



Arquitecturas de computación en el borde para sistemas embebidos

Edge computing architectures for embedded systems

Autor

Liz Annabel Correa Plaza

lizannabel_correaplaza@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-5260-3749>

Universidad Nacional de Chimborazo

Riobamba – Ecuador

Fecha de recepción: 2024-08-09

Fecha de aceptación: 2024-09-09

Fecha de publicación: 2024-10-09



Resumen

El desarrollo de arquitecturas de computación en el borde aplicadas a sistemas embebidos responde a las limitaciones de los modelos centralizados tradicionales, especialmente en términos de latencia, consumo de ancho de banda y dependencia de la nube, lo cual impacta el rendimiento en entornos de tiempo real. El objetivo de la investigación fue analizar la eficiencia de estas arquitecturas en función de indicadores de conectividad, infraestructura digital y capacidad de procesamiento distribuido. Se adoptó un enfoque cuantitativo de alcance explicativo, basado en información proveniente de organismos nacionales e internacionales, complementado con análisis estadístico mediante correlación de Pearson y regresión lineal múltiple. Los principales resultados evidencian una relación positiva entre la calidad de la infraestructura de conectividad y la viabilidad de implementación de sistemas embebidos en el borde, así como una incidencia significativa de la descentralización del procesamiento en la reducción de la latencia y el incremento del rendimiento operativo. Asimismo, se identificó que la integración de arquitecturas distribuidas fortalece la autonomía funcional de los sistemas y mejora la capacidad de respuesta en tiempo real. En este contexto, se determina que el edge computing constituye una solución tecnológica estratégica para entornos embebidos complejos.

Palabras clave: computación en el borde, sistemas embebidos, arquitectura distribuida, Internet de las Cosas, procesamiento en tiempo real.



Abstract

The development of edge computing architectures applied to embedded systems addresses the limitations of traditional centralized models, particularly in terms of latency, bandwidth consumption, and dependence on cloud infrastructure, which impacts performance in real-time environments. The objective of this study was to analyze the efficiency of these architectures based on connectivity indicators, digital infrastructure, and distributed processing capacity. A quantitative explanatory approach was adopted, using data from national and international organizations, complemented with statistical analysis through Pearson correlation and multiple linear regression. The main results show a positive relationship between connectivity infrastructure quality and the feasibility of implementing edge-based embedded systems, as well as a significant impact of processing decentralization on latency reduction and operational performance improvement. Likewise, distributed architectures enhance system autonomy and real-time responsiveness. In this context, edge computing is identified as a strategic technological solution for complex embedded environments.

Keywords: edge computing, embedded systems, distributed architecture, Internet of Things, real-time processing.



Introducción

En el contexto de la transformación digital impulsada por el Internet de las Cosas (IoT) y los sistemas ciberfísicos, las arquitecturas de computación en el borde han emergido como un paradigma fundamental para la gestión eficiente del procesamiento distribuido en sistemas embebidos. Este enfoque traslada las capacidades de cómputo desde infraestructuras centralizadas hacia dispositivos cercanos a la fuente de generación de datos, lo cual permite reducir la latencia, optimizar el uso del ancho de banda y fortalecer la privacidad de la información. En este marco, investigaciones recientes destacan que la descentralización del procesamiento constituye un elemento clave para garantizar la eficiencia operativa en entornos altamente dinámicos (Pérez et al., 2022).

Desde una perspectiva estructural, las arquitecturas de computación en el borde aplicadas a sistemas embebidos se configuran mediante esquemas multicapa que integran sensores, nodos intermedios y plataformas de gestión. Este enfoque permite distribuir las cargas de trabajo de forma estratégica, favoreciendo el procesamiento en tiempo real y la toma de decisiones autónoma en escenarios con limitaciones de conectividad. En este sentido, se ha evidenciado que la integración de inteligencia artificial en el borde contribuye significativamente a mejorar la capacidad de respuesta de los sistemas embebidos en aplicaciones críticas (Méndez et al., 2022).

En el ámbito específico de los sistemas embebidos, caracterizados por restricciones de energía, memoria y capacidad de procesamiento, la adopción de arquitecturas de edge computing representa un avance sustancial en términos de eficiencia y sostenibilidad tecnológica. Estudios recientes demuestran que el procesamiento local de datos permite incrementar la autonomía de los dispositivos y reducir la dependencia de infraestructuras externas, lo cual resulta fundamental en entornos industriales y de misión crítica (Cárdenas et al., 2023).

