



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), mayo-junio 2026,
Volumen 10, Número 3.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i3

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TELEMETRÍA AB INITIO PARA EDIFICIOS POST-SISMO BAJO CONECTIVIDAD LIMITADA

**DESIGN OF AN AB INITIO TELEMETRY SYSTEM FOR
POST-EARTHQUAKE BUILDINGS UNDER LIMITED
CONNECTIVITY CONDITIONS**

Brandon Josafat Mota López

Universidad Veracruzana, Boca del Río México

Pedro Guevara López

Instituto Politécnico Nacional, México

Gustavo Delgado Reyes

Universidad Veracruzana, Boca del Río México

Franco Antonio Carpio Santamaria

Universidad Veracruzana, Boca del Río México

Miguel Ángel Hernández Pérez

Universidad Veracruzana, Boca del Río México

Diseño de un Sistema de Telemetría AB Inicio para Edificios Post-Sismo Bajo Conectividad Limitada

Brandon Josafat Mota López¹

zS24025232@estudiantes.uv.mx
<https://orcid.org/0009-0007-5698-8109>
Universidad Veracruzana
Boca del Río México

Pedro Guevara López

pguevara@ipn.mx
<https://orcid.org/0000-0001-5373-1403>
Instituto Politécnico Nacional - ESIME
Culhuacan México

Gustavo Delgado Reyes

gusdelgado@uv.mx
<https://orcid.org/0000-0003-4743-4757>
Universidad Veracruzana
Boca del Río México

Franco Antonio Carpio Santamaria

fcarpio@uv.mx
<https://orcid.org/0000-0003-3383-1858>
Universidad Veracruzana
Boca del Río México

Miguel Ángel Hernández Pérez

miguelhernandez06@uv.mx
<https://orcid.org/0000-0001-9818-1898>
Universidad Veracruzana
Boca del Río México

RESUMEN

El presente trabajo aborda el diseño de un sistema de telemetría ab inicio para transmisión de datos de daño estructural en escenarios post-sismo bajo condiciones de conectividad limitada. El objetivo consiste en establecer una arquitectura autónoma de comunicación que opere independientemente de infraestructura pública de telecomunicaciones. La metodología se enmarca en el diseño conceptual y funcional de un sistema cliente-servidor implementado sobre computadora embebida. El servidor configura una red inalámbrica, mientras el cliente proporciona visualización mediante interfaz web. La validación demostró transmisión sin pérdidas de datos, capacidad de reconexión automática y latencia mediana de 168 ms. El trabajo establece la vinculación entre cómputo en el borde y transmisión resiliente mediante una red local autónoma, constituyendo una base técnica replicable para inspección estructural en emergencias sísmicas con conectividad comprometida, particularmente en escenarios donde la infraestructura de telecomunicaciones se encuentra colapsada o inexistente.

Palabras clave: redes autónomas; cómputo en el borde; conectividad limitada; post-sismo; sistemas resilientes; monitoreo estructura; telemetría.

¹ Autor principal

Correspondencia: zS24025232@estudiantes.uv.mx

Design of an Ab Initio Telemetry System for Post-Earthquake Buildings Under Limited Connectivity Conditions

ABSTRACT

This work addresses the design of an ab initio telemetry system for transmitting structural damage data in post-earthquake scenarios under limited connectivity conditions. The objective is to establish an autonomous communication architecture that operates independently of public telecommunications infrastructure. The methodology focuses on the conceptual and functional design of a client-server system implemented on an embedded computer. The server configures a wireless network, while the client provides visualization through a web interface. Validation demonstrated lossless data transmission, automatic reconnection capability, and a median latency of 168 ms. The work establishes the linkage between edge computing and resilient transmission through an autonomous local network, constituting a replicable technical foundation for structural inspection in seismic emergencies with compromised connectivity, particularly in scenarios where telecommunications infrastructure is collapsed or nonexistent.

Keywords: autonomous networks; edge computing; limited connectivity; post-earthquake; resilient systems; structural monitoring; telemetry

*Artículo recibido 20 mayo 2026
Aceptado para publicación: 20 junio 2026*



INTRODUCCIÓN

El presente artículo aborda el diseño de un sistema de telemetría ab initio implementado sobre computación en el borde en la plataforma NVIDIA Jetson Orin Nano (NVIDIA, 2026) enfocado en el diseño del sistema para transmitir datos de daño estructural en escenarios post-sismo y en la arquitectura de comunicación priorizando el diseño de una solución inicial.

La infraestructura de comunicación pública es un elemento crítico para el intercambio de información en situaciones de emergencia, sin embargo, frecuentemente esta infraestructura se ve comprometida durante desastres naturales, obstaculizando la coordinación de los equipos de rescate (López-Villegas et al., 2026). Además, las estaciones de comunicación suelen sufrir daños físicos o quedar inhabilitadas, interrumpiendo la conexión en el momento en que la comunicación de emergencia resulta más crítica (Rahman et al., 2025).

Ante este problema, la literatura sugiere el uso de redes desplegadas mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV) para restablecer la conectividad en las áreas afectadas (Ullah et al., 2020).

No obstante, los trabajos actuales en la literatura se centran en el restablecimiento masivo de servicios de telecomunicación general mediante arquitecturas dinámicas. Esto deja un vacío significativo en el desarrollo de sistemas de telemetría especializados para la inspección estructural, donde el objetivo no es el ancho de banda masivo, sino el funcionamiento independiente de las telecomunicaciones externas y la integridad de los datos generados. Asimismo, no se identifican propuestas que prioricen simultáneamente la integridad de los datos, la operación autónoma y la independencia total de infraestructura externa en sistemas de telemetría para inspección estructural. Entonces, el problema de investigación radica en la carencia de una arquitectura de telemetría diseñada específicamente para operar en el borde, que vincule el procesamiento de daños in-situ con un protocolo de transmisión resiliente.

La relevancia de esta investigación reside en la necesidad de dotar a los equipos de respuesta a emergencias de herramientas tecnológicas que operen con total independencia de la infraestructura tradicional de telecomunicaciones. En las primeras horas posteriores a un evento sísmico, la evaluación rápida y segura del estado estructural de las edificaciones es vital para la toma de decisiones sobre labores de rescate.



