

Hacia una arquitectura de referencia para la definición de arquitecturas de software empresariales híbridas, adaptada a las necesidades emergentes de la Ingeniería de Software Cuántica

Carlos Orozco¹

¹ Facultad de Ingeniería Electrónica – Universidad del Cauca
Calle 5 No. 4-70 – 190003 – Popayán – Cauca – Colombia

carlosorozco@unicauca.edu.co

Resumen. El auge de la computación cuántica ha abierto un nuevo paradigma en el 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 el estado actual de la propuesta de doctorado que se centra en el diseño de una arquitectura de referencia que apoye la definición de arquitecturas de sistemas software híbridos, atendiendo a las necesidades y desafíos que propone el avance en el campo de la Ingeniería de Software Cuántica.

Abstract. The rise of quantum computing has introduced a new paradigm in information processing, with the potential to surpass the limits of classical computation. However, the development of software architectures capable of fully leveraging this technology remains an active research area, filled with unprecedented challenges. This paper presents the current state of a Ph.D. proposal focused on designing a reference architecture to support the definition of hybrid software systems, addressing the needs and challenges emerging from the progress in Quantum Software Engineering.

1. Introducción

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 operativos capaces de solucionar problemas en la industria de software comenzó a suceder en la última década, cuando gigantes como Google (Gibney, 2019a), IBM (Santos, 2016) y Microsoft (Gibney, 2016) decidieron invertir recursos financieros, de infraestructura y de talento humano en el desarrollo de soluciones utilizando dispositivos cuánticos para abordar problemas en sectores como: la inteligencia artificial, la ciencia de datos, el análisis predictivo, la ciberseguridad, 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 un campo emergente y relacionado con la computación cuántica, denominado: *Ingeniería de Software 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. Para lograrlo, se han desarrollado diferentes soluciones para clarificar y establecer un ciclo de vida del desarrollo de software específico adaptado a las necesidades y retos que define la computación cuántica (Weder et al., 2020; Zhao, 2020), que incluyen documentar 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), definir principios y técnicas (Piattini et al., 2021) diseñadas para el desarrollo de algoritmos cuánticos, entre otros. 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 *Ingeniería de Software Cuántica* incluye la definición de estrategias que faciliten el diseño de sistemas desde la perspectiva de la *arquitectura de software*, que es el objeto de estudio de interés para el trabajo de investigación presentado en este artículo.

1. Estado del arte

Con el objetivo de analizar la arquitectura de software desde la perspectiva de la computación cuántica, se realizó una Revisión Sistemática de la Literatura (RSL). En general, los resultados destacan: (i) la necesidad de un estado del arte que facilite la síntesis e identificación de líneas de trabajo en el área; (ii) el desarrollo de modelos, metodologías y marcos que impulsen soluciones híbridas y cuánticas, y (iii) la importancia de establecer criterios de calidad para diseñar arquitecturas adaptadas a sistemas software híbridos (clásico-cuántico).

El análisis de la literatura destaca dos tipos de arquitecturas emergentes: (i) *híbridas*, que adaptan prácticas del software clásico a las necesidades de la computación cuántica, y (ii) *puramente cuánticas*, que requieren abordar nuevos desafíos propios del contexto cuántico. Sin embargo, esta área de investigación, aún en etapas preliminares, presenta soluciones limitadas, heterogéneas y sin consenso en definiciones y conceptos clave, lo que dificulta su aplicación industrial. Los resultados de la RSL también evidencian iniciativas metodológicas híbridas que buscan transferir mejores prácticas del software clásico al ámbito de la Ingeniería de Software Cuántica (Conradi & Fuggetta, 2002).

Por otro lado, el análisis de las tendencias presentes en la industria indica que las empresas tienen un creciente interés en adoptar e implementar soluciones que apliquen los beneficios que trae la computación cuántica. Sin embargo, la falta de soluciones generales y estandarizadas obliga a las empresas a invertir esfuerzos y tiempos adicionales en adaptar las soluciones existentes a su propio modelo de negocio (Beck et al., 2001). En este sentido, sólo algunas multinacionales y empresas de la industria de TI como: Google (Gibney, 2019a), IBM (Santos, 2016), Microsoft (Gibney, 2016), IonQ (IonQ, 2024), entre otros, cuentan con la capacidad de desarrollar computadoras cuánticas de alto nivel. Asimismo, algunas empresas de diversos sectores están comenzando a explorar, adquirir y utilizar computadoras cuánticas con capacidades limitadas para resolver necesidades específicas de su negocio, mejorar sus operaciones y desarrollar nuevas soluciones, algunas de ellas son: Alibaba, Tencent, Nokia, Airbus,

Biogen , entre otros (Gibney, 2019b; The Quantum Insider, 2022). De esta manera, se observa una fuerte tendencia hacia el uso de soluciones cuánticas en el sector industrial, sumado a iniciativas en la academia que buscan estandarizar el estado del conocimiento en torno a la definición de arquitecturas de software adaptadas a las necesidades que sugiere la computación cuántica.

Adicionalmente, se identificó una diversidad de enfoques arquitectónicos enfocados en el diseño de soluciones híbridas como cuánticas, esta variedad refleja un panorama heterogéneo de estrategias y patrones arquitectónicos, abarcando desde arquitecturas en capas, pasando por patrones de contención recursiva, que se utilizan para evitar desbordamientos de pila en entornos críticos, hasta llegar a configuraciones de computación cuántica universal (Khan et al., 2022). Por un lado, la variedad puede ser beneficiosa, ya que diferentes arquitecturas pueden adaptarse a necesidades específicas, aprovechar diferentes tecnologías subyacentes o abordar distintos tipos de problemas de manera más eficiente. Asimismo, la experimentación y la diversidad pueden fomentar la innovación de enfoques más efectivos. Por otro lado, una excesiva diversidad sin estandarización puede llevar a complicaciones en términos de: compatibilidad, interoperabilidad, colaboración, complejidad en el desarrollo, inconsistencias en la calidad y desempeño de las aplicaciones, dificultad en la adopción generalizada de tecnologías cuánticas, entre otros. En este sentido, una consolidación hacia estándares comunes puede facilitar la colaboración y la adopción generalizada de tecnologías cuánticas (Khan et al., 2022).

Además, los resultados del análisis de la literatura indican que se han realizado esfuerzos significativos en el estudio de los criterios de calidad o requisitos no funcionales que se deben adoptar, adaptar y definir para cumplir con los desafíos que requiere la industria para el desarrollo de arquitecturas híbridas y cuánticas, y destacan características de calidad conocidas desde el punto de vista de arquitecturas clásicas como: compatibilidad, escalabilidad, eficiencia, seguridad, entre otros, y proponen nuevos elementos directamente relacionados con los desafíos de la computación cuántica, por ejemplo: reducción de errores probabilísticos, calidad de simulaciones, coherencia cuántica y decoherencia cuántica, error cuántico fidelidad de operaciones cuánticas, seguridad cuántica, integración con sistemas clásicos, entre otros (Sodhi, 2018; Sodhi & Kapur, 2021). La superación de estos desafíos es importante para avanzar en el desarrollo de arquitecturas de software cuánticas.

5. Brechas existentes y propuesta de solución

En general, La RSL evidencia la necesidad de estandarizar el desarrollo de arquitecturas de software cuánticas mediante marcos de trabajo comunes que simplifiquen su creación/mantenimiento, promoviendo soluciones híbridas y cuánticas más cohesionadas y eficientes (Khan et al., 2022) que consideren aspectos como: (i) la reducción de costos operativos maximizando el uso de recursos cuánticos, (ii) la compatibilidad con sistemas clásicos al integrar aspectos funcionales y no funcionales de ambos paradigmas, y (iii) la transición eficaz y eficiente de sistemas clásicos a cuánticos mediante enfoques híbridos.

El análisis de la literatura identifica dos áreas clave para el desarrollo de soluciones en computación cuántica: (i) la creación de metodologías puramente cuánticas para mejorar enfoques existentes, y (ii) la exploración de soluciones híbridas

que conecten metodologías clásicas con enfoques cuánticos avanzados. En particular, este estudio se centrará en las arquitecturas híbridas porque representan una oportunidad de proponer soluciones que faciliten la transición entre el paradigma de desarrollo de software clásico y cuántico.

En el contexto de la arquitectura de software, esto se podría lograr a través de una arquitectura de referencia (Cervantes et al., 2016); la cual se puede definir como una abstracción de alto nivel que encapsula características comunes y prácticas de diseño que se pueden reutilizar en diferentes contextos, proporcionando una base estandarizada para el desarrollo de software. Como resultado, una arquitectura de referencia sirve como una base atemporal que se puede instanciar y adaptar para cumplir las necesidades propias de un proyecto. En consecuencia, una arquitectura de referencia en el contexto de las arquitecturas de software híbridas podría representar un conjunto estandarizado de componentes, patrones de diseño y prácticas que se aplican a la construcción de software que involucre elementos clásicos y cuánticos.

5. Estado actual de la propuesta de solución

La arquitectura de referencia que surgió como propuesta de solución luego de analizar los resultados reportados en la RSL hace parte de un proyecto de doctorado que se encuentra en etapa de desarrollo. A continuación, se presentan los objetivos definidos para el proyecto y su estado actual.

Objetivo General: Diseñar una arquitectura de referencia adaptada a las necesidades de la *Ingeniería de Software Cuántica* que apoye el diseño de arquitecturas de software empresariales híbridas en la industria de software.

Para dar conformidad al cumplimiento del objetivo general, se definió un total de cuatro objetivos específicos, que son descritos a continuación

OE1. Identificar los estudios, propuestas, alcance, limitaciones y desafíos de la arquitectura de software en el contexto de la computación cuántica, a través de una Revisión Sistemática de la Literatura que permita establecer un estado del conocimiento extendido en torno a las soluciones propuestas por otros autores; **OE2.** Diseñar una arquitectura de referencia para arquitecturas de software empresariales híbridas, que incorpore los principios de la Ingeniería de Software Cuántica y la armonización de los elementos identificados en el OE1; **OE3.** Evaluar la arquitectura de referencia propuesta en el OE2 a través de la aplicación de la técnica de evaluación de juicio de expertos, para determinar aspectos críticos e insights significativos que permitan mejorar y optimizar la solución y su aplicación en el contexto de aplicaciones empresariales híbridas; **OE4.** Evaluar la arquitectura de referencia propuesta en el OE2 mediante la validación de escenarios hipotéticos como método mixto de evaluación en un entorno controlado que permita determinar su grado de aplicabilidad.

4.1. Estado actual del proyecto

A partir del análisis realizado por el equipo investigador, se identificó que el marco para guiar el desarrollo de la propuesta se adapta al formalismo propuesto por la *metodología investigación-acción con múltiples ciclos* (Wood-Harper, 1985), donde cada ciclo se divide en cuatro etapas: **planeación, ejecución, desarrollo y reflexión** (ver la Figura 1):

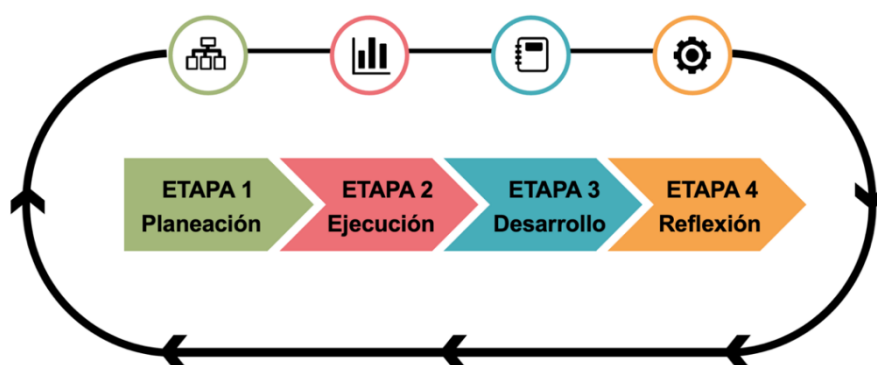


Figure 1. Metodología investigación-acción.

A partir de las actividades propuestas en esta metodología, se identificó que la investigación se debe dividir en cinco ciclos que guíen las actividades, entradas y salidas esperados después realizar el proyecto de investigación. A continuación, se presenta la descripción de cada ciclo planteado en el proyecto:

Ciclo 1: Realizar una Revisión Sistemática de la Literatura que sigue los lineamientos propuestos por (Budgen et al., 2008). El propósito de la revisión de la literatura es identificar el estado del arte actualizado y las brechas existentes en torno a la temática de interés; **Ciclo 2:** Definir una Arquitectura de Referencia para la definición de arquitecturas empresariales híbridas. Para lograrlo, se aplicará un proceso de armonización de las soluciones identificadas en el *Ciclo 1*, siguiendo las actividades que propone (Wood-Harper, 1985); **Ciclo 3:** Evaluar la Arquitectura de Referencia definida en el *Ciclo 2* mediante su validación a través del método de Juicio de Expertos (Almenara & Cejudo, 2013), que describe cada una de las actividades, roles y elementos necesarios para realizar una evaluación teórica que incluya a expertos en Ingeniería de Software y arquitectura de software, quienes determinarán la aplicabilidad de la propuesta e identificarán información que permita mejorar y optimizar la solución propuesta; **Ciclo 4:** Determinar la aplicabilidad de la arquitectura de referencia propuesta en el *Ciclo 2* y refinada durante el *Ciclo 3* en un entorno simulado y controlado. Para ello, se realizará una evaluación adaptando el método para la evaluación de arquitecturas de software a través de escenarios hipotéticos propuesto por (Kazman et al., 1994), conocido como SAAM, en inglés: Software Architecture Analysis Method; **Ciclo 5:** Documentación y socialización del proyecto. Este *Ciclo* es transversal y es realizado durante todo el tiempo que dure el proyecto. En particular, el Ciclo 1 que corresponde a la ejecución de la RSL, se ha completado satisfactoriamente. En la **Tabla 1** se presenta el consolidado de resultados esperados en las siguientes fases del proyecto.

