

ATHENA – Tecnologías Avanzadas para Entornos y Aplicaciones Híbridas Clásico–Cuánticas

Ignacio García-Rodríguez de Guzmán¹, Moisés Rodríguez¹, Ana Díaz-Muñoz^{1,2}, Jose Garcia-Alonso³, Enrique Moguel³, Juan Manuel Murillo³, José Antonio Parejo⁴, Antonio Ruiz-Cortés⁴, Pablo García-Bringas⁴, Iker Pastor López⁴

¹ ITSI, Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), España

² AQCLab Software Quality, Ciudad Real, España

³ Quercus Software Engineering Group, Universidad de Extremadura (UNEX), España

⁴ Unidad de Excelencia SCORE, Instituto I3US, Universidad de Sevilla (US), España

⁵ Universidad de Deusto, Bilbao, España

{Ignacio.GRodriguez, Moises.Rodriguez}@uclm.es; adiaz@aqclab.es;
{jgaralo, enrique, juanmamu}@unex.es; {japarejo, aruiz}@us.es
{pablo.garcia.bringas, iker.pastor}@deusto.es

Abstract. *A pesar de los avances recientes, la adopción industrial de la computación cuántica sigue careciendo de enfoques adecuados de Ingeniería del Software Cuántico (QSE) que permitan integrar servicios cuánticos en sistemas complejos de forma sistemática, gobernable y segura. En este trabajo se presenta ATHENA, un proyecto de investigación aplicada que aborda este reto desde la perspectiva de los Hybrid Software as a Service (HSaaS). ATHENA propone un enfoque basado en QSE para el diseño, desarrollo y operación de HSaaS, combinando arquitecturas híbridas, calidad y pruebas, seguridad desde el diseño y gobernanza basada en contratos, con el objetivo de facilitar la transición hacia sistemas software híbridos de nivel industrial.*

1. Introducción

En los últimos años, la computación cuántica ha experimentado un avance significativo, impulsado por fuertes inversiones públicas y privadas y por la disponibilidad de infraestructuras cuánticas accesibles a través de la nube. Iniciativas como el Quantum Flagship europeo y programas nacionales han contribuido a consolidar este paradigma [European Commission 2018] [Reuters 2021]. Sin embargo, a pesar de estos avances, la adopción de la computación cuántica en entornos industriales sigue siendo limitada.

Desde la perspectiva de la ingeniería del software, esta limitación se debe principalmente a la ausencia de enfoques maduros que permitan integrar de forma sistemática las capacidades cuánticas en sistemas software complejos y heterogéneos [Murillo et al. 2025]. En la práctica, los sistemas reales combinan componentes clásicos y cuánticos que interactúan a lo largo de todo el ciclo de vida del software, lo que introduce nuevos desafíos relacionados con la arquitectura, la calidad, las pruebas, la seguridad y la operación de los sistemas [Moguel et al. 2022] [Díaz-Muñoz et al. 2024a].

La QSE ha emergido para proporcionar métodos, técnicas y herramientas que permitan desarrollar software cuántico con niveles adecuados de calidad, fiabilidad y mantenibilidad [Murillo et al. 2025] [Ali et al. 2022] [Díaz-Muñoz et al. 2025b]. El uso de paradigmas consolidados, como la computación orientada a servicios, puede facilitar la integración de capacidades cuánticas en sistemas software más amplios [Moguel et al. 2022]. En particular, el concepto de Quantum Software as a Service ha sido propuesto como un mecanismo para exponer funcionalidades cuánticas mediante interfaces bien definidas, favoreciendo su reutilización e integración [García-Alonso et al. 2022]. También se observa que la analizabilidad de los circuitos cuánticos puede influir en la percepción de la calidad del software cuántico por parte de los desarrolladores, especialmente en términos de comprensión y evaluación [Díaz-Muñoz et al. 2025a].

Cuando los servicios cuánticos se combinan con servicios clásicos para dar lugar a soluciones híbridas, surgen nuevos retos: coordinación entre procesos clásicos y cuánticos, gestión de cambios continuos, evaluación global de la calidad del sistema [Díaz-Muñoz et al. 2024b] [Díaz-Muñoz et al. 2024c], y alineación entre decisiones técnicas, restricciones contractuales y modelos de coste [Murillo et al. 2025] [Moguel et al. 2022]. Estos, requieren de un enfoque holístico que considere el sistema híbrido como una unidad coherente, y no como una simple composición de componentes independientes.

Este artículo adopta la perspectiva de los Hybrid Software as a Service (HSaaS), en los que servicios clásicos y cuánticos se integran y operan como una oferta unificada percibida por los usuarios finales. El trabajo presenta un proyecto de investigación aplicada cuyo objetivo es definir un enfoque de ingeniería del software para el diseño, desarrollo y operación de HSaaS, apoyándose en principios consolidados de la ingeniería del software y adaptándolos a las particularidades de los entornos híbridos clásico-cuánticos. La contribución del artículo reside en la definición de un marco de ingeniería estructurado y aplicable que pretende reducir la brecha entre los servicios cuánticos aislados y los sistemas software híbridos de nivel industrial.

2. Proyecto ATHENA

ATHENA es un proyecto coordinado presentado en la Convocatoria 2024 de "Proyectos de Generación de Conocimiento", cuyo objetivo es abordar los principales desafíos de ingeniería del software asociados al desarrollo y adopción de sistemas híbridos clásico-cuánticos. ATHENA persigue facilitar la creación de sistemas HSaaS, en los que se integran y operan servicios clásicos y cuánticos como un único sistema software.

2.1. HARMONIA: Arquitecturas y operación de HSaaS

El subproyecto ATHENA-HARMONIA (Universidad de Extremadura) se centra en el diseño de arquitecturas híbridas y en la operación de HSaaS, abordando la integración de recursos cuánticos con clásicos dentro de entornos distribuidos. Su objetivo es definir mecanismos que permitan la partición, despliegue y orquestación dinámica de tareas entre componentes clásicos y cuánticos, apoyándose en principios consolidados de la SOC y del paradigma computing continuum. Este subproyecto sienta las bases arquitectónicas necesarias para el desarrollo y operación eficiente de sistemas híbridos.

2.2. HYGIEIA: Calidad y pruebas en sistemas híbridos

ATHENA-HYGIEIA (Universidad de Castilla-La Mancha) aborda los retos relacionados con el aseguramiento de la calidad y las pruebas en sistemas HSaaS. El subproyecto se centra en la definición de procesos, técnicas y herramientas que permitan evaluar de forma integrada la calidad de HSaaS, considerando tanto los componentes clásicos como los cuánticos y su interacción. En particular, se investiga cómo adaptar y extender enfoques consolidados de pruebas y evaluación de la calidad para dar respuesta a las características específicas de los sistemas híbridos, como el comportamiento probabilístico de los algoritmos cuánticos y la complejidad de su integración con software clásico.

2.3. AEGIS: Seguridad e integridad en HSaaS

El subproyecto ATHENA-AEGIS (Universidad de DEUSTO) se enfoca en los aspectos de seguridad e integridad de los HSaaS, abordando las vulnerabilidades específicas que surgen en entornos híbridos clásico-cuánticos. Su objetivo es definir metodologías, herramientas y métricas que permitan garantizar la fiabilidad, integridad y seguridad de los sistemas a lo largo del ciclo de vida de los HSaaS. Este subproyecto adopta una perspectiva transversal, considerando tanto amenazas accidentales como ataques deliberados.

2.4. TALOS: Gobernanza de servicios híbridos

Finalmente, el subproyecto ATHENA-TALOS (Universidad de Sevilla) se centra en la gobernanza de HSaaS, con especial atención a (i) la gestión basada en contratos, (ii) la planificación de capacidad, y (iii) la adaptación dinámica del comportamiento del sistema. El subproyecto investiga cómo modelar y automatizar tareas de gobernanza en entornos híbridos, teniendo en cuenta aspectos como modelos de precios [García-Fernández et al. 2024b], restricciones contractuales [Molino-Peña et al. 2025] y condiciones operativas tanto de servicios clásicos como cuánticos. Su objetivo es alinear las decisiones técnicas con los objetivos de negocio y las condiciones de uso [García-Fernández et al. 2024a], facilitando una operación eficiente y sostenible de HSaaS en contextos reales.

3. Conclusion

ATHENA aborda los desafíos de ingeniería del software asociados a la integración de la computación cuántica en sistemas software reales, donde componentes clásicos y cuánticos deben coexistir de forma coherente, y asumiendo que la falta de enfoques de ingeniería adaptados a sistemas híbridos sigue siendo una barrera relevante para su adopción en contextos industriales. ATHENA propone un enfoque de investigación aplicada centrado en los HSaaS, extendiendo principios consolidados de la ingeniería del software y SOC a entornos híbridos. De este modo, se sientan las bases para un marco de ingeniería que pretende facilitar la transición desde servicios cuánticos aislados hacia soluciones software híbridas más robustas y alineadas con las necesidades reales de la industria.

4. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos ATHENA PID2024-155639NB-C41, PID2024-155639NB-C42, PID2024-155639NB-C43 y PID2024-155639NB-C44), financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y FEDER (UE). Asimismo, ha contado con el apoyo de la Consejería de Economía, Ciencia y Agenda Digital de la Junta de Extremadura (GR21133).

Referencias

- Ali, S., Yue, T., and Abreu, R. (2022). When software engineering meets quantum computing. *Commun. ACM*, 65(4):84–88.
- Díaz-Muñoz, A., Cruz-Lemus, J. A., Rodríguez, M., and Baldasarre, T. (2025a). Towards an analyzability model for hybrid software. In *Proceedings of the 1st International Conference on Quantum Software - IQSOFT*, pages 97–104. INSTICC, SciTePress.
- Díaz-Muñoz, A., Rodríguez, M., Cruz-Lemus, J., and Piattini, M. (2024a). Evaluación de la mantenibilidad de los sistemas híbridos (clásico-cuánticos). In *Anais do XXVII Congresso Ibero-Americano em Engenharia de Software*, pages 356–363, Porto Alegre, RS, Brasil. SBC.
- Díaz-Muñoz, A., Rodríguez, M., and Piattini, M. (2024b). Implementing an environment for hybrid software evaluation. *Science of Computer Programming*, 236:103109.
- Díaz-Muñoz, A., Rodríguez, M., and Piattini, M. (2024c). Towards a set of metrics for hybrid (quantum/classical) systems maintainability. *JUCS - Journal of Universal Computer Science*, 30(1):25–48.
- Díaz-Muñoz, A., Verdugo, J., Rodríguez, M., Cruz-Lemus, J. A., Martínez-Gasca, R., and Piattini, M. (2025b). Environment for the evaluation of hybrid (classical–quantum) systems analyzability. *IEEE Software*, 42(5):73–81.
- European Commission (2018). Quantum flagship. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum-technologies-flagship>.
- Garcia-Alonso, J., Rojo, J., Valencia, D., Moguel, E., Berrocal, J., and Murillo, J. M. (2022). Quantum software as a service through a quantum api gateway. *IEEE Internet Computing*, 26(1):34–41.
- García-Fernández, A., Parejo, J. A., Cavero, F. J., and Ruiz-Cortés, A. (2024a). Racing the market: an industry support analysis for pricing-driven devops in saas. In *International Conference on Service-Oriented Computing*, pages 260–275. Springer.
- García-Fernández, A., Parejo, J. A., and Ruiz-Cortés, A. (2024b). Pricing4saas: Towards a pricing model to drive the operation of saas. In *International Conference on Advanced Information Systems Engineering*, pages 47–54. Springer.
- Moguel, E., Rojo, J., Valencia, D., Berrocal, J., Garcia-Alonso, J., and Murillo, J. M. (2022). Quantum service-oriented computing: current landscape and challenges. *Software Quality Journal*, 30(4):983–1002.
- Molino-Peña, E., García, J. M., and Ruiz-Cortés, A. (2025). Integrating terms of service and service level agreements for automating cloud service management. In *International Conference on Service-Oriented Computing*, pages 19–34. Springer.
- Murillo, J. M., Garcia-Alonso, J., Moguel, E., Barzen, J., Leymann, F., Ali, S., Yue, T., Arcaini, P., Pérez-Castillo, R., Guzmán, I. G.-R. d., Piattini, M., Ruiz-Cortés, A., Brogi, A., Zhao, J., Miransky, A., and Wimmer, M. (2025). Quantum software engineering: Roadmap and challenges ahead. *ACM Trans. Softw. Eng. Methodol.*, 34(5):Article 154.
- Reuters (2021). Germany to support quantum computing with 2 billion euros. <https://www.reuters.com/article/us-germany-quantumcomputer-idUSKBN2CS0W9>.