



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

Implementación de micro controladores electrónicos de bajo costo en la adquisición de deformaciones unitarias en estructuras

Implementation of low-cost electronic microcontrollers in the acquisition of strains in structures

Yi Cheng Liu Kuan, M.Sc.

Profesor de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica,
San José, Costa Rica.

yi.liukuan@ucr.ac.cr

Código ORCID: 0000-0001-6034-2430

Josué Berrocal Flores, Ing.

Ingeniero Civil, Instituto Costarricense de Electricidad,
San José, Costa Rica.

jberrocal@ice.go.cr

Código ORCID: 0009-0005-9721-9379

Fecha de recepción: 19 agosto 2025 / Fecha de aprobación: 10 febrero 2026

Índices y Bases de Datos:

latindex

UCRIndex

REDIB

Dialnet

DOAJ
DIRECTORY OF
OPEN ACCESS
JOURNALS

PERIÓDICA

biblat
Bibliografía Latinoamericana

ERIH PLUS
EUROPEAN REFERENCE INDEX FOR THE
HUMANITIES AND SOCIAL SCIENCES

Políticas de Uso:



Revista Métodos y Materiales por LanammeUCR se distribuye bajo: Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. ISSN electrónico: 2215-4558

Implementación de micro controladores electrónicos de bajo costo en la adquisición de deformaciones unitarias en estructuras

Implementation of low-cost electronic microcontrollers in the acquisition of strains in structures

Yi Cheng Liu Kuan, M.Sc.

Profesor de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica,
San José, Costa Rica.
yi.liukuan@ucr.ac.cr
Código ORCID: 0000-0001-6034-2430

Josué Berrocal Flores, Ing.

Ingeniero Civil, Instituto Costarricense de Electricidad,
San José, Costa Rica.
jberrocal@ice.go.cr
Código ORCID: 0009-0005-9721-9379

Fecha de recepción: 19 agosto 2025 / Fecha de aprobación: 10 febrero 2026

RESUMEN

Este proyecto presenta la implementación de un sistema de adquisición de datos basado en tecnología de Internet de las Cosas (IoT) y microcontroladores electrónicos de bajo costo, orientado a la medición de deformaciones unitarias en estructuras. El hardware del sistema se integró mediante galgas extensiométricas en configuración de $\frac{1}{4}$ de puente, un módulo de medición de deformaciones unitarias, un microcontrolador Arduino Uno y un miniordenador Raspberry Pi, junto con diversas herramientas de software, incluyendo Cayenne para la conexión con la plataforma IoT. De esta manera, el sistema quedó configurado para la adquisición, visualización y registro de datos de deformación unitaria en tiempo real. Las mediciones obtenidas con el sistema electrónico fueron validadas mediante el monitoreo de deformaciones unitarias en dos puntos de un espécimen estructural en voladizo, sometido a incrementos escalonados de carga en su extremo libre. Los resultados experimentales se compararon con los valores analíticos calculados a partir de la teoría de flexión de Euler-Bernoulli, obteniéndose una diferencia máxima del 5 % respecto a las predicciones teóricas.

Palabras clave: adquisición de datos, Arduino Uno, Raspberry Pi, IoT, cayenne, deformaciones unitarias, galgas extensiométricas

ABSTRACT

This project presents the implementation of a data acquisition system based on Internet of Things (IoT) technology and low-cost electronic microcontrollers for measuring structural strains. The system hardware was integrated using a quarter-bridge strain gauge, a strain measurement module, an Arduino Uno, and a Raspberry Pi, along with several software tools, including Cayenne, to enable IoT connectivity. The resulting system allows real-time acquisition, visualization, and storage of strain measurement data. The performance of the electronic system was validated by monitoring strains at two locations on a cantilever structural specimen subjected to stepwise load increments at its free end. Experimental results were compared with analytical values calculated using Euler-Bernoulli beam theory, yielding a maximum difference of 5% relative to theoretical predictions.

Keywords: data acquisition, Arduino Uno, Raspberry Pi, IoT, cayenne, strains, strain gauges

1. INTRODUCCIÓN

Un sistema de adquisición de datos (DAQ, del inglés *Data Acquisition*) es un sistema integrado que permite convertir señales provenientes del entorno en datos digitales equivalentes, los cuales pueden ser procesados, analizados y almacenados (Cajas, Campoverde y Tello, 2012). Este tipo de sistema desempeña un papel crucial en ensayos estructurales, tanto en laboratorio como en campo, y constituye la plataforma tecnológica que hace posible el denominado *monitoreo de salud estructural*, un área de investigación que ha ganado relevancia en los últimos años debido a su capacidad para identificar daños estructurales incipientes, estudiar el comportamiento real de los sistemas estructurales (Liu, Loh y Ni, 2012) y verificar hipótesis relacionadas con cargas y diseño (Vásquez, 2020). Todo ello contribuye a mejorar las labores de mantenimiento y reforzamiento estructural, optimizar el diseño y aumentar la confianza en la seguridad de las estructuras (Bisby, 2006). A pesar de estas ventajas, el monitoreo estructural aún no es una práctica cotidiana, al menos en nuestro país, principalmente debido al alto costo de los sistemas DAQ y de los sensores asociados. En este contexto, el presente proyecto tiene como objetivo proponer una solución económica y funcional para el monitoreo de deformaciones unitarias, mediante el uso de microcontroladores electrónicos de bajo costo en conjunto con diversas aplicaciones destinadas a la adquisición, transferencia y documentación de datos de deformación. Este planteamiento se aborda desde un enfoque práctico; es decir, no se desarrollarán nuevos componentes electrónicos, sensores ni aplicaciones, sino que se integrarán e implementarán tecnologías y plataformas de libre acceso o disponibles comercialmente para su aplicación en el monitoreo estructural. En la sección siguiente se describen las tecnologías y plataformas empleadas en el presente proyecto.

2. MARCO TECNOLÓGICO

Raspberry Pi

En la última década se ha popularizado el uso de microcontroladores y microcomputadores de bajo costo en proyectos relacionados con el Internet de las Cosas (IoT), entre los cuales destacan la Raspberry Pi y Arduino. La Raspberry Pi es un microcomputador de placa única que dispone de sistema operativo, capacidad de procesamiento suficiente para aplicaciones de control y monitoreo, y pines de entrada y salida que permiten

la conexión directa de sensores y otros dispositivos electrónicos. Además, cuenta con diversas interfaces periféricas que amplían sus posibilidades de integración en sistemas electrónicos. Sus dimensiones reducidas y su bajo costo la convierten en una alternativa atractiva para el desarrollo de aplicaciones IoT. Según Charry (2015), entre sus principales ventajas se encuentran la amplia disponibilidad de aplicaciones y bibliotecas en programación, así como el uso de software libre y sistemas operativos de código abierto, características que contribuyen a reducir los costos de implementación.

Arduino

A diferencia de Raspberry Pi, el Arduino es una placa de microcontrolador basado en el microchip ATmega328P. Este dispositivo no utiliza un sistema operativo, sino que ejecuta un conjunto de instrucciones previamente programadas desde un entorno de desarrollo integrado (IDE) denominado *Arduino IDE*, instalado en un ordenador externo. El lenguaje de programación empleado es similar a C++, y el código generado es compilado y cargado directamente en la placa para su ejecución. Según Herrero y Sánchez (2015), Arduino, en sus múltiples versiones, presenta ventajas como su bajo costo, dimensiones reducidas, amplia disponibilidad de bibliotecas en programación, modelos específicos según la aplicación, y su filosofía de diseño y código abierto.

Tecnología IoT

El Internet de las Cosas (IoT) hace referencia a escenarios en los que la conectividad de red y la capacidad de cómputo se extienden a objetos, sensores y dispositivos de uso cotidiano, permitiendo que estos artículos generen, intercambien y consuman datos con mínima intervención humana. La implementación de esta tecnología se basa en distintos modelos de conectividad, entre los que se incluyen dispositivo a dispositivo, dispositivo a la nube, dispositivo a puerta de enlace y el intercambio de datos a través de un sistema *back-end* (Rose, Eldridge y Chapin, 2015). El presente proyecto se centró en el modelo de conectividad dispositivo a la nube.

Existen múltiples plataformas y aplicaciones que facilitan la implementación de soluciones basadas en IoT. En este proyecto se seleccionó la plataforma Cayenne, desarrollada por myDevices, para la implementación del sistema DAQ. Esta plataforma fue elegida por ofrecer archivos de configuración predefinidos de fácil implementación y sin necesidad de programación. Además, permite la

visualización inmediata de los datos en paneles, gráficos o tablas, así como su descarga de manera sencilla, lo que la convierte en una herramienta amigable para el usuario.

El protocolo de comunicación utilizado por la plataforma es MQTT, un protocolo ligero que requiere un bajo consumo de datos. Asimismo, la plataforma permite la conexión de diversos dispositivos, sensores y actuadores, y dispone de una aplicación móvil que facilita el monitoreo remoto de los proyectos desde cualquier lugar con acceso a Internet. También incorpora un sistema de alertas que notifica al usuario por correo electrónico o mensaje de texto cuando la medición de un sensor supera un umbral previamente establecido (myDevices, 2020).

Antecedentes

A nivel internacional, durante la última década se ha incrementado el desarrollo de proyectos relacionados con el uso de sistemas de adquisición de datos de bajo costo aplicados al monitoreo de la salud estructural. Entre estos se encuentran estudios orientados al monitoreo de variables de aceleración y vibración en puentes (Quezada et al., 2017), la determinación del período de vibración de puentes de concreto en Panamá (Rodríguez, Gallardo y Arauz, 2017), el monitoreo de bajo costo para evaluar el comportamiento dinámico de estructuras de ingeniería civil bajo condiciones de servicio (Mosquera, 2019), y el desarrollo de plataformas para la captura, almacenamiento, procesamiento y visualización de datos provenientes de redes acelerométricas destinadas al monitoreo estructural (Angarita, 2019).

Asimismo, existen investigaciones centradas en la implementación de plataformas basadas en Raspberry Pi y Arduino para el monitoreo de variables ambientales. Entre ellas destacan el desarrollo de plataformas tecnológicas para monitoreo climático (Piñeres y Mejía, 2013), sistemas de monitoreo de la calidad del aire en tiempo real (Fernández, 2015), el diseño e implementación de estaciones meteorológicas basadas en Raspberry Pi (Tobajas, 2016), sistemas de monitoreo de variables ambientales mediante redes de sensores inalámbricos y plataformas IoT (Quiñones et al., 2017), y el desarrollo de un transductor de torque de bajo costo utilizando galgas extensiométricas y protocolos de comunicación IoT (Correa, 2020).

En el ámbito nacional y aplicado a la ingeniería civil, se destaca el uso de sensores ultrasónicos controlados mediante el microcontrolador Arduino Uno para la medición del desplazamiento lateral vehicular en distintas secciones de la red vial nacional primaria de Costa Rica (Oconitrillo, 2018).

Si bien la presente investigación se enmarca en la misma línea de los estudios previamente citados, su aporte se centra en la implementación de un sistema de bajo costo, apoyado en diversas aplicaciones y basado en tecnología IoT, específicamente orientado a la medición, transferencia y documentación de deformaciones unitarias en estructuras.

3. IMPLEMENTACIÓN DEL DAQ DE DEFORMACIONES UNITARIAS

En general, un sistema de adquisición de datos se compone de sensores, un módulo de acondicionamiento de señal, un dispositivo DAQ o controlador, el software para la gestión del sistema y un ordenador para la visualización o el almacenamiento de los datos. La Figura 1 presenta el esquema general del sistema DAQ implementado en este proyecto, cuyos componentes se describen a continuación:

a) Galga extensiométrica BF350 (sensor): se empleó una galga extensiométrica modelo BF350, que consiste en un transductor cuya resistencia eléctrica varía en función de la deformación, transformando así la deformación mecánica en una señal eléctrica. Esta es una galga de tipo folio de $\frac{1}{4}$ de puente, fue adherida al espécimen estructural siguiendo el procedimiento recomendado por Idrovo y Quintanilla (2010). Las especificaciones técnicas del sensor se presentan en la Tabla 1.

b) Módulo de medición de deformación y acondicionamiento (strain gauge module): este componente electrónico cumple la función de acondicionamiento de la señal proveniente de la galga extensiométrica. Entre sus funciones principales se incluyen el filtrado de ruido, la completación del puente de medición y el acondicionamiento de la señal eléctrica mediante un puente de Wheatstone y un amplificador operacional en configuración diferencial. Este sistema permite amplificar la señal de bajo nivel y realizar el ajuste de cero. Gracias a la implementación de este módulo, la señal proveniente de la galga fue procesada adecuadamente antes de ser enviada al Arduino Uno, reduciendo el ruido y garantizando un rango de señal adecuado para su digitalización. Este componente electrónico fue aislado del espécimen metálico para evitar cortocircuitos por contacto eléctrico. Las especificaciones técnicas de este dispositivo también se presentan en la Tabla 1.

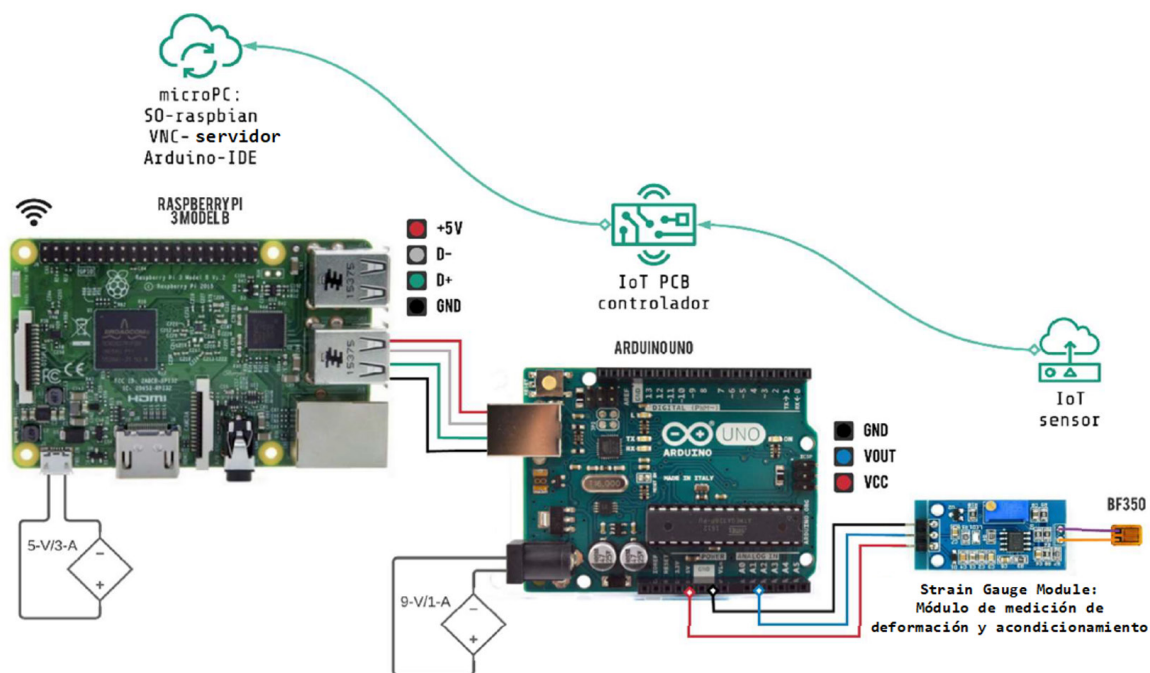


Figura 1. Esquema general del DAQ implementado.

Tabla 1. Especificaciones de los componentes electrónicos utilizados

Galga extensiométrica BF 350		Módulo de medición de deformación y acondicionamiento <i>Strain Gauge Module</i>	
Característica	Especificación	Característica	Especificación
Tipo	Laminar	Alimentación	5 V
Material de Respaldo	Resina fenólica modificada	Rango de salida analógica	0 V a 3.5 V
Resistencia nominal	350 Ω	Ganancia	1000
Rango de deformación	343 Ω a 357 Ω	Ganancia teórica	1100
Longitud activa	3 mm (tamaño de grilla 3.2 mm x 3.1 mm)	Temperatura de trabajo	-30 C° a 80 C°
Tipo de geometría	AA	Dimensiones	32 mm x 17 mm
Factor de galga	2-2.2	Peso	20 g
Temperatura de trabajo	-30 C° a 80 C°		

c) Arduino Uno (controlador): este es el encargado de ejecutar las instrucciones programadas en el entorno de desarrollo *Arduino IDE*. Su función principal consistió en convertir las señales analógicas provenientes del módulo de medición de deformación en señales digitales. Posteriormente, los datos digitales fueron transmitidos a la Raspberry Pi 3 Model B para su envío a la plataforma IoT. Las especificaciones técnicas del Arduino Uno se presentan en la Tabla 2.

d) Raspberry Pi 3 Model B (microordenador/servidor): este dispositivo sirvió como plataforma física para la gestión de la comunicación entre el Arduino Uno y la aplicación Cayenne en la nube, a través de una red inalámbrica WiFi. De este modo, permitió la transferencia de los datos de deformación desde el sistema de adquisición hacia la plataforma IoT. Sus especificaciones técnicas también se incluyen en la Tabla 2.

e) Cayenne (plataforma IoT): se utilizó la aplicación Cayenne como plataforma en la nube para la publicación, visualización, registro y descarga de los datos de deformación unitaria. Esta herramienta permitió supervisar las mediciones en tiempo real mediante paneles gráficos, así como almacenar la información en servidores remotos para su posterior análisis.

La Figura 2 ilustra el sistema DAQ ensamblado e implementado en el espécimen de validación. La Figura 3 presenta el diagrama de flujo del programa desarrollado para la obtención de deformaciones unitarias.

La Figura 2 ilustra el DAQ ensamblado e implementado en el espécimen de validación, y la Figura 3 muestra el diagrama de flujo de la programación para la obtención de deformaciones unitarias.

Tabla 2. Especificaciones de Arduino Uno y Raspberry Pi utilizados

Arduino UNO		Raspberry pi	
Característica	Especificación	Característica	Especificación
Procesador	ATmega328P	Procesador	BCM2837
Velocidad	16 MHz	Velocidad	1200 MHz
Alimentación	5 V	Alimentación	5 V / 3 A
IO digitales	14	RAM	1000 MB
Entradas analógicas	6	Pines GPIO	40
USB	1	Puertos	USB 4
Escudo ICSP	1	Puerto	Ethernet 1
Botón de reinicio	Si	Puerto HDMI	1
Dimensiones	68.6 mm x 53.4 mm	WiFi / Bluetooth	Si
		Almacenamiento externo	Tarjeta SD
		Dimensiones	85 mm x 56 mm

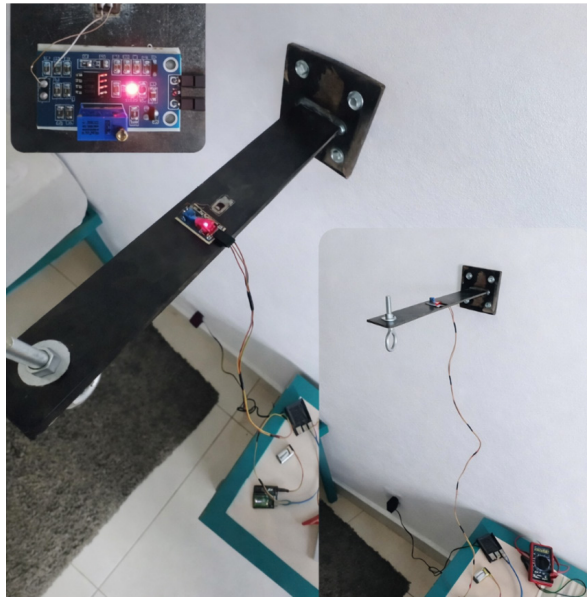


Figura 2. El DAQ ensamblado e implementado en el espécimen de validación.

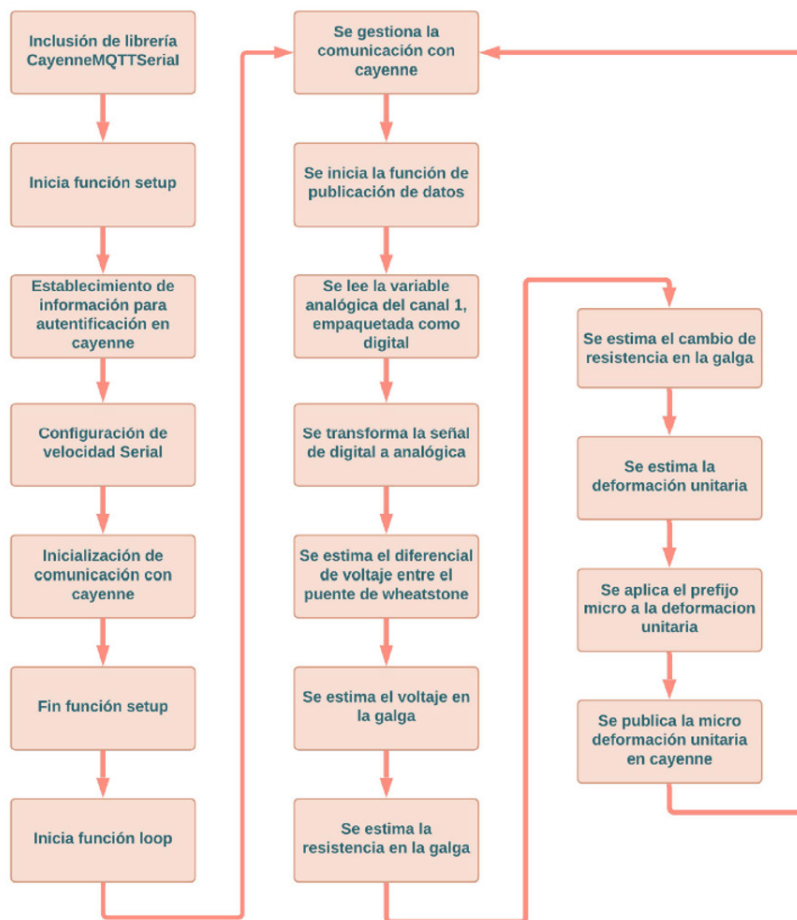


Figura 3. Diagrama de flujo para obtención de deformaciones unitarias.

4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL DAQ IMPLEMENTADO

Espécimen estructural de validación

El espécimen estructural utilizado para la validación del sistema de adquisición de datos (DAQ) consiste en una viga en voladizo, conformada por una pletina de 330 mm × 50 mm × 6.35 mm, soldada a una placa de 100 mm × 100 mm × 9.5 mm, la cual se encuentra apernada a una pared rígida para garantizar una conexión completamente rígida. Esta configuración puede observarse en la Figura 4, donde en a) se muestran las posiciones de las galgas extensiométricas instaladas en el espécimen, así como sus dimensiones principales, mientras que en b) se presenta el montaje real del sistema.

Las galgas extensiométricas fueron instaladas en dos posiciones. La Ubicación 1 se encuentra a 15 cm del punto de aplicación de la carga puntual, es decir, aproximadamente en el centro del espécimen estructural, y está adherida sobre la fibra extrema superior de la sección transversal. La Ubicación 2 se localiza a 22.5 cm

del punto de aplicación de la carga puntual, equivalente a una cuarta parte de la longitud del espécimen medida desde el empotramiento hacia el punto de carga. Esta galga también fue adherida sobre la fibra extrema superior en tensión de la sección transversal. Finalmente, se puede verificar fácilmente que las posiciones de ambas galgas se encuentran en la región donde cumple la hipótesis de Euler-Bernoulli.

Las pletinas comercializadas en Costa Rica cumplen con la norma ASTM A36. Debido a que no se dispone de un ensayo experimental específico para la pletina utilizada, se adoptará el valor teórico, asumiendo un esfuerzo de cedencia mínimo de 250 MPa. Las propiedades geométricas y mecánicas relevantes del espécimen se presentan en la Tabla 3.

Este modelo en voladizo fue adoptado como espécimen de validación debido a la facilidad para comparar los resultados experimentales con los valores teóricos. El espécimen estructural fue sometido a cargas puntuales escalonadas aplicadas en el extremo libre, específicamente en el gancho mostrado en la Figura 2.

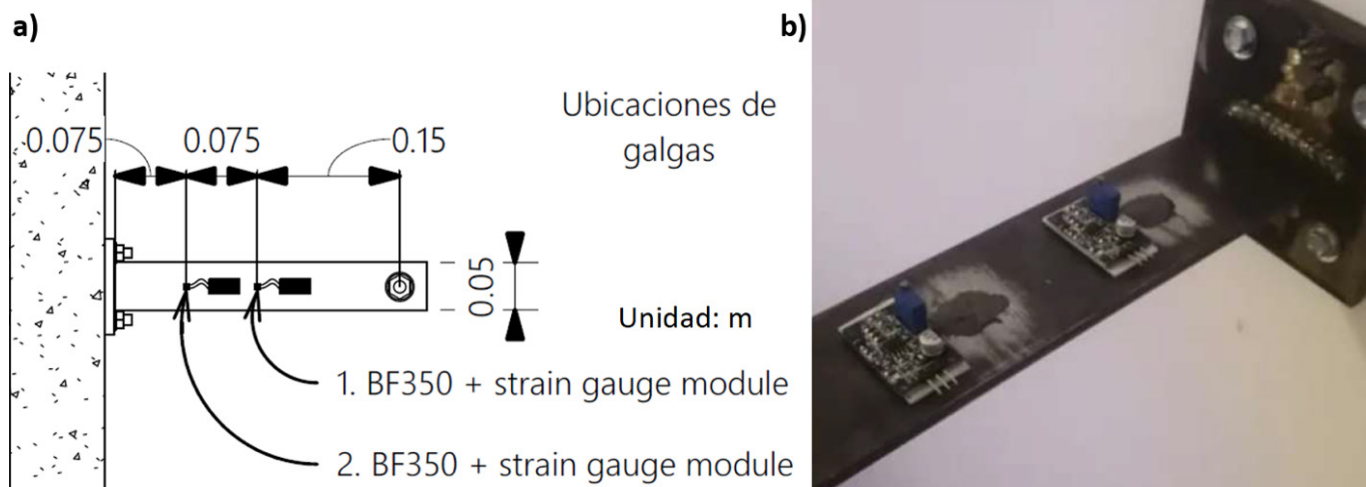


Figura 4. a) Ubicación de galgas extensiométricas en espécimen estructural, b) galgas extensiométricas y los módulos "Strain Gauge Module" instalados en el espécimen estructural ya empotrado.

Tabla 3. Propiedades geométricas y mecánicas del espécimen estructural

Propiedad	Valor
Momento de inercia de la sección transversal	1066.86 mm ⁴
Longitud del voladizo (desde el empotramiento hasta la carga puntual)	300 mm
Distancia del eje neutro a la fibra extrema superior de tensión	3.175 mm
Carga límite elástica del espécimen	280 N
Módulo de elasticidad	200 GPa
Esfuerzo de fluencia	250 MPa
Posición de la galga en ubicación 1 respecto a la carga puntual	150 mm
Posición de la galga en ubicación 1 respecto a la carga puntual	225 mm

Adherencia de las galgas extensiométricas

El proceso de adherencia de las galgas extensiométricas se realizó siguiendo las recomendaciones de Idrovo y Quintanilla (2010). Se evaluaron dos adhesivos de uso común en el mercado nacional, ambos de la marca Loctite: el denominado “*Súper Bonder*” y el “*Epoxi Bonder Metálico*”. Este último es un adhesivo epóxico para metales que desarrolla su resistencia en el transcurso de 24 horas y presenta una apariencia metálica.

El *Súper Bonder* tiene como principal ventaja su bajo costo; sin embargo, presenta varias limitaciones durante su aplicación. Entre sus desventajas se encuentran el secado rápido, que dificulta la manipulación precisa de la galga, la baja viscosidad que reduce la calidad de adherencia entre la galga y el metal, y la formación de una capa adhesiva muy delgada, lo que limita el área efectiva de contacto.

Por su parte, aunque el *Epoxi Bonder Metálico* posee un costo mayor, permite obtener una capa de adhesión más uniforme y adecuada, favoreciendo una unión efectiva entre la galga y la superficie metálica. Además, facilita una colocación más precisa de la galga y puede actuar como protección adicional frente a la intemperie. Su principal desventaja es que requiere un tiempo de curado de aproximadamente 24 horas para alcanzar su

resistencia óptima, y su preparación demanda el uso de implementos de protección personal durante la mezcla.

A partir de las experiencias adquiridas en el proceso de instalación, se recomienda no utilizar *Súper Bonder* para la fijación de galgas extensiométricas y optar, en su lugar, por el *Epoxi Bonder Metálico*. Para mejorar la calidad de adherencia, se recomienda preparar la superficie mediante lijado en dirección perpendicular al eje principal de la galga de modo que se genere una mejor superficie de adherencia. Asimismo, se debe respetar el tiempo de secado de 24 horas para garantizar el desarrollo adecuado de la resistencia del adhesivo.

Validación del sistema mediante incremento de cargas

La prueba de carga del espécimen y la adquisición de las deformaciones unitarias se realizaron mediante la aplicación de cargas incrementales, utilizando un recipiente al que se le añadieron volúmenes controlados de agua. El recipiente se colgó del gancho ubicado en el extremo libre del voladizo mediante una cuerda, tal como se muestra en la Figura 5, en la cual también se aprecia la interfaz de visualización de los registros enviados a la plataforma IoT Cayenne.

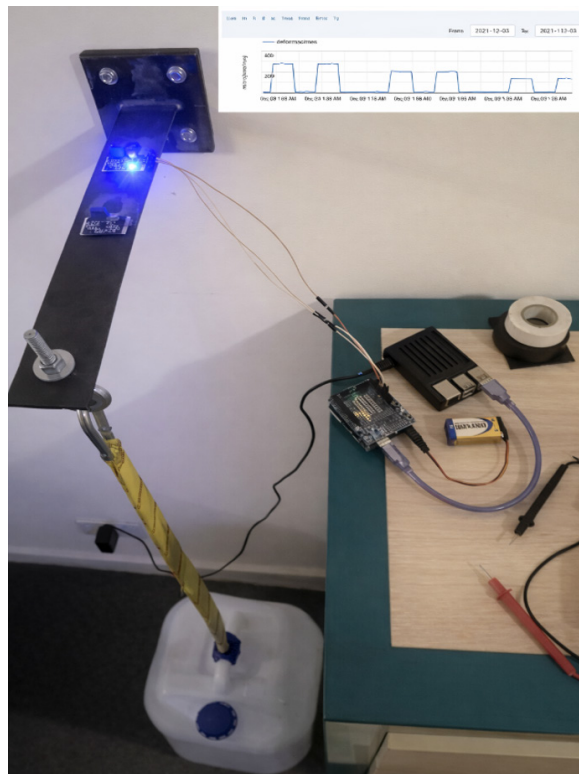


Figura 5. El DAQ en operación durante la prueba de carga y la visualización en la plataforma IoT Cayenne sobre las deformaciones unitarias monitoreadas por la galga en ubicación 1.

Las cargas se aplicaron en incrementos de 30 N, iniciando en este valor y alcanzando los 210 N, para un total de 7 niveles de carga. El DAQ envía una lectura cada 15 segundos a la plataforma en la nube Cayenne para su registro. Este intervalo de muestreo se definió debido a las limitaciones de la biblioteca Cayenne en su versión gratuita.

Como se observa en las Figuras 5 y 6, para cada nivel de carga se realizaron dos ciclos de carga y dos ciclos de descarga. En cada ciclo, el espécimen se carga y se deja en reposo durante 2 minutos, periodo durante el cual se registran 7 lecturas (primer ciclo de carga). Posteriormente, se descarga el espécimen y se mantiene sin carga durante 2 minutos adicionales, obteniéndose otras 7 lecturas correspondientes a la línea base, utilizadas posteriormente para la corrección de las mediciones.

Este procedimiento se repite para un segundo ciclo de carga de 2 minutos (otras 7 lecturas) y una segunda descarga de 2 minutos antes de avanzar al siguiente nivel de carga. De esta manera, para cada nivel de carga se obtuvieron 14 muestras experimentales de deformación unitaria y 14 muestras de línea base con el espécimen descargado.

Es importante aclarar que el ensayo busca medir la deformación producto de la carga puntual aplicada en el extremo libre del voladizo, por lo que las galgas fueron adheridas posterior a la soldadura y el montaje del espécimen para evitar la participación de las deformaciones residuales debido al trabajo realizado. Por otro lado, las deformaciones debidas al peso propio del espécimen o a los efectos derivados del proceso de adherencia de las galgas, en forma de un estado inicial de deformación, se eliminan mediante la función del ajuste de cero del módulo de medición y acondicionamiento de señal Strain Gauge Module, permitiendo que las lecturas registradas correspondan únicamente a las deformaciones generadas por las cargas aplicadas durante el ensayo.

Deformación unitaria vrs número de monitoreo

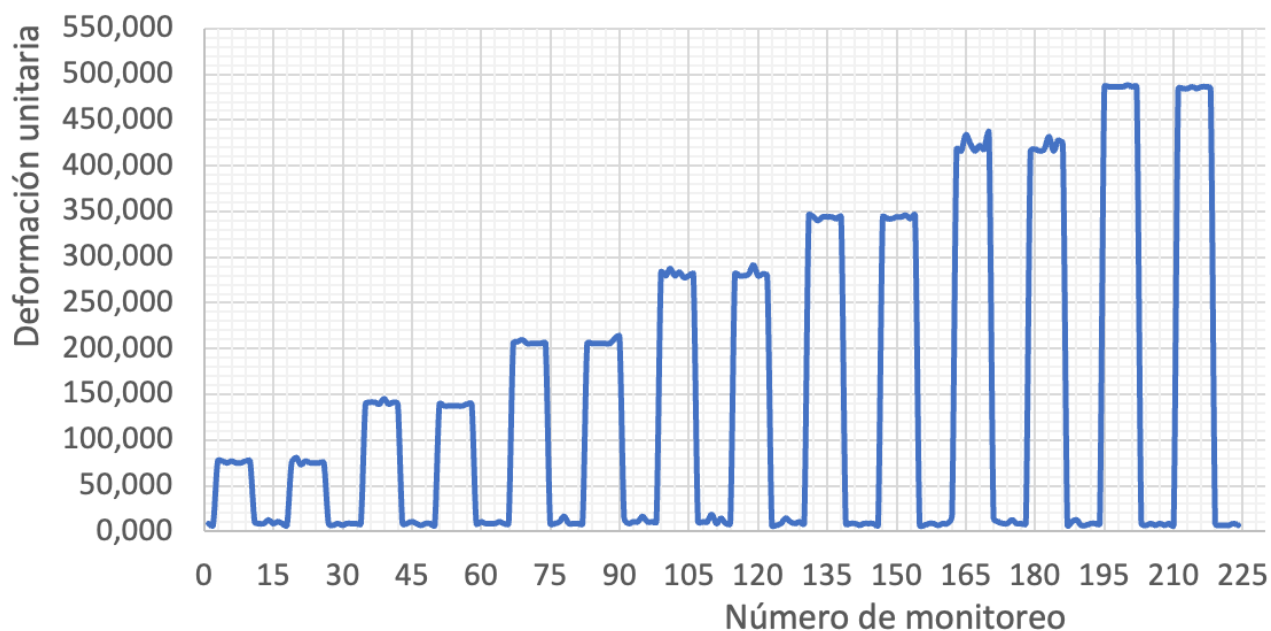


Figura 5. Deformaciones unitarias (en *microstrain* $\mu\epsilon$) adquiridas por la galga en ubicación 1 durante la prueba de carga.

Deformación unitaria vrs número de monitoreo

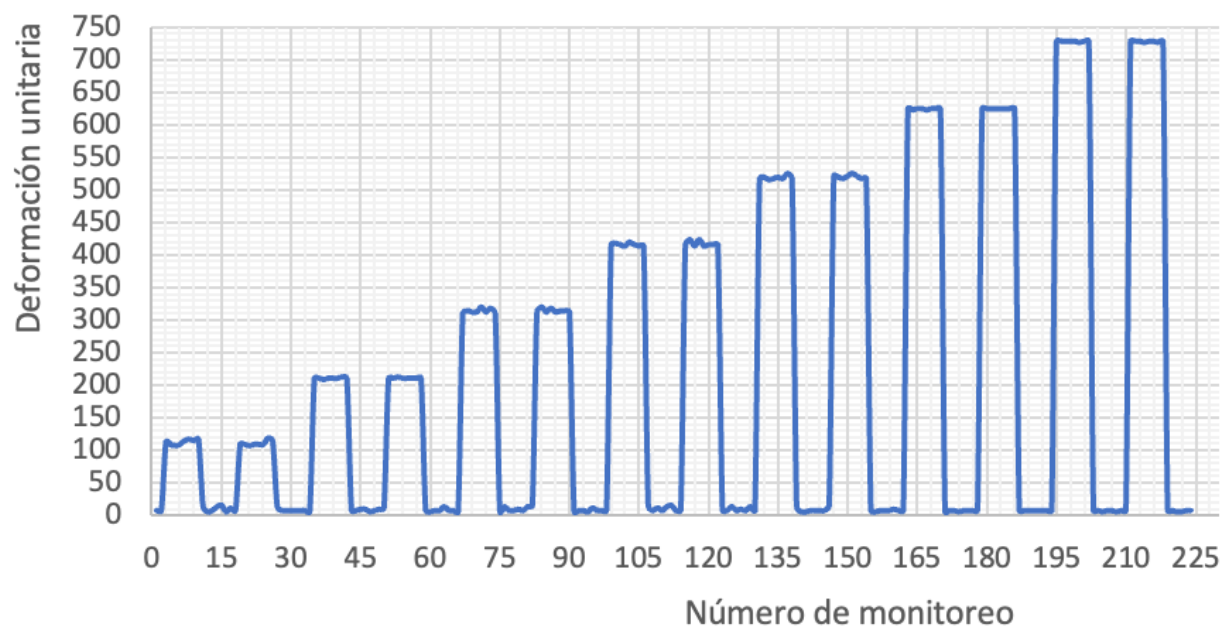


Figura 6. Deformaciones unitarias (en *microstrain* $\mu\epsilon$) adquiridas por la galga en ubicación 2 durante la prueba de carga.

Los promedios y la desviación estándar de las deformaciones unitarias registradas para cada nivel de carga y para la línea base se presentan en la Tabla 4 para la galga extensiométrica ubicada en la Ubicación 1, y en la Tabla 5 para la correspondiente a la Ubicación 2.

Las deformaciones unitarias experimentales efectivas debidas únicamente a la acción de la carga se determinaron substrayendo el promedio de la medición de línea base del promedio de la medición de deformación experimental.

Tabla 4. Deformaciones unitarias promedio en la ubicación 1.

Peso ensayado (N)	Promedio de la medición (Deformación + línea base) ($\mu\epsilon$)	Línea base ($\mu\epsilon$)	Desviación estándar de línea base ($\mu\epsilon$)	Promedio deformación experimental efectiva ($\mu\epsilon$)	Desviación estándar ($\mu\epsilon$)	Deformación Teórica ($\mu\epsilon$)	Diferencia exp. vrs. teoría (%)
30	75.8	8.4	1.6	67.4	1.7	65.7	2.60
60	139.4	8.5	1.1	130.8	2.1	131.4	-0.41
90	206.9	10.2	2.8	196.7	2.5	197.1	-0.21
120	281.9	10.2	3.1	271.7	3.5	262.8	3.41
150	344.0	7.9	1.1	336.1	1.6	328.4	2.32
180	422.5	9.6	2.8	412.9	6.8	394.1	4.75
210	486.4	7.4	1.0	479.0	1.1	459.8	4.17

Tabla 5. Deformaciones unitarias promedio en la ubicación 2.

Peso ensayado (N)	Promedio de la medición (Deformación + línea base) ($\mu\epsilon$)	Línea base ($\mu\epsilon$)	Desviación estándar de línea base ($\mu\epsilon$)	Promedio deformación experimental efectiva ($\mu\epsilon$)	Desviación estándar ($\mu\epsilon$)	Deformación Teórica ($\mu\epsilon$)	Diferencia exp. vrs. teoría (%)
30	112.6	10.0	3.1	102.7	3.9	98.5	4.18
60	211.6	9.0	2.1	202.6	0.9	197.1	2.82
90	314.9	9.5	3.1	305.4	3.2	295.6	3.33
120	417.3	10.3	2.8	407.0	3.2	394.1	3.26
150	520.1	9.4	2.9	510.7	2.8	492.7	3.67
180	625.3	8.1	0.7	617.2	0.7	591.2	4.39
210	728.7	7.9	0.9	720.8	0.8	689.7	4.51

La validación de las mediciones experimentales se llevó a cabo mediante su comparación con los valores teóricos obtenidos a partir de la teoría de flexión de vigas (Timoshenko, 1955), utilizando como datos de entrada las propiedades geométricas y mecánicas del espécimen presentadas en la Tabla 3. De acuerdo con esta teoría, el esfuerzo σ en cualquier punto material a una distancia “ y ” respecto al eje neutro es expresado como:

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad 1$$

Aquí, el símbolo M denota momento flector en la sección, e I es el momento de inercia de la sección.

La deformación unitaria por flexión ε para un punto dado de una viga en voladizo, que es el caso de este espécimen estructural, queda expresada como:

$$\varepsilon = \frac{My}{EI} = \frac{PLy}{EI} \quad 2$$

Aquí, P denota la carga aplicada en el extremo del voladizo, L es la distancia medida desde el punto de aplicación de la carga hasta la posición de la galga extensiométrica y E es el módulo de elasticidad.

A partir de los resultados obtenidos con la galga extensiométrica en ubicación 1, se observa que la línea base experimenta fluctuaciones con una desviación estándar que varía entre 1 y 3 $\mu\epsilon$. En comparación con el valor medio de la línea base, esta fluctuación representa aproximadamente entre 13 % y 30 % de dicho valor medio. Por el otro lado, la desviación estándar de las mediciones de deformación cuando el espécimen se encuentra cargado oscila entre 1 y 6.8 $\mu\epsilon$, lo que equivale a una variación de aproximadamente 0.25 % a 2.6 % con respecto a los valores promedio. Finalmente, el porcentaje de error en comparación con la predicción teórica varía desde 0.21 % para una carga de 90 N hasta 4.75 % para una carga de 180 N.

Para la ubicación 2, la fluctuación de la línea base presenta un nivel similar al observado en la ubicación 1, representando aproximadamente entre 8 % y 33 % del valor medio de la línea base. Asimismo, la desviación estándar de las mediciones de deformación bajo carga varía entre 0.6 y 3.9 $\mu\epsilon$, lo que corresponde a una dispersión de aproximadamente 0.1 % a 3.8 % con respecto a los valores promedio.

Es importante destacar que la dispersión de las mediciones es prácticamente independiente del nivel de carga para ambas galgas y no supera los 4 $\mu\epsilon$ en la mayoría de los casos. Además, la diferencia porcentual entre las mediciones experimentales y las predicciones teóricas no excede el 4.5 % en ninguno de los niveles de carga analizados. Se observa también que, en general, las mediciones experimentales resultan entre 3 % y 4 % mayores que las predicciones teóricas. Una posible explicación de esta diferencia es la sobreestimación del módulo de elasticidad teórico empleado en los cálculos.

Por otra parte, también es claro que las variaciones de temperatura ambiental pueden influir directamente en las mediciones de deformación registradas por las galgas extensiométricas y podría ser una posible fuente de error en el ensayo. A pesar de que no se cuenta con una medición de la temperatura, el ensayo se llevó a cabo en un aposento con condiciones térmicas controladas. Además, la duración total de las mediciones fue inferior a una hora, por lo que se espera que la influencia de las variaciones de temperatura haya sido mínima.

5. COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS CONTRA UN DAQ ESTÁNDAR

La Tabla 6 muestra la comparación de las características del sistema DAQ de bajo costo desarrollado contra un sistema DAQ estándar de renombre (National Instruments).

Tabla 6. Comparación entre el DAQ de bajo costo desarrollado y un DAQ estándar.

Característica	DAQ IoT	CompactDAQ y módulo de adquisición NI-9237
Costo	95 USD	~9000 USD
Resolución	10 bits	16 bits
Niveles digitales	1024	65536
Precisión	4.882 mV	0.076 mV
Multivariable	No	Si
Registro de datos	En la nube	En memoria interna
Visualización de datos	En internet	En ordenador
Flexible	Si	No
Compacto	Si	No
Programable	Si	Sí
Frecuencia de muestreo	Mediciones estáticas (0.066 Hz)	100 KHz
Software	Libre	Costo asociado

Entre las principales ventajas del sistema propuesto, en comparación con un sistema de adquisición de datos estándar de referencia, se destacan su bajo costo, el acceso a los registros de datos en la nube, la visualización remota de la información a través de internet, la facilidad de configuración tanto a nivel de hardware como de software, sus dimensiones reducidas y el uso de software libre.

Por otra parte, al tratarse de un sistema implementado en placas reducidas, presenta algunas limitaciones frente a un DAQ estándar, tales como la baja resolución y precisión, la capacidad de registro y documentación reducida de una sola variable y una baja frecuencia de muestreo.

No obstante, si se analizara el sistema de adquisición de datos desde un enfoque de costo-beneficio, se puede concluir que, a pesar de su baja resolución y frecuencia de muestreo, el sistema puede implementarse en el monitoreo de deformaciones unitarias estáticas siendo una alternativa económica, flexible y de fácil implementación, con un nivel de confiabilidad suficiente para este tipo de aplicaciones.

6. CONCLUSIONES

Se logró desarrollar e implementar un sistema de adquisición de datos de bajo costo, con un valor aproximado de 95 USD. Esto implica un ahorro considerable a la hora de implementar sistemas de adquisición de datos en la obtención de deformaciones unitarias y abre oportunidades para una mayor popularización de la instrumentación, monitoreo y la obtención de parámetros estructurales de campo que juegan un rol cada vez más importante hoy en día al ser estos los insumos indispensables para el desarrollo de los denominados “gemelos digitales”, para la retroalimentación a los modelos BIM (Modelado de información de construcción) y en la era de “big data”.

El DAQ desarrollado integra tecnología IoT mediante la plataforma Cayenne de myDevices, en su versión gratuita, permite monitorear en tiempo real las deformaciones unitarias que experimenta el espécimen bajo cargas estáticas. Los registros pueden ser consultados desde cualquier dispositivo con acceso a internet. Bajo las limitaciones de la versión gratuita

de la plataforma, se obtuvo una tasa de muestreo de 4 muestras por minuto (una medición cada 15 segundos), con una dispersión máxima de aproximadamente 4 μe en las mediciones y una diferencia menor al 4.5 % en comparación con los valores teóricos calculados mediante la teoría de flexión de vigas.

7. REFERENCIAS

- Angarita, W. (2019). *Plataforma de captura, almacenamiento, procesamiento, y visualización de datos de una red acelerométrica orientada al monitoreo de salud estructural*. Colombia: Universidad Cooperativa de Colombia.
- Bisby, L. A. (2006) *ISIS and SAMCO Educational Module 5: An Introduction to Structural Health Monitoring*. Canadá: SAMCO.
- Cajas, R. Campoverde, F. Tello, E. (2012). *Diseño e implementación de una tarjeta de adquisición de datos de alta velocidad y su aplicación en el diseño de laboratorios académicos basados en software y hardware libre*. España: Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.
- Charry, O. (2015). *Raspberry Pi. Revisión técnica: Guía de uso y programación*. Colombia: Servicio Nacional de Aprendizaje. Centro Tecnológico del Mobiliario.
- Correa, A. (2020). *Desarrollo de un transductor de torque de bajo costo, utilizando galgas extensiométricas y protocolos de comunicación del internet de las cosas*. Colombia: Universidad Eafit.
- Fernández, I. (2015). *Monitorización de la calidad del aire en tiempo real mediante el procesamiento de eventos complejos*. España: Universidad de Cádiz.
- Herrero, J. y Sánchez, J. (2015). *Una mirada al mundo de arduino*. España: Universidad Alfonso X el Sabio.
- Idrovo, P. y Quintanilla, L. (2010). *Aplicación de galgas extensiométricas en el laboratorio de mecánica de materiales de la Carrera de Ingeniería Mecánica para la obtención de deformaciones en elementos sometidos a cargas combinadas*. España: Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.
- Liu Kuan, Y.-C., Loh, C.-H., & Ni, Y.-Q. (2012). Stochastic subspace identification for output-only modal analysis: application to super high-rise tower under abnormal loading condition. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 42(4), 477-498. Obtenido de Wiley Online Library.
- Mosquera, I. (2019). *Monitorización de bajo coste para la evaluación del comportamiento dinámico de estructuras de ingeniería civil bajo condiciones de servicio*. España: Universidad Politécnica de Madrid.
- MyDevices. (2020). Cayenne: Características. Recuperado de: <https://developers.mydevices.com/cayenne/features/>
- Oconitrillo, E. (2018). *Uso de sensores ultrasónicos en la medición de desplazamiento lateral vehicular en diferentes secciones de la red vial nacional primaria de Costa Rica*. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Piñeres, G. y Mejia, A. (2013) *Plataformas tecnológicas aplicadas al monitoreo climático*. Colombia: Universidad de la Costa.
- Quezada, A. Chango, P. Benavides, V. Ramírez, R. Enciso, L. (2017). *Desarrollo de un sistema de monitoreo para estructuras de puentes*. Ecuador: Universidad Técnica Particular de Loja.
- Quiñones, M. González, V. Torres, R. Jumbo, M. (2017). *Sistema de monitoreo de variables medioambientales usando una red de sensores inalámbricos y plataformas de internet de las cosas*. Ecuador: Universidad Tecnológica Equinoccial.
- Rodríguez, S. Gallardo, J. Arauz, O. (2017). *Estudio del periodo de vibración de puentes de concreto en Panamá*. Panamá: Universidad Tecnológica de Panamá.
- Rose, K. Eldridge, S. Chapin, L. (2015). *La internet de las cosas: Una breve reseña*. Suiza: Internet Society.
- Timoshenko, S. P. (1955). *Strength of materials. Part I: Elementary theory and problems* (3rd ed.). D. Van Nostrand Company.
- Tobajas, A. (2016). *Diseño e implementación de una estación meteorológica con raspberry pi*. España: Universidad Abierta de Cataluña.
- Vásquez González, S. S. (2020). *Implementación de métodos de identificación de sistemas multivariables en el dominio del tiempo con base en vibraciones ambientales para edificaciones*. Proyecto de graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.