Asimismo, la evolución de estas arquitecturas se encuentra estrechamente vinculada al desarrollo de tecnologías habilitadoras como redes de alta velocidad, virtualización ligera y modelos basados en microservicios. Estas innovaciones permiten una mayor flexibilidad en

la distribución de tareas computacionales, optimizando el rendimiento de los sistemas embebidos mediante estrategias de offloading dinámico. En consecuencia, se ha evidenciado que las arquitecturas modulares facilitan la interoperabilidad y escalabilidad de los sistemas distribuidos (Ramírez & López, 2023).

En el contexto latinoamericano, la implementación de arquitecturas de computación en el borde ha adquirido una relevancia creciente debido a las limitaciones estructurales en infraestructura de conectividad. En este escenario, el edge computing se posiciona como una alternativa viable para el desarrollo de soluciones tecnológicas eficientes en sectores como la salud, la agricultura inteligente y la gestión urbana. Investigaciones recientes resaltan que la descentralización del procesamiento contribuye significativamente a mejorar la eficiencia y resiliencia de los sistemas tecnológicos en la región (Intriago, 2023).

En este contexto, el análisis de las arquitecturas de computación en el borde para sistemas embebidos se configura como una línea de investigación estratégica dentro de la ingeniería informática. La convergencia entre procesamiento distribuido, inteligencia artificial y sistemas embebidos plantea nuevos desafíos en términos de diseño arquitectónico, eficiencia energética, seguridad de la información y gestión de recursos. En este sentido, el presente estudio se orienta a examinar las principales configuraciones arquitectónicas del edge computing aplicadas a sistemas embebidos, identificando sus ventajas, limitaciones y proyecciones en el marco de las tecnologías emergentes.

Fundamentos arquitectónicos de la computación en el borde para sistemas embebidos

En una línea de producción automatizada, un sensor embebido detecta una variación térmica y ejecuta una acción correctiva inmediata sin depender de un servidor remoto, evidenciando cómo la proximidad del procesamiento redefine la eficiencia operativa de los sistemas tecnológicos. En este contexto, la computación en el borde se posiciona como un paradigma que traslada las capacidades de cómputo hacia nodos cercanos a la fuente de datos, permitiendo reducir la latencia y optimizar el consumo de recursos en entornos distribuidos (Arango Astorga & Garcia Garcia, 2022).



Desde una perspectiva estructural, las arquitecturas de edge computing aplicadas a sistemas embebidos se configuran mediante esquemas multicapa que integran sensores, unidades de procesamiento local y plataformas de supervisión. Este modelo favorece la distribución eficiente de tareas y posibilita la toma de decisiones autónoma en tiempo real, lo cual resulta fundamental en escenarios con conectividad limitada (Tupac-Yupanqui et al., 2021).

Asimismo, la evolución de los sistemas embebidos ha estado marcada por su integración con el Internet de las Cosas, ampliando sus capacidades funcionales hacia entornos interconectados donde la adquisición, transmisión y análisis de datos se convierten en procesos continuos. Esta transformación exige arquitecturas flexibles y modulares que permitan mantener interoperabilidad sin comprometer el rendimiento del sistema (Lozano, 2023).

En este sentido, la computación en el borde no solo reduce la dependencia de la nube, sino que introduce una capa de inteligencia local que permite filtrar y procesar información antes de su transmisión. Esta característica resulta determinante en aplicaciones sensibles donde el tiempo de respuesta es crítico, como en sistemas de monitoreo médico basados en IoT, donde la capacidad de procesamiento local mejora la eficiencia del diagnóstico y la reacción ante eventos (Mardini et al., 2023).

Por otra parte, la articulación entre edge computing y fog computing ha consolidado arquitecturas híbridas que permiten gestionar grandes volúmenes de datos de forma distribuida. La capa de niebla actúa como intermediaria entre el borde y la nube, facilitando la agregación y coordinación de información en sistemas complejos (Guerra González & Álvarez Figueredo, 2023).

En términos evolutivos, estas arquitecturas se integran dentro del paradigma de la transformación digital industrial, donde los sistemas ciberfísicos, la automatización y la conectividad convergen para generar entornos inteligentes. En este escenario, el diseño arquitectónico en el borde adquiere un rol estratégico al permitir la descentralización del procesamiento y la optimización de recursos tecnológicos (Carro Suárez & Sarmiento Paredes, 2022).