En este contexto, el diseño de un sistema de telemetría concebido desde su origen para operar en condiciones de conectividad limitada o inexistente, adquiere un papel fundamental. La transmisión confiable, ordenada y persistente de datos de inspección visual rápida automatizada hacia una estación de monitoreo permite coordinar los esfuerzos del personal humano en la gestión de las actividades de rescate.

Asimismo, el enfoque ab initio del sistema propuesto prioriza la simplicidad del sistema, la estabilidad de la conexión y la integridad de los datos transmitidos, aspectos que resultan fundamentales en escenarios de emergencia donde la complejidad excesiva de las soluciones puede comprometer su operatividad. El presente trabajo contribuye al desarrollo de infraestructura de telemetría especializada para la evaluación post-sismo, estableciendo una base técnica replicable y adaptable a distintos entornos de operación y plataformas de procesamiento en el borde.

La telemetría constituye uno de los conceptos fundamentales que sustentan el presente trabajo, y se define como una práctica que consiste en la transmisión simultánea de información desde un sistema remoto hacia una estación receptora (Modenini & Ripani, 2023). Bajo esta definición, la telemetría se entiende como el mecanismo mediante el cual se envían datos generados por un sistema a través de un enlace de comunicación. Por otra parte, el cómputo en el borde se define como un paradigma en el cual los servicios y las tareas de procesamiento se ejecutan próximo a la fuente de generación de los datos. De acuerdo con (Cao et al., 2020), el cómputo en el borde traslada las capacidades de red, cómputo y almacenamiento tradicionalmente asociadas a la nube hacia el borde de la red, con el objetivo de satisfacer requerimientos de baja latencia y alto ancho de banda, reduciendo la dependencia de infraestructuras centralizadas.

En la literatura, Farrar et al., (2025) describen la transición de enfoques centrados en modelos físicos hacia uno donde la adquisición, gestión y utilización de información estructural adquieren un papel central. Esta evolución evidencia que el monitoreo de la salud estructural ya no depende exclusivamente de técnicas de detección de daño, sino de sistemas capaces de registrar, organizar y disponer datos para su posterior análisis. En este contexto, los sistemas de transmisión y gestión de datos dejan de ser un componente externo y pasan a constituir un elemento indispensable para el análisis estructural moderno.



En su revisión sistemática sobre tecnologías avanzadas para monitoreo de la salud estructural, Hassani y Dackermann, (2023) señalan la relevancia de los mecanismos de adquisición, transmisión y resguardo de datos, así como la resiliencia del sistema ante fallos operativos.

En su trabajo, Fath et al., (2025) proponen un sistema de monitoreo estructural basado en un enjambre de robots con capacidades de aprendizaje automático y procesamiento en el borde, orientado a la inspección de grietas, deformaciones y elementos estructurales. Los autores reconocen que su implementación en entornos reales enfrenta desafíos significativos relacionados con la transferencia de datos, subrayando que el componente de red constituye un elemento crítico, especialmente en aplicaciones donde la conectividad es limitada. Por otro lado, Jornet-Monteverde et al., (2021) desarrollan una red de nodos basados en microcontroladores que digitalizan vibraciones ambientales mediante sensores sísmicos y transmiten la información hacia un servidor central. El sistema permite control remoto y visualización en línea a través de una interfaz accesible desde navegadores web, empleando conexiones Wi-Fi y comunicaciones TCP/IP para asegurar la entrega ordenada de paquetes, elección justificada frente a alternativas como UDP por menores pérdidas de paquetes en escenarios con tráfico variable.

El diseño incorpora además un esquema de sincronización para corregir desfases de reloj entre nodo cliente y servidor, preservando la coherencia temporal de los registros.

La presente investigación se desarrolla en el contexto de la alta actividad sísmica del territorio mexicano (Flores-Márquez et al., 2024). En este escenario, la evaluación visual rápida del daño estructural constituye un elemento crítico para la toma de decisiones en labores de rescate. Por ello, el diseño de sistemas de telemetría capaces de operar de manera independiente a la infraestructura tradicional adquiere relevancia dentro del marco de la resiliencia urbana y la gestión de desastres en México.

En razón de lo expuesto, el presente artículo tiene como objetivo diseñar un sistema de telemetría ab initio implementado sobre la plataforma NVIDIA Jetson Orin Nano, orientado a la transmisión confiable de datos de daño estructural en escenarios post-sismo bajo condiciones de conectividad limitada o inexistente.



A diferencia de enfoques orientados a restablecimiento de conectividad general, el presente trabajo se enfoca en garantizar la confiabilidad de la transmisión de datos críticos de ingeniería. El sistema se concibe como una arquitectura autónoma de red local, compuesta por un nodo servidor y un nodo cliente, vinculados mediante un esquema de comunicación tolerante a fallos e independiente de infraestructura pública de telecomunicaciones.

La contribución del trabajo reside en el establecimiento de una base técnica replicable que integre transmisión estructurada de datos, persistencia redundante y visualización operativa, como respuesta al vacío identificado en la literatura respecto al desarrollo de sistemas de telemetría especializados para la inspección estructural en emergencias sísmicas.

METODOLOGÍA

La presente investigación tiene un enfoque descriptivo y aplicativo, de carácter no experimental, orientado al diseño conceptual y funcional de un sistema de telemetría. El estudio se centra en la definición de los mecanismos de comunicación entre servidor y cliente dentro de un esquema de cómputo en el borde, sin manipular variables del entorno físico. No se persigue la validación de la evaluación del daño estructural, sino la demostración de la viabilidad operativa del sistema propuesto.

