12.
- Su introducción en dichas etapas es fundamental para la formación de una fuerza de trabajo futura que esté preparada para los desafíos de la revolución cuántica.
- Introducir la cuántica en etapas más tempranas ayuda y promueve el pensamiento crítico y científico, así como el interés por la ciencia en general.
- El avance en la investigación está mostrando las posibilidades existentes, entre las cuales se encuentra su introducción en K-12.
- Permite procesos de pensamiento profundo que fomentan la formación epistemológica del alumnado.
- Permite el aumento de investigaciones de mayor calidad relacionadas con la innovación didáctica, la creación de estándares y secuencias de

aprendizaje para su introducción en el currículo y la formación del profesorado.

Discusión

Esta revisión sistemática de la literatura ha analizado una muestra de 43 artículos para responder a las cuestiones de qué contenidos se están enseñando, cómo se están enseñando y qué beneficios se reportan.

A grandes rasgos, se han detectado cinco grupos de contenidos: principios fundamentales, fenómenos cuánticos, tecnología y aplicaciones, óptica, y modelos y formalismo matemático. Entre los conceptos, se yerguen, como grandes protagonistas, la superposición cuántica, el entrelazamiento, la dualidad onda-partícula, el principio de incertidumbre y el efecto túnel. A dichos términos subyace toda una base matemática sobre la cual se asientan las aproximaciones de definición que tratan de describir con palabras fenómenos para los cuales probablemente aún no existan los términos apropiados. Es precisamente ahí donde radica la complejidad: su naturaleza contraintuitiva y probabilística existe en un mundo que funciona y se comunica en términos deterministas.

No obstante, la presente investigación ha abordado maneras de introducir dichos conceptos con eficacia en la etapa K-12 y se han mostrado multitud de metodologías y herramientas disponibles, como las metodologías activas, participativas e interactivas; las simulaciones, vídeos, experimentos y juegos; las diversas maneras de presentar las matemáticas asociadas; los eventos, comunidades, grupos de investigación e iniciativas globales.

Los resultados de las metodologías y herramientas mostradas son, en general, muy positivos y, aunque se requiere mayor investigación al respecto, las perspectivas son prometedoras.

No hay que olvidar que la tecnología tiene un papel extremadamente relevante en la época actual y, en especial, el mundo digital está transformando nuestra manera de ver el mundo, perpetrando en la sociedad como uno de sus motores. Por ello, la computación cuántica ocupa un lugar prominente dentro de la física cuántica aplicada y este hecho plantea implicaciones educativas y filosóficas significativas. Tal y como se ha desarrollado un marco de Pensamiento Computacional derivado de la computación clásica y su auge, se estudia, de igual modo, su evolución y se plantea una etapa no clásica, basada en la

cuántica, que debe ser atendida desde un punto de vista educativo (Román-González et al., 2025). Una posible implicación de esto podría ser un marco de pensamiento computacional cuántico que atienda a dichas necesidades tal y como ya lo hizo el marco de pensamiento computacional clásico durante el auge de la era digital.

Asimismo, cabe mencionar algunas limitaciones encontradas en la revisión. Para empezar, la mayoría de los artículos tratan sobre casos particulares y muy reducidos, así que es necesario ampliar la investigación para obtener resultados sólidos sobre los beneficios asociados a la introducción de la física cuántica en etapas K-12. Por otro lado, la investigación general se centra en edades superiores a los dieciséis años, por lo tanto, una posible perspectiva de investigación podría ser el análisis de los resultados en edades inferiores, así como la adaptación de los materiales disponibles a distintas etapas del desarrollo. Por último, aunque está creciendo la cantidad de investigación disponible, ésta es aún desordenada y sin aplicaciones prácticas en el aula bien definidas. Por ello, las líneas de investigación futuras podrían definir secuencias de aprendizaje globales y basadas en el andamiaje para determinar qué conceptos se enseñan primero y cómo avanzar en ellos, teniendo siempre en cuenta el desarrollo cognitivo del alumnado en las distintas etapas.

Por último, se debe destacar que en esta revisión se ha utilizado una única base de datos con las limitaciones obvias que esto conlleva. Aun así, Scopus constituye un corpus de renombre internacional, caracterizado por una amplia cobertura y un proceso de indexación riguroso, lo cual permite suponer que los artículos analizados cumplen con un mínimo de calidad científica. Además, el número de artículos analizados (N=43) mediante el protocolo PRISMA resulta suficiente para observar ciertas tendencias y clasificar enfoques, así como para poder extraer conclusiones fundamentadas sobre el estado actual de la investigación. Aun así, para futuras investigaciones se recomienda ampliar la búsqueda a otras bases de datos complementarias para una mayor representatividad.

Conclusiones

Este trabajo presenta una sistematización del estado actual de la educación cuántica en etapas K-12 al clasificar cuarenta y tres artículos y analizarlos para responder a las preguntas de investigación planteadas. Constituye, asimismo, un marco útil para futuras intervenciones educativas y para la consulta de la investigación disponible en la materia con el objetivo de diseñar planes didácticos en un campo emergente en el que la investigación aún no está excesivamente extendida. Su enfoque pedagógico lo dota de originalidad, dado que existe aún menos investigación al respecto dentro del ámbito de las ciencias de la educación.

Así, la revisión sistemática de literatura pretende ser una base sobre la cual se puedan construir propuestas educativas fundamentadas y significativas que permitan al alumnado comprender el mundo que le rodea, desarrollar el pensamiento crítico, vencer las afirmaciones y concepciones de bajo valor científico y contribuir al desarrollo de una fuerza de trabajo cuántica que supla la necesidad del esperado futuro cuántico.

Referencias

Se han indicado con un asterisco (*) las referencias incluidas en la revisión sistemática.

*Aehle, S., Scheiger, P., y Cartarius, H. (2022). An Approach to Quantum Physics Teaching through Analog Experiments. *Physics*, *4*(4), 1241-1252. https://doi.org/10.3390/PHYSICS4040080

*Bitzenbauer, P. (2021). Quantum Physics Education Research over the Last Two Decades: A Bibliometric Analysis. *Education Sciences*, *11*(11), 699. https://doi.org/10.3390/EDUCSCI11110699

Blanco Otano, M. (2008). La cuántica en los libros de texto de segundo curso de bachillerato. Quantum theory in text books of the second year of bachillerato. *Campo Abierto*, *27*(2), 49-72.

*Bley, J., Mattei, V., Goorney, S., Sherson, J., y Heusler, S. (2023). Modelling assisted tunneling on the Bloch sphere using the Quantum Composer. *European Journal of Physics*, *45*(2), 025401. https://doi.org/10.1088/1361-6404/AD139A

*Bouchée, T., de Putter - Smits, L., Thurlings, M., y Pepin, B. (2022). Towards a better understanding of conceptual difficulties in introductory quantum physics courses. *Studies in Science Education*, *58*(2), 183-202. https://doi.org/10.1080/03057267.2021.1963579

*Bouchée, T., de Putter-Smits, L., Thurlings, M., y Pepin, B. (2023). The design and construction of a PhET-based inquiry learning worksheet to develop understanding of the particle-in-a-box model. *Physics Education*, *59*(1), 015031. https://doi.org/10.1088/1361-6552/ad11f8

*Bouchée, T., Thurlings, M., de Putter - Smits, L., y Pepin, B. (2023). Investigating teachers' and students' experiences of quantum physics lessons: Opportunities and challenges. *Research in Science & Technological Education*, *41*(2), 777-799. https://doi.org/10.1080/02635143.2021.1948826

California Institute of Technology. (s. f.). *What Is Quantum Physics?* Caltech Science Exchange. Recuperado 18 de marzo de 2025, de http://scienceexchange.caltech.edu/topics/quantum-science-explained/quantum-physics

Cañellas, X. (2023, octubre 2). Qué es la salud y la medicina cuántica. *Regenera Health | Líderes en Medicina Integrativa y Psiconeuroinmunología*. https://regenerahealth.com/blog/que-es-la-salud-y-la-medicina-cuantica/

*Chang, R.-Y., Hsu, Y.-C., y Huang, T.-W. (2023). Taiwan Student Quantum Computer Society. *2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, *03*, 49-57. https://doi.org/10.1109/QCE57702.2023.20324

*Chiofalo, M. L., Foti, C., Lazzeroni, C., Maniscalco, S., Seskir, Z. C., Sherson, J., Weidner, C. A., y Michelini, M. (2024). Games for Quantum Physics Education. *Journal of Physics: Conference Series*, *2727*, 012010. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2727/1/012010

*Chiofalo, M. L., Foti, C., Michelini, M., Santi, L., y Stefanel, A. (2022). Games for Teaching/Learning Quantum Mechanics: A Pilot Study with High-School Students. *Education Sciences*, *12*(7), 446. https://doi.org/10.3390/EDUCSCI12070446

*Chitransh, S., Fischer, D., Kawalek, N., Laracuente, N., Markman, J., Gaunkar, S. P., y Zvi, U. (2022). A Multidisciplinary, Artistic Approach to Broadening the Accessibility of Quantum Science. *2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, 701-708. https://doi.org/10.1109/QCE53715.2022.00095

*Dayou, J., y Markus, L. (2024). An integrative review of secondary school quantum physics curricula in Malaysia. *International Journal of Evaluation and Research in Education (IJERE)*, *13*(1), Article 1. https://doi.org/10.11591/ijere.v13i1.26083

*Dündar-Coecke, S., Yeh, L., Puca, C., Pfaendler, S. M.-L., Waseem, M. H., Cervoni, T., Kissinger, A., Gogioso, S., y Coecke, B. (2023). Quantum Picturalism: Learning Quantum Theory in High School. *2023 IEEE*

International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE), *03*, 21-32. https://doi.org/10.1109/QCE57702.2023.20321

*Ferrer, A. (2020). Quantum education and paradigm shift integral education, quantum physics and consciousness. *Comprendre*, *22*(1), 63-99.

*Fitzgerald, B. W., Emonts, P., y Tura, J. (2024). A Christmas story about quantum teleportation. *Physics Education*, *59*(3), 035021. https://doi.org/10.1088/1361-6552/ad2cf4

*Foti, C., Anttila, D., Maniscalco, S., y Chiofalo, M. L. (2021). Quantum Physics Literacy Aimed at K12 and the General Public. *Universe*, *7*(4), 86. https://doi.org/10.3390/UNIVERSE7040086

Franklin, D., Palmer, J., Jang, W., Lehman, E. M., Marckwordt, J., Landsberg, R. H., Muller, A., y Harlow, D. (2020). Exploring Quantum Reversibility with Young Learners. *Proceedings of the 2020 ACM Conference on International Computing Education Research*, 147-157. https://doi.org/10.1145/3372782.3406255

Franklin, D., Palmer, J., Landsberg, R., Marckwordt, J., Muller, A., Singhal, K., Salac, J., y Harlow, D. (2020). Initial Learning Trajectories for K-12 Quantum Computing. *Proceedings of the 51st ACM Technical Symposium on Computer Science Education*, 1331. https://doi.org/10.1145/3328778.3372590

*German, A., Pias, M., y Xiang, Q. (2023). On the Design and Implementation of a Quantum Architectures Knowledge Unit for a CS Curriculum. *Proceedings of the 54th ACM Technical Symposium on Computer Science Education V. 1*, 1150-1156. https://doi.org/10.1145/3545945.3569845

*Giliberti, M. (2019). "There Are no Things Inside Things": An Augmented Lecture to Bridge the Gap Between Formal and Informal Physics Education. En P. McLoughlin Eilishand van Kampen (Ed.), *Concepts, Strategies and Models to Enhance Physics Teaching and Learning* (pp. 203-213). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18137-6_18

*Giliberti, M., Albanese, F., y Lovisetti, L. (2024). Principles and Equations of Physics: A multidisciplinary laboratory. *Journal of Physics: Conference Series*, *2750*(1), 012028. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2750/1/012028

*Gray-Donald, J. (2007). Implications of quantum theory on education: A critical review of the literature. *International Journal of Innovation and Sustainable Development*, *2*(3-4), 315-331.