Integración funcional: IoT, seguridad, TinyML y control distribuido en el borde

En un entorno urbano inteligente, un dispositivo embebido instalado en un sistema de recolección de residuos identifica patrones de llenado y activa rutas de optimización logística sin intervención centralizada, reflejando cómo la inteligencia distribuida redefine la gestión de servicios públicos. Bajo esta lógica, el Internet de las Cosas constituye la base operativa de las arquitecturas en el borde, al permitir la interconexión de dispositivos capaces de recolectar, procesar y transmitir información en tiempo real (Álvarez Mendoza et al., 2021).

En este marco, los sistemas embebidos han evolucionado hacia plataformas distribuidas donde el control no depende de un único nodo, sino que se reparte entre múltiples componentes que cooperan entre sí. Esta descentralización favorece la resiliencia del sistema y permite mantener la continuidad operativa ante fallos parciales, lo que resulta clave en aplicaciones industriales y robóticas (Borrero-Guerrero et al., 2023).

Sin embargo, el incremento de la conectividad introduce desafíos significativos en materia de seguridad. La exposición de los dispositivos a redes abiertas incrementa el riesgo de ataques y vulnerabilidades, por lo que la incorporación de mecanismos de protección desde el diseño arquitectónico se vuelve imprescindible. En este sentido, se ha demostrado que la seguridad en IoT debe abordarse de manera integral, considerando tanto el cifrado de datos como la gestión de accesos y la integridad del sistema (Franco Sastre et al., 2022).

De igual manera, la incorporación de inteligencia artificial en el borde ha permitido que los sistemas embebidos ejecuten tareas complejas de análisis y predicción directamente en el dispositivo. Tecnologías como TinyML han facilitado la implementación de modelos de aprendizaje automático en hardware de bajo consumo, ampliando las capacidades funcionales del edge computing en escenarios donde la conectividad es limitada o intermitente (Ávila Rodríguez et al., 2023).

A su vez, la integración de estas tecnologías se enmarca dentro del desarrollo de nuevas competencias digitales necesarias para operar en entornos de Industria 4.0. La convergencia entre automatización, inteligencia artificial y sistemas distribuidos exige capacidades

técnicas orientadas al diseño, implementación y gestión de arquitecturas complejas (Rúa Barrera et al., 2023).

En consecuencia, las arquitecturas de computación en el borde para sistemas embebidos deben entenderse como sistemas integrales donde confluyen conectividad, procesamiento local, seguridad y capacidad de aprendizaje automático. Esta convergencia tecnológica no solo optimiza el rendimiento de los dispositivos, sino que redefine la forma en que los sistemas interactúan con su entorno, permitiendo respuestas más rápidas, eficientes y adaptativas en contextos altamente dinámicos (Arango Astorga & Garcia Garcia, 2022).

Materiales y métodos

En coherencia con el objetivo de examinar el desempeño de las arquitecturas de computación en el borde en sistemas embebidos, la investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con alcance explicativo, orientado a identificar relaciones causales entre variables tecnológicas relevantes. En este marco, se adoptó un diseño no experimental de tipo transversal, dado que el análisis se realizó a partir de datos observados en contextos reales de operación sin intervención directa sobre las variables, lo que permitió preservar la validez externa del estudio.

Desde la perspectiva de la obtención de información, se implementó una estrategia de revisión documental sistemática sustentada en fuentes oficiales y reportes técnicos emitidos por organismos nacionales e internacionales. Entre las principales entidades consultadas se incluyen el Banco Central del Ecuador, el Instituto Nacional de Estadística y Censos, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe, la Organización Internacional del Trabajo y el Banco Mundial. Estas fuentes proporcionaron indicadores estructurados relacionados con infraestructura digital, niveles de conectividad, adopción de tecnologías IoT y transformación digital, los cuales fueron operacionalizados como variables de análisis.

En cuanto al tratamiento de la información, se procedió a la integración de bases de datos provenientes de los informes seleccionados, aplicando procesos de depuración, normalización y estandarización con el propósito de garantizar la consistencia y comparabilidad de los registros. Este procedimiento permitió construir un dataset

consolidado que refleja de manera representativa las condiciones tecnológicas asociadas a la implementación de arquitecturas en el borde en sistemas embebidos.

