

Evaluación experimental de una arquitectura híbrida adaptativa para la gestión de identidades digitales basada en Blockchain

Autores:

Luis Eduardo Chichanda Garcia, Jorge Roberto Loayza Zambrano,
Aura Dolores Zambrano Rendon
Escuela Superior Politécnica Agropecuaria De Manabí Manuel Félix López(ESPAM)
luischichandagarcia@gmail.com, robcuero94@gmail.com,
azambrano@espam.edu.ec,
Calceta, Ecuador

DOI: <https://doi.org/10.56124/encriptar.v9i17.011>

RESUMEN

La gestión de identidades digitales se desarrolla en un contexto de tensión permanente entre seguridad, rendimiento y consumo energético, especialmente cuando se comparan arquitecturas centralizadas con enfoques basados en Blockchain, y en este escenario el presente estudio introduce y evalúa un modelo arquitectónico híbrido adaptativo que integra procesamiento centralizado y descentralizado y que conmuta de forma dinámica en función de la carga, del nivel de riesgo y de la criticidad de las operaciones, de manera que la investigación se estructura como un estudio aplicado, de enfoque cuantitativo y diseño experimental comparativo, en el cual se implementaron tres entornos funcionalmente equivalentes, centralizado, descentralizado e híbrido, y se ejecutaron pruebas con 500 identidades digitales bajo cinco niveles de concurrencia 50, 100, 200, 500 y 1000 solicitudes, registrando de forma sistemática la latencia, el uso de CPU, el consumo energético y una métrica de eficiencia energética computacional EPR expresada en Wh por transacción, y los resultados evidencian que el modelo híbrido mantiene valores de latencia y de EPR global muy próximos a la arquitectura centralizada, mientras que la arquitectura descentralizada presenta en general un mayor consumo por transacción y una demanda más elevada de CPU, aun cuando mejora su EPR en escenarios de carga extrema, de modo que los hallazgos respaldan que las arquitecturas híbridas adaptativas permiten articular un equilibrio entre trazabilidad y eficiencia y se perfilan como una alternativa viable para sistemas de identidad digital sometidos a cargas variables y restricciones de sostenibilidad computacional.

Palabras clave: identidad digital, arquitectura híbrida, Blockchain, eficiencia energética, sistemas distribuidos.

Experimental evaluation of an adaptive hybrid architecture for Blockchain based digital identity management

ABSTRACT

The management of digital identities unfolds in a context of persistent tension between security, performance, and energy consumption, particularly when centralized architectures are compared with blockchain-based approaches. In this setting, the present study introduces and evaluates an adaptive hybrid architectural model that integrates centralized and decentralized processing and switches dynamically according to system load, risk level, and operational criticality. The research is structured as an applied, quantitative study with a comparative experimental design, in which three functionally equivalent environments, namely centralized, decentralized, and hybrid, were implemented, and tests were conducted using 500 digital identities under five concurrency levels (50, 100, 200, 500, and 1000 requests). Latency, CPU utilization, energy consumption, and a computational energy efficiency metric (EPR), expressed in Wh per transaction, were systematically recorded. The results show that the hybrid model maintains global latency and EPR values that are very close to those of the centralized architecture, whereas the decentralized architecture generally exhibits higher energy consumption per transaction and greater CPU demand, even though its EPR improves under extreme load scenarios. Overall, the findings support the view that adaptive hybrid architectures can balance traceability and efficiency and emerge as a viable alternative for digital identity systems operating under variable loads and computational sustainability constraints.

Keywords: digital identity, hybrid architecture, Blockchain, energy efficiency, distributed systems.

1. Introducción

En la actualidad, la gestión de identidades digitales se ha convertido en un elemento fundamental para el funcionamiento de los sistemas de información debido a su papel en la protección de datos sensibles, la autenticación de usuarios y la continuidad operativa de los servicios digitales en entornos cada vez más interconectados, especialmente en sectores como la administración pública, los servicios financieros, la salud y la educación, donde la confianza en los procesos tecnológicos depende del diseño arquitectónico que articula de manera conjunta la seguridad, el rendimiento y la sostenibilidad computacional (Schmidt, 2025).

