



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**MONITOREO DE LA SALUD ESTRUCTURAL DE UN
PUENTE UTILIZANDO LA TECNICA PPP-GNSS**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR: NESTOR ALEJANDRO BARBECHO SINCHI

**DIRECTOR: ING. MSC. JUAN SEBASTIAN MALDONADO
NOBOA**

CUENCA - ECUADOR

2022

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**MONITOREO DE LA SALUD ESTRUCTURAL DE UN PUENTE
UTILIZANDO LA TECNICA PPP-GNSS.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR: NESTOR ALEJANDRO BARBECHO SINCHI

**DIRECTOR: ING. MSC. JUAN SEBASTIAN MALDONADO
NOBOA**

CUENCA - ECUADOR

2022

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

Declaratoria de Autoría y Responsabilidad

Néstor Alejandro Barbecho Sinchi portador de la cédula de ciudadanía N° 0104828728. Declaro ser el autor de la obra: “MONITOREO DE LA SALUD ESTRUCTURAL DE UN PUENTE UTILIZANDO LA TÉCNICA PPP-GNSS”, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 22 de abril de 2022



Néstor Alejandro Barbecho Sinchi
0104828728

Certificación

Yo, Ing. Msc. Juan Sebastián Maldonado Noboa, en calidad de tutor del trabajo de titulación denominado: “MONITOREO DE SALUD ESTRUCTURAL DE UN PUENTE UTILIZANDO LA TÉCNICA PPP-GNSS”, certifico que el presente trabajo fue desarrollado por NESTOR ALEJANDRO BARBECHO SINCHI, estudiante de la carrera de ingeniería civil de la Unidad Académica de Ingeniería, Industria y Construcción, bajo la supervisión del suscrito; trabajo reúne los requerimientos necesarios para su presentación y sustentación ante el tribunal que se disponga.

Cuenca, 22 de abril de 2022



Ing. Civil Juan Sebastián Maldonado Noboa
Ing. Msc. DIRECTOR

DEDICATORIA

A dios por que fue quien me dio la sabiduría y entusiasmo para poder llevar a cabo este proyecto, dándome salud y vida siendo mi guía a lo largo de toda mi vida, llegando a un momento importante de mi vida profesional.

Especialmente a mi esposa Mayra Magaly quien me brindo todo su amor y apoyo incondicional para poder culminar mis estudios que ha sido mi compañía y sobre todo mi inspiración.

A mis padres por darme la educación y bienestar quienes me han guiado de la manera más sabia y correcta, gracias a sus consejos han hecho de mi un hombre de bien.

También dedico a mis hijos Miguel Ángel y Mayra Alexandra quien ha sido mi mayor motivación para nunca rendirme en mis estudios y poder llegar a ser un ejemplo para ellos.

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a dios por estar conmigo en cada paso que doy, por darme fuerzas e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a todas aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante el periodo de mi estudio. Agradezco a mi esposa Mayra Magaly por ser quien me ha ayudado dándome el apoyo y los ánimos necesarios para seguir adelante

A mis padres por haberme proporcionado la mejor educación y lecciones de la vida

Agradezco de manera especial a los docentes de la Universidad Católica de Cuenca de la carrera de Ingeniería Civil, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de mi profesión. De manera especial a mi tutor, el Ing. Civil Juan Maldonado quien ha sabido brindar su apoyo, su conocimiento durante todo el proceso de elaboración en este trabajo de investigación.

RESUMEN

El funcionamiento de la tecnología de Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS) ha aumentado en distintas prácticas como el monitoreo de la salud estructural en puentes; hay distintas técnicas de procesamiento de datos GNSS y metodologías que son fiabilidad como la técnica de posicionamiento puntual preciso (PPP-GNSS) que utiliza un receptor de orden geodésico GNSS. El trabajo está formado por el capítulo 1 referente a generalidades de la averiguación, el capítulo 2 en funcionalidad del marco teórico referente al sistema de monitoreo de salud estructural de puentes, señales GPS y módulo GPS con Arduino, en el capítulo 3 se proyecta los modelos físicos de prototipos con sistema GPRS-GSM y comparación con sistema GNSS señalando la metodología del primer ejemplar y la comparación de los sistemas, en el capítulo 4 se analizan los resultados referente a el cansancio estructural, la verificación de los aspectos usando el primer modelo y estación total para el marco, obtención y recepción de datos; finalmente se otorgan las conclusiones y sugerencias en funcionalidad de los resultados alcanzados en el trabajo de indagación, se enseñó que la técnica con GPS caracteriza una elección posible para el monitoreo de la salud de obras civiles de categoría como puentes, para la obtención de precisiones confiables. Asimismo, la utilización de las técnicas de monitoreo estructural de obras civiles por medio de distintas metodologías, es una virtud para los expertos gracias a la necesidad de ofrecer garantía a la estabilidad de los usuarios en obras como puentes, autopistas, construcciones y otros.

Palabras clave: Sistema GPS, sistema GNSS, salud estructural, sistema GPRS-GSM, monitoreo estructural

ABSTRACT

The functioning of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) technology has increased in different practices such as structural health monitoring in bridges; there are different GNSS data processing techniques and methodologies that are reliable such as precise point positioning technique (PPP-GNSS) which uses a GNSS geodetic order receiver. The work is formed by chapter 1 referring to generalities of the inquiry, chapter 2 in the functionality of the theoretical framework referring to the structural health monitoring system of bridges, GPS signals and GPS module with Arduino, chapter 3 projects the physical models of prototypes with GPRS-GSM system and comparison with GNSS system pointing out the methodology of the first exemplary and the comparison of the systems, chapter 4 analyzes the results referring to structural fatigue, verification of the aspects using the first model and total station for the framework, obtaining and receiving data; finally, the conclusions and suggestions are given in functionality of the results reached in the work of inquiry, it was taught that the technique with GPS characterizes a possible choice for the monitoring of the health of civil works of category as bridges, for the obtaining of reliable precisions. Likewise, the use of structural monitoring techniques of civil works using different methodologies is a virtue for the experts thanks to the need to offer a guarantee to the stability of the users in works such as bridges, highways, constructions, and others.

Keywords: gps, gnss system, structural health, gprs-gsm system, structural monitoring

ÍNDICE

Declaratoria de Autoría y Responsabilidad.....	II
Certificación.....	III
Dedicatoria.....	IV
Agradecimiento.....	V
Resumen.....	VI
Abstract.....	VII
ÍNDICE.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE ANEXOS.....	XII
1. CAPÍTULO I GENERALIDADES.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Justificación.....	3
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. Alcance de la investigación.....	4
2. CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Consideraciones generales.....	5
2.2. Sistema de monitoreo de salud estructural de puentes.....	5
2.2.1. Tipos de Sensores para el Monitoreo de la Salud Estructural.....	10
2.2.2. Monitoreo de Salud Estructural de un Puente.....	11
2.3. Los sistemas GNSS.....	14
2.3.1. Sistema PPP- GNSS.....	14
2.4. Técnica del Sistema PPP- GNSS.....	15
2.4.1. Análisis de fallas de integridad y vulnerabilidades en PPP.....	17
2.5. Señales GNSS.....	20
2.5.1. Señales GPS.....	20
2.5.2. Señal GLONASS.....	21
2.5.3. GALILEO.....	21
2.5.4. BEIDUO.....	22
2.6. REDES MOVILES.....	22
2.6.1. GSM (sistema global para las comunicaciones móviles) 1G.....	22
2.6.2. GPRS (servicio general de paquetes vía radio) 2G.....	22
2.6.3. EDGE o EGPRS.....	22
2.6.4. UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). 3G.....	23
2.6.5. HSPDA (High Speed Downlink Packet Access). 3G+.....	23
2.6.6. LTE (Long Term Evolution) 4G.....	23
2.6.7. NSA (Non Standalone) 5G.....	23
2.7. Localización GPS/GSM.....	23
2.8. DISPOSITIVOS.....	24
2.8.1. GPS NEO 6M.....	24

2.8.2.	Módulo SIM800L	26
2.8.3.	Módulo GPS con Arduino.	26
2.9.	Fatiga estructural.	27
3.	CAPÍTULO III MODELO FÍSICO DEL PROTOTIPO CON SISTEMA GPS- GSM Y COMPARACIÓN CON SISTEMA GNSS.....	31
3.1.	Sistemas GPS – GSM.....	31
3.1.1.	Digitalizador.	31
3.1.2.	Arduino Nano.....	32
3.1.3.	Sistema de posicionamiento.....	33
3.1.4.	Sensor.....	34
3.1.5.	Esquema de conexión.	35
3.1.6.	Adquisición De Datos.....	35
3.1.7.	Dispositivos Para El Circuito Eléctrico	36
3.1.8.	Resistencia.	36
3.1.9.	Regulador de voltaje lineal.	37
3.1.10.	Placa Electrónica.....	38
3.1.11.	Sistema De Alimentación.	38
3.1.12.	Funcionamiento del primer prototipo.	39
3.1.13.	Funcionamiento Del Segundo Prototipo.....	39
3.2.	SISTEMA GNSS.....	40
3.2.1.	Componentes del sistema GNSS.	42
3.3.	Comparación de los sistemas GPS – GNSS.....	43
3.4.	Metodología	46
3.4.1.	Prototipo GSM/GPRS	46
3.4.1.1.	Obtención de datos.....	46
3.4.1.2.	Recepción de datos	48
3.4.2.	Sistema GNSS.....	50
4.	CAPÍTULO IV RESULTADOS	53
4.1.	Verificación de los puntos utilizando el prototipo y estación total.	53
4.2.	Resultados del prototipo con sistema GSM/GPRS	56
4.3.	Resultados con sistema PPP-GNSS	58
4.3.1.	Métodos.....	58
4.3.2.	Resultados.....	59
4.4.	Implementación del sistema de monitoreo sistema GNSS.....	64
4.5.	Análisis de resultados.....	66
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
	BIBLIOGRAFÍA.....	71
	ANEXOS.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema Inteligente De Monitoreo De Salud Estructural	8
Figura 2. Equipo De Monitoreo De Salud Estructural	13
Figura 3. Árbol De Fallas De Integridad	18
Figura 4. memoria EEPROM	24
Figura 5. Especificaciones y características.	24
Figura 6. Modulo GPS.....	25
Figura 7. Modulo GPS.....	26
Figura 8. SIM800L-AT-Arduino-Uno-Conexión.....	27
Figura 9. Procesamiento de Datos	27
Figura 10. Modos de Agrietamiento en Acero Estructural.....	29
Figura 11. Placa Arduino Pro Mini	31
Figura 12. Placa Arduino Nano	32
Figura 3. Módulo GPS Neo -6M	33
Figura 15. Módulo MPU6050	34
Figura 16. Módulo MPU6050	35
Figura 17. Módulo SIM800L V2.2 GSM/GPRS.....	36
Figura 48. Condensadores	36
Figura 19. Resistencia	37
Figura 20. Regulador De Voltaje Lineal	37
Figura 21. Placa Electrónica.....	38
Figura 22. Porta Pilas	38
Figura 23. Primer Prototipo.....	39
Figura 24. Segundo Prototipo.....	40
Figura 25. Diagrama Del Sistema GNSS	43
Figura 26. Comprobación De Señal GPS	46
Figura 27. Comprobación De Mensajería (SMS).....	46
Figura 28. Recepción De Señal Del GPS	47
Figura 29. Envío De Mensaje	48
Figura 30. Recepción De Mensajes Al Celular	49
Figura 31. Ubicación Del Prototipo P1 Y P2	50
Figura 52. Receptores GNSS.....	51
Figura 33. Levantamiento con GPS/GNSS	52
Figura 34. Mensaje de texto recibido del prototipo al celular.....	53

Figura 35. Levantamiento De Los Puntos para la comprobación del margen de error	54
Figura 36. Comprobación De Los Puntos con el prototipo y estación total	55
Figura 37. Comprobación de puntos en elevación con margen de error $\pm 3m$	56
Figura 38. Ubicación Del Dispositivo en el puente	57
Figura 39. Receptor geodésico GPS Diferencial FOIF A90	58
Figura 40. Estación total Topcon IS303	59
Figura 41. Levantamiento de puntos del estribo del puente con la estación RTK	60
Figura 42. Levantamiento de puntos del estribo del puente con la estación total	60
Figura 43. Verificación de los puntos levantados del estribo del puente.	62
Figura 44. Puntos de referencia para el monitoreo de los estribos del puente.	63
Figura 45. Receptor geodésico establecido como base	64
Figura 46. Colectora de datos con sistema GNSS	65
Figura 47. Puntos de control en el estribo del puente	65
Figura 48. Levantamientos de puntos	66
Figura 49. Distancia entre estribos obtenido del levantamiento de los puntos	67
Figura 50. Subestructura del puente	67
Figura 51. Estribo del puente con un desnivel de 5cm	68
Figura 52. Fisura en el estribo	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Modos de Falla Compilados de GNSS PPP	18
Tabla 2. Especificaciones Técnicas	32
Tabla 3. Especificaciones	33
Tabla 4. Propiedades Físicas de MPU6050	35
Tabla 5. Características Regulador de Voltaje	37
Tabla 6. Comparación Segmento Espacial	44
Tabla 7. Comparación Segmento de Control	45
Tabla 8 Comparación de Prestaciones	45
Tabla 9. Comparativa De Frecuencias	45
Tabla 10. Tabla De Coordenadas obtenidas con los dos sistemas	55
Tabla 11. Comprobación de puntos entre el prototipo y estación total	55
Tabla 12 Tabla levantamiento de puntos con el equipo rtk y estación total	61
Tabla 13 Tabla de comprobación de los puntos levantados del estribo del puente	62
Tabla 14 Tabla de los puntos de referencia para el monitoreo de los estribos del puente	64

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Prototipo en placa perforada y placa electrónica para pruebas.....	75
Anexo 2. Prototipo final colocado en una caja para su debida transportación del mismo	76
Anexo 3. Funcionamiento del módulo MPU6050 al realizar un movimiento	77
Anexo 4. Verificación de los puntos con estación total y el prototipo.....	78
Anexo 5. Obtención de datos enviados desde el prototipo hacia el celular.	79
Anexo 6. Implementación de prototipo en el Puente ubicado vía Javier Maldonado sobre el rio Machángara sector feria de ganado.....	80
Anexo 7. Indicaciones del funcionamiento del equipo RTK por parte de la Universidad Católica de Cuenca sede Azogues de la facultad de Ing. Civil.....	80
Anexo 8. Colocación del receptor como base en la estancia Luis Cordero y receptor Rover.....	81
Anexo 9. Implementación del equipo RTK y estación total.	81
Anexo 10. Comprobación de los puntos levantados en AutoCAD	83

II. CAPÍTULO I GENERALIDADES

1.1. Introducción

En el año 1973 la defensa de los EEUU ejecuto un sistema de posicionamiento con satélites: NAVSTAR/GPS, el cual admitía a través de un receptor adecuado la obtención del posicionamiento; esta aplicación es una fuente militar comandada por el Departamento de defensa de los Estados Unidos (DOD). A mediados de la década de 1990, esta tecnología comenzó a utilizarse con fines civiles con el fin de llegar a diversos acuerdos entre el gobierno de EE. UU. y diferentes países del mundo, siendo el GPS el único sistema de navegación por satélite completamente operativo para esa época.

Hoy día el Sistema de Posicionamiento Global (SPG) hace referencia al conjunto de sistemas de posicionamiento como el Global Navigation Satellite System (GLONASS), European Geostationary Navigation Overlay System (EGNOS), Wide Area Surveillance Satellite (WASS), MTSAT Satellite based Augmentation System (MSAS), asimismo el proyecto europeo para el desarrollo de un sistema de navegación global por satélite nombrado GALILEO designándose Global Navigation Satellite Systems (GNSS).

El método que ha tenido mayor relevancia en su aplicación es la tecnología satelital GNSS la cual sirve para el monitoreo de estructuras en tiempo real. Uno de los primeros trabajos de obras civiles con la tecnología GNSS fue llevado a cabo por *Lovse et al. (1995)* para monitorear los desplazamientos dinámicos de la torre Calgary en Alberta Canadá. Mediante la tecnología GNSS se obtiene coordenadas en las tres componentes, siendo así un instrumento potencial para el monitoreo de estructuras al medir directamente el desplazamiento.

Para el monitoreo de obras de ingeniería es necesario requerir receptores geodésicos de doble frecuencia y que el intervalo de frecuencia sea de altas frecuencias (10Hz) por este motivo se utiliza la técnica conocida como PPP-GNSS. La metodología PPP-GNSS es un método de procesamiento de datos GNSS que utiliza un solo receptor satelital y con diferentes modelados de las fuentes de error puede alcanzar precisiones de hasta +/- 2mm. Sin embargo este método ha intervenido como una opción al monitoreo de la salud estructural (SHM, por sus siglas en ingles).

En este trabajo de investigación se implementa la técnica PPP-GNSS como una alternativa para el monitoreo de la salud estructural en un puente. Se debe tener en cuenta que

los puentes son estructuras consideradas de gran importancia por lo que se debe de evitar que estas estructuras sufran daños considerables o deterioros, sismos u otros efectos ambientales, por esta razón resulta recomendable realizar un monitoreo constante de la estructura con la finalidad de conocer su estado de salud estructural y si se detecta algún daño tomar las medidas respectivas para su oportuna intervención y rehabilitación. Es muy común ver a usuarios de estas estructuras sobrepasar la carga permitida para su utilización generando daños estructurales que se pueden ver reflejados en paneles, vigas, pilas o estribos.