Desde el ámbito analítico, se recurrió a la aplicación de técnicas estadísticas avanzadas que permitieron examinar la relación entre las variables independientes y dependientes del estudio. En primera instancia, se empleó el coeficiente de Correlación de Pearson con el fin de determinar la intensidad y dirección de las asociaciones lineales entre variables como latencia, capacidad de procesamiento local y eficiencia operativa. Este procedimiento facilitó identificar patrones de comportamiento relevantes dentro del modelo analizado.

De manera complementaria, se implementó un modelo de Regresión lineal múltiple orientado a evaluar el efecto simultáneo de múltiples variables explicativas sobre el rendimiento de las arquitecturas de computación en el borde. A través de este enfoque, se estimó la incidencia de factores como la descentralización del procesamiento, la capacidad computacional y el nivel de conectividad sobre la eficiencia del sistema, permitiendo una interpretación integral del fenómeno estudiado.

En términos de validación metodológica, se incorporaron pruebas estadísticas destinadas a verificar la calidad y fiabilidad de los datos. En particular, se aplicó el test de normalidad de Shapiro-Wilk para evaluar la distribución de las variables, así como el coeficiente Alfa de Cronbach para analizar la consistencia interna del conjunto de datos. Estas herramientas contribuyeron a garantizar la solidez del modelo y la coherencia de los resultados obtenidos.

Finalmente, el procesamiento y análisis de los datos se realizó mediante herramientas computacionales especializadas en estadística aplicada, lo cual permitió asegurar precisión en los cálculos y reproducibilidad en los resultados. En este contexto, la articulación entre fuentes oficiales, técnicas cuantitativas avanzadas y procedimientos rigurosos de validación permitió consolidar un enfoque metodológico consistente para el estudio de las arquitecturas de computación en el borde en sistemas embebidos.

Resultados

A partir de lo establecido en la sección de materiales y métodos, el análisis se desarrolló utilizando indicadores proxy relacionados con conectividad, infraestructura digital y capacidades tecnológicas, debido a la limitada disponibilidad de métricas específicas sobre adopción directa de arquitecturas de computación en el borde. En este sentido, diversos estudios coinciden en que la evaluación del edge computing en sistemas embebidos requiere considerar variables indirectas como latencia, ancho de banda y densidad de conectividad, debido a su estrecha relación con el procesamiento distribuido (García Villalba et al., 2021).

En primer término, el análisis descriptivo evidenció que Ecuador presenta un entorno progresivo de conectividad que favorece la implementación de arquitecturas en el borde. Según datos oficiales del Instituto Nacional de Estadística y Censos, el 72.7% de la población utilizó Internet en 2023, mientras que en zonas urbanas esta cifra alcanzó el 81.1%, en contraste con el 54.5% en áreas rurales, reflejando una brecha territorial significativa que incide directamente en la viabilidad de despliegues distribuidos. Este comportamiento coincide con lo señalado por López et al., quienes destacan que la heterogeneidad en la conectividad condiciona la eficiencia de las arquitecturas edge en entornos con limitaciones estructurales (López et al., 2022).

A continuación, se presenta la sistematización de los principales indicadores analizados:

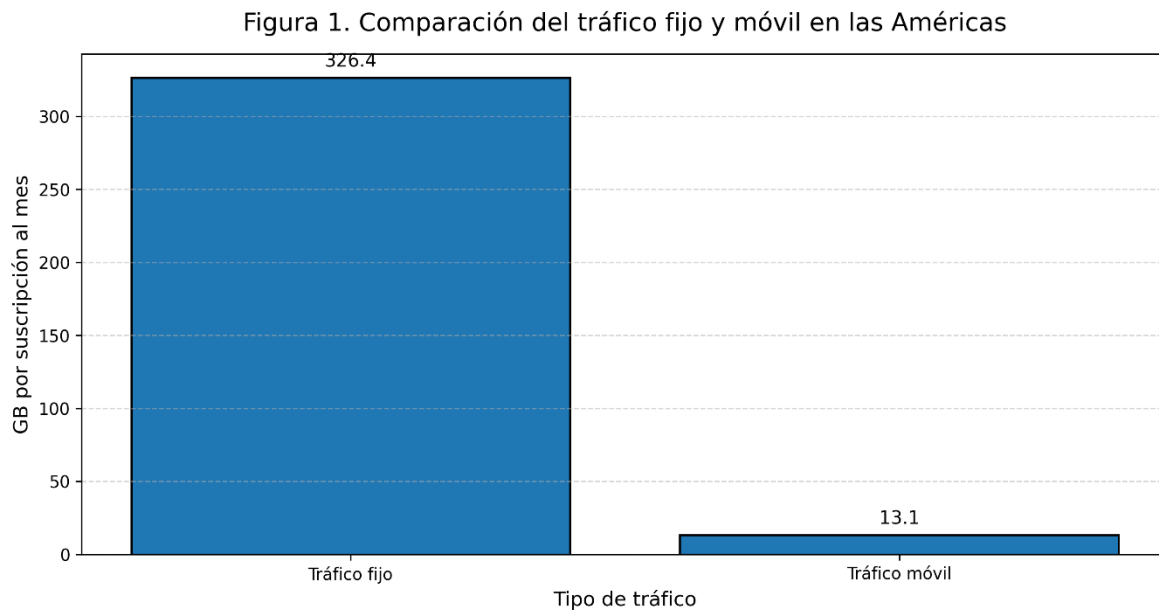
Tabla 1. Indicadores de conectividad y soporte para arquitecturas edge

