



**unitec**®  
LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES®

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROYECTO FASE I**

**DISEÑO DE SISTEMA ELECTRÓNICO PARA MONITOREO DE VIBRACIONES  
ESTRUCTURALES**

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO**

**INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**PRESENTADO POR:**

**11511071 ALISON ANNETH ROSSELL FUNEZ**

**ASESOR METODOLÓGICO: ING. RIGOBERTO CASTRO CASTRO**

**ASESOR TEMÁTICO: ING. VÍCTOR ALONZO MARTÍNEZ REYES**

**CAMPUS TEGUCIGALPA; ENERO 2020**

## **DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS**

Para el proyecto que se presenta a continuación, le quiero dar gracias primero a Dios por permitirme culminar este paso de mi formación profesional. Por guiarme y darme la sabiduría necesaria ante toda situación presentada.

De manera especial, dedico este proyecto a mis padres Wilmer Rossell y Marilen Funez que dieron todo su esfuerzo por darme la mejor educación posible y que me animan cada día a ser una mejor persona. También dedico este proyecto a mis hermanas Kimberly Rossell y Jennifer Rossell, y a Arnold Flores, quienes en todo momento estuvieron presentes y me dieron su apoyo.

A mis amigos y colegas de ingeniería, quienes han estado presente en todo este camino, de manera especial a Kevin Martínez, Luis Escobar y Victor Borrayo que me dieron su apoyo no sólo como amigos, pero como ingenieros.

Por último, pero no menos importante quiero agradecer al Ing. René León, que me brindó su apoyo desde el inicio hasta el final de la carrera y a los que me han inspirado a querer ser un mejor profesional y apasionarme por la carrera: Ing. Daniel Ramos, Ing. Pablo Meraz y al personal que labora en el laboratorio de Física en el cuál dediqué mi tiempo como instructora: Otoniel Zavala.

## RESUMEN EJECUTIVO

Las infraestructuras de tipo civil incluyen puentes, edificios, obras hidráulicas, rutas de transporte, entre otras. La seguridad estructural de estas contempla los aspectos de resistencia, estabilidad y condiciones de servicio. La tecnología de medición, transmisión y análisis de los parámetros más importantes para asegurar la calidad estructural de manera remota aún no se utiliza en Honduras, convirtiéndose en una necesidad para el control de calidad de manera eficiente y de bajo costo.

El presente proyecto se enfoca en el diseño de un sistema electrónico capaz de medir y transmitir datos de aceleraciones en una estructura civil. Este proyecto tiene un carácter científico investigativo, el desarrollo de este dispositivo es de interés para utilizarlo en la medición de parámetros de vibración en estructuras civiles en Honduras. Estos parámetros que son la aceleración y velocidad de una vibración en determinado tiempo son fundamentales para asegurar la calidad y tiempo de vida útil de estructuras, con el propósito de aumentar la seguridad estructural de las edificaciones en Honduras.

El proyecto ha planteado la necesidad de la utilizar tecnología de bajo costo, bajo consumo energético y comunicación de largo alcance. Mediante uso de un microcontrolador ESP 32, un sensor MPU 6050 y una base de datos MySQL se ha logrado hacer un sistema de medición de aceleraciones y transmisión de datos. Finalmente se implementó un sistema de energizado fotovoltaico que alimenta el sistema de manera autosuficiente, de bajo costo y bajo mantenimiento.

De esta manera se logró realizar el diseño de un sistema electrónico de monitoreo de vibraciones, dicho sistema será útil para el análisis de vibraciones estructurales en edificaciones en Honduras. La implementación de este sistema servirá como método remoto de captación de datos vibraciones necesarios para el estudio de seguridad de estructuras en Honduras. Este sistema se logró utilizando un sensor MEMS MPU 6050 en conjunto con un microcontrolador ESP 32 para la medición, procesamiento y transmisión de datos hacia una base de datos en internet. Adicionalmente se realizó el cálculo de un sistema fotovoltaico para generación de energía que requiere de un panel solar de 5W y corriente de 0.3 A en conjunto con una batería recargable de 7.4 V, 2000 mAh.

## **EXECUTIVE SUMMARY**

Civil infrastructures include bridges, buildings, hydraulic works, transportation, among others. The structural safety of these include the aspects of Resistance, stability and service conditions. The technology for measurement, transmission and analysis of the most important parameters to ensure structural quality remotely is not yet used in Honduras, becoming a necessity for quality control in an efficient and low-cost systems.

This project focuses on the measurement and transmission of accelerations parameters in a structure in a given period of time using electronic sensors and a data transmission system. These parameters are essential to ensure the quality of a structure, with the purpose of increasing the structural safety of buildings in Honduras.

The project has goal to achieve the use of low-cost technology, low energy consumption and long-range communication. Through the use of an ESP 32 microcontroller, an MPU 6050 sensor and a MySQL database, the acceleration measurements and data transmission system has been achieved. Finally, a photovoltaic energizing method was implemented in the system to create a self-sufficient, low cost and low maintenance system.

The design of a vibration monitoring system has been achieved to collect data that will be useful for the analysis of vibrations that determine the quality of the structures. By having eliminated human intervention in the measurement and transmission process, it was created a self-sufficient low maintenance system, ready to be implemented in structures that are subjected to many efforts. This system was achieved using a MEMS MPU 6050 sensor and a ESP 32 microcontroller for measuring, processing and transmitting data to an internet database. In addition, the design of a photovoltaic system was made to provide energy to the system, this design was made with a solar panel that provides 5W and 0.3 A current, and a 7.4 V, 2000 mAh rechargeable battery.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| Lista de siglas.....  | 1  |
| Glosario.....   | 2  |
| I. Introducción.....  | 3  |
| II. Planteamiento del Problema.....   | 5  |
| 2.1 Precedentes del problema.....   | 5  |
| 2.2 Definición del Problema.....  | 5  |
| 2.3 Justificación.....  | 6  |
| 2.4 Preguntas de investigación.....   | 6  |
| 2.5 Objetivos.....  | 7  |
| 2.5.1 Objetivo General.....   | 7  |
| 2.5.2 Objetivos específicos.....  | 7  |
| III. Marco teórico.....   | 8  |
| 3.1 Trabajos Previos.....   | 8  |
| 3.1.1 Sistema de bajo costo para monitoreo de disturbios de vibración en máquinas rotatorias..... | 8  |
| 3.1.2 Diseño e implementación de un analizador virtual de vibraciones mecánicas.....              | 8  |
| 3.1.3 Sistema de monitoreo de vibraciones para la detección de fallas.....                        | 9  |
| 3.1.4 Distributed FBG vibration sensing based on OFDR H Hmploying a DFB-LD.....                   | 9  |
| 3.1.5 Development of a small energy scavenger.....  | 10 |
| 3.1.6 Diseño de prototipo de sistema vertical fotovoltaico y captación de agua de lluvia.....     | 10 |
| 3.2 Vibraciones mecánicas.....  | 10 |
| 3.2.1 Clasificación de las vibraciones.....   | 11 |
| 3.2.2 Procedimiento del análisis de la vibración teórica.....                                     | 11 |
| 3.2.3 Estabilidad de sistemas.....  | 12 |
| 3.2.4 Respuesta de sistemas sometidos a fuerzas.....  | 13 |
| 3.2.5 Vibraciones en estructuras.....   | 13 |
| 3.3 Detección de vibraciones.....   | 14 |
| 3.4 Normativas para la medición de vibraciones estructurales.....                                 | 14 |
| 3.4.1 Factores a considerar en la medición de vibraciones en una estructura.....                  | 15 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.4.2 | Medición de vibraciones.....   | 19 |
| 3.5   | Métodos de análisis de estructuras.....  | 20 |
| 3.6   | Dispositivos electrónicos utilizados para la medición y procesamiento de datos en vibraciones..... | 21 |
| 3.6.1 | Sensor piezoeléctrico.....   | 21 |
| 3.6.2 | Acelerómetro capacitivo.....   | 21 |
| 3.6.3 | Arduino MEGA.....  | 22 |
| 3.6.4 | MPU6050.....   | 23 |
| 3.7   | Transmisión de Datos.....  | 23 |
| 3.7.1 | Sistemas de comunicación.....  | 23 |
| 3.7.2 | Medios de transmisión.....   | 26 |
| 3.7.3 | Transmisión por radiofrecuencia.....   | 26 |
| 3.7.4 | El internet de las cosas (IoT).....  | 27 |
| 3.7.5 | NRF24L01 Wireless RF Module.....   | 28 |
| 3.7.6 | ESP 32.....  | 28 |
| 3.8   | Métodos de energizado.....   | 30 |
| 3.8.1 | Energizado piezoeléctrico.....   | 30 |
| 3.8.2 | Energía Solar Fotovoltaica.....  | 32 |
| IV.   | Metodología.....   | 37 |
| 4.1   | Enfoque.....   | 37 |
| 4.2   | Variables de Investigación.....  | 37 |
| 4.3   | Técnicas e Instrumentos Aplicados.....   | 38 |
| 4.4   | Materiales.....  | 38 |
| 4.5   | Metodología de estudio.....  | 40 |
| 4.5.1 | Análisis de proyectos relacionados con el tema.....  | 40 |
| 4.5.2 | Determinación de variables a medir.....  | 40 |
| 4.5.3 | Adquisición de datos.....  | 40 |
| 4.5.4 | Procesamiento de datos.....  | 42 |
| 4.5.5 | Transmisión de datos.....  | 45 |
| 4.5.6 | Energizado de sistema.....   | 49 |
| 4.5.7 | Diseño de prototipo.....   | 52 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.6   | Metodología de Validación.....                          | 54 |
| 4.6.1 | Medición y procesamiento de datos de aceleraciones..... | 54 |
| 4.6.2 | Conexión del microcontrolador al wifi .....             | 60 |
| 4.6.3 | Transmisión de datos al servidor.....                   | 60 |
| 4.6.4 | Sistema fotovoltaico.....                               | 62 |
| 4.7   | Cronograma de actividades.....                          | 65 |
| V.    | Resultados y Análisis.....                              | 66 |
| 5.1   | Análisis de documentos .....                            | 66 |
| 5.2   | Variables a medir .....                                 | 66 |
| 5.3   | Elección de componentes.....                            | 66 |
| 5.3.1 | Pruebas del prototipo.....                              | 67 |
| 5.4   | Sistema de comunicación.....                            | 72 |
| 5.5   | Método de alimentación de energía.....                  | 73 |
| 5.6   | Presupuesto .....                                       | 73 |
| VI.   | Conclusiones .....                                      | 74 |
| VII.  | Recomendaciones.....                                    | 75 |
| VIII. | Aplicabilidad.....                                      | 76 |
| IX.   | Evolución de trabajo actual .....                       | 77 |
|       | Bibliografía.....                                       | 78 |
|       | Anexos.....   | 81 |

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 1. Esquema de medición de vibración .....  | 14 |
| Ilustración 2. British Standard BS 7385 para análisis de vibraciones estructurales .....     | 15 |
| Ilustración 3. Clasificación de estructuras con relación a su resistencia de vibración ..... | 17 |
| Ilustración 4. Categorización de estructuras según grupo de edificios.....                   | 18 |
| Ilustración 5. Sensor Piezoeléctrico .....   | 21 |
| Ilustración 6. Acelerómetro capacitivo .....   | 22 |
| Ilustración 7. Arduino MEGA 2560.....  | 22 |
| Ilustración 8. Elementos de los sistemas de comunicación. ....                               | 23 |
| Ilustración 9. Número de medios de transmisión por número de equipos.....                    | 26 |
| Ilustración 10. NRF24L01 WIRELESS RF MODULE.....   | 28 |
| Ilustración 11. Pines del ESP 32 .....   | 30 |
| Ilustración 12. Circuito de puente de diodos .....   | 31 |
| Ilustración 13. Partes de un sensor piezoeléctrico .....                                     | 32 |
| Ilustración 14. Funcionamiento de una celda solar .....                                      | 33 |
| Ilustración 15. Partes de un panel solar .....   | 34 |
| Ilustración 16. Dirección de los ejes del MPU 6050 .....                                     | 41 |
| Ilustración 17. Conexión del sensor con el microprocesador ESP 32.....                       | 42 |
| Ilustración 18. Configuración de sketch para procesamiento de datos .....                    | 43 |
| Ilustración 19. Configuración de sketch para procesamiento de datos .....                    | 43 |
| Ilustración 20. Configuración de sketch para procesamiento de datos .....                    | 44 |
| Ilustración 21. Configuración de sketch para procesamiento de datos .....                    | 44 |
| Ilustración 22. Diagrama de conexión del microcontrolador con el módulo de transmisión..     | 45 |
| Ilustración 23. ESP - WROOM – 32.....  | 46 |
| Ilustración 24. Configuración de sketch para transmisión de datos.....                       | 46 |



|   |    |
|---|----|
| Ilustración 25. Configuración de sketch para transmisión de datos.....          | 47 |
| Ilustración 26. Configuración de sketch para transmisión de datos.....          | 47 |
| Ilustración 27. Configuración de sketch para transmisión de datos.....          | 48 |
| Ilustración 28. Creación de la estructura de la base de datos.....              | 48 |
| Ilustración 29. Diagrama de conexión de sistema de energizado.....              | 51 |
| Ilustración 30. Ficha técnica del panel solar seleccionado .....                | 52 |
| Ilustración 31. Modelado 3D de caja protectora.....                             | 53 |
| Ilustración 32. Modelado 3D de caja protectora.....                             | 53 |
| Ilustración 33. Modelado 3D de elementos utilizados .....                       | 54 |
| Ilustración 34. Pruebas de Cantilever para 1Hz .....                            | 55 |
| Ilustración 35. Definición de la carga armónica para 1 Hz .....                 | 56 |
| Ilustración 36. Mallado del sólido para la simulación .....                     | 56 |
| Ilustración 37. Pruebas de Cantilever para 2 Hz.....                            | 57 |
| Ilustración 38. Pruebas de Cantilever para 3 Hz.....                            | 58 |
| Ilustración 39. Pruebas de Cantilever para 5 Hz.....                            | 59 |
| Ilustración 40. Monitor serial indicando que se logró la conexión al Wifi ..... | 60 |
| Ilustración 41. Inicio de sesión en phpMyAdmin .....                            | 61 |
| Ilustración 42. Página de inicio de phpMyAdmin .....                            | 61 |
| Ilustración 43. Tabla de datos recibidos.....                                   | 62 |
| Ilustración 44. Mapa de irradiación horizontal global de Honduras .....         | 63 |
| Ilustración 45. Datos de irradiancia para UNITEC .....                          | 64 |
| Ilustración 46. Cronograma de actividades .....                                 | 65 |
| Ilustración 47. Componentes electrónicos utilizados.....                        | 67 |
| Ilustración 48. Simulación de la aceleración en el eje Y para 1Hz.....          | 68 |
| Ilustración 49. Simulación para 2 Hz.....                                       | 69 |

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 50. Simulación para 3 Hz.....                          | 70 |
| Ilustración 51. Simulación para 5 Hz.....                          | 71 |
| Ilustración 52. Tabla de datos de aceleración .....                | 72 |
| Ilustración 53. Grafica de aceleraciones en la base de datos ..... | 73 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Transmisión de datos análogo/digital. ....     | 25 |
| Tabla 2. Materiales.....                                | 39 |
| Tabla 3. Resultados de la simulación de cantilever..... | 67 |

## ÍNDICE DE ECUACIONES

|   |    |
|---|----|
| Ecuación 1. Declinación solar .....                 | 35 |
| Ecuación 2. Angulo horario .....                    | 35 |
| Ecuación 3. Altura Solar .....                      | 35 |
| Ecuación 4. Energía total consumida .....           | 49 |
| Ecuación 5. Numero de módulos a utilizar .....      | 50 |
| Ecuación 6. Energía suministrada por el panel ..... | 50 |
| Ecuación 7. Capacidad de la batería .....           | 50 |

## ÍNDICE DE ANEXOS

|   |    |
|---|----|
| Anexo 1. Diagrama del circuito integrado del MPU 6050 .....     | 81 |
| Anexo 2. Características del módulo Wi-Fi Radio del ESP 32..... | 82 |
| Anexo 3. Plano de la caja de protección del sensor .....        | 83 |
| Anexo 4. Plano de la tapa de protección del sensor .....        | 84 |
| Anexo 5. Plano de pin para caja protectora.....                 | 85 |
| Anexo 6. Diagrama de conexión de elementos.....                 | 86 |
| Anexo 7. Carta Solar UNITEC .....                               | 87 |

## LISTA DE SIGLAS

|             |                                  |
|-------------|----------------------------------|
| <b>FFT</b>  | Fast Fourier Transform           |
| <b>cpm</b>  | Ciclos por minuto                |
| <b>MEMS</b> | Micro-Electro-Mechanical Systems |
| <b>QFN</b>  | Quad Flat No-Leads               |
| <b>SHM</b>  | Structure Health Monitoring      |
| <b>PPV</b>  | Peak Particle Velocity           |
| <b>LAN</b>  | Local Area Network               |
| <b>HTML</b> | HyperText Markup Language        |
| <b>url</b>  | Uniform Resource Locator         |
| <b>php</b>  | Hypertext Preprocessor           |
| <b>IoT</b>  | Internet of things               |
| <b>FV</b>   | Fotovoltaico                     |

## GLOSARIO

**Excitación determinística:** se da cuando el valor o magnitud de la excitación que actúa en un sistema vibratorio se conoce en cualquier tiempo dado (RAO, 2012).

**Frecuencia natural:** es la frecuencia propia de un sistema, frecuencia con la cual oscila sin la acción de una fuerza externa después de una perturbación inicial (RAO, 2012).

**Frecuencia de Resonancia:** sucede cuando la frecuencia del sistema vibratorio alcanza el grado máximo de oscilación y se iguala a la frecuencia de excitación (RAO, 2012).

**Mampostería:** es un sistema de construcción tradicional que consiste en superponer rocas, ladrillos o bloques de concreto prefabricado, para la edificación de estructuras. Para su adición se emplea una mezcla de cemento o cal, con arena y agua. (Redacción, 2018)

## I. INTRODUCCIÓN

Todas las estructuras civiles acumulan daño generado gradualmente durante su vida útil, particularmente, los puentes, pasos a desnivel y edificaciones grandes, siendo la fatiga y los efectos ambientales, las principales causas de deterioro. El reglamento para la reducción de riesgo de desastres en el Distrito Central establece que *"la persona humana es el fin supremo de la sociedad, razón por la cual el Estado y la misma sociedad deben brindarle la protección adecuada, en especial en los términos de seguridad personal, familiar y patrimonial. Por tal motivo, la municipalidad del distrito central tiene el deber de realizar acciones prácticas para proteger la vida y los bienes de los habitantes dentro de la circunscripción de su geografía"* (La Gaceta, Acta No. 020, 2017, p.3). Dicha acta solo establece la reducción de riesgos orientada a desastres naturales y fallos de suelo, pero uno de los problemas principales de las estructuras civiles es su deterioro, que a falta de supervisión y por ende falta de mantenimiento se convierte en una falla estructural que puede provocar el colapso de las mismas.

Este proyecto tiene como principal objetivo mostrar el desarrollo del diseño de un sistema electrónico para monitoreo de vibraciones estructurales y ha sido orientado a la medición y procesamiento de variables como la velocidad, aceleración y desplazamiento que ocurre en un periodo de vibraciones con el fin de asegurar la calidad estructural para el uso humano. Este sistema implementa tecnologías de censado, procesamiento y transmisión de datos para el análisis de estructuras con el que se pueda darles seguimiento y atención a las mismas de manera eficiente, además el sistema opera de forma independiente mediante un método de generación de energía autosuficiente.

Las secciones que conforman el presente trabajo se detallan a continuación:

Planteamiento del problema: se detalla la problemática encontrada y se expone porqué es importante su solución.

Marco teórico: representa el fundamento teórico de la investigación y ofrece un mayor entendimiento de las metodologías realizadas.



Metodología: se detallan las variables de investigación que surgen del problema, de igual forma la metodología utilizada para realizar el diseño del sistema, las técnicas implementadas, la descripción de los materiales necesarios y un presupuesto estimado del costo de materiales.

Resultados y análisis: se presenta una síntesis de los datos obtenidos durante el desarrollo del proyecto, como ser los datos medidos y los simulados, así como el análisis del autor sobre la investigación para la realización del diseño.

Conclusiones: esta sección incluye las conclusiones obtenidas durante la realización del proyecto.

En los posteriores capítulos se presentan las sugerencias y recomendaciones propuestas para el seguimiento de este proyecto y mejoras del mismo.

## **II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **2.1 PRECEDENTES DEL PROBLEMA**

Todo tipo de estructuras, especialmente las que son diseñadas para soportar máquinas centrífugas pesadas o máquinas reciprocantes se ven sometidas a vibraciones. En todos los casos el componente de la estructura sometido a la vibración puede fallar debido a la fatiga del material producida por la vibración constante ya sea de un esfuerzo inducido o natural.

El objetivo del análisis de vibraciones consiste en definir si existe una vibración anormal, establecer la severidad del problema y recomendar las actividades necesarias de mantenimiento para que todo tenga una operación óptima.

En trabajos anteriores, como el Analizador Virtual de Vibraciones para predecir fallas mecánicas habla sobre la implementación de sensores micro electromecánicos para el análisis de las vibraciones de máquinas rotatorias con el fin de prevenir fallas mecánicas (Estupiñan, Martín, & Solaligue, 2006) o el trabajo Diseño de Prototipo de Sistema Vertical Fotovoltaico y Captación de Agua de Lluvia, en el que se estudia la generación de energía mediante energía solar fotovoltaica (Escobar, 2018) y la Normativa BS 7385 : *Evaluation and measurement for vibration in buildings* donde se establecen las reglas sobre medición de vibraciones estructurales (British Standard BS 7385,1993 ) se recolectó la información necesaria para el diseño de este sistema de monitoreo. En estos trabajos se aprendió sobre cómo tomar medidas de vibraciones para extraer datos útiles para el análisis de las mismas, así como una manera de aprovechar un recurso ilimitado de energía como ser la radiación solar y utilizarla para alimentar el sistema de monitoreo remoto.

### **2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Una de las variables utilizadas para monitorear la seguridad de una edificación es su nivel de vibraciones, ya que está directamente relacionada a la condición de la estructura y puede predecir la necesidad de mantenimientos o modificaciones de las mismas. Actualmente, Honduras no cuenta con sistemas de captación de vibraciones en estructuras civiles, por lo que no se le puede dar seguimiento a variables para el análisis dinámico de una estructura de manera continua y eficiente.

## **2.3 JUSTIFICACIÓN**

La medición y análisis de vibraciones, como técnica dinámica no destructiva, es un procedimiento importante para evaluar daño estructural provocado por causas forzadas y naturales o posible daño que puede existir durante su vida útil. Los resultados que se obtienen de dichas mediciones permiten prevenir deflexiones y esfuerzos por fatiga dañinos para la estructura. El propósito de un sistema de captación de vibraciones en estructuras es mejorar la seguridad y fiabilidad de infraestructuras, ya que detectan el daño antes de llegar a una etapa crítica del problema, de manera en la que se pueda actuar con medidas preventivas para obtener el comportamiento dinámico estructural adecuado.

En Honduras no se utilizan sistemas de medición de este tipo, por lo cual las estructuras corren el riesgo de sufrir una falla sin ser detectadas. La acumulación de fallas puede causar un daño grave en la estructura, incluso llegar al colapso, provocando pérdidas materiales y en el peor de los casos pérdidas de vidas humanas. Por estas razones mencionadas es importante desarrollar un sistema de captación de vibraciones de estructuras, autosuficiente y de bajo costo, capaz de medir y analizar los parámetros más importantes para asegurar la calidad de estructuras.

## **2.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

1. ¿Qué sensores de vibraciones para estructuras existen en el mercado?
2. ¿Qué sensores de vibraciones son aplicados en las estructuras de Honduras?
3. ¿Qué métodos de recolección de energía se pueden aplicar para hacer un sistema autosostenible?
4. ¿Qué componentes electrónicos son necesarios para realizar el sistema de censado?
5. ¿Qué método de comunicación es más eficiente para la transmisión de los datos?
6. ¿Cuál es la mejor manera de realizar el procesamiento de datos?

## **2.5 OBJETIVOS**

### **2.5.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar un sistema de monitoreo autosuficiente capaz de detectar las vibraciones que se producen en estructuras civiles con el fin de analizar la calidad, fiabilidad y seguridad de las mismas. Con ello asegurar que cumplan los requerimientos dinámicos de las estructuras, mediante sensores electrónicos y tecnología de transmisión de datos.

### **2.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Investigar sobre 4 sistemas de captación de vibraciones y proyectos similares con el propósito de la recopilación y el análisis de la información necesaria para el desarrollo del proyecto.
2. Determinar las variables más importantes a medir para el análisis dinámico de estructuras.
3. Establecer los componentes a utilizar, orientados a la medición y procesamiento de los parámetros requeridos para el análisis de vibraciones.
4. Establecer un sistema de comunicación eficiente para la transmisión de los datos obtenidos.
5. Diseñar un método de alimentación de energía con el propósito de hacer el sistema autosuficiente.
6. Designar un presupuesto para el diseño del proyecto, con el fin de establecer la rentabilidad del mismo.

### **III. MARCO TEÓRICO**

#### **3.1 TRABAJOS PREVIOS**

Los analizadores de vibraciones son utilizados para medir y diagnosticar la vibración producida en maquinarias o estructuras. Generalmente utilizan funciones basadas en el algoritmo FFT (Transformada rápida de Fourier) para graficar la magnitud de la vibración y como ésta cambia a lo largo de sus frecuencias, utilizado principalmente para identificar y predecir fallas.

Existen equipos de monitorización de vibraciones autónomos que registran y a su vez monitorizan los datos, si se exceden los valores límites establecidos, se activa una alarma vía SMS o e-mail. También existen los sensores que se cablean para ser integrados en una red, donde se conectan varios sensores, para hacer la monitorización del conjunto y registrar los datos de los diferentes puntos sensibles del edificio o construcción.

