

Redes inalámbricas ad hoc aplicadas a la monitorización de salud estructural en edificios

Iván Palacios, José Placencia, Milton Muñoz, Víctor Samaniego,
Santiago González, Remigio Guevara,

ivan.palacios, jose.placencial, milton.munozc, victor.samaniegog,
santiago.gonzalezm, remigio.guevara@ucuenca.edu.ec.

Dpto. de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad de Cuenca- Ecuador, CP. 010201

Abstract- This paper presents an architecture based on wireless ad hoc networks for the structural health monitoring of buildings. The solution consists of a set of ten sensor nodes (accelerograph stations) as well as a main node or gateway. The communication among the devices was configured through a multi-hop topology. Furthermore, the gateway node incorporates an automatic event detection system where the sensor nodes upload the information of the seismic events to the cloud (Google Drive). This proposal contributes in the design and implementation of resilient communications systems on real scenarios. Regarding the network performance, several experiments were carried out in order to evaluate the throughput, RTT, and the time to transmit the data of events. Finally, results of a seismic event detected are presented which evidence the proper operation of the architecture proposed.

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad las redes inalámbricas presentan una gran diversidad de aplicaciones, entre las más importantes se encuentran: redes de meteorología, agricultura de precisión y monitorización de ambientes urbanos. En tal contexto, las redes inalámbricas ad hoc representan un paradigma de comunicación que ha captado un gran interés, en especial gracias a un conjunto de escenarios especializados tales como las redes inalámbricas de sensores (WSN), las redes vehiculares y las redes tipo *mesh*. Por ejemplo, en [1] y [2] se describen soluciones para el despliegue de sistemas tipo ITS (*Intelligent Transport Systems*) que combinan la aplicación de VANET's en conjunto con tecnologías de *cloud computing*.

Por otra parte, un escenario de especial interés para la aplicación de redes tipo ad hoc es ante la ocurrencia de desastres naturales. En este contexto, en [3] se propone una arquitectura de comunicación para una rápida respuesta en caso de inundaciones. Por otro lado, en [4] se propone un sistema de comunicación resiliente basado en el paradigma ad hoc para mantener la conectividad de dispositivos de usuario en caso de un desastre natural. Por último, en [5] se desarrolla una aplicación móvil para operaciones de rescate en situaciones de desastres.

El enfoque del uso de este tipo de redes, como un sistema de comunicación robusto para mitigar las pérdidas en desastres naturales, responde a su capacidad de ser escalables, auto configurables y autorreparables [6]. Para evaluar el rendimiento de la red usualmente se emplean

métricas como por ejemplo *throughput*, la tasa de envío de paquetes (PDR), el tiempo de ida y vuelta (RTT), el retardo y la carga de enrutamiento normalizada (NRL) [7].

Otro escenario de gran importancia donde las redes ad hoc y en particular las WSN's han cobrado gran relevancia se enfoca en la monitorización de infraestructuras ante eventos sísmicos, dicho ámbito de investigación se conoce como salud estructural (SHM, *Structural Health Monitoring*). En tal sentido, en [8], se presenta una revisión de diversas tecnologías y soluciones para SHM basadas en redes de sensores. Adicionalmente, en [9] se propone una arquitectura de un sistema de monitoreo estructural basado en una arquitectura nodo-concentrador, una topología estrella y una red ad hoc. De forma similar, el sistema planteado en [10], se basa en una arquitectura donde los nodos se comunican a través de una red ad hoc con un dispositivo concentrador, el mismo almacena los datos en un servidor con el objetivo de monitorizar la edificación en estudio. Finalmente, en la literatura es posible encontrar soluciones adicionales basadas en el paradigma ad hoc para la monitorización de salud estructural. No obstante, la mayoría de trabajos emplean simulaciones y no detallan el despliegue y la evaluación del rendimiento de la red en un escenario real.

En este artículo se presenta una solución de comunicación basada en una red ad hoc multi salto para un sistema de monitorización de salud estructural en edificios. El sistema fue implementado y evaluado sobre un escenario real y consta de múltiples nodos con sensores acelerómetros, así como un nodo principal o *gateway*. Este último permite la conectividad de la arquitectura hacia Internet y además implementa un sistema de detección automática de eventos sísmicos. La comunicación entre todos los nodos se realiza a través del protocolo MQTT (*Message Queue Telemetry Transport*). La principal contribución del trabajo consiste en el diseño e implementación de una arquitectura de comunicación resiliente basada en el paradigma ad hoc, sobre un escenario real y enfocado en la monitorización de salud estructural.

II. MÉTODOS Y MATERIALES

Esta sección presenta una descripción general del sistema, la topología de la red implementada en la edificación de estudio, la configuración para los nodos sensores y el

dispositivo *gateway*, y finalmente, la comunicación entre las estaciones mediante el protocolo MQTT.

A. Descripción general del sistema

La arquitectura del sistema emplea el modelo cliente-servidor, en este sentido cada uno de los nodos sensores o estaciones de acelerógrafos corresponden a un cliente y el nodo principal o *gateway* es el servidor.

Con respecto a los nodos sensores, su diseño y validación se analizó previamente como se detalla en [11]. En particular, los nodos constan de un ordenador de tamaño reducido (SBC) Raspberry Pi, un microcontrolador y un sensor acelerógrafo. Para la configuración y considerando las limitaciones de la antena interna de la Raspberry Pi, se empleó un módulo IEEE 802.11 externo. Por otra parte, el nodo principal o *gateway* se basa en el mismo sistema de los nodos sensores, no obstante, también dispone de un sistema de detección automática de eventos sísmicos y acceso a Internet a través de un router 4G LTE. Finalmente, para la comunicación entre los nodos se utilizó el protocolo MQTT y se desplegó una red ad hoc multi salto con topología lineal. Además, con el objetivo de acceder a los datos de forma remota, los eventos sísmicos registrados por cada estación son enviados hacia la nube.

B. Topología de la red ad hoc

La topología de la red se desplegó en función de la ubicación de los nodos sensores, los cuales se instalaron en diferentes pisos del edificio objeto de estudio. Debido a que las redes ad hoc no requieren una infraestructura preexistente y la ubicación de las estaciones es fija, se eligió dicha red con una topología lineal y direcciones IP estáticas. El sistema consta de un total de 10 nodos sensores y el nodo principal (*gateway*). El esquema con la topología y la ubicación estimada de los nodos en el edificio se presenta en la Fig. 1.

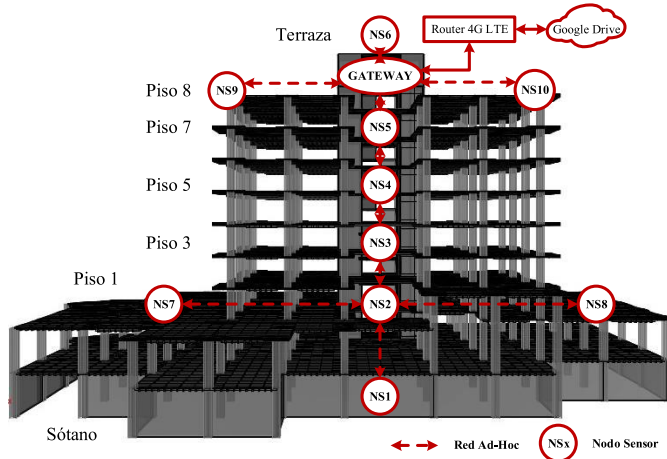


Fig. 1. Topología de la red ad hoc desplegada en el edificio.

Para el funcionamiento del sistema cada estación de acelerógrafos debe comunicarse con el dispositivo *gateway*.

En este sentido, los nodos sensores 5, 6, 9 y 10 se encuentran a un salto del nodo principal. Por otra parte, las estaciones 4, 3 y 2 se encuentran a dos, tres y cuatro saltos respectivamente. Finalmente, los nodos 1, 7 y 8 están a cinco saltos del dispositivo *gateway*.

C. Configuración de la red

En la Fig. 2 se presenta un diagrama funcional con las etapas para configurar la red ad hoc. Como se puede observar, en primera instancia es necesario conectar el módulo IEEE 802.11 a la Raspberry Pi de cada estación. A continuación, se configuran los parámetros de la red, específicamente, el nombre, la dirección IP estática, el canal inalámbrico, la máscara de red y la dirección de *broadcast*. Luego, para el funcionamiento adecuado del sistema es necesario deshabilitar la asignación dinámica de direcciones (DHCP).

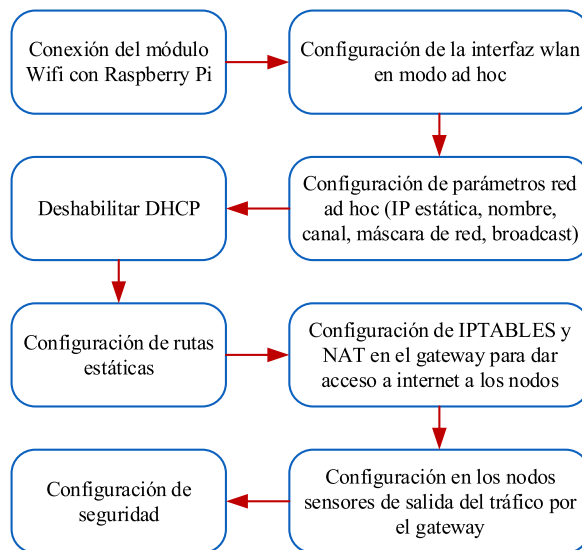


Fig. 2. Diagrama de bloques de la configuración de la red.

Siguiendo con la configuración, para establecer la comunicación entre estaciones sin enlace directo en el edificio, es necesario realizar saltos a través de los nodos intermedios. Para tal objetivo se realiza la configuración de rutas estáticas según los saltos que debe dar cada nodo sensor hasta llegar al dispositivo *gateway*. Posteriormente, para proporcionar acceso a Internet a todas las estaciones a través del nodo *gateway*, se realizó la configuración NAT (traducción de direcciones de red) mediante la herramienta *iptables*. De forma similar, en cada estación se configuró una ruta estática para que el tráfico de datos se dirija por el nodo principal. Finalmente, se configuró la seguridad de la red implementada. En concreto, se definió una contraseña de acceso de 13 caracteres. Por otro lado, se implementaron reglas de seguridad con filtrado de puertos y de direcciones MAC, la configuración se realizó de forma tal que un solo ordenador con una MAC determinada pueda acceder por SSH o VNC a los ordenadores Raspberry Pi.

D. Comunicación entre nodos sensores

Con el objetivo de acceder remotamente a los datos sísmicos, el sistema implementado envía los eventos de cada estación a la nube, específicamente a Google Drive. En particular, para disminuir la latencia y el ancho de banda en las comunicaciones se envían únicamente los eventos sísmicos. En tal sentido, sobre el nodo *gateway* se implementó un sistema de detección automática de eventos sísmicos basado en el algoritmo STA/LTA (*Short Term Average to Long Term Average*) recursivo [12]. Adicionalmente, se utilizó el protocolo MQTT para la

comunicación, donde, el nodo principal publica en un tópico (MQTT) la información de cada evento sísmico detectado y las estaciones de acelerógrafos suscritas al tópico reciben dicha información. Finalmente, cada estación sube a la nube un archivo con los datos del evento sísmico.

III. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

Para la evaluación experimental se desplegó el sistema en el edificio objeto de estudio. En este contexto, el nodo *gateway* implementado se presenta en la Fig. 3a y una de las estaciones de acelerógrafos instalada en el edificio se muestra en la Fig. 3b. Con el objetivo de evaluar el rendimiento de la red se realizaron experimentos para obtener las métricas de tiempo de ida y vuelta (RTT, *Round-Trip delay Time*), tiempo de envío de un archivo y el *throughput*. Por último, se realizó el análisis del evento sísmico más relevante registrado por el sistema.

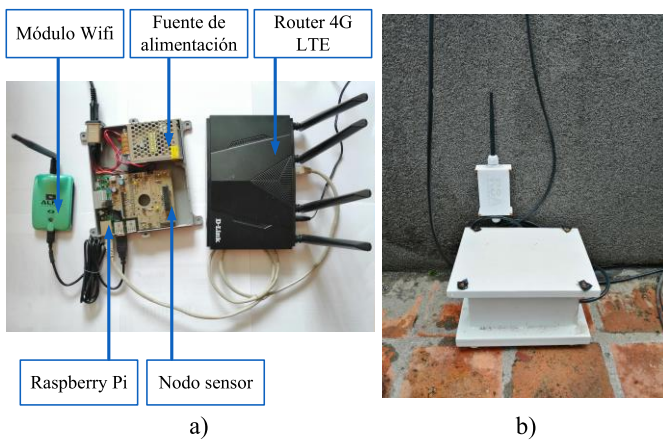


Fig. 3. a) Dispositivo gateway implementado. b) Nodo acelerógrafo instalado en el edificio objeto de estudio.

A. Evaluación del rendimiento de la red

Los experimentos realizados consisten en el envío de paquetes y archivos desde varias estaciones ubicadas en distintos pisos del edificio hasta el nodo *gateway*. En particular, se utilizaron las estaciones de los pisos 7, 5, 3, 1 y sótano que se encuentran a 1, 2, 3, 4 y 5 saltos del nodo principal, respectivamente.

En primera instancia, para la evaluación de la conectividad de la red, se utilizó la herramienta *ping*. La cual permite estimar el tiempo que demora un paquete en alcanzar el destino y retornar a la fuente, esta métrica se denomina tiempo de ida y vuelta (RTT). Desde cada estación de los diferentes pisos, se ejecutaron múltiples experimentos para realizar un análisis estadístico de las medidas. Los resultados obtenidos con los intervalos de confianza del 95% se presentan en la gráfica superior de la Fig. 4. Como se puede observar, el valor de RTT aumenta en función del número de saltos (v.g. 1.98 ms para 1 salto y 7.42 ms para 5 saltos). De forma similar, los intervalos de confianza tienen mayor variabilidad cuando el número de saltos es mayor, esto es consecuencia de que el éxito en la transmisión disminuye a medida que aumenta el número de dispositivos.

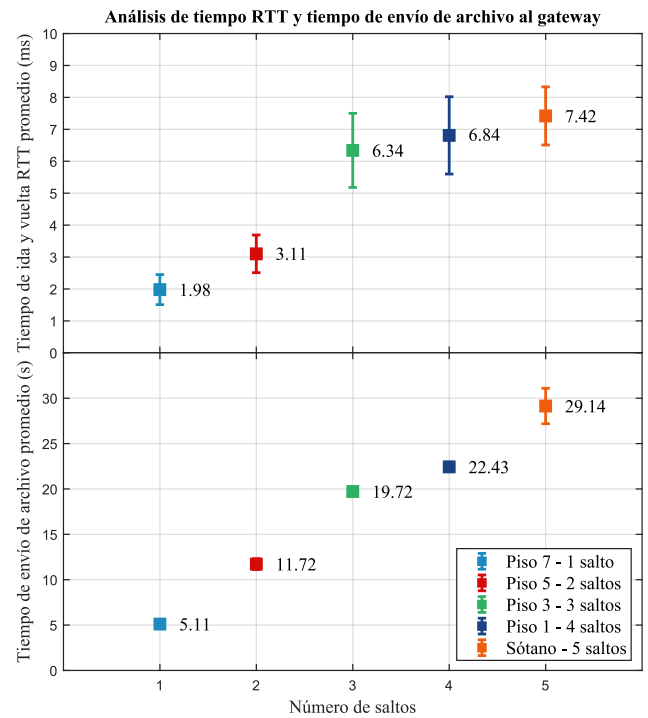


Fig. 4. Análisis de tiempo de ida y vuelta RTT (gráfica superior) y tiempo de envío de un archivo (gráfica inferior).

Adicionalmente, se realizaron experimentos para determinar el tiempo de envío de un archivo desde una estación hasta el nodo *gateway*. Para tal objetivo, se envió 10 veces un archivo de 10 MB desde cada nodo sensor. El tiempo de envío medio con los intervalos de confianza se presentan en la gráfica inferior de la Fig. 4. Como se muestra, a mayor número de saltos mayor el tiempo de envío (v.g. 5.11 segundos para 1 salto y 29.14 segundos para 5 saltos). Además, los intervalos de confianza presentan mínima variabilidad hasta 4 saltos y únicamente con 5 saltos es considerable. Con estos resultados, y considerando que el tamaño máximo de un evento sísmico usualmente es de 1 MB, se comprueba que la red implementada permite el envío de los archivos satisfactoriamente.

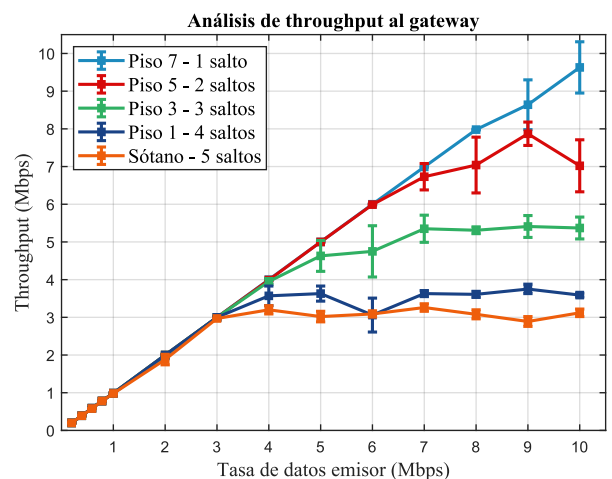


Fig. 5. Análisis de throughput desde los nodos sensores al gateway.

Como último experimento se realizó un estudio de caracterización del *throughput* en cada salto. Para tal objetivo, se generó tráfico CBR (*Constant Bit Rate*) desde cada nodo sensor hacia el dispositivo *gateway*.

Específicamente, se configuraron cinco réplicas para cada flujo de tráfico desde 200 kbps a 1 Mbps (en intervalos de 200 kbps) y desde 1 Mbps hasta 10 Mbps (en intervalos de 1 Mbps). Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 5, las gráficas describen la relación entre la carga demandada y el *throughput* efectivo en la red. Los resultados indican que para 1 salto el comportamiento es prácticamente lineal y a medida que aumenta el número de saltos disminuye el valor de *throughput* (v.g. para el mayor número de saltos el *throughput* no supera el valor de 3 Mbps).

B. Monitorización de eventos sísmicos

La monitorización de eventos sísmicos, en la edificación de estudio, se realizó durante varios meses y el evento más relevante se registró el día 26 de abril de 2021, [13] y su magnitud fue de 3.9 Md. En la Fig. 6, se presentan los acelerogramas de este evento, para el eje longitudinal y los pisos 1 y 7 del edificio. Como se puede observar, la magnitud en el piso 1 (valor RMS de 0.203 cm/s^2) es inferior a la magnitud en el piso 7 (valor RMS de 0.223 cm/s^2). Los resultados muestran que a menor altura también es menor la amplitud y el piso más elevado registra la mayor amplitud del evento sísmico. Finalmente, a partir de estos resultados, se destaca que mediante el sistema desarrollado es posible evaluar la respuesta del edificio frente a sismos.

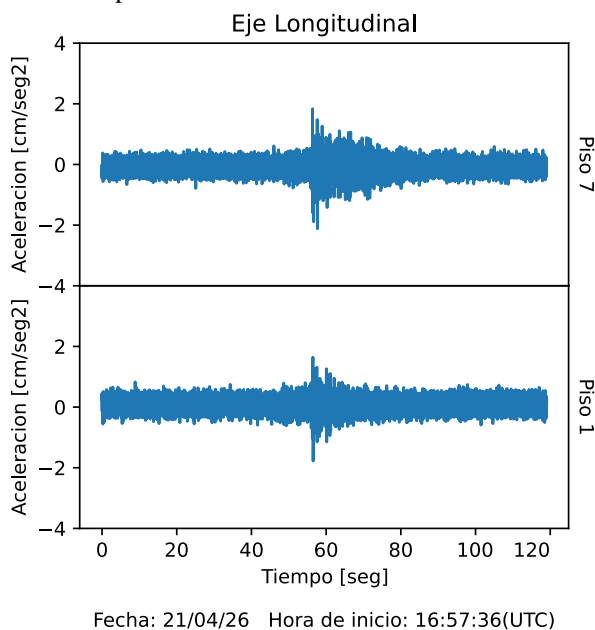


Fig. 6. Evento sísmico registrado por las estaciones de los pisos 1 y 7.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una solución basada en redes inalámbricas ad hoc para aplicaciones de salud estructural. El sistema consiste de múltiples nodos sensores acelerógrafos y un nodo *gateway*. Las estaciones envían los eventos sísmicos a la nube y la comunicación se basa en una topología multi salto. De esta manera la propuesta consiste en un sistema de fácil instalación, escalable y sin la necesidad de infraestructura pre existente.

Para la evaluación del trabajo, se empleó un escenario real y se determinaron las métricas de RTT, tiempo de envío de un archivo y *throughput*. Los resultados muestran que, si bien a mayor número de saltos disminuye el *throughput*, la

capacidad de la red es adecuada para la transmisión de la información de eventos sísmicos. En tal contexto, se obtuvieron los valores RTT medios de 1.98 ms y 7.42 ms para 1 y 5 saltos respectivamente. De forma similar, el tiempo medio de envío de un archivo de 10 MB fue de 5.11 y 29.14 segundos para 1 y 5 saltos respectivamente. Finalmente, se realizó el análisis de un evento sísmico detectado en el edificio objeto de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del proyecto de investigación “Tecnologías IoT y redes inalámbricas de sensores aplicados a la monitorización de salud estructural en edificios esenciales de la ciudad de Cuenca”. Los autores agradecen el apoyo de la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca- Ecuador, el departamento Red Sísmica del Austro y la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur (EERCS).

REFERENCIAS

- [1] R. Udendhran and K. Muthuramalingam, “An Effective Framework to Enhance Intelligent Transport Systems using Cloud Computing,” *Proc. 2018 Int. Conf. Curr. Trends Toward Converging Technol. ICCTCT 2018*, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/ICCTCT.2018.8550976.
- [2] K. Naseer Qureshi, F. Bashir, and S. Iqbal, “Cloud Computing Model for Vehicular Ad hoc Networks,” *Proc. 2018 IEEE 7th Int. Conf. Cloud Networking, CloudNet 2018*, pp. 22–24, 2018, doi: 10.1109/CloudNet.2018.8549536.
- [3] V. Dattana, A. Kush, R. Hasan, and S. Mahmood, “Ad Hoc Network as a solution in Disaster Management,” *2020 Glob. Conf. Wirel. Opt. Technol.*, pp. 1–4, 2020, doi: 10.1109/gewot49901.2020.9391631.
- [4] A. Reichman and S. Wayer, “Ad-hoc network recovery after severe disaster,” *2019 IEEE Int. Conf. Microwaves, Antennas, Commun. Electron. Syst. COMCAS 2019*, pp. 22–24, 2019, doi: 10.1109/COMCAS44984.2019.8958195.
- [5] V. Tundjungarsi and A. Sabiq, “Android-based application using mobile adhoc network for search and rescue operation during disaster,” *ICECOS 2017 - Proceeding 2017 Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Sci. Sustain. Cult. Herit. Toward Smart Environ. Better Futur.*, pp. 16–21, 2017, doi: 10.1109/ICECOS.2017.8167124.
- [6] A. P. Patil, A. Behera, P. Anusha, and P. Masudi, “Efficient Communication in Disaster-hit Areas in Smart Cities using Infrastructure-less networks,” *2018 Int. Conf. Adv. Comput. Commun. Informatics, ICACCI 2018*, pp. 897–902, 2018, doi: 10.1109/ICACCI.2018.8554635.
- [7] A. Joshi, S. Dhongdi, S. Kumar, and K. R. Anupama, “Simulation of Multi-UAV Ad-Hoc Network for Disaster Monitoring Applications,” *Int. Conf. Inf. Netw.*, vol. 2020-Janua, pp. 690–695, 2020, doi: 10.1109/ICOIN48656.2020.9016543.
- [8] L. Alonso, J. Barbarán, J. Chen, M. Díaz, L. Llopis, and B. Rubio, “Middleware and communication technologies for structural health monitoring of critical infrastructures: A survey,” *Comput. Stand. Interfaces*, vol. 56, no. March 2017, pp. 83–100, 2018, doi: 10.1016/j.csi.2017.09.007.
- [9] L. Gallucci *et al.*, “An embedded wireless sensor network with wireless power transmission capability for the structural health monitoring of reinforced concrete structures,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 11, 2017, doi: 10.3390/s17112566.
- [10] P. Barsocchi *et al.*, “Wireless Sensor Networks for Continuous Structural Health Monitoring of Historic Masonry Towers,” *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 15, no. 1, pp. 22–44, 2020, doi: 10.1080/15583058.2020.1719229.
- [11] M. Muñoz, R. Guevara, S. González, and J. C. Jiménez, “Reliable Data Acquisition System for a Low-Cost Accelerograph Applied to Structural Health Monitoring,” *J. Appl. Sci. Eng. Technol. Educ.*, vol. 3, no. 2, pp. 181–194, 2020, doi: 10.35877/454ri.asci159.
- [12] Y. A. Sya’bani, A. Novianty, and A. L. Prasasti, “Implementation of Automatic First Arrival Picking On P-Wave Seismic Signal Using Logistic Regression Method,” *2020 8th Int. Conf. Inf. Commun. Technol. ICICT 2020*, pp. 1–5, 2020, doi: https://doi.org/10.1109/ICICT49345.2020.9166345.
- [13] I. G.- EPN, “Informes de los Últimos Sismos,” 2021. https://www.igepn.edu.ec/ultimos-sismos (accessed May 19, 2021).