Haron, S., y Halim, L. (2023). Teaching Quantum Physics at Secondary Schools: A Systematic Literature Review. *International Journal of Academic Research in Progressive Education and Development*, *12*. https://doi.org/10.6007/IJARPED/v12-i3/19308

He, Y., Zha, S., He, W., y Bastiaens, T. (2021). A Literature Review of Quantum Education in K-12 Level. *Proceedings of Innovate Learning Summit 2021*. https://digitalcommons.odu.edu/itds_facpubs/65

*Holincheck, N., Rosenberg, J. L., Zhang, X., Butler, T. N., Colandene, M., y Dreyfus, B. W. (2024). Quantum Science and Technologies in K-12: Supporting Teachers to Integrate Quantum in STEM Classrooms. *Education Sciences*, *14*(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/educsci14030219

*How, M.-L. (2022). Advancing Multidisciplinary STEM Education with Mathematics for Future-Ready Quantum Algorithmic Literacy. *Mathematics*, *10*(7), 1146. https://doi.org/10.3390/MATH10071146

*Ilchev, K., y Kotseva, I. (2022). Investigation of instructional practices in high-school atomic and subatomic physics. *Bulgarian Chemical Communications*, *54*, 116-123. https://doi.org/10.34049/bcc.54.B1.0418

*Ivory, M., Bettale, A., Boren, R., Burch, A. D., Douglass, J., Hackett, L., Kiefer, B., Kononov, A., Long, M., Metcalf, M., Propp, T. B., y Sarovar, M. (2023). Quantum Computing, Math, and Physics (QCaMP): Introducing Quantum Computing in High Schools. *2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, *03*, 1-9. https://doi.org/10.1109/QCE57702.2023.20318

*Jordon, A., Hawkins-Seagram, A., Norrie, S., Ossorio, J., y Stege, U. (2023). QWalkVis: Quantum Walks Visualization Application. *2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, *03*, 87-93. https://doi.org/10.1109/QCE57702.2023.20328

*Kaur, M., y Venegas-Gomez, A. (2022). Defining the quantum workforce landscape: A review of global quantum education initiatives. *Optical Engineering*, *61*(8), 081806. https://doi.org/10.1117/1.OE.61.8.081806

*Khodaeifaal, S. (2022). Updated and Adapted Curriculum and Pedagogy of Physics with the Fourth Industrial Revolution and Quantum Revolution: From Waves Principles to Quantum Mechanics Fundamentals. *2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, 653-668. https://doi.org/10.1109/QCE53715.2022.00088

*Kopf, L., Hiekkamäki, M., Prabhakar, S., y Fickler, R. (2023). Endless fun in high dimensions—A quantum card game. *American Journal of Physics*, *91*(6), 458-462. https://doi.org/10.1119/5.0062128

Lee, T., y Yoon, H. (2023). A systematic literature review on secondary quantum physics education. *Korean Association For Learner-Centered Curriculum And Instruction*, *23*, 299-314. https://doi.org/10.22251/jlcci.2023.23.16.299

Lobato, T., y Greca, I. (2005). Análise da inserção de conteúdos de Teoria quântica nos currículos de física do Ensino Médio. *Ciência & Educação (Bauru)*, *11*. https://doi.org/10.1590/S1516-73132005000100010

*Lovisetti, L., Organtini, G., y Giliberti, M. (2023). Inducing the construction of formal axioms of Quantum Mechanics and fostering their comprehension by high school students: The effectiveness of a conceptual approach. *Il Nuovo Cimento C*, *46*(6), 1-24. https://doi.org/10.1393/ncc/i2023-23200-1

*Maldonado-Romo, A., y Yeh, L. (2022). Quantum computing online workshops and hackathon for Spanish speakers: A case study. *2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, 709-717. https://doi.org/10.1109/QCE53715.2022.00096

*Malgieri, M., y Onorato, P. (2022). Recent Progress on the Sum over Paths Approach in Quantum Mechanics Education. *Physics*, *4*(3), Article 3. https://doi.org/10.3390/physics4030067

*Montagnani, S., Stefanel, A., Chiofalo, M. L. M., Santi, L., y Michelini, M. (2023). An experiential program on the foundations of quantum mechanics for final-year high-school students. *Physics Education*, *58*(3), 035003. https://doi.org/10.1088/1361-6552/acb5da

*Perkowski, M., y Liu, K. (2021). Binary, Multi-Valued and Quantum Board and Computer Games to Teach Synthesis of Classical and Quantum Logic Circuits. *2021 IEEE 51st International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL)*, *2021-May*, 93-100. https://doi.org/10.1109/ISMVL51352.2021.00025

*Plunkett, T., Frantz, T. L., Khatri, H., Rajendran, P., y Midha, S. (2020). A Survey of Educational Efforts to Accelerate a Growing Quantum Workforce. *2020 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, 330-336. https://doi.org/10.1109/QCE49297.2020.00048

*Purohit, A., Kaur, M., Seskir, Z. C., Posner, M. T., y Venegas-Gomez, A. (2024). Building a quantum-ready ecosystem. *IET Quantum Communication*, *5*(1), 1-18. https://doi.org/10.1049/qtc2.12072

Quantum Flagship. (s. f.-a). *Education & Training*. Quantum Flagship. Recuperado 18 de marzo de 2025, de https://qt.eu/ecosystem/education-and-training

Quantum Flagship. (s. f.-b). *Introduction to the Quantum Flagship*. Quantum Flagship. Recuperado 18 de marzo de 2025, de https://qt.eu/about-quantum-flagship/

Rada, A. G. (2023, septiembre 29). *Entre el desafío científico y los nuevos enigmas: Así concluye una década de investigación del cerebro*. Agencia SINC. https://www.agenciasinc.es/Reportajes/Entre-el-desafio-cientifico-y-los-nuevos-enigmas-asi-concluye-una-decada-de-investigacion-del-cerebro

Real Decreto 217/2022, de 29 de marzo, por el que se establece la ordenación y las enseñanzas mínimas de la Educación Secundaria Obligatoria. (2022). https://www.boe.es/buscar/pdf/2022/BOE-A-2022-4975-consolidado.pdf

Real Decreto 243/2022, de 5 de abril, por el que se establecen la ordenación y las enseñanzas mínimas del Bachillerato. (2022).

*Rodriguez, L. V., van der Veen, J. T., Anjewierden, A., van den Berg, E., y de Jong, T. (2020). Designing inquiry-based learning environments for quantum physics education in secondary schools. *Physics Education*, *55*(6), 065026. https://doi.org/10.1088/1361-6552/ABB346

Román-González, M., Moreno-León, J., Robles, G., y Rodríguez, J. (2025). *Extending the Computational Thinking Framework towards Quantum Education*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22136.56326

Sánchez-Serrano, S., Pedraza-Navarro, I., y Donoso-González, M. (2022). How to conduct a systematic review under PRISMA protocol? Uses and fundamental strategies for its application in the educational field through a practical case study. *Bordon. Revista de Pedagogia*, *74*(3), 51-66. https://doi.org/10.13042/Bordon.2022.95090

Sciarretta, W., Bondani, M., Galano, S., Malgieri, M., Onorato, P., y Testa, I. (2024). Analysis of pseudoscientific beliefs in quantum mechanics of high school students and teachers. *Physical Review Physics Education Research*, *20*(2), 020145. https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.20.020145

*Seskir, Z. C., Migdał, P., Weidner, C., Anupam, A., Case, N., Davis, N., Decaroli, C., Ercan, İ., Foti, C., Gora, P., Jankiewicz, K., Cour, B. R. L., Malo, J. Y., Maniscalco, S., Naeemi, A., Nita, L., Parvin, N., Scafirimuto, F., Sherson, J. F., … Chiofalo, M. (2022). Quantum games and interactive tools for quantum technologies outreach and education. *Optical Engineering*, *61*(8), 081809. https://doi.org/10.1117/1.OE.61.8.081809

Shittu, R. A. (2023). *Systematic review on teaching quantum computing within k-12 levels* [Master's thesis]. University of Eastern Finland.

*Silberman, D. M. (2022). Quantum education and pathways: An open-source modifiable presentation to high school and college students. *Proc. SPIE 12213, Optics Education and Outreach VII*, *12213*, 37-45. https://doi.org/10.1117/12.2641537

*Silberman, D. M. (2023). Teaching quantum to high school students. *Seventeenth Conference on Education and Training in Optics and Photonics: ETOP 2023*, 127232R. https://doi.org/10.1117/12.2665916

*Sreekuttan, L. S., Thampy, R. P., Thota, S., Sharma, A. M., Vikas, V. T., Chemban, J. J., Kumar, S. R., y Bhattacharya, S. (2022). Stranded: A Mainstream VR Quantum Game For Novices. *2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, 873-874. https://doi.org/10.1109/QCE53715.2022.00149

Stadermann, H. K. E., Van Den Berg, E., y Goedhart, M. J. (2019). Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic. *Physical Review Physics Education Research*, *15*(1), 010130. https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010130

*Sutrini, C., Malgieri, M., y De Ambrosis, A. (2019). Bubble: Experimenting with Feynman's sum over paths approach in the secondary school. *Life Science Journal*, *11*, 102-105. https://doi.org/10.1393/ncc/i2019-19241-4

Tipler, P. A. (1994). *Física moderna*. Reverte.

*Tucker, D. L. (2023). Leveraging Dual Enrollment Programs to Expand Secondary Education in Quantum Computation. *2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, *03*, 10-14. https://doi.org/10.1109/QCE57702.2023.20319

*Ubben, M. S., Veith, J. M., Merzel, A., y Bitzenbauer, P. (2023). Quantum science in a nutshell: Fostering students' functional understanding of models. *Frontiers in Education*, *8*. https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1192708

*Wolf, R. A., y Araiba, S. (2023). A Brief Overview of Programmed Instructions for Quantum Software Education. *2023 IEEE International Conference on*

Quantum Computing and Engineering (QCE), *03*, 78-86. https://doi.org/10.1109/QCE57702.2023.20327

Yusuf, A., y Román-González, M. (2024). *A systematic review of Quantum Computing in K-12 education: A call for increased training and research rigor*. https://doi.org/10.17605/OSF.IO/9NJEB

Apéndice 1. Tabla de datos cuantitativos

Ref.	Título	Autores	Fuente	SJR 2023	SNIP 2023	Año	Citas	Tipo
R01	Implications of quantum theory on education: A critical review of the literature	Gray-Donald, J.	International Journal of Innovation and Sustainable Development, 2(3-4), pp. 315–331	0.215	0.306	2007	1	Review
R02	Bubble: Experimenting with Feynman's sum over paths approach in the secondary school	Sutrini, C., Malgieri, M., de Ambrosis, A.	Nuovo Cimento della Societa Italiana di Fisica C, 42(5), 241	0.18	0.178	2019	1	Article
R03	"There Are no Things Inside Things": An Augmented Lecture to Bridge the Gap Between Formal and Informal Physics Education	Giliberti, M.	Concepts, Strategies and Models to Enhance Physics Teaching and Learning, pp. 203–213	Book		2019	2	Book Chapter
R04	Quantum education and paradigm shift integral education, quantum physics and consciousness	Ferrer, A., Ferrer, A.	Comprendre, 22(1), pp. 63–99	0.1	0.375	2020	0	Article
R05	A Survey of Educational Efforts to Accelerate a Growing Quantum Workforce	Plunkett, T., Frantz, T.L., Khatri, H., Rajendran, P., Midha, S.	Proceedings - IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering, QCE 2020, pp. 330–336, 9259973	Conference paper		2020	17	Conference Paper
R06	Designing inquiry-based learning environments for quantum physics education in secondary schools	Rodriguez, L.V., van der Veen, J.T., Anjewierden, A., van den Berg, E., de Jong, T.	Physics Education, 55(6), 065026	0.389	0.749	2020	12	Article
R07	Quantum physics literacy aimed at k12 and the general public	Foti, C., Anttila, D., Maniscalco, S., Chiofalo, M.L.	Universe, 7(4), 86	0.78	0.804	2021	18	Article
R08	Binary, Multi-Valued and Quantum Board and Computer Games to Teach Synthesis of Classical and Quantum Logic Circuits	Perkowski, M., Liu, K.	Proceedings of The International Symposium on Multiple-Valued Logic, 2021-May, pp. 93–100, 9459643	0.394	0.655	2021	0	Conference Paper

R09	Quantum physics education research over the last two decades: A bibliometric analysis	(Bitzenbauer, 2021)	Education Sciences, 11(11), 699	0.669	1.323	2021	18	Article
R10	Towards a better understanding of conceptual difficulties in introductory quantum physics courses	Bouchée, T., de Putter-Smits, L., Thurlings, M., Pepin, B.	Studies in Science Education, 58(2), pp. 183–202	3	4.469	2022	23	Review
R11	Investigation of instructional practices in high-school atomic and subatomic physics	Ilchev, K., Kotseva, I.	Bulgarian Chemical Communications, 54, pp. 116–123	0.148	0.241	2022	0	Article
R12	Quantum education and pathways: an open-source modifiable presentation to high school and college students	Silberman, D.M.	Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 12213, 1221308	0.152	0.202	2022	1	Conference Paper
R13	Updated and Adapted Curriculum and Pedagogy of Physics with the Fourth Industrial Revolution and Quantum Revolution: From Waves Principles to Quantum Mechanics Fundamentals	Khodaeifaal, S.	Proceedings - 2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering, QCE 2022, pp. 653–668	Conference		2022	1	Conference Paper
R14	Quantum computing online workshops and hackathon for Spanish speakers: A case study	Maldonado-Romo, A., Yeh, L.	Proceedings - 2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering, QCE 2022, pp. 709–717	Conference		2022	3	Conference Paper
R15	A Multidisciplinary, Artistic Approach to Broadening the Accessibility of Quantum Science	Chitransh, S., Fischer, D., Kawalek, N., ...Gaunkar, S.P., Zvi, U.	Proceedings - 2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering, QCE 2022, pp. 701–708	Conference		2022	1	Conference Paper
R16	Stranded: A Mainstream VR Quantum Game For Novices	Sreekuttan, L.S., Thampy, R.P., Thota, S., ...Kumar, S.R., Bhattacharya, S.	Proceedings - 2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering, QCE 2022, pp. 873–874	Conference		2022	0	Conference Paper

R17	Advancing Multidisciplinary STEM Education with Mathematics for Future-Ready Quantum Algorithmic Literacy	How, M.-L.	Mathematics, 10(7), 1146	0.475	0.913	2022	4	Article
R18	Games for Teaching/Learning Quantum Mechanics: A Pilot Study with High-School Students	Chiofalo, M.L., Foti, C., Michelini, M., Santi, L., Stefanel, A.	Education Sciences, 12(7), 446	0.669	1.323	2022	14	Article
R19	Quantum games and interactive tools for quantum technologies outreach and education	Seskir, Z.C., Migdał, P., Weidner, C., ...Zabello, O., Chiofalo, M.	Optical Engineering, 61(8), 081809	0.331	0.679	2022	28	Article
R20	Defining the quantum workforce landscape: A review of global quantum education initiatives	Kaur, M., Venegas-Gomez, A.	Optical Engineering, 61(8), 081806	0.331	0.679	2022	28	Review
R21	Recent Progress on the Sum over Paths Approach in Quantum Mechanics Education	Malgieri, M., Onorato, P.	Physics (Switzerland), 4(3), pp. 1012–1025	0.462	0.655	2022	1	Article
R22	An Approach to Quantum Physics Teaching through Analog Experiments	Aehle, S., Scheiger, P., Cartarius, H.	Physics (Switzerland), 4(4), pp. 1241–1252	0.462	0.655	2022	2	Article
R23	Investigating teachers' and students' experiences of quantum physics lessons: opportunities and challenges	Bouchée, T., Thurlings, M., de Putter-Smits, L., Pepin, B.	Research in Science and Technological Education, 41(2), pp. 777–799	0.714	1.391	2023	13	Article
R24	Quantum science in a nutshell: fostering students' functional understanding of models	Ubben, M.S., Veith, J.M., Merzel, A., Bitzenbauer, P.	Frontiers in Education, 8, 1192708	0.627	1.040	2023	1	Article
R25	Teaching quantum to high school students	Silberman, D.M.	Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 12723, 127232R	x	x	2023	1	Conference Paper

R26	Quantum Picturalism: Learning Quantum Theory in High School	Dundar-Coecke, S., Yeh, L., Puca, C., ...Gogioso, S., Coecke, B.	Proceedings - 2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering, QCE 2023, 3, pp. 21–32	x	x	2023	3	Conference Paper
R27	Leveraging Dual Enrollment Programs to Expand Secondary Education in Quantum Computation	Tucker, D.L.	Proceedings - 2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering, QCE 2023, 3, pp. 10–14	x	x	2023	0	Conference Paper
R28	Taiwan Student Quantum Computer Society	Chang, R.-Y., Hsu, Y.-C., Huang, T.-W.	Proceedings - 2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering, QCE 2023, 3, pp. 49–57	x	x	2023	0	Conference Paper
R29	Quantum Computing, Math, and Physics (QCaMP): Introducing Quantum Computing in High Schools	Ivory, M., Bettale, A., Boren, R., ...Propp, T.B., Sarovar, M.	Proceedings - 2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering, QCE 2023, 3, pp. 1–9	x	x	2023	0	Conference Paper
R30	A Brief Overview of Programmed Instructions for Quantum Software Education	Wolf, R.A., Araiba, S.	Proceedings - 2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering, QCE 2023, 3, pp. 78–86	x	x	2023	0	Conference Paper
R31	QWalkVis: Quantum Walks Visualization Application	Jordon, A., Hawkins-Seagram, A., Norrie, S., Ossorio, J., Stege, U.	Proceedings - 2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering, QCE 2023, 3, pp. 87–93	x	x	2023	1	Conference Paper
R32	On the Design and Implementation of a Quantum Architectures Knowledge Unit for a CS Curriculum	German, A., Pias, M., Xiang, Q.	SIGCSE 2023 - Proceedings of the 54th ACM Technical Symposium on Computer Science Education, 1, pp. 1150–1156	x	x	2023	3	Conference Paper

R33	An experiential program on the foundations of quantum mechanics for final-year high-school students	Montagnani, S., Stefanel, A., Chiofalo, M.L.M., Santi, L., Michelini, M.	Physics Education, 58(3), 035003	0.389	0.749	2023	6	Article
R34	Endless fun in high dimensions—A quantum card game	Kopf, L., Hiekkamaki, M., Prabhakar, S., Fickler, R.	American Journal of Physics, 91(6), pp. 458–462	0.536	0.982	2023	2	Article
R35	Inducing the construction of formal axioms of Quantum Mechanics and fostering their comprehension by high school students: The effectiveness of a conceptual approach	Lovisetti, L., Organtini, G., Giliberti, M.	Nuovo Cimento della Societa Italiana di Fisica C, 46(6), 23200	0.180	0.178	2023	1	Article
R36	The design and construction of a PhET-based inquiry learning worksheet to develop understanding of the particle-in-a-box model	Bouchée, T., de Putter-Smits, L., Thurlings, M., Pepin, B.	Physics Education, 59(1), 015031	0.389	0.749	2024	0	Article
R37	Games for Quantum Physics Education	Chiofalo, M.L., Foti, C., Lazzeroni, C., ...Weidner, C.A., Michelini, M.	Journal of Physics: Conference Series, 2727(1), 012010	0.180	0.303	2024	1	Conference Paper
R38	Principles and Equations of Physics: A multidisciplinary laboratory	Giliberti, M., Albanese, F., Lovisetti, L.	Journal of Physics: Conference Series, 2750(1), 012028	0.18	0.303	2024	0	Conference Paper
R39	An integrative review of secondary school quantum physics curricula in Malaysia	Dayou, J., Markus, L.	International Journal of Evaluation and Research in Education, 13(1), pp. 570–579	0.335	0.78	2024	0	Article
R40	Building a quantum-ready ecosystem	Purohit, A., Kaur, M., Seskir, Z.C., Posner, M.T., Venegas-Gomez, A.	IET Quantum Communication, 5(1), pp. 1–18	0.835	1.207	2024	3	Review

R41	Modelling assisted tunneling on the Bloch sphere using the Quantum Composer	Bley, J., Mattei, V., Goorney, S., Sherson, J., Heusler, S.	European Journal of Physics, 45(2), 025401	0.41	0.756	2024	0	Article
R42	Quantum Science and Technologies in K-12: Supporting Teachers to Integrate Quantum in STEM Classrooms	Holincheck, N., Rosenberg, J.L., Zhang, X., ...Colandene, M., Dreyfus, B.W.	Education Sciences, 14(3), 219	0.669	1.323	2024	1	Article
R43	A Christmas story about quantum teleportation	Fitzgerald, B.W., Emonts, P., Tura, J.	Physics Education, 59(3), 035021	0.389	0.749	2024	0	Article

Apéndice 2. Conceptos y contenidos clave a los que hace referencia cada artículo

	ARTÍCULO		Principios fundamentales	Fenómenos cuánticos	Tecnología y aplicaciones	Óptica	Modelos y formalismo matemático
R01	(Gray-Donald, 2007)	Implications of quantum theory on education: A critical review of the literature	x				
R02	(Sutrini et al., 2019)	Bubble: Experimenting with Feynman's sum over paths approach in the secondary school	x	x		x	x
R03	(Giliberti, 2019)	"There Are no Things Inside Things": An Augmented Lecture to Bridge the Gap Between Formal and Informal Physics Education	x	x		x	x
R04	(Ferrer, 2020)	Quantum education and paradigm shift integral education, quantum physics and consciousness	x				
R05	(Plunkett et al., 2020)	A Survey of Educational Efforts to Accelerate a Growing Quantum Workforce	x		x		
R06	(Rodriguez et al., 2020)	Designing inquiry-based learning environments for quantum physics education in secondary schools	x	x		x	x
R07	(Foti et al., 2021)	Quantum physics literacy aimed at k12 and the general public	x	x	x	x	x
R08	(Perkowski y Liu, 2021)	Binary, Multi-Valued and Quantum Board and Computer Games to Teach	x		x		x