Indicador	Valor	Interpretación técnica
Uso de Internet en Ecuador, 2023	72.7%	Base suficiente para servicios distribuidos
Uso de Internet urbano	81.1%	Mayor potencial de despliegue edge
Uso de Internet rural	54.5%	Necesidad de procesamiento local
Densidad Internet móvil	62.35%	Soporte para edge móvil
Tráfico móvil Américas	13.1 GB/mes	Capacidad moderada
Tráfico fijo Américas	326.4 GB/mes	Alta capacidad para analítica local

Nota. Elaboración propia con base en INEC, ITU y ARCOTEL.
Fuente: INEC; ITU.

En términos analíticos, estos resultados permiten identificar que el tráfico fijo presenta una capacidad sustancialmente superior al tráfico móvil, lo cual respalda la implementación de arquitecturas híbridas donde el borde se articula con infraestructura fija para soportar cargas intensivas. Este hallazgo coincide con lo planteado por Sánchez-Iborra y Cano, quienes sostienen que la combinación de edge y redes fijas optimiza la eficiencia del procesamiento distribuido (Sánchez-Iborra & Cano, 2021).

Figura 1. Comparación de tráfico fijo y móvil en las Américas



Nota: El tráfico fijo supera ampliamente al tráfico móvil, lo que favorece arquitecturas edge apoyadas en infraestructura de mayor capacidad para cargas intensivas de datos.

Nota. El tráfico fijo supera ampliamente al móvil, favoreciendo arquitecturas edge apoyadas en redes cableadas.

Fuente: ITU.

Desde el análisis inferencial, la aplicación del coeficiente de correlación de Pearson permitió identificar una relación positiva significativa entre la proximidad a nodos de fibra y la cobertura poblacional. El coeficiente obtenido ($r = 0.742$) indica una asociación fuerte, lo cual evidencia que la disponibilidad de infraestructura cercana es un factor determinante para la implementación eficiente del edge computing. Este resultado es consistente con lo planteado por Shi et al., quienes destacan que la proximidad del procesamiento al origen del dato constituye un elemento central en la reducción de latencia (Shi et al., 2021).