Se han realizado varios trabajos e investigaciones centrados en este tema, sin embargo, ninguno es aplicado en Honduras, a continuación, se expondrán algunos de estos.

##### **3.1.1 SISTEMA DE BAJO COSTO PARA MONITOREO DE DISTURBIOS DE VIBRACIÓN EN MÁQUINAS ROTATORIAS**

En el artículo técnico (Ocampo, 2013) presento una investigación del desarrollo de un sistema de bajo costo que le permitía monitorear vibraciones y diagnosticar disturbios que podrían causar problemas en máquinas rotatorias mediante el uso de técnicas de medición y estadística. El prototipo que elaboro consto en una aplicación desarrollada en el software de programación LabVIEW, utilizada para analizar los datos recibidos por los sensores. Este análisis tenía el fin de mostrar al usuario el estado de una máquina referente a sus vibraciones para así tomar la decisión de apagar el motor antes que estos disturbios generen un problema mayor y más claro de resolver.

##### **3.1.2 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ANALIZADOR VIRTUAL DE VIBRACIONES MECÁNICAS**

(Estupiñan et al., 2006) desarrollaron el diseño e implementación de un analizador de vibraciones basado en un sistema de adquisición de datos capaz de monitorear y analizar vibraciones en uno

y dos canales simultáneamente. El analizador permite calcular espectros, formas de onda, analizar órbitas, coherencia, así como también almacenar los datos adquiridos para su posterior análisis con el propósito de realizar un sistema de mantenimiento predictivo útil para el diagnóstico de fallas de máquinas rotatorias.

### 3.1.3 SISTEMA DE MONITOREO DE VIBRACIONES PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS

En el artículo técnico desarrollado por (Rangel, Contreras, Romero, Vite, & Rivera, 2007) elaboran un sistema para el monitoreo de vibraciones utilizando un acelerómetro de 3-ejes con tecnología MEMS para el censado de vibraciones y un circuito FPGA para el control del sistema. El acelerómetro empleado es un dispositivo de bajo costo y consumo de potencia en comparación con soluciones comerciales, lo cual lo hace atractivo para el sector industrial. El sistema integra una técnica novedosa para reducir ruido que consiste en incluir el acelerómetro y el convertidor analógico-digital en una misma tarjeta que constituye el sistema de instrumentación con el objetivo de llevar a cabo la conversión analógica-digital dentro del sensor de vibraciones antes de ser transmitida. El FPGA permite realizar el control del sensor de vibraciones, captura y almacenamiento de los datos dentro del mismo circuito, además de contar con una arquitectura abierta que permite realizar un proyecto escalable.

### 3.1.4 DISTRIBUTED FBG VIBRATION SENSING BASED ON OFDR EMPLOYING A DFB-LD

(Wu, Wang, Hou, Liu, & Li, 2018) proponen en su artículo una red distribuida de detección de vibraciones con FBG (fiber Bragg grating) basada en OFDR (optical frequency domain reflectometry). Como una herramienta de diagnóstico importante, la técnica de reflectometría en el dominio de frecuencia óptica (OFDR) se practica en redes de detección ópticas distribuidas o cuasidistribuidas y está bien establecida en fibra óptica para fines de diagnóstico estructurales no destructivos. En este artículo estudian la medición de alta velocidad de FBG distribuidos basada en OFDR con retroalimentación para una sintonización de frecuencia rápida mientras se mantiene una alta resolución espacial y precisión en la amplitud de tensión.

### 3.1.5 DEVELOPMENT OF A SMALL ENERGY SCAVENGER

(León, 2007) Desarrolla varios prototipos de baterías utilizando sensores piezoeléctricos para aprovechar la energía mecánica y convertirla en energía eléctrica. Estas baterías basadas en el principio piezoeléctrico fueron diseñadas para reemplazar sistemas de energizado convencionales que requieren de mantenimientos muy seguidos como ser las baterías que deben ser reemplazadas y en su lugar aprovechar la vibración natural para crear energía limpia y de bajo mantenimiento.

### 3.1.6 DISEÑO DE PROTOTIPO DE SISTEMA VERTICAL FOTOVOLTAICO Y CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA

Esta tesis desarrollada por (Escobar, 2018) se diseña el prototipo de un arreglo de paneles fotovoltaicos que permiten la captación tanto de energía solar como del agua de lluvia con el objetivo que este pueda ser instalado en aquellas zonas rurales y urbanas del país en las que el sistema eléctrico convencional no es un recurso con el que puedan contar. Para el diseño de este prototipo se tomó en cuenta factores claves que impactarían en la eficiencia final del diseño; tales factores fueron: la altura solar de solsticio de invierno, radiación solar promedio, precipitación promedio y eficiencia de los equipos. Tomando en cuenta estos elementos, se ha podido llegar a un prototipo eficiente de energía fotovoltaica.

## 3.2 VIBRACIONES MECÁNICAS

La vibración de un sistema es cualquier movimiento que se repite después de un intervalo de tiempo y que implica la transformación de su energía potencial en energía cinética y cinética a potencial de manera alterna. Si la frecuencia de una fuerza externa que provoca una vibración coincide con la frecuencia natural del sistema ocurre la resonancia, en la que el sistema sufre oscilaciones muy grandes causando fallas estructurales. El movimiento oscilatorio puede repetirse con regularidad o irregularidad. Si un movimiento se repite en tiempos iguales después de varios intervalos es un movimiento periódico, el tipo más simple de movimiento periódico es el movimiento armónico.

Se conoce como vibración torsional al movimiento resultante cuando un cuerpo rígido oscila con respecto a un eje de referencia específico y el desplazamiento se mide en función de una coordenada angular. Un sistema vibratorio se dice que es dinámico si sus variables como ser las entradas y salidas dependen del tiempo. Su respuesta depende de las condiciones iniciales como de las fuerzas externas (Rao, 2012).

### 3.2.1 CLASIFICACIÓN DE LAS VIBRACIONES

Las vibraciones se pueden clasificar de esta manera:

- Vibración libre: se produce cuando un sistema vibra debido a una excitación instantánea inicial, ninguna fuerza externa actúa en el sistema.
- Vibración forzada: se produce cuando un sistema vibra debido a una excitación externa constante.
- Vibración amortiguada: se produce cuando la vibración de un sistema es disipada o en otras palabras pierde energía
- Vibración no amortiguada: se produce cuando la vibración de un sistema no pierde energía.
- Vibración lineal: se produce cuando los componentes básicos de un sistema vibratorio tales como la masa, los resortes y amortiguadores se comportan de una manera lineal, su vibración resultante es lineal.
- Vibración no lineal: se produce cuando alguno de sus componentes tiene un comportamiento no lineal.

### 3.2.2 PROCEDIMIENTO DEL ANÁLISIS DE LA VIBRACIÓN TEÓRICA

La respuesta de un sistema vibratorio depende de las condiciones iniciales y de las fuerzas externas. Muchos de los sistemas vibratorios son muy complejos, por lo que es imposible considerar todos los detalles en un análisis matemático, se consideran solo los detalles más importantes que ayudan a predecir el comportamiento del sistema en condiciones específicas.



El análisis de un sistema vibratorio se puede determinar con un modelo simple del sistema físico complejo, lo que suele implicar modelado matemático.

Pasos para el análisis de vibraciones:

- Paso 1 – Modelado Matemático: puede ser lineal o no lineal, según el comportamiento del sistema. Con este modelado se representan todos los detalles importantes del sistema y se derivan las ecuaciones matemáticas.

Se empieza con un modelo básico para tener una idea del comportamiento total del sistema, luego se refina el modelo con la introducción de más componentes de modo que se pueda observar más de cerca el comportamiento del sistema

- Paso 2 – Derivación de ecuaciones rectoras: ya realizado el modelo matemático utilizamos el principio de dinámica y obtenemos las ecuaciones que van a describir la vibración del sistema. Las ecuaciones de movimiento de un sistema vibratorio son un conjunto de ecuaciones diferenciales comunes para un sistema discreto y ecuaciones diferenciales parciales para un sistema continuo.
- Paso 3 – Solución de las ecuaciones rectoras: se resuelven las ecuaciones rectoras ya sea por métodos estándar, transformada de Laplace, métodos matriciales y numéricos.
- Paso 4 – Interpretación de los resultados: las ecuaciones rectoras nos proporcionan en su solución los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de las diversas masas del sistema.

Cualquier función periódica puede representarse como una suma de funciones armónicas, y también se utiliza la expansión de la serie de Fourier utilizando tanto una representación en el dominio del tiempo y una representación en el dominio de la frecuencia (Rao, 2012).

### 3.2.3 ESTABILIDAD DE SISTEMAS

La estabilidad es una de las características más importantes de cualquier sistema vibratorio. Un sistema se considera asintóticamente estable si su respuesta de vibración tiende a cero a medida que el tiempo tiende a infinito, y se considera inestable si su respuesta de vibración tiende a

infinito mientras el tiempo avanza. Un sistema se considera estable si su respuesta de vibración no aumenta ni disminuye, sino permanece constante (Chopra, 2014).

#### 3.2.4 RESPUESTA DE SISTEMAS SOMETIDOS A FUERZAS

Un sistema mecánico o estructural experimenta vibración forzada cuando se le suministra energía externa al sistema durante la vibración. La energía externa se puede proveer ya sea mediante una fuerza aplicada o por una excitación de desplazamiento impuesta.

El espectro de respuesta es una gráfica que muestra la variación de la respuesta máxima de valores como el desplazamiento, la velocidad, la aceleración o cualquier otra cantidad máxima a frecuencia natural de un sistema de un solo grado de libertad vs una función forzada especificada dando la respuesta máxima de todos los posibles sistemas de un solo grado de libertad (Rao, 2012).

#### 3.2.5 VIBRACIONES EN ESTRUCTURAS

El estudio de la dinámica estructural se inicia con estructuras simples, estas son las que pueden representarse como una masa centrada soportada por una estructura con rigidez en dirección lateral. En estos sistemas idealizados el desplazamiento que se presenta cuando se les permite vibrar libremente es el mismo desplazamiento máximo en todas las oscilaciones de manera indefinida sin llegar al reposo, pero en la práctica encontramos el proceso de amortiguamiento mediante el cual las vibraciones disminuyen de manera constante, y se trata de la energía cinética y de deformación que se disipan por oscilación (Chopra, 2014).

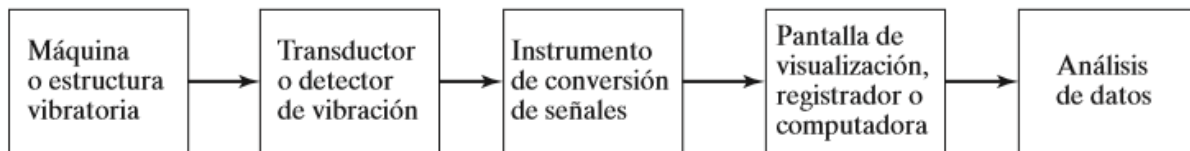
El comportamiento estructural se evalúa mediante la respuesta estructural dinámica, obtenida mediante técnicas experimentales dadas en términos de aceleraciones y velocidades vibratorias. La evaluación se realiza comparando los resultados obtenidos de las mediciones con los límites indicados por normativas y criterios internacionales

### 3.3 DETECCIÓN DE VIBRACIONES

En la práctica podría llegar a ser difícil desarrollar un modelo matemático del sistema y predecir sus características de vibración por medio de un estudio analítico, por lo tanto, se utilizan métodos experimentales para medir la respuesta de vibración del sistema ante una situación conocida. Esto ayuda a identificar el sistema en función de su masa, rigidez y amortiguamiento.

Para esto se utilizan analizadores de vibraciones que son instrumentos que miden, almacenas y diagnostican la vibración producida por una maquinaria o estructura. Funcionan básicamente grabando las vibraciones por uno o más transductores, generalmente acelerómetros.

El procedimiento de análisis de vibraciones se representa en la ilustración 1 iniciando con la vibración de un cuerpo, luego este se transforma en señales eléctricas mediante un transductor que mide los cambios de cantidades mecánicas como los desplazamientos, velocidades y aceleraciones y los transforma en cambios eléctricos de voltaje o corriente. Esta señal es muy débil una vez que el transductor la crea, por lo que es necesario utilizar un conversor de señales para amplificar señal, que luego será transmitida y registrada en un servidor para su posterior análisis (Rao, 2012).



**Ilustración 1. Esquema de medición de vibración**

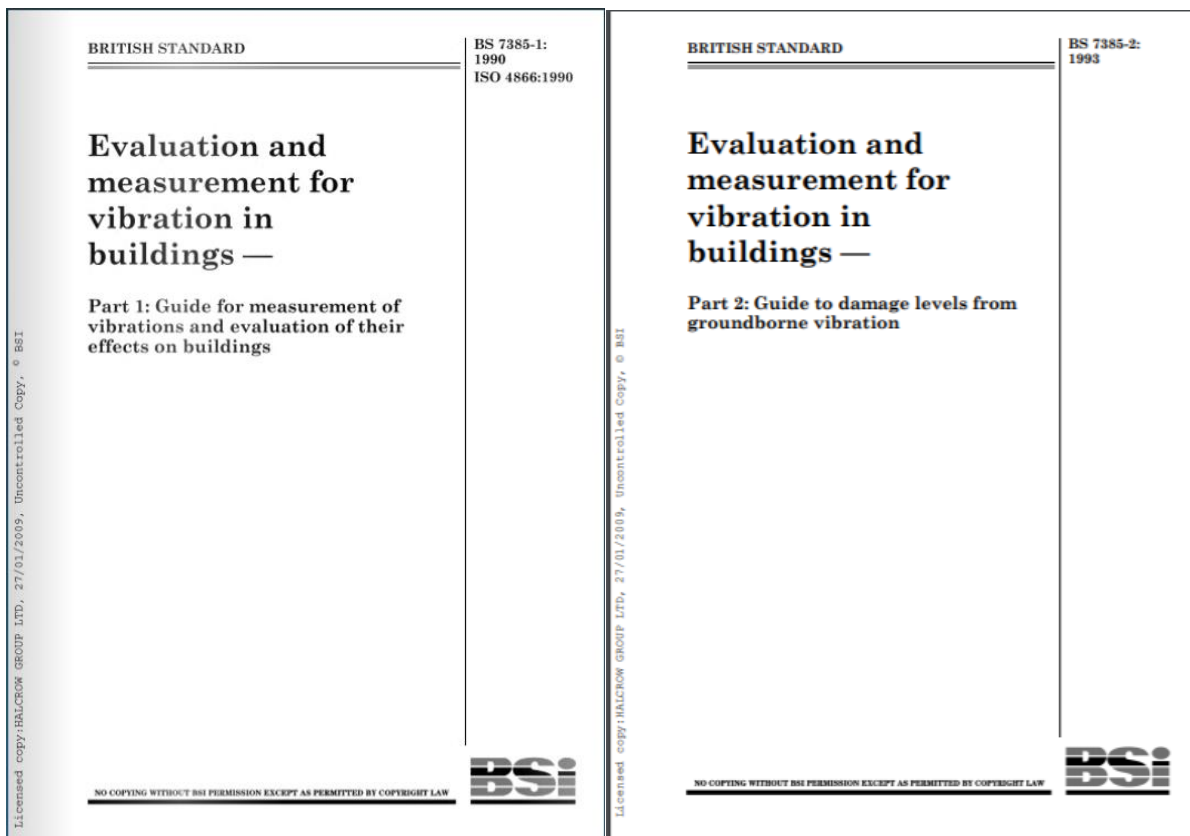
Fuente: (Rao, 2012)

El principal objetivo de un analizador de vibraciones en estructuras es realizar un diagnóstico del estado de este, permitiendo detectar a tiempo cualquier vibración peligrosa para tomar medidas de prevención.

### 3.4 NORMATIVAS PARA LA MEDICIÓN DE VIBRACIONES ESTRUCTURALES

Existen normativas al respecto, tales como ASA 95-1990 ó ANSI S2.47 "American National Standard. Vibration of Buildings. Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of

their effects on buildings" o la BS 7385-2: 1993 "Evaluation and measurement for vibration in buildings. Guide to damage levels from groundborne vibration ". Estas normativas, a diferencia de la existente para las máquinas, no dan valores numéricos que permitan la evaluación de la severidad de la vibración. Esta normativa es solamente cualitativa. Indica los diferentes factores que deben ser considerados para su evaluación; como tomar en cuenta los diferentes tipos de estructuras o edificios existentes; las magnitudes y métodos de medición que pueden ser usados y los diferentes procedimientos de cálculo a utilizar para evaluar las vibraciones medidas.



**Ilustración 2. British Standard BS 7385 para análisis de vibraciones estructurales**

Fuente: (British Standard BS 7385, 1993)

### 3.4.1 FACTORES A CONSIDERAR EN LA MEDICIÓN DE VIBRACIONES EN UNA ESTRUCTURA

La respuesta de un edificio a la vibración terrestre se ve afectado por las condiciones del suelo, la construcción del edificio y el estado de reparación del edificio.

- Tipo y condiciones del terreno

La interacción entre el suelo y la base de la estructura puede tener un efecto importante en la respuesta de las mediciones. La geología del suelo entre la fuente de vibración y el edificio también afecta el espectro de frecuencia medido del edificio. En general, los cimientos más rígidos resultan en frecuencias naturales más altas y frecuencias más altas son a menudo asociado con un terreno más duro.

La tensión impuesta en un edificio a nivel de los cimientos es proporcional a la velocidad pico de una partícula, pero es inversamente proporcional a la velocidad de propagación de las ondas de compresión en el suelo. Ya que la velocidad de propagación aumenta mientras más rígido sea un suelo, un PPV más alto medido en un suelo con condiciones más fuertes pueden inducir la misma tensión como un PPV más bajo medido con suelo más blando, siempre que ocurra significativamente lejos de una vibración de resonancia. (*British Standard BS 7385, 1993*)

- Tipo y construcción del edificio.

Las tensiones inducidas en un edificio por una determinada excitación de vibración dependerán de las características dinámicas del tipo de edificio, es decir, las frecuencias naturales, formas de modo normal y amortiguamiento. Las frecuencias naturales están determinadas por la geometría del edificio y sus componentes, el grado de fijación de estos componentes en la estructura y la rigidez y masa de cada uno. Las estructuras de mampostería tradicional y de baja altura tienden a tener frecuencias naturales más altas en comparación con edificaciones modernas ligeras, flexibles y más altas. Se producirán mayores niveles de tensión cuando las frecuencias de excitación son cercanas a las frecuencias naturales.

Una clasificación de edificios se da en el anexo A de BS 7385-1: 1990 mostrado en las siguientes imágenes, con una indicación de la relativa resistencia a la vibración.

| Class of building <sup>a</sup>             | Category of structure<br>(see Table A.1)   |     |            |            |     |                   |            |            |                   |
|--|--|-----|------------|------------|-----|-------------------|------------|------------|-------------------|
|  | 1  | 2   | 3          | 4          | 5   | 6                 | 7          | 8          |                   |
|  | Categories of foundations (capital letters) and types of soil (lower case letter)<br>(see clause A.5 and clause A.6) |     |            |            |     |                   |            |            |                   |
| ← Level of acceptable vibration decreasing | 1  | A a |            |            |     |                   |            |            |                   |
|  | 2  | A b | A a        | A a        | A a |                   |            |            |                   |
|  | 3  |     | A b<br>B a | A b<br>B a | A b | A a<br>A b        |            |            |                   |
|  | 4  |     | A c<br>B b | B b        | A c | A c<br>B a<br>B b |            |            |                   |
|  | 5  |     | B c        | A c        |     | B c               | B a        |            |                   |
|  | 6  |     | A f        |            | A d | B d               | B b<br>C a | B a        |                   |
|  | 7  |     |            | A f        | A e | B e               | B c<br>C b | B b<br>C a |                   |
|  | 8  |     |            |            |     |                   | B e<br>C c | B c<br>C b |                   |
|  | 9  |     | B f        |            |     |                   | C d        | B d<br>C c | A a               |
|  | 10   |     |            | B f        |     |                   | C e        | B e<br>C d | A b               |
|  | 11   |     |            |            | C f | C f               |            | C e        | B a               |
|  | 12   |     |            |            |     |                   | C f        |            | B c<br>C a        |
|  | 13   |     |            |            |     |                   |            | C f        | B d<br>C b<br>C c |
|  | 14   |     |            |            |     |                   |            |            | C d<br>C e<br>C f |

<sup>a</sup> High class number = high degree of protection required.

### Ilustración 3. Clasificación de estructuras con relación a su resistencia de vibración

Fuente: (British Standard BS 7385, 1993)

| Category of structure                | Group of building (see clause A.4) |   |  |
|--------------------------------------|------------------------------------|---|--|
|                                      | 1                                  | 2   |  |
| ← Resistance to vibration decreasing | 1                                  | Heavy industrial multi-storey buildings, five to seven storeys high, including earthquake-resistant forms<br><br>Heavy structures, including bridges, fortresses, ramparts  | Two- and three-storey industrial, heavy-frame buildings of reinforced concrete or structural steel, clad with sheeting and/or infilling panels of blockwork, brickwork, or precast units, and with steel, pre-cast or <i>in situ</i> concrete floors<br><br>Composite, structural steel and reinforced concrete heavy industrial buildings |
|                                      | 2                                  | Timber frame, heavy, public buildings, including earthquake-resistant forms   | Five- to nine-storey (and more) blocks of flats, offices, hospitals, light-frame industrial buildings of reinforced concrete or structural steel, with infilling panels of blockwork, brickwork, or precast units, not designed to resist earthquakes  |
|                                      | 3                                  | Timber-frame, single- and two-storey houses and buildings of associated uses, with infilling and/or cladding, including "log cabin" kinds, including earthquake-resistant forms   | Single-storey moderately lightweight, open-type industrial buildings, braced by internal cross walls, of steel or aluminium or timber, or concrete-frame, with light, sheet-cladding, and light panel-infilling, including earthquake-resistant types  |
|                                      | 4                                  | Fairly heavy multi-storey buildings, used for medium warehousing or as living accommodation varying from five to seven storeys or more  | Two-storey, domestic houses and buildings of associated uses, constructed of reinforced blockwork, brickwork or precast units, and with reinforced floor and roof construction, or wholly of reinforced concrete or similar, all of earthquake-resistant types   |
|                                      | 5                                  | Four- to six-storey houses, and buildings of associated urban uses, made with blockwork or brickwork, load-bearing walls of heavier construction, including "stately homes" and small palace-style buildings  | Four- to ten-storey domestic and similar buildings, constructed mainly of lightweight load-bearing blockwork and brickwork, calculated or uncalculated, braced mostly by internal walls of similar material, and by reinforced concrete, preformed or <i>in situ</i> floors at least on every other storey.                                |
|                                      | 6                                  | Two-storey houses and buildings of associated uses, made of blockwork, brickwork or pis-à-terre, with timber floors and roof<br>Stone- or brick-built towers, including earthquake-resistant forms  | Two-storey domestic houses and buildings of associated uses, including offices, constructed with walls of blockwork, brickwork, precast units, and with timber or precast or <i>in situ</i> floors and roof structures   |
|                                      | 7                                  | Lofty church, hall and similar stone- or brick-built, arched or "articulated" type structures, with or without vaulting, including arched smaller churches and similar buildings<br><br>Low heavily constructed "open" (i.e. non-cross-braced) frame church and barn type buildings including stables, garages, low industrial buildings, town halls, temples, mosques, and similar buildings with fairly heavy timber roofs and floors | Single- and two-storey houses and buildings of associated uses, made of lighter construction, using lightweight materials, pre-fabricated or <i>in situ</i> , separately or mixed  |
|                                      | 8                                  | Ruins and near-ruins and other buildings, all in a delicate state<br><br>All class 7 constructions of historical importance   |  |

**Ilustración 4. Categorización de estructuras según grupo de edificios.**

Fuente: (British Standard BS 7385, 1993)

- Componentes de construcción

Los componentes de construcción como paredes, pisos, vigas o techos tienen frecuencias naturales que suelen ser más altas que las frecuencias del edificio en conjunto, y por lo tanto son más susceptible a la excitación en resonancia de maquinaria en funcionamiento continuo, que la estructura en conjunto.

### 3.4.2 MEDICIÓN DE VIBRACIONES

- Cantidad a medir

Las características de la naturaleza de la entrada de vibración y de la respuesta de la estructura pueden ser medidas con transductores de desplazamiento, velocidad o aceleración. Es una práctica habitual detectar una cantidad cinemática, como la aceleración y luego integrar para la velocidad y posición si son requeridos.

- Posiciones para la medición

La colocación del transductor en un edificio depende de la respuesta de vibración que se quiera adquirir. Las evaluaciones de las vibraciones de fuentes terrestres se realizan mejor colocando los sensores cerca de los cimientos.

La determinación de deformación por cizalladura del edificio en su conjunto requiere mediciones directamente en los miembros que soportan la carga que son los que le dan la rigidez de la estructura como ser las columnas.

A veces, los movimientos de piso o pared son preocupantes, con amplitudes máximas en ubicaciones de tramo medio. Aunque a veces es muy grave, estas vibraciones generalmente no están relacionadas con la integridad estructural.

En caso de que se realicen mediciones relacionadas con el equipo, como cuando se monitorean instalaciones sensibles a la vibración, la medición debe reflejar la vibración entrante. El punto de medición debe colocarse sobre o en los cimientos o en el marco del equipo. En este caso, el equipo debe, si es posible, retirarse para la medición.



En caso de que se realicen mediciones relacionadas con la vibración transmitida por el suelo, es habitual orientar los sensores con respecto a la dirección radial definida como la línea que une la fuente con el sensor. Si no es posible realizar mediciones en la base adecuada, entonces los instrumentos deben estar acoplados al suelo.