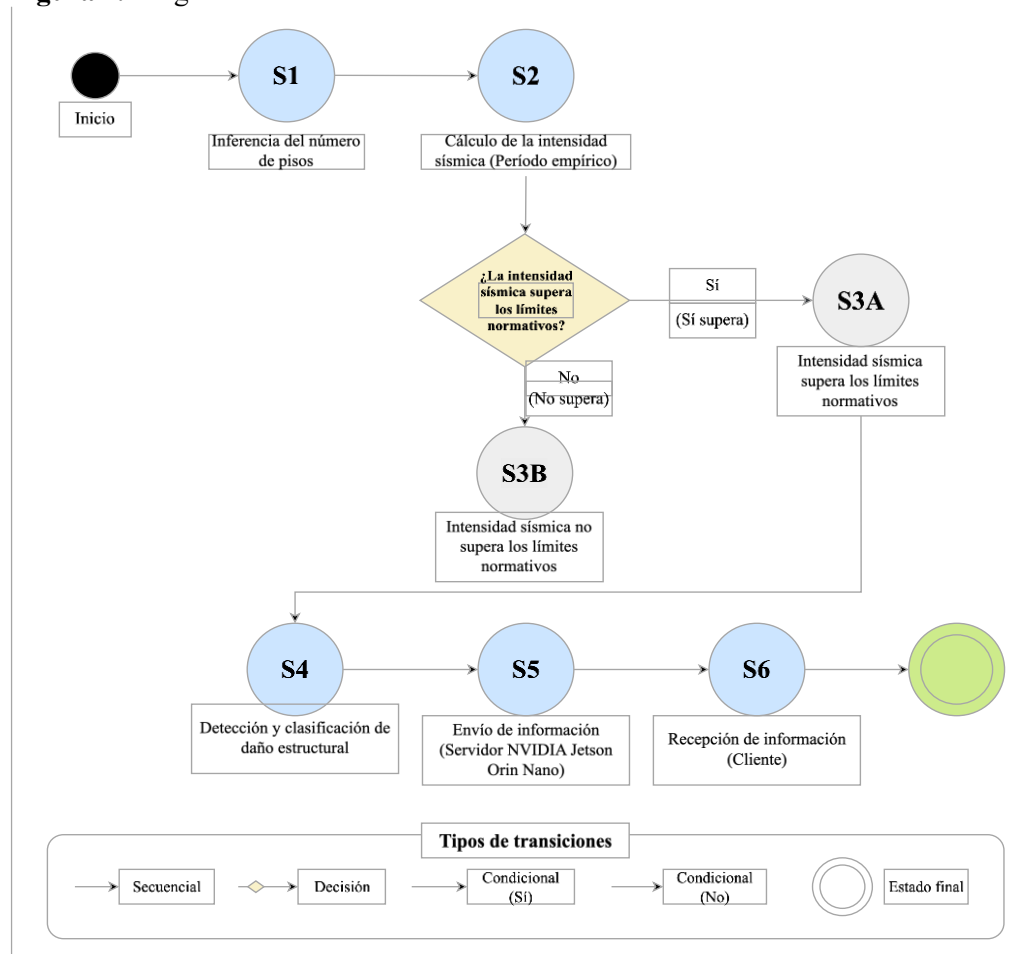
La Figura 1 presenta el esquema general del sistema de detección de daño estructural dentro del cual se integra el subsistema de telemetría.

A partir de este esquema global, el procedimiento metodológico del presente trabajo se enfoca específicamente en las etapas correspondientes a la transmisión, recepción y visualización de información, las cuales se detallan más adelante.

Para la validación del sistema se consideran como métricas de desempeño la latencia extremo a extremo, la integridad de los datos transmitidos, la capacidad de reconexión automática y la estabilidad del enlace durante la operación.



Figura 1. Diagrama del sistema de detección de daño estructural.



Fuente propia

Tabla 1. Lista de estados.

Etapa	Estado	Descripción
S1	Inferencia del número de pisos.	Inferencia de número de pisos en edificación mediante una fotografía y una red neuronal convolucional.
S2	Cálculo de la intensidad sísmica (Período empírico).	Con el número de pisos y formulas, se obtiene el periodo estructural empírico e intensidad de la acción sísmica, considerando el contenido frecuencial del sismo.
S3A	Intensidad sísmica supera los límites normativos.	La intensidad de la acción sísmica supera los límites normativos.
S3B	Intensidad sísmica no supera los límites normativos.	La intensidad de la acción sísmica no supera los límites normativos.
S4	Detección y clasificación de daño estructural.	Detección y clasificación de daño estructural con una fotografía mediante una red neuronal convolucional.
S5	Envío de la información (Servidor NVIDIA Jetson Orin Nano).	Sistema de envío de la información recolectada (servidor) desde NVIDIA Jetson Orin Nano.
S6	Recepción de la información (Cliente).	Sistema de recepción de la información recolectada (cliente).
Fin	Final del proceso.	Proceso completado.

Tabla 2. Listado de transiciones.

Desde	Hacia	Condición / Evento	Tipo
Inicio	S1	Inicio del sistema.	Secuencial.
S1	S2	Número de pisos inferido correctamente.	Secuencial.
S2	S3A	Intensidad sísmica > límites normativos	Condicional (Sí).
S2	S3B	Intensidad sísmica ≤ límites normativos	Condicional (No).
S3A	S4	Evaluación de riesgo completada (supera límites).	Secuencial.
S3B	S4	Evaluación de riesgo completada (no supera límites).	Secuencial.
S4	S5	Daño estructural clasificado.	Secuencial.
S5	S6	Información enviada correctamente.	Secuencial.
S6	Fin	Información recibida correctamente.	Secuencial.

Como se muestra en la Figura 1, el sistema de detección de daño estructural se compone de etapas que abarcan desde la inferencia de características de la edificación hasta el sistema de telemetría. No obstante, las etapas 1 a 4 corresponden a procesos que únicamente proporcionan el contexto operativo del sistema y no constituyen el objeto de estudio de esta investigación. El presente estudio se enfoca en el diseño del sistema de telemetría, representado por las etapas 5 y 6. Estas etapas representan la contribución del trabajo, al definir el esquema de comunicación y la interacción entre el servidor y el cliente.

A continuación, se describen con mayor detalle los componentes que integran el sistema de telemetría, así como su operación dentro del esquema cliente–servidor propuesto.

1. Diseño e implementación del nodo servidor de telemetría

El servidor constituye el componente principal de la arquitectura de telemetría y se implementa sobre la computadora embebida NVIDIA® Jetson Orin Nano™ que se ve en la Figura 2, seleccionada por su capacidad de procesamiento local requerida durante la etapa de inferencia de daño. Esta elección se fundamenta en el paradigma de cómputo en el borde descrito anteriormente, el cual traslada capacidades de procesamiento y almacenamiento hacia la fuente de generación de datos.



Figura 2. Computadora embebida NVIDIA Jetson Orin Nano donde se implementa el sistema.



Fuente propia

El servidor se diseña como un nodo autónomo capaz de operar sin acceso a internet ni servicios externos. Con este fin, el dispositivo se configura como Punto de Acceso inalámbrico (AP), estableciendo una red WiFi local independiente dedicada al sistema de telemetría. Esta red opera con direccionamiento IPv4 manual, asignándose al servidor una dirección IP estática. La comunicación se restringe a los dispositivos que se autentican mediante contraseña y se conectan a esta red, quedando limitada al alcance de la señal inalámbrica generada por el servidor.

La arquitectura de comunicación adoptada es cliente-servidor con conexión TCP, por su capacidad de garantizar entrega ordenada de paquetes. A diferencia de protocolos no orientados a conexión como UDP, TCP establece un canal confiable donde los datos llegan en el orden transmitido y se detectan automáticamente errores de transmisión. Dado que el objetivo del sistema no es maximizar ancho de banda, sino asegurar la integridad y coherencia de datos críticos de ingeniería, se prioriza estabilidad sobre velocidad de transmisión. Esta decisión implica un incremento en la latencia respecto a protocolos no orientados a conexión; sin embargo, resulta adecuada dado que el objetivo del sistema es priorizar la integridad de los datos sobre la velocidad de transmisión. La implementación del servicio de comunicación se realiza en lenguaje Python mediante la biblioteca estándar socket, la cual proporciona acceso a las funciones de red del sistema operativo. El servidor se configura para aceptar conexiones entrantes en un puerto dedicado, manteniendo el enlace activo durante toda la sesión de transmisión.

Los datos se transmiten como mensajes estructurados en formato JSON, utilizando el carácter de salto de línea como delimitador entre paquetes. El uso de JSON responde a criterios de interoperabilidad, legibilidad y extensibilidad, permitiendo que los datos puedan ser interpretados por distintos sistemas. Esta estructura permite al receptor procesar cada mensaje de forma secuencial sin requerir protocolos complejos de segmentación.

Al establecerse la conexión TCP, el cliente y el servidor ejecutan un intercambio inicial de mensajes para verificar disponibilidad y coordinar operaciones. Este intercambio incluye la transmisión de un sello de tiempo generado por el reloj del servidor, permitiendo al cliente estimar el desfase temporal entre nodos y calcular la latencia extremo a extremo de los paquetes. Adicionalmente, se implementa un comando de apagado remoto que permite al cliente instruir al servidor para que cierre ordenadamente el socket y libere el puerto de escucha sin requerir acceso físico al dispositivo.

Durante la fase operativa, el servidor transmite de manera periódica paquetes de datos con información simulada de daño estructural, exclusivamente con fines de validación funcional del canal de comunicación en esta etapa de diseño. El sistema incorpora mecanismos de manejo de excepciones orientados a tolerar desconexiones abruptas del cliente o fallas temporales del enlace. Ante la interrupción de la comunicación, el servidor retorna automáticamente a estado de espera, permitiendo la reconexión sin reinicio manual. Se habilita la reutilización del puerto de escucha para evitar bloqueos posteriores a cierres inesperados, reforzando la continuidad operativa del nodo en escenarios de conectividad inestable. El diseño y operación del cliente, así como los mecanismos de recepción y validación de los paquetes transmitidos, se describen a continuación.

2. Diseño e implementación del nodo cliente de monitoreo

La implementación se realiza en lenguaje Python utilizando la biblioteca NiceGUI para la construcción de una interfaz web accesible desde navegador, sin requerir software licenciado de terceros ni servicios externos. La estación opera dentro de la misma red WiFi local generada por el servidor, recibiendo, almacenando y visualizando los paquetes transmitidos.

El cliente establece una conexión TCP con la dirección IP del servidor y ejecuta un procedimiento de sincronización temporal mediante intercambio de mensajes con sellado de tiempo. A partir de la respuesta recibida, se estima el desfase entre relojes de ambos nodos, permitiendo calcular la latencia



extremo a extremo de los paquetes transmitidos. Este mecanismo proporciona una estimación operativa de desempeño del enlace para evaluar el comportamiento del sistema.

La recepción de datos se ejecuta en un proceso independiente de la interfaz gráfica, separando la capa de comunicación de la capa de visualización. Esta arquitectura previene bloqueos de la interfaz ante variaciones en el flujo de red y permite desacoplar la llegada de paquetes del ritmo de actualización visual. Para cada mensaje recibido se verifica su validez sintáctica como JSON antes de su procesamiento. Los datos válidos se almacenan en memoria y se complementan con metadatos locales de recepción: sello temporal y desfase estimado entre relojes. Con base en el tiempo de transmisión proporcionado por el servidor y el tiempo de recepción compensado, se calcula la latencia extremo a extremo dentro de la red local.

El cliente incorpora almacenamiento local en formato CSV, donde cada registro incluye el identificador del elemento evaluado, coordenadas geográficas, número de pisos, período estructural empírico, estado de clasificación, información de daño reportada y latencia calculada. Este registro complementa el archivo generado por el servidor, manteniendo copias independientes de la información en ambos nodos del enlace para preservar los datos ante la interrupción de uno de los extremos de comunicación.

La interfaz de monitoreo se estructura en tres componentes principales: bitácora de eventos, panel de visualización detallada y módulo de geolocalización. Esta segmentación responde a principios de usabilidad establecidos por Benaida (2023), favoreciendo la visibilidad del estado del sistema y la reducción de carga cognitiva. El diseño permite al personal técnico interpretar información crítica de forma inmediata sin recurrir a formatos crudos como JSON o salidas de terminal.

El módulo de geolocalización utiliza mapas almacenados localmente, eliminando la dependencia de servicios externos y garantizando continuidad operativa en escenarios sin conectividad a internet. Los edificios analizados se representan mediante marcadores georreferenciados, permitiendo correspondencia directa entre la información técnica y su contexto físico. La actualización de la visualización se implementa mediante temporización controlada que desacopla la recepción de datos del proceso de animación, evitando saturación visual y permitiendo la inspección manual de registros históricos sin interrumpir la adquisición en segundo plano.



El cliente incorpora la capacidad de enviar un comando de apagado remoto al servidor, proporcionando gestión operativa directa desde la estación de monitoreo sin requerir acceso físico al dispositivo. El nodo cliente constituye un componente activo dentro de la arquitectura de telemetría, no limitándose a visualizar datos sino participando en la gestión del sistema.

El alcance del sistema incluye el diseño e implementación del canal de comunicación TCP en red local, la transmisión y recepción de paquetes JSON estructurados, la estimación de latencia extremo a extremo, el almacenamiento redundante en ambos nodos y la visualización operativa en navegador web. Quedan fuera del alcance la evaluación del desempeño en entornos físicos reales con interferencias o degradación de señal, la medición de calidad del enlace en términos de potencia, la integración con las etapas de inferencia y clasificación estructural descritas previamente, y la operación simultánea con múltiples nodos cliente.

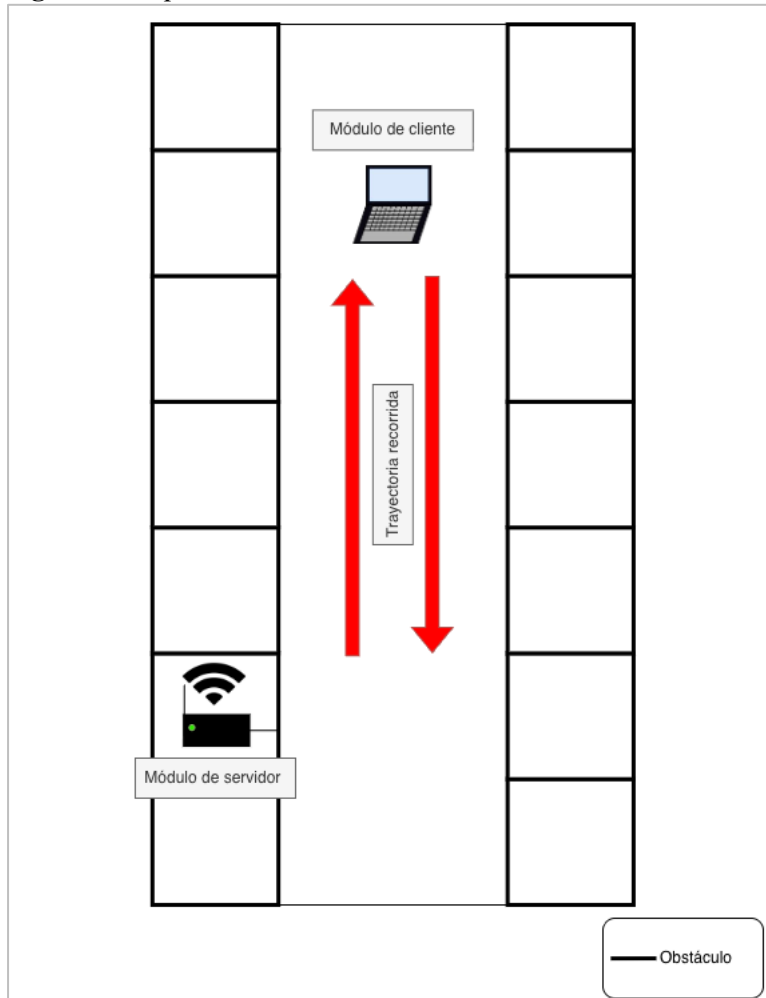
En términos éticos, el sistema se concibe como herramienta de apoyo preliminar para identificación temprana de daño, no como sustituto del juicio técnico ni de la inspección profesional realizada por autoridades competentes. La información generada debe entenderse como auxiliar para la priorización y gestión de daños, no como dictamen definitivo sobre la habitabilidad o seguridad de una edificación. Se reconoce como limitación del estudio que la validación del sistema se restringe a un entorno controlado, sin considerar variables físicas del medio tales como condiciones de propagación, interferencias o degradación de señal.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La validación funcional del sistema de telemetría se realizó en las instalaciones de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Culhuacán del Instituto Politécnico Nacional. El entorno físico de prueba consistió en un recorrido a lo largo de un pasillo con paredes que actuaban como obstáculos entre el nodo servidor y el nodo cliente, según se ilustra en la Figura 3.



Figura 3. Esquema del entorno de validación funcional del sistema de telemetría.



Fuente propia

Durante la ejecución de la prueba de concepto, se desplazó el nodo cliente a lo largo del recorrido, mientras el nodo servidor (NVIDIA Jetson Orin Nano) permaneció en ubicación fija. La validación se extendió durante tres sesiones separadas por dos reconexiones manuales ejecutadas desde el nodo cliente mediante la interfaz de monitoreo.

Estas desconexiones y reconexiones fueron realizadas intencionalmente para validar la capacidad del sistema de restablecer comunicación de forma autónoma sin requerir reinicio del servidor. El servidor permaneció en estado de espera durante los períodos de desconexión, reanudando la transmisión al detectar la reconexión del cliente. Este comportamiento confirma el diseño resiliente implementado con tolerancia a interrupciones del enlace. La Tabla 3 presenta el resumen estadístico de las sesiones de transmisión registradas durante la validación funcional.

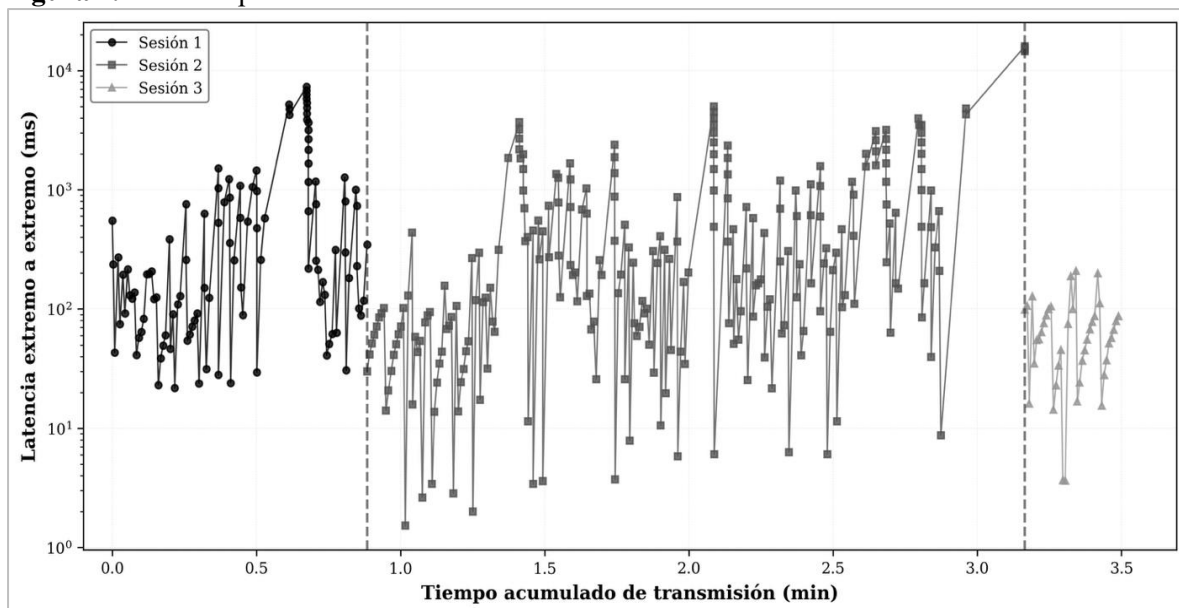
Tabla 3. Resumen estadístico de transmisión de datos durante validación funcional.

Sesión	Paquetes transmitidos	Duración (s)	Latencia mínima (ms)	Latencia mediana (ms)	Latencia media (ms)	Latencia máxima (ms)	Desviación estándar
1	107	53.02	21.71	218.06	845.32	7304.25	1651.89
2	245	136.89	1.52	212.72	844.50	16009.06	2110.97
3	40	19.50	3.63	60.41	62.14	208.10	49.24
Total	392	658.543	1.52	168.19	844.50	16009.06	1894.67

Se observa que el sistema recibió la totalidad de los paquetes transmitidos en cada sesión, verificado mediante la secuencia consecutiva de identificadores en los registros almacenados. Este comportamiento evidencia la robustez del sistema ante interrupciones del enlace, reforzando su idoneidad para escenarios donde la conectividad es intermitente o inestable. La mediana de latencia global (168.19 ms) constituye un indicador representativo del desempeño típico del sistema, ya que la media (844.50 ms) se ve influenciada por valores extremos correspondientes a eventos transitorios asociados al desplazamiento físico y obstáculos estructurales. Este valor se considera adecuado para aplicaciones de monitoreo en escenarios de emergencia, donde la prioridad radica en la confiabilidad de la información más que en la respuesta instantánea.

La Figura 4 presenta la distribución temporal de latencias durante las tres sesiones de transmisión.

Figura 4. Serie temporal de latencia con reconexiones automáticas

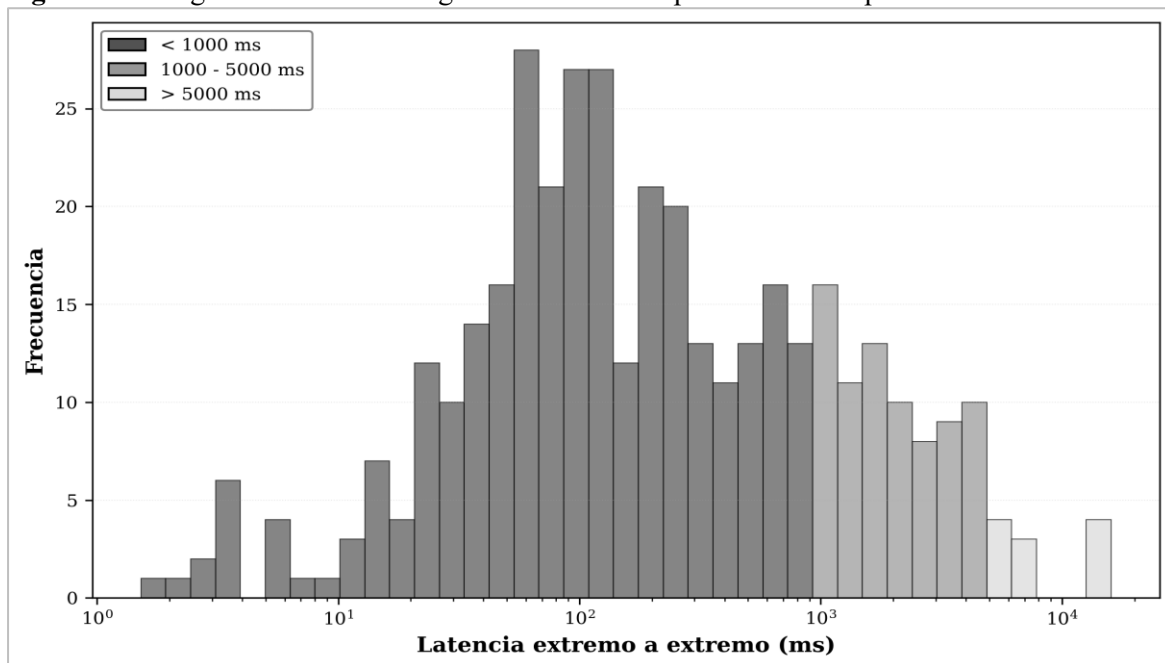


Fuente propia

En la Figura 4, las líneas verticales punteadas indican los puntos donde se ejecutaron reconexiones de forma manual desde el cliente, evidenciando que el sistema restableció comunicación de forma exitosa con el servidor. La Sesión 3 exhibe menor variabilidad que las sesiones 1 y 2, coherente con los valores de desviación estándar reportados en la Tabla 1.

A continuación, la Figura 5 presenta la distribución de frecuencias de latencias en escala logarítmica. La mayoría de las barras se concentra por debajo de 10^3 ms (1 segundo), evidenciando que los valores extremos superiores a 10^4 ms constituyen eventos excepcionales.

Figura 5. Histograma de latencias registradas durante la prueba de concepto



Fuente propia

La integridad de los datos se preservó durante todas las sesiones, sin registrarse corrupción de paquetes ni inconsistencias en la estructura JSON recibida. El mecanismo de almacenamiento redundante fue verificado mediante la generación de archivos CSV en ambos nodos, confirmando la persistencia de la información ante posibles interrupciones del enlace.

Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad funcional del sistema de telemetría diseñado para operar bajo condiciones de conectividad limitada. El establecimiento de una red local independiente, la transmisión ordenada de datos estructurados y la capacidad de reconexión automática sin intervención manual constituyen evidencia de que el diseño propuesto cumple con los objetivos planteados en la investigación.

El presente sistema se diferencia fundamentalmente de los trabajos revisados en la literatura en su concepción para operar sin dependencia de infraestructura externa. Jornet-Monteverde et al. (2021) desarrollaron un sistema de monitoreo continuo de vibraciones sísmicas que asume disponibilidad de red WiFi y servidor accesible, mientras que el presente trabajo establece su propia red local autónoma mediante punto de acceso inalámbrico.

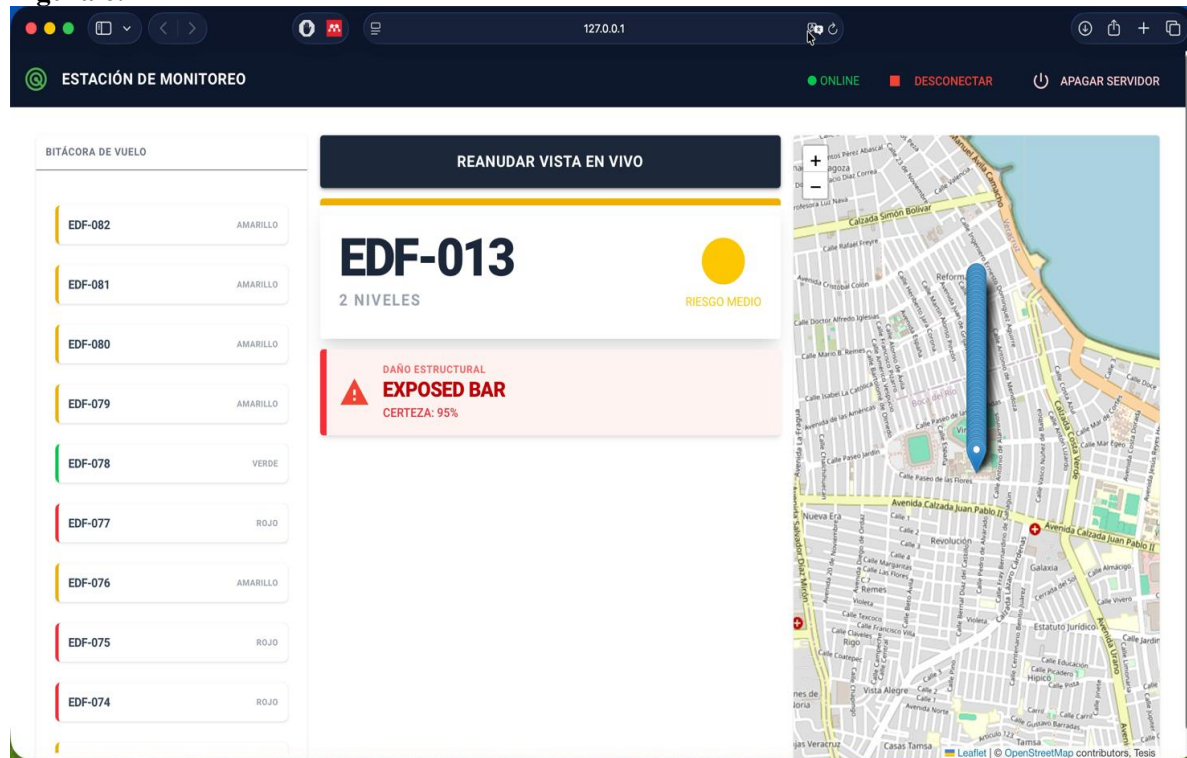
Asimismo, Fath et al. (2025) reconocen que el componente de red constituye un elemento crítico en sistemas de inspección robótica, pero no abordan explícitamente el diseño de una arquitectura de comunicación resiliente ante colapso de infraestructura pública. La contribución del presente trabajo reside en el diseño ab initio de un sistema de telemetría concebido desde su origen para escenarios donde las redes celulares y servicios en la nube resultan inaccesibles, aspecto no contemplado en las propuestas revisadas. Asimismo, el sistema propuesto prioriza explícitamente la integridad de los datos sobre el rendimiento en ancho de banda, lo cual representa una diferencia conceptual relevante respecto a trabajos previos.

Los resultados obtenidos validan la elección del protocolo TCP para la transmisión de datos. La ausencia total de pérdidas de paquetes durante las tres sesiones de validación confirma que el mecanismo de entrega ordenada y verificación de integridad de los datos resulta adecuado para el caso de uso planteado. En el contexto de inspección estructural post-sismo, donde la prioridad reside en la confiabilidad de los datos sobre la velocidad de transmisión, esta decisión se alinea con los requerimientos del sistema.

La Figura 6 presenta la interfaz de usuario del nodo cliente durante una sesión de monitoreo de la prueba de concepto. Se implementa el diseño descrito en la metodología siguiendo los principios de usabilidad establecidos, permitiendo la visualización simultánea de los datos recibidos del análisis de daño mediante los tres componentes principales.



Figura 6. Interfaz de monitoreo del nodo cliente



Fuente propia

Se reconoce como limitación del estudio que la validación se ejecutó en un entorno controlado dentro de instalaciones académicas, no bajo condiciones reales de emergencia sísmica. El sistema se validó con datos de daño estructural simulados, dado que las etapas de inferencia y clasificación mediante redes neuronales convolucionales no constituyen el objeto de estudio del presente trabajo. Esto implica que los valores de desempeño obtenidos podrían variar significativamente en escenarios reales donde existan interferencias electromagnéticas, obstáculos estructurales más complejos o degradación severa del enlace.

La novedad científica del trabajo radica en el establecimiento de una arquitectura de telemetría concebida desde su origen para operar sin dependencia de infraestructura pública de telecomunicaciones, aspecto no abordado de forma explícita en la literatura revisada sobre sistemas de monitoreo estructural.

Como trabajo futuro se plantea la evaluación del sistema en condiciones experimentales controladas y la implementación de las etapas de inferencia y clasificación de daño estructural. En el marco de la línea de investigación en resiliencia urbana y gestión de desastres, el desarrollo de herramientas tecnológicas autónomas constituye un área de oportunidad para fortalecer las capacidades de respuesta ante

emergencias sísmicas en México, donde la infraestructura de telecomunicaciones ha exhibido vulnerabilidad durante eventos de gran magnitud. La extensión hacia arquitecturas multi-nodo y la incorporación de cifrado extremo a extremo representan vías de evolución del sistema propuesto.