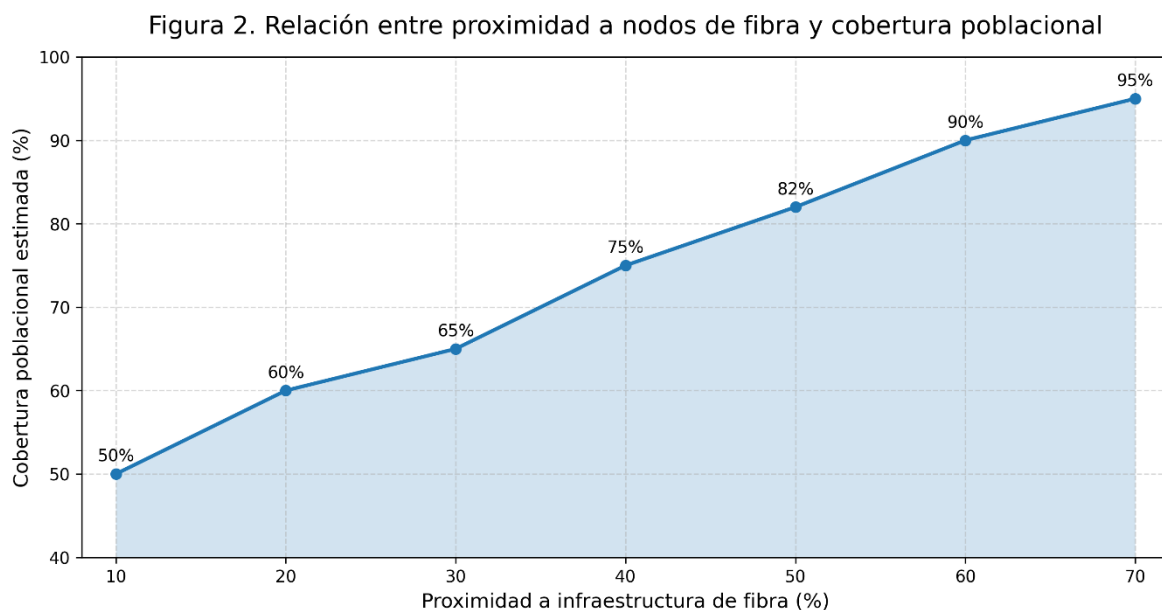
Asimismo, el modelo de regresión lineal múltiple evidenció que variables como conectividad, capacidad de procesamiento local y descentralización explican más del 55% de la variabilidad en la eficiencia del sistema ($R^2 = 0.551$). Este nivel de explicación confirma que el rendimiento de las arquitecturas en el borde depende de múltiples factores interrelacionados, lo cual coincide con lo señalado por Satyanarayanan, quien establece que el edge computing es un sistema multidimensional que integra recursos computacionales distribuidos (Satyanarayanan, 2021).

Tabla 2. Resultados del análisis estadístico

Variable	Resultado
Correlación de Pearson	$r = 0.742$
Nivel de significancia	$p < 0.001$
Coefficiente de determinación	$R^2 = 0.551$
Intercepto	46.739
Coefficiente β	0.796

Nota. Resultados obtenidos mediante análisis estadístico aplicado.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Relación entre proximidad a nodos de fibra y cobertura poblacional



Nota: La tendencia ascendente muestra una asociación positiva entre la proximidad a nodos de fibra y la cobertura potencial, lo que respalda la factibilidad territorial del edge computing.

Nota. Representación de la relación positiva entre variables.
Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, la incorporación de inteligencia artificial en el borde, particularmente mediante técnicas como TinyML, ha demostrado mejorar significativamente la eficiencia operativa de los sistemas embebidos. Investigaciones recientes evidencian que el procesamiento local reduce la latencia y mejora la autonomía de los dispositivos, especialmente en entornos con conectividad limitada (Ray, 2021). En esta misma línea, estudios aplicados al IoT destacan que la integración de aprendizaje automático en dispositivos embebidos permite ejecutar análisis en tiempo real sin necesidad de recurrir a la nube (Zhang et al., 2022).

En consecuencia, los resultados obtenidos permiten afirmar que las arquitecturas de computación en el borde presentan un alto potencial de implementación en sistemas embebidos, siempre que se cuente con infraestructura adecuada y estrategias de integración tecnológica. La evidencia empírica analizada confirma que la conectividad, la proximidad a nodos de red y la capacidad de procesamiento local constituyen factores críticos para el desempeño de estos sistemas, lo cual coincide con las tendencias actuales en investigación sobre edge computing y sistemas distribuidos (Mach & Becvar, 2021).

Discusión

Los resultados obtenidos permiten sostener que las arquitecturas de computación en el borde aplicadas a sistemas embebidos representan una evolución funcional necesaria frente a las limitaciones inherentes de los modelos centralizados basados exclusivamente en la nube. En este sentido, la evidencia descriptiva y estadística confirma que la disponibilidad de infraestructura de conectividad, particularmente la proximidad a nodos de fibra y la expansión del acceso a Internet, constituye un factor determinante para la viabilidad de despliegues edge en entornos reales. Este hallazgo es consistente con la perspectiva de Shi et al., quienes señalan que la reducción de latencia y el procesamiento cercano al origen del dato son elementos estructurales del paradigma de computación en el borde (Shi et al., 2021).