Dentro de este contexto, los modelos centralizados han sido ampliamente utilizados para la gestión de identidades digitales debido a su estructura simple, facilidad de administración y menores costos iniciales de implementación, sin embargo, la concentración de la información en repositorios únicos ha evidenciado debilidades estructurales relevantes asociadas a puntos únicos de fallo, a la exposición masiva de datos y a la vulnerabilidad frente a ataques de gran escala, lo que ha generado una pérdida progresiva de confianza por parte de usuarios y organizaciones en estos esquemas tradicionales (Appenzeller et al., 2022).

En respuesta a estas limitaciones, la tecnología Blockchain ha surgido como una alternativa orientada a fortalecer la seguridad y la trazabilidad de los sistemas de identidad digital mediante el uso de registros distribuidos, mecanismos criptográficos avanzados y contratos inteligentes que reducen la dependencia de intermediarios centralizados, permitiendo mejorar la transparencia y la auditabilidad de los procesos en contextos donde la soberanía del dato y la verificación independiente de la información resultan aspectos prioritarios (UI et al., 2024).

No obstante, de acuerdo con la literatura especializada, las arquitecturas completamente descentralizadas presentan limitaciones operativas significativas asociadas al incremento de la latencia, a la elevada demanda de recursos computacionales y a un mayor consumo energético en comparación con los sistemas

centralizados, lo que afecta su escalabilidad y sostenibilidad cuando se enfrentan a escenarios de alta concurrencia y uso intensivo, restringiendo así su adopción en entornos operativos reales donde la eficiencia y la experiencia del usuario constituyen factores críticos (Islam & Apu, 2024).

En este marco, diversos estudios han analizado la gestión de identidades digitales desde enfoques técnicos y organizacionales, señalando que la arquitectura tecnológica influye directamente en la latencia, la resiliencia y el consumo energético de los sistemas, por lo que el desafío actual no se limita a reforzar la seguridad, sino a lograr un equilibrio sostenible entre eficiencia operativa, trazabilidad y escalabilidad, lo que justifica la adopción de modelos híbridos y adaptativos como alternativa a los esquemas tradicionales reportados en la literatura reciente (Islam & Apu, 2024; Chen et al., 2025).

Frente a este panorama, han surgido enfoques híbridos que combinan componentes centralizados y descentralizados con el propósito de aprovechar las fortalezas de ambos paradigmas, de modo que estas arquitecturas buscan conservar la eficiencia y agilidad de los sistemas tradicionales al mismo tiempo que incorporan capacidades de seguridad, trazabilidad y resiliencia propias de la tecnología Blockchain, configurándose como una alternativa viable para la gestión de identidades digitales en entornos complejos y dinámicos (Chen et al., 2025).

Por su parte, distintos antecedentes señalan que la integración de estos enfoques incrementa la complejidad técnica de los sistemas y exige mecanismos de coordinación más avanzados para gestionar adecuadamente los flujos de información y la asignación de recursos computacionales, además de que persiste una limitada evidencia empírica sobre el comportamiento de arquitecturas híbridas adaptativas capaces de ajustar su funcionamiento en función de la carga del sistema, el nivel de riesgo y la criticidad de las transacciones procesadas, lo que constituye un vacío relevante en la literatura científica actual (Le et al., 2025).

En función de lo anterior, los estudios comparativos disponibles indican que ni las arquitecturas centralizadas ni las completamente descentralizadas logran optimizar de

manera simultánea el rendimiento técnico, la resiliencia ante fallos y la eficiencia energética en escenarios caracterizados por una alta variabilidad operativa, lo que pone de manifiesto la necesidad de explorar soluciones arquitectónicas que permitan una gestión más inteligente de los recursos computacionales sin comprometer los niveles de seguridad exigidos en los sistemas de identidad digital contemporáneos (Bulgakov et al., 2024).

En coherencia con estos antecedentes, el presente estudio surge de la necesidad de optimizar la gestión de identidades digitales en escenarios caracterizados por alta variabilidad operativa. En este contexto, el objetivo del artículo es analizar experimentalmente un modelo arquitectónico híbrido adaptativo para la gestión de identidades digitales, evaluando su desempeño en términos de rendimiento, resiliencia y eficiencia energética en comparación con arquitecturas centralizadas y descentralizadas bajo distintos niveles de carga y criticidad.

En función de este propósito, se establecen los siguientes objetivos específicos:

1. Comparar la latencia media entre las arquitecturas evaluadas en diferentes escenarios de carga concurrente.
2. Evaluar la eficiencia energética mediante la métrica EPR expresada en Wh por transacción.
3. Analizar el comportamiento del uso de CPU como indicador del esfuerzo computacional asociado a cada modelo arquitectónico.
4. Examinar el efecto de la conmutación adaptativa en el equilibrio entre trazabilidad distribuida y eficiencia operativa del sistema.

A partir del objetivo general planteado, se formula la siguiente pregunta de investigación: **¿Puede una arquitectura híbrida adaptativa optimizar de manera simultánea el rendimiento, la resiliencia y la eficiencia energética frente a modelos centralizados y descentralizados en condiciones de carga variable?**

De esta formulación central del estudio se desglosan las siguientes preguntas

específicas:

- a. ¿Existen diferencias en la latencia entre las arquitecturas evaluadas bajo distintos niveles de concurrencia?
- b. ¿Cómo varía la eficiencia energética computacional (EPR) según el modelo arquitectónico y el volumen de solicitudes procesadas?
- c. ¿Qué impacto tiene la lógica adaptativa en el uso de CPU en comparación con esquemas no adaptativos?

2. Materiales y Métodos

La investigación sobre la gestión de identidades digitales mediante arquitecturas centralizadas, descentralizadas e híbridas adaptativas se desarrolló como un estudio de tipo aplicada con enfoque cuantitativo, al analizar variables susceptibles de medición relacionadas con el rendimiento, la resiliencia y la eficiencia energética en condiciones controladas y reproducibles, lo que permitió evaluar el comportamiento de los modelos arquitectónicos en escenarios operativos representativos, en correspondencia con los criterios metodológicos expuestos por Katikaridis et al. (2025) y Bulgakov et al. (2024).

El estudio asumió un diseño descriptivo y comparativo con corte transversal, ya que se caracterizaron métricas clave bajo distintos niveles de carga y criticidad operacional, permitiendo contrastar el desempeño de las arquitecturas evaluadas en un entorno de ejecución estandarizado, tal como recomiendan León Torres et al. (2025) para estudios comparativos en sistemas distribuidos, y atendiendo a la necesidad de reproducibilidad y control experimental señalada por Le et al. (2025) en investigaciones sobre infraestructuras digitales.

Desde una perspectiva operativa, la adaptatividad del modelo híbrido puede entenderse como la capacidad del sistema para alternar entre procesamiento centralizado y descentralizado en función del nivel de carga concurrente y del grado de criticidad de las transacciones, de manera que la arquitectura activada en cada momento responda a condiciones técnicas previamente definidas y no a decisiones arbitrarias, tal como señalan

Katkaridis et al. (2025) al analizar esquemas comparativos en entornos distribuidos.

En este sentido, bajo condiciones de baja demanda se emplea el procesamiento centralizado para asegurar mayor eficiencia y estabilidad, mientras que ante incrementos de carga o transacciones de mayor criticidad se activa el componente Blockchain para fortalecer la trazabilidad y la integridad de la información, en línea con lo señalado por Islam & Apu (2024), evaluándose la adaptatividad mediante su incidencia en la latencia, el EPR y el uso de CPU en los escenarios experimentales analizados.

Para el desarrollo metodológico se emplearon métodos científicos a nivel teórico y empírico, utilizando el análisis y la síntesis para el tratamiento crítico de la información especializada relacionada con identidades digitales y arquitecturas de software, apoyándose en la revisión bibliográfica y documental que permitió definir variables y escenarios experimentales, mientras que la experimentación controlada se estructuró conforme al enfoque de Urblik et al. (2023) sobre sistemas híbridos adaptativos y a los criterios de evaluación de entornos distribuidos planteados (Goel & Rahulamathavan, 2025).

Siguiendo los de análisis de desempeño descritos por Guaña-Moya & Chipuxi-Fajardo (2023), la muestra estuvo conformada por 500 identidades digitales reales provenientes de una plataforma institucional, las cuales fueron sometidas a procesos de anonimización y seudonimización antes de su uso experimental, permitiendo preservar la utilidad técnica de los datos y mitigar riesgos asociados a la información personal, y dichas identidades se procesaron bajo distintos niveles de carga concurrente para observar el comportamiento de las arquitecturas.

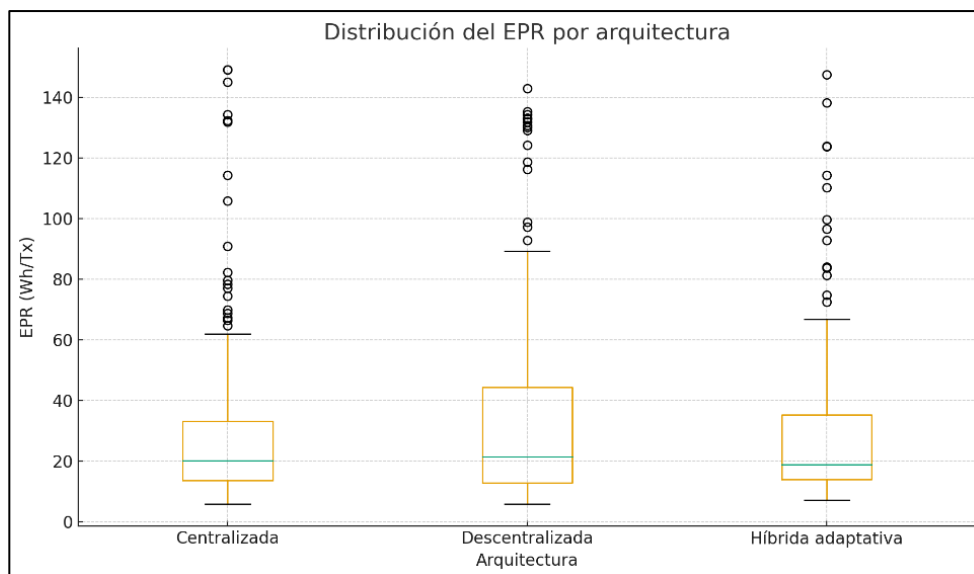
El procesamiento de la información se realizó mediante flujos de trabajo en Python orientados a la limpieza, organización y análisis de los datos, posteriormente se aplicaron técnicas estadísticas no paramétricas junto con métricas de eficiencia energética integradas a indicadores de rendimiento y resiliencia, lo que permitió valorar de manera integral la pertinencia del modelo híbrido adaptativo y garantizar la consistencia, fiabilidad y validez de los resultados obtenidos.

3. Resultados

A partir de las quinientas ejecuciones analizadas se determinó que la latencia media presenta una estabilidad notable entre las tres arquitecturas evaluadas de modo que el cambio de diseño no altera drásticamente el tiempo de respuesta bajo condiciones controladas mientras que el uso de CPU aumenta en los esquemas distribuidos debido a la carga de validación criptográfica lo cual resalta la importancia de la eficiencia energética para medir el coste real de cada operación.

La comparación de la eficiencia energética mediante la métrica EPR permite identificar variaciones significativas en el desempeño operativo de cada modelo según su diseño lógico de modo que se establecen diferencias claras entre el consumo por transacción de los sistemas tradicionales frente a los basados en cadena de bloques tal como se representa en la distribución de valores representados en el siguiente diagrama de cajas y bigotes.

3.1.1. Figura 1. Distribución de la Eficiencia Energética Computacional (EPR, Wh/TX) por arquitectura.

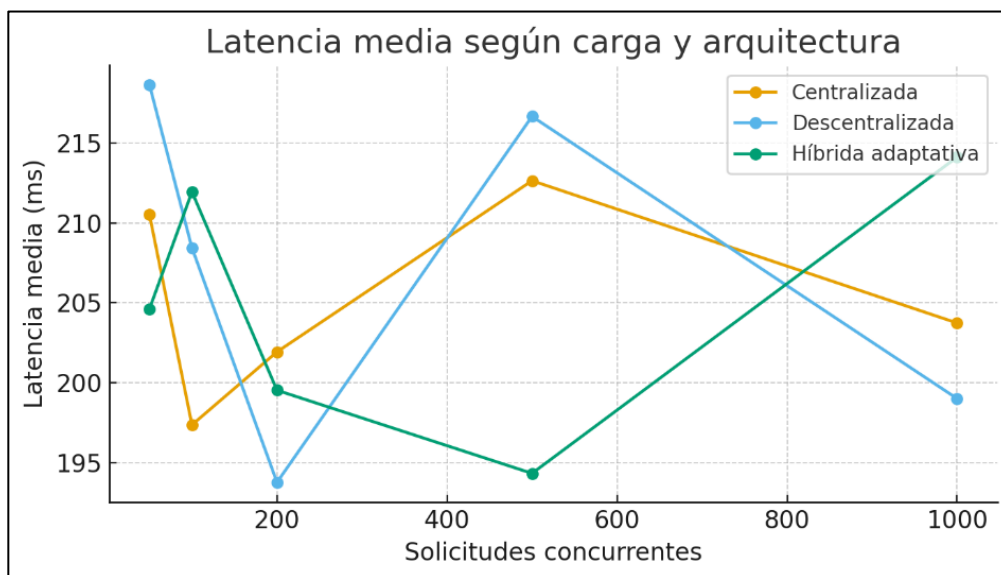


Fuentes: Los Autores (2025).

El comportamiento observado en la arquitectura descentralizada revela que la dispersión de valores elevados y la presencia de valores atípicos penalizan la eficiencia energética global de las transacciones procesadas de manera que se confirma que la inmutabilidad propia del Blockchain puro exige un quince por ciento más de energía mientras que el modelo híbrido logra emular el perfil de bajo consumo del esquema centralizado sin sacrificar las capacidades de trazabilidad distribuida.

Respecto al desempeño frente al aumento de la demanda se identificaron patrones de respuesta variables donde ninguna configuración mantiene una superioridad absoluta durante todo el espectro de carga evaluado de modo que la agilidad del sistema fluctúa según el volumen de solicitudes concurrentes lo cual se evidencia en la evolución de las trayectorias de tiempo de respuesta que se presentan en la siguiente comparativa de rendimiento técnico.

3.1.2. Figura 2. Latencia media en función de la carga concurrente para las arquitecturas centralizada, descentralizada e híbrida adaptativa



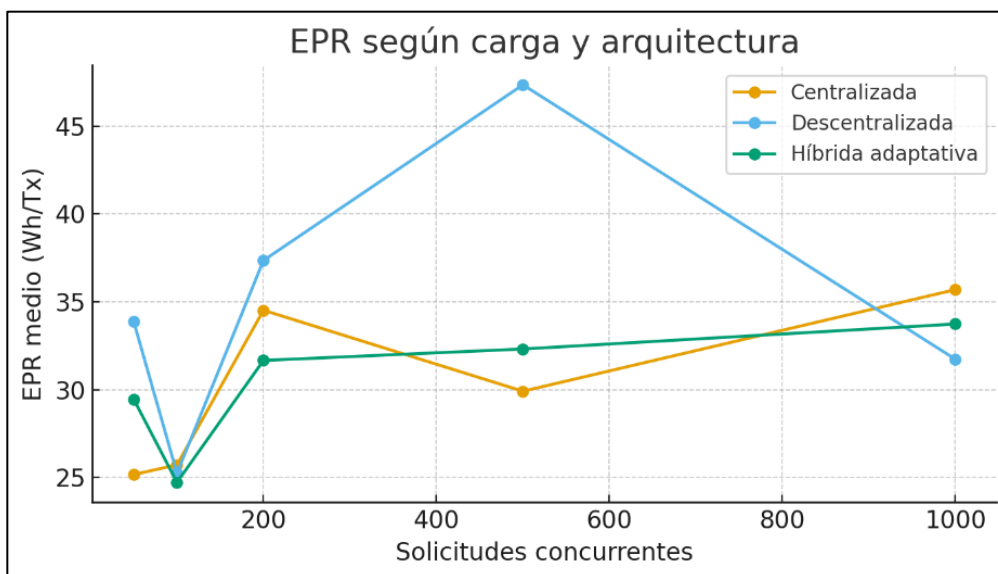
Fuentes: Los Autores (2025).

La convergencia de las latencias en niveles de carga intermedia sugiere que el

sistema alcanza un punto de equilibrio operativo óptimo antes de que las diferencias arquitectónicas vuelvan a manifestarse con mayor intensidad por consiguiente el análisis demuestra que la arquitectura híbrida adaptativa logra reducir los tiempos de espera en escenarios de baja demanda y recupera su liderazgo en cargas extremas posicionándose como una alternativa más flexible que los modelos rígidos tradicionales.

En cuanto a la eficiencia energética integrada se identificó que la curva de consumo para el esquema descentralizado describe un ascenso marcado al superar las doscientas solicitudes alcanzando picos críticos de gasto energético que no se reflejan en las otras dos alternativas evaluadas de modo que el impacto ambiental y operativo de la red crece de forma asimétrica respecto al volumen de datos procesados tal como se ilustra en la siguiente variación de la métrica por nivel de carga.

3.1.3. Figura 3. Variación del EPR medio en función de la carga concurrente para las arquitecturas centralizada, descentralizada e híbrida adaptativa.



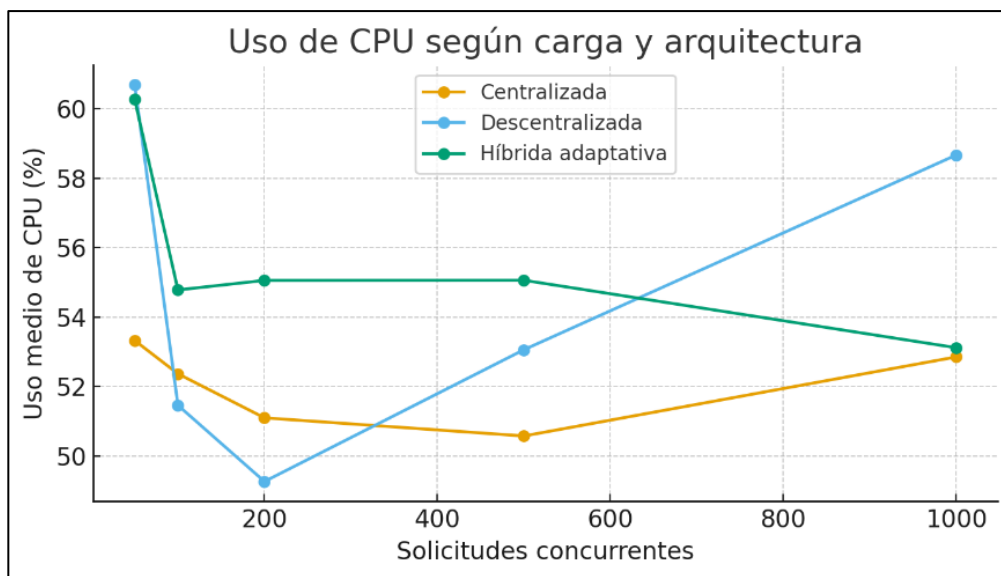
Fuentes: Los Autores (2025).

Este incremento en el consumo energético del modelo puramente distribuido ratifica que el mantenimiento de la integridad de los datos mediante consenso constante introduce una penalización estructural que el modelo híbrido logra atenuar significativamente de manera que la lógica adaptativa permite capturar los beneficios de seguridad de la cadena

de bloques manteniendo un coste por transacción muy similar al de las bases de datos clásicas incluso bajo condiciones de alta demanda.