El monitoreo de salud estructural (Sistema de monitoreo estructural - SHM) facilita la detección y caracterización de los daños en una estructura que pueden afectar su capacidad para desempeñar con seguridad su función prevista; identifica estos cambios en la primera oportunidad, de modo que se puedan tomar medidas correctivas para minimizar el tiempo de inactividad, los costos operativos, de mantenimiento para reducir el riesgo de fallos catastróficos, lesiones y pérdida de vidas (Predictiva 21, 2019).

1.2. Antecedentes

El objetivo del monitoreo de salud estructural (SHM) mediante sensores es inspeccionar el comportamiento de la estructura de forma concisa y eficiente, y así verificar su rendimiento bajo diferentes cargas de servicio, de esta forma se detecta el daño con el afán de determinar su condición general (Seguel, 2019).

1.3. Justificación

La importancia de los puentes en el país se genera debido a la facilidad de conexión entre dos ciudades de una forma corta y segura, contribuyendo al sector comercial de una urbe a otra. Es significativo que los puentes dispongan con un monitoreo de salud estructural que permita equiparar la presencia de daños en la estructura mediante métodos de modelación analítica e interpretación de datos.

La técnica PPP-GNSS es un método de procesamiento de datos GNSS que utiliza un solo receptor satelital que actualmente el post procesamiento de esta técnica es considerado muy costoso debido a que requiere diferentes equipos como receptores, representando gastos considerables al momento de ejecutar las mediciones. Por lo mencionado anteriormente es importante construir el prototipo con sistema satelital GSM GPRS que es un sistema de comunicación móvil que fue creado en la década de los 80 y se ha convertido en un elemento clave de la industria. La finalidad de este prototipo es asemejar a la técnica PPP-GNSS utilizando recursos que encontramos en nuestro medio. Una vez ya obtenido el prototipo se procederá realizar el monitoreo del puente para proporcionar la seguridad de los usuarios que a diario interactúan con el mismo. Uno de los aspectos a beneficiarse es que se determina la salud estructural y de esta manera su puedan evitar accidentes ocasionados por el mal estado estructural de dichas obras.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general.

Realizar el monitoreo de un puente a través de un sistema de red inalámbrica utilizando la técnica de posicionamiento puntual preciso (PPP-GNSS) de forma que se permita evaluar la salud estructural del puente objeto de estudio.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Investigar una metodología para realizar un sistema de red inalámbrica a través de la técnica PPP-GNSS que cuantifique los desplazamientos laterales.
- Implementar el sistema de red inalámbrica en el puente que servirá de estudio con la finalidad de conocer los desplazamientos laterales que se generen.
- Determinar la salud estructural del estribo del puente por medio de los datos registrados en campo.

1.5. Alcance de la investigación

La implementación del monitoreo estructural haciendo uso de la técnica PPP-GNSS genera en forma positiva un beneficio en la visualización en tiempo real del comportamiento de la estructura en estudio, con lo que será posible analizar de forma más real la salud estructural de la misma. La realización y exposición de este proyecto teórico busca ser de interés para los profesionales que requieran determinar el comportamiento estructural, para este caso, un puente bajo la implantación de un prototipo con geolocalización. Por lo tanto, es indispensable utilizar y colocar en práctica los conocimientos obtenidos en diferentes asignaturas dictadas en el trayecto de la carrera de Ingeniería Civil.

2. CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Consideraciones generales.

El puente representa un estructura vial de gran inversión económica de acuerdo con lo planteado por Viviescas, Carrillo y Vargas (2018) se debe desarrollar un programa de monitoreo para detectar cambios en su respuesta dinámica que podría ser un indicador de falla o fatiga del material, que al estar sometido a cargas de tipo dinámico, tales como el tráfico, las vibraciones inducidas por humanos, condiciones climatológicas, entre otros factores, pueden conducir a la producción y propagación de fisuras o grietas, ocasionando finalmente la fractura súbita y el colapso del puente. Es por ello, que el monitoreo y detección temprana de estos cambios contribuye a tomar decisiones a tiempo para su oportuna intervención, mantenimiento o reparación.

Es importante señalar, que los puentes, independientemente de que su estructura sea metálica, de concreto o madera, durante su funcionamiento, están sometidos a diversos esfuerzos a lo largo del tiempo, que pueden ser causados por fenómenos mecánicos o ambientales, cambios de temperatura, presencia de medios corrosivos, etc. y una combinación de dos o más de estas causas. Además, la aplicación continua de estas cargas puede provocar microfisuras en el material, a menudo comenzando en la superficie, a través del material, reduciendo la capacidad de carga del elemento y, en última instancia, provocando su rotura, es decir, el material está fatigado, dañado.

2.2. Sistema de monitoreo de salud estructural de puentes

El sistema de monitoreo y sensores fueron perfeccionados para cubrir los parámetros de los mecanismos de deterioro más significativos tales como: la corrosión de armaduras en puentes, carbonatación de concreto y daños mecánicos en general, así como aquellos cambios en el comportamiento de la estructura y seguridad, entre los que se tienen la deformación estática, ancho de grietas y vibraciones. (Mejía & Salazar, 2019).

Dentro de su instalación el sistema de monitoreo permanente en puentes proporciona ventajas como reducción de costos operativos en inspecciones y mantenimiento (25%), costos relacionados con el tráfico (30%) al reducir el número y el alcance de las inspecciones y en costos totales pertenecientes al aprovechamiento vital de la estructura (10%) con ayuda de modelos mejorados en diseño de predicción de vida útil (Mejía & Salazar, 2019).

Con el fin de garantizar la posibilidad del estado en que se encuentran los puentes, la Universidad Técnica “Gheorghe Asachi” de Iasi dentro de un programa de investigación, desarrolló un sistema de monitoreo de salud estructural (SHM) para evaluar su durabilidad (Claudiu y otros, 2017). Este sistema debe ser integrado junto con la experiencia real de inspecciones bajo visualización combinadas con la respuesta confiable de diferentes sensores que monitorean el rigor de daños mediante modelos de deterioro y se instalan en puntos específicos de la estructura. Básicamente, el sistema SHM tiene la capacidad de establecer y generar la correlación para la evaluación de la estructura. (Sousa y otros, 2011).

Desde hace veinte años, el monitoreo de la salud en las estructuras civiles ha tenido gran progreso debido al valor de conocer el estado estructural y experimentar su comportamiento en operación. La inversión económica que representa una estructura vial tipo puente genera la necesidad de implantar planes de monitoreo para detectar cambios en la respuesta dinámica, ya que podrían ser indicadores de daño y contribuirían en la toma de decisiones para su intervención y mantenimiento. En la actualidad se maneja el término de monitoreo de la salud estructural (SHM), para describir las técnicas que admiten la evaluación y diagnóstico preventivo en las estructuras.

En la evaluación estructural del puente se valora el desempeño en momentos determinados así como la identificación de daños y fallas, estos se definen como los cambios en materiales a nivel de sus propiedades geométricas, de los sistemas y de sus condiciones conectividad. Asimismo, los daños afectan el manejo actual y futuro de la estructura, ya que una falla es la cualidad del puente cuando su estado límite es alcanzado o excedido (Tecnológico de Costa Rica, 2019).

El proceso de identificación de daños se distribuye de la siguiente manera:

- Detección: se determina la aparición de un daño.
- Localización: es cuando se descubre el daño.
- Tipificación: es cuando se establece el tipo de daño.
- Extensión: es cuando se valora la severidad del daño.

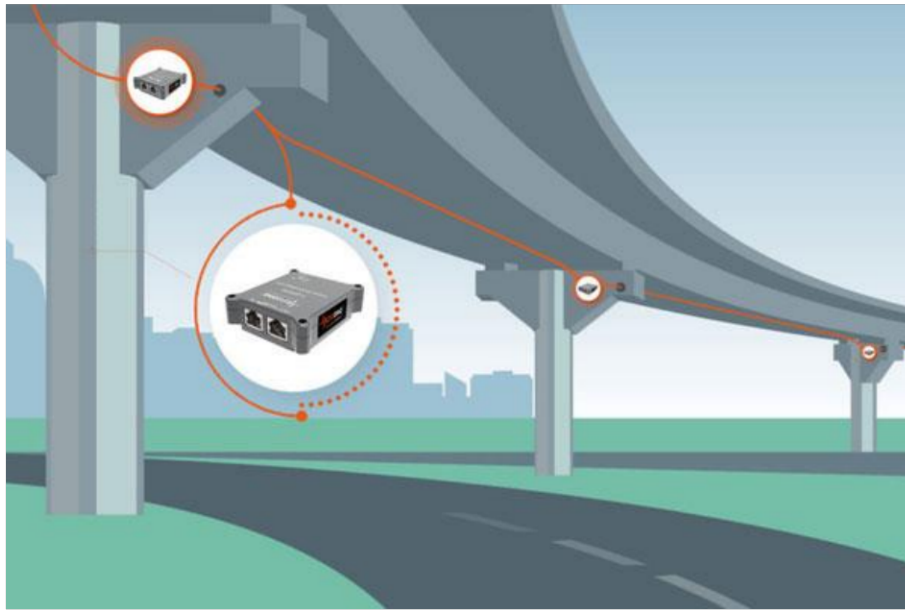
Asimismo, la American Association of State Highways and Transportation Official (AASHTO) ha generado una serie de manuales que se pueden manejar para la definición de una metodología mixta en la evaluación de puentes, tales como:

- AASHTO Guide Manual for Bridge Element Inspection. First Edition - 2011. El manual reemplaza al AASHTO Guide for Commonly Recognized (CoRe) Structural Elements, el cual pretende ser un referente en la estandarización de elementos, cálculos de cantidades, definición de estados de condición, recomendaciones a nivel de intervenciones y acuerdos de inspección.
- Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nation's Bridges U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. 1995. El documento proporciona una guía para la evaluación y codificación de los elementos principales de las estructuras de puentes.
- Bridge Inspector's Reference Manual. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. 2006. El documento contiene una guía de inspección de manera minuciosa de las estructuras de puentes.
- The Manual for Bridge Evaluation. Second Edition. 2011. El manual estándar fue publicado por la AASHTO, proporciona uniformidad en los procedimientos y políticas para comprobar las condiciones físicas, las necesidades de mantenimiento y la capacidad de cargas de los puentes en EEUU.

Los sistemas de monitoreo de salud estructural basados en ondas guiadas, brindan información sobre la integridad estructural basada en mediciones obtenidas de transductores, como sensores piezoeléctricos y de fibra óptica. Estas mediciones de sensores están influenciadas por cambios en las condiciones ambientales y operativas (CAO), así como por la presencia de ruido eléctrico. Para obtener información sobre la existencia de daño estructural, las características de ondas guiadas que son sensibles a la presencia de daño pueden extraerse y fusionarse para formar un índice de daño que represente el estado actual de la integridad de la estructura. Se puede usar un valor de umbral para el índice de daño para distinguir un estado dañado de un estado no dañado. Este valor umbral se determina en base a un cierto nivel de confianza estadística en la medición del sensor bajo la presencia de incertidumbre causada por ruido aleatorio y sistémico. Esto provoca un nivel significativo de incertidumbre en las mediciones de los sensores que no se puede ignorar y requiere la aplicación de técnicas de análisis estadístico para tener en cuenta sus efectos.

Figura 1.

Sistema Inteligente De Monitoreo De Salud Estructural



Fuente: Constro Facilitator (2021)

Para agregar las condiciones ambientales y operativas (CAO) puede tener diferentes efectos sobre las ondas guiadas según el material y el tipo de daño presente, en el cual para lograr una identificación de daños altamente preciso se deben cuantificar para la gama de materiales presentes. Para obtener información sobre la existencia de daño estructural, se pueden extraer y fusionar características de onda guiada que son sensibles a la presencia de daño para formar un índice que represente el estado actual de la integridad de la estructura. Se puede usar un valor umbral para el índice y distinguir un estado dañado de uno no dañado; este valor de umbral se determina basándose en un cierto nivel de confianza estadística en la medición del sensor en presencia de incertidumbre causada por ruido aleatorio y sistémico (Yue & Aliabi, 2020).

El monitoreo de la salud estructural es un método de registro, procesamiento y evaluación de datos de medición para detectar cambios estructurales, daños y niveles de estrés crítico en una etapa temprana. Esto está diseñado para garantizar la capacidad funcional, la seguridad y el buen funcionamiento y, al mismo tiempo, reducir los gastos tecnológicos y financieros. Consta de sensores ubicados en posiciones cuidadosamente seleccionadas en todo el edificio, equipos de transmisión de datos y un servidor para la recopilación y el control de datos.

El proceso de desarrollo del sistema consta de tres etapas: diseño, construcción y mantenimiento:

1. En la etapa de diseño se modelan las amenazas, se identifican los parámetros de monitoreo requeridos. Los parámetros a considerar al momento del monitorear son los ambientales como: temperatura, velocidad y dirección del viento, radiación solar y precipitación pluvial todos estos parámetros se requerirán para realizar el análisis de correlación y así determinar la influencia de estos parámetros en el comportamiento de estructura y así generan modelos matemáticos e informáticos. En esta etapa se establecen las reglas iniciales que determinan el tipo y la ubicación del sensor. Dependiendo del parámetro requerido, los sensores se pueden instalar empotrados en el hormigón, en una armadura o en carcasas especiales.
2. Al monitorear el edificio durante un período de tiempo y evaluar los resultados, los modelos matemáticos e informáticos desarrollados en la etapa de diseño se verifican y corrigen en el software de monitoreo cuando es necesario. El software utilizado es el SODIS Building M, es desarrollado y comercializado por NPO SODIS. Este software permite que el sistema de monitoreo estructural realice análisis complejos de diferentes mediciones y muestre los resultados monitoreados en tiempo real.
3. La etapa de mantenimiento, es cuando los operadores del edificio toman el control del sistema de monitoreo y utilizan el software especialmente desarrollado para la maniobra y conservación del edificio. El software admite a los operadores ver inmediatamente el estado del edificio (Constro Facilitator, 2021).

Entre los sistemas de monitoreo de la salud estructural se tienen los siguientes:

- *Detección y monitoreo de impactos de camiones de gran altura.* - Este monitoreo sirve para identificar camiones que superen el límite de altura señalado. La instrumentación monitorea continuamente el puente en busca de posibles impactos a las vigas como resultado de camiones que exceden el límite de altura señalado.
- *Detección y monitoreo de impactos de barcazas.* - La implementación es con tecnología de detección para monitorear los pilares desde lejos en busca de impactos de una barcaza o flotilla de barcazas. En este monitoreo se colocan acelerómetros triaxiales en la parte superior de los pilares del puente para detectar y medir los impactos.

- *Efecto de las cargas térmicas en la evaluación de la subestructura de puentes.* - La implementación es con dispositivos de monitoreo de temperatura y respuesta del puente para comparar las mediciones de las presiones del suelo inducidas por la temperatura con las presiones derivadas de las disposiciones de diseño y el análisis de elementos finitos del puente.
- *Evaluación del movimiento térmico de las juntas de dilatación.* - Esta evaluación se llevó a cabo para aclarar aún más la respuesta de carga térmica de las superestructuras de puentes de acero y para evaluar la solidez de las disposiciones existentes de carga de temperatura AASHTO para un puente en servicio a gran escala.
- *Monitoreo del crecimiento de grietas.* - Para este monitoreo las grietas se identifican en la parte superior de la red, al final de la viga de piso. Se coloca un medidor de microfisuras de cuerda vibrante a través de una fisura seleccionada y se mide el movimiento en tiempo real.

2.2.1. Tipos de Sensores para el Monitoreo de la Salud Estructural.

Sensor de fibra óptica.

Es un sensor que utiliza fibra óptica como elemento para transmitir señales desde un sensor remoto a la electrónica que procesa las señales. Las fibras tienen diferentes manejos en la teledetección la cual va depender de la aplicación, se puede utilizar debido a su tamaño ya que no se necesita energía eléctrica en la ubicación remota, debido a que diversos sensores se pueden multiplexar a lo largo de una fibra, utilizando un cambio de longitud de onda de luz para cada sensor, y detectando el retardo de tiempo a medida que la luz pasa a lo largo de la fibra mediante cada uno.

El retardo de tiempo se puede comprobar utilizando un dispositivo como reflectómetro óptico en el dominio del mismo y el cambio de longitud de onda se puede calcular usando un instrumento que implemente la reflectometría en el dominio de la frecuencia óptica. Los sensores de fibra óptica también son inmunes a las interferencias electromagnéticas y no conducen la electricidad, por lo que pueden usarse en lugares donde hay electricidad de alto voltaje o material inflamable como el combustible para aviones.

Clinómetro.

Se utiliza un inclinómetro para monitorear los movimientos y deformaciones del subsuelo. Las aplicaciones propias de los inclinómetros contienen la detección de zonas de

movimiento y establecer si el movimiento es constante, acelerado o respondiendo a una medida correctiva, verificando que las deformaciones estén dentro de los límites de diseño, que los puntales y anclajes funcionen como se esperaba y que los edificios adyacentes no se vean afectados por el suelo. movimientos, verificación de la estabilidad de presas, estribos de presas y taludes aguas arriba durante y después del embalse y seguimiento de los perfiles de asentamiento de terraplenes, cimientos y otras estructuras (inclinómetro horizontal). Un sistema de inclinómetro tiene dos componentes: (1) carcasa de inclinómetro y (2) un sistema de medición de inclinómetro.

2.2.2. Monitoreo de Salud Estructural de un Puente.

El monitoreo de la salud estructural de los puentes (SHM), es una herramienta importante en la gestión de activos que se ha vuelto extremadamente popular durante la última década.