		Synthesis of Classical and Quantum Logic Circuits					
R09	(Bitzenbauer, 2021)	Quantum physics education research over the last two decades: A bibliometric analysis	x	x	x	x	x
R10	(Bouchée et al., 2022)	Towards a better understanding of conceptual difficulties in introductory quantum physics courses	x	x			x
R11	(Ilchev y Kotseva, 2022)	Investigation of instructional practices in high-school atomic and subatomic physics	x	x		x	
R12	(Silberman, 2022)	Quantum education and pathways: an open-source modifiable presentation to high school and college students	x	x	x	x	
R13	(Khodaeifaal, 2022)	Updated and Adapted Curriculum and Pedagogy of Physics with the Fourth Industrial Revolution and Quantum Revolution: From Waves Principles to Quantum Mechanics Fundamentals	x	x	x	x	x
R14	(Maldonado-Romo y Yeh, 2022)	Quantum computing online workshops and hackathon for Spanish speakers: A case study			x		
R15	(Chitransh et al., 2022)	A Multidisciplinary, Artistic Approach to Broadening the Accessibility of Quantum Science	x	x	x		x
R16	(Sreekuttan et al., 2022)	Stranded: A Mainstream VR Quantum Game for Novices	x	x	x		x
R17	(How, 2022)	Advancing Multidisciplinary STEM Education with Mathematics for	x	x	x	x	x

		Future-Ready Quantum Algorithmic Literacy					
R18	(Chiofalo et al., 2022)	Games for Teaching/Learning Quantum Mechanics: A Pilot Study with High-School Students	x	x	x	x	x
R19	(Seskir et al., 2022)	Quantum games and interactive tools for quantum technologies outreach and education	x	x	x	x	x
R20	(Kaur y Venegas-Gomez, 2022)	Defining the quantum workforce landscape: A review of global quantum education initiatives			x		
R21	(Malgieri y Onorato, 2022)	Recent Progress on the Sum over Paths Approach in Quantum Mechanics Education	x	x			x
R22	(Aehle et al., 2022)	An Approach to Quantum Physics Teaching through Analog Experiments	x	x	x	x	x
R23	(Bouchée, Thurlings, et al., 2023)	Investigating teachers' and students' experiences of quantum physics lessons: opportunities and challenges	x	x	x	x	x
R24	(Ubben et al., 2023)	Quantum science in a nutshell: fostering students' functional understanding of models	x	x		x	x
R25	(Silberman, 2022)	Teaching quantum to high school students	x	x	x		x
R26	(Dündar-Coecke et al., 2023)	Quantum Picturalism: Learning Quantum Theory in High School	x				x

R27	(Tucker, 2023)	Leveraging Dual Enrollment Programs to Expand Secondary Education in Quantum Computation	x			x			x
R28	(Chang et al., 2023)	Taiwan Student Quantum Computer Society	x			x			x
R29	(Ivory et al., 2023)	Quantum Computing, Math, and Physics (QCaMP): Introducing Quantum Computing in High Schools	x		x	x		x	x
R30	(Wolf y Araiba, 2023)	A Brief Overview of Programmed Instructions for Quantum Software Education				x			
R31	(Jordon et al., 2023)	QWalkVis: Quantum Walks Visualization Application	x		x	x		x	x
R32	(German et al., 2023)	On the Design and Implementation of a Quantum Architectures Knowledge Unit for a CS Curriculum	x		x	x			x
R33	(Montagnani et al., 2023)	An experiential program on the foundations of quantum mechanics for final-year high-school students	x		x			x	x
R34	(Kopf et al., 2023)	Endless fun in high dimensions—A quantum card game	x			x			x
R35	(Lovisetti et al., 2023)	Inducing the construction of formal axioms of Quantum Mechanics and fostering their comprehension by high school students: The effectiveness of a conceptual approach	x		x			x	x

R36	(Bouchée, de Putter-Smits, et al., 2023)	The design and construction of a PhET-based inquiry learning worksheet to develop understanding of the particle-in-a-box model	x	x			
R37	(Chiofalo et al., 2024)	Games for Quantum Physics Education	x	x	x	x	x
R38	(Giliberti et al., 2024)	Principles and Equations of Physics: A multidisciplinary laboratory	x				
R39	(Dayou y Markus, 2024)	An integrative review of secondary school quantum physics curricula in Malaysia	x	x	x	x	x
R40	(Purohit et al., 2024)	Building a quantum-ready ecosystem			x		
R41	(Bley et al., 2023)	Modelling assisted tunneling on the Bloch sphere using the Quantum Composer	x	x	x		x
R42	(Holincheck et al., 2024)	Quantum Science and Technologies in K-12: Supporting Teachers to Integrate Quantum in STEM Classrooms	x				
R43	(Fitzgerald et al., 2024)	A Christmas story about quantum teleportation	x	x	x		x
Total			39	29	28	20	31

Apéndice 3. Presentación de las metodologías y herramientas empleadas en cada estudio

ARTÍCULO			Revisión de la calidad	Estudio empírico (tamaño de la muestra)	Caso, experiencia puntual o presentación de una herramienta (descriptivo)	Enumeración de metodologías y herramientas o revisiones sistemáticas	Otros
R01	(Gray-Donald, 2007)	Implications of quantum theory on education: A critical review of the literature					x
R02	(Sutrini et al., 2019)	Bubble: Experimenting with Feynman's sum over paths approach in the secondary school		x (76)	x		
R03	(Giliberti, 2019)	"There Are no Things Inside Things": An Augmented Lecture to Bridge the Gap Between Formal and Informal Physics Education			x		
R04	(Ferrer, 2020)	Quantum education and paradigm shift integral education, quantum physics and consciousness					x
R05	(Plunkett et al., 2020)	A Survey of Educational Efforts to Accelerate a Growing Quantum Workforce				x	
R06	(Rodriguez et al., 2020)	Designing inquiry-based learning environments for quantum physics education in secondary schools		x (114)			
R07	(Foti et al., 2021)	Quantum physics literacy aimed at K-12 and the general public			x		
R08	(Perkowski y Liu, 2021)	Binary, Multi-Valued and Quantum Board and Computer Games to Teach Synthesis of Classical and Quantum Logic Circuits			x		

R09	(Bitzenbauer, 2021)	Quantum physics education research over the last two decades: A bibliometric analysis				x
R10	(Bouchée et al., 2022)	Towards a better understanding of conceptual difficulties in introductory quantum physics courses				x
R11	(Ilchev y Kotseva, 2022)	Investigation of instructional practices in high-school atomic and subatomic physics				x
R12	(Silberman, 2022)	Quantum education and pathways: an open-source modifiable presentation to high school and college students		x		
R13	(Khodaeifaal, 2022)	Updated and Adapted Curriculum and Pedagogy of Physics with the Fourth Industrial Revolution and Quantum Revolution: From Waves Principles to Quantum Mechanics Fundamentals		x		
R14	(Maldonado-Romo y Yeh, 2022)	Quantum computing online workshops and hackathon for Spanish speakers: A case study	x (16)	x		
R15	(Chitransh et al., 2022)	A Multidisciplinary, Artistic Approach to Broadening the Accessibility of Quantum Science	x (41)	x		
R16	(Sreekuttan et al., 2022)	Stranded: A Mainstream VR Quantum Game For Novices		x		
R17	(How, 2022)	Advancing Multidisciplinary STEM Education with Mathematics for Future-Ready Quantum Algorithmic Literacy		x		
R18	(Chiofalo et al., 2022)	Games for Teaching/Learning Quantum Mechanics: A Pilot Study with High-School Students	x (20)			

R19	(Seskir et al., 2022)	Quantum games and interactive tools for quantum technologies outreach and education				x
R20	(Kaur y Venegas-Gomez, 2022)	Defining the quantum workforce landscape: A review of global quantum education initiatives				x
R21	(Malgieri y Onorato, 2022)	Recent Progress on the Sum over Paths Approach in Quantum Mechanics Education		x		
R22	(Aehle et al., 2022)	An Approach to Quantum Physics Teaching through Analog Experiments		x		
R23	(Bouchée, Thurlings, et al., 2023)	Investigating teachers' and students' experiences of quantum physics lessons: opportunities and challenges	x (18)	x		
R24	(Ubben et al., 2023)	Quantum science in a nutshell: fostering students' functional understanding of models	x (59)	x		
R25	(Silberman, 2022)	Teaching quantum to high school students				x
R26	(Dündar-Coecke et al., 2023)	Quantum Picturalism: Learning Quantum Theory in High School		x		
R27	(Tucker, 2023)	Leveraging Dual Enrollment Programs to Expand Secondary Education in Quantum Computation		x		
R28	(Chang et al., 2023)	Taiwan Student Quantum Computer Society		x		
R29	(Ivory et al., 2023)	Quantum Computing, Math, and Physics (QCaMP): Introducing Quantum Computing in High Schools	x (52)	x		
R30	(Wolf y Araiba, 2023)	A Brief Overview of Programmed Instructions for Quantum Software Education		x		

R31	(Jordon et al., 2023)	QWalkVis: Quantum Walks Visualization Application		x			
R32	(German et al., 2023)	On the Design and Implementation of a Quantum Architectures Knowledge Unit for a CS Curriculum			x		
R33	(Montagnani et al., 2023)	An experiential program on the foundations of quantum mechanics for final-year high-school students	x (49)	x			
R34	(Kopf et al., 2023)	Endless fun in high dimensions—A quantum card game		x			
R35	(Lovisetti et al., 2023)	Inducing the construction of formal axioms of Quantum Mechanics and fostering their comprehension by high school students: The effectiveness of a conceptual approach	x (120)	x			
R36	(Bouchée, de Putter-Smits, et al., 2023)	The design and construction of a PhET-based inquiry learning worksheet to develop understanding of the particle-in-a-box model		x			
R37	(Chiofalo et al., 2024)	Games for Quantum Physics Education			x		
R38	(Giliberti et al., 2024)	Principles and Equations of Physics: A multidisciplinary laboratory		x			
R39	(Dayou y Markus, 2024)	An integrative review of secondary school quantum physics curricula in Malaysia		x			
R40	(Purohit et al., 2024)	Building a quantum-ready ecosystem					x
R41	(Bley et al., 2023)	Modelling assisted tunneling on the Bloch sphere using the Quantum Composer		x			

R42	(Holincheck et al., 2024)	Quantum Science and Technologies in K-12: Supporting Teachers to Integrate Quantum in STEM Classrooms	x (49)			
R43	(Fitzgerald et al., 2024)	A Christmas story about quantum teleportation		x		
Total			11	28	9	3
			21,57%	54,90%	17,65%	5,88%

Apéndice 4. PRISMA *checklist*

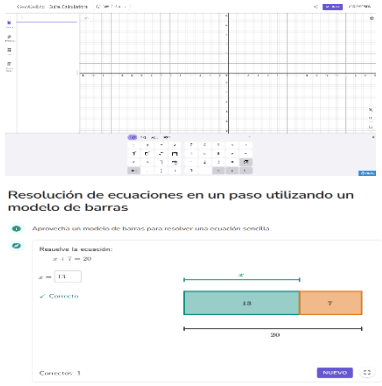
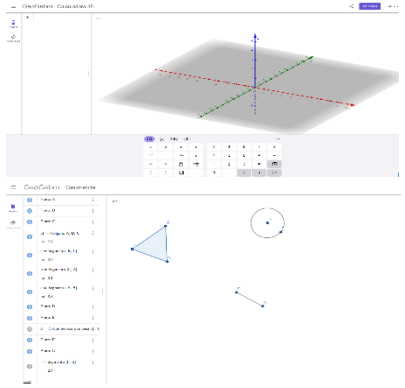
Section and Topic	Item #	Checklist item	Location where item is reported
TITLE			
Title	1	Identify the report as a systematic review.	1
ABSTRACT			
Abstract	2	See the PRISMA 2020 for Abstracts checklist.	5
INTRODUCTION			
Rationale	3	Describe the rationale for the review in the context of existing knowledge.	5-7
Objectives	4	Provide an explicit statement of the objective(s) or question(s) the review addresses.	7
METHODS			
Eligibility criteria	5	Specify the inclusion and exclusion criteria for the review and how studies were grouped for the syntheses.	15, 16
Information sources	6	Specify all databases, registers, websites, organisations, reference lists and other sources searched or consulted to identify studies. Specify the date when each source was last searched or consulted.	15, 16
Search strategy	7	Present the full search strategies for all databases, registers and websites, including any filters and limits used.	15-17
Selection process	8	Specify the methods used to decide whether a study met the inclusion criteria of the review, including how many reviewers screened each record and each report retrieved, whether they worked independently, and if applicable, details of automation tools used in the process.	15-17
Data collection process	9	Specify the methods used to collect data from reports, including how many reviewers collected data from each report, whether they worked independently, any processes for obtaining or confirming data from study investigators, and if applicable, details of automation tools used in the process.	15-17
Data items	10a	List and define all outcomes for which data were sought. Specify whether all results that were compatible with each outcome domain in each study were sought (e.g. for all measures, time points, analyses), and if not, the methods used to decide which results to collect.	15-17, 23, 25, 26, 39
	10b	List and define all other variables for which data were sought (e.g. participant and intervention characteristics, funding sources). Describe any assumptions made about any missing or unclear information.	-
Study risk of bias assessment	11	Specify the methods used to assess risk of bias in the included studies, including details of the tool(s) used, how many reviewers assessed each study and whether they worked independently, and if applicable, details of automation tools used in the process.	-
Effect measures	12	Specify for each outcome the effect measure(s) (e.g. risk ratio, mean difference) used in the synthesis or presentation of results.	23, 25, 26, 39
Synthesis methods	13a	Describe the processes used to decide which studies were eligible for each synthesis (e.g. tabulating the study intervention	17, 23, 25, 26, 39

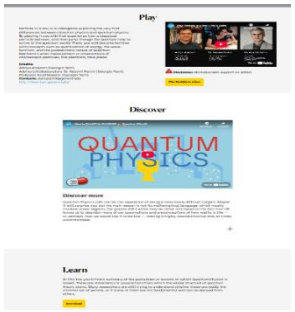
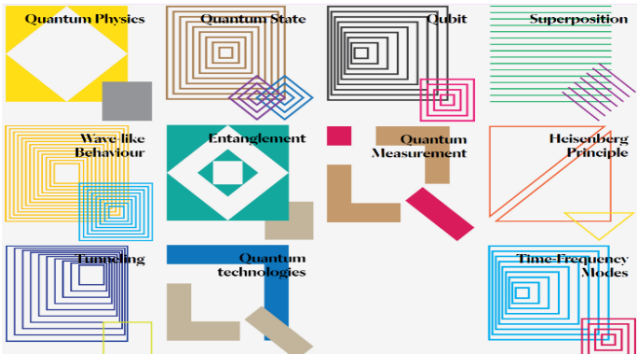
Section and Topic	Item #	Checklist item	Location where item is reported
		characteristics and comparing against the planned groups for each synthesis (item #5)).	
	13b	Describe any methods required to prepare the data for presentation or synthesis, such as handling of missing summary statistics, or data conversions.	23, 25, 26, 39
	13c	Describe any methods used to tabulate or visually display results of individual studies and syntheses.	23, 25, 26, 39
	13d	Describe any methods used to synthesize results and provide a rationale for the choice(s). If meta-analysis was performed, describe the model(s), method(s) to identify the presence and extent of statistical heterogeneity, and software package(s) used.	-
	13e	Describe any methods used to explore possible causes of heterogeneity among study results (e.g. subgroup analysis, meta-regression).	-
	13f	Describe any sensitivity analyses conducted to assess robustness of the synthesized results.	-
Reporting bias assessment	14	Describe any methods used to assess risk of bias due to missing results in a synthesis (arising from reporting biases).	-
Certainty assessment	15	Describe any methods used to assess certainty (or confidence) in the body of evidence for an outcome.	48?
RESULTS			
Study selection	16a	Describe the results of the search and selection process, from the number of records identified in the search to the number of studies included in the review, ideally using a flow diagram.	16
	16b	Cite studies that might appear to meet the inclusion criteria, but which were excluded, and explain why they were excluded.	17
Study characteristics	17	Cite each included study and present its characteristics.	
Risk of bias in studies	18	Present assessments of risk of bias for each included study.	-
Results of individual studies	19	For all outcomes, present, for each study: (a) summary statistics for each group (where appropriate) and (b) an effect estimate and its precision (e.g. confidence/credible interval), ideally using structured tables or plots.	23, 25, 26, 39
Results of syntheses	20a	For each synthesis, briefly summarise the characteristics and risk of bias among contributing studies.	-
	20b	Present results of all statistical syntheses conducted. If meta-analysis was done, present for each the summary estimate and its precision (e.g. confidence/credible interval) and measures of statistical heterogeneity. If comparing groups, describe the direction of the effect.	23, 25, 26
	20c	Present results of all investigations of possible causes of heterogeneity among study results.	-
	20d	Present results of all sensitivity analyses conducted to assess the robustness of the synthesized results.	-
Reporting biases	21	Present assessments of risk of bias due to missing results (arising from reporting biases) for each synthesis assessed.	-
Certainty of evidence	22	Present assessments of certainty (or confidence) in the body of evidence for each outcome assessed.	-
DISCUSSION			

Section and Topic	Item #	Checklist item	Location where item is reported
Discussion	23a	Provide a general interpretation of the results in the context of other evidence.	46-48
	23b	Discuss any limitations of the evidence included in the review.	
	23c	Discuss any limitations of the review processes used.	
	23d	Discuss implications of the results for practice, policy, and future research.	
OTHER INFORMATION			
Registration and protocol	24a	Provide registration information for the review, including register name and registration number, or state that the review was not registered.	-
	24b	Indicate where the review protocol can be accessed, or state that a protocol was not prepared.	-
	24c	Describe and explain any amendments to information provided at registration or in the protocol.	-
Support	25	Describe sources of financial or non-financial support for the review, and the role of the funders or sponsors in the review.	-
Competing interests	26	Declare any competing interests of review authors.	-
Availability of data, code and other materials	27	Report which of the following are publicly available and where they can be found: template data collection forms; data extracted from included studies; data used for all analyses; analytic code; any other materials used in the review.	-

Apéndice 5. Tabla de recursos

SITIOS WEB | HARDWARE Y SOFTWARE | SIMULADORES | APLICACIONES Y JUEGOS | CURSOS | COMUNIDADES E INICIATIVAS

Recurso	Descripción	Enlace	Imagen de muestra (extraídas del enlace) y otros datos de interés
		SITIOS WEB	
Geeks for Geeks	Portal sobre ciencias de la computación. En el buscador superior se pueden encontrar varios artículos sobre computación cuántica.	https://www.geeksforgeeks.org/	Algunos ejemplos de artículos disponibles: - *What is Quantum AI? The Future of Computing and Artificial Intelligence Explained.* - *Uses of Quantum Numbers in Daily Life.* - *Real Life Applications of Quantum Mechanics.* - *R for Quantum Computing Simulations.* - *Role of Python in Quantum Computing.* - *Quantum-Inspired Algorithms.* - *Quantum Computing – pros and cons.* - *Application of Quantum Computing.* - *Quantum Cryptography.* - *Introduction to quantum computing.*
GeoGebra	Plataforma en línea y software educativo con más de 1 millón de recursos educativos. Cuenta con simuladores, calculadoras, sistemas de coordenadas interactivos y otros muchos recursos para aprender matemáticas y apoyar la educación STEM.	https://www.geogebra.org/	 

QPlayLearn	Plataforma educativa desarrollada principalmente por profesionales del ámbito de la física cuántica que ofrece recursos para introducir la física cuántica a todos los públicos.	https://qplaylearn.com/	 
Qureca	Ofrece cursos en línea desde niveles iniciales y la *¡Qureka! Box*, una herramienta didáctica tangible para enseñar computación cuántica, entre otros recursos y servicios.	https://www.qureca.com/es/	
qBraid	Plataforma online que permite acceder al software y hardware cuántico disponible desde un solo lugar para poder programar y ejecutar directamente en computadoras cuánticas reales. Incluye contenidos educativos de nivel inicial.	https://www.qbraid.com/	Servicios ofertados: - ***QBOOK***: plataforma de aprendizaje. - ***LAB***: entorno de prácticas para software cuánticos. - ***RUNTIME***: sistema modular que abstrae y organiza los elementos necesarios para ejecutar programas cuánticos en diversos dispositivos y proveedores. - ***RESEARCH***: el equipo investiga para contribuir a la innovación en computación cuántica.

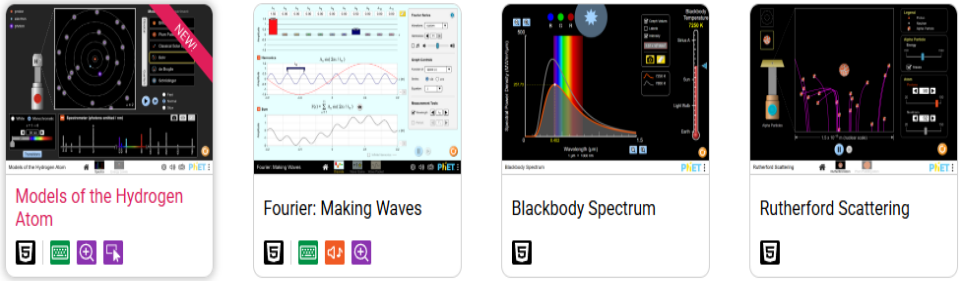
HARDWARE Y SOFTWARE

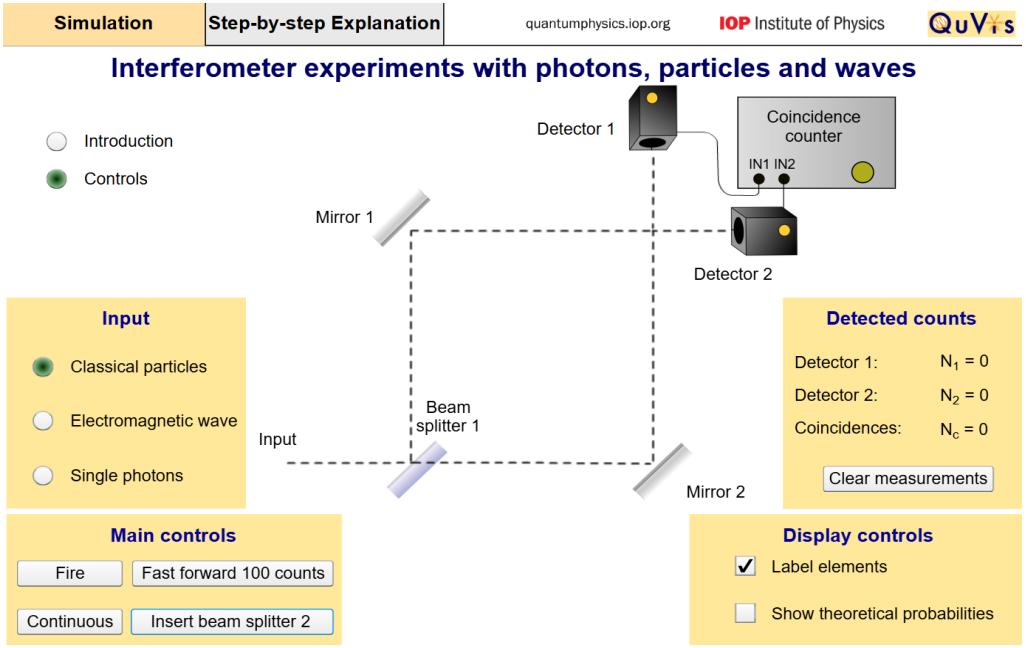
SpinQ	Empresa que desarrolla computadoras cuánticas basadas en resonancia magnética nuclear para fines educativos que permiten al alumnado interactuar con hardware cuántico real de manera accesible y segura.	https://www.spinquanta.com/	

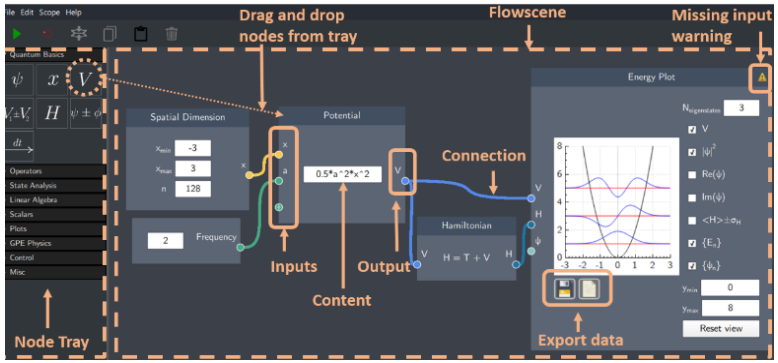
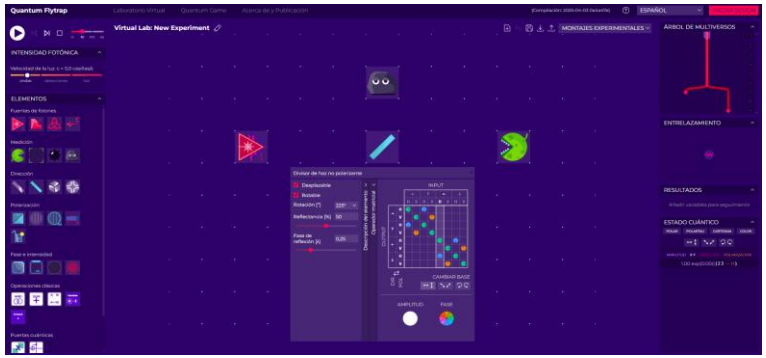
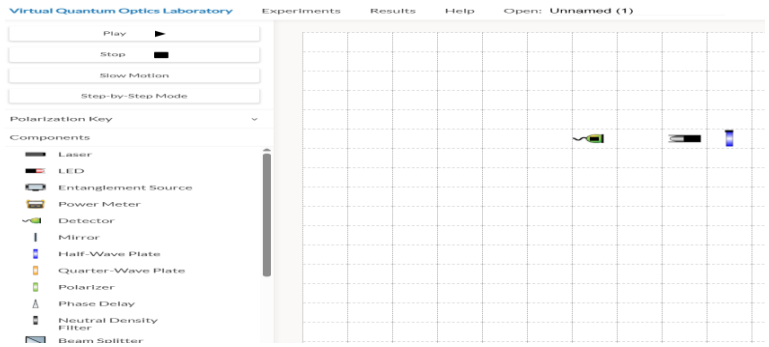
Qiskit	Software para programar computadoras cuánticas. El ecosistema Quantum de IBM cuenta con tutoriales, guías, librerías y otras herramientas que apoyan el uso del software y la formación en computación cuántica.	https://www.ibm.com/quantum/qiskit	```# Optimize for target hardware:
			
			from qiskit_ibm_runtime import QiskitRuntimeService
			from qiskit.transpiler.preset_passmanagers import generate_preset_pass_manager
			from qiskit.transpiler import PassManager
			
			service = QiskitRuntimeService()
			backend = service.backend('ibm_sherbrooke')
			
			target = backend.target
			
			# Transpile the circuit
			pm = generate_preset_pass_manager(
			target=target,
			optimization_level=3
			)
			
			t_qc = pm.run(qc)
			
			# Map the observables according to the transpile layout
			t_obs = obs.apply_layout(t_qc.layout)```

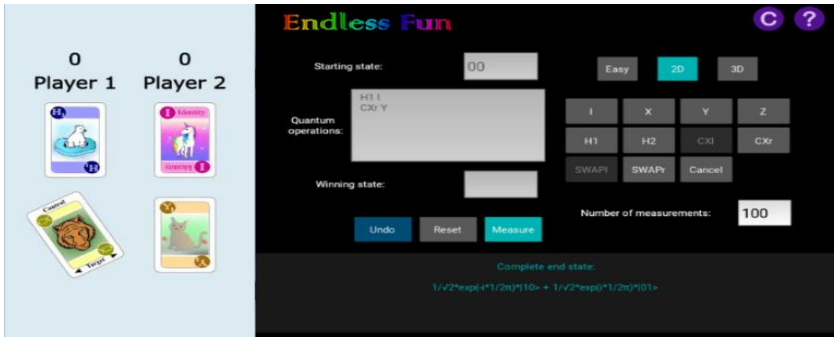
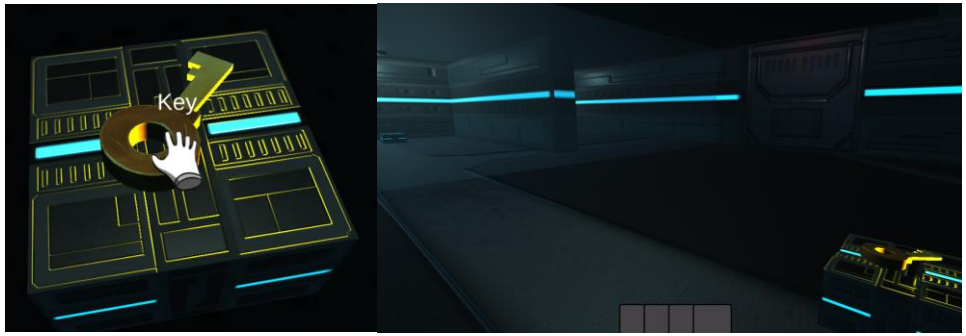
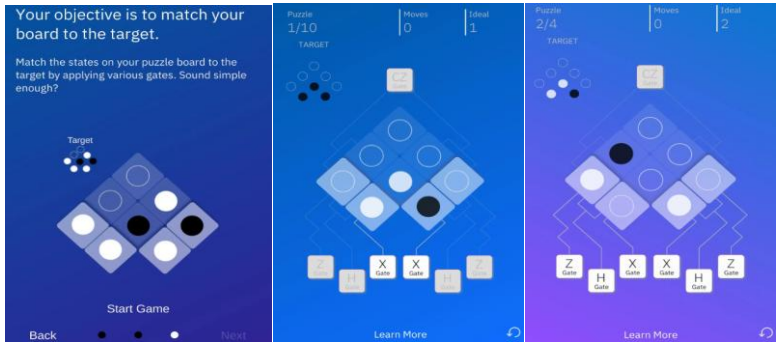
SIMULADORES

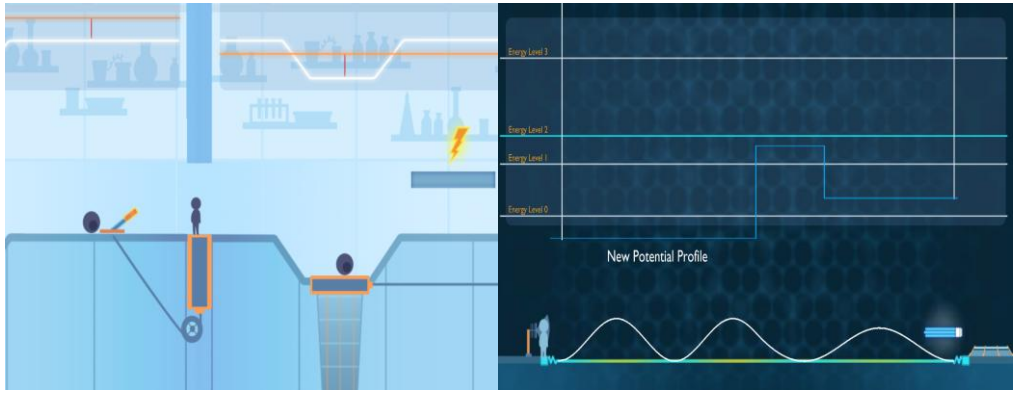
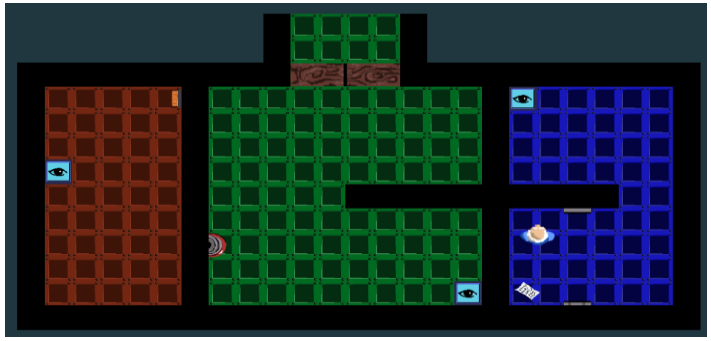
PhET (*Physics Education Technology Interactive Simulations*)	Repositorio de más de 100 simuladores interactivos para aprender y enseñar ciencia. Cuenta con cuatro simuladores específicos de fenómenos cuánticos y 64 simuladores de física en general.	https://phet.colorado.edu
QuVis	Sitio de simulaciones interactivas para enseñar y aprender cuántica desde un nivel básico.	https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/



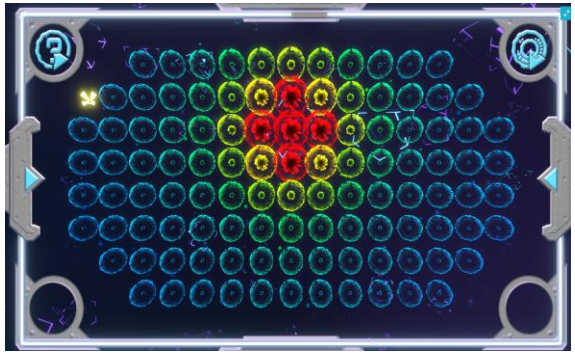
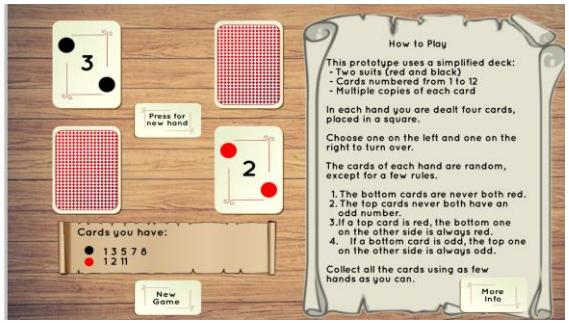
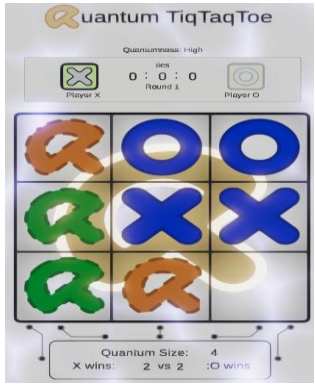


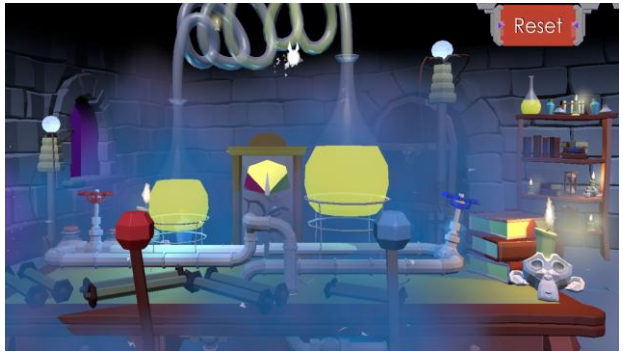
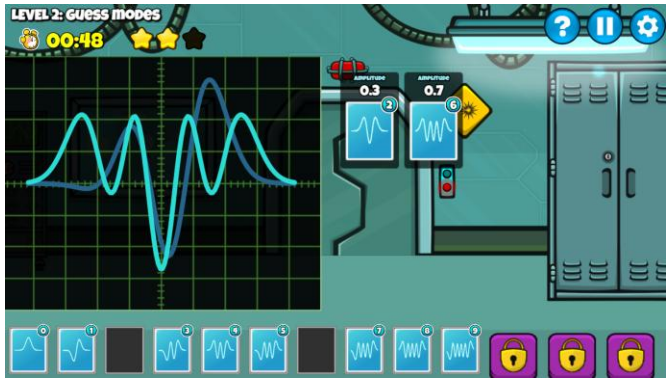
Quantum Composer	Herramienta interactiva para visualizar y simular conceptos y sistemas de mecánica cuántica.	https://www.quatomic.com/composer/	
Virtual Lab **(de Quantum Flytrap)**	Un simulador en línea interactivo para explorar fenómenos cuánticos con una interfaz muy intuitiva. Permite simular hasta cuatro fotones entrelazados, algoritmos y protocolos de computación cuántica. Sirve tanto para principiantes como para expertos.	https://lab.quantumflytrap.com/lab?mode=waves	
Virtual Optics Laboratory	Simulador de fenómenos ópticos con una interfaz y uso sencillos.	https://www.vqol.org/	

APLICACIONES Y JUEGOS			
Endless Fun in high dimensions	Juego de cartas digital que incluye un software para hacer los cálculos de los resultados.	https://zenodo.org/records/4016359	
Escape Quantum	Juego de la plataforma *QPlayLearn* para comprender la medida cuántica, muestra objetos que cambian de posición cuando no se observan y que se mantienen en la misma al ser observados.	https://qplaylearn.com/game-escapequantum	
Hello Quantum	Juego de construcción de bloques y puzles diseñado para enseñar conceptos básicos de computación cuántica.	https://www.gameloop.com/game/educational/com.ibm.research.helloquantum	

Particle in a box:	Juego de la plataforma *QPlayLearn* para comprender el problema de la partícula confinada en una caja o pozo de potencial para visualizar e interactuar con conceptos y fenómenos como potenciales, estados cuánticos, niveles de energía, cuantización, funciones de onda y probabilidad.	https://qplaylearn.com/game-particle-in-a-box	
Phyphox	Aplicación para móviles que permite convertir el smartphone en un laboratorio de física portátil. Utiliza los sensores del móvil para realizar experimentos científicos en tiempo real.	https://phyphox.org/	
Potatoes Quest	Juego de la plataforma *QPlayLearn* de estilo arcade para familiarizarse con conceptos como el efecto túnel, el principio de Heisenberg o el comportamiento como onda onda.	https://qplaylearn.com/game-potatoes-quest	

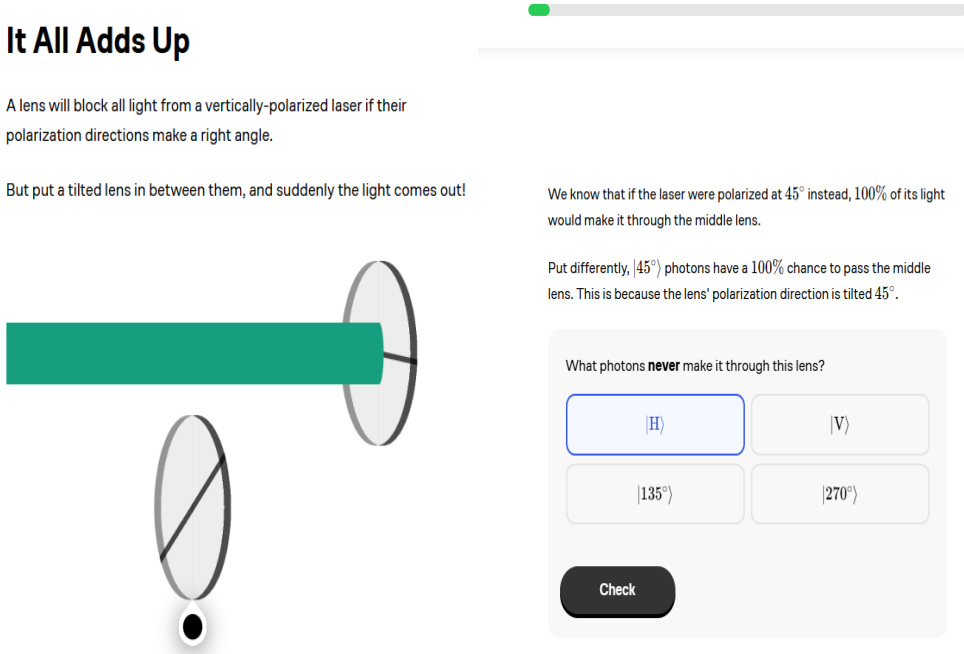
Psi and delta	Juego de la plataforma *QPlayLearn* para comprender conceptos cuánticos como la dualidad, la superposición, el principio de incertidumbre o el colapso de la función de onda.	https://qplaylearn.com/game-psi-and-delta	
Quantum Chess	Una versión del ajedrez que incorpora mecánicas inspiradas en principios de la física cuántica.	https://quantumchess.net/quantum-chess/	
Quantum Odyssey	Juego muy visual para aprender sobre computación cuántica. También cuenta con un apartado de acertijos y explicaciones de conceptos cuánticos.	https://www.quarksinteractive.com/quantum-odyssey	

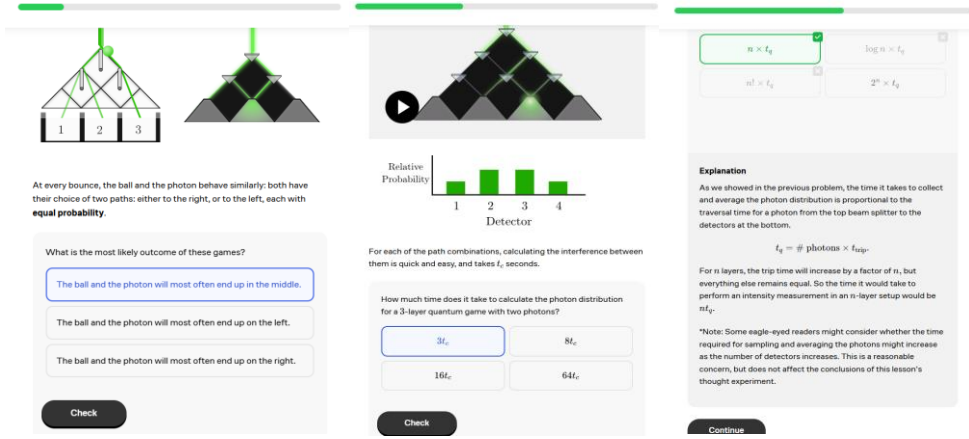
Quantum Playground	Juego de la plataforma *QPlayLearn* que permite visualizar conceptos clave de física cuántica, como los estados cuánticos, la superposición, la interferencia y la ecuación de Schrödinger mediante la "creación" de una partícula y su posterior medida.	https://qplaylearn.com/quantum-playground	
Quantum Solitaire	Juego de la plataforma *QPlayLearn*. Es una versión cuántica del juego del solitario para construir intuición sobre el entrelazamiento cuántico. Se trata de conseguir todas las cartas usando la menor cantidad de manos posible.	https://qplaylearn.com/quantum-solitaire	
Quantum TiqTaqToe	Juego de la plataforma *QPlayLearn* con las reglas del tres en raya clásico al que se pueden añadir componentes cuánticos como la superposición, el entrelazamiento o la medida al seleccionar el nivel de "*quantumness*" del juego antes de empezar.	https://qplaylearn.com/game-tiqtaqtoe	

Qwiz	Juego de la plataforma *QPlayLearn. C*omo aprendiz de brujo, se debe mover un líquido que funciona bajo las leyes de la mecánica cuántica. Es un ejemplo de proyecto de ciencia ciudadana para resolver un problema de investigación abierto.	https://qplaylearn.com/game-qwiz	
Q|Cards>	Juego para móvil de la plataforma *QPlayLearn* educativo y multijugador para familiarizarse con los conceptos de la computación cuántica de una manera interactiva.	https://qplaylearn.com/game-qcards	
Saving Photonland	ayuda a construir intuición sobre los modos de tiempo-frecuencia y la descomposición de pulsos cuánticos. Trata de reconstruir pares de fotones ajustando sus amplitudes y reconstruyendo sus modos.	https://qplaylearn.com/games/stormytune/	

Stranded	Juego en desarrollo para aprender los principios básicos de la computación cuántica mediante puzles.	https://github.com/jowinjohnchemban/qkrishigame/?tab=readme-ov-file	

CURSOS

Brilliant	Plataforma educativa que cuenta con una aplicación móvil. Ofrece cursos de toda la rama STEM (ciencia, lógica y razonamiento, computación, matemáticas y tecnología). Los itinerarios formativos son breves y se basan en presentar la teoría, mostrar simulaciones y evaluar lo aprendido mediante breves tests a los cuales luego se proporciona una explicación de la respuesta. Tiene 2 cursos sobre cuántica a nivel introductorio y parte de su uso es gratuito.	https://brilliant.org/	***Quantum Mechanics with Sabine:*** 

			Quantum Computing (Microsoft + Alphabet X): 
Coursera	Plataforma de cursos en línea de todo tipo. Algunos son gratuitos y otros de pago.	https://www.coursera.org/	Cursos de nivel inicial ofertados relacionados con la cuántica: - *Quantum Computing for Everyone - An Introduction*: https://www.coursera.org/learn/quantum-computing-for-everyone-an-introduction - *Programa especializado: The Complete Quantum Computing Course for Beginners*: https://www.coursera.org/specializations/packt-the-complete-quantum-computing-course-for-beginners - Comprender la física moderna II: Mecánica cuántica y átomos: https://www.coursera.org/learn/understanding-modern-physics-2-quantum-mechanics-and-atoms - *Practical Quantum Computing with IBM Qiskit for Beginners*: https://www.coursera.org/learn/packt-beginners-guide-to-practical-quantum-computing-with-ibm-qiskit-w6mos

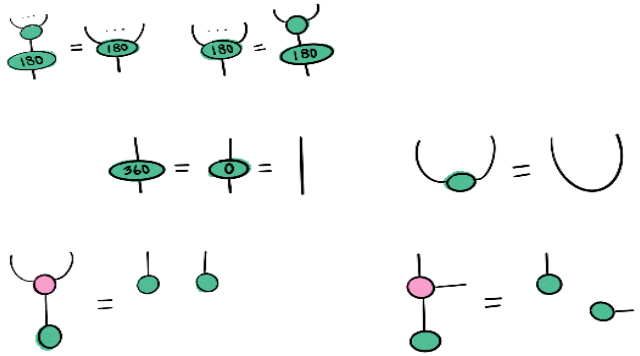
edX	Plataforma de cursos en línea de todo tipo. Este curso en particular es de pago.	https://www.edx.org/es	Curso de nivel inicial ofertado relacionado con la cuántica: - *Explore the fundamentals of quantum computing:* https://acortar.link/gkFi28
Quantum for Everyone	Curso de Qureca sobre computación cuántica. Este curso en particular es de pago.	https://lms.qureca.com/product/quantum-for-everyone-2-0/?v=12470fe406d4	Itinerario formativo: Lección 1: Fundamentos de la computación cuántica. Lección 2: Casos de uso de la computación cuántica. Lección 3: Transición hacia una seguridad resistente a la cuántica. Lección 4: La industria cuántica.
SheQuantum	Plataforma de eLearning con el objetivo de inspirar a mujeres y niñas del mundo en tecnologías cuánticas. Cada curso redirige a una lista de reproducción de YouTube donde se encuentran los contenidos de éste en forma de disertaciones.	https://shequantum.org/	Cursos ofertados: - *Practical Introduction to Quantum Computing.* - *Quantum Information 101.* - *Mini Course: Quantum Simulations 101.* - *Mini Course: Quantum Computing and QML.* - *Quantum Computing for Cybersecurity.* - *Workshop: Semi-definite programs for Quantum Information using Python.* - *Mini Course: Quantum Artificial Life in a Cloud Quantum Computer.* - *Mini Course: Basics of Quantum Computing.* - *QSpain-SheQuantum Joint Workshop.* - *Quantum Computing under 10 Minutes.* - *SheQuantum Talks.* - *Inspiring Quantum Experts: Interviews & Testimonials.*

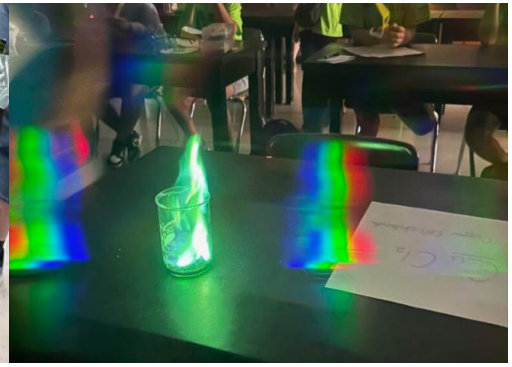
The Unconventional Computing Lab	Trabajan para contribuir a la comprensión de los aspectos físicos, matemáticos, de implementación y sociales de la computación, con particular interés en la computación cuántica, para lo cual han creado un curso gratuito online y asíncrono en español para el cual se requieren conocimientos de cálculo diferencial e integral de bachillerato (preparatoria).	https://unconventionalcomputing.org/	Contenidos del curso: - Introducción al cómputo cuántico. - Matemáticas para computación cuántica. - Postulados de la mecánica cuántica y circuitos cuánticos. - Plataformas de simulación y ejecución de circuitos cuánticos. - Dos propiedades exóticas y básicas del cómputo cuántico. - Estados de Bell y enredamiento cuántico bipartita. - Algoritmos y protocolos cuánticos I. - Algoritmos y protocolos cuánticos II. - Máquinas de Turing y teoría de la complejidad. - Modelos de computación cuántica. - Algoritmos y protocolos cuánticos III.
Udemy	Plataforma de cursos en línea de todo tipo. Los cursos introductorios a la cuántica aquí presentados son de pago.	https://www.udemy.com/	Cursos de nivel inicial ofertados relacionados con la cuántica: - *Quantum Kitchen: Cooking Up Concepts in Quantum Computing*: https://www.udemy.com/course/quantum-computing-kitchen/?couponCode=ST7MT290425G2 - *Quantum Computing on AWS for Beginners: Amazon Braket*: https://www.udemy.com/course/quantum-computing-on-aws-for-beginners-amazon-braket/?couponCode=ST7MT290425G2 - *AI & Quantum Computing Mastery: From Zero to Expert Bootcamp*: https://www.udemy.com/course/ai-quantum-computing-mastery-from-zero-to-expert-bootcamp/?couponCode=ST7MT290425G2
Understanding Quantum Computers	curso de la Universidad de Keio (Japón) en la plataforma *FutureLearn* para conocer los aspectos clave de la	https://www.futurelearn.com/courses/intro-	Temario cubierto: - *Waves and interference.* - *Quantum superposition and entanglement.* - *Computational complexity.*

	computación cuántica y cómo está cambiando las ciencias de la computación. A nivel introductorio y para todo tipo de personas.	to-quantum-computing	- *The quantum Fourier transform.* - *Shor's algorithm for factoring large numbers.* - *Grover's algorithm.* - *Quantum chemistry and machine learning.* - *Physical phenomena as quantum bits (qubits).* - *Quantum computing hardware and architecture.* - *Quantum error correction.* - *The quantum information technology industry.*
COMUNIDADES E INICIATIVAS			
American Association of Physics Teachers	Asociación cuya misión es asegurar la diseminación del conocimiento de la física mediante la enseñanza, es una asociación dedicada a docentes. En el apartado dedicado a K-12 comparte recursos para docentes de esta etapa entre los cuales se encuentran recursos de física cuántica. Además, es socio de la *National Q-12 Education Partnership*.	https://aapt.org/K12/index.cfm	Información y recursos que ofrece: - Concursos y competiciones de estudiantes. - Recursos didácticos. - Charlas y discusiones organizadas. - Equipo de activación de educación en heliofísica de la NASA. - Información sobre obtención de fondos y becas. - Agentes de Recursos para la Enseñanza de la Física (PTRA).
DigiQ	Proyecto que forma parte de *QTEdu*. Ofrece programas de Máster en tecnologías cuánticas, pero también cursos más cortos. Además, fruto de su trabajo de	https://digiq.hybridintelligence.eu/	Según se indica en su web, DigiQ se organiza en 5 paquetes de trabajo: - **Paquete de trabajo 1**: desarrollo de experiencias de aprendizaje digital en Tecnologías Cuánticas mediante recursos como *ScienceAtHome* (AU), *Quantum Odyssey* (QI), *QPlayLearn* (UH),

	investigación y formación, han creado multitud de herramientas educativas y didácticas sobre cuántica en colaboración con distintas universidades.		*SpinDrops* (TUM) y *Decide Game* (ICFO), traducidos a tres idiomas. - **Paquete de trabajo 2**: alineación de cursos de enseñanza/aprendizaje impartidos en tres formatos diferentes: aumentados, en línea y en formatos experimentales innovadores. - **Paquete de trabajo 3**: creación y gestión de redes DQ (*DQ-networks*) para formar el núcleo humano central del programa *DigiQ*, proporcionando formación estructurada y personalizada para cada estudiante de *DigiQ*. - **Paquete de trabajo 4**: semestres de intercambio donde el alumnado pueda acceder a las innovaciones didácticas de los cursos DQ desarrollados y a proyectos de tesis, así como el establecimiento del programa de prácticas (*internship*) en nodos de investigación y centros industriales. - **Paquete de trabajo 5**: creación de una infraestructura compartida para la implementación del máster DQ entre todos los socios participantes, garantizando la coherencia entre los programas educativos ofrecidos y haciendo seguimiento de la participación del alumnado en el máster *DigiQ*.
National Q-12 Education Partnership	Iniciativa del gobierno de Estados Unidos para promover la educación en cuántica en los niveles K-12 y así formar la fuerza laboral cuántica desde edades tempranas.	https://q12education.org/	Algunos de sus ejes y proyectos: - ***K-12 QIS Framework*** para introducir la cuántica en el currículo STEM de K-12. - ***QuanTime***: proporciona actividades para que los docentes puedan desarrollar en el aula. - ***Quantum Education Forum***: foro en línea para que educadores puedan compartir, preguntar y conectar.

OnRamps	Iniciativa de la Universidad de Texas en Austin para preparar a los estudiantes desde etapas K-12 hasta la universidad. Ofrece todo tipo de cursos, incluyendo algunos basados en tecnologías y física cuántica. Estos cursos otorgan créditos universitarios al alumnado.	https://onramps.utexas.edu/	Algunos cursos ofertados relacionados con la cuántica: - *Introduction to Quantum Technologies.* - *Electromagnetism, Optics and Nuclear Physics*.
QTEdu	Es la rama educativa de la *European Quantum Flagship* y su propósito es crear un ecosistema de aprendizaje para educar a la sociedad sobre las nuevas tecnologías cuánticas.	https://qtedu.eu/	Algunas actuaciones y recursos que ofrece para primaria y secundaria: - Currículos escolares de la UE. - Programas, cursos y formaciones. - Herramientas de evaluación. - Materiales y herramientas.
QWorld	Es una organización sin ánimo de lucro que junta a investigadores y apasionados de la cuántica para popularizar las tecnologías y software cuánticos. También se centra en la formación de futuros científicos cuánticos. Lleva a cabo proyectos, eventos y cursos enfocados en la cuántica.	https://qworld.net/	- **Eventos:** *QWorld Annual Meeting, QJam2024, Quantum Science Days, NYUAD Course 2025, QJam 2021, Quantum Summer School 2021, QPrep, QBronze, QCobalt, QNickel, QSilver, QWebinars, QTalks, QChallenge2020 y Hackathons.* - **Proyectos y talleres:** *QSpring2022, QWomen, QJunior, QTraining4 for Silver, QTraining7 for Nickel, QPool2019 y QDrive.* - **Cursos**: curso anual de introducción a la computación cuántica, su programación y algoritmos.

Quantum Open-Source Foundation (QOSF)	Cuenta con varios ejes de actuación relacionados con la computación cuántica, uno de los cuales es transmitir los conceptos fundamentales de la computación cuántica y la ingeniería de software cuántica a la población general. En su página se puede encontrar un repositorio de referencias a recursos para lograrlo.	https://qosf.org/learn_quantum/	Recursos que comparte QOSF en su página web: - Aprendizaje - Cursos en línea masivos y abiertos (MOOC) - Herramientas de desarrollo - Blogs - Libros - Artículos (papers) - Vídeos - Comunidad
Quantum for Everyone	Iniciativa destinada a crear recursos que acercan la cuántica a docentes, estudiantes y personas entusiastas. Su aporte más destacado es el *Quantum Picturalism*, una forma visual, accesible y rigurosa de representar las matemáticas cuánticas.	https://quantuminpictures.org/	

Quantum for all	Ofrece campamentos de física cuántica para estudiantes y formaciones para docentes.	https://quantumforall.org/	
Qubit by Qubit	Una iniciativa de The Coding School para enseñar computación cuántica a estudiantes K-16 (hasta los 22 años).	https://www.qubitbyqubit.org/	Algunos programas que ha ofrecido a estudiantes preuniversitarios: - Introduction to Quantum Computing with Google Quantum AI. - Foundations of Quantum Computing with Google Quantum AI. - Introduction to Quantum Computing para centros educativos. - Quantum Computing Professional Development para docentes de secundaria.