Sobre el uso de recursos de procesamiento se verificó que tanto el diseño descentralizado como el adaptativo demandan una carga de CPU sistemáticamente superior debido a la ejecución de contratos inteligentes y procesos de coordinación distribuida lo cual establece una diferencia de base respecto a la ligereza operativa de la solución centralizada tal como se aprecia en el agrupamiento de las siguientes trayectorias de uso de procesador analizadas.

3.1.4. Figura 4. Uso medio de CPU en función de la carga concurrente para las arquitecturas centralizada, descentralizada e híbrida adaptativa.



Fuentes: Los Autores (2025).

La asimetría en el esfuerzo de procesamiento revela que la arquitectura centralizada es la opción más liviana para la estabilidad del sistema mientras que el modelo descentralizado concentra la mayor demanda en los tramos de carga más elevados por lo tanto se concluye que el enfoque híbrido redistribuye el esfuerzo computacional de forma eficiente permitiendo una gestión de identidad digital robusta que evita la saturación crítica de los recursos informáticos disponibles.

Con el objetivo de permitir que otros investigadores repliquen estos experimentos y verifiquen los datos obtenidos se ha puesto a disposición pública el código fuente del modelo mediante un repositorio especializado el cual contiene todos los scripts y configuraciones utilizadas durante las pruebas.

3.1.5. Figura 5. Acceso al repositorio de código fuente del modelo híbrido adaptativo.



Fuentes: Los Autores(2025).

4. Discusión

Los hallazgos demuestran que la arquitectura híbrida logra una paridad en latencia con el modelo centralizado lo que valida la premisa de Urblik et al. (2023), sobre la eficacia de sistemas que ajustan su lógica según el contexto operativo de modo que la conmutación inteligente permite integrar la trazabilidad de la cadena de bloques sin introducir las demoras estructurales típicas de los esquemas puramente distribuidos por consiguiente se establece el principio de que la agilidad del usuario no debe ser sacrificada para obtener garantías de seguridad en la gestión de identidad digital contemporánea.

La penalización del quince por ciento en el EPR del modelo descentralizado reafirma la contradicción estructural entre la integridad absoluta de los datos y la sostenibilidad energética que ha sido ampliamente discutida por autores previos en el ámbito de las tecnologías distribuidas sin embargo la convergencia observada bajo cargas extremas sugiere una generalización importante donde el enfoque Blockchain mejora su relación de eficiencia a medida que aumenta la demanda masiva de modo que estos resultados sugieren que la especialización arquitectónica es fundamental para evitar el

consumo innecesario en operaciones rutinarias.

La convergencia del esquema híbrido con los niveles de consumo centralizado respalda la tesis de Urblik et al. (2023), acerca de la implementación de estratos lógicos intermedios para robustecer la confiabilidad sistémica sin incrementar los costos de infraestructura física valida la tesis sobre la eficiencia de las arquitecturas modulares frente a los modelos monolíticos tradicionales de modo que se habilitan nuevas líneas de investigación enfocadas en algoritmos de decisión heurística basados en el análisis de riesgo y la criticidad intrínseca de cada transacción por lo cual el diseño adaptativo se consolida como un estándar de compromiso técnico que resuelve la dicotomía entre seguridad y eficiencia operativa permitiendo profundizar en la escalabilidad de ecosistemas de identidad soberana altamente resilientes.

5. Conclusiones

La evaluación experimental permitió constatar que la arquitectura híbrida adaptativa logra equilibrar rendimiento, resiliencia y eficiencia energética en comparación con los modelos centralizado y descentralizado evaluados. En escenarios de carga variable, el modelo propuesto mantuvo niveles de latencia competitivos y un consumo energético inferior al esquema descentralizado puro, conservando al mismo tiempo capacidades de trazabilidad cuando fueron requeridas.

Se identificó que la arquitectura descentralizada presenta mayores valores de consumo energético y uso de CPU en la mayoría de los escenarios analizados, mientras que el modelo centralizado ofrece mejores tiempos de respuesta bajo condiciones de baja demanda. En este contexto, la incorporación de un mecanismo de conmutación adaptativa permitió aprovechar las ventajas de ambos enfoques sin reproducir de forma permanente sus limitaciones estructurales.

Los hallazgos obtenidos aportan evidencia empírica sobre la viabilidad de modelos arquitectónicos híbridos en la gestión de identidades digitales, particularmente en entornos con variabilidad operativa. Estos resultados pueden servir como referencia para futuros

desarrollos orientados a optimizar el equilibrio entre eficiencia computacional y garantías de integridad distribuida.

6. Referencias bibliográficas

- Appenzeller, A., Leitner, M., Philipp, P., Krempel, E., & Beyerer, J. (2022). Privacy and Utility of Private Synthetic Data for Medical Data Analyses. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(23), 1–19. <https://doi.org/10.3390/app122312320>
- Bulgakov, A. L., Aleshina, A. V., Smirnov, S. D., Demidov, A. D., Milyutin, M. A., & Xin, Y. (2024). Scalability and Security in Blockchain Networks: Evaluation of Sharding Algorithms and Prospects for Decentralized Data Storage. *Matematics*, 12(23), 1–24. <https://doi.org/10.3390/math12233860>
- Chen, X., Li, S., & Li, M. (2025). A hybrid centralized-decentralized traffic control framework for unmanned aerial vehicles in urban low-altitude airspace. *Communications in Transportation Research*, 5(January), 100195. <https://doi.org/10.1016/j.commtr.2025.100195>
- Goel, A., & Rahulamathavan, Y. (2025). A Comparative Survey of Centralised and Decentralised Identity Management Systems: Analysing Scalability, Security, and Feasibility. *Future Internet*, 17(1), 1–29. <https://doi.org/10.3390/fi17010001>
- Islam, S., Apu, K. U. (2024). Decentralized Vs. Centralized Database Solutions in Blockchain: Advantages, Challenges, and Use Cases. *Global Mainstream Journal of Innovation, Engineering & Emerging Technology*, 3(4), 58–68. <https://doi.org/10.62304/jieet.v3i04.195>
- Katkaridis, D., Benos, L., Busato, P., Kateris, D., Papageorgiou, E., Karras, G., & Bochtis, D. (2025). Experimental Comparative Analysis of Centralized vs . Decentralized Coordination of Aerial – Ground Robotic Teams for Agricultural Operations. *Robotics*, 14(9), 1–24. <https://doi.org/10.3390/robotics14090119>
- Le, H. V. A., Nguyen, Q. D. N., Tadashi, N., & Tran, T. H. (2025). Blockchain-Based Decentralized Identity Management System with AI and Merkle Trees. *Computers*, 14(7), 1–17. <https://doi.org/10.3390/computers14070289>
- León Torres, L. M., Jarrín Rivadeneira, E. P., Muñoz González, S. P., Suarez Galarza, M.

- B., & León Torres, M. G. (2025). Metodologías Ágiles en la Gestión de Proyectos de Infraestructura: Retos y Oportunidades. In Revista Veritas de Difusão Científica (Vol. 5, Issue 3). <https://doi.org/10.61616/rvdc.v5i3.314>
- Schmidt, A. A. (2025). A Comparative Study of Centralized vs . Decentralized AI Architectures in Smart Supply Chain Management. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5257269>
- UI, B., Khan, I., Malaya, U., Lumpur, K., Padang, U. N., Barat, S., Goh, K. W., Technology, I., Zuhairi, M. F., Lumpur, U. K., Putra, R. R., Teknik, F., Padang, U. N., Barat, S., Khan, A. R., Arabia, S., Chaimanee, M., & Thani, P. (2024). A Scalability Enhancement Scheme for Ethereum Blockchains : A Graph-based Decentralized Approach. Eng. Technol. Appl. Sci. Res, 14(6), 17725–17736. <https://doi.org/10.48084/etasr.8465>
- Urblik, L., Kajati, E., & Papcun, P. (2023). A Modular Framework for Data Processing at the Edge : Design and Implementation. Sensors, 23(17), 7662. <https://doi.org/10.3390/s23177662>