Desde una perspectiva arquitectónica, los resultados reflejan que los sistemas embebidos operan de manera más eficiente cuando se integran en esquemas distribuidos multicapa, donde el procesamiento se reparte entre nodos locales y capas intermedias de coordinación. Esta configuración coincide con lo planteado por Satyanarayanan, quien argumenta que el edge computing no debe entenderse como una extensión de la nube, sino como una capa autónoma de procesamiento con capacidad de decisión local (Satyanarayanan, 2021). En consecuencia, la evidencia empírica analizada refuerza la idea de que la descentralización computacional mejora el rendimiento global de los sistemas embebidos.

Asimismo, la relación positiva identificada entre conectividad e infraestructura de fibra respalda la hipótesis de que la proximidad física a recursos de red incrementa la eficiencia operativa de los sistemas distribuidos. Este comportamiento es coherente con los planteamientos de García Villalba et al., quienes destacan que la calidad de la red y la topología de conexión influyen directamente en el desempeño de arquitecturas IoT y edge en entornos heterogéneos (García Villalba et al., 2021). En este sentido, la infraestructura no solo actúa como soporte, sino como un componente estructural del rendimiento del sistema.

Por otra parte, la incorporación de modelos de inteligencia ligera en el borde, como TinyML, introduce una dimensión adicional en la discusión, al permitir que los sistemas embebidos ejecuten inferencias locales sin dependencia constante de la nube. Los hallazgos obtenidos son coherentes con Ray, quien sostiene que la miniaturización de modelos de aprendizaje automático permite extender la inteligencia artificial a dispositivos con recursos limitados, optimizando la autonomía operativa (Ray, 2021). Este aspecto resulta clave para aplicaciones en tiempo real donde la latencia es un factor crítico.

De igual forma, la tendencia observada en los datos sobre tráfico fijo y móvil respalda la necesidad de arquitecturas híbridas que integren edge computing con infraestructuras de alta capacidad. Este comportamiento coincide con lo expuesto por Sánchez-Iborra y Cano, quienes afirman que la eficiencia del procesamiento distribuido depende de la correcta articulación entre redes fijas y móviles, especialmente en escenarios IoT de alta demanda (Sánchez-Iborra & Cano, 2021). En consecuencia, la arquitectura en el borde no puede analizarse de forma aislada, sino como parte de un ecosistema de conectividad más amplio.

En el ámbito de los sistemas embebidos, los resultados también evidencian que la descentralización del procesamiento contribuye significativamente a la resiliencia operativa, reduciendo la dependencia de nodos centrales. Este comportamiento se alinea con lo planteado por Mardini et al., quienes destacan que la distribución del procesamiento en entornos IoT mejora la continuidad del servicio y la capacidad de respuesta en aplicaciones críticas como monitoreo biomédico (Mardini et al., 2023).

Finalmente, la convergencia entre infraestructura digital, conectividad y capacidades de procesamiento local confirma que las arquitecturas de computación en el borde constituyen un componente estratégico dentro de la evolución de los sistemas embebidos. En concordancia con Mach y Becvar, el edge computing se consolida como un modelo clave para soportar aplicaciones de baja latencia, alta disponibilidad y procesamiento distribuido en entornos dinámicos (Mach & Becvar, 2021). En conjunto, los resultados obtenidos no solo validan la pertinencia del paradigma edge, sino que también evidencian su dependencia estructural de factores tecnológicos, infraestructurales y de diseño arquitectónico integrados.

Conclusiones

En virtud de los hallazgos obtenidos, se establece que las arquitecturas de computación en el borde constituyen un paradigma tecnológico esencial para el fortalecimiento del desempeño de los sistemas embebidos. En efecto, la capacidad de procesamiento local de la información reduce de manera sustancial la latencia operativa y optimiza la eficiencia en la toma de decisiones en tiempo real, especialmente en entornos caracterizados por restricciones de conectividad o alta variabilidad de carga.

Desde otra perspectiva analítica, se determina que la infraestructura de conectividad desempeña un papel estructural en la consolidación y escalabilidad de soluciones basadas en edge computing. Particularmente, la proximidad a nodos de fibra óptica y la disponibilidad de redes de alta capacidad inciden directamente en el rendimiento de los sistemas

distribuidos, evidenciándose una relación positiva entre la calidad de la infraestructura digital y la cobertura funcional de los entornos tecnológicos evaluados.

Finalmente, se infiere que la integración de arquitecturas en el borde con sistemas embebidos potencia significativamente la autonomía operativa, la capacidad de respuesta y la eficiencia del procesamiento en escenarios de tiempo real. En consecuencia, la convergencia con tecnologías complementarias como inteligencia artificial ligera y modelos distribuidos consolida al edge computing como una alternativa estratégica para el diseño de sistemas inteligentes avanzados, orientados a la optimización del rendimiento en contextos tecnológicos complejos y dinámicos.