Tabla 1.Resultados esperados durante la ejecución del proyecto.

Resultado	Entrada	Proceso	Salida
1	Reporte estructurado de resultados de la RSL.	Desarrollo de actividades correspondientes al Ciclo 2	Arquitectura de referencia (Versión 1).
2	Arquitectura de referencia (Versión 1).	Desarrollo de actividades correspondientes al Ciclo 3.	Arquitectura de referencia (Versión 2).
3	Arquitectura de referencia (Versión 2).	Desarrollo de actividades correspondientes al Ciclo 4.	Arquitectura de referencia (Versión final).

6. Conclusiones preliminares

Con respecto al trabajo desarrollado hasta el momento se puede concluir que: (i) la RSL permitió conocer el estado del arte en torno a la definición e implementación de soluciones en el área de la arquitectura de software cuántica; (ii) el análisis de las arquitecturas de software cuánticas es un tema emergente que se encuentra en estudio y es susceptible a mejoras relacionadas con el desarrollo de procesos, marcos de trabajo, estándares, entre otros, que faciliten la adopción de soluciones híbridas y cuánticas.

Referencias

- Almenara, J. C., & Cejudo, M. del C. L. (2013). La aplicación del juicio de experto como técnica de evaluación de las tecnologías de la información y comunicación (TIC). *Revista Eduweb*, 7(2), 11–22.
- 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.
- 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, February 12). *Manifesto for Agile Software Development*.
- Cervantes, H., Velasco-Elizondo, P., & Castro, L. (2016). Arquitectura de software Conceptos y ciclo de desarrollo. *México, México DF*.
- Conradi, H., & Fuggetta, A. (2002). Improving software process improvement. *IEEE Software*, 19(4), 92–99. <https://doi.org/10.1109/MS.2002.1020295>
- Gibney, E. (2016). Inside Microsoft's quest for a topological quantum computer. *Nature*.
- Gibney, E. (2019a). Hello quantum world! Google publishes landmark quantum supremacy claim. *Nature*, 574(7779), 461–463.
- IonQ. (2024, February 22). *IonQ*. <https://ionq.com>.
- Kazman, R., Bass, L., Abowd, G., & Webb, M. (1994). SAAM: A method for analyzing the properties of software architectures. *Proceedings of 16th International Conference on Software Engineering*, 81–90.
- Khan, A. A., Ahmad, A., Waseem, M., Liang, P., Fahmideh, M., Mikkonen, T., & Abrahamsson, P. (2022). Software Architecture for Quantum Computing Systems-A Systematic Review. *ArXiv Preprint ArXiv:2202.05505*.
- Piattini, M., & Murillo, J. M. (2022). Quantum Software Engineering Landscape and Challenges. In *Quantum Software Engineering* (pp. 25–38). Springer.
- Piattini, M., & Murillo, J. M. (2022). Quantum Software Engineering Landscape and Challenges. In *Quantum Software Engineering* (pp. 25–38). Springer.
- Piattini, M., Peterssen, G., & Pérez-Castillo, R. (2021). Quantum computing: A new software engineering golden age. *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, 45(3), 12–14.
- Santos, A. C. (2016). The IBM quantum computer and the IBM quantum experience. *ArXiv Preprint ArXiv:1610.06980*.

- Sodhi, B. (2018). Quality attributes on quantum computing platforms. *ArXiv Preprint ArXiv:1803.07407*.
- Sodhi, B., & Kapur, R. (2021). Quantum computing platforms: assessing the impact on quality attributes and sdlc activities. *2021 IEEE 18th International Conference on Software Architecture (ICSA)*, 80–91.
- The Quantum Insider. (2022). *Quantum Technology Investment Update*.
- Weder, B., Barzen, J., Leymann, F., Salm, M., & Vietz, D. (2020). The quantum software lifecycle. *Proceedings of the 1st ACM SIGSOFT International Workshop on Architectures and Paradigms for Engineering Quantum Software*, 2–9.
- Wood-Harper, T. (1985). Research methods in information systems: using action research. *Research Methods in Information Systems*, 169, 191.
- Ying, M. (2010). Foundations of quantum programming. *Asian Symposium on Programming Languages and Systems*, 16–20.
- Zhao, J. (2020). Quantum software engineering: Landscapes and horizons. *ArXiv Preprint ArXiv:2007.07047*.