Las mediciones de vibración realizadas sobre o debajo de la superficie del suelo pueden verse afectadas por la variación de la amplitud de una onda de superficie con la profundidad. Los cimientos de los edificios pueden estar expuestos a un movimiento que es diferente del observado en la superficie del suelo, dependiendo de la longitud de onda, las profundidades de los cimientos y las condiciones geotécnicas.

La masa del transductor y la unidad de monitoreo no debe ser mayor al 10% del elemento de construcción al cual está fijo. El montaje debe ser lo más rígido y ligero posible. El montaje del transductor se puede asegurar al edificio mediante pernos.

### **3.5 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS**

Con el desarrollo de la industria, los instrumentos de precisión o las estructuras civiles llegarán a un punto en donde inevitablemente se dañarán. El monitoreo de salud estructural (SHM) puede entenderse como la integración del censado e inteligencia artificial que nos permite registradas, analizadas, localizadas los daños que se están provocando en las estructuras. La respuesta de una estructura a la excitación dinámica se lleva a cabo tradicionalmente utilizando sondas locales como acelerómetros, vibrómetros láser para mediciones de velocidad, sensores de fluoruro de polivinilideno, sensores piezoeléctricos o medidores de tensión.

El análisis consiste en determinar la rigidez equivalente de una estructura calculada a partir de las mediciones dinámicas y estáticas, con las que se obtienen las frecuencias naturales de vibración. Consecutivamente, mediante criterios o códigos se analizan los datos medidos y se comparan con los límites de diseño a fin de definir el nivel actual de servicio que presente el puente.

### **3.6 DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS UTILIZADOS PARA LA MEDICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS EN VIBRACIONES**

#### **3.6.1 SENSOR PIEZOELÉCTRICO**

Los acelerómetros como sensores de vibración son muy comunes ya que pueden detectar una amplia gama de vibraciones. Una de las versiones más populares de acelerómetro es el sensor piezoeléctrico. Este tipo de sensor tiene un material que emite una carga eléctrica cuando detecta cambios en la presión. Mediante la medición de la cantidad de carga eléctrica que estos emiten se determina la cantidad de vibración.

El sensor piezoeléctrico se utiliza a menudo para la flexión, el tacto, la vibración y las medidas de choque. Una pequeña tensión alterna y de gran tamaño se crea cuando la película se deforma.



**Ilustración 5. Sensor Piezoeléctrico**

Fuente: (Electrónica E, 2019.)

#### **3.6.2 ACCELERÓMETRO CAPACITIVO**

Un acelerómetro es un instrumento que mide la aceleración de un cuerpo vibratorio. Este sensor están compuestos por capas capacitivas internas, ya sea que estén fijas o contengan unos pequeños resortes, cuando se aplica una fuerza de aceleración al sensor, las placas se mueven una a otra, ocasionando cambios en la capacitancia. A partir de estos cambios se puede establecer la aceleración.



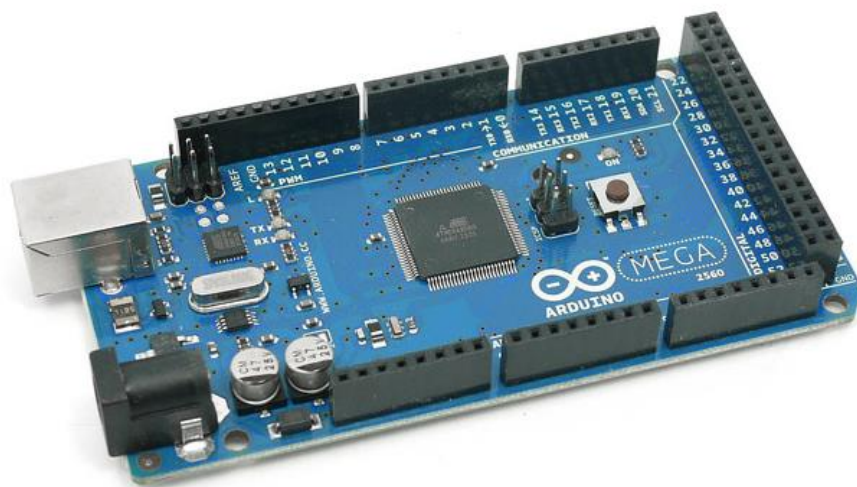
**Ilustración 6. Acelerómetro capacitivo**

Fuente: (SEIKA,2019).

### 3.6.3 ARDUINO MEGA

Es una placa de desarrollo basada en el microcontrolador ATmega2560 y funciona para interpretar las señales de los sensores. El Arduino Mega 2560 tiene 54 pines de entrada/salida, de los cuales exactamente 14 de ellos pueden ser utilizados como salidas de modulación por ancho de pulso, cuenta con otras 16 entradas analógicas y 4 puertos seriales.

Cuenta con un Cristal de 16MHz y una memoria Flash de 256K. Maneja un rango de voltaje de entrada de entre 7 y 12 volt. La comunicación entre el Arduino y la computadora se establece a través del puerto serie.



**Ilustración 7. Arduino MEGA 2560**

Fuente: (ARDUINO MEGA 2560, 2018)

### 3.6.4 MPU6050

El MPU6050 es un chip de 6 grados de libertad porque incluye un acelerómetro MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) de 3 ejes y un giróscopo de 3 ejes en un solo chip. Es muy preciso, ya que contiene hardware de conversión de analógico a digital de 16 bits para cada canal. Por lo tanto, captura los canales x, y y z al mismo tiempo. Los acelerómetros miden la aceleración en unidades "g", donde 1 g se define como la aceleración gravitacional de la tierra aplicada sobre un objeto. El sensor usa el bus I2C para interactuar con microcontroladores.

## 3.7 TRANSMISIÓN DE DATOS

### 3.7.1 SISTEMAS DE COMUNICACIÓN

El objetivo de un sistema de comunicación es intercambiar información entre dos o más entidades y tienen los siguientes elementos fundamentales:



O bien



**Ilustración 8. Elementos de los sistemas de comunicación.**

Fuente: (Fernández, 2005)

Una estación de trabajo se define como un elemento cuya arquitectura permite la comunicación con el exterior, sus elementos principales son:

- La fuente: genera los datos a transmitir
- El trasmisor: transforma y codifica la información, generando señales electromecánicas.
- El sistema de transmisión: medio físico por el que se envía la señal.
- El receptor: acepta la señal del sistema de transmisión y la transforma de manera que pueda ser utilizada por el dispositivo de destino.
- Destino: toma y utiliza los datos del receptor.

Un sistema de comunicación de datos propaga de un punto a otro sus datos mediante señales electromagnéticas. Las señales pueden ser analógicas o digitales, las señales analógicas son ondas electromagnéticas que varían constantemente con el tiempo y las señales digitales es una secuencia de pulsos de tensión que se puede transmitir con una representación binaria.

La transmisión de datos conocida como transmisión digital se puede definir como la transferencia de datos por un canal de comunicación punto a punto o multipunto. Tanto las señales analógicas como digitales se pueden propagar a través de un medio conductor que determinara como serán tratadas las señales.

**Tabla 1. Transmisión de datos análogo/digital.**

| <b>Datos y señales</b> |   |   |
|------------------------|---|---|
|                        | <b>Señal Analógica</b>  | <b>Señal Digital</b>  |
| Datos Analógicos       | Hay dos alternativas: 1) La señal ocupa el mismo espectro que los datos analógicos y 2) Los datos analógicos se codifican ocupando una porción distinta del espectro. | Los datos analógicos se codifican utilizando un codec para generar una cadena de bits.  |
| Datos Digitales        | Los datos se codifican usando un modem para generar las señales analógicas.   | Hay dos opciones: 1) La señal consiste en dos niveles de tensión que representan dos valores binarios y 2) Los datos digitales se codifican para producir una señal digital con las propiedades adecuadas.  |
| Señal Analógica        | Se propaga a través de amplificadores, se trata de igual manera si los datos son analógicos o digitales.  | Para este caso se supone que las señales analógicas representan datos digitales, por lo cual la señal se propaga a través de repetidores, en cada uno de ellos los datos digitales se obtienen a partir de la señal de entrada y se usan para generar una nueva señal analógica de salida.  |
| Señal Digital          | No se usa   | Aquí la señal digital representa una cadena de 1's o 0's los cuales pueden representar datos digitales o pueden ser resultados de la codificación de datos analógicos. La señal se propaga a través de repetidores, y en cada uno de ellos se recupera la cadena de bits a partir de la señal que entra y por medio de esta se genera una nueva cadena de salida. |

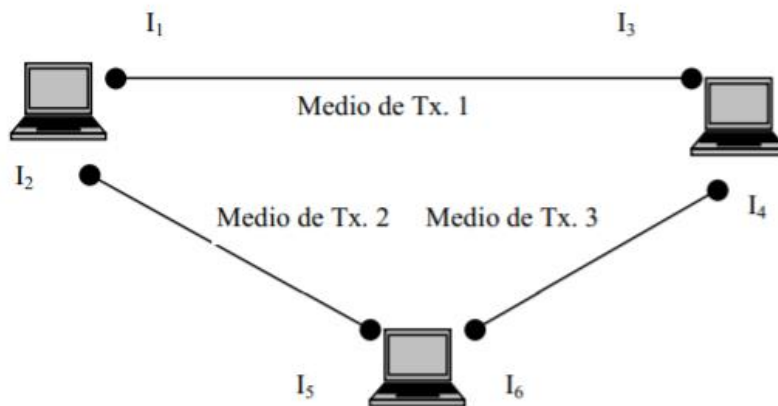
Fuente: (Fernández, 2005)

### 3.7.2 MEDIOS DE TRANSMISIÓN

El medio de transmisión forma el soporte físico a través del cual emisor y receptor pueden comunicarse en un sistema de transmisión de datos. Existen dos tipos de medios que son:

- Guiados: conducen las ondas a través de un medio físico como ser el cable de red, coaxial fibra óptica etc.
- No guiados: también llamada transmisión inalámbrica, proporcionan un soporte para que las ondas se transmitan, pero no las dirigen como el aire o el vacío.

El sistema de comunicación más básico consta de dos equipos conectados por un medio de transmisión. Si tenemos tres equipos de necesitan 3 medios de transmisión y en cada máquina 2 interfaces de comunicación, con  $n$  equipos interconectados se necesitarían  $n(n - 1)/2$  medios de transmisión y cada máquina debe tener  $n-1$  interfaces.



**Ilustración 9. Número de medios de transmisión por número de equipos**

Fuente: (Fernández, 2005)

### 3.7.3 TRANSMISIÓN POR RADIOFRECUENCIA

Cuando se diseña un sistema de medición y control que será ubicado en lugares remotos, con el objetivo de ser de bajo costo, robusto, de respuesta rápida y que sea autónomo sin la necesidad de mucho mantenimiento, se utilizan sistemas que se puedan controlar y supervisar remotamente mediante el uso de redes inalámbricas.

Los avances en las telecomunicaciones han llevado al desarrollo de sistemas de monitoreo inalámbricos, permitido la miniaturización de componentes electrónicos, logrando así, diseñar y crear circuitos capaces de procesar datos digitales y analógicos, asimismo de transmitirla por radiofrecuencia con módulos pequeños.

### **Ventajas del monitoreo remoto**

- Accesible desde cualquier lugar
- Monitoreo seguro en ambientes peligrosos
- Alerta para condiciones fuera del rango de medición si es el caso

### **Desventajas del monitoreo remoto**

- Puede ser afectado por ruido e interferencias
- Puede exigir la presencia de técnicos en el lugar para reiniciar o arreglar el equipo en caso de condiciones fuera del alcance de medición

#### 3.7.4 EL INTERNET DE LAS COSAS (IOT)

El internet de las cosas se define como un grupo de infraestructuras que interconectan objetos conectados y permiten su gestión, extracción de datos y el acceso a los datos que generan en donde los objetos conectados son sensores y/o actuadores que realizan una función específica que pueden comunicarse con otros equipos (Dorsemaine, Gaulier, Wary, Kheir, & Urien, 2015)

El termino Internet de las cosas describe la extensión de la conectividad de la red y la capacidad de cómputo de objetos, dispositivos, sensores y elementos que normalmente no se consideran como computadoras. Estos objetos inteligentes requieren una mínima intervención humana para generar, intercambiar y consumir datos; a menudo cuentan con conectividad para la recopilación remota de datos, análisis y capacidades de gestión remotas de datos (Boyes, Hallaq, Cunningham, & Watson, 2018)

El internet de las cosas representa un escenario futuro no tan lejano en el que cada objeto estara integrado con sensores capaz de comunicar automáticamente su estado con otros objetos y



sistemas automatizados dentro del su entorno. Cada objeto representara un nodo en una red virtual, transmitiendo continuamente un gran volumen de datos sobre sí mismo y sus alrededores

### 3.7.5 NRF24L01 WIRELESS RF MODULE

Cada módulo puede enviar y recibir datos y comandos. Trabaja con la ayuda de las comunicaciones SPI que es un protocolo con un bus síncrono, lo que significa que utiliza líneas separadas para datos y reloj, lo que dota a ambos dispositivos de perfecta sincronización. Los módulos cuando funcionan de manera eficiente pueden cubrir una distancia de 100 metros.



**Ilustración 10. NRF24L01 WIRELESS RF MODULE**

Fuente (NRF24L01 Circuit & Datasheet, 2019)

### 3.7.6 ESP 32

El ESP32 es un único chip combinado de 2,4 GHz con Wi-Fi y Bluetooth. Está diseñado para lograr el mejor rendimiento de potencia y radiofrecuencia, mostrando robustez, versatilidad y fiabilidad en una amplia variedad de aplicaciones y escenarios de potencia. El uso de Wi-Fi permite una comunicación de mediano alcance y conectarse a una red LAN y a través de un Router conexión a Internet, mientras que el Bluetooth nos permite conectarse directamente a otro dispositivo como un celular.

ESP32 está diseñado para aplicaciones móviles, de electrónica y es un potente modulo que integra Wi-Fi y Bluetooth, ideal para desarrollar productos de IoT. Cuenta con todas las características de los chips de baja potencia. El ESP32 se despierta periódicamente y solo cuando se detecta una condición específica. El ciclo de trabajo bajo se utiliza para minimizar la cantidad de energía que gasta el chip. La salida del amplificador de potencia también es ajustable, lo que contribuye a una óptima compensación entre rango de comunicación, velocidad de datos y consumo de energía.

La corriente de reposo del chip ESP32 es inferior a 5  $\mu$ A, siendo muy eficiente para aplicaciones portátiles o de baterías.

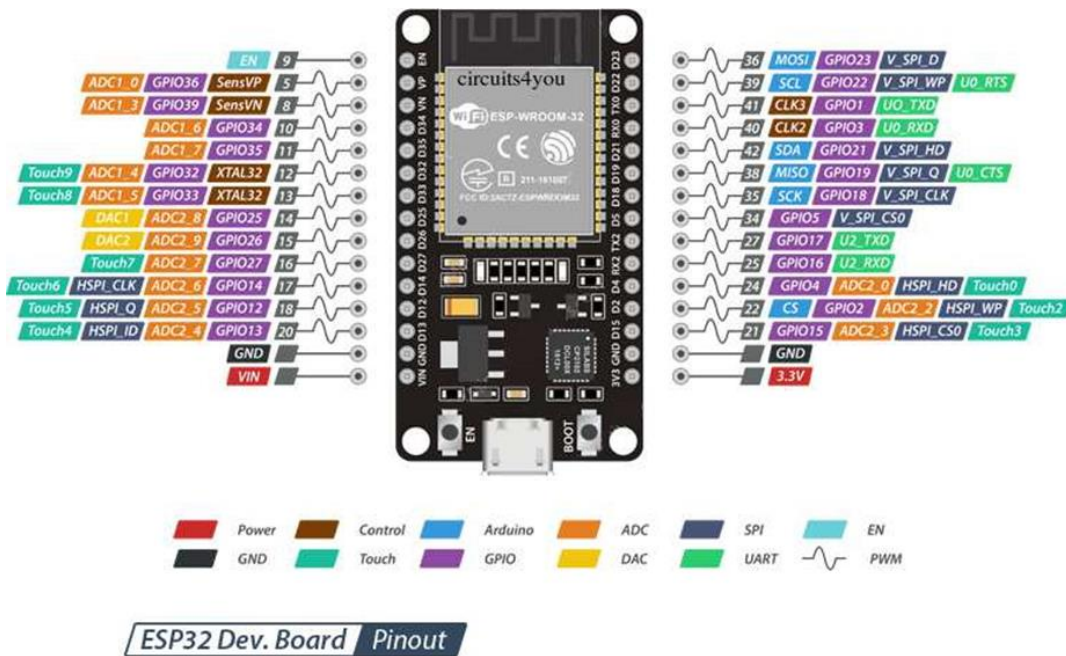
En el núcleo de este microcontrolador se encuentra el módulo ESP-WROOM-32. El chip integrado está diseñado para ser escalable y adaptado, la frecuencia del reloj que posee es ajustable de 80 MHz a 240 MHz. Además, integra un amplio conjunto de periféricos como sensores táctiles capacitivos, sensores Hall, amplificadores de bajo nivel de ruido, interfaz para SD, Ethernet, SPI, UART, I2S e I2C

#### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

- Voltaje de Alimentación: 3.3V DC (2.7~ 3.6V)
- Corriente de Operación: ~80mA
- Voltaje (Entradas/Salidas): 3.3V
- SoC: ESP32 (ESP32-D0WDQ6)
- CPU: Dual core Tensilica LX6 (32 bit)
- Frecuencia de Reloj: 80 MHz a 240MHz
- SRAM: 520KB
- Memoria Flash Externa: 4MB
- Pines Digitales GPIO: 34 (incluyendo todos los periféricos)
- UART: 2
- SPI:3

- I2C:2
- Wi-Fi híbrido y chip Bluetooth

ESP32 es capaz de funcionar de manera confiable en entornos industriales, con una temperatura de funcionamiento que oscila entre  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Alimentado por circuitos de calibración avanzados, ESP32 puede eliminar dinámicamente las imperfecciones de los circuitos externos y adaptarse a los cambios en las condiciones externas. (Espressif Systems, 2019.)



**Ilustración 11. Pines del ESP 32**

Fuente (ElectronicWings, 2018)

### 3.8 MÉTODOS DE ENERGIZADO

#### 3.8.1 ENERGIZADO PIEZOELECTRICO

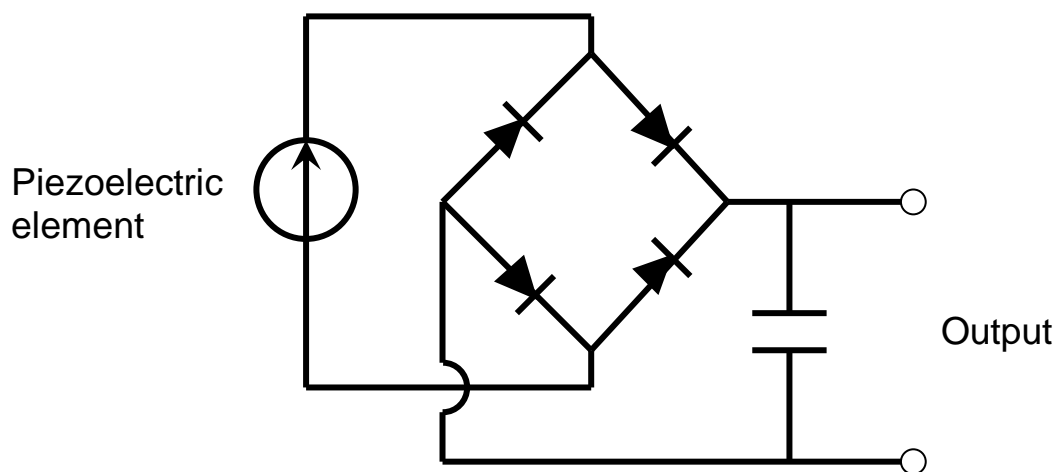
Es posible construir un método de recolección de energía mediante sensores piezoeléctricos. El efecto piezoeléctrico convierte la energía cinética en forma de vibraciones o choques a energía eléctrica. Los generadores piezoeléctricos son una solución viable al convertir la energía de las vibraciones naturales del ambiente a energía eléctrica utilizable para alimentar directamente el sistema de sensores remotos.

La Real academia española define la piezoelectricidad como “Propiedad que tienen ciertos tipos de cristales de polarizarse eléctricamente cuando son sometidos a presión”

El efecto piezoeléctrico fue descubierto por Pierre y Paul-Jacques Curie. Cuando sometieron diferentes materiales a tensiones mecánicas en diferentes ejes de orientación, estos materiales generaron una diferencia potencial en la superficie. En su mayoría, estos materiales eran cristales. Estos cristales mostraron voltajes de diferentes polaridades si se sometían a tensión o compresión y el voltaje estaba relacionado proporcionalmente a la fuerza aplicada.

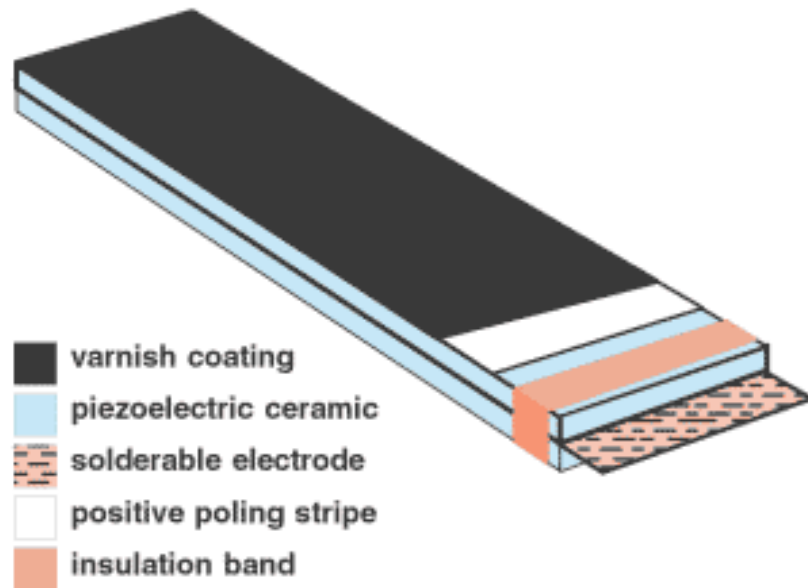
El sistema de captación de energía que se analizó tiene como objetivo almacenar energía durante varios minutos. Cuando la potencia alcance el nivel deseado, los sensores utilizarán la energía almacenada para realizar mediciones y posteriormente la transmisión de los datos de forma inalámbrica.

Este sistema se logra utilizando varios piezoeléctricos en paralelo para generar un mayor voltaje, conectados a un circuito electrónico que consta de un puente de diodos utilizado para convertir la corriente alterna en directa, paralelo al puente se conectaron capacitores en paralelo para almacenar la energía en el proceso de carga del capacitor que luego será entregada en la descarga. Adicionalmente es posible utilizar una fuente Step Up, que ayuda a entregar a la salida más tensión DC de la que recibe a la entrada para lograr el voltaje requerido de funcionamiento.



**Ilustración 12. Circuito de puente de diodos**

Fuente (León, 2007)



**Ilustración 13. Partes de un sensor piezoeléctrico**

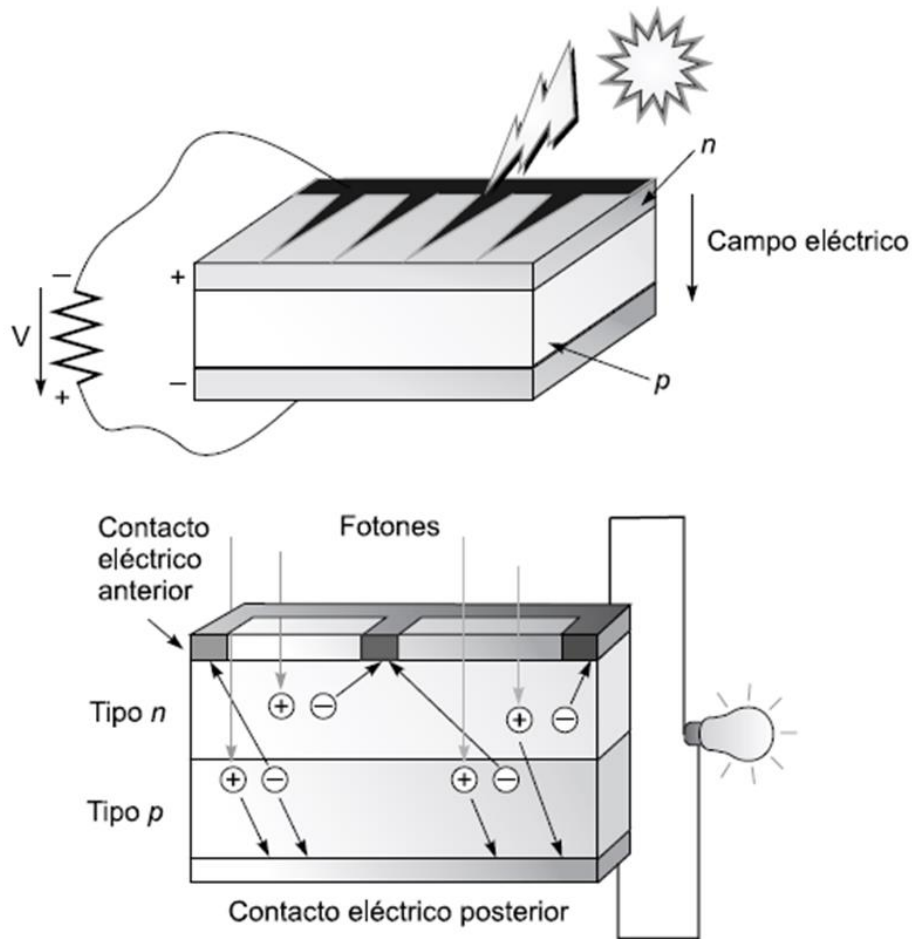
Fuente ("Stipe Actuators-APC International," 2019)

### 3.8.2 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Según la Real Academia Española (2014), la energía solar es aquella obtenida a partir de la radiación del Sol y utilizada para usos térmicos mediante colectores o para generar electricidad con paneles fotovoltaicos.

El efecto fotoeléctrico es el fenómeno que consiste en la emisión de electrones por un material cuando incide sobre él una radiación electromagnética ya sea luz visible, ultravioleta o luz en general.

Las partículas de luz llamadas fotón, impactan contra un material produciendo emisiones de electrones. El electrón se mueve durante el proceso, dando origen a una corriente eléctrica. Es decir que la energía proveniente del sol en forma de fotones crea un movimiento de los electrones en ciertas superficies, causando una corriente eléctrica. Este fenómeno es la base de la generación eléctrica por medio de celdas fotovoltaicas.



**Ilustración 14. Funcionamiento de una celda solar**

Fuente (Gonzalez, Perez, Colmenar, & Castro, 2009)

Los paneles o módulos fotovoltaicos, llamados comúnmente paneles solares, están formados por un conjunto de células fotovoltaicas fabricadas de materiales semiconductores, es decir que solo conducen corriente eléctrica en un sentido. El material más comúnmente utilizado y más desarrollado para fabricar celdas solares es el silicio, que se corta en capas muy delgadas y es dopada con electrones para formar la Capa N y la otra es privada de electrones formando la Capa P, creando una unión PN que es semiconductora. Los electrones fluyen al ser impactados por radiación solar, de la capa N a la P, generando un voltaje.

## ELEMENTOS DE UN PANEL FOTOVOLTAICO

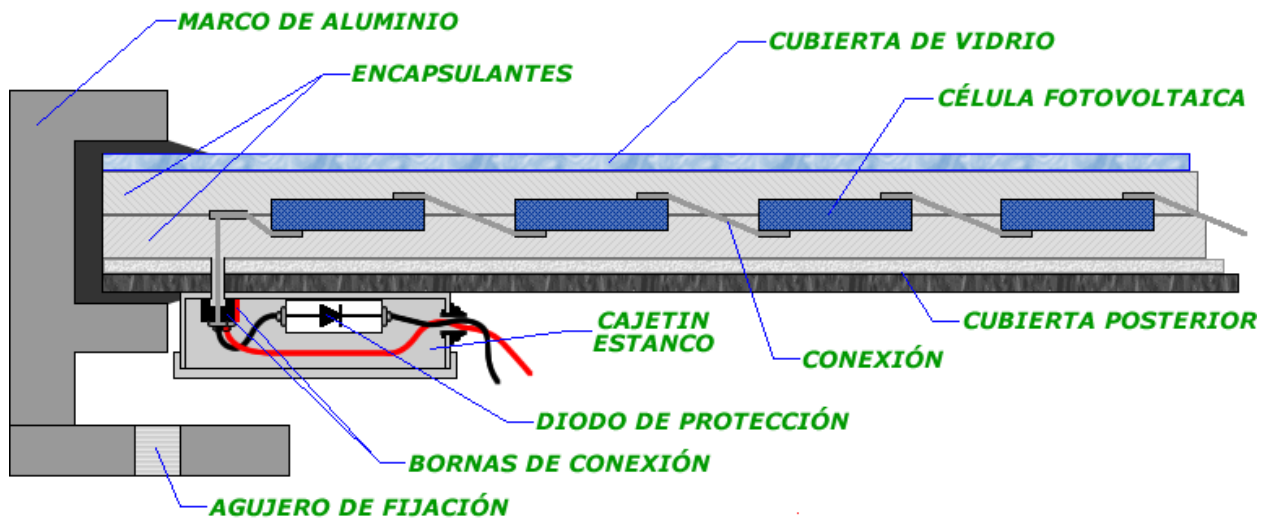


Ilustración 15. Partes de un panel solar

Fuente: (Zelaya, 2019)

Las especificaciones técnicas para considerar para utilizar un panel son:

- Potencia: Define la capacidad máxima del panel, sus unidades son Watt-pico (Wp)
- Tensión de circuito abierto: Nivel de tensión en las terminales de conexión del panel sin estar conectado, unidades Vcc.
- Tensión de plena carga: Nivel de tensión en las terminales de conexión al momento de máxima potencia, unidades Vcc.
- Corriente de corto circuito: Nivel de corriente al momento de cortocircuitar las terminales de conexión al momento de máxima potencia, unidades Acc
- Corriente de operación: Nivel de corriente eléctrica funcionando a máxima potencia, unidades Acc.
- Peso: Define el peso del panel, unidades Kg.
- Dimensiones: Incluye el largo, ancho y profundidad del panel, sus unidades pueden ser cm o mm.

Para utilizar energía fotovoltaica se debe calcular la declinación solar de la ubicación del panel solar. La declinación Solar se calcula con la siguiente formula en la que necesitaremos la constante  $\pi = 3.141592654$  y  $\delta_0 = 23.45$

$$\delta = \delta_0 \sin \left[ 2\pi \left( \frac{284 + n}{365} \right) \right]$$

**Ecuación 1. Declinación solar**

Además, se calcula el ángulo Horario

$$w_s = -\tan \delta \tan \theta$$

**Ecuación 2. Angulo horario**

Y la altura Solar

$$\alpha = (\sin \delta \sin \theta + \cos \theta \cos \alpha \cos w_s)$$

**Ecuación 3. Altura Solar**

También es importante conocer los datos de irradiación solar que se define como la magnitud que mide la energía por unidad de área de radiación solar incidente en una superficie (Irradiación solar,2019). La magnitud que describe la radiación solar que llega a la tierra es llamada irradiancia. La irradiancia se expresa en unidades de potencia por superficie, generalmente  $W/m^2$ .

La irradiación solar en la superficie terrestre es la adición en un intervalo de tiempo determinado de la radiancia solar filtrada por la interposición de la atmósfera por lo tanto su valor depende de la época del año, de la latitud, la climatología local y las horas del día.

- Tipos de irradiancia solar:

**La irradiación solar total:** medida de la potencia solar en todas las longitudes de onda por unidad de área incidente en la atmósfera superior de la Tierra.



**La irradiación normal directa:** es igual a la irradiancia extraterrestre por encima de la atmósfera menos las pérdidas atmosféricas debidas a la absorción y dispersión

**La irradiación horizontal difusa:** es la radiación en la superficie de la Tierra a partir de la luz dispersada por la atmósfera.

**La irradiación horizontal global:** es la irradiancia total del sol sobre una superficie horizontal en la Tierra. Es la suma de la todas las irradiancias.

## IV. METODOLOGÍA

### 4.1 ENFOQUE

El siguiente proyecto tiene un enfoque cuantitativo ya que se basa en datos numéricos de las mediciones que se obtendrán de los sensores, además un enfoque de desarrollo tecnológico ya que pretende crear un prototipo del diseño propuesto.

### 4.2 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

- Parámetros medidos en las vibraciones

El sistema electrónico fue diseñado para la medición de los principales parámetros que se encuentran en las vibraciones necesarias para su análisis, con el objetivo de determinar la condición de la estructura. Se tuvo el apoyo bibliográfico de la norma BS 7385 *Evaluación and measurement for vibration in buildings*.(British Standard BS 7385, 1993)

- Componentes electrónicos a utilizar

Fue necesario decidir qué sensores y componentes utilizar de acuerdo a los parámetros que se decidieron medir, se ha tomado en cuenta el requerimiento de ser instalados de manera sencilla y que sean capaces de realizar una medición constante, de bajo consumo y de poco mantenimiento.

- Procesamiento de datos

El monitoreo de los datos debe de ser posible de forma remota, con la finalidad de brindarle seguimiento y atención a las estructuras. Por lo que fue necesario una programación del microcontrolador para procesar los datos que monitorea el sensor y luego transmitirlo.

- Diseño de sistema de transmisión

El proyecto requiere del diseño de un sistema de comunicación que envíe los datos obtenidos por medio de componentes electrónicos de manera inalámbrica, utilizando un bajo consumo de energía realizando un enlace por radiofrecuencia.

- Diseño de sistema de alimentación de energía eléctrica

El sistema debe funcionar de manera autosuficiente, desconectado de la red eléctrica para facilitar su instalación en cualquier lugar. Requiere ser alimentado con una fuente externa que no demande de constante mantenimiento.

### **4.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS**

- IDE de Arduino: el software permite la compilación, creación y edición de códigos con la extensión .ino en una tarjeta Arduino, su utilización requiere conocimiento de lenguaje de programación C++.
- CAD: se define como diseño asistido por computadora y son softwares que se utilizan para diseñar y fabricar productos.
- SolidWorks: es un software CAD para modelado mecánico en 2D y 3D, que permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción.
- PHPMyAdmin: es un software de código abierto, diseñado para manejar la administración y gestión de bases de datos MySQL a través de una interfaz gráfica de usuario.
- Global Solar Atlas: es una página web que proporcionar un acceso rápido y fácil a los recursos solares y los datos de potencial de energía fotovoltaica a nivel mundial utilizado para diseño de sistemas fotovoltaicos.

### **4.4 MATERIALES**

- ESP 32: es un microcontrolador que funciona para interpretar las señales de los sensores y además transmitirlos de manera inalámbrica.
- MPU6050: contiene un acelerómetro MEMS y un gyro MEMS en un solo chip. Captura los canales x, y y z al mismo tiempo así medimos las variables de la aceleración, inclinación o velocidad angular.
- Hostinger URL: es un proveedor de alojamiento web y dominios web.
- Panel solar: placa solar o módulo solar es un dispositivo que capta la energía de la radiación solar para su aprovechamiento.

- Batería de litio recargable: es un dispositivo diseñado para almacenamiento de energía eléctrica que emplea como electrolito una sal de litio que consigue los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo.
- Cargador de baterías: modulo electrónico utilizado para protección de sobrecarga especialmente con fuentes que varían mucho como los paneles solares.

**Tabla 2. Materiales**

| <b>Elemento</b>                               | <b>Fuente</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Precio unitario (USD.)</b> | <b>Precio unitario (LPS.)</b> | <b>Costo total(USD.)</b> | <b>Costo total(LPS.)</b> |
|---|---------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Tarjeta de desarrollo Wi-fi ESP32             | Comercial     | 1               | USD.18.00                     | LPS.444.60                    | USD.18.00                | LPS.444.60               |
| Giroscopio y Acelerómetro para Arduino MPU650 | Comercial     | 1               | USD.8.00                      | LPS.197.60                    | USD.8.00                 | LPS.197.60               |
| Batería de 7.4 voltios Recargable             | Comercial     | 1               | USD.8.00                      | LPS.197.60                    | USD.8.00                 | LPS.197.60               |
| Protoboard                                    | Comercial     | 1               | USD.8.00                      | LPS.197.60                    | USD.8.00                 | LPS.197.60               |
| Panel Solar 12V/5W                            | Comercial     | 1               | USD.22.00                     | LPS.543.40                    | USD.22.00                | LPS.543.40               |
| Diodo 1n4004                                  | Comercial     | 1               | USD.0.50                      | LPS.12.35                     | USD.0.50                 | LPS.12.35                |
| Cargador de Batería de Litio 3S               | Comercial     | 1               | USD.7.00                      | LPS.172.90                    | USD.7.00                 | LPS.172.90               |
| <b>Total</b>                                  |               |                 |                               |                               | USD.71.50                | LPS.1,766.05             |

Fuente: Elaborada por autor

## **4.5 METODOLOGÍA DE ESTUDIO**

### **4.5.1 ANÁLISIS DE PROYECTOS RELACIONADOS CON EL TEMA**

Para lograr un buen desarrollo del proyecto con un criterio válido, para el análisis de soluciones efectivas, se debe acudir a la investigación bibliográfica, por este motivo se ha consultado en variadas fuentes como libros, tesis de pregrado y postgrado, páginas web y artículos científicos. Con la información recolectada se desarrolló el marco teórico y metodologías necesaria para llevar a cabo el proyecto.

### **4.5.2 DETERMINACIÓN DE VARIABLES A MEDIR**

Existen tres métodos para expresar la vibración de un cuerpo. La primera forma es a través de la medición de su desplazamiento, relacionado con el estrés que sufre el cuerpo. Este método se utiliza cuando las frecuencias están debajo de 600 cpm. La segunda forma es mediante la medición de la velocidad, relacionado con la fatiga. Este método de medición se usa cuando las frecuencias están en el rango de 600 y 60,000 cpm. La tercera forma es mediante la medición de la aceleración, relacionada a la fuerza que provoca la vibración. Se usa cuando las frecuencias están arriba de 60,000 cpm (Ocampo, 2013).

El análisis vibratorio demanda dos tipos de mediciones: medición de amplitud y medición de frecuencia. Amplitud y frecuencia son los dos parámetros claves para el análisis vibratorio y deben ser evaluados en las variables que definen, desde el punto de vista cinético, a una vibración: desplazamiento, velocidad, aceleración y envolvente.

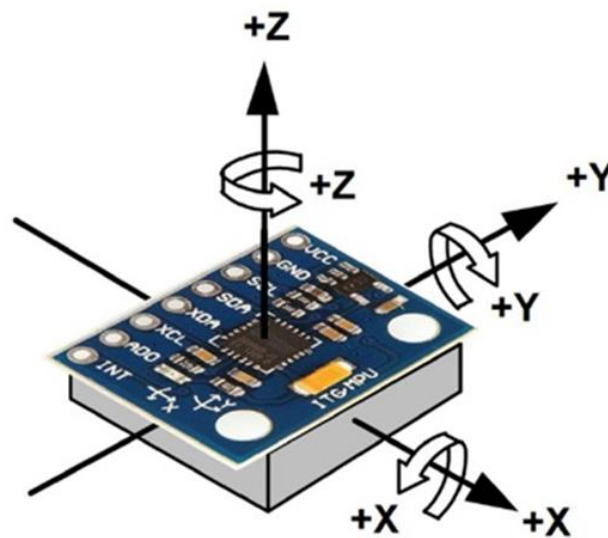
Los cambios de frecuencia múltiples pueden proporcionar información espacial sobre el daño estructural porque los cambios en la estructura en diferentes lugares causarán diferentes combinaciones de cambios en las frecuencias modales.

### **4.5.3 ADQUISICIÓN DE DATOS**

Se procedió a seleccionar los sensores a utilizar, se buscó crear un sistema de toma de datos con las siguientes características:

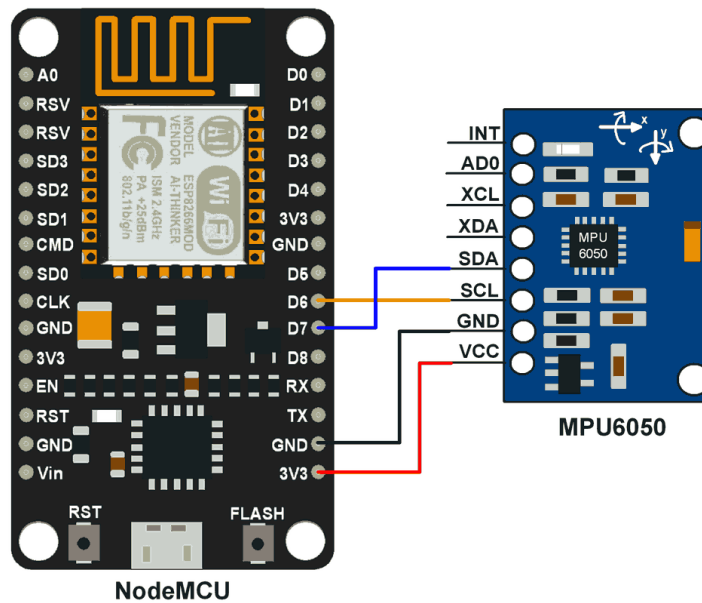
- Fácil instalación y uso
- Poca intervención humana para la medición de datos
- Capaz de realizar mediciones automáticas y continuas
- Bajo nivel de mantenimiento
- Rango de medición dentro de los parámetros.
- Bajo consumo eléctrico
- Bajo costo sin perder la calidad

Ante la investigación y cotización de sensores que cumplieran con tales características, se ha determinado que el sensor MPU 6050 es la mejor opción ya que contiene un acelerómetro MEMS y un gyro MEMS en un solo chip. Es muy preciso, ya que contiene hardware de conversión de analógico a la digital de 16 bits para cada canal. Por lo tanto, captura los canales x, y y z al mismo tiempo. Además, incluye la tecnología Digital Motion Processor que es un coprocesador de movimiento que permite ejecutar algunos algoritmos esenciales y reducir la carga en el procesador principal. El sensor usa el bus I2C para interactuar con el Arduino que procesara los datos tomados. Su voltaje de operación es de 3.3V y sus dimensiones don de 21.2mm de largo x 16.4mm de ancho y x 3.3mm de altura y peso de 2.1g .



**Ilustración 16. Dirección de los ejes del MPU 6050**

Fuente: (MiArduino, 2016)



**Ilustración 17. Conexión del sensor con el microprocesador ESP 32**

Fuente: (Nodemcu, 2018)

#### 4.5.4 PROCESAMIENTO DE DATOS

El sensor elegido tiene una señal de salida analógica. El microprocesador tiene dos propiedades fundamentales en la lectura de señales analógicas, la primera es que tiene entradas de señal analógica en la que admiten señales de voltaje entre 0 y 5V, la segunda propiedad es su resolución analógica, la cual trata del número de bits que se usa para representar con una notación digital una señal analógica.

En la programación hecha mediante el IDE de Arduino en la que debe incluir la librería MPU 6050.h para realizar las lecturas del acelerómetro. Se define la dirección I2c que es 0x68. Se inicia el microcontrolador con los 3.3V del acelerómetro como voltaje de referencia para la conversión Analógica/Digital.

```

#include "I2Cdev.h"
#include "MPU6050.h"
#include <WiFi.h>
#include <HTTPClient.h>

const char* ssid = "CC-528239";
const char* password = "contraseña";

#if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE
    #include "Wire.h"
#endif

MPU6050 accelgyro;

int16_t ax, ay, az;
int16_t gx, gy, gz;
unsigned long tiempo= 0;

```

### Ilustración 18. Configuración de sketch para procesamiento de datos

Fuente: Elaborado por autor

Se deben declarar las entradas que se quieren leer y almacenar, en este caso los datos de aceleración en cada eje.

En el void setup se inicializan los dispositivos y se imprime la verificación de conexión.

```

Wire.begin();
Serial.begin(115200);
// initialize device
Serial.println("Initializing I2C devices...");
accelgyro.initialize();
// verify connection
Serial.println("Testing device connections...");
Serial.println(accelgyro.testConnection() ? "MPU6050 connection successful" : "MPU6050 connection failed");

// configure Arduino LED pin for output
pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
}

```

### Ilustración 19. Configuración de sketch para procesamiento de datos

Fuente: Elaborado por autor



La primera función lee la aceleración de los componentes z-y-x, luego se programa un filtro para eliminar el ruido que interfiere con la toma de datos.

```
void loop() {
  tiempo = millis();
  while(millis() - tiempo <= 10000){

    // read raw accel/gyro measurements from device
    accelgyro.getAcceleration(&ax, &ay, &az);

    #ifdef OUTPUT_READABLE_ACCELGYRO
      /*----- FILTRO -----*/
      //EJE Z
      if(abs(valor_viejo_az - az) < 320){
      }else{
        valor_viejo_az = az;
      }
      //EJE Y
      if(abs(valor_viejo_ay - ay) < 320){
      }else{
        valor_viejo_ay = ay;
      }
      //EJE X
      if(abs(valor_viejo_ax - ax) < 320){
      }else{
        valor_viejo_ax = ax;
      }
    #endif
  }
}
```

### **Ilustración 20. Configuración de sketch para procesamiento de datos**

Fuente: Elaborado por autor

Finalmente hacemos promedios de los valores que se tomaron durante 10 segundos.

```

/*----- PROMEDIAR -----*/
//EJE Z
promedio_az = (promedio_az + valor_viejo_az)/2;
//EJE Y
promedio_ay = (promedio_ay + valor_viejo_ay)/2;
//EJE X
promedio_ax = (promedio_ax + valor_viejo_ax)/2;

#endif
```

### **Ilustración 21. Configuración de sketch para procesamiento de datos**

Fuente: Elaborado por autor

#### 4.5.5 TRANSMISIÓN DE DATOS

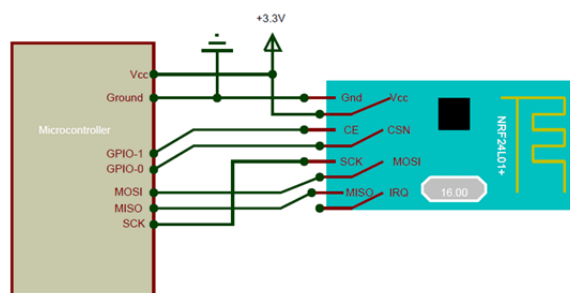
Los sistemas como Fieldbus, Ethernet Industrial, y las recientes Redes Inalámbricas aplicadas en estos ámbitos, son los que marcan el camino de las telecomunicaciones industriales en la actualidad. Gracias a las modernas tecnologías de comunicaciones, se van modificando las arquitecturas de las redes de automatización, llegando hasta las actuales arquitecturas híbridas que combinan cable y redes inalámbricas.

Al permitir que las personas visualicen los datos de cualquier lugar, el monitoreo remoto es ideal para situaciones con condiciones ambientales severas o peligrosas o donde una única persona o equipo debe monitorear los resultados de varios lugares o fuentes. El monitoreo remoto puede ser combinado con el monitoreo celular o inalámbrico para alertar cuando las condiciones locales requieren revisión o acción.

Los sistemas de monitoreo remotos tienen una transmisión de datos que permite un flujo de información eficiente. Los sensores periódicamente toman muestras de los datos requeridos y transmiten los datos a un receptor que mantiene una base de datos completos de todos los datos muestreados.

- Módulo NRF24L01 RF inalámbrico

Se investigó sobre el módulo NRF24L01 RF inalámbrico para la transmisión de los datos medidos por el MPU 6050. Este módulo transmite y recibe datos, dependiendo de la programación. Además, es de bajo costo y bajo consumo de energía. Tiene una frecuencia de operación de frecuencia de 2.4GHz y un alcance de hasta 100 metros.



**Ilustración 22. Diagrama de conexión del microcontrolador con el módulo de transmisión**

Fuente: (Circuit & Datasheet, 2018)

- ESP - WROOM – 32

Para la comunicación se planteó la necesidad de la comunicación a larga distancia de manera inalámbrica, con bajo consumo de energía, con la posibilidad de conectar varios dispositivos.

Para cumplir tales objetivos se decidió utilizar el microcontrolador ESP 32 que utiliza un módulo ESP - WROOM – 32 para comunicación por wifi, para lograr esta comunicación se programó el microcontrolador mediante el IDE de Arduino .



**Ilustración 23. ESP - WROOM – 32**

Fuente (ElectronicWings, 2018)

En la programación se debe incluir la librería **WiFi.h** y HTTPClient.h para lograr la comunicación WiFi y el SSID (Service Set Identifier) que es una secuencia de 0-32 octetos incluida en todos los paquetes de una red inalámbrica para identificarlos como parte de esa red, en esta se escribe el nombre de la red que se va a utilizar, luego se escribe la contraseña de esa red.

```
prueba_tiempo_wifi §
```

```
#include "I2Cdev.h"
#include "MPU6050.h"
#include <WiFi.h>
#include <HTTPClient.h>

const char* ssid = "CC-528239";
const char* password = "contraseña";

#if I2CDEV_IMPLEMENTATION == I2CDEV_ARDUINO_WIRE
    #include "Wire.h"
#endif
```

**Ilustración 24. Configuración de sketch para transmisión de datos**

Fuente: Elaborado por autor

En el void setup se conecta a la red y se imprime la respuesta de que la conexión se realizo

```
void setup() {  
  
    Serial.begin(115200);  
    WiFi.begin(ssid, password);  
    delay(2000);  
  
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {  
        delay(5000);  
        Serial.println("Connecting to WiFi..");  
    }  
    Serial.println("Connected to the WiFi network");  
  
    Wire.begin();  
    Serial.begin(115200);  
    // initialize device  
    Serial.println("Initializing I2C devices...");  
    accelgyro.initialize();  
    // verify connection  
    Serial.println("Testing device connections...");  
    Serial.println(accelgyro.testConnection() ? "MPU6050 connection successful" : "MPU6050 connection failed");  
}
```

### Ilustración 25. Configuración de sketch para transmisión de datos

Fuente: Elaborado por autor

Luego se crea el url con el orden en el que se van a transmitir los datos

```
String url="dondehn.com/url.php?";  
url = url + "promedio_az=" + promedio_az + "&promedio_ay=" + promedio_ay + "&promedio_ax=" + promedio_ax;  
if ((WiFi.status() == WL_CONNECTED)) { //Revisar si se conecto a la red WiFi  
  
    HTTPClient http;  
  
    http.begin(url); //Specify the URL  
    int httpCode = http.GET(); //request del dato  
  
    if (httpCode > 0) { //Revisar la respuesta  
  
        String payload = http.getString();  
        Serial.println(httpCode);  
        Serial.println(payload);  
    }  
  
    else {  
        Serial.println("Error on HTTP request");  
    }  
}
```

### Ilustración 26. Configuración de sketch para transmisión de datos

Fuente: Elaborado por autor

Si no ocurre ningún error de red se imprimen los datos en el monitor serial (si está disponible) y se transmiten cada 30 segundos a la base de datos.

```

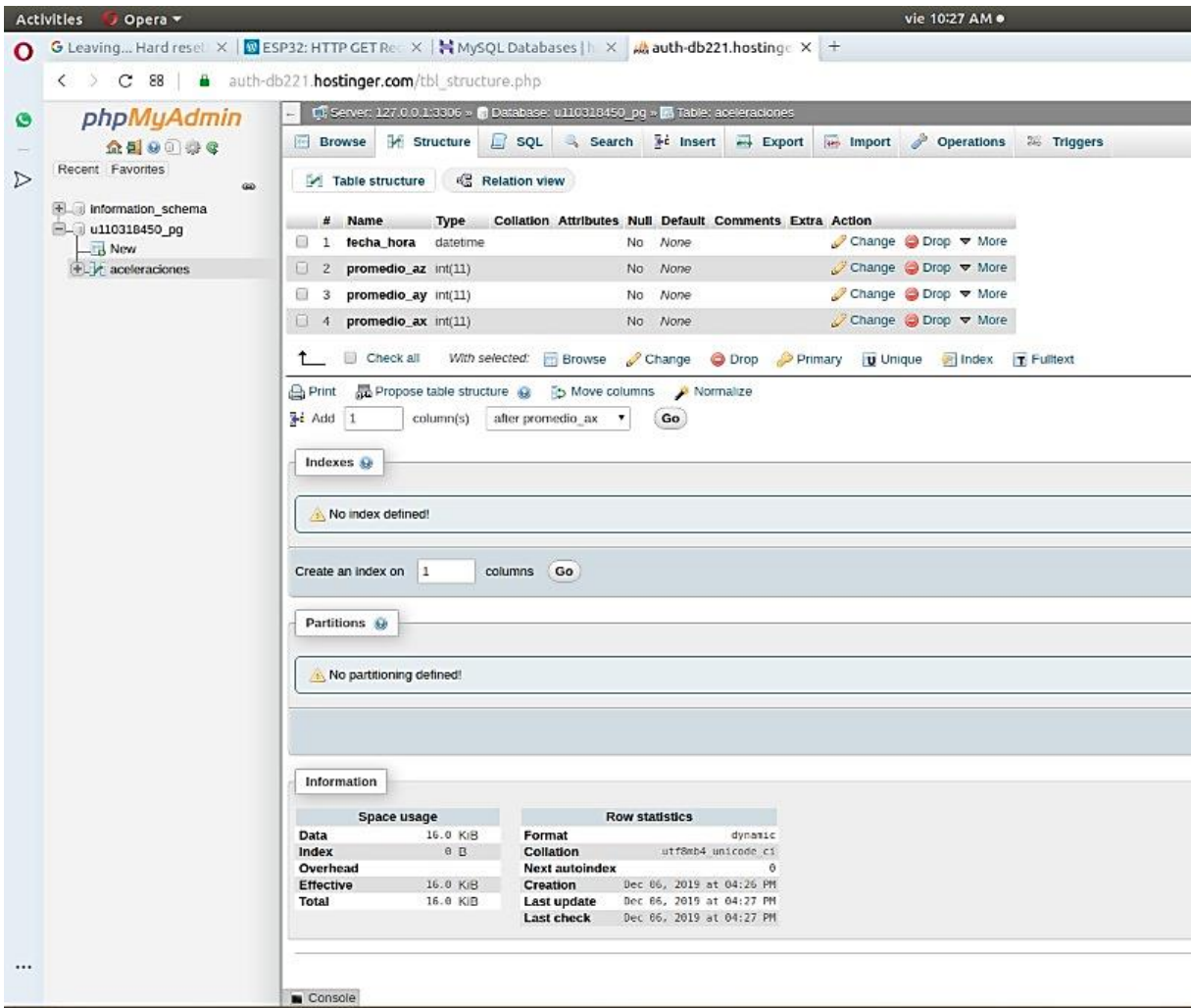
delay(30000);
//DEBUG
Serial.print(promedio_az); Serial.print("\t");
Serial.print(promedio_ay); Serial.print("\t");
Serial.print(promedio_ax); Serial.print("\n");
Serial.println("FIN!");
}

```

**Ilustración 27. Configuración de sketch para transmisión de datos**

Fuente: Elaborado por autor

La base de datos es creada en MySQL y administrada mediante phpMyAdmin, que es una herramienta escrita en PHP con la intención de manejar MySQL a través de páginas web, utilizando un navegador web.



**Ilustración 28. Creación de la estructura de la base de datos**

Fuente: Elaborado por autor

#### 4.5.6 ENERGIZADO DE SISTEMA

Los sistemas de monitoreo tienen la necesidad de ser conectados a fuentes externas o cambiar las baterías regularmente para alimentar sus dispositivos. La vida útil de las baterías no recargables aun es limitada y la actividad de reemplazar las baterías muy seguido en lugares poco accesibles se vuelve una tarea muy inconveniente (León, 2007). Existen muchos tipos energizado autosuficiente, sin embargo, luego de la investigación realizada se utilizó un sistema de energizado fotovoltaico.

- Diseño de sistema de energizado fotovoltaico

Para determinar la energía que debe suministrar el panel se debe calcular el tiempo total de encendido de los componentes, el sistema diseñado realiza mediciones de 10 segundos en intervalos de 30 segundos, eso quiere decir que en un periodo de 2 minutos el sistema va a estar encendido por 30 segundos, calculando el tiempo de encendido en una hora se obtiene lo siguiente

$$\textit{Tiempo de encendido} = 30s * 30 = 900s$$

El tiempo de encendido por hora es de 900 segundos, se convierten los segundos a horas y se obtiene lo siguiente

$$900s = \frac{1 \textit{ hr}}{3600 \textit{ s}} = 0.25 \textit{ h}$$

Se calcula el tiempo de encendido total por día y obtiene lo siguiente

$$\textit{Tiempo de encendido por dia} = 0.25h * 24 = 6 \textit{ h}$$

Seguidamente se calcula la energía total consumida por día multiplicando el tiempo de encendido por la potencia consumida por el sistema, en este caso se requieren de 500mA y 7.4 voltios y se obtiene lo siguiente

$$P = I * V = 500mA * 7.4V = 3.7 \textit{ W}$$

$$E_c = \textit{Tiempo de encendido} * \textit{potencia consumida} = 6h * 3.7W = 22.2 \textit{ Wh}$$

#### **Ecuación 4. Energía total consumida**

Fuente (Escobar, 2018)

Se debe considerar que la energía que el sistema consume del panel es solo la mitad de lo que se calculó, ya que solo se alimentara la mitad del día mientras exista luz solar por lo tanto será de 11.1 Wh.

Seguidamente se calcula la cantidad de paneles requeridos para alimentar el sistema, se toman como datos de base una Irradiación promedio para Honduras de 5 kWh/m<sup>2</sup>/día (Flores, Ojeda, Flores, & Rivas, 2011) por lo tanto habrá en promedio 5 Horas de Sol Pico (HSP) es decir 5.5 horas con 1000 W/m<sup>2</sup> incidiendo sobre los módulos FV.

$$\begin{aligned} \text{Número de módulos} &= \frac{\text{Energía total consumida}}{\text{HSP} * \text{Rendimiento del panel} * \text{Potencia máxima del módulo}} \\ &= \frac{11.1 \text{ Wh}}{5.5h * 0.80 * 5W} = 0.51 \approx 1 \end{aligned}$$

**Ecuación 5. Número de módulos a utilizar**

Fuente (Escobar, 2018)

Energía suministrada por un panel con capacidad de 5W es la siguiente:

$$\text{Es} = 5W * 5.5 \text{ horas de sol efectivo} = 27.5 \text{ Wh}$$

**Ecuación 6. Energía suministrada por el panel**

Fuente (Escobar, 2018)

Se requiere de 1 panel que entregue una potencia de 5W, el sistema demanda 11.1 Wh, el resto de la energía va a cargar la batería que energizara al sistema en las horas que no haya luz solar.

Para conocer la capacidad que debe suplir la batería se realizan los siguientes cálculos:

$$\begin{aligned} C_p &= \frac{E * \text{Días de autonomia}}{\text{descarga de baterías}} \\ &= \frac{11.1 \text{ Wh} * 0.77}{0.8} = 10.68 \text{ Wh} \end{aligned}$$

**Ecuación 7. Capacidad de la batería**

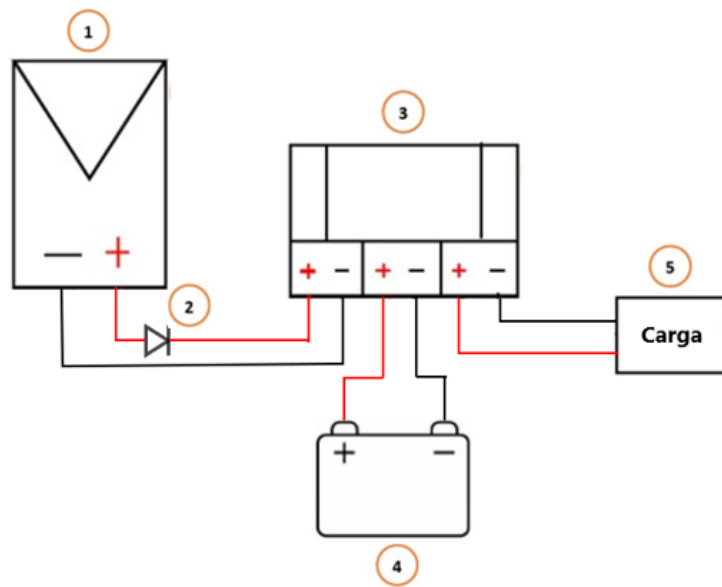
Fuente (Escobar, 2018)

Seguidamente calculamos la capacidad en mAh, ya que comercialmente así se define la capacidad de una batería, como ya se conoce el voltaje que se necesita, se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{10.68Wh}{7.4V} = 1.44 mAh$$

Por lo tanto, se requiere de 1 batería recargable de litio de 7.4 V, 2000 mAh que se cargará con la energía sobrante del panel solar y alimentará el sistema en la noche.

Ahora debemos considerar la parte de carga del proceso. El panel solar no estará generando energía todo el día, las horas promedio que genera un panel con luz solar son 5.5, en esos momentos la irradiancia es alta, por lo tanto, la corriente es alta, para solucionar las variaciones de potencia se utilizara un cargador de batería regulable que admita variaciones de entrada provenientes del panel y que mantenga un voltaje estable de salida para la batería.






| Número de referencia | Componente           |
|----------------------|----------------------|
| 1                    | Módulo Fotovoltaico  |
| 2                    | Diodo                |
| 3                    | Cargador de baterías |
| 4                    | Batería              |
| 5                    | Carga                |

**Ilustración 29. Diagrama de conexión de sistema de energizado**

Fuente: Elaborado por autor



Como se observa en el diagrama de conexión del sistema de energizado, se utilizó un diodo para evitar corrientes de retorno que pueden dañar el panel, luego un cargador regulable de baterías para mantener la alimentación estable en la batería y la carga.

| SunLink PV  |         | SL005-12M5 |
|---|---------|------------|
| Rated Max Power   | (Pmax)  | 5W         |
| Minimum power tolerance   |         | -3%~+3%    |
| Current at Pmax at STC  | (Imp)   | 0.30A      |
| Voltage at Pmax at STC  | (Vmp)   | 16.8V      |
| Short-Circuit Current at STC  | (Isc)   | 0.34A      |
| Open-Circuit Voltage at STC   | (Voc)   | 21.0V      |
| Normal Operating Cell Temp  | (Tnoct) | 45+/-2°C   |
| Weight  |         | 1kg        |
| Max System Voltage  |         | 1000V      |
| Max Series Fuse Rating  |         | 2A         |
| Application Class   |         | A          |
| STC: AM=1.5 E=1000W/m <sup>2</sup> Tc=25°C  |         |            |
| Add:Zhangjiagang Economic Development Zone,Jiangsu Province,China 215600  |         |            |
| Tel:0086-512-58992216 Fax:0086-512-58992258   |         |            |
|  Warning:electric hazard<br>This unit produces electricity if exposed to light<br>Do not disconnect under load  |         |            |
|     |         |            |

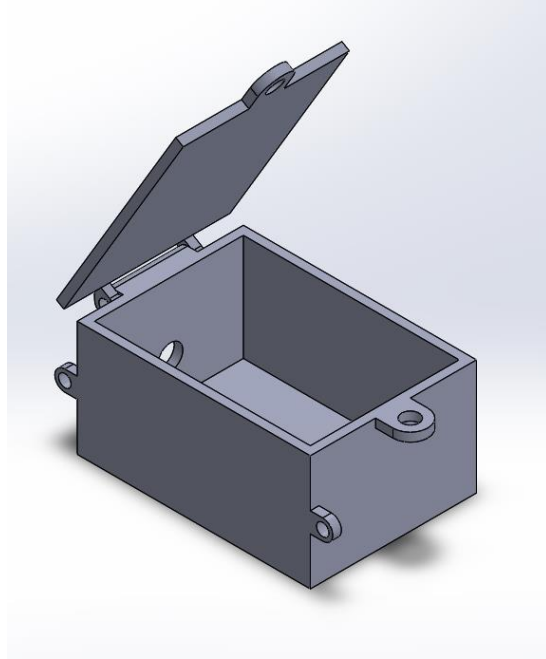
**Ilustración 30. Ficha técnica del panel solar seleccionado**

Fuente: Elaborado por autor

#### 4.5.7 DISEÑO DE PROTOTIPO

Para el diseño del prototipo se debe tener en cuenta la ubicación del mismo, para la determinación de deformación por cizalladura del edificio en su conjunto se requieren mediciones directamente en los miembros que soportan la carga que son los que le dan la rigidez de la estructura como ser las columnas.

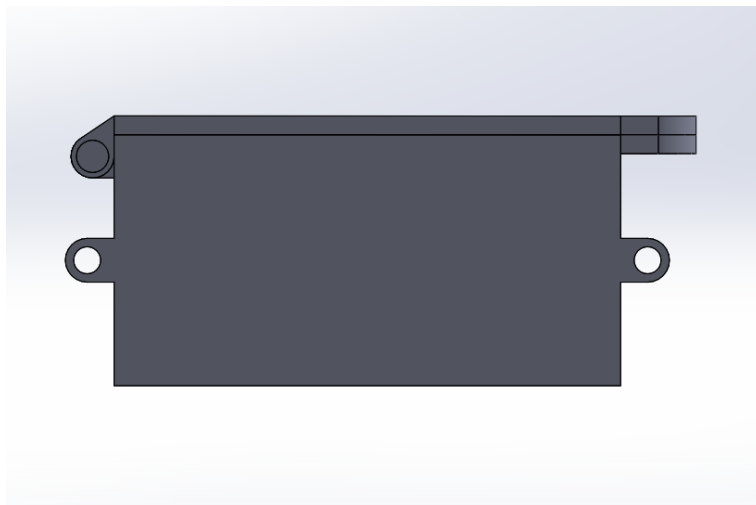
La masa del transductor y la unidad de monitoreo no debe ser mayor al 10% del elemento de construcción al cual está fijo. El montaje debe ser lo más rígido y ligero posible, se diseñó el prototipo de la estructura de protección del sensor en SolidWorks.



**Ilustración 31. Modelado 3D de caja protectora**

Fuente: Elaborada por autor

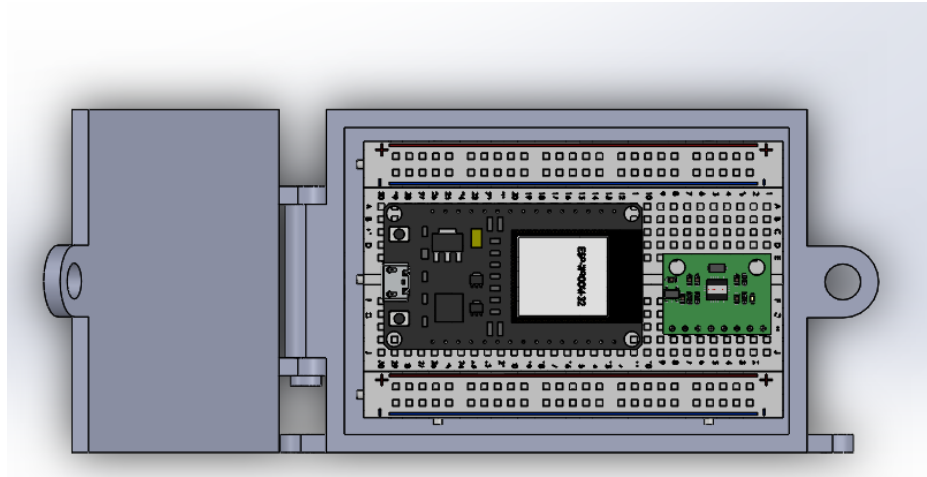
Esta pieza cuenta con dos partes, una caja en la que ira colocado el sensor y una tapadera para mantenerlo cerrado, se le agrego una ranura para asegurar la caja con candado, también dos soportes para atornillar la caja a la pared y mantenerla fija a ella. Los planos de este modelo se encuentran en el Anexo 3.



**Ilustración 32. Modelado 3D de caja protectora**

Fuente: Elaborada por autor

Dentro de esta caja está ubicado el microcontrolador con el sensor



**Ilustración 33. Modelado 3D de elementos utilizados**

Fuente: Elaborada por autor

## 4.6 METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN

### 4.6.1 MEDICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS DE ACELERACIONES

Para la validación del sistema se medición se realizaron pruebas de cantilever beam analysis para simular la vibración en una viga sometida a una fuerza, con este método se pretendía generar una vibración con una amplitud y frecuencia específica para medir la aceleración y comparar ese resultado con simulaciones del modelo de cantilever realizado en SolidWorks.

Tras las pruebas de cantilever (viga en voladizo) se obtuvieron los diferentes resultados:

- Prueba de laboratorio

$$F = 1Hz ; A = 4.480 ; m = 0.005 kg$$



**Ilustración 34. Pruebas de Cantilever para 1Hz**

Mediante el programa realizado en la IDE de Arduino se obtienen los datos correspondientes a la aceleración en cada uno de sus ejes

Tomaremos el valor correspondiente a la aceleración en el eje "z", el valor que mide el sensor está en grados g, mediante una sencilla formula se convierten a  $m/s^2$

$$a = 3867 * \frac{9.81 \text{ m/s}^2}{16384} = 2.3154 \text{ m/s}^2$$

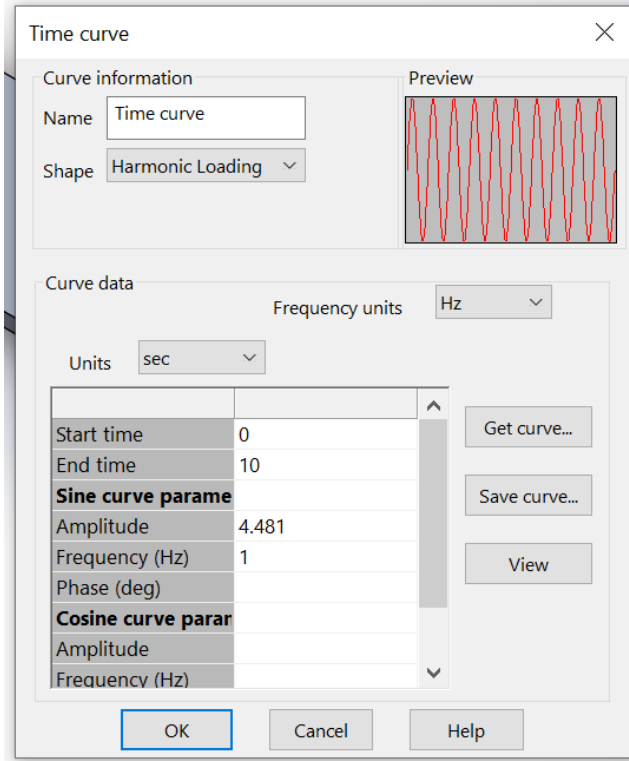
Conociendo la aceleración y la masa calculamos la fuerza ejercida

$$F = m * a = 0.005 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0.049 \text{ N}$$

Con el dato RMS del voltaje calculamos a voltaje pico pico para conocer la amplitud

$$V_{pp} = \frac{3.169 V_{RMS} * 2}{\sqrt{2}} = 4.481 V_{pp}$$

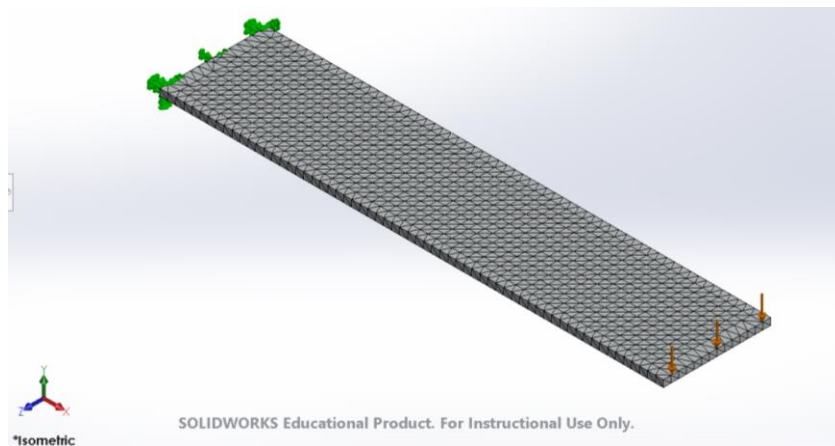
Con los datos de la fuerza, la frecuencia y la amplitud realizamos una simulación de análisis dinámico en SolidWorks para comprobar las medidas del sensor.



**Ilustración 35. Definición de la carga armónica para 1 Hz**

Fuente: Elaborada por autor

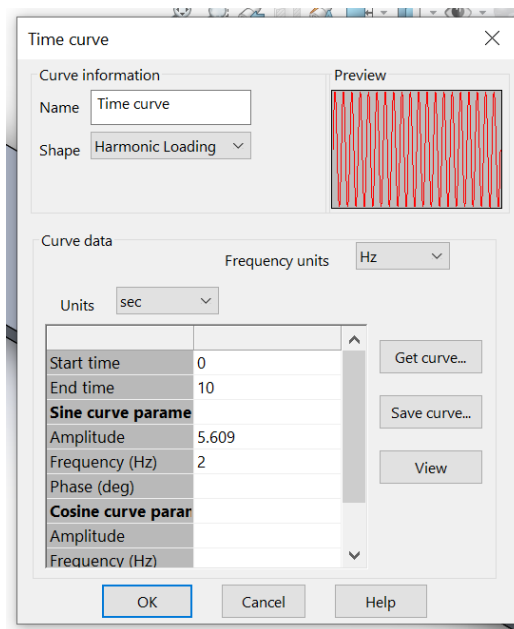
Especificamos los datos de la fuerza, la dirección, las conexiones de la viga y se crea una malla para realizar el estudio.



**Ilustración 36. Mallado del sólido para la simulación**

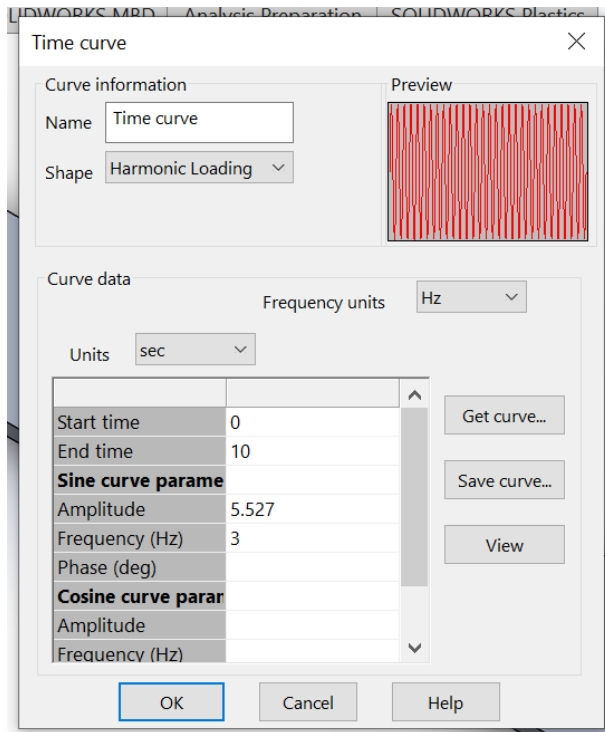
Fuente: Elaborada por autor

Se realiza el estudio con diferentes valores de frecuencia y se obtienen los resultados de aceleración medidos y simulados para ser comparados.



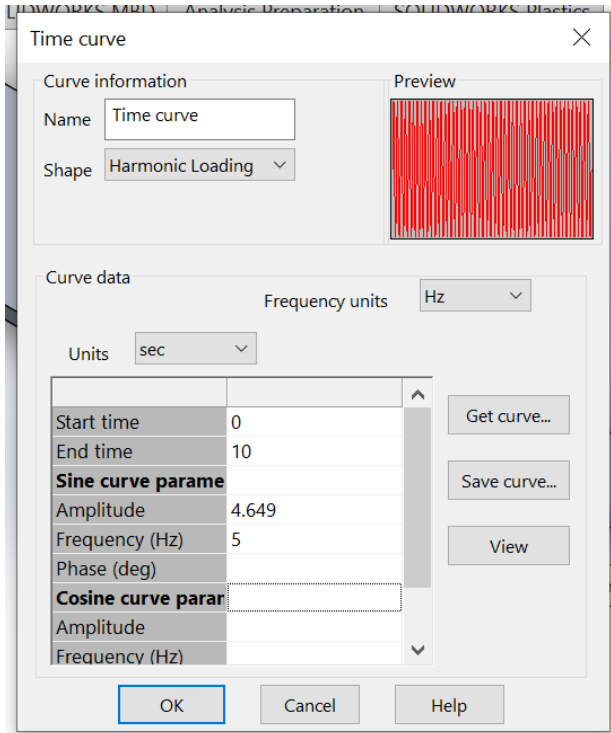
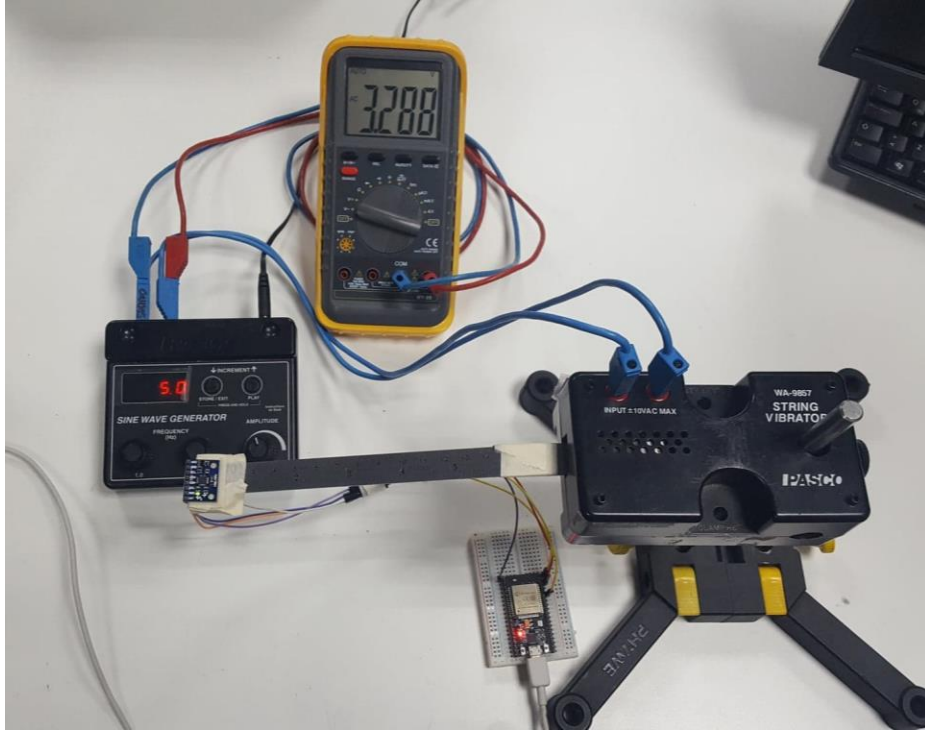
**Ilustración 37. Pruebas de Cantilever para 2 Hz**

Fuente: Elaborada por autor



**Ilustración 38. Pruebas de Cantilever para 3 Hz**

Fuente: Elaborada por autor



**Ilustración 39. Pruebas de Cantilever para 5 Hz**

Fuente: Elaborada por autor

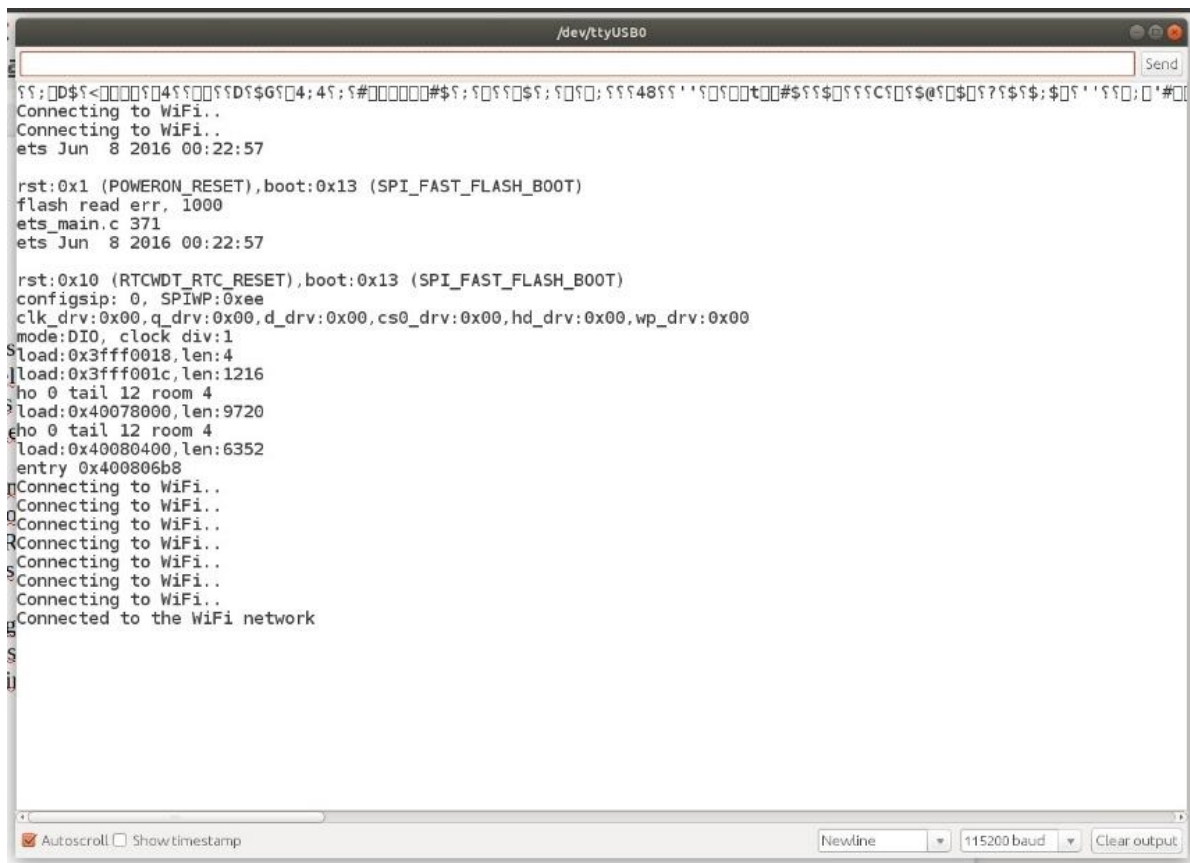
Los datos obtenidos se muestran en la sección de resultados.



## 4.6.2 CONEXIÓN DEL MICROCONTROLADOR AL WIFI

Para la validación de la programación de este sistema de transmisión se debe de revisar que la sintaxis de programación no contenga errores, que compile el programa. El IDE de Arduino indica si existe un error en la sintaxis, si es así se corrige hasta que el código compile sin problemas.

Realizamos pruebas de transmisión, el monitor serial nos debe indicar que el microcontrolador fue capaz de conectarse a la red WiFi.



```
Connecting to WiFi..
Connecting to WiFi..
ets Jun  8 2016 00:22:57

rst:0x1 (POWERON_RESET),boot:0x13 (SPI_FAST_FLASH_BOOT)
flash read err, 1000
ets_main.c 371
ets Jun  8 2016 00:22:57

rst:0x10 (RTCWDT_RTC_RESET),boot:0x13 (SPI_FAST_FLASH_BOOT)
configsip: 0, SPIWP:0xee
clk_drv:0x00,q_drv:0x00,d_drv:0x00,cs0_drv:0x00,hd_drv:0x00,wp_drv:0x00
mode:DIO, clock div:1
load:0x3fff0018,len:4
load:0x3fff001c,len:1216
ho 0 tail 12 room 4
load:0x40078000,len:9720
ho 0 tail 12 room 4
load:0x40080400,len:6352
entry 0x400806b8
Connecting to WiFi..
Connecting to WiFi..
Connecting to WiFi..
Connecting to WiFi..
Connecting to WiFi..
Connecting to WiFi..
Connected to the WiFi network
```

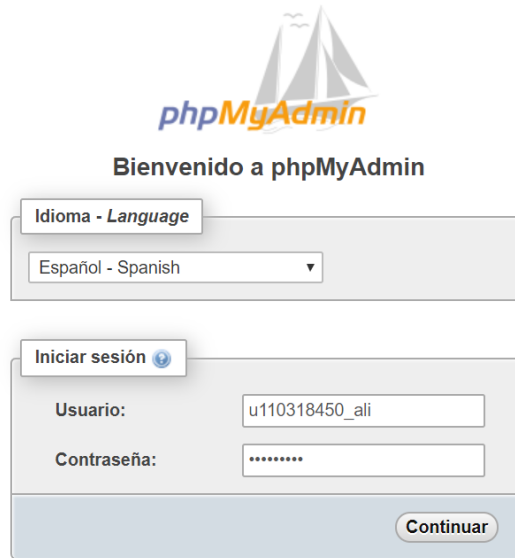
**Ilustración 40. Monitor serial indicando que se logró la conexión al Wifi**

Fuente: Elaborado por autor

## 4.6.3 TRANSMISIÓN DE DATOS AL SERVIDOR

Cuando el microcontrolador se conectó a la red Wifi los datos censados por el MPU 6050 que posteriormente son enviados al servidor web se ingresan a una base de datos, mediante pruebas se logró validar la correcta transmisión y almacenamiento a la base de datos.

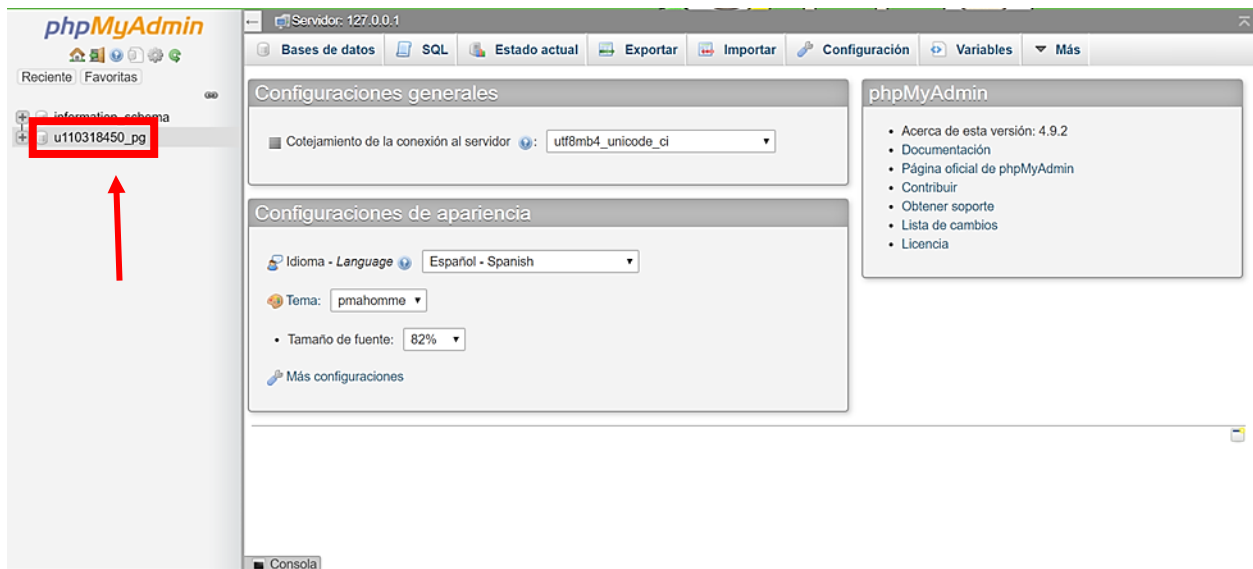
Primero se ingresa a PHPMyAdmin con el usuario y contraseña creadas



**Ilustración 41. Inicio de sesión en phpMyAdmin**

Fuente: Elaborado por autor

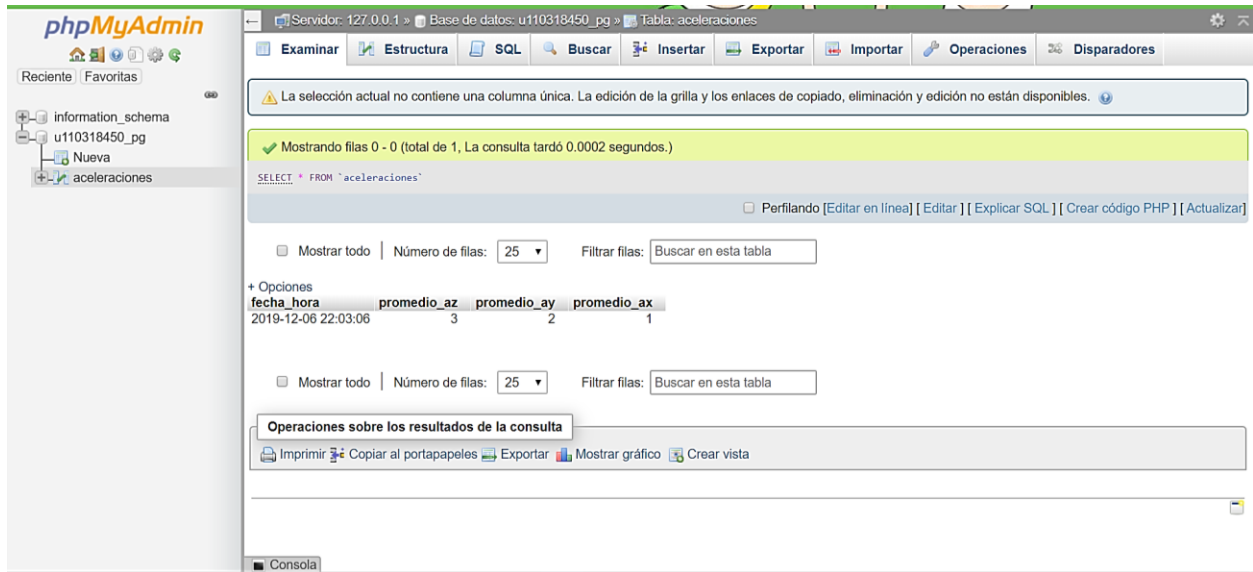
Luego se selecciona la base de datos creada



**Ilustración 42. Página de inicio de phpMyAdmin**

Fuente: Elaborado por autor

Una vez se ingresa a la base se selecciona la tabla creada con el nombre de “aceleraciones” y en ella se ven los valores que se envían con el microcontrolador por medio de un URL.



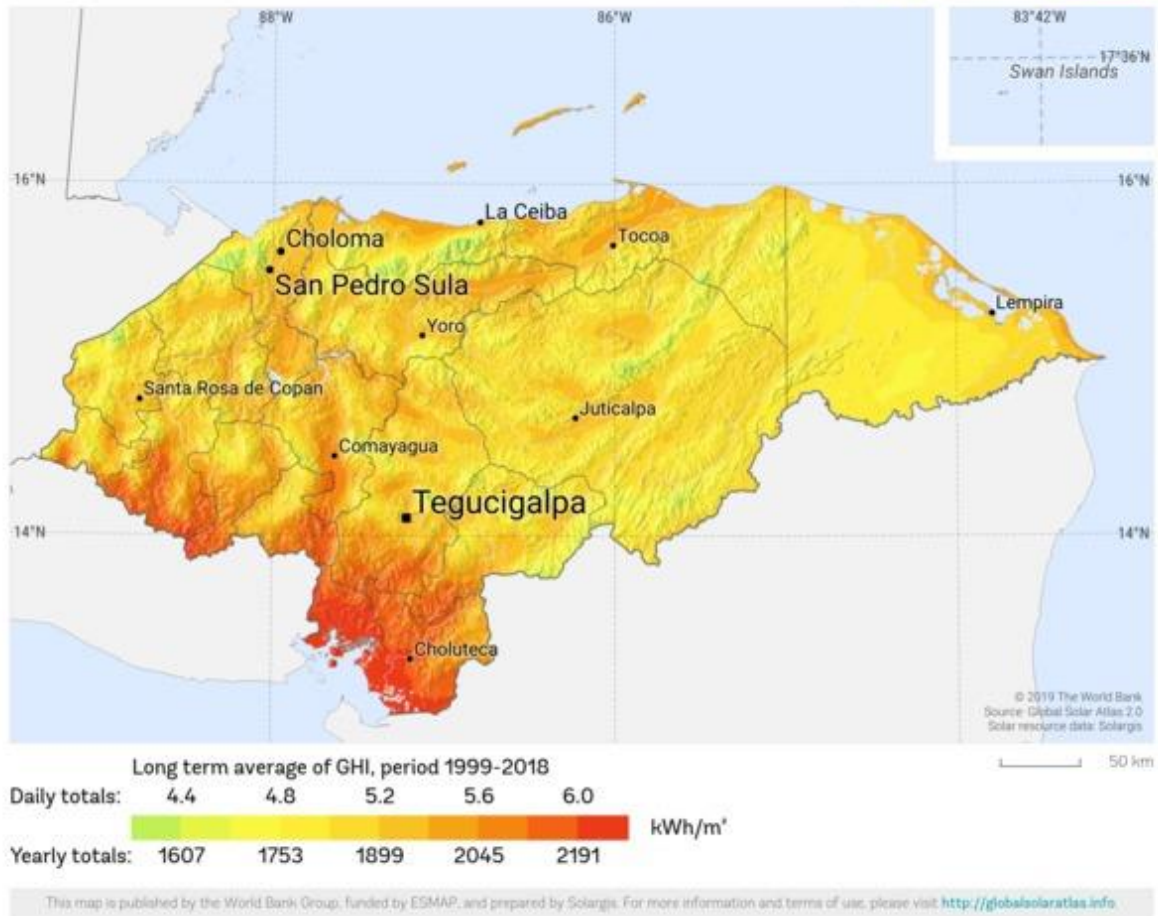
**Ilustración 43. Tabla de datos recibidos**

Fuente: Elaborado por autor

#### 4.6.4 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Las cifras de irradiación solar se utilizan para diseñar los sistemas de energía solar. Los paneles fotovoltaicos pueden convertir en electricidad tanto la irradiación directa como la irradiación difusa, pero la energía solar concentrada solo puede funcionar de manera eficiente con la irradiación directa.

Para la validación de los cálculos del diseño del sistema fotovoltaico se obtuvieron los datos de irradiancia de UNITEC con un Atlas solar.



#### Ilustración 44. Mapa de irradiación horizontal global de Honduras

Fuente ("Mapas de recursos solares de Honduras," 2019)

La imagen muestra un promedio de irradiancia en Honduras, tomando Tegucigalpa como punto de estudio se puede observar una irradiancia promedio de 5.2-5.6 kWh/m<sup>2</sup>, y tomando la latitud y longitud de UNITEC que es de 14.05 ° y -87.17 ° respectivamente se obtienen los datos de irradiancia de ese punto exacto.

| Map data   |                     | Per day ▾       |                              |
|--|---------------------|-----------------|------------------------------|
| Specific photovoltaic power output                 | PVOUT<br>specific   | <b>4.318</b>    | kWh/kWp por día ▾            |
| Irradiación directa normal                         | DNI                 | <b>4.402</b>    | kWh/m <sup>2</sup> por día ▾ |
| Irradiación horizontal global                      | GHI                 | <b>5.328</b>    | kWh/m <sup>2</sup> por día ▾ |
| Irradiación difusa horizontal                      | DIF                 | <b>2.254</b>    | kWh/m <sup>2</sup> por día ▾ |
| Irradiación global inclinada para el ángulo óptimo | GTI <sub>opta</sub> | <b>5.458</b>    | kWh/m <sup>2</sup> por día ▾ |
| Temperatura del aire                               | TEMP                | <b>21.8</b>     | °C ▾                         |
| Inclinación óptima de los módulos fotovoltaicos    | OPTA                | <b>15 / 180</b> | °                            |
| Elevación del terreno                              | ELE                 | <b>1090</b>     | m ▾                          |

**Ilustración 45. Datos de irradiancia para UNITEC**

Fuente ("Global Solar Atlas," 2019)

Como se observa en la imagen la irradiación horizontal global que es la que tomamos en cuenta para los cálculos ya que es la suma de todas las irradiancias que pueden llegarle al panel a nivel del suelo es de 5.328 kWh/m<sup>2</sup> por lo que se validan los cálculos del panel.



## **V. RESULTADOS Y ANÁLISIS**

### **5.1 ANÁLISIS DE DOCUMENTOS**

Se analizaron cuatro proyectos en donde se han aplicado técnicas similares a la del diseño del este proyecto, en los cuatro proyectos se concluyeron resultados positivos, logrando sistemas de medición funcionales, eficiencia energética, confiabilidad y reducción de costos.

Así mismo se realizó una investigación bibliográfica en libros, artículos científicos, páginas web y presentaciones, para lograr un marco teórico y metodologías bajo un criterio válido que dieran solución a los objetivos planteados.

### **5.2 VARIABLES A MEDIR**

Siguiendo las normativas BS 7385-1 y BS 7385-2 , en conjunto con la recopilación de información bibliográfica, se logró definir las variables a medir para un correcto análisis de vibraciones.

Para determinar las características de la naturaleza de la entrada de vibración y de la respuesta de la estructura es una práctica habitual detectar una cantidad cinemática, como la aceleración y luego integrar para la velocidad y posición si son requeridos.

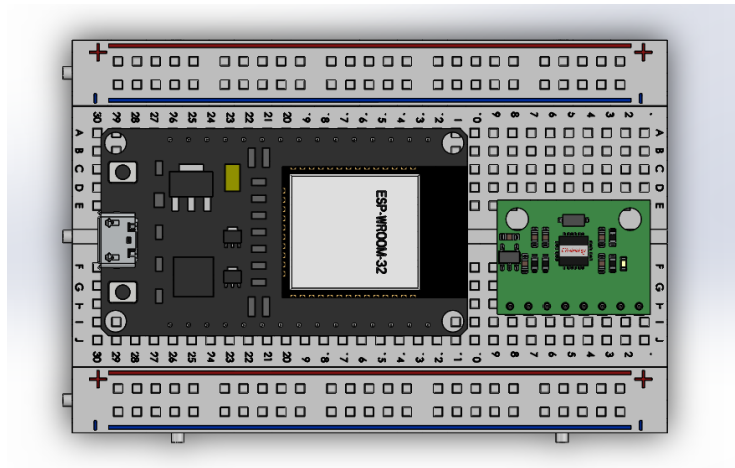
### **5.3 ELECCIÓN DE COMPONENTES**

Con los parámetros a medir decididos y con el establecimiento de características para elegir qué sistema de medición utilizar, se logró seleccionar el conjunto de componentes que se iba a utilizar en el sistema de medición.

Para la medición de las aceleraciones, se decidió utilizar un sensor piezoeléctrico MEMS MPU 6050, ya que cumplía con todos los requisitos establecidos. Con el acelerómetro podemos hacer mediciones indirectas como por ejemplo si integramos la aceleración en el tiempo obtenemos la velocidad y si la integramos nuevamente obtenemos el desplazamiento.

Para el procesamiento de las señales análogas se decidió utilizar el microcontrolador ESP 32, ya que además de trabajar como un microcontrolador normal, tiene la ventaja de sus propiedades de comunicación WiFi que se utilizan para la transmisión de los datos a la base de datos.

Con la IDE de Arduino de lograron procesar y filtrar los datos que posteriormente se utilizaran para realizar los análisis correspondientes para la evaluación estructural.



**Ilustración 47. Componentes electrónicos utilizados**

Fuente: Elaborada por autor

### 5.3.1 PRUEBAS DEL PROTOTIPO

Los resultados obtenidos por el sensor de la simulación de viga en Cantilever se muestran en la tabla 3, los datos se convirtieron de unidades g a metros por segundo como se muestra en la sección de validación de metodología.

**Tabla 3. Resultados de la simulación de cantilever**

| <b>Frecuencia<br/>Hz</b> | <b>Amplitud<br/>RMS</b> | <b>Amplitud<br/>PP</b> | <b>Az<br/>g</b> | <b>Az<br/>m/s<sup>2</sup></b> |
|--------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------|-------------------------------|
| 1 Hz                     | 3.169                   | 4.480966               | 3867            | 2.3154                        |
| 2 Hz                     | 3.967                   | 5.609338               | 9289            | 5.5618                        |
| 3 Hz                     | 3.909                   | 5.527326               | 14885           | 8.9125                        |
| 5 Hz                     | 3.288                   | 4.649232               | 20920           | 12.5260                       |

Fuente: Elaborada por autor

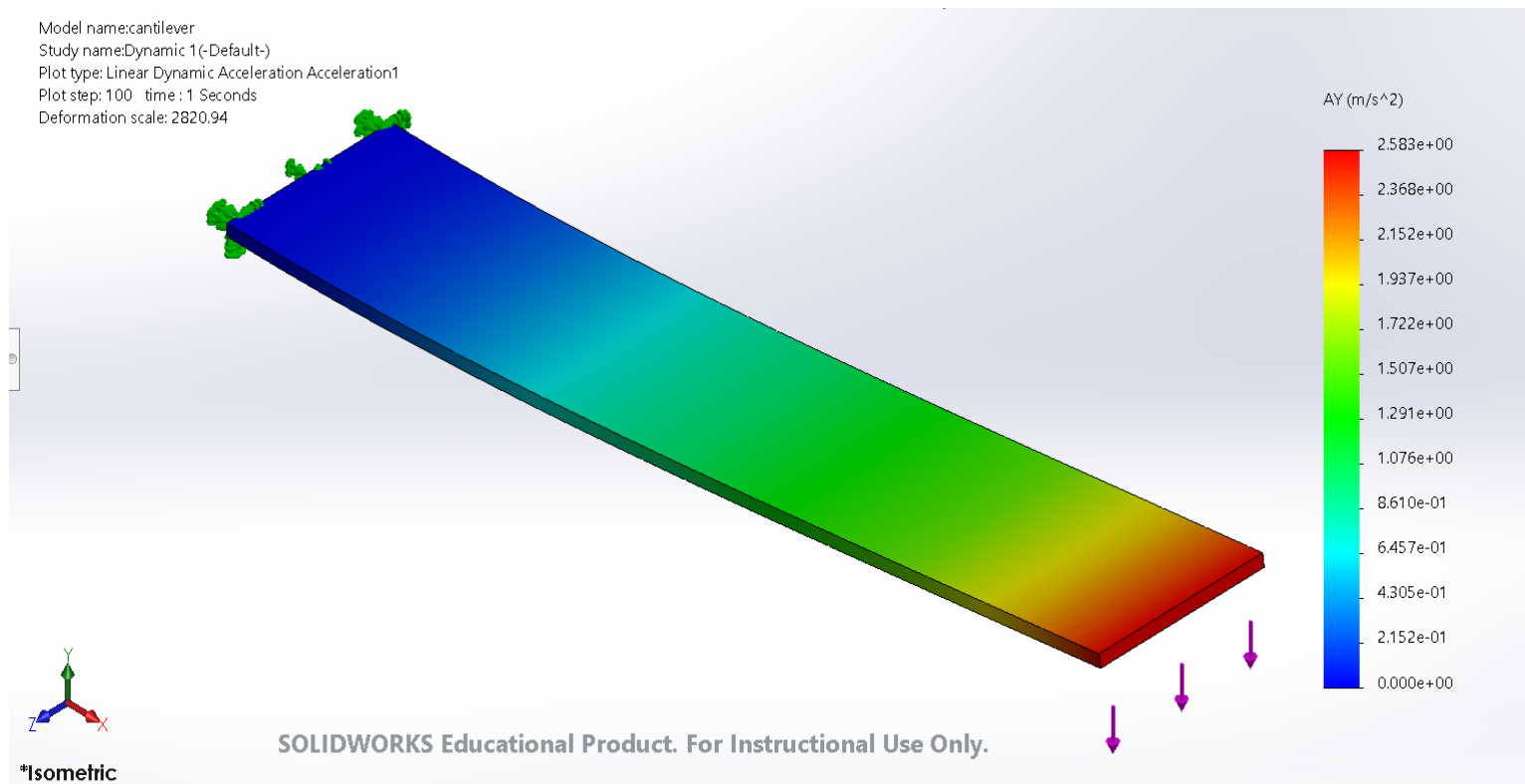
Los resultados de las simulaciones del modelo de cantiléver elaboradas en SolidWorks se muestran a continuación



- Para 1 Hz

Definimos la carga armónica que está soportando la viga colocando el valor de la frecuencia y amplitud de la señal. Seguidamente se define la fuerza que ejerce la masa que se colocó en su extremo de 0.05 N.

Se ejecuta la simulación para obtener los resultados de aceleraciones en el eje Y

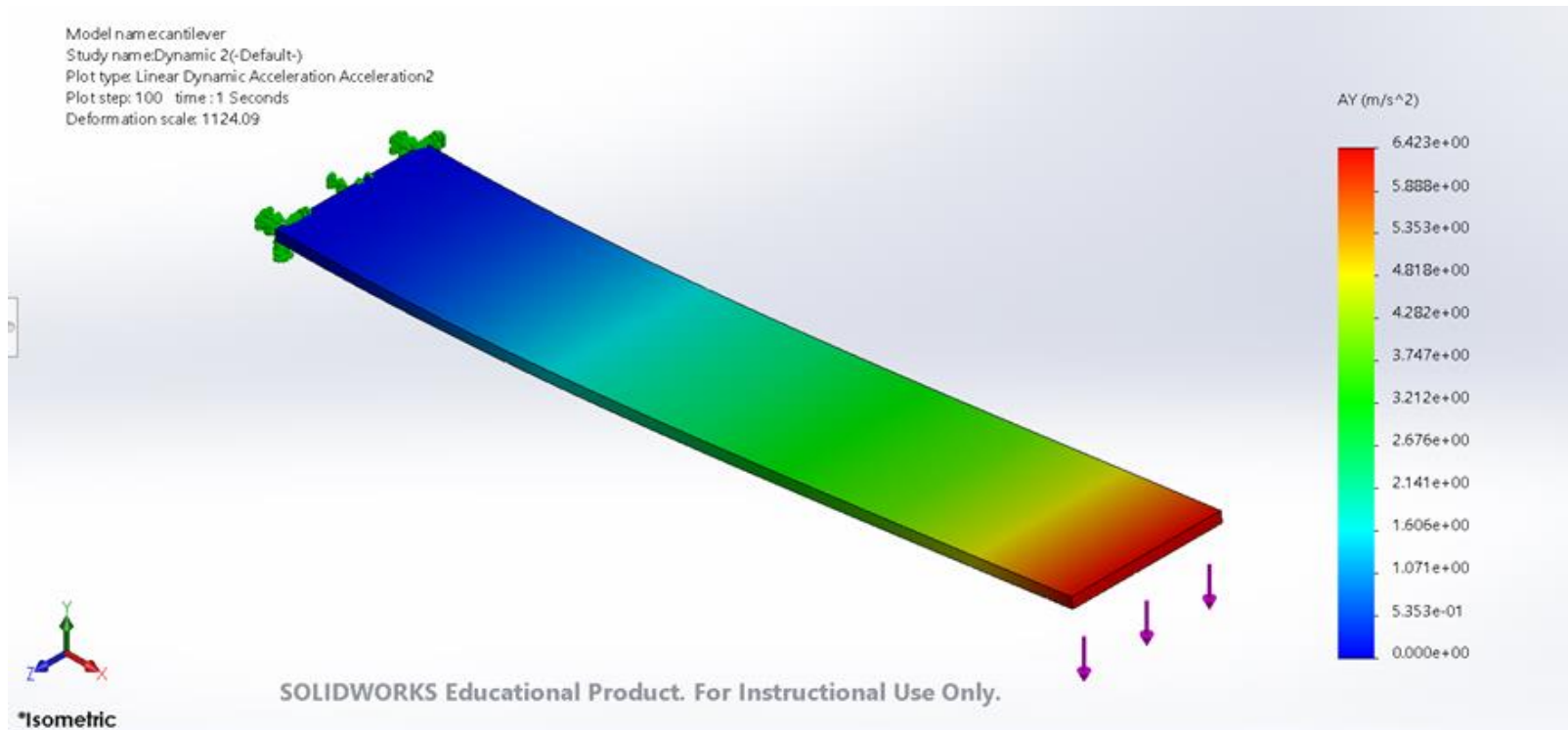


**Ilustración 48. Simulación de la aceleración en el eje Y para 1Hz**

Fuente: Elaborado por autor

Como se puede observar en los resultados de las aceleraciones en la simulación es posible que las vibraciones alcancen una aceleración máxima de  $2.583 \text{ m/s}^2$ . Comparándolos con los datos la tabla 3 para 1 Hz, se puede observar que el dato medido fue de  $2.3154 \text{ m/s}^2$ . El sensor se colocó al final de la viga, que equivale al área naranja de la simulación a donde su aceleración está dentro del rango de  $2.152 \text{ m/s}^2$  y  $2.368 \text{ m/s}^2$ .

- 2 Hz

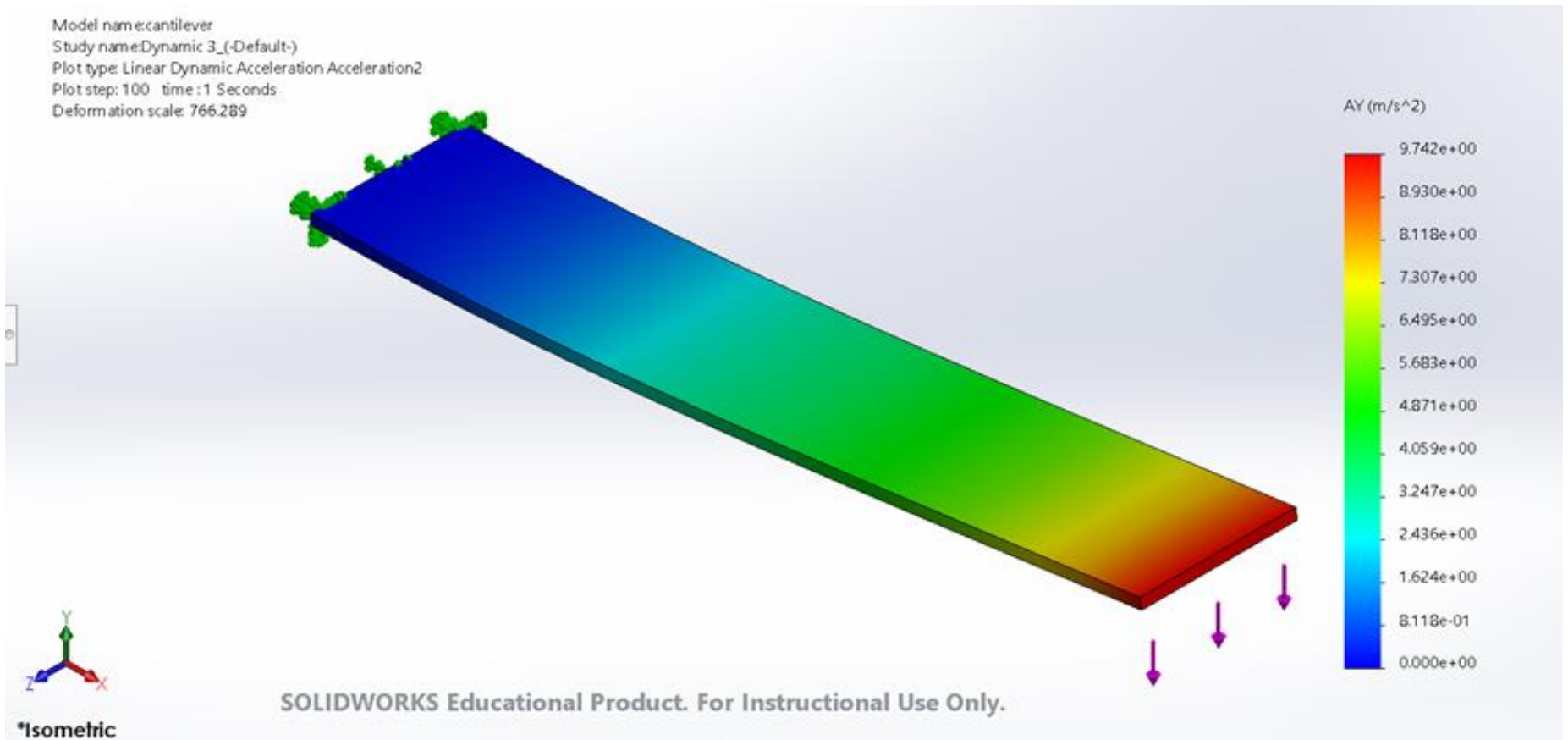


**Ilustración 49. Simulación para 2 Hz**

Fuente: Elaborado por autor

Para la simulación de 2 Hz las aceleraciones obtenidas están dentro del rango de  $5.353 \text{ m/s}^2$  y  $5.888 \text{ m/s}^2$ .

- 3 Hz

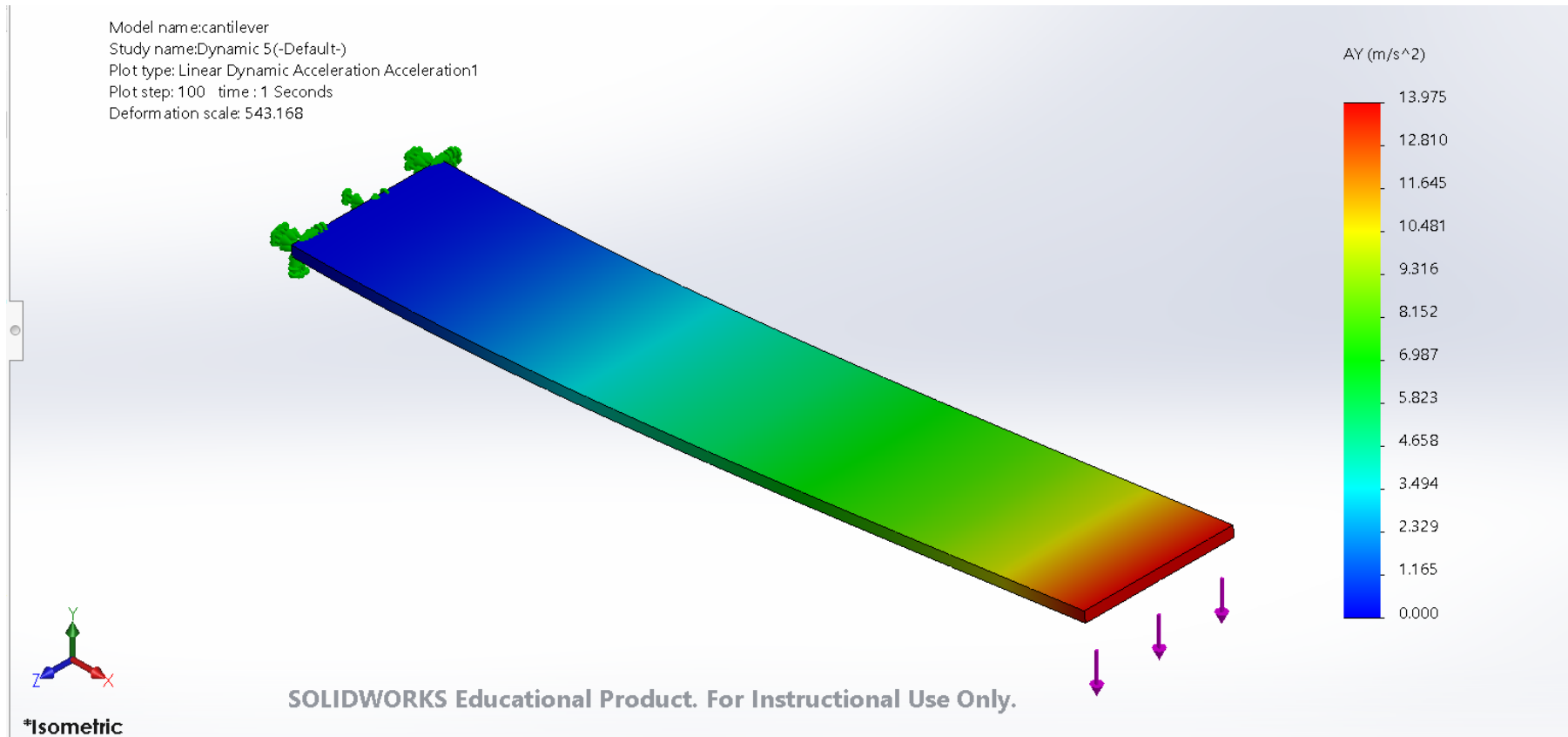


**Ilustración 50. Simulación para 3 Hz**

Fuente: Elaborado por autor

Para la simulación de 3 Hz las aceleraciones obtenidas están dentro del rango de 8.118 m/s<sup>2</sup> y 8.930 m/s<sup>2</sup> .

- 5 Hz



**Ilustración 51. Simulación para 5 Hz**

Fuente: Elaborado por autor

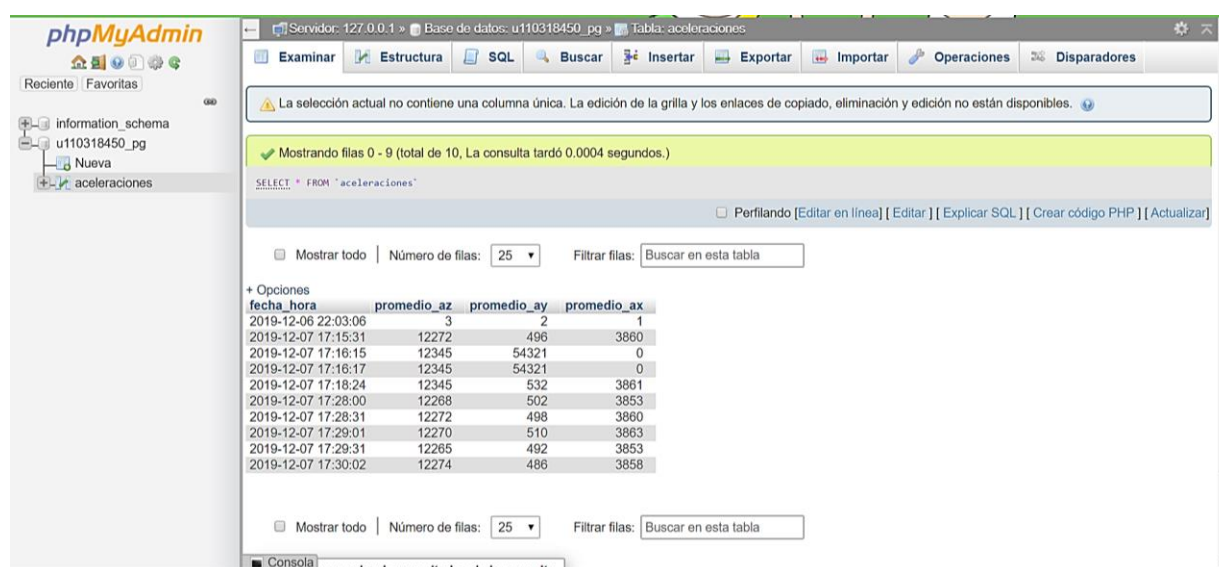
Para la simulación de 5 Hz las aceleraciones obtenidas están dentro del rango de 11.645 m/s<sup>2</sup> y 12.810 m/s<sup>2</sup>.

Como se puede observar los resultados de las aceleraciones que se midieron con el sensor están dentro del rango de aceleraciones que se simularon.

## 5.4 SISTEMA DE COMUNICACIÓN

Para cumplir los objetivos que se plantearon para seleccionar el sistema de comunicación adecuado, se descartó el módulo NRF24L01 RF inalámbrico ya que, si bien es cierto su alcance es de 100 metros, este se ve afectado por la cantidad de obstáculos como ser paredes o ventanas que existen en un edificio, pero la comunicación a muy larga distancia no se podía dar.

Se decidió utilizar IoT mediante el uso de un módulo ESP-WROOM-32 que permite una comunicación de gran alcance conectándose a una red LAN a través de un enrutador con una conexión WiFi para salir a Internet y envía por medio de un URL los resultados al servidor, que luego almacena los datos en la base de datos en SQL.



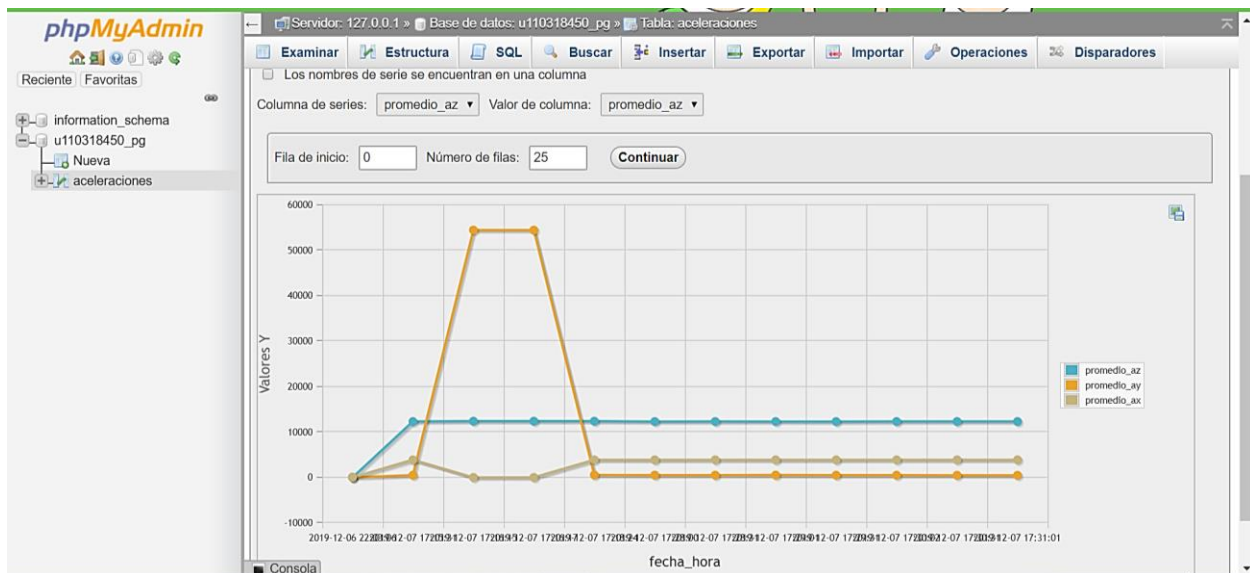
The screenshot shows the phpMyAdmin interface for a database named 'u110318450\_pg' with a table named 'aceleraciones'. The table contains 10 rows of data with columns for 'fecha\_hora', 'promedio\_az', 'promedio\_ay', and 'promedio\_ax'. The data shows acceleration values for various times on December 7, 2019.

| fecha_hora          | promedio_az | promedio_ay | promedio_ax |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|
| 2019-12-06 22:03:06 | 3           | 2           | 1           |
| 2019-12-07 17:15:31 | 12272       | 496         | 3860        |
| 2019-12-07 17:16:15 | 12345       | 54321       | 0           |
| 2019-12-07 17:16:17 | 12345       | 54321       | 0           |
| 2019-12-07 17:18:24 | 12345       | 532         | 3861        |
| 2019-12-07 17:28:00 | 12268       | 502         | 3853        |
| 2019-12-07 17:28:31 | 12272       | 498         | 3860        |
| 2019-12-07 17:29:01 | 12270       | 510         | 3863        |
| 2019-12-07 17:29:31 | 12265       | 492         | 3853        |
| 2019-12-07 17:30:02 | 12274       | 486         | 3858        |

**Ilustración 52. Tabla de datos de aceleración**

Fuente: Elaborado por autor

En la imagen se muestran los datos obtenidos por el sensor que se transmitieron con el microcontrolador y fueron almacenados en la base de datos, esta tabla posee cuatro columnas, en la primera se visualiza la fecha y el tiempo exacto en el que le almaceno el dato, en las siguientes tres columnas se muestran los datos de aceleraciones en los tres ejes.



**Ilustración 53. Grafica de aceleraciones en la base de datos**

Fuente: Elaborado por autor

Estos datos se pueden graficar en phpMyAdmin para ver directamente las variaciones que se han producido en las aceleraciones de cada eje, pero es posible descargar los datos para luego hacer el análisis correspondiente.

## 5.5 MÉTODO DE ALIMENTACIÓN DE ENERGÍA

El método de generación de energía solar fotovoltaica es renovable, de bajo mantenimiento y bajo costo, muy eficiente y fácil de utilizar.

Los cálculos para el panel solar muestran que se requiere de 1 panel con una capacidad de 5W y 0.3 A para ser capaz de suplir la energía consumida por el sistema de 11.1 Wh.

Ya que el panel no es capaz de generar energía por las noches se requiere de una batería para suplir la carga a esas horas. Los cálculos definieron que la capacidad de la batería requerida es de 2000 mAh a 7.4 V.

## 5.6 PRESUPUESTO

El presupuesto final del proyecto suma la cantidad de L1,766.05, sin tomar en cuenta los costos de implementación y montaje, ya que el objetivo del proyecto termina hasta el diseño del sistema.

## VI. CONCLUSIONES

- Se logró el diseño de un sistema de monitoreo de vibraciones autosuficiente capaz de medir aceleraciones haciendo uso de componentes de bajo costo, bajo consumo energético, obteniendo una transmisión de manera remota y energizado independiente de la red eléctrica, logrando el propósito de dar seguimiento a los valores de interés que posteriormente se someterán a un análisis.
- Se realizó el análisis de cuatro proyectos de similares áreas de estudio y se recopiló la información necesaria para desarrollar un criterio válido para la realización del proyecto.
- Se determinaron las variables más importantes que se deben recopilar para el análisis de una vibración estructural mediante la investigación bibliográfica que son las aceleraciones en los ejes  $x,y,z$  ya que con la aceleración se pueden obtener también los datos de velocidad y desplazamiento que serán útiles para el análisis posterior.
- Se especificaron los elementos electrónicos más adecuados para la medición y procesamiento de los datos que fueron el sensor microelectromecánico MPU 6050 ya que cuenta con un acelerómetro de 3 ejes y un procesador digital de movimiento capaz de procesar los algoritmos de movimientos complejos en una sola placa con un amplio rango de sensibilidad y el microcontrolador ESP 32 ya que es capaz de procesar y transmitir los datos medidos.
- Se estableció un sistema de comunicación para la transmisión de los datos obtenidos mediante el microcontrolador ESP 32 y que cuenta con un módulo WiFi que permite una transmisión de datos mediante el internet a una base de datos en MySQL.
- Se realizó el diseño y análisis de un sistema de alimentación fotovoltaico para la alimentación de energía autónoma que consta de 1 panel solar con capacidad de 5W y una batería recargable de 7.4V a 2000 mAh.
- Se designó un presupuesto para el diseño del proyecto y se detalló el precio final relacionado a la compra de todos los componentes que fue de L1,766.05.

## **VII. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda realizar el estudio y la implementación de otros tipos de sensores como piezoeléctricos para medir tensiones y desplazamientos que brinden más datos que mejoren el análisis.
- Se recomienda cambiar el sistema de transmisión si se pretende utilizar el sensor en puentes o pasos de nivel ya que estas estructuras no poseen conexión a internet.



## **VIII. APLICABILIDAD**

La aplicabilidad de este proyecto está orientada a las estructuras como los edificios y casas, principalmente estructuras que son sometidas a muchas cargas o vibraciones como ser fabricas que utilizan mucha maquinaria que produce muchas vibraciones o edificios en los que hay mucho movimiento de personas como son los centros educativos.

## **IX. EVOLUCIÓN DE TRABAJO ACTUAL**

- A pesar de haber realizado simulaciones de recopilación de datos mediante un modelo de cantiléver, es sumamente importante comprobar su funcionamiento en la realidad, en trabajos futuros se plantea su montaje e instalación.
- El alcance del diseño fue la recopilación de datos, se requiere crear un sistema de análisis que utilice los datos recopilados para determinar el estado de las vibraciones.
- Se plantea la posibilidad de agregar más sensores con distintos tipos de medición como sensores piezoeléctricos o piezorresistivos para medir las tensiones que se den en el punto de aplicación del sensor.
- Realizar un sistema de interconexión de nodos de medición que se coloquen en varios puntos del edificio para tener más datos de referencia.
- La implementación del mismo diseño para análisis de estructuras como puentes requiere de un sistema de comunicación distinta, por lo que se aconseja investigar sobre otros métodos de transmisión inalámbrica.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Barahona, G. (2018). *Carta Solar UNITEC*.
2. Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., & Watson, T. (2018). The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in Industry, 101*, 1–12.  
<https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.015>
3. *British Standard BS 7385*. (n.d.). Retrieved from  
<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt379.pdf>
4. Chopra, A. (2014). *Dinámica de Estructuras* (Cuarta Edición). University of California at Berkeley: Pearson.
5. Dorsemayne, B., Gaulier, J.-P., Wary, J.-P., Kheir, N., & Urien, P. (2015). Internet of Things: A Definition amp; Taxonomy. *2015 9th International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies*, 72–77.  
<https://doi.org/10.1109/NGMAST.2015.71>
6. ElectronicWings. (2018). Nodemcu Mpu6050 Interfacing With Nodemcu | Nodemcu. Retrieved December 7, 2019, from  
<https://www.electronicwings.com/nodemcu/mpu6050-interfacing-with-nodemcu>
7. Escobar, L. F. (2018). *DISEÑO DE PROTOTIPO DE SISTEMA VERTICAL FOTOVOLTAICO Y CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA*. UNITEC, Honduras.
8. *Esp32\_datasheet\_en.pdf*. (n.d.). Retrieved from  
[https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)

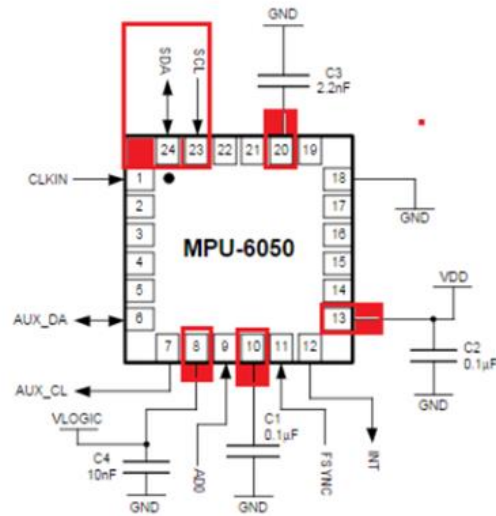
9. Estupiñan, E., Martín, C., & Solaligue, R. (2006). Diseño e implementación de un analizador virtual de vibraciones mecánicas. *Revista de La Facultad de Ingeniería - Universidad de Tarapacá, ISSN 0717-1072, Vol. 14, N° 1, 2006, Pags. 7-15, 14.*
10. Fernández, L. A. (2005). unitechn—Transmisión y comunicación de datos. Retrieved November 14, 2019, from <https://elibro.net/es/lc/unitechn/titulos/28598>
11. Flores, W. C., Ojeda, O. A., Flores, M. A., & Rivas, F. R. (2011). Sustainable energy policy in Honduras: Diagnosis and challenges. *Energy Policy, 39(2)*, 551–562.  
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.10.020>
12. Global Solar Atlas. (n.d.). Retrieved December 13, 2019, from <https://globalsolaratlas.info/detail?c=14.049332,-87.17308,11&s=14.0495,-87.173298&m=site>
13. Gonzalez, J. A., Perez, R., Colmenar, A., & Castro, M. (2009). *Centrales de energías renovables*. Pearson Education.
14. Irradiación solar. (n.d.). Retrieved December 15, 2019, from <https://solar-energia.net/ques-energia-solar/radiacion-solar/irradiacion-solar>
15. León, R. (2007). *DEVELOPMENT OF A SMALL ENERGY SCAVENGER (SES)*. FLORIDA INTERNATIONAL UNIVERSITY, Florida.
16. Mapas de recursos solares de Honduras. (n.d.). Retrieved December 13, 2019, from <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/honduras>
17. Mpu6050 datasheet pdf, mpu6050 data sheet, mpu6050, mpu6050.pdf, mpu6050 pdf, mpu6050 stock, mpu6050 circuit, mpu6050 datenblatt, block diagram, schematic,

- Datasheet4U.com. (n.d.). Retrieved December 15, 2019, from [https://datasheet4u.com/share\\_search.php?sWord=mpu6050](https://datasheet4u.com/share_search.php?sWord=mpu6050)
18. NRF24L01 Pinout, Features, Circuit & Datasheet. (n.d.). Retrieved November 17, 2019, from <https://components101.com/wireless/nrf24l01-pinout-features-datasheet>
19. Ocampo, J. R. (2013). Sistema de bajo costo para monitoreo de disturbios de vibración en máquinas rotatorias. *Innovare*, 31.
20. Rangel, J., Contreras, L., Romero, R., Vite, J., & Rivera, J. (2007). *Sistema de monitoreo de vibraciones para la detección de fallas*. Universidad de Guanajuato, Salamanca, Guanajuato.
21. Rao, S. (2012). *Vibraciones Mecánicas* (Quinta Edición). Univesidad de Miami: Pearson.
22. Redacción. (2018, June 16). Mampostería | Qué es, definición, tipos, información, muros. Retrieved December 4, 2019, from Rocas y Minerales website: <https://www.rocasyminales.net/mamposteria/>
23. Stipe Actuators—Products | APC International. (n.d.). Retrieved November 17, 2019, from <https://www.americanpiezo.com/standard-products/stripe-actuators.html>
24. Wu, L., Wang, C., Hou, Y., Liu, Q., & Li, Z. (2018). *Distributed FBG vibration sensing based on OFDR Hmploying a DFB-LD*.
25. Zelaya, M. R. (2019, July). *Energía termosolar y fotovoltaica*. Presented at the UNITEC. UNITEC.

# Anexos

## Anexo 1. Diagrama del circuito integrado del MPU 6050

### 7.2 Typical Operating Circuit



Typical Operating Circuits

### 7.3 Bill of Materials for External Components

| Component                           | Label | Specification                 | Quantity |
|-------------------------------------|-------|-------------------------------|----------|
| Regulator Filter Capacitor (Pin 10) | C1    | Ceramic, X7R, 0.1µF ±10%, 2V  | 1        |
| VDD Bypass Capacitor (Pin 13)       | C2    | Ceramic, X7R, 0.1µF ±10%, 4V  | 1        |
| Charge Pump Capacitor (Pin 20)      | C3    | Ceramic, X7R, 2.2nF ±10%, 50V | 1        |
| VLOGIC Bypass Capacitor (Pin 8)     | C4*   | Ceramic, X7R, 10nF ±10%, 4V   | 1        |

\* MPU-6050 Only.

Fuente ( mpu6050 datenblatt, 2019)

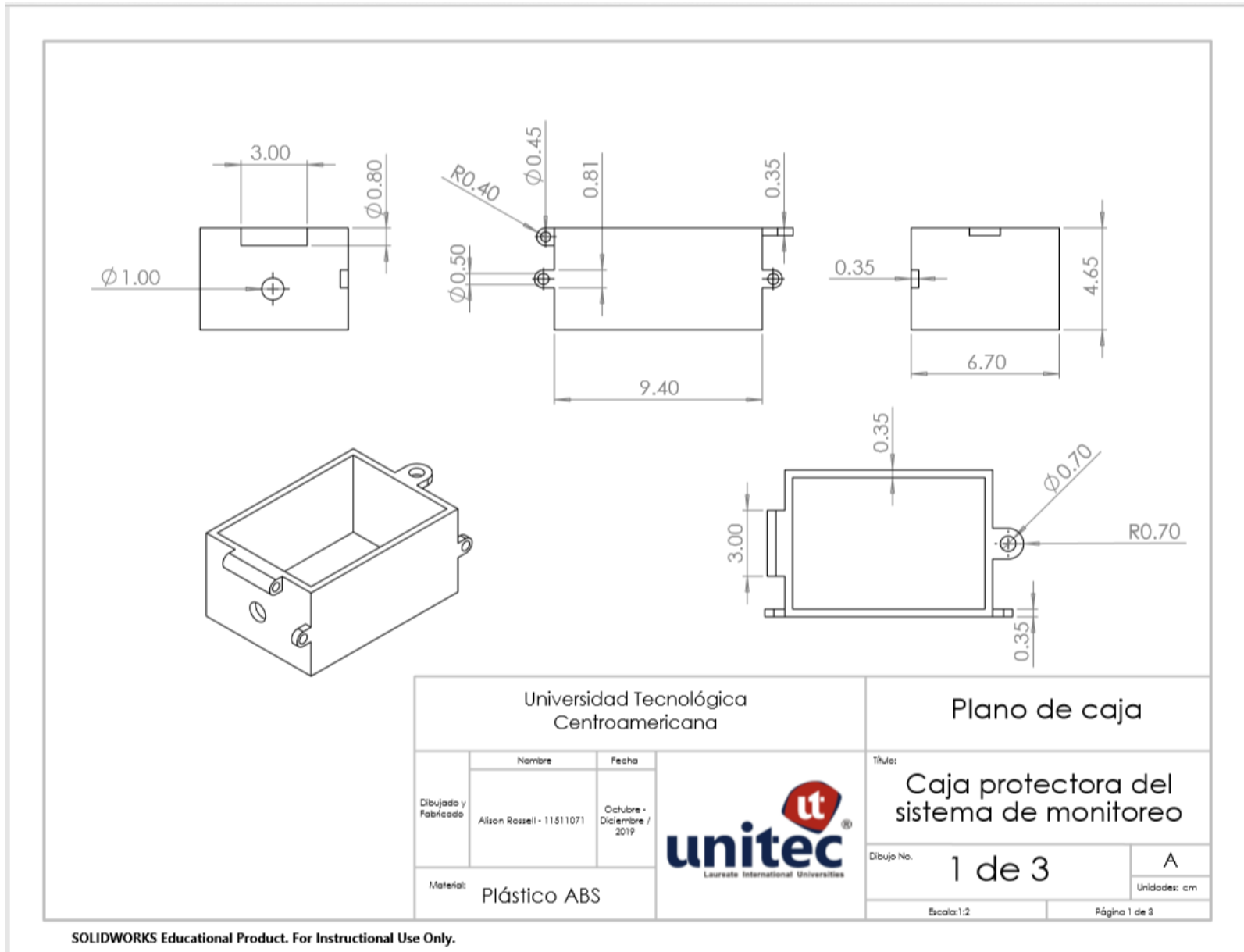
## Anexo 2. Características del módulo Wi-Fi Radio del ESP 32

| Parameter                              | Condition                  | Min         | Typical       | Max  | Unit     |
|--|----------------------------|-------------|---------------|------|----------|
| Operating frequency range <i>note1</i> | -                          | 2412        | -             | 2484 | MHz      |
| Output impedance <i>note2</i>          | -                          | -           | <i>note 2</i> | -    | $\Omega$ |
| TX power <i>note3</i>                  | 11n, MCS7                  | 13          | 14            | 15   | dBm      |
|  | 11b mode                   | 19.5        | 20            | 20.5 | dBm      |
| Sensitivity                            | 11b, 1 Mbps                | -           | -98           | -    | dBm      |
|  | 11b, 11 Mbps               | -           | -91           | -    | dBm      |
|  | 11g, 6 Mbps                | -           | -93           | -    | dBm      |
|  | 11g, 54 Mbps               | -           | -75           | -    | dBm      |
|  | 11n, HT20, MCS0            | -           | -93           | -    | dBm      |
|  | 11n, HT20, MCS7            | -           | -73           | -    | dBm      |
|  | 11n, HT40, MCS0            | -           | -90           | -    | dBm      |
|  | 11n, HT40, MCS7            | -           | -70           | -    | dBm      |
|  | Adjacent channel rejection | 11g, 6 Mbps | -             | 37   | -        |
| 11g, 54 Mbps                           |                            | -           | 21            | -    | dB       |
| 11n, HT20, MCS0                        |                            | -           | 37            | -    | dB       |
| 11n, HT20, MCS7                        |                            | -           | 20            | -    | dB       |

1. Device should operate in the frequency range allocated by regional regulatory authorities. Target operating frequency range is configurable by software.
2. The typical value of ESP32's Wi-Fi radio output impedance is different in chips of different QFN packages. For ESP32 chips with a QFN 6x6 package (ESP32-D0WDQ6), the value is  $30+j10 \Omega$ . For ESP32 chips with a QFN 5x5 package (ESP32-D0WD, ESP32-D2WD, ESP32-S0WD), the value is  $35+j10 \Omega$ .
3. Target TX power is configurable based on device or certification requirements.

Fuente (Esp32\_datasheet, 2019)

### Anexo 3. Plano de la caja de protección del sensor

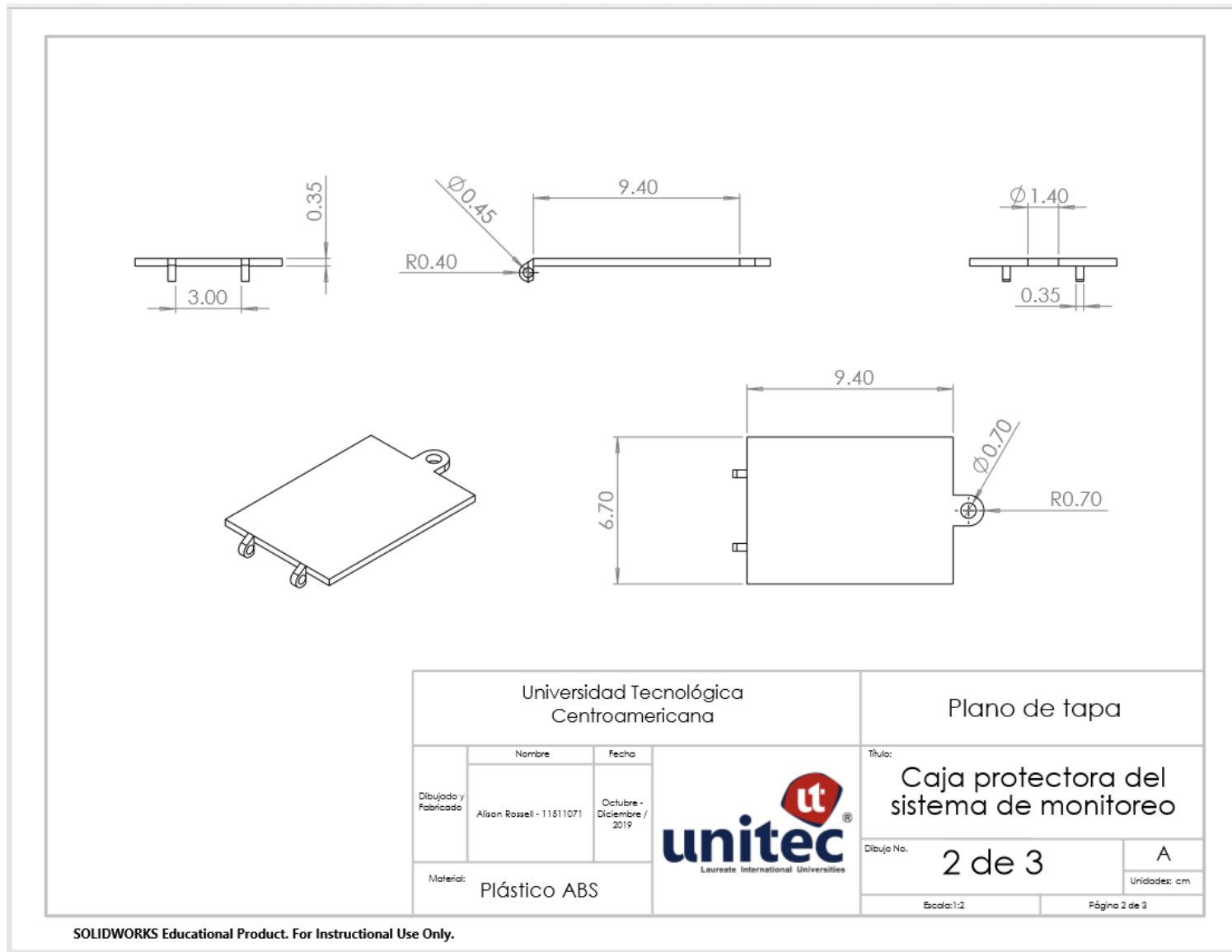


SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

Fuente: Elaborado por autor

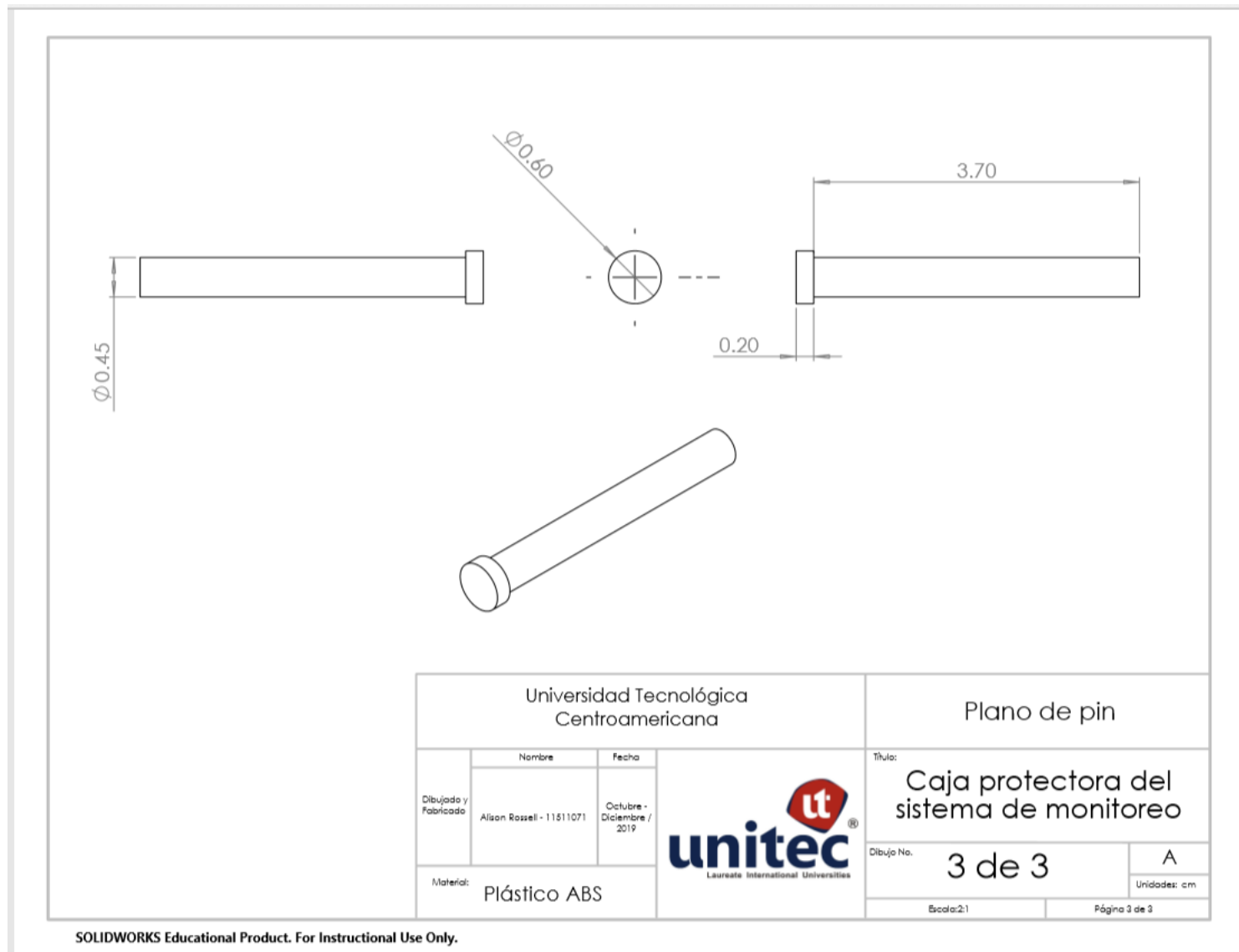


### Anexo 4. Plano de la tapa de protección del sensor









Fuente: Elaborado por autor

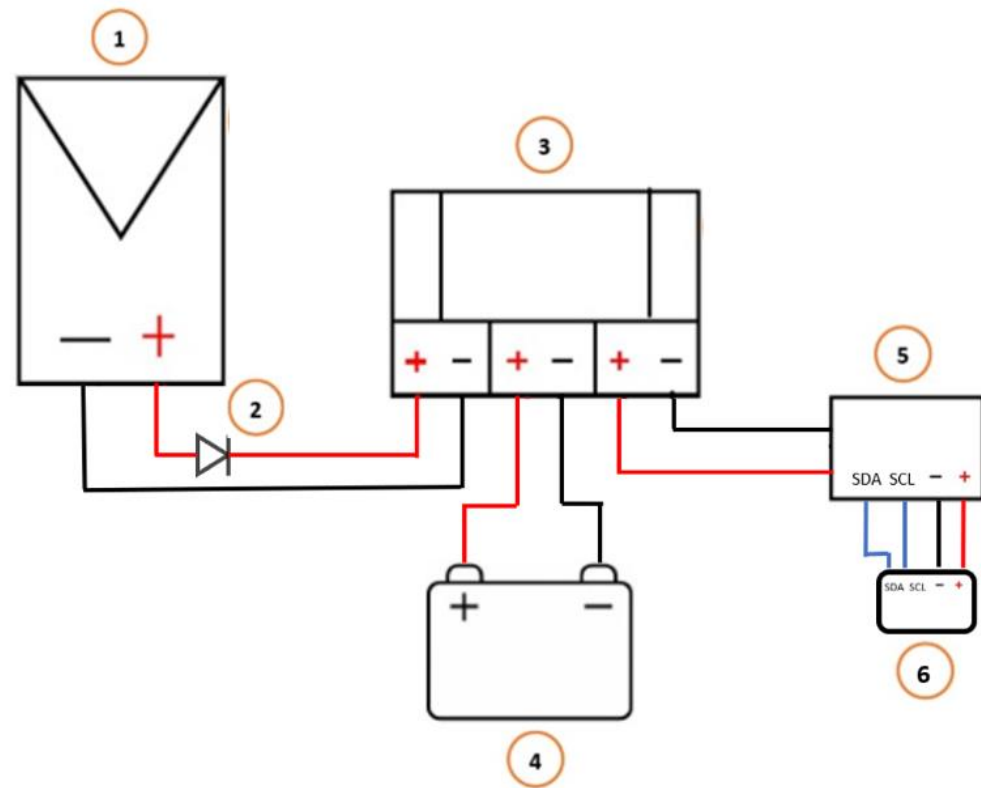
### Anexo 5. Plano de pin para caja protectora



Fuente: Elaborado por autor

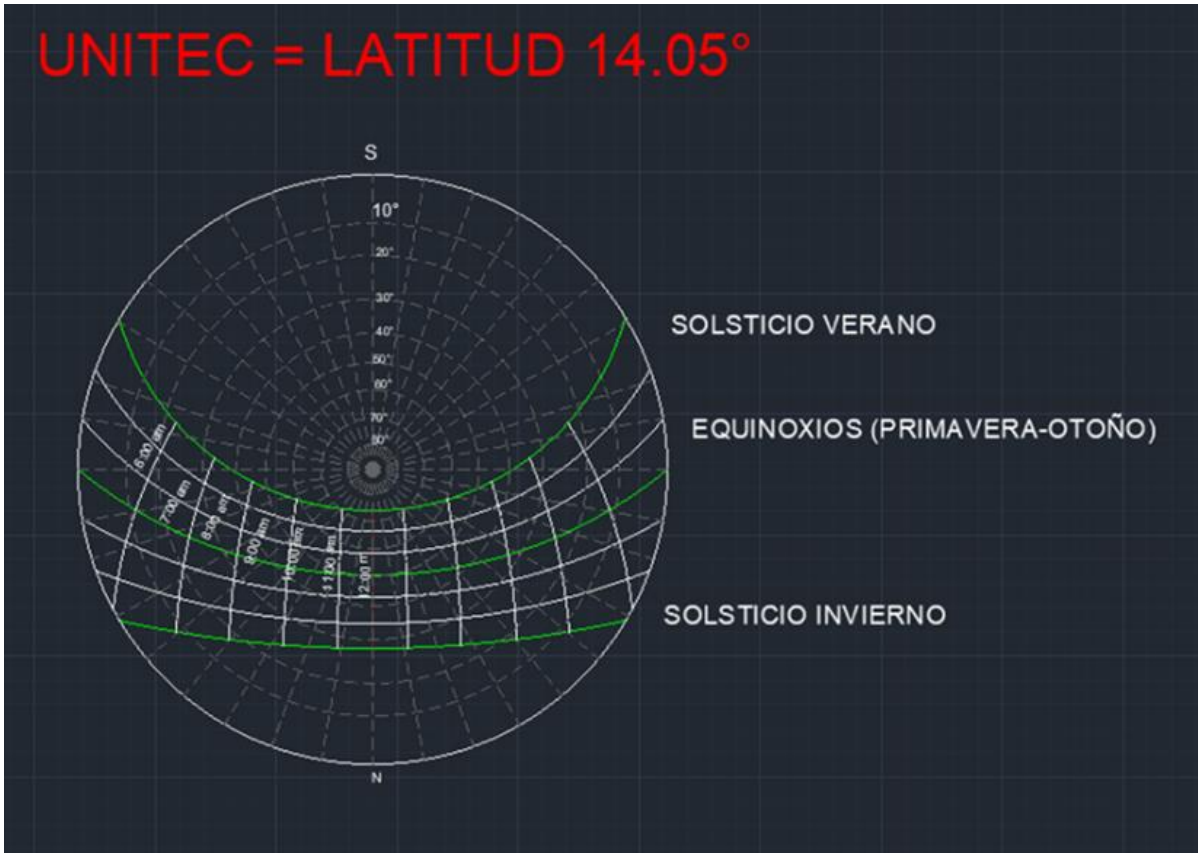
### Anexo 6. Diagrama de conexión de elementos

| # | Elemento                                      | Foto  |
|---|---|---|
| 1 | Panel Solar 12V/5W                            |    |
| 2 | Diodo 1n4004                                  |    |
| 3 | Cargador de Batería de Litio 3S               |    |
| 4 | Batería de 7.4 voltios Recargable             |    |
| 5 | Tarjeta de desarrollo WiFi ESP32              |  |
| 6 | Giroscopio y Acelerómetro para Arduino MPU650 |  |



Fuente: Elaborado por autor

Anexo 7. Carta Solar UNITEC



Fuente (Barahona, 2018)