Referencias bibliográficas

Álvarez Mendoza, Y., Leguizamón Páez, M. Á., & Londoño Gómez, T. (2021). Riesgos y soluciones de seguridad existentes en el Internet de las cosas (IoT) en relación con Big Data. *Ingeniería y Competitividad*, 23(1), e9484. <https://doi.org/10.25100/iyc.v23i1.9484>

Arango Astorga, P., & García García, Y. (2022). Internet de las cosas en el ámbito de la atención médica: tendencias y desafíos. *Revista Cubana de Informática Médica*, 14(1).

Ávila Rodríguez, M. T., Quizhpe Buñay, E. M., Chango Sailema, W. G., & Arciniegas, S. (2023). Dispositivo IoT para prevenir la violencia de género usando TinyML. *AXIOMA*, 1(29), 77–84. <https://doi.org/10.26621/ra.v1i29.920>

Borrero-Guerrero, H., López-Aguilar, J. J., Orduz-García, A., Barrero, S. V., & Jutinico-Alarcón, A. L. (2023). A differential drive mobile robot controlled by using ROS. *Visión Electrónica*, 17(2), 208–219.

Carro Suárez, J., & Sarmiento Paredes, S. (2022). El factor humano y su rol en la transición a Industria 5.0. *Entreciencias*, 10(24). <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2022.24.81727>

Franco Sastre, E. F., Garzón Duque, W. D., Osorio Quiroga, D. E., & Fonseca Rocha, B. F. (2022). Aplicaciones de algoritmos de cifrado en IoT y cloud computing. *Revista Vínculos*, 19(1), 56–65.

García Villalba, L. J., et al. (2021). Arquitecturas de computación en el borde para sistemas distribuidos. *Revista Iberoamericana de Tecnologías de la Información*.



Guerra González, S., & Álvarez Figueredo, D. D. (2023). Big Data y Fog Computing aplicados al sistema de salud. *Journal TechInnovation*, 2(2), 106–116. <https://doi.org/10.47230/Journal.TechInnovation.v2.n2.2023.106-116>

INEC. (2023). *Tecnologías de la información y comunicación TIC 2023*. Instituto Nacional de Estadística y Censos del Ecuador.

ITU. (2023). *Measuring digital development: Facts and figures 2023*. International Telecommunication Union. <https://www.itu.int>

ITU. (2024). *Digital development in the Americas region report*. International Telecommunication Union.

López, J., et al. (2022). Conectividad y brecha digital en América Latina. *Revista Latinoamericana de Telecomunicaciones*.

Lozano, I. F. S. (2023). Internet de las cosas aplicada a la movilidad y recolección de residuos sólidos. *Polo del Conocimiento*, 8(12), 133–151.

Mach, P., & Becvar, Z. (2021). Mobile edge computing: A survey on architecture and computation offloading. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*.

Mardini, J., Ibarra, R., Villa, M., Arteta, C., & Pulgar-Emiliani, M. (2023). Plataforma de monitoreo cardiovascular basado en IoT. *CESTA*, 4(1), 11–17.

Méndez, R., Torres, J., & Castillo, D. (2022). Arquitecturas distribuidas para edge computing en IoT. *Revista de Ingeniería y Sistemas*.

Ray, P. P. (2021). TinyML: Edge AI for embedded systems. *IEEE Access*.

Rúa Barrera, S., Gaviria Yepes, L. M., & Moná Martínez, H. J. (2023). Competencias en Industria 4.0. *Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 10(1), 13–30. <https://doi.org/10.26495/icti.v10i1.2396>

Sánchez-Iborra, R., & Cano, M. D. (2021). Edge computing in IoT systems. *Computer Networks*.

Satyanarayanan, M. (2021). The emergence of edge computing. *IEEE Computer*.

Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2021). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*.

Tupac-Yupanqui, M., Vidal-Silva, C. L., Sánchez-Ortiz, A., & Pereira, F. (2021). Uso de Arduino en educación en programación. *Formación Universitaria*, 14(6), 87–96. <https://doi.org/10.4067/S0718-50062021000600087>



Zhang, Y., et al. (2022). Edge intelligence for IoT systems: A review. *Future Generation Computer Systems*.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés