







Tendencias emergentes y desafíos de las arquitecturas de *software* en la computación cuántica. Una revisión sistemática de la literatura

Emerging Trends and Challenges of Software Architecture in Quantum Computing: A Systematic Literature Review

Tendências Emergentes e Desafios das Arquiteturas de Software na Computação Quântica: Uma Revisão Sistemática da Literatura

Carlos Eduardo Orozco¹  
César Jesús Pardo Calvache²  

Recibido: 27 de agosto de 2024

Aceptado: 1 de octubre de 2024

Para citar este artículo: Orozco, C. E., Pardo, C. J. (2024). Tendencias emergentes y desafíos de las arquitecturas de *software* en la computación cuántica. Una revisión sistemática de la literatura. *Revista Científica*, 51(3), 87-111. <https://doi.org/10.14483/23448350.22793>

Resumen

El auge de la computación cuántica ha abierto un nuevo paradigma de procesamiento de la información, prometiendo superar los límites de la computación clásica. Sin embargo, el desarrollo de arquitecturas de *software* que puedan explotar plenamente este potencial es aún un campo de estudio constante, lleno de desafíos sin precedentes. Este artículo presenta los resultados de realizar una revisión sistemática de la literatura sobre las arquitecturas de *software* en el contexto de la computación cuántica, destacando las tendencias emergentes y delineando los principales desafíos que enfrenta este campo. Mediante un enfoque metodológico formal y riguroso, se identificó y analizó un total de 17 estudios primarios, lo que reveló los patrones clave, las metodologías de diseño y las estrategias de implementación que están guiando la evolución de las arquitecturas de *software* cuánticas. Los resultados muestran una concentración de esfuerzos en la estandarización de protocolos, la seguridad cuántica y la escalabilidad, así como una creciente preocupación por la interoperabilidad con sistemas clásicos y la abstracción de la complejidad cuántica para los desarrolladores. Este estudio proporciona una consolidación crítica del conocimiento existente y establece una base para futuras investigaciones, señalando áreas emergentes y oportunidades para innovaciones disruptivas en el diseño y la aplicación de *software* cuántico.

Palabras clave: SQA, arquitectura de *software* cuántica, ingeniería de *software* cuántica, revisión sistemática de la literatura, RSL

1. Universidad del Cauca, Popayán, Colombia. Contacto: carlosorozco@unicauca.edu.co
2. Universidad del Cauca, Popayán, Colombia. Contacto: cpardo@unicauca.edu.co

Abstract

The rise of quantum computing has introduced a new information processing paradigm, promising to surpass the limits of classical computing. However, the development of software architectures that can fully exploit this potential remains a field of constant study filled with unprecedented challenges. This article presents the results of a systematic literature review on software architectures in the context of quantum computing, highlighting emerging trends and outlining the main challenges faced by this field. Through a formal and rigorous methodological approach, a total of 17 primary studies were identified and analyzed, revealing the key patterns, design methodologies, and implementation strategies that are shaping the evolution of quantum software architectures. The results show a concentration of efforts on protocol standardization, quantum security, and scalability, as well as growing concerns regarding interoperability with classical systems and the abstraction of quantum complexity for developers. This study provides a consolidation of existing knowledge and lays the foundation for future research, identifying emerging areas and opportunities for disruptive innovations in the design and application of quantum software.

Keywords: SQA, software quantum architecture, quantum software engineering, systematic literature review, SLR

Resumo

O surgimento da computação quântica abriu um novo paradigma no processamento de informações, prometendo superar os limites da computação clássica. No entanto, o desenvolvimento de arquiteturas de software que possam explorar plenamente esse potencial ainda é um campo de estudo em constante evolução, repleto de desafios inéditos. Este artigo apresenta os resultados relatados após a realização de uma Revisão Sistemática da Literatura sobre arquiteturas de software no contexto da computação quântica, destacando as tendências emergentes e delineando os principais desafios enfrentados nesse campo. Através de uma abordagem metodológica formal e rigorosa, foram identificados e analisados um total de 17 estudos primários, identificando padrões-chave, metodologias de design e estratégias de implementação que estão orientando a evolução das arquiteturas de software quântico. Os resultados mostram uma concentração de esforços na padronização de protocolos, segurança quântica e escalabilidade, bem como uma crescente preocupação com a interoperabilidade com sistemas clássicos e a abstração da complexidade quântica para os desenvolvedores. Este estudo não apenas fornece uma consolidação crítica do conhecimento existente, mas também estabelece uma base para futuras pesquisas, apontando áreas emergentes e oportunidades para inovações disruptivas no design e aplicação de software quântico.

Palavras-chaves: SQA, arquitetura de software quântico, engenharia de software quântico, revisão sistemática da literatura, RSL

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las compañías de desarrollo de *software* disponen de una alta diversidad de procesos, técnicas y marcos metodológicos diseñados con el fin de facilitar y normalizar las etapas y actividades esenciales para la entrega de soluciones efectivas a sus clientes, todo ello encaminado a mejorar los niveles y estándares de calidad de los productos *software* (Conradi & Fuggetta, 2002). En este contexto, el desarrollo de *software* se aborda desde dos perspectivas: por un lado están las *metodologías tradicionales*, con fases bien definidas (análisis, diseño, implementación, pruebas y despliegue) para la creación de *software* eficaz (Conradi & Fuggetta, 2002); y por otro lado están las *metodologías ágiles*, que fomentan entregas rápidas mediante iteraciones cortas, haciendo énfasis en la comunicación

fluida, la colaboración, la transparencia y la reducción de la documentación ([Beck et al., 2001](#)). Estas metodologías conforman lo que comúnmente se denomina el *ciclo clásico de desarrollo de software* (en adelante, enfoques clásicos) ([Beck et al., 2001](#)). Sin embargo, en las últimas décadas se han realizado estudios y esfuerzos orientados a definir nuevas metodologías que se adapten a las necesidades emergentes en la industria de *software*, lo que incluye retos relacionados con la eficiencia, la seguridad, la escalabilidad y una mejor capacidad de procesamiento, entre otros. En particular, uno de los enfoques que promete mejorar exponencialmente estos aspectos es la *computación cuántica*. Este paradigma aplica el formalismo físico y matemático de la mecánica cuántica para solucionar problemas computacionales, marcando, mediante el uso de qubits, un contraste significativo con el desarrollo de *software* convencional (Steane, 1998). Los qubits (o bits cuánticos) son la unidad básica de información en la computación cuántica, análoga al bit en la computación clásica. A diferencia de un bit clásico, que puede encontrarse en uno de dos estados definidos (0 o 1), un qubit puede existir simultáneamente en múltiples estados gracias a un fenómeno conocido como *superposición cuántica*. Esta característica de simultaneidad promete revolucionar la capacidad de procesamiento de información frente a los sistemas clásicos a niveles sin precedente ([Piattini et al., 2021](#); [Steane, 1998](#); [Azeem Akbar et al., 2022](#)).

De acuerdo con lo anterior, las últimas cuatro décadas han marcado un avance notable en la comprensión conceptual y teórica de la computación cuántica. Sin embargo, la implementación de dispositivos cuánticos capaces de solucionar problemas en la industria del *software* comenzó apenas en la última década, cuando gigantes como Google ([Gibney, 2019](#)), IBM ([Santos, 2016](#)) y Microsoft ([Gibney, 2016](#)) decidieron invertir cantidades significativas de recursos financieros, de infraestructura y de talento humano en el desarrollo de soluciones que utilizaran dichos dispositivos para abordar problemas en sectores como la inteligencia artificial, la ciencia de datos, el análisis predictivo, la ciberseguridad y la optimización de procesos empresariales, entre otros ([Bayerstadler et al., 2021](#)). Como resultado, la integración de la computación cuántica en el desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas se ha convertido gradualmente en un punto de enfoque crítico para la industria.

Simultáneamente, el sector académico ha buscado clarificar y sistematizar el conocimiento en torno a la *ingeniería de software cuántica* (ISC), un campo emergente y relacionado con la computación cuántica ([Zhao, 2020](#)). Este esfuerzo busca adaptar los fundamentos de la ingeniería de *software* clásica –que incluye conceptos, definiciones, prácticas, roles y actividades– al nuevo paradigma que representa la computación cuántica. Con este fin, se han desarrollado diversas soluciones para esbozar el ciclo de vida del desarrollo de *software* para sistemas cuánticos ([Weder et al., 2020](#); [Zhao, 2020](#)), que incluyen investigaciones exploratorias para mapear el estado del arte de las distintas fases de desarrollo de *software* dentro del ámbito cuántico ([Piattini & Murillo, 2022](#)), la creación de marcos de trabajo híbridos clásico/cuántico ([Piattini & Murillo, 2022](#)), principios ([Piattini et al., 2021](#)) y técnicas ([Ying, 2010](#)) para el desarrollo de algoritmos cuánticos. Los esfuerzos académicos complementan los avances industriales, estableciendo un puente entre la teoría y la práctica que promete acelerar la evolución y aplicación de la tecnología cuántica en el *software*, marcando un hito en la forma en que se enfrentan los retos tecnológicos y se desarrollan soluciones innovadoras. En particular, una de las áreas críticas de la ISC incluye la definición de estrategias y mecanismos que faciliten el diseño de un sistema adaptado a las necesidades y desafíos que propone la computación cuántica, lo cual se debe llevar a cabo mediante un enfoque conocido como *arquitectura de software*, que es el objeto de estudio de interés de esta revisión sistemática de la literatura.

Con el propósito de establecer un panorama amplio en torno al estudio de la arquitectura de *software* desde el punto de vista de la computación cuántica, se llevó a cabo una revisión sistemática de la literatura (RSL) que buscó identificar propuestas relacionadas con el campo de interés en dos ejes: (i) la búsqueda de un estado del arte claro en torno a la temática que permita revisar la literatura existente, sintetizarla e identificar líneas de trabajo para entender la arquitectura de *software* aplicada a soluciones cuánticas; y (ii) la identificación de soluciones a través de la definición de modelos, metodologías y marcos de trabajo basados en modelos *de facto* o herramientas que faciliten el desarrollo de soluciones híbridas y cuánticas. Estas soluciones emergen como un área de interés a partir de la creciente necesidad de construir herramientas para facilitar el diseño, el análisis y la implementación de arquitecturas de *software* cuánticas.