CONCLUSIONES

Se logró el diseño e implementación funcional de un sistema de telemetría ab initio para transmisión de datos de daño estructural en escenarios post-sismo bajo condiciones de conectividad limitada. El sistema opera mediante una arquitectura autónoma de red local que vincula un nodo servidor implementado sobre plataforma NVIDIA Jetson Orin Nano con un nodo cliente de visualización web, empleando protocolo TCP sobre enlace WiFi independiente de infraestructura pública de telecomunicaciones.

La validación funcional confirmó la transmisión íntegra de datos estructurados sin pérdidas, la capacidad de reconexión automática sin intervención manual y el desempeño adecuado del sistema en condiciones de conectividad variable. Estos resultados demuestran la viabilidad operativa del diseño propuesto para el caso de uso planteado. Este enfoque resulta particularmente relevante en las primeras horas posteriores a un evento sísmico, donde la disponibilidad de información confiable es crítica para la toma de decisiones.

La contribución del trabajo reside en el establecimiento de una arquitectura de telemetría concebida desde su origen para operar sin dependencia de infraestructura externa, aspecto no abordado explícitamente en la literatura revisada sobre sistemas de monitoreo estructural. A diferencia de propuestas existentes que asumen disponibilidad de redes celulares o servicios en la nube, el sistema desarrollado tiene un enfoque que vincula cómputo en el borde y transmisión resiliente mediante una red local autónoma. El enfoque ab initio priorizó simplicidad estructural, estabilidad de conexión e integridad de datos sobre optimización de ancho de banda, reconociendo que la complejidad excesiva constituye un factor de riesgo en entornos de emergencia.

Se reconoce como limitación que la validación se ejecutó en entorno controlado, sin replicar condiciones reales post-desastre donde variables como degradación de infraestructura, interferencias electromagnéticas intensas y ausencia de energía estable introducirían desafíos adicionales.



Asimismo, el sistema fue validado con datos simulados, quedando pendiente la implementación de las etapas de inferencia y clasificación mediante redes neuronales convolucionales.

Se plantean como trabajo futuro la evaluación del sistema en condiciones experimentales controladas la caracterización rigurosa del enlace WiFi mediante mediciones de potencia de señal, la implementación de cifrado extremo a extremo, y el diseño para soportar múltiples nodos cliente.

El desarrollo de herramientas tecnológicas autónomas que operen independientemente de servicios externos constituye una línea de investigación relevante para fortalecer las capacidades de respuesta ante desastres naturales en México. El sistema de telemetría presentado establece fundamentos técnicos sobre los cuales pueden construirse soluciones orientadas a la preservación de vidas humanas en las primeras horas críticas posteriores a un evento sísmico.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Benaida, M. (2023). Developing and extending usability heuristics evaluation for user interface design via AHP. *Soft Computing*, 27(14), 9693–9707. <https://doi.org/10.1007/S00500-022-07803-4/TABLES/11>
- Cao, K., Liu, Y., Meng, G., & Sun, Q. (2020). An Overview on Edge Computing Research. *IEEE Access*, 8, 85714–85728. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2991734>
- Farrar, C. R., Dervilis, N., & Worden, K. (2025). The Past, Present and Future of Structural Health Monitoring: An Overview of Three Ages. *Strain*, 61(1). <https://doi.org/10.1111/STR.12495>
- Fath, A., Sauter, C., Liu, Y., Gamble, B., Burns, D., Trombley, E., Sathi, S. K. R., Xia, T., & Huston, D. (2025). HeSARIC: A Heterogeneous Cyber-Physical Robotic Swarm Framework for Structural Health Monitoring with Augmented Reality Representation. *Micromachines* 2025, Vol. 16, Page 460, 16(4), 460. <https://doi.org/10.3390/M16040460>
- Flores-Márquez, E. L., Ramírez-Rojas, A., & Sigalotti, L. D. G. (2024). Non-Extensive Statistical Analysis of Seismicity on the West Coastline of Mexico. *Fractal and Fractional* 2024, Vol. 8, Page 306, 8(6), 306. <https://doi.org/10.3390/FRACTALFRACT8060306>
- Hassani, S., & Dackermann, U. (2023). A Systematic Review of Advanced Sensor Technologies for Non-Destructive Testing and Structural Health Monitoring. *Sensors* 2023, Vol. 23, Page 2204, 23(4), 2204. <https://doi.org/10.3390/S23042204>



- Jornet-Monteverde, J. A., Galiana-Merino, J. J., & Soler-Llorens, J. L. (2021). Design and Implementation of a Wireless Sensor Network for Seismic Monitoring of Buildings. *Sensors* 2021, Vol. 21, Page 3875, 21(11), 3875. <https://doi.org/10.3390/S21113875>
- López-Villegas, I., Martínez-Rios, E. A., Izquierdo-Reyes, J., Bustamante-Bello, R., & Falcone, F. (2026). A systematic literature review of emergency communications assisted by unnamed aerial vehicles. *Ad Hoc Networks*, 182, 104063. <https://doi.org/10.1016/J.ADHOOC.2025.104063>
- Modenini, A., & Ripani, B. (2023). A Tutorial on the Tracking, Telemetry, and Command (TT&C) for Space Missions. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 25(3), 1510–1542. <https://doi.org/10.1109/COMST.2023.3287431>
- NVIDIA. (2026). *Jetson Orin Nano Developer Kit User Guide*. <https://developer.nvidia.com/embedded/learn/jetson-orin-nano-devkit-user-guide/index.html>
- Rahman, M. T., Shahen Shah, A. F. M., Karabulut, M. A., & Ilhan, H. (2025). FANET-enabled cluster-based emergency communication with 3D mobility in 5G and beyond. *Vehicular Communications*, 56, 100971. <https://doi.org/10.1016/J.VEHCOM.2025.100971>
- Ullah, H., Abu-Tair, M., McClean, S., Nixon, P., Parr, G., & Luo, C. (2020). Connecting Disjoint Nodes Through a UAV-Based Wireless Network for Bridging Communication Using IEEE 802.11 Protocols. *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020(1), 142-. <https://doi.org/10.1186/S13638-020-01727-Z/FIGURES/6>