En el análisis de la literatura, se observó un panorama amplio respecto al estudio de la importancia, la estructura y las soluciones que se deben considerar para el desarrollo de dos tipos de arquitecturas específicas: (i) las arquitecturas híbridas, que buscan adaptar las prácticas presentes en el ciclo de vida de *software* clásico a las necesidades que surgen como consecuencia de la computación cuántica; y (ii) el diseño de arquitecturas puramente cuánticas, lo que plantea un estado del conocimiento completamente nuevo desde el punto de vista de las necesidades y desafíos de la computación cuántica. En este sentido, se identificó que las arquitecturas de *software* cuánticas son un campo/área del conocimiento sensible a mejoras, discusión y desarrollo. Además, los resultados descritos en la RSL revelan la existencia de iniciativas que propenden por adaptar el conjunto de mejores prácticas y conceptos presentes en las arquitecturas clásicas mediante el desarrollo de soluciones metodológicas híbridas que permitan aplicar el conocimiento actual de la arquitectura de *software* a la ISC ([Piattini et al., 2021](#)). En particular, se identificó una diversidad de enfoques arquitectónicos para el diseño de soluciones tanto híbridas como cuánticas. Esta variedad refleja un panorama heterogéneo de estrategias y patrones arquitectónicos, desde aquellas que adaptan las buenas prácticas propuestas por la computación clásica hasta las diseñadas para resolver problemas utilizando el poder que ofrece la computación cuántica ([Khan et al., 2022](#)).

Los resultados del análisis de la literatura también indican que se han realizado esfuerzos significativos en el estudio de los criterios de calidad y los requisitos no funcionales que se deben adoptar, adaptar y definir para cumplir con los desafíos de la industria en el desarrollo de arquitecturas híbridas y cuánticas. También destacan características de calidad conocidas desde las arquitecturas clásicas, e.g., la compatibilidad, la escalabilidad, la eficiencia, la estabilidad, la facilidad de pruebas, el mantenimiento y la seguridad, entre otros, y proponen nuevos elementos directamente relacionados con los desafíos, dada la naturaleza única y compleja de la computación cuántica, e.g., la reducción de errores probabilísticos, la coherencia y decoherencia cuántica, la fidelidad de operaciones cuánticas, la escalabilidad, la interferencia cuántica, la seguridad cuántica y la integración con sistemas clásicos, entre otros ([Sodhi, 2018](#); [Sodhi & Kapur, 2021](#)). Finalmente, el análisis de la literatura revela dos áreas críticas de investigación para avanzar en el desarrollo de soluciones innovadoras en el campo de la computación cuántica. La primera tiene que ver con la creación y el refinamiento de metodologías puramente cuánticas destinadas a adaptar o mejorar los enfoques existentes, y la segunda se centra en investigar el potencial de soluciones híbridas que proporcionen un puente efectivo entre las metodologías de desarrollo de *software* clásicas y los enfoques cuánticos vanguardistas.

En los siguientes apartados se presentará detalladamente la RSL, así como el protocolo implementado, siguiendo un proceso metódico y sistemático. Para lograrlo, este documento se divide de la siguiente

manera. La segunda sección describe el formalismo utilizado para llevar a cabo la RSL, y la siguiente presenta la metodología propuesta para la planeación, la ejecución y el análisis de los resultados reportados en la literatura. Después se resumen algunas preguntas planteadas para la RSL que fueron consideradas relevantes para el alcance de este artículo. Acto seguido se presentan las conclusiones del estudio, y las últimas tres secciones atañen al financiamiento, los agradecimientos y las referencias bibliográficas correspondientes.

METODOLOGÍA

Análisis del estado del arte

La RSL es un método de investigación utilizado para identificar los estudios relevantes realizados por diferentes autores en un área de interés. Dichos estudios son sometidos a un análisis detallado, con el objetivo de obtener información que aporte al desarrollo de nuevas investigaciones. Nuestra RSL se llevó a cabo de acuerdo con el formalismo propuesto por [Budgen et al. \(2008\)](#) y [Petersen et al. \(2008\)](#) y se estructuró en tres fases. En primer lugar estuvo la fase de planeación, donde se propusieron los criterios, procesos y técnicas que se deben aplicar para determinar el alcance, el propósito y los resultados esperados de la RSL. Como resultado de esta fase, se plantearon los objetivos y las respectivas preguntas de investigación. Se estableció la estrategia que conduciría la investigación mediante la definición de una cadena de búsqueda aplicable a diferentes motores de búsqueda científica, la selección de los motores de búsqueda pertinentes para la investigación, la definición de los criterios de inclusión y exclusión para la selección de estudios primarios y la caracterización de un conjunto de criterios de pertinencia que buscaban identificar qué estudios podían ser de mayor relevancia para futuras investigaciones. En segundo lugar estuvo la fase de ejecución, donde se aplicó una cadena de búsqueda genérica adaptada a cada uno de los motores de búsqueda seleccionados y se realizaron varias iteraciones mediante la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión definidos en la fase anterior. Como resultado de la fase de ejecución, se obtuvo un conjunto de estudios considerados como primarios, que proveen información directamente relacionada con los objetivos propuestos para la investigación. Finalmente, en la fase de documentación se analizaron y recopilaron los resultados de la fase de ejecución. Esto, a través de análisis estadísticos, lo que permitió dar respuesta a cada una de las preguntas de investigación propuestas.

Fase de planeación

La fase de planeación de una RSL considera todos los elementos necesarios para establecer una estrategia que permita a los autores obtener información de valor sobre el área de interés. En general, dicha fase incluye las siguientes actividades: (i) la definición de los objetivos de la investigación, (ii) la definición de las preguntas de investigación y su relación con los objetivos, (iii) la definición de la estrategia de búsqueda, (iv) la definición de los criterios de inclusión y exclusión para la selección de estudios primarios y (v) la definición de criterios para evaluar la pertinencia de los estudios primarios. Cada una de las actividades realizadas durante la planeación de nuestra RSL fue supervisada y evaluada por asesores expertos, quienes validaron la consistencia y pertinencia de los artefactos resultantes. En la Figura 1 se ilustran las actividades realizadas durante dicha fase.

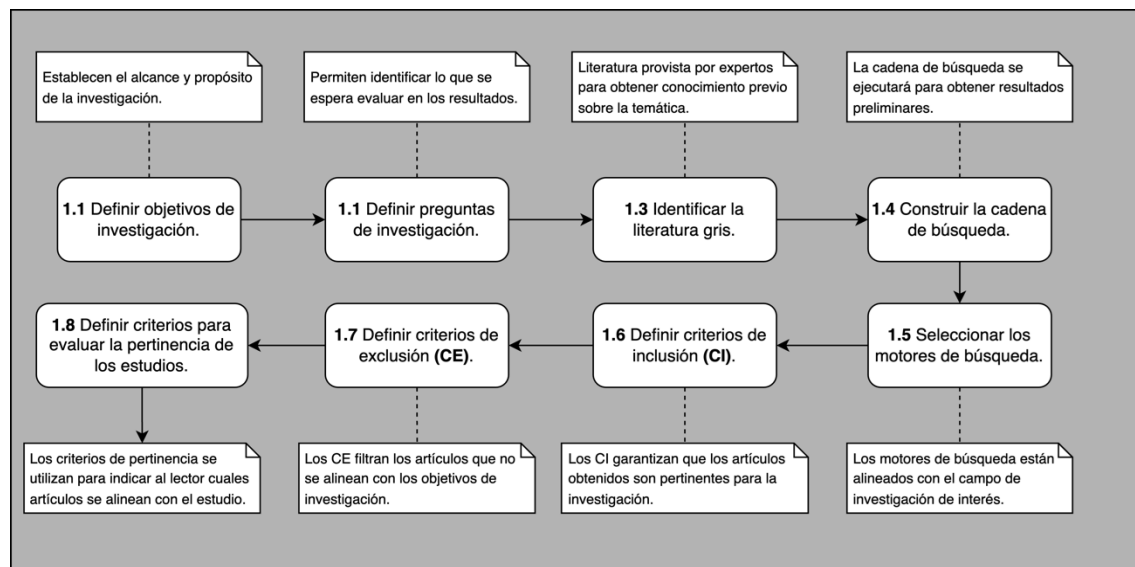


Figura 1. Fase de planeación

1) Definición de los objetivos y preguntas de investigación

Los objetivos de investigación (OI) proveen una hoja de ruta para definir todos los elementos necesarios en la fase de planeación. En particular, los OI aclaran el alcance, el propósito y el nuevo estado del conocimiento que se espera obtener de la RSL. Por otro lado, las preguntas de investigación (PI) definen el alcance y la naturaleza de los resultados esperados. Para definir los OI (Tabla 1) y las PI (Tabla 2), se utilizó el formalismo propuesto por el enfoque *goal-question-metric* (GQM) (Caldiera & Rombach, 1994), que describe tres niveles de abstracción: (i) el nivel conceptual, que establece los lineamientos para proponer un conjunto de objetivos claramente definidos; (ii) el nivel operacional, en el que se plantean las preguntas que los autores consideran pertinentes para el alcance y el propósito del estudio y que deben estar alineadas con uno o más OI; y (iii) el nivel cuantitativo, que busca asociar un conjunto de métricas a las preguntas y ampliar su alcance utilizando métodos de evaluación. Dado el alcance de esta RSL, solo se realizaron las actividades correspondientes a los niveles operacional y conceptual, ya que el estudio no buscaba establecer criterios cuantitativos para ponderar las PI propuestas por los autores. Adicionalmente, con el propósito de extender la pertinencia de las preguntas de investigación y su correspondencia con los objetivos de investigación, se realizó una validación conformada por tres actividades: (i) evaluación por parte de un experto, que determinó si los OI cumplían con los criterios propuestos por la metodología SMART (*i.e.*, si eran específicos, medibles, alcanzables, relevantes y temporales) (Doran, 1981); (ii) validación por parte de asesores externos, quienes proporcionaron retroalimentación continua para garantizar que las preguntas fueran pertinentes y claras y estuvieran alineadas con el contexto de la investigación; y (iii) evaluación de los OI y PI según los criterios propuestos por Basili *et al.* (2007), Lee (2013) y Shull *et al.* (2007), que establecen un conjunto de elementos para facilitar la evaluación de PI. Dicho conjunto incluye aspectos como pertinencia, claridad, precisión y especificidad, entre otros.

Tabla 1. Objetivos de investigación

Id.	Descripción	Motivación
OI1	Identificar y analizar las tendencias actuales en la definición de arquitecturas de <i>software</i> en el contexto de la computación cuántica, con el fin de identificar oportunidades y desafíos en el campo.	Comprender el estado actual en el campo de la computación cuántica y la arquitectura de <i>software</i> . Esto incluye la identificación de las publicaciones más influyentes, las metodologías predominantes y la distribución geográfica de los estudios. Este enfoque permite una comprensión profunda y holística del campo, proporcionando una perspectiva macroscópica de su desarrollo y tendencias actuales.
OI2	Analizar las soluciones y tipos de arquitecturas de <i>software</i> en el contexto de la computación cuántica, con el objetivo de identificar las más prometedoras para futuras implementaciones.	Investigar las soluciones y los tipos de arquitectura de <i>software</i> que han sido específicamente diseñadas para la computación cuántica. Esto implica una exploración detallada y una categorización sistemática de las aproximaciones y diseños que se han propuesto o implementado en este campo.
OI3	Realizar un estudio comparativo para evaluar el impacto de las diferentes arquitecturas de <i>software</i> en el ámbito de la computación cuántica.	Evaluar las diferencias entre las arquitecturas de <i>software</i> para computación cuántica y las tradicionales, centrándose en aspectos como la eficiencia, la capacidad y la aplicabilidad. Este análisis comparativo permitirá comprender las ventajas y limitaciones inherentes a la computación cuántica.
OI4	Explorar los desafíos y proyecciones futuras en el ámbito de la arquitectura de <i>software</i> dentro del contexto de la computación cuántica.	Identificar y analizar los desafíos contemporáneos que se presentan en el desarrollo de arquitecturas de <i>software</i> para la computación cuántica. Además, se busca anticipar las tendencias y oportunidades futuras en este campo emergente. La importancia de esta área radica en su potencial para orientar la investigación futura y estimular la innovación en la tecnología cuántica.

Las PI se dividen en tres categorías: (i) preguntas demográficas, que permiten identificar tendencias sobre la distribución temporal, los tipos de investigación y la distribución geográfica de los estudios (esta información es importante porque permite conocer cuáles son los autores, instituciones y nichos que realizan más aportes al área de interés); (ii) preguntas relacionadas con la caracterización de arquitecturas, que buscan conocer cuáles son los tipos de soluciones propuestas por otros autores (estudios metodológicos, revisiones de la literatura, estudios de caso, entre otros); y (iii) preguntas para determinar los impactos y desafíos en el área de interés, que representan el punto de inicio para conocer la importancia, las limitaciones y las propuestas de trabajo futuro que surgen del análisis de los estudios primarios.

Tabla 2. Preguntas de investigación

Id.	Pregunta de investigación	Motivación	OI asociado	Categoría
PI1	¿Cuáles son los tipos y la frecuencia de las publicaciones realizadas en el contexto de la computación cuántica?	Identificar los tipos de publicaciones (artículos de revistas y actas de congreso) y destacar la frecuencia de las publicaciones por año. Esta pregunta permite comprender el histórico de publicaciones sobre el tema, <i>i.e.</i> , el tipo y la frecuencia de las publicaciones realizadas en la ventana de tiempo consultada (2016-2024).	OI1	Pregunta demográfica
PI2	¿Cuáles son los tipos de investigación identificados y las contribuciones reportadas sobre el estudio de la arquitectura de <i>software</i> en el contexto de la computación cuántica?	El objetivo de esta pregunta es identificar los tipos de investigación según el enfoque de clasificación propuesto por Wieringa <i>et al.</i> (2006): validación, evaluación, propuesta de solución, artículos filosóficos, artículos de opinión y artículos de experiencia personal. Esta caracterización busca reconocer la diversidad de los artículos desde diferentes perspectivas.	OI1	

PI3	¿Qué tipo de soluciones se han planteado en torno a la definición de arquitecturas de <i>software</i> para la computación cuántica?	Entender las soluciones existentes proporciona una base para mejorar o desarrollar nuevas soluciones. Identificar técnicas, procesos, modelos y herramientas, entre otros, que buscan aportar en el conocimiento relacionado con la temática permite establecer un panorama claro sobre los mecanismos propuestos en la literatura para caracterizar arquitecturas de <i>software</i> en este contexto.	OI2	Caracterización de arquitecturas
PI4	¿Cuáles son los tipos de arquitecturas de <i>software</i> para computación cuántica que se reportan en la literatura?	Estudiar cuáles son los tipos de arquitecturas propuestos en el contexto de la computación cuántica permite establecer un grado de relación o diferencia entre las soluciones arquitectónicas existentes y aquellas que se han propuesto para este nuevo contexto.	OI2	
PI5	¿Cuál es el impacto de las arquitecturas de <i>software</i> en el contexto de la computación cuántica en comparación con las arquitecturas clásicas?	Determinar cuál es el grado de importancia que tienen el estudio y la implementación de arquitecturas de <i>software</i> cuánticas para el sector académico y la industria del <i>software</i> facilita el desarrollo de un estado del conocimiento claro en torno a las iniciativas e investigaciones realizadas por otros autores en este campo.	OI3	
PI6	¿Cuáles son los desafíos reportados en la literatura en torno a la definición de arquitecturas de <i>software</i> en el contexto de la computación cuántica?	Determinar cuáles son los aspectos a considerar para identificar acciones de mejora en la definición, la caracterización, la implementación y el estudio de arquitecturas de <i>software</i> en el contexto de la computación cuántica incluye pero no se limita a la comprensión de los principios fundamentales de la computación cuántica, la elección de un modelo adecuado de computación cuántica, la evaluación de las capacidades y limitaciones de las tecnologías actuales de <i>hardware</i> cuántico, la consideración aspectos no funcionales y la evaluación de las necesidades de formación y educación de los desarrolladores de <i>software</i> .	OI4	Impactos y desafíos
PI7	¿Cuáles son las vías de trabajo futuro en torno a la definición, implementación y optimización de arquitecturas de <i>software</i> en el contexto de la computación cuántica?	Identificar temas relevantes y prometedores para la ejecución de nuevos estudios y/o revisiones de la literatura, incluyendo pero no limitado a avances tecnológicos, avances recientes en algoritmos cuánticos y técnicas de programación cuántica, entre otros.	OI4	

2) Estrategia de investigación

Para realizar una búsqueda exhaustiva de la literatura sobre el área de interés, los autores recopilaron literatura relevante sobre el tema, solicitada a expertos en la materia, con el fin de establecer un estado previo del conocimiento que aportó información valiosa. Esta literatura es conocida como *literatura gris*. Posteriormente, se creó una cadena de búsqueda utilizando una combinación de operadores y conectores lógicos 'AND' y 'OR', aplicada a un conjunto de conceptos, términos y palabras clave relevantes para el área de estudio. La formulación de dicha cadena de búsqueda siguió las recomendaciones propuestas por Kitchenham en [Keele \(2007\)](#). Las palabras clave fueron seleccionadas tras varias sesiones de lluvia de ideas y la revisión de la literatura gris. Como resultado, la cadena de búsqueda obtenida ([Tabla 3](#)) refleja el conjunto del conocimiento de interés para la investigación.

Tabla 3. Cadena de búsqueda

("quantum computing architecture" OR "quantum computing software architecture" OR "quantum software architecture" OR) AND (classification OR design OR framework OR model OR pattern OR process OR technique OR tool OR study)

La cadena fue adaptada a las características de cada buscador, considerando sus parámetros y filtros asociados. El resultado se presenta en la [Tabla 4](#).

Tabla 4. Cadena de búsqueda adaptada

No.	Base de datos	Cadena adaptada	Filtros
1	ACM Digital Library	[[All: "quantum computing architecture"] OR [All: "quantum computing software architecture"] OR [All: "quantum software architecture"] OR [All: "quantum software enterprise architecture"]] AND [[All: classification] OR [All: design] OR [All: framework] OR [All: model] OR [All: pattern] OR [All: process] OR [All: technique] OR [All: tool] OR [All: study]] AND [E-Publication Date: (01/01/2016 TO 12/31/2024)]	La cadena incluye todos los filtros correspondientes, no es necesario realizar parametrización.
2	Scopus	("quantum computing architecture" OR "quantum computing software architecture" OR "quantum software architecture" OR "quantum software enterprise architecture") AND (classification OR design OR framework OR model OR pattern OR process OR technique OR tool OR study) AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI"))	Language: ENG Doctype: ("ar", "cp") Subject area: COMP, ENGI
3	Google Scholar		Specific interval: 2016 – 2024 Include references: No Include patents: No
4	IEEEExplore		Range: 2016 – 2024
5	Science Direct	("quantum computing architecture" OR "quantum computing software architecture" OR "quantum software architecture" OR "quantum software enterprise architecture") AND (classification OR design OR framework OR model OR pattern OR process OR technique OR tool OR study)	Range: 2016 – 2024 Subject areas: Computer Science, Engineering Article type: Research articles
6	Springer Link		Start year: 2016. End year: 2024. Disciplines: Computer Science

Finalmente, se seleccionaron los motores de búsqueda pertinentes para aplicar la cadena. Dichos motores ofrecen una cobertura amplia de la literatura académica y científica, lo que garantiza una exploración exhaustiva y representativa del campo de estudio. Para asegurar que las bases de datos elegidas fueran adecuadas, se tuvieron en cuenta varios aspectos: (i) la base de datos debía estar activa y (ii) debía cubrir estudios relacionados con la ingeniería de *software* y/o las ciencias de la computación; (iii) los estudios indexados debían haber sido revisados por pares expertos para verificar su calidad; y (iv) los motores debían ofrecer opciones de búsqueda avanzada para ampliar el alcance de la revisión mediante filtros. Además, la selección de los motores de búsqueda fue sometida a la evaluación de asesores expertos en la realización de RSL, quienes validaron la pertinencia de los motores para el alcance de la investigación. Como resultado de esta revisión y validación, se seleccionaron las siguientes bases de datos: ACM Digital Library, Google Scholar, IEEE Xplore, Science Direct, Scopus y SpringerLink.

3) Selección de los criterios de inclusión y exclusión

Para identificar un conjunto de estudios de alta relevancia para el informe y análisis de los resultados obtenidos en la fase de ejecución, se definió un conjunto de criterios de inclusión y exclusión que guiaron la búsqueda. Los criterios de inclusión (CI) determinan los aspectos a considerar para decidir si un estudio puede clasificarse como primario, *i.e.*, si es un estudio que contribuye directamente al tema de investigación. En la [Tabla 5](#) se muestran los CI definidos para el alcance del estudio, junto con su descripción y propósito.

Tabla 5. Criterios de inclusión

Id.	Descripción	Propósito
CI1	Validación del título, resumen y palabras clave.	Determinar si los estudios son relevantes para el alcance y objetivos de investigación.
CI2	Selección de estudios en inglés.	De acuerdo con el reporte realizado por Tardy (2004), el inglés es el idioma más utilizado para publicar y socializar artículos especializados en el contexto científico. Elegir estudios escritos en inglés garantiza una gama más amplia de resultados relevantes para el tema de investigación.
CI3	Selección de estudios que propongan mecanismos para definir, aplicar, evaluar y estudiar arquitecturas de <i>software</i> en el contexto de la computación cuántica (estudios exploratorios, procesos, modelos, técnicas y herramientas, entre otros).	Permitir un análisis integral sobre cómo se define, aplica, evalúa y estudia la arquitectura de <i>software</i> en el ámbito emergente de la computación cuántica. Este criterio garantiza que la revisión cubra un espectro amplio de investigaciones y desarrollos en este campo específico.
CI4	Selección de estudios que describan, estudien o propongan diferentes tipos de arquitecturas en el contexto de la arquitectura cuántica (arquitecturas monolíticas, orientadas a servicios, multicapa o en la nube, entre otros).	Estudiar diferentes aproximaciones para la definición e implementación de arquitecturas en el contexto de la arquitectura de <i>software</i> cuántica permite obtener una comprensión más amplia y detallada de las diferentes metodologías utilizadas en la arquitectura de <i>software</i> cuántica, abarcando una variedad de paradigmas y enfoques en el diseño y la implementación de sistemas cuánticos.
CI5	Estudios publicados desde el año 2016.	Este límite temporal asegura que la revisión sistemática se centre en los desarrollos y hallazgos más recientes y relevantes en el área de interés. Al establecer el año 2016 como punto de partida, se prioriza la investigación actual, reflejando los avances y tendencias contemporáneos del campo de estudio.

Por otro lado, los criterios de exclusión (CE) permiten identificar los estudios que no proporcionan información suficiente para ser considerados como primarios. Los CE actúan como un filtro adicional que facilita la identificación de los estudios que están fuera del alcance de una RSL. En la [Tabla 6](#) se presentan los CE definidos para el alcance del estudio, junto con su descripción y propósito.

Tabla 6. Criterios de exclusión

Id.	Descripción	Propósito
CE1	Estudios que no contribuyan a la identificación de propuestas o soluciones relacionados con el uso de procesos, técnicas, modelos o herramientas (entre otros) en el contexto de las arquitecturas de <i>software</i> cuánticas.	Excluir los estudios que propongan soluciones enfocadas en temáticas que no estén directamente relacionadas con los criterios de inclusión CI3 y CI4.
CE2	Estudios que no contribuyan a la identificación, caracterización o estudio de diferentes tipos de arquitecturas de <i>software</i> en el contexto de las arquitecturas cuánticas.	
CE3	Estudios sin suficiente nivel de detalle.	Excluir los estudios que no sigan una metodología clara o estén escritos con nivel muy alto de abstracción. Un estudio con poco nivel de detalle no ofrece información suficiente para realizar un análisis exhaustivo.
CE4	Estudios de discusión presentados como resúmenes o presentaciones.	Los estudios de discusión aportan información muy valiosa sobre investigaciones futuras, pero están sujetos a cambios, por lo que no se garantiza que sus resultados sean una versión final que pueda ser sometida al estudio por otros autores.

CE5	Estudios sin una fecha de publicación.	Los estudios que no han sido publicados formalmente o que se encuentran en revisión pueden estar sujetos a cambios, por lo que su análisis se debe hacer cuando exista una versión final estable y validada por pares.
CE6	Estudios duplicados.	Ejecutar una cadena en múltiples bases de datos científicas puede resultar en estudios duplicados. Para el alcance y propósito de la RSL, solo basta con reportar el primer estudio identificado y clasificado como primario. De esta manera, el reporte de los resultados no es redundante.
CE7	Estudios fuera de la franja temporal designada para la búsqueda.	Aunque los estudios anteriores al año 2016 pueden aportar información interesante, este año fue el lanzamiento del servicio IBM Quantum, que facilitó el acceso masivo a sistemas de computación cuántica, representando un punto de inflexión importante en la evolución de la computación cuántica y el punto de partida para el estudio de nuevas tendencias en esta temática.

4) Evaluación de la pertinencia de los estudios

Evaluar la pertinencia de los estudios primarios tiene dos propósitos: (i) determinar el grado de relevancia de un estudio primario para futuras investigaciones y (ii) brindar una referencia a otros investigadores para identificar estudios que se alineen con sus objetivos de investigación. Con el fin de medir la pertinencia de los estudios primarios de esta RSL, se implementó un cuestionario que utiliza una escala de calificación de tres puntos (-1, 0, 1). La suma total de los puntajes asignados a cada estudio primario refleja su nivel de pertinencia total, con resultados posibles que varían en el intervalo [-9, 9]. Los resultados obtenidos después de aplicar esta evaluación sirven como un indicador para determinar cuáles estudios pueden ser de gran relevancia en investigaciones futuras. Para lograrlo, los aspectos propuestos para la evaluación están alineados con cuatro categorías: claridad ([L. Yang et al., 2021](#)), rigor ([Wieringa et al., 2006](#)), relevancia ([Dybå & Dingsøyr, 2008](#)) y credibilidad ([Dybå & Dingsøyr, 2008](#)) ([Tabla 7](#)). Cada una de estas categorías facilita el entendimiento de la naturaleza, el alcance y la importancia de cada uno de los criterios propuestos para la evaluación.

Tabla 7. Categorías para la evaluación de los criterios de pertinencia

No.	Descripción	Descripción
1	Claridad	Determinar la relación entre cada artículo primario y el estudio de la definición e implementación de arquitecturas de <i>software</i> en el contexto de la computación cuántica, teniendo en cuenta el contexto de la aplicación y los aportes realizados.
2	Rigor	Esta categoría se centra en explicar las técnicas de investigación utilizadas para garantizar la precisión de los datos, incluyendo las herramientas de recolección, las estrategias de análisis y, en consecuencia, la credibilidad de los hallazgos obtenidos.
3	Relevancia	Esta categoría ayuda a discernir el valor, el efecto y las contribuciones de la investigación dentro del ámbito de la industria del <i>software</i> y las comunidades científicas.
4	Credibilidad	Esta categoría evalúa si los resultados obtenidos en la investigación son confiables, prácticos, claros y de relevancia. Además, examina los enfoques científicos empleados y el análisis de los descubrimientos realizados.

En la [Tabla 8](#) se presentan los criterios de evaluación de pertinencia definidos para nuestro estudio, así como cada una de sus categorías asociadas.

Tabla 8. Criterios para evaluar la pertinencia de los estudios primarios

Id	Pregunta	Categoría	Puntuación asignada		
			1	0	-1
CC1	¿Los objetivos del estudio se describen claramente?	Claridad	Sí	Parcialmente	No
CC2	¿La metodología utilizada para realizar la investigación es clara?		Sí	Parcialmente	No
CC3	¿El estudio utiliza un método de validación para garantizar la conformidad de la propuesta?		Sí	Parcialmente	No
CC4	¿El estudio expone de manera clara y detallada los resultados obtenidos?	Rigor	Sí	Parcialmente	No
CC5	¿Los resultados presentados por los autores son replicables?		Sí	Parcialmente	No
CC6	¿El estudio presenta una discusión sobre los hallazgos, impactos y desafíos identificados por los autores?		Sí	Parcialmente	No
CC7	¿Los autores presentan las limitaciones de su estudio y posibles vías de trabajo para nuevas investigaciones?	Relevancia	Sí	Parcialmente	No
CC8	¿El estudio ha sido publicado en una revista, conferencia o congreso de alto impacto?	Credibilidad	$JCR > 2.0$ $1 \leq JCR \leq 2.0$ $JCR < 1$		
CC9	¿El estudio es citado por otros autores (según el índice de citas de Google Scholar)?		Más de cinco autores	Entre uno y cinco autores	No ha sido citado

CC: Criterio de evaluación de calidad.

RESULTADOS

Fase de ejecución

La selección de estudios primarios siguió un proceso sistemático que incluyó las siguientes actividades: (a) la revisión de seis estudios clasificados como literatura gris y (b) la aplicación de la cadena de búsqueda en cada una de las bases de datos definidas durante la fase de planeación. Para implementar la cadena de búsqueda, se efectuaron seis iteraciones en total, una por cada base de datos. Cada iteración constó de una búsqueda inicial utilizando la cadena adaptada para cada buscador, seguida de la aplicación de tres filtros de exclusión, el primero de los cuales se utilizó para eliminar estudios duplicados. Para facilitar esta tarea, la primera iteración se realizó en Google Scholar, pues esta base de datos arrojó el mayor número de resultados. Por tanto, los estudios duplicados identificados en búsquedas posteriores corresponden a aquellos que ya habían sido reconocidos en Google Scholar durante la primera iteración. El segundo filtro de exclusión se aplicó para descartar los estudios que cumplieran con uno o más criterios de exclusión (Tabla 5). Este filtro resultó en un conjunto de estudios relevantes que podrían responder (o no) a las PI. Por último, el tercer filtro de exclusión implicó la lectura completa de cada artículo para determinar su relevancia directa con los OI y PI planteados durante el diseño de la RSL. Los estudios que superaron este filtro fueron clasificados como primarios. En la Figura 2 se presenta un resumen de las actividades de la etapa de ejecución.

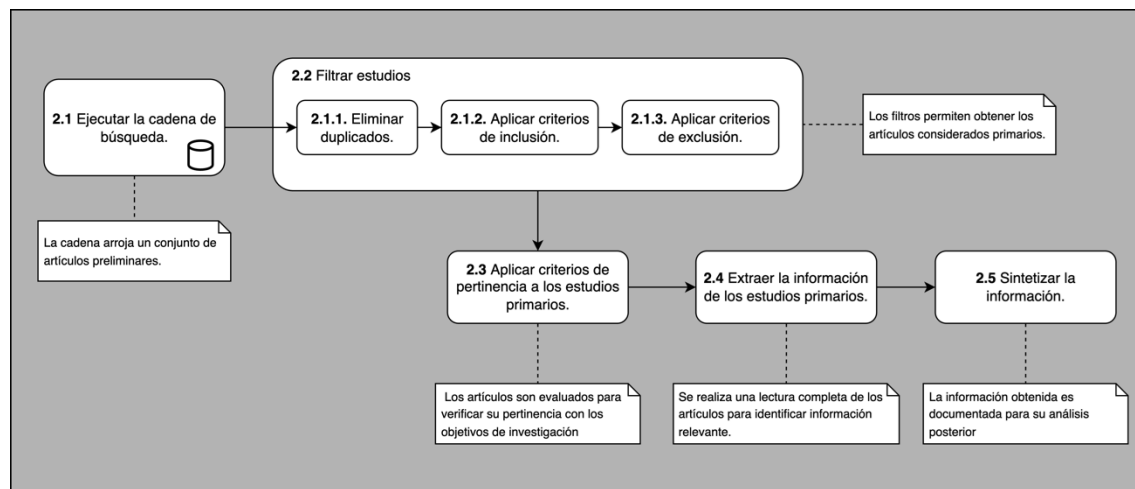


Figura 2. Fase de ejecución

El resumen de los resultados obtenidos durante la ejecución de la cadena de búsqueda se muestra en la [Tabla 9](#).

Tabla 9. Resultados obtenidos durante la ejecución de la cadena de búsqueda

No.	Base de datos	Resultados de la cadena	Primer filtro (estudios duplicados)	Segundo filtro (estudios relevantes)	Tercer filtro (estudios primarios)
1	Google Scholar	784	784	18	11
2	ACM Digital Library	11	10	2	0
3	IEEEExplore	15	6	3	0
4	ScienceDirect	43	15	4	0
5	Scopus	322	317	8	2
6	Springer Link	31	28	7	1
7	Literatura gris	6	3	3	3
Total		1212	1164	45	17

A) Reporte y análisis de los resultados

Después de realizar la búsqueda y aplicar los filtros correspondientes, se identificó un total de 17 estudios primarios directamente alineados con los objetivos establecidos para la revisión de la literatura, como se detalla en la [Tabla 1](#). A continuación, se presentan las respuestas a las PI con base en el análisis de dichos estudios. Además, se incluyen los resultados obtenidos luego de la evaluación de pertinencia, que siguió los criterios especificados en la [Tabla 7](#).

1) Evaluación de la pertinencia de los estudios

Con el fin de determinar cuáles estudios primarios eran de mayor relevancia o impacto futuro, se asignó una puntuación de acuerdo con los criterios propuestos en la [Tabla 7](#). La [Tabla 10](#) presenta los resultados obtenidos y un análisis de las relaciones y comportamientos observados durante la evaluación de cada criterio de calidad (CC).

Tabla 10. Resultados obtenidos en la evaluación de la calidad de los estudios primarios.

No	Estudio	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5	CC6	CC7	CC8	CC9	Total
1	Software architecture for quantum computing systems — A systematic review (Khan <i>et al.</i> , 2023)	1	1	0	1	1	1	1	1	1	8
2	Towards process centered architecting for quantum software systems (Ahmad <i>et al.</i> , 2022)	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
3	Engineering reliable hybrid quantum software: An architectural-driven approach (Scheerer <i>et al.</i> , 2021)	1	1	1	1	1	1	1	0	-1	5
4	Selection of quantum computing architecture using a decision tree approach (Nallamothula, 2020)	1	1	1	1	1	1	1	1	0	8
5	Quality attributes on quantum computing platforms (Sodhi, 2018)	1	1	0	1	1	1	1	-1	1	6
6	Challenges and opportunities in quantum software architecture (Yue <i>et al.</i> , 2023)	1	1	0	1	1	1	1	-1	0	5
7	A serverless cloud integration for quantum computing (Grossi <i>et al.</i> , 2021)	1	1	0	1	1	1	1	-1	1	6
8	Research on quantum computing standard system architecture and roadmap (H. Yang <i>et al.</i> , 2023)	1	1	0	1	1	1	1	1	0	7
9	Design of classical-quantum systems with UML (Pérez-Castillo & Piattini, 2022)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
10	Hybrid quantum algorithms and quantum software development frameworks (Ramouthar & Seker, 2023)	1	1	0	1	1	1	1	-1	0	5
11	Quantum computing platforms: assessing the impact on quality attributes & SDLC activities (Sodhi & Kapur, 2021)	1	1	1	1	1	1	1	0	1	8
12	The quantum software lifecycle (Weder <i>et al.</i> , 2020)	1	1	1	1	1	1	1	0	1	8
13	Towards a distributed quantum computing ecosystem (Cuomo <i>et al.</i> , 2020)	1	1	0	1	1	1	1	0	1	8
14	Classical to quantum software migration journey begins: A conceptual readiness model (Akbar <i>et al.</i> , 2022)	1	1	1	1	1	1	1	0	1	8
15	Software architecture challenges in integrating hybrid classical-quantum systems (Stirbu & Mikkonen, 2023)	1	1	0	1	1	1	1	-1	-1	4
16	Architecture decisions in quantum software systems: An empirical study on Stack Exchange and GitHub (Shamima Aktar <i>et al.</i> , 2023)	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	5
17	Patterns for quantum software development (Bühler <i>et al.</i> , 2023)	1	1	0	1	1	1	1	-1	0	5
Ref: Referencia											

En general, se observó que los 17 estudios primarios (que representan el 100 % de los estudios seleccionados) describen de manera explícita y detallada sus objetivos, metodología y resultados. Además, todos ellos ofrecen una discusión pormenorizada de sus hallazgos, impactos, desafíos y limitaciones, así como de las posibles direcciones para futuras investigaciones. De esta manera, se identificó que cada uno de los estudios presenta una estructura clara, concisa y replicable, facilitando la extracción de información valiosa para responder a las PI planteadas en la fase de planeación. En cuanto a los resultados obtenidos tras aplicar los criterios CC3, CC8 y CC9 (Tabla 10), se observaron diversas características, las cuales se detallan a continuación.

Con respecto al criterio CC3, se observó que siete de los estudios (41.2 %) (Akbar *et al.*, 2022; Nallamothula, 2020; Pérez-Castillo & Piattini, 2022; Scheerer *et al.*, 2021; Shamima Aktar *et al.*, 2023; Sodhi & Kapur, 2021; Weder *et al.*, 2020) demuestran un formalismo claro en la validación de sus

resultados. Esto contrasta con los diez estudios restantes (58.8 %) ([Ahmad et al., 2022](#); [Bühler et al., 2023](#); [Cuomo et al., 2020](#); [Grossi et al., 2021](#); [Khan et al., 2023](#); [Ramouthar & Seker, 2023](#); [Sodhi, 2018](#); [Stirbu & Mikkonen, 2023](#); [H. Yang et al., 2023](#); [Yue et al., 2023](#)), que se centran en presentar el objetivo y alcance de sus trabajos, sin abordar en detalle los métodos específicos de evaluación utilizados para validar sus propuestas.

Con respecto al criterio CC8, se determinó que siete estudios (41.2 %) ([Bühler et al., 2023](#); [Grossi et al., 2021](#); [Ramouthar & Seker, 2023](#); [Shamima Aktar et al., 2023](#); [Sodhi, 2018](#); [Stirbu & Mikkonen, 2023](#); [Yue et al., 2023](#)) fueron publicados en revistas o conferencias con un índice JCR inferior a 1. Por otro lado, cinco estudios (29.4 %) ([Akbar et al., 2022](#); [Cuomo et al., 2020](#); [Scheerer et al., 2021](#); [Sodhi & Kapur, 2021](#); [Weder et al., 2020](#)) están indexados en revistas con un JCR entre 1 y 5, y los cinco estudios restantes (29.4 %) ([Ahmad et al., 2022](#); [Khan et al., 2023](#); [Nallamothula, 2020](#); [Pérez-Castillo & Piattini, 2022](#); [H. Yang et al., 2023](#)) poseen un índice JCR superior a 5.

Finalmente, con respecto al criterio CC9, se halló que tres estudios (17.6 %) ([Scheerer et al., 2021](#); [Shamima Aktar et al., 2023](#); [Stirbu & Mikkonen, 2023](#)) no han sido citados hasta la fecha de publicación de este estudio. Además, cinco estudios (29.4 %) ([Bühler et al., 2023](#); [Nallamothula, 2020](#); [Ramouthar & Seker, 2023](#); [H. Yang et al., 2023](#); [Yue et al., 2023](#)) han recibido entre una y cinco citas, y nueve estudios (53 %) ([Ahmad et al., 2022](#); [Akbar et al., 2022](#); [Cuomo et al., 2020](#); [Grossi et al., 2021](#); [Khan et al., 2023](#); [Pérez-Castillo & Piattini, 2022](#); [Sodhi, 2018](#); [Sodhi & Kapur, 2021](#); [Weder et al., 2020](#)) han sido citados más de cinco veces.

2) Respuesta a las preguntas de investigación

Debido a las limitaciones de espacio y alcance de este artículo, solo se presentarán las respuestas a las preguntas P2, P4, P5 y P7. El reporte completo con las respuestas a todas las preguntas de investigación será publicado en un artículo extendido.

P2. ¿Cuáles son los tipos de investigación identificados y las contribuciones reportadas sobre el estudio de la arquitectura de *software* en el contexto de la computación cuántica?

Según [Wieringa et al. \(2006\)](#), los estudios de investigación reportados en la literatura pueden ser clasificados como estudios de validación, estudios de evaluación, propuestas de solución, artículos filosóficos, artículos de opinión y artículos de experiencia personal. En la [Tabla 11](#) se describe de manera resumida cada uno de los tipos de investigación propuestos y utilizados como criterio para el análisis de los estudios primarios.

Tabla 11. Tipos de estudios de acuerdo con la clasificación propuesta por [Wieringa et al. \(2006\)](#)

Tipo de estudio	Descripción
Estudio de validación	Se centra en evaluar las tecnologías existentes para comprender su efectividad o impacto en contextos específicos.
Estudio de evaluación	Prueba la factibilidad de teorías o técnicas a través de experimentos o análisis, en aras de demostrar su validez.
Propuesta de solución	Desarrolla y propone nuevas técnicas o herramientas para resolver los problemas identificados, a menudo acompañadas de una demostración preliminar de su utilidad.
Artículo filosófico	Reflexiona sobre los fundamentos teóricos y los principios subyacentes de la ingeniería de requerimientos, proponiendo nuevas interpretaciones o marcos conceptuales.

Artículo de opinión	Presenta puntos de vista personales o críticas sobre tendencias actuales, prácticas o investigaciones en la ingeniería de requerimientos, con base en la experiencia y conocimiento del autor.
Artículo de experiencia personal	Relata estudios de caso o experiencias personales en la aplicación de técnicas o en el abordaje de desafíos específicos en la ingeniería de requerimientos, ofreciendo lecciones aprendidas y mejores prácticas.

De acuerdo con la [Figura 3](#), siete estudios (41.17 %) ([Khan et al., 2023](#); [Ramouthar & Seker, 2023](#); [Shamima Aktar et al., 2023](#); [Sodhi, 2018](#); [Stirbu & Mikkonen, 2023](#); [H. Yang et al., 2023](#); [Yue et al., 2023](#)) evalúan diferentes soluciones y modelos a través de técnicas de análisis teórico y experimental. Por otro lado, los diez estudios restantes (58.82 %) ([Ahmad et al., 2022](#); [Akbar et al., 2022](#); [Bühler et al., 2023](#); [Cuomo et al., 2020](#); [Grossi et al., 2021](#); [Nallamothula, 2020](#); [Pérez-Castillo & Piattini, 2022](#); [Scheerer et al., 2021](#); [Sodhi & Kapur, 2021](#); [Weder et al., 2020](#)) proponen procesos, métodos, modelos o marcos de trabajo para solucionar aspectos específicos relacionados con la arquitectura de *software* en el contexto de la computación cuántica. Por último, no se reportaron estudios en las categorías de artículo de opinión, artículo filosófico, artículo de validación o artículo de experiencia personal.

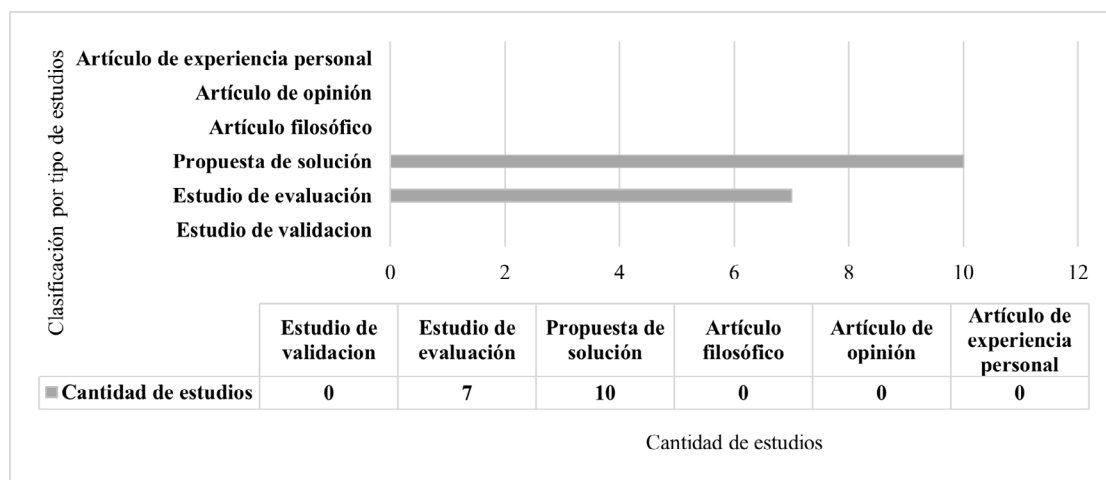


Figura 3. Distribución por tipo de estudio

P4. ¿Cuáles son los tipos de arquitecturas de *software* para computación cuántica que se reportan en la literatura?

En los resultados reportados en la literatura se observa que el desarrollo de soluciones en torno a la definición de arquitecturas de *software* se divide en dos enfoques: (i) el desarrollo de soluciones puramente cuánticas y (ii) la implementación de soluciones híbridas que adaptan o integran prácticas utilizadas en las arquitecturas de *software* clásicas para facilitar la transición entre los sistemas clásicos y las soluciones que siguen los paradigmas que propone la computación cuántica. En la [Tabla 12](#) se presenta el detalle de los tipos de arquitecturas y soluciones identificados en la literatura, así como su clasificación.

Tabla 12. Tipos de arquitecturas identificados en la literatura

No	Tipo de arquitectura o solución	Estudios relacionados	Descripción	Enfoque	
				Cuántico	Híbrido
1	Arquitectura en capas	Khan <i>et al.</i> (2023), Scheerer <i>et al.</i> (2021), Sodhi y Kapur (2021)	Se aplican arquitecturas de múltiples capas para facilitar el bajo acoplamiento entre los componentes clásicos y cuánticos propuestos por los autores.		X
2	Arquitectura de tuberías y filtros (<i>pipeline</i>)		De acuerdo con los autores, el uso de arquitecturas basadas en <i>pipelines</i> facilita la creación de cadenas de responsabilidad para la transmisión de información entre <i>hardware</i> y <i>software</i> híbrido.		X
3	Arquitectura basada en prototipos		Los enfoques basados en prototipos permiten identificar los componentes activos del sistema, sus dependencias y las posibles líneas de escalamiento cuando se integran con otro tipo de sistemas.		X
4	Arquitectura de diseño compuesto	Khan <i>et al.</i> (2023)	El diseño compuesto involucra las tareas, las actividades y los elementos necesarios para integrar los componentes presentes en los sistemas cuánticos con su contraparte clásica. Esto se logra mediante tareas de análisis, diseño, integración, implementación, simulación y validación de los componentes lógicos necesarios para garantizar el paso de información entre <i>software/hardware</i> clásico y cuántico.		X
5	Patrón de contención recursiva		Se refiere a cualquier elemento no funcional que busca determinar las estrategias a seguir para que el diseño de los circuitos o módulos cuánticos esté alineado con las necesidades del sistema.		X
6	Patrón de puertas para n-qbits	Khan <i>et al.</i> (2023), Bühler <i>et al.</i> (2023)	Se refiere a la disposición específica y la secuencia de compuertas cuánticas dentro de un circuito cuántico. El diseño de una arquitectura de <i>software</i> cuántica debe considerar patrones específicos de compuertas basados en la necesidad específica del negocio o del sistema.	X	
7	Arquitectura centrada en procesos	Weder <i>et al.</i> (2020), Ahmad <i>et al.</i> (2022)	Es un enfoque en el diseño de sistemas, ya sean de <i>software</i> , de negocios u organizacionales, donde el énfasis principal está en los procesos y flujos de trabajo.		X
8	Arquitecturas centradas en componentes (PCM)	Scheerer <i>et al.</i> (2021)	En este contexto particular, se refiere a una solución derivada del <i>Palladio component model</i> (PCM) para analizar arquitecturas de <i>software</i> híbridas cuántico-clásicas. Este enfoque se centra en la fiabilidad y en cómo los errores cuánticos afectan la arquitectura del <i>software</i> .		X
9	<i>Quantum annealing</i>		El <i>quantum annealing</i> , o recocido cuántico, es una técnica utilizada en computación cuántica, principalmente para resolver problemas de optimización. Esta técnica permite mejorar sustancialmente aspectos no funcionales de un sistema, e.g., el rendimiento, la seguridad y la optimización.	X	
10	Simulación cuántica	Nallamoorthula (2020)	En el contexto de la computación cuántica, las simulación se refiere al uso de computadores cuánticos para modelar sistemas que son intrínsecamente cuánticos o que son demasiado complejos para ser simulados por computadores clásicos de manera eficiente.	X	
11	Computación cuántica universal		Se refiere a un enfoque que busca establecer los elementos necesarios para describir una arquitectura basada únicamente en la implementación, la ejecución, el despliegue y el mantenimiento de algoritmos cuánticos.	X	

12	Arquitectura en la nube		Los autores proponen una arquitectura basada en la nube que permite integrar el uso de algoritmos y dispositivos cuánticos en arquitecturas empresariales clásicas, con el objetivo de mejorar aspectos relacionados con el rendimiento y el procesamiento de grandes cantidades de información	X
13	Arquitectura de microservicios	Grossi <i>et al.</i> (2021)	El uso de una arquitectura basada en microservicios permite desacoplar las funciones y responsabilidades del <i>software</i> clásico y cuántico, gracias a que estos son agnósticos a la tecnología y los entornos de ejecución. Para lograrlo, los autores detallan la necesidad de establecer canales de comunicación clásicos y/o híbridos que permitan el paso de información entre microservicios clásicos y cuánticos.	X
14	Arquitectura orientada a eventos		La arquitectura orientada a eventos busca establecer canales de comunicación asíncronos que faciliten el paso de información entre dispositivos y/o <i>software</i> clásico y cuántico.	X
15	Arquitectura <i>serverless</i>		El uso de contenedores y funciones sin servidor con proveedores específicos garantiza una mejora en aspectos no funcionales como la disponibilidad, el rendimiento, la escalabilidad y la elasticidad del sistema propuesto por los autores.	X
16	Arquitectura para la definición de plataformas cuánticas	Sodhi y Kapur (2021)	Los autores proponen una arquitectura general compuesta por hardware y <i>software</i> cuántico y clásico que incluye bloques de construcción física, puertas lógicas cuánticas, una interfaz cuántico-clásica, un entorno de programación cuántica y aplicaciones de <i>software</i> clásico-cuántico.	X
17	Ciclo de vida para la definición de arquitecturas de <i>software</i>	Ahmad <i>et al.</i> (2022), Yue <i>et al.</i> (2023), H. Yang <i>et al.</i> (2023)	En sus estudios, los autores proponen o hacen énfasis en la necesidad definir un ciclo de vida, una hoja de ruta o un marco de trabajo para la definición de arquitecturas de <i>software</i> cuánticas que incluya actividades, roles, tareas, artefactos y elementos de proceso. Como resultado, se busca establecer un estándar o modelo de referencia que explique cuáles son los aspectos a considerar para definir una arquitectura en el contexto cuántico.	X
18	Ecosistema de computación cuántica distribuida	Cuomo <i>et al.</i> (2020)	El estudio presenta un ecosistema en capas que integra la Internet Cuántica para la comunicación entre dispositivos cuánticos remotos, centrándose en funcionalidades de red y comunicación y su impacto en el diseño de arquitecturas de <i>software</i> cuánticas.	X

De acuerdo con los resultados reportados en la [Tabla 11](#), se identificó un total de 18 enfoques para la definición, implementación o diseño de arquitecturas en diferentes contextos. Como se puede observar, 11 elementos (61.1 %) corresponden a estudios directamente relacionados con soluciones híbridas, y los siete elementos restantes (38.9 %) corresponden a trabajos que involucran patrones o arquitecturas cuánticas.

P5. ¿Cuál es el impacto de las arquitecturas de *software* en el contexto de la computación cuántica en comparación con las arquitecturas clásicas?

En general, los estudios indican una tendencia hacia la evolución gradual entre los sistemas clásicos y cuánticos por medio de modelos, herramientas, metodologías y arquitecturas que aplican lo mejor de la arquitectura clásica y el estado del conocimiento actual en torno a la computación cuántica. Según [Khan *et al.* \(2023\)](#), las arquitecturas de *software* cuánticas se destacan por su capacidad para manejar tareas computacionalmente desafiantes de manera más eficiente que sus contrapartes clásicas. Como resultado, las arquitecturas de *software* cuánticas representan una nueva generación de sistemas de *software* intensivos,

con procesos y notaciones que pueden ser adaptados para las actividades de arquitectura y el desarrollo de lenguajes de modelado de *software* cuántico. De igual manera, las arquitecturas de *software* cuánticas requieren un enfoque específico que difiere de los métodos tradicionales de la ingeniería de *software*, adaptándose a los principios de la computación cuántica, lo cual abre el camino para el desarrollo de un nuevo ciclo de vida para el desarrollo de *software* que aborde desafíos únicos como la ingeniería de dominio cuántico, la simulación de información cuántica y la definición de nuevos roles que deben ser asumidos por profesionales con nuevas habilidades duras y blandas enfocadas en aspectos específicos de la computación cuántica ([Ahmad et al., 2022](#)). Además, de acuerdo con el análisis de los estudios primarios, el potencial de la computación cuántica destaca en su capacidad de superar los límites de la computación clásica en campos como la inteligencia artificial, el procesamiento masivo de datos ([H. Yang et al., 2023](#)), la criptografía, la seguridad informática ([Khan et al., 2023](#); [Sodhi, 2018](#)) y su aplicabilidad en cualquier nicho de negocio que lo requiera.

Por otro lado, la arquitectura de *software* cuántica y las arquitecturas híbridas tienen un impacto significativo en la manera en que los profesionales en diseño y análisis de *software* deben plantear los criterios de calidad y/o requisitos no funcionales en el desarrollo de nuevos sistemas, ya que deben afrontar retos relacionados con elementos no funcionales, e.g., la fiabilidad ([Scheerer et al., 2021](#); [Sodhi, 2018](#); [Yue et al., 2023](#)), la viabilidad ([Scheerer et al., 2021](#)), el rendimiento ([Sodhi, 2018](#); [Yue et al., 2023](#)), la escalabilidad ([Sodhi, 2018](#); [Yue et al., 2023](#)), la seguridad ([Ahmad et al., 2022](#); [Ramouthar & Seker, 2023](#)), el balanceo de carga ([Grossi et al., 2021](#)), la eficiencia ([Ramouthar & Seker, 2023](#)), la mantenibilidad ([Shamima Aktar et al., 2023](#)) y la interoperabilidad ([Shamima Aktar et al., 2023](#)), entre otros. Adicionalmente, el diseño de arquitecturas en el contexto de la ISC trae consigo la definición de nuevos elementos no funcionales, e.g., coherencia y decoherencia cuántica, fidelidad de operaciones cuánticas, error de corrección cuántica, entrelazamiento cuántico, escalabilidad cuántica, aislamiento cuántico e integración híbrida, entre otros ([Akbar et al., 2022](#); [Bühler et al., 2023](#); [Shamima Aktar et al., 2023](#); [Sodhi, 2018](#)). Es importante analizar cómo se deben considerar los requisitos no funcionales clásicos e incorporar los cuánticos para facilitar el desarrollo efectivo de sistemas híbridos y cuánticos. Esto implica un enfoque holístico tenga en cuenta las necesidades tradicionales de *software* y aborde los desafíos únicos de la computación cuántica. Los profesionales en este campo deben ser conscientes de estos retos y estar preparados para adaptar sus enfoques de diseño y análisis de *software* con el fin satisfacer estas nuevas demandas. La integración de estos elementos en las prácticas de desarrollo de *software* podría resultar en sistemas más robustos, eficientes y seguros, aprovechando las ventajas que ofrece la tecnología cuántica.

De igual manera, existen factores importantes relacionados con el diseño de sistemas que incluyen elementos de *hardware* y *software* para la computación cuántica, entre los que se encuentran los bloques de diseño e implementación cuánticos, e.g., los qubits, las puertas cuánticas y la superposición, los cuales representan un cambio de paradigma en torno al diseño y el desarrollo de *software* ([Khan et al., 2023](#)). A diferencia de los bits tradicionales, que pueden tener dos estados (0 o 1), los qubits pueden existir simultáneamente en múltiples estados gracias a la superposición, permitiendo una capacidad de procesamiento y almacenamiento exponencialmente mayor ([Ahmad et al., 2022](#)). Este potencial para resolver problemas complejos que son intratables para las computadoras clásicas, como la optimización combinatoria, la simulación de materiales y moléculas, y los algoritmos de criptografía, destaca como uno de los impactos más significativos de la computación cuántica en el desarrollo de *software* ([Khan et al., 2023](#)). La incorporación de estos bloques de construcción cuánticos en las arquitecturas de *software* implica una revisión fundamental del ciclo de vida del desarrollo de *software*.

De acuerdo con lo anterior, se hace pertinente estudiar aspectos relacionados con el uso de herramientas y plataformas adaptados a los principios que propone la computación cuántica, así como reconsiderar las metodologías para desarrollo de *software* en aras de incorporar prácticas propias de la computación cuántica ([Ahmad et al., 2022](#)). Asimismo, se abren las puertas para el estudio de la integración entre sistemas clásicos y cuánticos, lo que incluye la definición de interfaces y protocolos que permitan la comunicación y el procesamiento conjunto de estos sistemas mediante enfoques híbridos, asegurando una transición controlada y orgánica entre el paradigma de desarrollo de soluciones clásicas y la adopción de enfoques cuánticos ([Akbar et al., 2022](#); [Khan et al., 2023](#); [Scheerer et al., 2021](#); [Weder et al., 2020](#); [Yue et al., 2023](#)).

P7. ¿Cuáles son las vías de trabajo futuro en torno a la definición, implementación y optimización de arquitecturas de *software* en el contexto de la computación cuántica?

En general, se observan varias brechas que se pueden abordar con el propósito de extender el conocimiento en torno al diseño, la implementación, la evaluación y la gestión de las arquitecturas de *software* híbridas y cuánticas. A continuación, se detallan los trabajos futuros propuestos por los autores de los estudios primarios, considerando su alcance y puntos de vista.

De acuerdo con [Khan et al. \(2023\)](#), la elaboración de nuevas revisiones sistemáticas enfocadas en aspectos específicos de la computación cuántica puede facilitar el desarrollo de nuevas hipótesis, principios, procesos y prácticas que permitan caracterizar arquitecturas de referencia para las necesidades y los desafíos planteados por la computación cuántica. El estudio sugiere realizar nuevos estudios que permitan identificar los elementos necesarios para el desarrollo de una comunidad de ingeniería de *software* centrada en herramientas, roles y tecnologías que puedan gestionar los desafíos de la ISC. Además, los autores enfatizan la importancia de realizar proyectos que promuevan la formación de profesionales con habilidades específicas para la solución de problemas asociados con el diseño de arquitecturas híbridas y cuánticas. Por último, el estudio sugiere realizar estudios exploratorios que permitan identificar modelos, herramientas y enfoques para el modelado de sistemas adaptados a las necesidades de la computación cuántica.

Como refuerzo a lo anterior, [Ahmad et al. \(2022\)](#) enfatizan la necesidad de orientar los esfuerzos de investigación hacia el desarrollo de enfoques en definir procesos y estándares para describir el ciclo de vida del *software* cuántico. En particular, los autores indican que se requiere realizar estudios para identificar enfoques centrados en procesos que faciliten el análisis y la definición de arquitecturas de *software* cuánticas. Además, como vía de trabajo futuro, el estudio reitera la identificación de conocimientos, saberes y habilidades específicos enfocados en los aspectos propios de la computación cuántica. En el futuro cercano, el objetivo de los autores es establecer una arquitectura de *software* como un plan para guiar la ISC, argumentando la necesidad de procesos arquitectónicos, roles profesionales y herramientas que faciliten el desarrollo de arquitecturas. Finalmente, en Shamima [Aktar et al. \(2023\)](#) y [Stirbu y Mikkonen \(2023\)](#) se recomienda realizar nuevos estudios para establecer un estado del conocimiento más maduro en torno al uso de herramientas para la integración de arquitecturas híbridas. Asimismo, se sugiere enfocar esfuerzos de investigación en el desarrollo de modelos robustos que apoyen la toma de decisiones de arquitectura de *software*.

Por otro lado, en [Sodhi \(2018\)](#) y [Yue et al. \(2023\)](#) se sugiere realizar trabajos futuros enfocados en el desarrollo de estándares y el impacto de los requisitos no funcionales en el desarrollo de arquitecturas híbridas y cuánticas. Además, se mencionan esfuerzos futuros relacionados con el desarrollo de tecnologías

y herramientas específicas para la ISC, la adaptación de patrones arquitectónicos y la exploración de enfoques óptimos para la ejecución de aplicaciones híbridas. De igual manera, en [H. Yang et al. \(2023\)](#) se menciona que es necesario aunar esfuerzos hacia la estandarización de términos y conceptos, en aras de crear un vocabulario común y homogéneo en torno a la computación y la arquitectura de *software* cuánticas. Esto, mediante el uso de ontologías, taxonomías, diccionarios, y cualquier otro mecanismo pertinente para este propósito. Por otro lado, [Akbar et al. \(2022\)](#) consideran adecuado realizar estudios para desarrollar modelos y marcos de referencia que faciliten la transición de las organizaciones hacia la adopción de sistemas cuánticos, abordando nuevas áreas que se encuentren alineadas con las necesidades de la computación cuántica.

En cuanto a la definición de técnicas de modelado, [Pérez-Castillo y Piattini \(2022\)](#) indican que los estudios futuros se pueden centrar en adaptar y refinar de las técnicas de ingeniería de *software* clásicas en el contexto de la ISC, incluyendo la optimización de técnicas de modelado UML aplicadas al contexto de la computación cuántica, así como la exploración de nuevas metodologías o herramientas de diseño específicas. Además, los autores indican que es necesario realizar estudios adicionales para identificar cuáles técnicas de modelado clásicas (casos de uso, diagramas de secuencia, colaboración y despliegue, entre otros) se pueden utilizar para analizar problemas propios de la computación cuántica.

SESGOS Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO

El estudio presentado ofrece una revisión sistemática y detallada sobre las tendencias emergentes y desafíos de las arquitecturas de *software* en la computación cuántica. Sin embargo, como en cualquier investigación, existen sesgos y limitaciones inherentes que deben ser reconocidos. Primero, la selección de estudios primarios puede estar influenciada por la disponibilidad y accesibilidad de las publicaciones, lo que puede limitar la comprensión de todos los desarrollos y perspectivas en este campo emergente. Además, el enfoque en literatura publicada en inglés potencialmente excluye trabajos relevantes en otros idiomas, restringiendo la amplitud de la revisión. Otro sesgo potencial se relaciona con la concentración de esfuerzos en áreas específicas de la computación cuántica, lo que puede haber llevado a una cobertura desigual de todos los aspectos relevantes de las arquitecturas de *software* cuánticas. Finalmente, la rápida evolución de la tecnología cuántica implica que los hallazgos pueden quedar rápidamente desactualizados, limitando la longevidad de las conclusiones del estudio. Reconocer estas limitaciones es crucial para interpretar adecuadamente los resultados y orientar futuras investigaciones hacia áreas menos exploradas o enfoques más inclusivos.

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Los resultados reportados en esta RSL señalan varias áreas de oportunidad para futuras investigaciones. Con los resultados encontrados, es posible evidenciar una carencia de estudios en las siguientes categorías: artículos de opinión, artículos filosóficos, artículos de validación y artículos de experiencia personal. Esto sugiere la necesidad de explorar más profundamente las reflexiones teóricas, las validaciones experimentales y las experiencias prácticas en el diseño y la implementación de arquitecturas de *software* cuánticas. Además, si bien se ha avanzado en la definición de soluciones híbridas y arquitecturas de *software* cuánticas ‘puras’, hay un vacío en la estandarización de procesos y marcos de trabajo orientados a facilitar su desarrollo coherente y escalable. También se destaca la transición entre arquitecturas clásicas y cuánticas como un desafío significativo, indicando la necesidad de desarrollar modelos y prácticas que

permitan una integración efectiva de ambos enfoques. Por otro lado, la formación de talento especializado emerge como un área crítica, con un llamado a la creación de programas educativos y recursos de capacitación adaptados a las necesidades de la computación cuántica. Finalmente, es preciso aclarar que la investigación sobre el impacto de las arquitecturas de *software* cuánticas, en comparación con las clásicas, se encuentra en sus etapas iniciales, y aún requiere investigación profunda para comprender mejor sus beneficios, limitaciones y aplicabilidad en diversos dominios. Estas brechas representan un terreno importante para que las futuras investigaciones contribuyan al campo de la arquitectura de *software* cuántica.

Por otro lado, los resultados reportados proporcionan un análisis exhaustivo del estado actual de la arquitectura de *software* en el contexto de la computación cuántica, destacando tanto la diversidad de enfoques arquitectónicos como los retos asociados a la definición de nuevos criterios de calidad para este nuevo paradigma tecnológico. Se resalta la existencia de una amplia gama de estrategias y patrones arquitectónicos, desde arquitecturas en capas hasta configuraciones de computación cuántica universal, junto con un esfuerzo significativo por identificar y adaptar criterios de calidad y requisitos no funcionales específicos para el desarrollo de soluciones híbridas y cuánticas. Sin embargo, se observa una falta de uniformidad y estandarización en estos enfoques, lo que revela la necesidad de desarrollar soluciones genéricas que promuevan una mayor cohesión y eficiencia en el diseño de sistemas de *software*. Adicionalmente, el análisis sugiere que la adopción de la computación cuántica en procesos críticos se encuentra en sus fases preliminares, y que se carece de soluciones generalizadas y estandarizadas que sean aplicables de manera uniforme en la industria. Esta situación evidencia la ausencia de un marco de referencia o un mecanismo consolidado que permita la replicación y reutilización eficiente de arquitecturas híbridas y cuánticas adaptadas a las necesidades específicas de cada empresa o equipo de desarrollo.

Como trabajo futuro, se plantea realizar estudios exploratorios adicionales para establecer un panorama en torno a los aspectos que fueron identificados pero que no hacen parte del alcance inicial de esta RSL, e.g., los patrones para la definición de arquitecturas híbridas y/o cuánticas, la caracterización de requisitos no funcionales (atributos de calidad) desde el punto de vista de los desafíos que propone la computación cuántica, la definición de roles especializados para responder a las necesidades de la ISC y la identificación de propuestas cuánticas *de facto*. Además, se espera utilizar los resultados para establecer un modelo de referencia que facilite la definición de arquitecturas de *software* híbridas en la industria del *software*.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los comentarios y las observaciones realizados por los revisores anónimos.

Contribución de autoría

Carlos Orozco: Conceptualización, Metodología, Investigación, Escritura- Borrador original, Escritura – Revisión y edición, Análisis formal.

César Jesús Pardo Calvache: Conceptualización, Visualización, Curación de datos, Escritura – Revisión y edición, Supervisión Validación.

REFERENCIAS

- Ahmad, A., Khan, A. A., Waseem, M., Fahmideh, M., & Mikkonen, T. (2022). *Towards process centered architecting for quantum software systems* [Artículo de conferencia]. 2022 IEEE International Conference on Quantum Software (QSW). <https://doi.org/10.1109/QSW55613.2022.00019>
- Akbar, M. A., Rafi, S., & Khan, A. A. (2022). *Classical to quantum software migration journey begins: a conceptual readiness model* [Artículo de conferencia]. International Conference on Product-Focused Software Process Improvement. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.05105>
- Azeem Akbar, M., Khan, A. A., Mahmood, S., & Rafi, S. (2022). Quantum software engineering: A new genre of computing. *ArXiv E-Prints*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.13990>
- Basili, V., Rombach, D., Schneider, K., Kitchenham, B., Pfahl, D., & Selby, R. (2007). *Empirical software engineering issues. Critical assessment and future directions: International workshop, Dagstuhl Castle, Germany, June 26-30, 2006, revised papers* (vol. 4336). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-71301-2>
- Bayerstadler, A., Becquin, G., Binder, J., Botter, T., Ehm, H., Ehmer, T., Erdmann, M., Gaus, N., Harbach, P., & Hess, M. (2021). Industry quantum computing applications. *EPJ Quantum Technology*, 8(1), 25. <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-021-00114-x>
- Beck, K., Beedle, M., Bennekum, A. Van, Cockburn, A., Cunningham, W., Fowler, M., Grenning, J., Highsmith, J., Hunt, A., Jeffries, R., Kern, J., & Marick, B. (2001). *Manifesto for Agile Software Development*. <https://agilemanifesto.org/>
- Budgen, D., Turner, M., Brereton, P., & Kitchenham, B. A. (2008). Using mapping studies in software engineering. *Ppig*, 8, 195–204. <https://doi.org/10.14236/ewic/EASE2008.8>
- Bühler, F., Barzen, J., Beisel, M., Georg, D., Leymann, F., & Wild, K. (2023). *Patterns for quantum software development* [Artículo de conferencia]. 15th International Conference on Pervasive Patterns and Applications (PATTERNS 2023). <https://doi.org/10.1145/3665870.3665871>
- Caldiera, V. R. B. G., & Rombach, H. D. (1994). The goal question metric approach. *Encyclopedia of Software Engineering*, 528-532. <https://www.cs.umd.edu/users/mvz/handouts/gqm.pdf>
- Conradi, H., & Fuggetta, A. (2002). Improving software process improvement. *IEEE Software*, 19(4), 92–99. <https://doi.org/10.1109/MS.2002.1020295>
- Cuomo, D., Caleffi, M., & Cacciapuoti, A. S. (2020). Towards a distributed quantum computing ecosystem. *IET Quantum Communication*, 1(1), 3-8. <https://doi.org/10.1049/iet-qtc.2020.0002>
- Doran, G. T. (1981). There's a SMART way to write managements's goals and objectives. *Management Review*, 70, 35-36. <https://community.mis.temple.edu/mis0855002fall2015/files/2015/10/S.M.A.R.T-Way-Management-Review.pdf>
- Dybå, T., & Dingsøyr, T. (2008). *Strength of evidence in systematic reviews in software engineering* [Artículo de conferencia]. Proceedings of the Second ACM-IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement. <https://doi.org/10.1145/1414004.1414034>
- Gibney, E. (2016). Inside Microsoft's quest for a topological quantum computer. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/nature.2016.20774>
- Gibney, E. (2019). Hello quantum world! Google publishes landmark quantum supremacy claim. *Nature*, 574(7779), 461-463. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-03213-z>
- Grossi, M., Crippa, L., Aita, A., Bartoli, G., Sammarco, V., Picca, E., Said, N., Tramonto, F., & Mattei, F. (2021). A serverless cloud integration for quantum computing. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.02007>
- Keele, S. (2007). *Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering* (ver. 2.3) [Reporte técnico]. Ebse. <https://doi.org/10.1145/1134285.1134500>

- Khan, A. A., Ahmad, A., Waseem, M., Liang, P., Fahmideh, M., Mikkonen, T., & Abrahamsson, P. (2023). Software architecture for quantum computing systems—A systematic review. *Journal of Systems and Software*, 201, 111682. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2023.111682>.
- Lee, R. (2013). *Software engineering research, management and applications* (vol. 496). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-24344-9>.
- Nallamothula, L. (2020). *Selection of quantum computing architecture using a decision tree approach* [Artículo de conferencia]. 2020 3rd International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS). <https://doi.org/10.1109/ICISS49785.2020.9315893>.
- Pérez-Castillo, R., & Piattini, M. (2022). Design of classical-quantum systems with UML. *Computing*, 104(11), 2375-2403. <https://doi.org/10.1007/s00607-022-01091-4>.
- Petersen, K., Feldt, R., Mujtaba, S., & Mattsson, M. (2008). Systematic mapping studies in software engineering. *12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE)*, 12, 1-10.
- Piattini, M., & Murillo, J. M. (2022). Quantum software engineering landscape and challenges. En M. A. Serrano, R. Pérez-Castillo, & M. Piattini (Eds.), *Quantum Software Engineering* (pp. 25-38). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-05324-5_2
- Piattini, M., Petersen, G., & Pérez-Castillo, R. (2021). Quantum computing: A new software engineering golden age. *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, 45(3), 12-14. <https://doi.org/10.1145/3402127.3402131>
- Ramouthar, R., & Seker, H. (2023). Hybrid quantum algorithms and quantum software development frameworks. *ScienceOpen preprints*. <https://doi.org/10.14293/PR2199.000298.v1>
- Santos, A. C. (2016). *The IBM quantum computer and the IBM quantum experience*. <https://quantum.ibm.com>
- Scheerer, M., Klamroth, J., & Denninger, O. (2021). *Engineering reliable hybrid quantum software: An architectural-driven approach*. <https://ceur-ws.org/Vol-3008/short3.pdf>
- Shamima Aktar, M., Liang, P., Waseem, M., Tahir, A., Ahmad, A., Zhang, B., & Li, Z. (2023). Architecture decisions in quantum software systems: An empirical study on Stack Exchange and GitHub, *Information and Software Technology*, 177, 107587. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2024.107587>
- Shull, F., Singer, J., & Sjøberg, D. I. K. (2007). *Guide to advanced empirical software engineering*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-044-5>
- Sodhi, B. (2018). Quality attributes on quantum computing platforms. *arXiv preprints*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1803.07407>
- Sodhi, B., & Kapur, R. (2021). *Quantum computing platforms: assessing the impact on quality attributes and sdlc activities* [Artículo de conferencia]. 2021 IEEE 18th International Conference on Software Architecture (ICSA). <https://doi.org/10.1109/ICSA51549.2021.00016>
- Steane, A. (1998) Quantum computing. *Reports on Progress in Physics*, 61, 117-173. <http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/61/2/002>
- Stirbu, V., & Mikkonen, T. (2023). Software architecture challenges in integrating hybrid classical-quantum systems. *2023 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, 2, 203-204. <https://doi.org/10.1109/QCE57702.2023.10212>
- Tardy, C. (2004). The role of English in scientific communication: Lingua franca or Tyrannosaurus rex? *Journal of English for Academic Purposes*, 3(3), 247-269. <https://doi.org/10.1016/j.jeap.2003.10.001>
- Weder, B., Barzen, J., Leymann, F., Salm, M., & Vietz, D. (2020a). *The quantum software lifecycle* [Artículo de conferencia]. 1st ACM SIGSOFT International Workshop on Architectures and Paradigms for Engineering Quantum Software. <https://doi.org/10.1145/3412451.3428497>

- Wieringa, R., Maiden, N., Mead, N., & Rolland, C. (2006). Requirements engineering paper classification and evaluation criteria: A proposal and a discussion. *Requirements Engineering*, 11, 102-107. <https://doi.org/10.1007/s00766-005-0021>
- Yang, H., Wang, J., & Sun, X. (2023). Research on quantum computing standard system architecture and roadmap. *Journal of Physics: Conference Series*, 2433(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2433/1/012035>
- Yang, L., Zhang, H., Shen, H., Huang, X., Zhou, X., Rong, G., & Shao, D. (2021). Quality assessment in systematic literature reviews: A software engineering perspective. *Information and Software Technology*, 130, 106397. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2020.106397>
- Ying, M. (2010). *Foundations of quantum programming* [Artículo de conferencia]. Asian Symposium on Programming Languages and Systems. https://doi.org/10.1007/978-3-642-17164-2_2
- Yue, T., Maurer, W., Ali, S., Taibi, D., Greiwe, F., Krüger, T., Maurer, W., Safi, H., Wintersperger, K., & Maurer, W. (2023). Challenges and opportunities in quantum software architecture. En P. Pelliccione, R. Kazman, I. Weber & A. Liu (Eds.), *Software Architecture* (pp. 1-23). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36847-9_1
- Zhao, J. (2020). Quantum software engineering: Landscapes and horizons. *arXiv preprint*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.07047>