El monitoreo ayuda a los ingenieros a identificar daños en las estructuras de los puentes que podrían ser materiales y/o geométricos. Entre los daños más frecuentes que se presentan en los puentes están: la cimentación, especialmente en pilas y elementos situados en causes, aparatos de apoyo y sistemas de drenaje e impermeabilización entre ellos juntas de dilatación. En puentes de concreto se pueden encontrar unas categorías principales para evaluar daños, la primera sería daños por diseño donde se encuentran fisuras, aplastamiento vibración excesiva. En los daños por construcción se encuentran hormigueos, fisuración y segregación. En los daños por funcionamiento encontramos infiltración, carbonatación, corrosión o fallas por impacto. Si el puente es en estructura metálica se pueden encontrar unas categorías principales para evaluar daños como corrosión, daños en cables o pendolones, daños de perfiles metálicos o armaduras, daños en conexiones.

Con los avances actuales en tecnología de sensores, adquisición de datos y redes, proporciona herramientas que pueden identificar rápidamente defectos y daños en los componentes del puente, lo que puede conducir a estructuras más seguras y confiables. Los avances tecnológicos recientes facilitan el uso de sistemas más complejos y precisos para evaluar el desempeño de puentes existentes y nuevos. Se espera que el rápido desarrollo de la tecnología promueva una filosofía de mantenimiento basada en el estado más rentable y un cambio de la filosofía basada en el tiempo que se utiliza actualmente (Abheetha y otros, 2018).

Al implementar un sistema de monitoreo de salud estructural en puentes, se debe interactuar y disponer la práctica real basada en las inspecciones visuales combinando la respuesta de varios sensores confiables instalados en la estructura para monitorear la severidad del daño estructural con modelos de deterioro realistas. Este sistema SHM, tiene la capacidad de determinar y evaluar el servicio, confiabilidad y funcionalidad de la estructura en términos de durabilidad.

El sistema implementado en puentes incluye cinco operaciones de adquisición, validación, análisis, pronóstico y gestión del sistema, en el cual los sensores fueron perfeccionados para resguardar los parámetros mecánicos como corrosión de armaduras en puentes, carbonatación del hormigón, ciclos de congelación y descongelación, reacción álcali-sílice y daños mecánicos, también los cambios en el comportamiento y seguridad de las estructuras como las deformaciones estáticas, deformaciones, anchos de fisura, frecuencias, amplitudes, aceleraciones y modos de vibración (Claudiu y otros, 2017).

Un sistema de monitoreo de salud estructural contribuye en la evaluación de daños en 5 niveles primordiales:

- Nivel I - Detección de daño cuando identifica que ha ocurrido el daño
- Nivel II - Localización de daño cuando identifica que ha ocurrido daño y determina la ubicación del daño
- Nivel III - Tipificación de daño donde identifica, ubica, estima el tipo de daño
- Nivel IV - Extensión del daño donde identifica, localiza, estima el tipo y evalúa la severidad del daño
- Nivel V - Extensión del daño donde identifica que ha ocurrido el daño , ubicación del daño, tipo de daño, severidad del daño, y evalúa la vida útil remanente del puente o estado de viabilidad (Claudiu y otros, 2017).

Figura 2.

Equipo De Monitoreo De Salud Estructural



Fuente: Sousa y otros (2011)

Factores para monitorizar la estructura del puente:

- Vibraciones: De origen natural como los movimientos sísmicos o artificial como las obras, explosiones, se manejan acelerómetros de alta sensibilidad para la medición de su intensidad, periodicidad y evaluar sus efectos a corto o largo plazo.
- Calidad del hormigón: Dos sensores se instalan en los encofrados del hormigón, los cuales serán útiles para evitar estudios y diagnósticos destructivos; esto se realiza cuando la construcción está finalizada y en su uso habitual. Uno es el extensómetro que mide la calidad de mezcla de hormigón durante varios años; y el otro es el sensor de corrosión que admite conocer el grado y velocidad de avance del frente de corrosión en encofrados afectados por la patología del hormigón.
- Inclinación: los tabiques y columnas perciben movimientos con respecto a su posición original, son difíciles de percibir a simple vista y se detectan a través de inclinómetros de alta resolución.
- Temperatura y humedad: cambios característicos en los factores que inducen y/o indican alguna patología.
- Aparición de grietas, fisuras y sus alteraciones: es significativo detectar la aparición de grietas y fisuras para establecer su grado de jerarquía. Una vez aparecidas es indispensable verificar el seguimiento sobre su evolución, para ello se manejan sensores de fibra óptica, galgas y fisurómetros.

2.3. Los sistemas GNSS

Los Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS) son el conjunto de constelaciones de satélites que orbitan la Tierra y tienen como función dar posicionamiento tridimensional sobre la superficie terrestre.

Los GNSS consisten básicamente en tres segmentos principales:

- **Segmento Espacial:** sus funciones son la generación y transmisión de señales de fase de código y portadora, almacenamiento y transmisión del mensaje de navegación cargado por el segmento de control; son controladas por relojes atómicos altamente estables a bordo de los satélites. (Vazquez, 2019). Este segmento lo constituyen los satélites artificiales (de navegación como de comunicación) que forman el sistema.
- **Segmento de control:** es responsable del funcionamiento correcto del GNSS. Sus funciones básicas son controlar, mantener el estado y la configuración de la constelación de satélites, predecir las efemérides y la evolución del reloj del satélite, para mantener la escala de tiempo GNSS adecuado para actualizar los mensajes de navegación hacia todos los satélites (Vazquez, 2019). La cual corresponde al conjunto de estaciones presentes en la superficie terrestre los cuales se ocupan de recolectar los datos obtenidos para ponerlos a disposición de los usuarios.
- **Segmento de Usuario:** El segmento usuario está compuesto por receptores GNSS. Su función principal es recibir señales GNSS, determinar pseudodistancias (y otros observables) y resolver las ecuaciones de navegación para obtener las coordenadas y proporcionar un tiempo muy preciso. Los elementos básicos de un receptor GNSS genérico son: una antena con preamplificación, una sección de radiofrecuencia, un microprocesador, un oscilador de precisión intermedia, una fuente de alimentación, algo de memoria para el almacenamiento de datos y una interfaz con el usuario.

El segmento usuario debe entenderse como equipos, terminales, receptores y dispositivos que reciben las señales procedentes del segmento espacial.

2.3.1. Sistema PPP- GNSS.

Para obtener un nivel de precisión de posicionamiento centimétrico, una opción se llama posicionamiento relativo o sistemas globales de navegación por satélite diferenciales llamado DGNS (iniciales en inglés), el cual es un método para mejorar la precisión de posicionamiento que utiliza una estación de referencia terrestre de posición conocida fija, es

decir, la estación base. El segundo receptor GNSS, que se llama móvil, puede estar en modo estático o cinemático, ambos receptores necesitan observar simultáneamente los mismos satélites. Las fallas que afectan las observaciones de la base y el móvil son muy similares, por lo que la línea de base entre la base y el móvil se puede estimar con precisión.

Sin embargo, DGNSS tiene tres defectos principales: (1) la necesidad de establecer una estación receptora base conocida, (2) la necesidad de observaciones simultáneas en las estaciones receptoras base y móvil y (3) la degradación de la precisión con el aumento de la distancia entre la estación base y receptor móvil. Por lo tanto, el enfoque en el procesamiento del posicionamiento preciso de puntos (PPP) no necesita una estación base, es una alternativa eficiente a los métodos DGNSS; desarrollado con la llegada de los productos GNSS, incluida la órbita precisa, el reloj satelital, el desplazamiento del centro de fase para el satélite y el receptor y las correcciones atmosféricas (Ashraf y otros, 2020).

2.4. Técnica del Sistema PPP- GNSS

El posicionamiento preciso de puntos (PPP) es una técnica de posicionamiento que elimina o modela los errores del sistema GNSS para proporcionar un alto nivel de precisión de posición desde un solo receptor. Una solución PPP depende del reloj del satélite GNSS y las correcciones de la órbita, concebidas a partir de una red de estaciones de referencia global. Una vez calculadas las correcciones, se entregan al usuario final vía satélite o por Internet. El receptor utiliza estas correcciones, lo que da como resultado un nivel de decímetro o un mejor posicionamiento sin necesidad de una estación base. Una estación base es un punto de referencia donde se conozcan sus coordenadas con precisión. (Novatel, 2020).

PPP ofrece una precisión hasta 3 centímetros, una solución de PPP típica requiere un período de tiempo para converger a una precisión decimétrica con la finalidad de resolver cualquier problema local, como las condiciones atmosféricas, el entorno de trayectos múltiples y la geometría de los satélites. La precisión real alcanzada y el tiempo de convergencia requerido dependen de la calidad de las correcciones y de cómo se aplican en el receptor. De estructura similar a un sistema SBAS (Satellite Based Augmentation System o Sistema de Aumentación Basado en Satélites), es un sistema de corrección de las señales que proporcionan los Sistemas Globales de Navegación por Satélite GNSS. Los sistemas SBAS mejoran el posicionamiento horizontal y vertical del receptor y dan información sobre la calidad de las señales. Un sistema PPP proporciona correcciones a un receptor para aumentar la precisión de la posición, sin embargo, los sistemas PPP generalmente brindan un mayor nivel de precisión y cobran una tarifa para acceder a las correcciones; asimismo, permiten

utilizar un único flujo de corrección en todo el mundo, mientras que los sistemas SBAS son regionales.

Las principales fuentes de error de PPP se amortiguan de las siguientes formas:

- Operación de doble frecuencia: el retardo ionosférico de primer orden es proporcional a la frecuencia de la onda portadora. Por lo tanto, el retardo ionosférico de primer orden se puede eliminar por completo mediante el uso de combinaciones de mediciones GNSS de doble frecuencia.
- Datos de corrección de errores externos: esto incluye las correcciones de la órbita del satélite y el reloj. En el caso del servicio terrastar, las correcciones generadas son transmitidas a los usuarios finales por los satélites de telecomunicaciones de inmarsat.
- Modelado: el retraso troposférico se corrige utilizando el modelo UNB, sin embargo, la parte húmeda del retardo troposférico varía mucho y no puede modelarse con suficiente precisión. Por lo tanto, el retardo troposférico residual se estima al estimar la posición y otras incógnitas. El modelado también se utiliza en el receptor PPP para corregir el efecto de mareas de tierra sólida. El retraso troposférico es el error que introduce el paso de la señal por la troposfera.
- Algoritmos de filtro PPP: se utiliza un filtro de kalman extendido (ekf) para la estimación de PPP. El filtro ekf es una aproximación del estimador Bayesiano y se basa en linealizar las funciones a través de una expansión en series de Taylor de primer orden en torno al estado estimado en cada paso. La posición, el error de reloj del receptor, el retardo troposférico y las ambigüedades de la fase portadora son estados ekf estimados. El Ekf minimiza el ruido en el sistema y permite estimar la posición con precisión centimétrica. Las estimaciones de los estados ekf se mejoran con sucesivas mediciones GNSS, hasta que convergen en valores estables y precisos. El tiempo de convergencia típico de PPP a menos de 10 cm de error horizontal es de entre 20 y 40 minutos, pero depende del número de satélites disponibles, su geometría, la calidad de los productos de corrección, el entorno multirayecto del receptor y las condiciones atmosféricas (Novatel, 2020).

El uso de receptores GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite) de grado geodésico está evolucionando cada vez más en el Monitoreo de Salud Estructural (SHM) de las infraestructuras, en este sentido, el GNSS de Posicionamiento Preciso de Puntos (PPP-

GNSS) se está volviendo muy popular ya que solo requiere un receptor GNSS. El sistema de posicionamiento por satélite de navegación global de alta velocidad (GNSS-PPP) se utiliza para detectar el comportamiento dinámico de la estructura.

La integración de la tecnología de medición PPP-GNSS, va enlazada con un enfoque probabilístico alternativo, basado en el estudio del comportamiento estocástico de los desplazamientos y sus correspondientes funciones de densidad de probabilidad. Un proceso estocástico se define como una familia de variables aleatorias, las cuales dependen de una variable determinista que es el tiempo. Los resultados se validan a través de la precisión de la tecnología de medición PPP-GNSS, derivando beneficios potenciales del enfoque probabilístico alternativo de SHM, ya que los riesgos estructurales se pueden extraer utilizando un solo receptor GNSS en términos de índice de confiabilidad y probabilidad de falla (Ontiveros y otros, 2021).

2.4.1. Análisis de fallas de integridad y vulnerabilidades en PPP.

Para mejorar el desempeño del posicionamiento GNSS, especialmente con respecto a la integridad, es necesario tener un buen conocimiento de todas las amenazas y fallas potenciales, llamados modos de falla. El análisis de ellos, ayuda a identificar los requisitos de integridad de GNSS y desarrollar un modelo de amenaza, así como prevenir y/o proteger contra posibles fallas. Los modos en la técnica PPP rara vez se discuten, ya que las fallas potenciales que deben considerarse para la integridad de PPP se investigan con dos métodos de análisis de fallas representativos: (1) Modos de falla y análisis de efectos (FMEA) y (2) Análisis de árbol de fallas (FTA).

Análisis de modos y efectos de falla (FMEA).

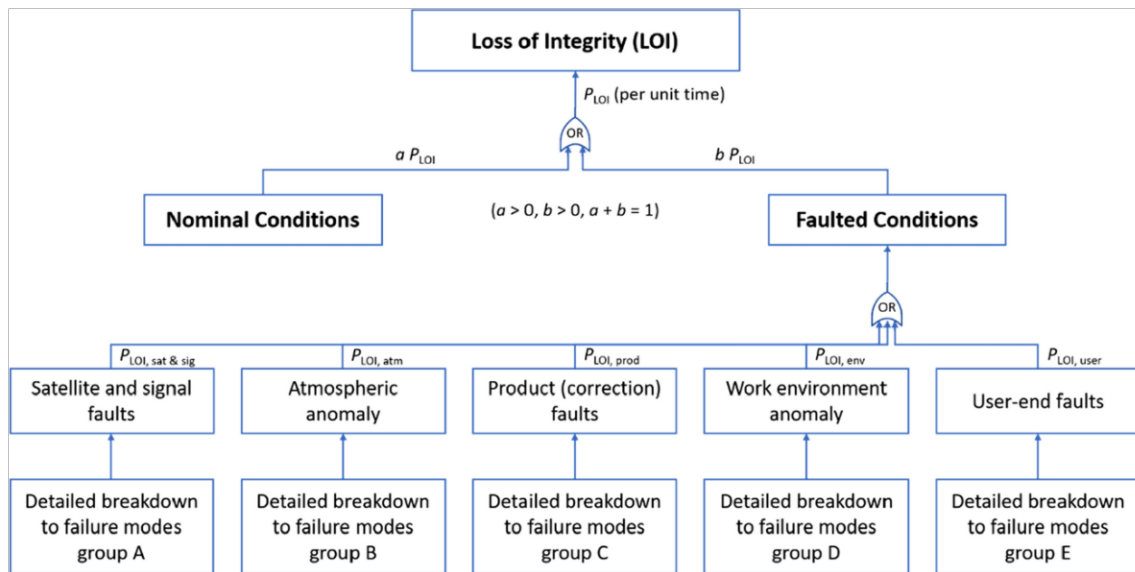
El FMEA generalmente implica identificar todos los modos de falla potenciales con sus causales y características, impactos en los usuarios, probabilidades de ocurrencia y/o métodos de mitigación correspondientes. Se clasifican en cinco grupos: satélite y señal, medio (atmósfera), productos (correcciones), entorno de trabajo y usuario. Los modelos matemáticos para diferentes tipos de fallas, son aproximados, pero pueden ayudar a diseñar y evaluar algoritmos de monitoreo de integridad en un contexto de simulación.

Análisis de árbol de fallas (FTA).

El FTA por sus siglas en ingles, es un procedimiento de análisis de riesgo que desglosa un evento de falla en eventos o factores de nivel inferior para determinar las probabilidades de pérdida de integridad o para asignar riesgos utilizando un diagrama de árbol de fallas (Yujun y otros, 2021).

Figura 3.

Árbol De Fallas De Integridad



Fuente: Yujun, Jinling, Chris y Ahmed (2021)

Tabla 1.

Modos de Falla Compilados de GNSS PPP

Modo de fallo	Tipo de error	Probabilidad previa	Observaciones
<i>(A) Satélite y señal</i>			
Se han subido datos de navegación incorrectos	Error de paso/rampa	$\leq 1 \times 10^{-5}$ /h por satélite en total 2	1. Incluidas las deformaciones de la señal, las fluctuaciones, el código no estándar (NSC), la divergencia del portador del código, etc. 2. Suposición empírica conservadora para GPS (Departamento de Defensa de EE. UU. 2020).
Salto y deriva del reloj satelital	Error de paso/rampa		
Trayectoria anormal e inestabilidad de actitud	Error de paso/rampa		
Mala señal generada o transmitida 1	Paso/Error de rampa/Ruido aleatorio		
Mal funcionamiento del vehículo espacial	Error de paso/ruido aleatorio		
<i>(B) Medio (Atmósfera)</i>			
Centelleo y variabilidad ionosférica	Paso/Error de rampa/Ruido aleatorio	UI (bajo investigación)	

Variabilidad troposférica	Error de paso/rampa	interfaz de usuario	
<i>(C) Productos (correcciones)</i>			
Errores en productos precisos de órbita y reloj (correcciones)	Error de paso/rampa	$1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-5}$ /h por satélite 3	3. Estimaciones empíricas de las correcciones Trimble RTX (Real Time eXtended) (Rodríguez-Solano et al. 2019).
Errores en las correcciones ionosféricas en tiempo real	Paso/Error de rampa/Ruido aleatorio	$\sim 1 \times 10^{-5}$ /h por satélite 3	
Errores en las correcciones troposféricas en tiempo real	Error de paso/rampa	$\sim 1 \times 10^{-6}$ /h por satélite 3	
Parámetros de orientación terrestre (EOP) incorrectos	Error de paso/rampa	interfaz de usuario	Falla en toda la constelación (Díaz et al. 2014).
Modelado incorrecto del centro de fase de la antena del satélite	Sesgo/Oscilación	interfaz de usuario	
Modelado incorrecto del centro de fase del receptor	Sesgo/Oscilación	interfaz de usuario	
Sesgos de código incorrectos	Parcialidad	interfaz de usuario	
Sesgos de fase incorrectos	Parcialidad	interfaz de usuario	
<i>(D) Ambiente de trabajo</i>			
Ruta múltiple de código	Error de paso/ruido aleatorio	Depende del entorno y del receptor	
Código NLOS	Error de paso/ruido aleatorio	Dependiente del entorno	
Trayectoria múltiple de fase portadora	Ruido aleatorio	Depende del entorno y del receptor	
NLOS de fase portadora	Error de paso/ruido aleatorio	Dependiente del entorno	
Interferencia no intencional	Error de paso/ruido aleatorio	Dependiente del entorno	
Interferencias y suplantación de identidad	Paso/Error de rampa/Ruido aleatorio	Dependiente del entorno	
Resbalones de ciclo	error de paso	Dependiente del entorno	
<i>(E) Usuario</i>			
Averías en el receptor y la antena	Error de paso/ruido aleatorio	Dependiente del receptor	
Alta dinámica	Error de paso/ruido aleatorio	Dependiente del usuario	Puede introducir cambios Doppler elevados, lo que provoca un aumento del ruido o una pérdida de seguimiento de la señal
Modelo dinámico inapropiado	Error de paso/rampa	Dependiente del usuario	Fallos en estados predichos en un filtro de Kalman
Incompatibilidad o inconsistencia	Sesgo/Oscilación	Dependiente del usuario	
Ambigüedad fija incorrecta	error de paso	Depende del servicio y del usuario	
Problema de comunicaciones	Error de paso/rampa	interfaz de usuario	

Fuente: Yujun, Jinling, Chris y Ahmed (2021)

2.5. Señales GNSS

Un sistema global de navegación por satélite (Global Navigation Satellite System, GNSS) es una constelación de satélites que transmite rangos de señales utilizados para posicionamiento y localización en cualquier parte del globo terrestre, ya sea en tierra, mar o aire. Un sistema de navegación basado en satélites artificiales puede proporcionar a los usuarios información sobre la posición y la hora (cuatro dimensiones) con una gran exactitud, en cualquier parte del mundo, las 24 horas del día y en todas las condiciones climatológicas.

El sistema GNSS hace referencia al conjunto de los sistemas de navegación por satélite como son GPS, GLONASS, Galileo y Beidou que con cobertura global proveen un posicionamiento geoespacial de una manera autónoma.

2.5.1. Señales GPS

Es un sistema de radionavegación basado en satélites que utiliza mediciones de distancia precisas de satélites GPS para determinar la posición y la hora en cualquier parte del mundo. El GPS posee un error nominal en el cálculo de la posición de aproximadamente 15 m. Este sistema pertenece a los Estados Unidos.

El sistema está formado por una constelación de 32 satélites que se mueven en órbita a 20.200 km aproximadamente, alrededor de seis planos con una inclinación de 55 grados. La estructura del sistema GPS se compone de 3 segmentos

- **Segmento espacial:** conjunto de 30 satélites colocados uniformemente en 6 planos orbitales en forma circular con una inclinación de 55° sobre la línea horizonte y una altitud de 20.200 km, opera con relojes atómicos de Cesio y algunos de Rubidio.
- **Segmento de control:** formado por una estación maestra (MCS) ubicada en Colorado (más 2 estaciones de reserva en California y Maryland) y un conjunto de estaciones de monitoreo alrededor del globo terrestre que facilitan información; 3 de ellas consta de antenas con conexión a tierra que integran un enlace bidireccional con los satélites (Ascensión Island, Diego García, Kwajalein) mientras que las otras no (Hawái, Colorado Springs).
- **Segmento de usuario:** combinación de receptores GPS que hacen uso del sistema.

2.5.2. Señal GLONASS.

El sistema GLONASS es la versión Rusa del GPS, cuyo propósito representativo es bajo cualquier circunstancia con número limitado de usuarios conceder posicionamiento espacial y temporal, contando con la medida de velocidad de la Tierra y el espacio cercano. Para el año 1976 se aprobó en el Comité del Partido Comunista Soviético y el Consejo de ministros de la URSS, el plan de desarrollo de GLONASS.

La estructura del sistema GLONASS se compone de 3 segmentos, aunque el diseño empleado para cada uno de ellos es diferente al de GPS, en el cual tienes las siguientes similitudes:

- **Segmento espacial:** constelación de satélites GLONASS conformada por 21 en actividad y tres de repuesto, distribuida en tres planos orbitales separados 120° , con 8 satélites, a una altitud de 19.100 km y una pendiente de $64,8^\circ$ sobre el Ecuador.
- **Segmento de control:** estación de monitoreo central (CCS) y las de control repartidas por San Petersburgo, Schelkovo, Yenisseyk, Komsomolsk-Amur, Moscú; tiene funciones de seguimiento del ejercicio de la constelación orbital, juste continuo de variables orbitales en las estaciones, formación y carga de programas, instrucciones de control, entre otros.
- **Segmento de usuario:** recibe señales procedentes del segmento de espacio.

2.5.3. GALILEO

Galileo es un sistema de navegación global de Europa basado en satélites, proporcionando un servicio de colocación global altamente exacto, garantizando bajo control civil. Proporciona una precisión en tiempo real entorno a un metro. Y garantiza la disponibilidad del servicio bajo circunstancias extremas e informara a usuarios rápidamente si falla cualquier satélite. El segmento del espacio de galileo abarca una constelacion total de 30 satélites medios de la órbita de la tierra.

2.5.4. BEIDUO

Es un sistema de navegación por satélite chino. Se compone de dos constelaciones de satélites separadas. El primer sistema BeiDou, oficialmente llamado Sistema Experimental de Navegación por Satélite BeiDoU.

Según informaciones oficiales ofrecerá dos tipos de servicio: el primero será abierto y podrá dar una posición con un margen de 10 metros de distancia, 0.2 metros por segundo de velocidad 0.000005 segundos de tiempo. El segundo servicio será autorizado solo para determinados clientes y ofrecerá servicios más precisos y con mayores medidas de seguridad.

2.6. REDES MOVILES

2.6.1. GSM (sistema global para las comunicaciones móviles) 1G

Es un tipo de red que se utiliza para la transmisión móvil de voz y datos. Su banda es lenta y a veces puede causar interferencias electrónicas.

2.6.2. GPRS (servicio general de paquetes vía radio) 2G

Es una extensión mejorada del GSM. Proporciona una cobertura inalámbrica completa y velocidades de transferencia de entre 56 a 114 kbps (kilobits por segundo). Por ejemplo, nos permite enviar 30 SMS por minuto, mientras que con GSM podemos mandar entre 6 y 10.

2.6.3. EDGE o EGPRS

EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) es una clara evolución del sistema GPRS. Permite alcanzar velocidades de hasta 384 kbps y recibir datos móviles pesados, como grandes archivos adjuntos de correo electrónico o navegar por páginas web complejas a gran velocidad.

2.6.4. UMTS (Universal Mobile Telecommunication System). 3G

La transferencia de datos es no solo más veloz, sino que es más fiable, por lo que se le pueden englobar muchas más tareas, pudiendo incluir archivos multimedia, cosa que con las conexiones anteriores era impensable.

2.6.5. HSPDA (High Speed Downlink Packet Access). 3G+

Las velocidades que consigue alcanzar se sitúan entre los 7,2 y los 14,4 Mbps, por lo que en su momento fue un cambio que todo el mundo agradeció. La gran ventaja que esta evolución provocó fue que al fin existía una conexión suficientemente potente en lo que a subida de archivos se refería.

2.6.6. LTE (Long Term Evolution) 4G

La tecnología 4G, también llamada LET, es la más veloz desarrollada hasta la fecha. Pero todavía no es una realidad global y no todos los terminales ni todas las tarjetas SIM son compatibles con ella.

2.6.7. NSA (Non Standalone) 5G

La macroevolución que promete el 5G para nuestras vidas es realmente impresionante. En España ya hay bastantes zonas que tienen esta nueva tecnología de red inalámbrica, pero lo cierto es que su implantación definitiva aún llevará tiempo, ya que el 5G verdaderamente real, aún está en camino.

2.7. Localización GPS/GSM

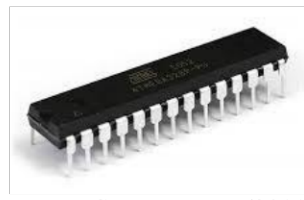
Es un dispositivo que utiliza tecnología GPS o localización por GSM para obtener su posición, esta posición luego puede ser enviada a almacenada de forma local, permitiendo conocer la posición de un objeto o persona en todo momento. Actualmente existe diferentes dispositivos de localización tanto para control de flotas, vehículos y para controlar la posición de persona.

2.8. DISPOSIVIVOS

2.8.1. GPS NEO 6M.

Es un módulo receptor empleado en todo aquello que demande una aplicación de geolocalización, contiene una antena de alta potencia con memoria EEPROM, que es una memoria que permite almacenar variables de forma permanente, y una batería que respalda la configuración del módulo, permitiéndole recibir señales de los satélites que están próximos a la tierra.

Figura 4.
memoria EEPROM



Fuente: Sousa y otros (2011)

El GPS NEO6M es excelente en proyectos de vehículos autónomos como aviones, quadcopters, helicópteros, robots móviles y drones en su aplicación que requieran geolocalización. Es compatible con Arduino, PIC, AVR, Raspberry y otros microcontroladores del mercado, se puede entregar información de manera precisa, así como ser configurado mediante el puerto UART (UNIT Electronics, 2021).

Figura 5.

Especificaciones y características.

Especificaciones	Características
Modelo	GY-NEO6M
Dimensiones antena	25 mm * 25 mm; de módulo: 36 mm * 25.9 mm
Voltaje de alimentación mínimo	3.3 V; de alimentación máximo: 5 V
Corriente de funcionamiento	45 mA.
Comunicación	UART
Velocidad de comunicación	9600 bps
Memoria	EEPROM
Interface	TTL serial
Indicador de señal	LED

Pines de módulo	VCC, RX, TX y GND
Sistema de coordenadas	WGS-84
Sensibilidad de captura	-148 dBm
De rastreo	-161 dBm
Máxima altura medible	18000
Máxima velocidad	515 m/s
Exactitud	1 micro segundo
Frecuencia receptora	L1 (1575.42 MHz)
Código C/A	1.023 MHz
Tiempo de conexión por primera vez	Mínimo 5 min o hasta casi 10 min
Tiempo de conexión por segunda vez	Mínimo 40 segundos o hasta 1 minuto
Led indicador	Sí, cuando reciba señal y mande datos de los satélites por medio de la antena el led prenderá de lo contrario estará apagado.

Fuente: UNIT Electronics (2021)

El módulo GPS puede implementarse utilizando un módulo basado en el microchip Neo 6M V2, dicho dispositivo viene acondicionado para recibir voltajes de 5V permitiendo facilitar y reducir el hardware necesario para conectarlo con el microcontrolador (Pérez & Moreno, 2020).

Figura 6. Modulo GPS



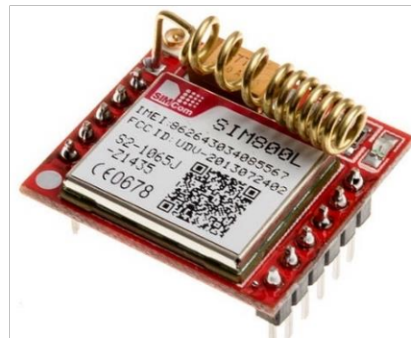
Fuente: UNIT Electronics (2021)

2.8.2. Módulo SIM800L

Es un dispositivo GSM y GPRS de 4 bandas, se puede usar en proyectos de comunicación y control remoto inalámbrico ya sea para enviar y recibir mensajes SMS y llamadas, o tener una red de datos móviles e internet a través de GPRS. Este módulo dispone de un zócalo para conectar un micro SIM y pines de comunicación UART como medio de comunicación portátil. Se puede conectar cualquier proyecto a una red celular y enviar mensajes de texto, datos y llamadas, para el caso de estudio se requiere un chip 2G para poder conectarse a cualquier red mundial GSM.

De igual manera, se puede emplear para enviar alertas de equipos remotos, sistemas de seguridad caseros, enviar datos de telemetría, aplicaciones M2M, automatización industrial, proyectos BMS, domótica, IOT, transporte público, seguimiento personal, detección de entornos eléctricos, POS inalámbrico, medición inteligente y otras aplicaciones. En cuanto a su funcionamiento se requiere un microcontrolador al configurarlo, es compatible con las placas de desarrollo de Arduino así como con un microcontrolador de 5V que cuente con interfaz de comunicación UART ya que por los puertos de TX y RX puede enviar y recibir comandos AT (UNIT Electronics, 2021).

Figura 7. Módulo GPS



Fuente: techmartgh.com

2.8.3. Módulo GPS con Arduino.

El módulo GPS del GY-GPS6MV2 incluye un módulo serie U-Blox NEO 6M montado en PCB, una EEPROM preconfigurada, una batería de tipo botón para guardar los datos de configuración en la EEPROM, un indicador LED y una antena de cerámica. Además, cuenta con conectores Vcc, Rx, Tx y Gnd al microcontrolador a través de una interfaz serial; Si el módulo GPS funciona correctamente, se recomienda que realice la

prueba en un entorno abierto o cerca de una ventana para obtener una recepción de señal adecuada.

Figura 8. SIM800L-AT-Arduino-Uno-Conexión

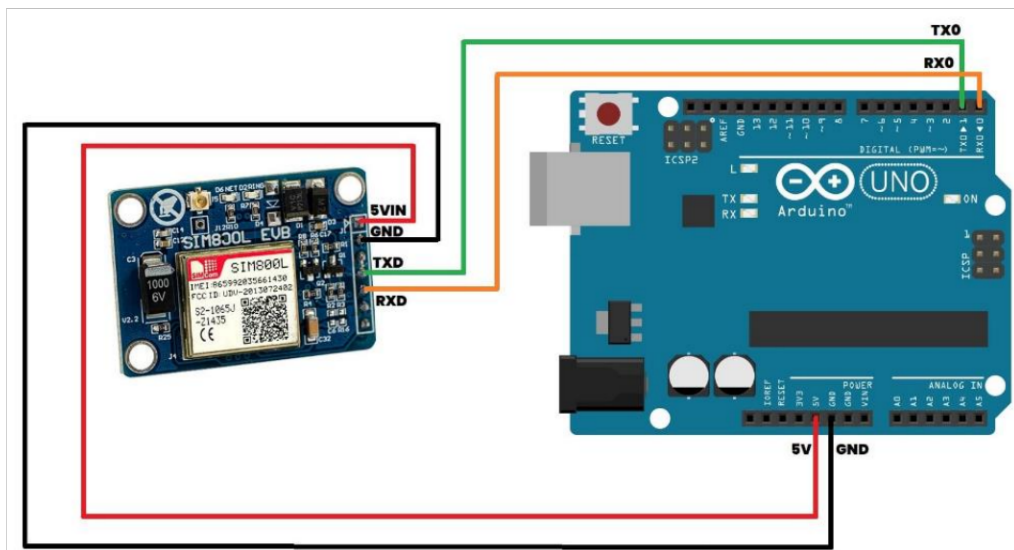
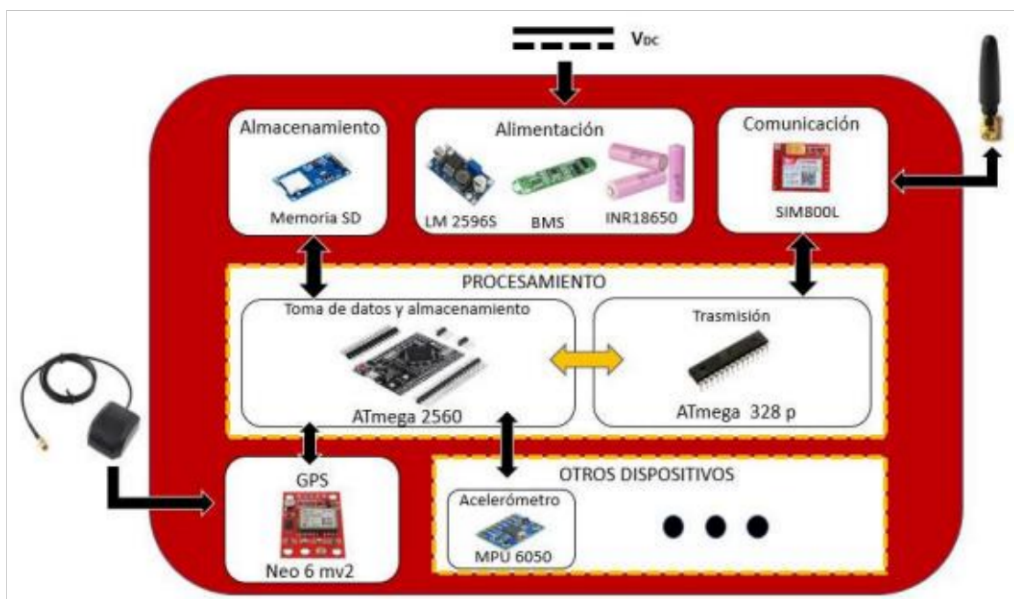


Figura 9. Procesamiento de Datos



2.9. Fatiga estructural.

La fatiga es un proceso progresivo, en el que los daños en la estructura se acumulan lentamente en las primeras etapas y se aceleran rápidamente hasta la falla o fractura, a través de una evolución en reducción de resistencia local produciendo micro fisuras que pueden

propagarse independientemente, hasta que algunas de ellas se fusionan entre sí comenzando a interactuar y combinarse mutuamente formando una superficie de falla. (Maldonado, 2016).

De igual manera, ante una carga estable la fisura crecerá lenta y progresivamente, iniciando un proceso de aceleración prácticamente irreversible cuando se pierde sección transversal en el elemento ya que aumenta el campo local de tensiones cerca de la fisura.

Por otro lado, el estado último de falla se producirá mediante una rotura inestable cuando el área restante no sea suficiente para soportar la carga, donde el daño resultante de la aplicación de esfuerzos repetitivos puede ocasionar grietas incluso muy por debajo del límite de fluencia del material. Por consiguiente, es un proceso en el que un material sufre cambios estructurales continuos, incrementales y locales en puntos específicos donde está sujeto a tensiones y deformaciones variables. De acuerdo a Cuesta (2021) suelen derivarse en una rotura producida “súbitamente después de que la fisura generada haya crecido hasta alcanzar unas dimensiones tales que la sección remanente no es capaz de soportar los esfuerzos requeridos” situación que puede ocasionar graves incidentes materiales, personales y medioambientales.

Al respecto, se identifican tres etapas en la falla por fatiga del material, primeramente se da la Iniciación, donde comienzan a aparecer microfisuras en un material, generalmente alrededor de alguna fuente de concentración de tensión o en una superficie externa con un gran cambio en la resistencia a la tracción y ocurre cuando la superficie de falla está formada y las deformaciones plásticas se acumulan en una superficie libre como resultado de los movimientos de dislocación, este estado puede ocurrir incluso mucho antes de llegar al límite plástico del material como defectos lineales en la estructura que pueden multiplicarse bajo la tensión tangencial, ocasionando una deformación permanente, la cantidad de deformación es mayor en una superficie libre que en el interior de materiales cristalinos debido a la ausencia de la contención de las juntas inter granulares.

Seguidamente, se presenta la Propagación y Ensanchamiento, En esta etapa, algunas grietas comienzan a ensancharse bajo carga; En este punto, la dirección de las grietas se vuelve perpendicular a la tensión principal, haciéndose visibles. (Maldonado 2006) señala que existe cohesión entre las capas de la banda de deslizamiento, provocando una pérdida en sección transversal por la oxidación de las superficies recientes y por el endurecimiento del material deformado, generando la formación de intrusiones o micro-fisuras las cuales pueden

propagarse a lo largo de los planos de deslizamiento, un proceso promovido por la tensión tangencial este proceso se extiende por unos pocos granos.

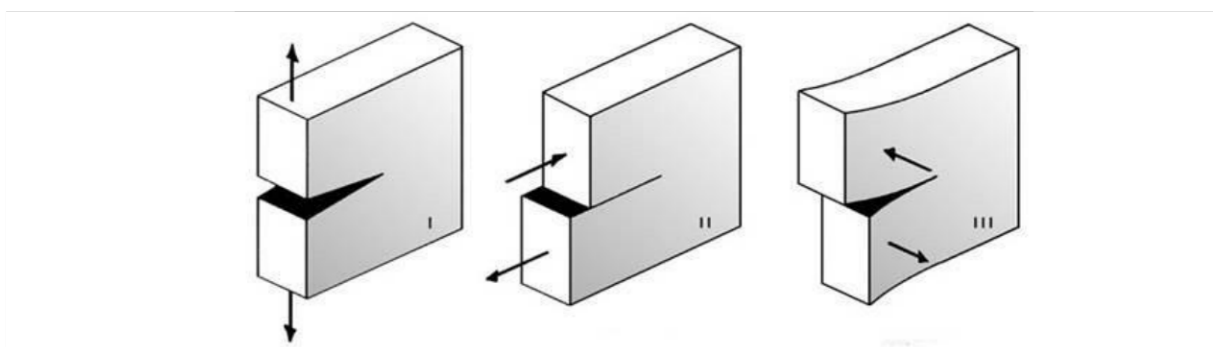
Finalmente, surge la Rotura o Propagación Final, etapa donde el recorrido de la fisura es ahora esencialmente perpendicular al eje de tracción de tensión, a pesar que su avance sigue influenciado por la orientación de los granos formando un zigzag a lo largo del plano de deslizamiento; en tales circunstancias, la fisura final se produce porque la pieza no puede soportar la tensión aplicada y la fisura ha experimentado un crecimiento inestable y ha crecido hasta el punto en que la sección transversal neta del material no puede soportar la carga total.

Por consiguiente, en los puentes de acero estructural, las grietas o fisuras son las principales consecuencias de la fatiga; las cuales, se manifiestan de 3 modos, apertura o modo I, deslizamiento o modo II y desgarro o modo III:

En el Modo I, el agrietamiento se caracteriza por esfuerzos y desplazamientos normales a las superficies de grietas. Los esfuerzos cortantes en el plano con los desplazamientos de fisura asociados en el plano de la fisura, y perpendiculares al borde de ataque de la fisura, producen fisuración de Modo II. El agrietamiento de Modo III es causado por cortante fuera del plano con desplazamientos también en el plano de la grieta, pero paralelos al frente de la grieta (McMullin, 2016).

Técnicamente el más importante y donde las discusiones se centran es generalmente el Modo I de fractura, siendo el menos frecuente el Modo II, el cual se produce cuando se tienen grietas sobre planos que forman ángulos de 90° ; finalmente, el último el Modo III se genera en barras con grietas las cuales están sometidas por lo general a esfuerzos de torsión, como se presenta en la figura 23.

Figura 10. Modos de Agrietamiento en Acero Estructural



Fuente: Wikipedia (2022)

En resumen, las pruebas de fatiga son muy importantes en la ingeniería civil y de vital relevancia en el diseño y la construcción de puentes, que al estar sometidos a cargas de tipo dinámico, tales como el volumen del tráfico, el tráfico de vehículos pesados y de maquinarias, las vibraciones inducidas por factores climatológicos: el viento, el oleaje, la crecida de los ríos, los sismos, entre otros, pueden provocar un desplazamiento del puente y; por consiguiente, grietas causadas por agrietamiento en lugares donde se concentra la tensión, deformaciones en la estructura, discontinuidades de superficies y rotura del pavimento, entre las consecuencias más destacadas.

Por tanto, las comprobaciones relativas a la seguridad estructural obligarán de acuerdo a lo planteado por Cuesta (2021) a verificar constantemente el correcto comportamiento de la estructura de los puentes frente a las mencionadas y continuas acciones dinámicas, garantizando que no se desarrollan estas grietas que lleven al fallo tanto de sus elementos como de la estructura, y en caso de presentarse, ubicarlas y aplicar todos los correctivos necesarios para solventar tan peligrosa situación.

3. CAPÍTULO III

MODELO FÍSICO DEL PROTOTIPO CON SISTEMA GPS-GSM Y COMPARACIÓN CON SISTEMA GNSS

3.1. Sistemas GPS – GSM

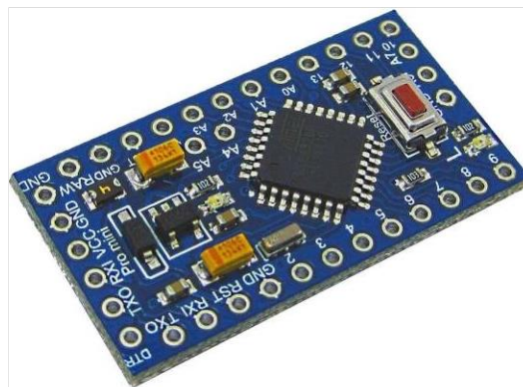
3.1.1. Digitalizador.

Arduino Pro Mini.

En las especificaciones de Arduino (2021) se define como un tablero desarrollado para las aplicaciones e instalaciones, donde el espacio es premium y los proyectos se ejecutan como montajes permanentes. El Arduino Pro Mini es una placa de microcontrolador asentada en el ATmega328P, tiene 14 pines de E/S digital (6 pines se pueden usar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un resonador integrado, un botón de reinicio y orificios para ajustar los encabezados de los pines. (Arduino, 2021)

Fue diseñado y fabricado por SparkFun Electronics para la instalación semipermanente en objetos y exposiciones, la placa aparece sin cabezales premontados, de tal forma, que admite el uso de diferentes tipos de conectores y soldadura directa de cables. El diseño de los pines es factible con Arduino Mini. Se tienen 2 versiones del Pro Mini, uno funciona a 3.3 V y 8 MHz, el otro a 5 V y 16 MHz alimentado por ATmega328P (Arduino, 2021).

Figura 11. Placa Arduino Pro Mini



Fuente: Geek Factory (2021)

Tabla 2.

Especificaciones Técnicas

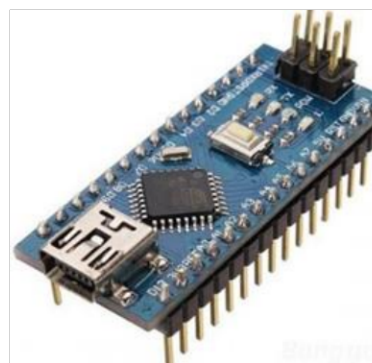
Microcontrolador	ATmega328P
Fuente de alimentación de la placa	3,35-12 V (modelo de 3,3 V) o 5-12 V (modelo de 5 V)
Voltaje de funcionamiento del circuito	3.3 V o 5 V (según modelo)
Pines de E / S digitales	14
Pines PWM	6
UART	1
SPI	1
I2C	1
Pines de entrada analógica	6
Interrupciones externas	2
Corriente CC por pin de E / S	40 mA.
Memoria flash	32kb: 2kb utiliza el gestor de arranque
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Velocidad de reloj	8 MHz (versiones de 3,3 V) o 16 MHz (versiones de 5 V)

Fuente: Arduino (2021)

3.1.2. Arduino Nano.

Es una versión de placa de desarrollo Arduino, contiene una gran cantidad de posibilidades para ejecutar el proyecto, tiene similitudes con otras placas de compatibilidad Arduino. Es una versión inapreciable del Arduino 1. La placa Arduino nano es compatible con todo tipo de dispositivos electrónicos, se puede utilizar el software Arduino IDE que se emplea para el resto de placas.

Figura 12. Placa Arduino Nano



Fuente: Altronics (2021)

3.1.3. Sistema de posicionamiento.

Módulo GPS NEO-6M.

El GPS NEO-6M para Arduino con ranura, funciona con la tarjeta microSD y una antena activa. Es una alternativa de costo beneficio y una excelente precisión, el tamaño del módulo es reducido, ya que es fácil y portable para el proyecto. Se comunica mediante un puerto serial UART, el cual se puede manejar en cualquier plataforma como Arduino, RaspberryPi, pcDuino y Laptop. Mide parámetros como latitud, longitud, velocidad, altitud, hora, fecha y numero de satélites en uso.

La precisión que en posición es de 2.5m, en velocidad 0,1m/s y en orientación 0.5°, valores más que aceptables para un sistema de posicionamiento GPS.

Figura 3. Módulo GPS Neo -6M



Fuente: AV Electronics (2021)

Entre sus especificaciones se tiene:

Tabla 3.

Especificaciones

Dimensiones	Especificaciones
Receptor	50 canales
Tiempo hasta la primera reparación: arranque en frío o en caliente	27 segundos arranque en caliente: 1 segundo
Sensibilidad	
Seguimiento y navegación	161 dBm
Readquisición	160 dBm
Arranque en frío (sin ayuda)	147 dBm
Arranque en caliente	156 dBm
Velocidad máxima de actualización	1 Hz

Precisión de posición horizontal	2,5 m
Precisión de velocidad	0,1 m / s
Precisión de rumbo	0,5 grados
P recisión de rumbo	0,5 grados
Límites operacionales	
Dinámica	<= 4g
Altitud	50000 m
Velocidad	500 m / s

Fuente: Electrobres (2019)

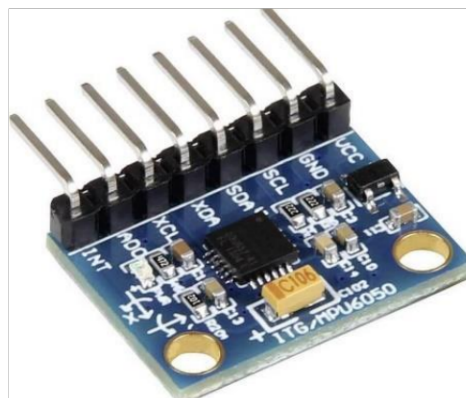
3.1.4. Sensor

Módulo MPU6050.

Es el primer dispositivo de seguimiento del movimiento del eje si x del mundo, que está formado por un acelerómetro y un giroscopio de tres ejes. La estructura del MPU6050 se puede dividir simplemente en cinco capas: paquete (Quad Flat No-lead, QFN-24), capa de tapa, capa de sensor, circuito integrado específico de la aplicación (ASIC) y marco de plomo. Tiene como ventaja la simulación de campo metafísico, ya que se puede dividir en cuatro pasos: desmontar MPU6050, establecimiento del modelo geométrico, formar el modelo de elementos finitos y realizar la simulación de acoplamiento.

Al momento de la ejecución del módulo puede haber un desnivel en sus componentes una vez instalado, por lo cual es necesario calibrar el módulo asegurando que no haya error de desnivel agregado en cada componente. Durante la calibración se debe mantener estático el sensor en la posición de trabajo, entonces el programa empieza a leer los offset y nos pide que enviemos un carácter por el puerto serie, esta calibración se lo hace una vez.

Figura 15. Módulo MPU6050



Fuente: AranaCorp (2021)

Tabla 4. Propiedades Físicas de MPU6050

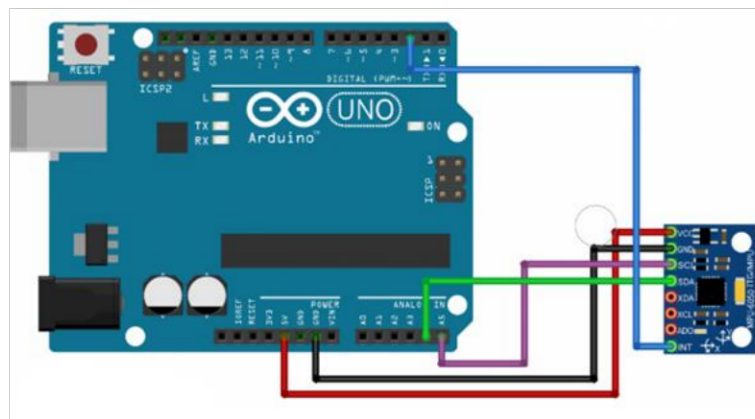
Estructura	Material	Propiedad (Unidad)	Valor
Paquete	Resina epóxica	Densidad: ρ_1 (kg/m ³)	980
		Módulo de young: E1 (GPa)	2,89
		Relación de poisson: ν_1	0,40
Acelerómetro	Silicio	Densidad: ρ_2 (kg /m ³)	2330
ASIC con tapa		Módulo de Young: E2 (GPa)	150
MEMS		Relación de poisson: ν_2	0,22
Marco del plomo	Aleación 42	Densidad: ρ_3 (kg /m ³)	8150
		Módulo de young: E3 (GPa)	145
		Relación de poisson: ν_3	0,30

Fuente: Yunfan, y otros (2019)

3.1.5. Esquema de conexión.

El MPU6050 viene con interface I2C por lo que la conexión es trivial y poderlo hacer de esta manera.

Figura 16. Módulo MPU6050



Fuente: Prometec (2022)

3.1.6. Adquisición De Datos.

Módulo SIM800L V2.2 GSM/GPRS.

Es un modelo de telefonía móvil GSM/GPRS Quad-Band versión 2, y trabaja en las bandas de 850, 900, 1800 y 1900 MHz. Es un dispositivo pequeño que actúa para agregar funciones GSM como llamada de voz, mensajes y datos a los proyectos con Arduino. Fundamentalmente es conectar un celular al proyecto, por lo tanto, se debe manipular una SIM CARD de 4G.

Figura 17. Módulo SIM800L V2.2 GSM/GPRS



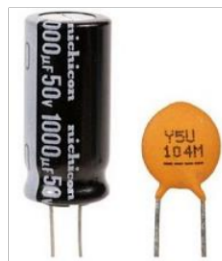
Fuente: Compel electrónica (2022)

3.1.7. Dispositivos Para El Circuito Eléctrico

Condensadores.

Se caracteriza por ser la parte latente que se utiliza para almacenar la energía eléctrica, está formado por dos transmisores que están aislados por el material dieléctrico, las cuales son placas que pueden acumular cargas. Una placa es para carga positiva mientras que la otra es para carga negativa. El condensador es utilizado para mantenerlo constante y estable el volteje al momento que el volteje requerido oscile.

Figura 48. Condensadores



Fuente: Notatecnologica (2022)

3.1.8. Resistencia.

Es una medición de la oposición al flujo de corriente eléctrica. Se considera que los electrones que fluyen a través de un cable son análogos a las esferas que ruedan por una rampa, la resistencia es lo que sucedería si se colocaran obstrucciones en la rampa, lo que haría que el flujo de las esferas se ralentizara a medida que transfieren parte de su energía a las obstrucciones. La unidad de medida es el ohmio (Ω) para medir la dificultad que presenta un conductor al paso de la corriente eléctrica.

Figura 19. Resistencia

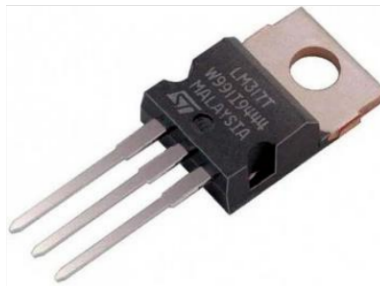


Fuente: deresistencias (2022)

3.1.9. Regulador de voltaje lineal.

El regulador de voltaje se compone de materiales ignífugos, diodos y resistentes a altas temperaturas para mayor seguridad y durabilidad. El regulador está completamente aislado, para garantizar una alta fiabilidad en condiciones ambientales ásperas (alta humedad, polvo, sal, vibración) y fuertes vibraciones.

Figura 20. Regulador De Voltaje Lineal



Fuente: Maxitec (2022)

Tabla 5.

Características Regulador de Voltaje

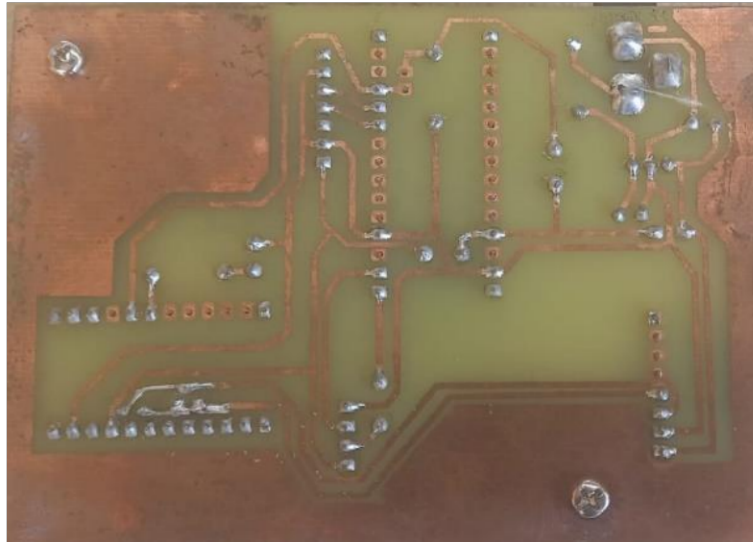
Voltaje de Entrada	8 – 36 V
Voltaje de Salida	1.25 – 32 V
Corriente de Salida	0 – 5 A
Potencia de Salida	75 W
Eficacia de conversión	96%
Temperatura de Funcionamiento	-40 a +85 °C
Dimensiones	54 x 23 x 15 mm (largo*ancho*alto)
Conexión	Soldadura

Fuente: adaptado de Cadena (2021)

3.1.10. Placa Electrónica.

Se realizó la impresión de la placa con la finalidad de hacer el circuito más eficiente, esta placa es una superficie constituida por caminos que conecta componentes electrónicos y es el componente básico para hacer el proyecto.

Figura 21. Placa Electrónica



Fuente: Elaboración propia

3.1.11. Sistema De Alimentación.

Baterías de litio 18650 de 4.2V.

Para realizar el proyecto se utilizó una porta pilas con dos baterías de litio de 18650 en serie para así obtener 7.4-8.4 V. Estas baterías son recargables y son muy útiles a largo plazo.

Figura 22. Porta Pilas

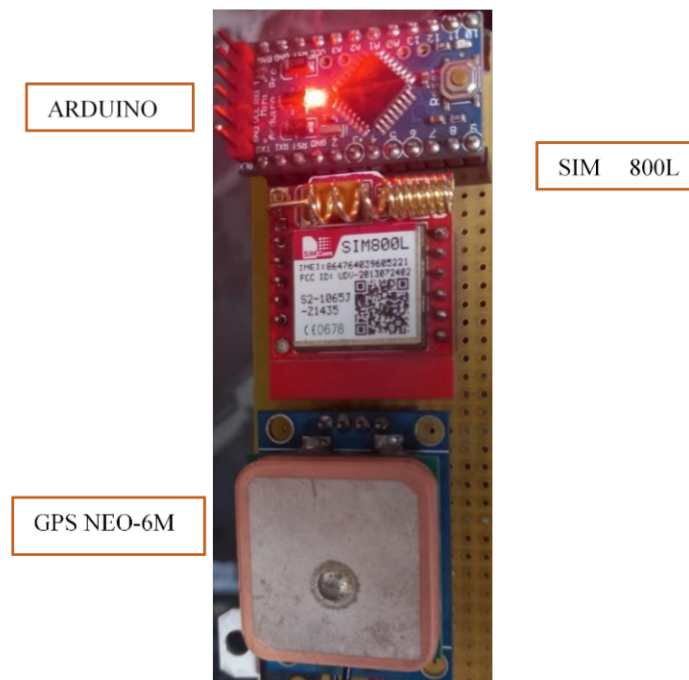


Fuente: Elaboración propia

3.1.12. Funcionamiento del primer prototipo.

En el primer prototipo se trabajó con un Módulo GPS NEO-6M, un sim 800L normal y un Arduino Pro mini. El módulo SIM 800L y el módulo GPS está conectado al Arduino Pro mini que es un microcontrolador de 3-5V que envía y recibe comandos al mismo. Al momento de hacer las pruebas de la placa, es necesario situarlo en un contexto abierto o cerca a la ventana, y así el módulo GPS funcione perfectamente para una adecuada recepción de la señal. Para hacer él envío de datos, el módulo es manual en este caso, se necesita que el envío de datos se automático al momento de sucintar un movimiento. El Módulo SIM 800L no tenía la posibilidad de enviar datos ya que el módulo mencionado anteriormente no tiene la capacidad de chip SIM 4G.

Figura 23. Primer Prototipo



Fuente: Elaboración propia

3.1.13. Funcionamiento Del Segundo Prototipo

El segundo prototipo se utiliza el módulo MPU 6050 como módulo de alerta al suscitarse un movimiento que está conectado al Arduino Pro Mini y este módulo sirve para poder enviar mensaje automáticamente. Para poder saber si el MPU 6050 está en funcionamiento se le coloco un foco led de alerta que al momento del movimiento se encienda. Se implementa el módulo SIM 800L V2.2 que tiene la capacidad de insertar un

SIM CARD 4G y el módulo GPS que están conectados a un Arduino Nano que es un microcontrolador que envía y recibe comandos al mismo.

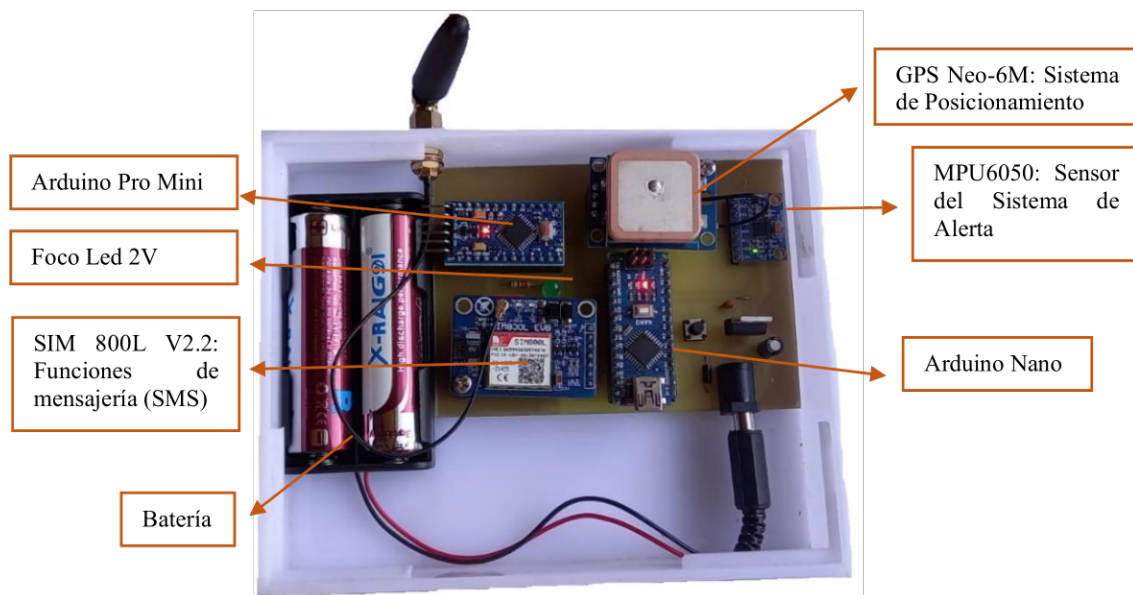
Se recomienda que para hacer las pruebas se lo debe hacer a cielo abierto para poder tener una mejor recepción de señal. Para saber que el módulo GPS esté en funcionamiento se debe esperar que se encienda la luz roja y este titilando.

El sistema trabaja con el módulo MPU 6050 que es un sensor que al momento de suscitarse el movimiento envía información al sim 800L V2.2 este módulo registrar el dato y envía un mensaje (SMS) con posicionamiento (coordenadas) al teléfono móvil.

Al momento de la programación se debe ingresar el número del teléfono celular al Modulo SIM 800L V2.2 al que se va enviar el mensaje para así poder observar la ubicación.

El mensaje que llegará al teléfono celular será con posicionamiento y dirección a Google Maps.

Figura 24. Segundo Prototipo



Fuente: Elaboración propia

3.2. SISTEMA GNSS.

La precisión, la continuidad y la fiabilidad son factores clave de las antenas GNSS, ya que dependen de la fuerza de la antena y de su aplicación, por lo tanto, se deben entender los parámetros clave para localizar la antena que coincida correctamente con sus requerimientos. Se consideran 4 factores al seleccionar una antena GNSS, como la región/frecuencia, tamaño,

material - forma y ubicación de la antena. Cada satélite GNSS emite a una frecuencia particular dentro de la banda, estableciendo el número de canal de frecuencia del satélite y permitiendo que los receptores de los usuarios equilibren los satélites.

La frecuencia real de la transmisión de señal de GNSS en G_1 y G_2 puede proceder del número de canal k aplicando las siguientes expresiones:

$$G1 = 1602 + k \times 9/16 = (2848 + k) \times 9/16 \text{ MHz}$$

$$G2 = 1246 + k \times 7/16 = (2848 + k) \times 7/16 \text{ MHz}$$

Dos códigos de rango, el C/A de adquisición aproximada siendo el código civil abierto y el código P militar preciso, se modulan en estas frecuencias conjuntamente con un mensaje de navegación. Los códigos C/A y P tienen periodos de 1ms y 1s, anchos de banda de 586.7 y 58.67 m, equitativamente, y son aproximadamente 2 veces más ruidosos que los de GPS (Vazquez, 2019).

Existe una gran variedad de tipologías de antenas para aplicaciones de GNSS, que, de acuerdo a las bandas a cubrir, componentes y constelaciones soportadas, se clasifican en 3 grupos:

- Antena Parche: es muy común, de forma plana, montada con un dieléctrico cerámico de elevada constante dieléctrica y una geometría de antena rectangular en su parte superior. Se instala en superficies planas y de bajo costo. Adquiere altas prestaciones con un diagrama de radiación directivo con el máximo de radiación en el zenith. Alcanza una ganancia de 5dB y valores de *Axial Ratio* menores a 3dB en la dirección del máximo.
- Antena Hélice: su tamaño geométrico va depender del dieléctrico, llenando el espacio entre las partes activas de la antena y sus hélices. Se consigue prestaciones en ganancia y axial ratio equivalentes a una antena parche, con ventajas en el ancho de banda y el ancho de haz del diagrama de radiación. Es autónomo de las dimensiones del plano de masa donde está emplazada.
- Antena Chip: son notables en los diseños de GNSS por su bajo costo y tamaño considerablemente pequeño hasta 3.2*1.6*1.1 mm. Sus componentes son una antena en polarización lineal (AR infinito), conllevando que tengan una pérdida de 3dB en ganancia en relación a las antenas helicoidales y parche. Los patrones de radiación al ser emplazados en forma directa en el plano del circuito impreso, son

omnidireccionales, donde la antena no sólo radia hacia el zenith sino también exterioriza radiación hacia el suelo (Leedeo Engineering, 2019).

EU Space Programme (2021) señala que el rendimiento de GNSS se evalúa empleando 4 criterios:

- Precisión: la discrepancia entre la posición, la velocidad y el tiempo medido y real de un receptor;
- Integridad: la capacidad de un sistema para suministrar un umbral de confianza y, en caso de una incoherencia en los datos de posicionamiento, una alarma;
- Continuidad: la extensión de un sistema para trabajar sin interrupciones;
- Disponibilidad: el porcentaje de tiempo que una señal cumple en función de las razones de precisión, integridad y continuidad.

3.2.1. Componentes del sistema GNSS.

Consta de tres tecnologías de satélite principales GPS, Glonass y Galileo, conformados por 3 segmentos: (a) espacial (b) de control y (c) de usuario; son casi similares en las tres tecnologías satelitales que en conjunto hacen el GNSS. Actualmente, la tecnología satelital completa es la GPS y la mayor parte de las aplicaciones existentes a nivel mundial están relacionadas con la misma. La tecnología GNSS se torna más clara después de la operación de Galileo y la reconstrucción de Glonass en los próximos años.

- Componentes Satélite GPS:

Segmento espacial: consiste en los satélites GPS; los vehículos espaciales (SV) envían señales de radio desde el espacio.

Segmento de control: consiste en un sistema de estaciones de seguimiento situadas en todo el mundo. La instalación de Master Control está ubicada en Schriever Air Force Base (anteriormente Falcón AFB) en el estado de Colorado, EE. UU. Segmento de usuarios: conformado por los receptores de GPS y la comunidad de usuarios. Los receptores GPS convierten las señales de los vehículos espaciales (SV) en estimaciones de posición, velocidad y tiempo (Nicopolitidis, 2015).

- Componentes Glonass:

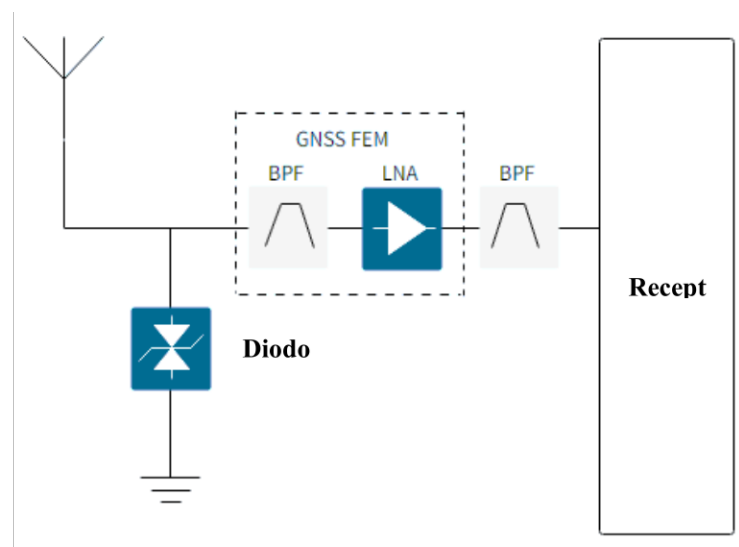
Segmento espacial: está formado por 24 satélites, distribuidos equitativamente en tres órbitas separadas por 120° en el plano ecuatorial. La altitud orbital del satélite es de unos 19.130 km sobre la superficie del suelo (Nicopolitidis, 2015).

- Componentes Galileo:

Segmento espacial: consta de 30 órbitas terrestres medias (MEO) satélites (27 y 3 satélites de reserva activos), distribuidos uniforme y regularmente en tres planos orbitales. La altitud proyectada es ligeramente mayor que para el GPS 23,616 km y la inclinación es de 56° .

Segmento de tierra: se encarga de gestionar la constelación de navegación, satélites, controlando las situaciones básicas de la misión de navegación, como la determinación de la órbita de satélites y sincronización de reloj, determinación y difusión así como la información de integridad y las alertas de advertencia dentro de los requisitos de tiempo de alarma a nivel mundial nivel (Nicopolitidis, 2015).

Figura 25. Diagrama Del Sistema GNSS



Fuente: Nicopolitidis (2015).

3.3. Comparación de los sistemas GPS – GNSS

El GPS y GNSS están relacionados porque uno es parte del otro. A nivel técnico, GNSS se gestiona junto con un sistema GPS en el que el receptor GNSS es compatible con GPS, pero el receptor GPS no es totalmente compatible con GNSS. Entonces un receptor GPS es una máquina que solo funciona con señales GPS, si funcionan con diferentes sistemas

se le llama receptor GNSS. Actualmente se prefiere el uso de receptores multifrecuencia por su capacidad de procesar señales de sistemas GPS y GLONASS (Topo Servis, 2021).

Constan de tres partes, y aunque cada una tiene un diseño diferente, tienen algunas similitudes:

- Segmento espacial: Constelación de satélites GLONASS. Inicialmente, se propuso una constelación de 24 satélites.
- Sección de control: Los puntos de control se encuentran en Rusia.
- Segmentación de usuarios. Se puede considerar una cuarta parte, el complejo de lanzamiento espacial.

Proporcionan dos tipos de servicios: señales de precisión estándar (conocidas como CSA) y señales de precisión (CHA). La señal estándar ya está disponible para el civil, por lo que puede usarse después de que todo el sistema esté completo, la señal también se transmite en la banda L1, puede alcanzar una posición horizontal con una precisión de 57 a 70 metros, es decir, con una probabilidad del 99,7%, la posición vertical con una precisión de 70 metros, también con una probabilidad del 99,7% (Solís, 2019).

Al analizar críticamente diferentes tipos de sistemas GPS y GNSS, dan una idea de los factores que intervienen en la investigación del GPS. A modo de comparación, las características clave de ambos están muy detalladas.

Tabla 6.
Comparación Segmento Espacial

	GPS	GNSS
Satélites	30	24 (21+3 de repuesto)
Altitud	20200 km	19100 km
Periodo	11 h 56 min	11 h 15 min
Inclinación	55°	64.8°
Planos	6	3
Satélites/plano	Hasta 6	Hasta 8 (7 y 1 de repuesto)

Fuente: Adaptado de Solis (2019)

Tabla 7.

Comparación Segmento de Control

	GPS	GNSS
Estación Maestra	Base Falcon US Air Force	System Control Center
Estación Monitora	5 estaciones monitoras distribuidas en todo el planeta	5 estaciones monitoras repartidas en territorio ruso
Antenas de transmisión	3 repartidas en las estaciones monitoras (TT/Clinks)	5 antenas distribuidas en Mission Up – Links (TT/Clinks)

Fuente: Adaptado de Solís (2019)

Tabla 8

Comparación de Prestaciones

	GPS		GNSS	
Cobertura	Global	Local	Global	Local
Precisión Horizontal y vertical	H < 20 m V < 20 m	Sistema de aumento H < 1 m V < 1 m	H < 50 m V < 70 m	Similar al GPS
Disponibilidad	95%	95-99.7%	99.7%	99.7%
Integridad	No	Si	No	Si

Fuente: Adaptado de Solís (2019)

Tabla 9.

Comparativa De Frecuencias

	GPS	GNSS
Frecuencias (MHz)	L5: 1164 - 1188 L2: 1216 - 1240 L1: 1563 - 1587	L2: 1240 - 1254 L 1: 1593 - 1610
Servicios	L5: SoL L2: SPS/PPS L1: SPS/PPS	L2: CSA/CHA L1: CSA/CHA

Fuente: Adaptado de Pérez (2019)

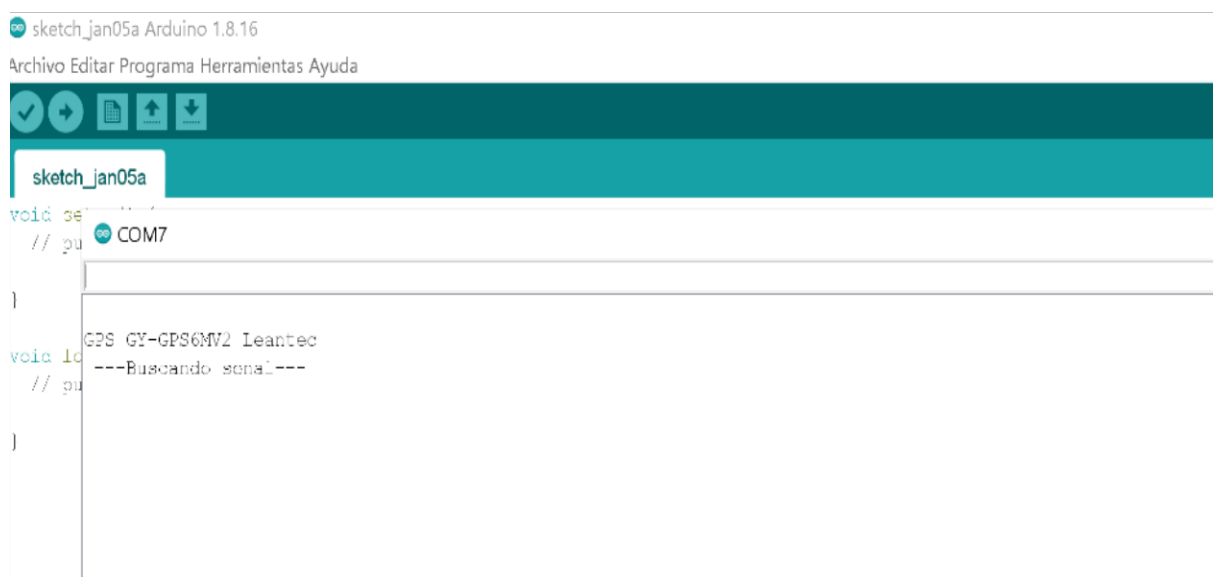
3.4. Metodología

3.4.1. Prototipo GSM/GPRS

3.4.1.1. Obtención de datos.

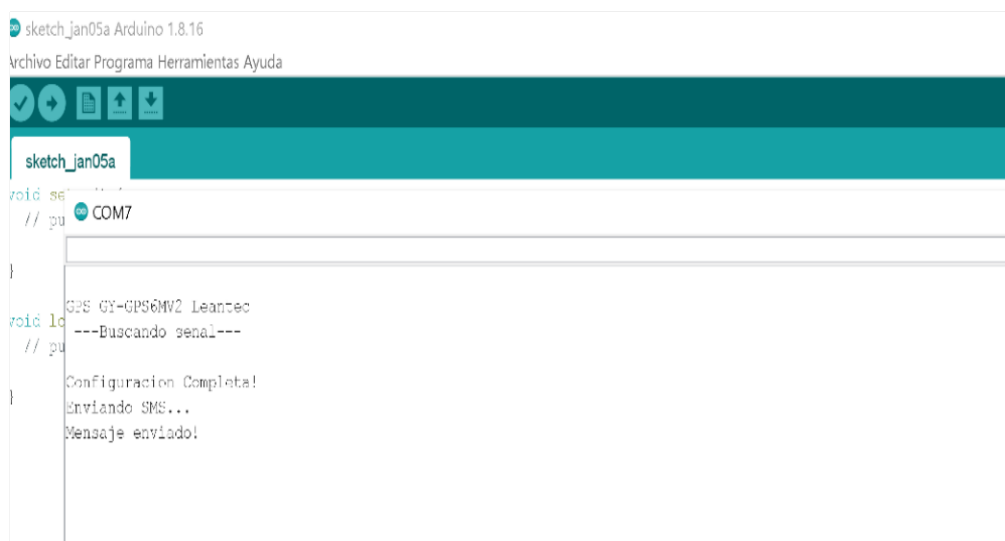
- Para poder comprobar si la señal del GPS es correcta, se puede revisar mediante una computadora empleando para ello un cable USB, que conecta al prototipo con el equipo, permitiendo la revisión a través de un software de interfaz amigable y sencilla, como se presenta en la figura 26.

Figura 26. Comprobación De Señal GPS



Fuente: Elaboración propia

Figura 27. Comprobación De Mensajería (SMS)



Fuente: Elaboración propia

- Una vez que el GPS Neo 6M permita obtener la señal, es posible acceder a los datos de posicionamiento, mostrando latitud y longitud, fecha y número de satélites, como se presenta en la figura 28.

Figura 28. Recepción De Señal Del GPS

```

sketch_jan05a Arduino 1.8.16
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
sketch_jan05a
void se
// pu COM7
}
Latitud/Longitud: -2.859010,-79.002563
Fecha: 5/1/2022 Hora: 20:50:58.0
// pu
Altitud (metros): 2682.40
Rumbo (grados): 0.00
Velocidad(kmph): 0.13
}
Satelites: 5

Latitud/Longitud: -2.859008,-79.002563
Fecha: 5/1/2022 Hora: 20:50:59.0
Altitud (metros): 2682.40
Rumbo (grados): 0.00
Velocidad(kmph): 0.17
Satelites: 5

Latitud/Longitud: -2.859008,-79.002563
Fecha: 5/1/2022 Hora: 20:51:0.0
Altitud (metros): 2682.40
Rumbo (grados): 0.00
Velocidad(kmph): 0.30
Satelites: 5

Latitud/Longitud: -2.859008,-79.002563
Fecha: 5/1/2022 Hora: 20:51:1.0
Altitud (metros): 2682.40
Rumbo (grados): 0.00
Velocidad(kmph): 0.26
Satelites: 5

 Autoscroll  Mostrar marca temporal

```

Fuente: Elaboración propia

- Al momento que el prototipo registre un movimiento, enviará el mensaje al teléfono móvil que ha sido programado para tal efecto. Su precisión está en +- 5 cm al momento de suscitarse el movimiento como lo muestra la figura 29.

Figura 29. Envío De Mensaje

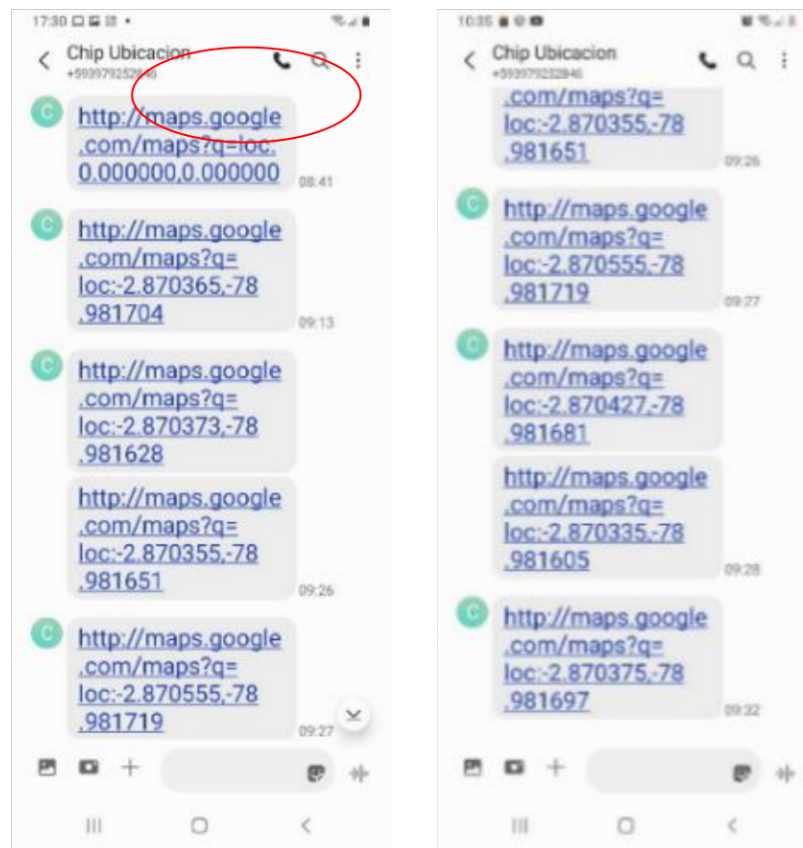
```
sketch_jan05a Arduino 1.8.16
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
sketch_jan05a
void se
// pu COM7
}
Altitud (metros): 2682.40
Rumbo (grados): 0.00
Velocidad(kmph): 0.06
Satelites: 5
}
Latitud/Longitud: -2.859003,-79.002563
Fecha: 5/1/2022 Hora: 20:52:13.0
Altitud (metros): 2682.40
Rumbo (grados): 0.00
Velocidad(kmph): 0.00
Satelites: 5
Configuracion Completa!
Enviando SMS...
Mensaje enviado!
Latitud/Longitud: -2.859002,-79.002563
Fecha: 5/1/2022 Hora: 20:52:15.0
Altitud (metros): 2682.40
Rumbo (grados): 0.00
Velocidad(kmph): 0.04
Satelites: 5
Latitud/Longitud: -2.859002,-79.002563
Fecha: 5/1/2022 Hora: 20:52:16.0
Altitud (metros): 2682.40
Rumbo (grados): 0.00
Velocidad(kmph): 0.07
Satelites: 5
```

Fuente: Elaboración propia

3.4.1.2. Recepción de datos

- El envío de mensajes se hace desde el prototipo diseñado mediante el SIM 800L, que llegara al celular como mensajería de texto (SMS) con dirección a Google Maps. Cuando el GPS todavía no tiene señal llega el mensaje hacia el celular sin posicionamiento, como de demuestra en la figura 30.

Figura 30. Recepción De Mensajes Al Celular

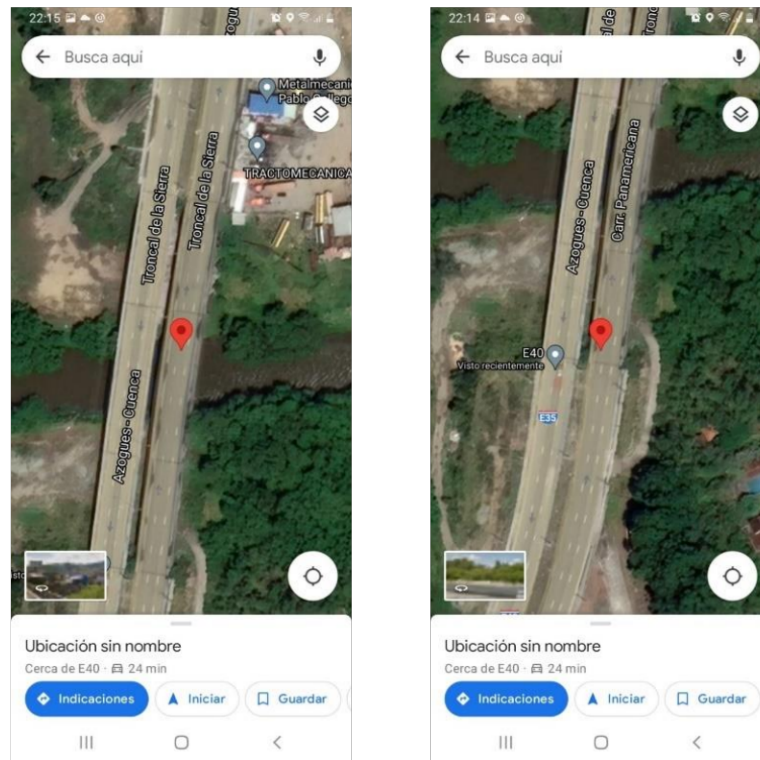


Fuente: Elaboración propia

- Una vez obtenido el mensaje, su apertura permite visualizar la imagen satelital para obtener el punto de ubicación precisa que indica el Sistema de Posicionamiento Global, como se indica en la figura 31.

Figura 31.

Ubicación Del Prototipo P1 Y P2



Fuente: Elaboración propia

En tal sentido, el desarrollo del prototipo con base a la técnica de PPP-GNSS que permite la cuantificación del desplazamiento lateral de las estructuras de puentes, empleando procesadores de datos como el Arduino, permite el acceso oportuno al posicionamiento de la estructura oscilante, obteniendo un reporte a través de mensajería de texto (MMS) con la ubicación exacta en coordenadas (x,y,z), y de esta forma poder verificar de forma certera la salud estructural del puente, obteniendo los datos eficazmente, a través del desarrollo de un prototipo que además de eficiente es viable desde el punto de vista técnico, operativo y económico, proporcionando respuestas efectivas en la evaluación de la salud estructural del puente.

3.4.2. Sistema GNSS.

Los métodos más consolidados para utilizar las estaciones de referencia terrestres para proporcionar correcciones GNSS a los receptores son la cinemática en tiempo real (RTK) y el posicionamiento puntual preciso (PPP).

El RTK se basa en una única estación base o en una red de referencia local para obtener datos de corrección que pueden eliminar la mayoría de los errores del GNSS. El RTK supone que la estación base y el receptor están muy cerca -con un máximo de 40 kilómetros (km).

Las aplicaciones que necesitan una precisión cercana al RTK y tiempos de inicialización rápidos suelen emplear el servicio de corrección GNSS más reciente, el RTK-PPP (a veces denominado representación del espacio de estado (SSR)). Utiliza una red de referencia con estaciones separadas por unos 100 km (65 millas) que recogen datos del GNSS y calculan una combinación de correcciones satelitales y atmosféricas.[1]

Los receptores GNSS que utilizan RTK-PPP pueden tener precisiones inferiores al decímetro.

Los receptores GNSS son la interfaz de usuario a cualquier Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS), su objetivo es procesar las señales en el espacio transmitidas por los satélites.

En este estudio es recomendable utilizar los receptores de doble frecuencia que permiten recibir mayor cantidad de señales de los satélites y alcanzan precisiones muy altas, tanto, en la posición horizontal como vertical. La ventaja de los receptores de doble frecuencia es que al momento de recolectar los datos necesarios el tiempo de rastreo es más corto.

Figura 52.

Receptores GNSS



Fuente: paratopografia.com

un receptor de doble frecuencia debe tener disponibilidad de 4 canales para rastrear un satélite. Es decir, si el mínimo de satélites rastreables para un levantamiento son 4 satélites con un receptor de doble frecuencia, el receptor debe disponer de 8 canales como mínimo.

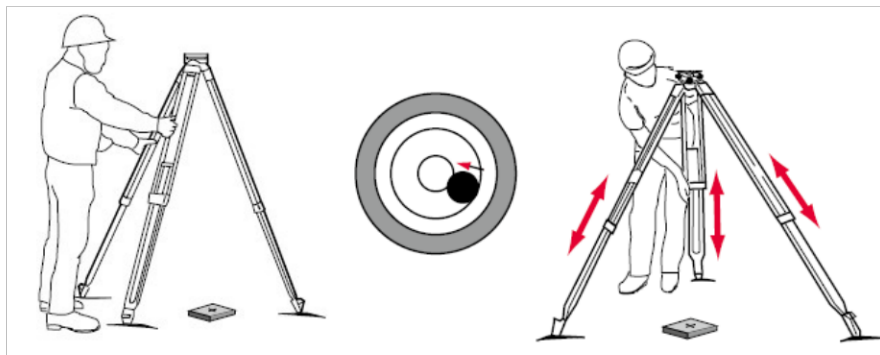
La precisión de un levantamiento durante el tiempo de rastreo con GNSS depende de:

- El tipo de receptor a utilizar.
- La precisión de la estación base.
- El número de satélites visibles.
- La geometría de los satélites.
- Las condiciones atmosféricas.
- La cantidad del tiempo de rastreo.
- Las obstrucciones de la señal de satélite.
- El número de observaciones redundantes.
- El software empleado para realizar el postproceso.

Al efectuar el levantamiento con GPS/GNSS, comprenden elementos adicionales como la Baliza, Bípode, Tripie, Base Nivelante y Adaptador Rotativo, que deberán encontrarse en buen estado. La baliza se debe verificar que el nivel esférico esté calibrado para mantenerse en la posición correcta en cualquier lado, siendo recomendable emplear un Bípode para sujetar y mantenerla verticalmente; del tripie se debe comprobar que el plato no contenga ondulaciones por golpes, desgaste y que las patas se conserven fijas para impedir su deslizamiento y haya riesgo de caída; la base Nivelante debe estar calibrada para que al plomear el receptor adquiera la verticalidad correcta (ECO, 2019).

Figura 33.

Levantamiento con GPS/GNSS



Fuente: ECO (2019)

CAPÍTULO IV RESULTADOS

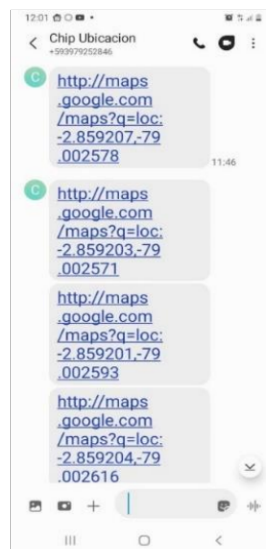
4.1. Verificación de los puntos utilizando el prototipo y estación total.

Al momento de realizarlo la verificación se realizó con cuatro puntos de referencia primero se encero la estación total y se levantó los dos puntos. Una vez ya levantado los puntos con la estación total se realizó el levantamiento de los puntos con el prototipo. Los puntos que se registran en la estación total son de coordenadas UTM WGS84 mientras tanto que el prototipo envía mensajes con ubicación del punto en longitud y latitud luego de obtenerlos los puntos con la ayuda de un convertidor a través de la página web se puede transformar el punto (longitud, latitud y elevación) en coordenadas UTM WGS84 para la verificación.

Especificaciones técnicas de estación total TOPCON IS303

– Rango de prisma 1/3/9	3000 m / 4000 m / 5000 m
– Precisión	$\pm(2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \times D^*)$ m.s.e.
Modo Sin Prisma	
– Rango Corto	1,5 m - 250 m
Precisión	$\pm 5 \text{ mm}$ m.s.e.
– Rango Largo	5,0 m - 2000 m
Precisión	$\pm(10 \text{ mm} + 10 \text{ ppm} \times D^*)$ m.s.e
Velocidad de Seguimiento	15°/seg
Rango de Seguimiento	1000m (con prisma estándar)
Velocidad de Rotación	85°/seg

Figura 34. Mensaje de texto recibido del prototipo al celular.



Fuente: Elaboración propia

Figura 35. Levantamiento De Los Puntos para la comprobación del margen de error



Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Tabla De Coordenadas obtenidas con los dos sistemas

RESULTADOS					
Punto	X	Y	Z	Descrip.	
1	722027.55	9683778.65	2502.9	P1	PROTOTIPO
2	722027.805	9683773.74	2503.45	P2	
3	722010.423	9683770.06	2502.436	P3	
4	722010.957	9683776.171	2502.44	P4	
6	722033.3	9683779.6	2500	B	
7	722025.6	9683778.6	2500	N	
8	722027.308	9683778.77	2499.942	L	ESTACIÓN TOTAL
9	722028.095	9683773.7	2500.255	L	
10	722010.68	9683770.03	2500.761	L	
11	722010.973	9683776.06	2500.736	L	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Comprobación de puntos entre el prototipo y estación total

COMPROBACION		
Punto	ERROR (X, Y)	ERROR (Z)
1-8	0.270	2.96
2-9	0.293	3.19
3-10	0.259	1.68
4-11	0.112	1.704

Fuente: Elaboración propia

Con la ayuda del programa Civil 3D se procedió a subir los puntos para analizar el margen de error de los puntos levantados con el prototipo y la estación total.

Figura 36. Comprobación De Los Puntos con el prototipo y estación total

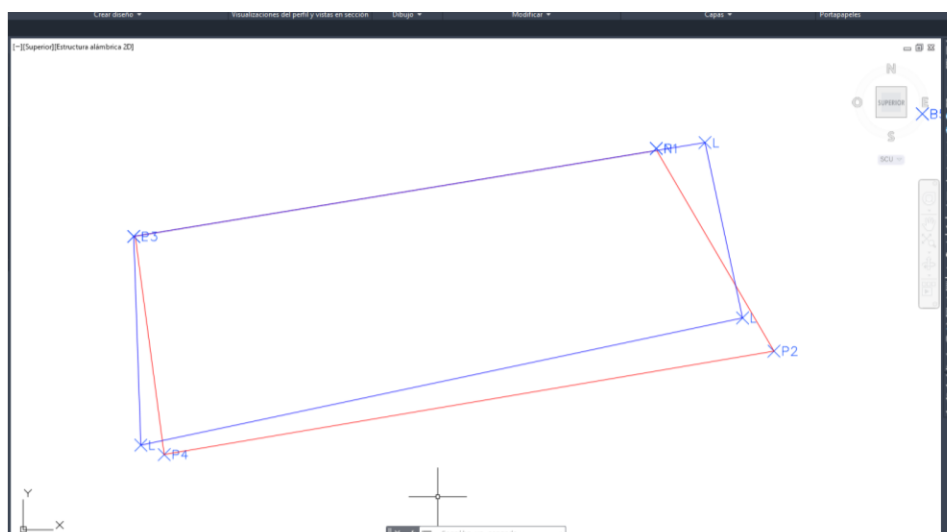
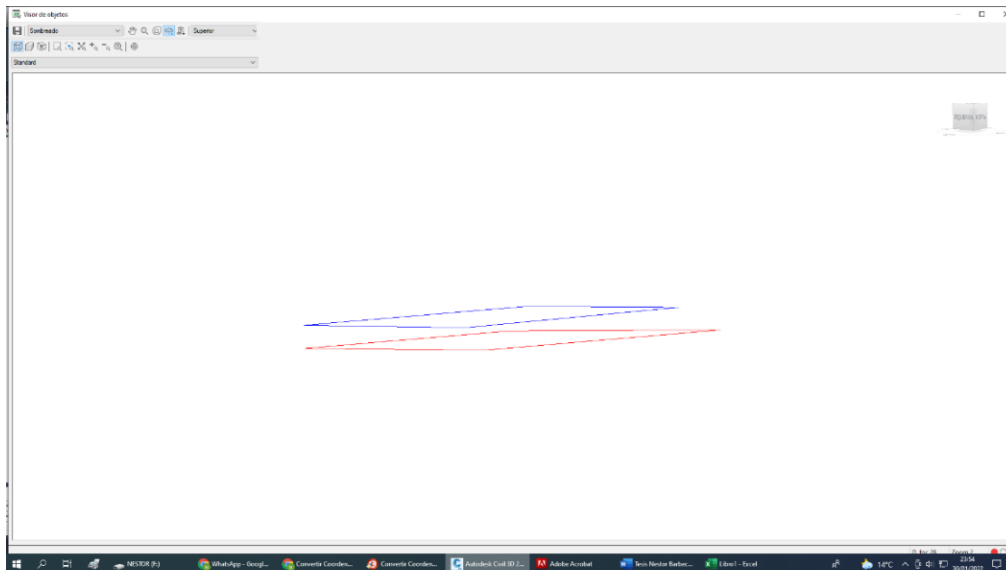


Figura 37. Comprobación de puntos en elevación con margen de error $\pm 3m$



Fuente: Elaboración propia

4.2. Resultados del prototipo con sistema GSM/GPRS

Esta sección presenta los resultados obtenidos durante el desarrollo y uso del prototipo en Arduino con la utilización del SIM 8000L V2.2 que envía mensajería de texto (SMS) a un dispositivo móvil en los casos en los que se registre algún desplazamiento lateral de la estructura que se analiza. Se verifica la precisión del GPS Neo 6M el cual permite obtener la ubicación con una precisión de ± 0.3 m. en coordenadas x,y y con una precisión de $\pm 3m$. en z. Es importante acotar, que el dispositivo se colocó en los extremos y en el centro del puente bajo prueba, como se muestra en la figura 37.

El prototipo está instalado un GPS Neo 6 con comunicación GSM/GPRS en el cual toma datos al momento de suscitarse un movimiento en el puente. La sensibilidad del prototipo es de $\pm 5cm$ en movimiento de los 3 ejes (x,y,z).

Figura 38. Ubicación Del Dispositivo en el puente



Fuente: Elaboración propia

El módulo MPU6050 es un sensor de movimiento en tres ejes (x, y, z) al momento de suscitarse el movimiento lateral procede a enviar el mensaje mediante el SIM 800L.

Al momento del desarrollo del prototipo para su ejecución, fue de consideración prioritaria la facilidad de uso, lo que permite desplazarlo a diferentes ubicaciones sin ningún tipo de problema, resultando de mucha utilidad, ya que el dispositivo GPS hace posible su ubicación en el instante que se genere un nuevo movimiento.

Para obtener una mejor precisión con este sistema de red GSM/GPRS es necesario de monitorear con 3 dispositivos propuesto haciendo un sistema de red que se conecten entre si para obtener los resultados de mayor confiabilidad.

4.3. Resultados con sistema PPP-GNSS

4.3.1. Métodos

4.3.1.1. Receptor geodésico GNSS

Para el caso de este trabajo de investigación se utilizó un receptor geodésico GPS FOIF A90 está integrado con un módulo GNSS de alta sensibilidad, A90 puede implementar encuestas masivas: RTK, DGPS, (SBAS), Estático, etc. El receptor geodésico es de doble frecuencia con seguimiento de 550 canales. A continuación, se presenta las siguientes especificaciones técnicas:

- 550 Canales de recepción
- Procesa datos GPS, Glonass, SBAS, Galileo, Beidou (Compas)
- Precisión RTK de +- 8 mm Hz
- Precisión Post Proceso de +- 2.5 mm + 0.1ppm
- Posicionamientos largos +- 2.5 mm+ 0.1ppm
- Tiempo real activo UHF
- Resistente IP 67 Sumergible en agua

Figura 39. Receptor geodésico GPS Diferencial FOIF A90



Fuente: foif.com

4.3.1.1. Estación total.

En este estudio se realizó utilizando una estación total Topcon IS 303. El funcionamiento del equipo se basa realizar el levantamiento a partir de dos puntos con coordenadas conocidas. A continuación, se presenta las especificaciones técnicas del equipo:

– Rango de prisma 1/3/9	3000 m / 4000 m / 5000 m
– Precisión	$\pm(2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm} \times D^*) \text{ m.s.e.}$
Modo Sin Prisma	
– Rango Corto	1,5 m - 250 m
Precisión	$\pm 5 \text{ mm m.s.e.}$
– Rango Largo	5,0 m - 2000 m
Precisión	$\pm(10 \text{ mm} + 10 \text{ ppm} \times D^*) \text{ m.s.e}$
Velocidad de Seguimiento	15°/seg
Rango de Seguimiento	1000m (con prisma estándar)
Velocidad de Rotación	85°/seg

Figura 40. Estación total Topcon IS303



Fuente: global.topcon.com

4.3.2. Resultados

Se realiza monitoreo con los dos equipos en la subestructura del puente ubicado en la vía Javier Maldonado sobre el río Machángara sector feria de ganado. Se realiza la medición de los estribos del puente para obtener los datos (coordenadas) a través de la estación total partiendo de dos puntos conocidos luego se procede levantar los puntos con el equipo RTK cual nos genera coordenadas en tiempo real.

Figura 41. Levantamiento de puntos del estribo del puente con la estación RTK



Fuente: Elaboración propia

Figura 42. Levantamiento de puntos del estribo del puente con la estación total



Fuente: Elaboración propia

Tabla 12

Tabla levantamiento de puntos con el equipo rtk y estación total.

COORDENADAS					
P	N	E	Z	D	
1	9683460.087	724407.686	2535.941	A	ESTACION RTK
2	9683452.488	724409.312	2535.946	B	
3	9683461.369	724450.433	2535.933	C	
4	9683468.918	724448.747	2535.955	D	
5	9683461.875	724407.124	2535.417	E	
6	9683460.356	724408.483	2535.751	F	
7	9683460.171	724409.239	2533.062	G	
8	9683452.660	724410.077	2535.733	H	
9	9683452.801	724410.762	2532.850	I	
10	9683448.336	724408.748	2535.023	J	
11	9683448.410	724409.017	2533.473	K	
12	9683473.029	724449.382	2535.021	L	
13	9683473.037	724449.125	2534.035	M	
14	9683468.776	724447.956	2535.682	N	
15	9683468.661	724447.557	2532.610	Ñ	
16	9683461.144	724449.566	2535.630	O	
17	9683461.070	724449.158	2532.610	P	
18	9683457.937	724452.717	2535.102	Q	
19	9683457.747	724452.543	2533.638	R	
20	9683460.091	724407.714	2535.965	A1	
21	9683452.510	724409.312	2535.964	B1	
22	9683461.393	724450.432	2535.955	C1	
23	9683468.922	724448.763	2535.980	D1	
24	9683461.899	724407.111	2535.441	E1	
25	9683460.374	724408.502	2535.761	F1	
26	9683460.179	724409.225	2533.081	G1	
27	9683452.684	724410.090	2535.761	H1	
28	9683452.801	724410.787	2532.876	I1	
29	9683448.351	724408.767	2535.040	J1	
30	9683448.438	724409.021	2533.499	K1	
31	9683473.052	724449.391	2535.033	L1	
32	9683473.061	724449.140	2534.052	M1	
33	9683468.795	724447.965	2535.712	N1	
34	9683468.645	724447.551	2532.624	Ñ1	
35	9683461.166	724449.581	2535.635	O1	
36	9683461.092	724449.164	2532.638	P1	
37	9683457.925	724452.715	2535.118	Q1	
38	9683457.755	724452.571	2533.659	R1	
39	9683473.856	724408.539	2534.154	BM	
40	9683492.289	724404.446	2534.513	BM	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13

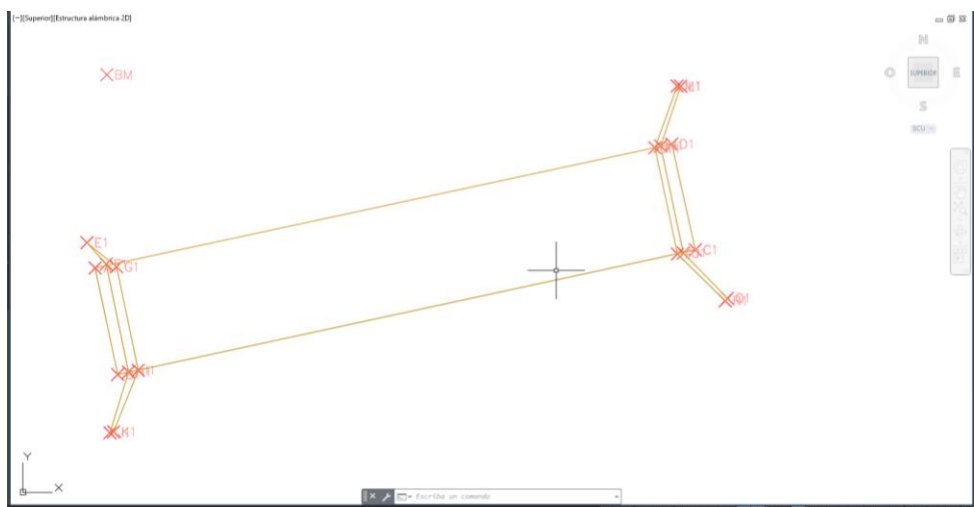
Tabla de comprobación de los puntos levantados del estribo del puente

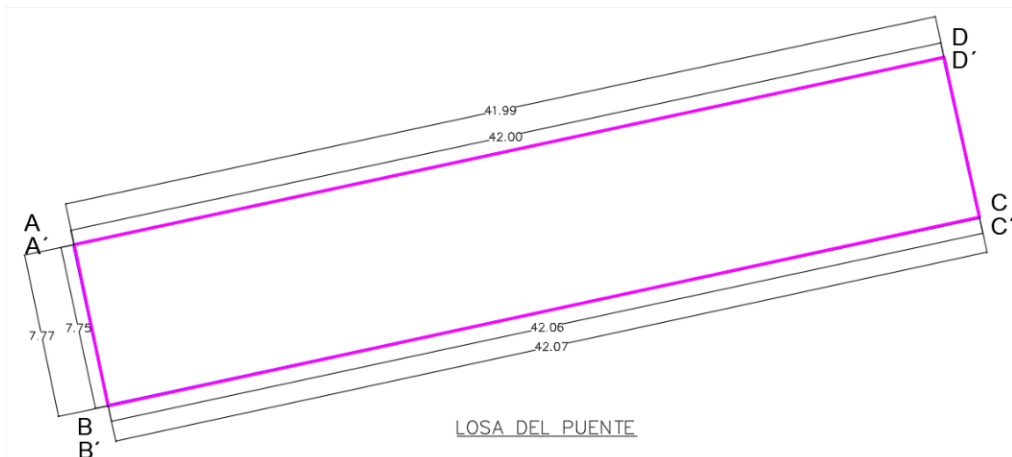
COMPROBACION		
P	DIST.	Z
1-20	0.028	0.024
2-21	0.022	0.018
3-22	0.024	0.022
4-21	0.016	0.025
5-22	0.027	0.024
6-23	0.026	0.010
7-22	0.016	0.019
8-23	0.027	0.028
9-24	0.025	0.026
10-23	0.024	0.017
11-24	0.028	0.026
12-25	0.025	0.012
13-24	0.028	0.017
14-25	0.021	0.030
15-26	0.017	0.014
16-25	0.027	0.005
17-26	0.023	0.028
18-27	0.012	0.016
19-28	0.029	0.021

Fuente: Elaboración propia

La verificación de los puntos obtenidos con los dos equipos se realizó en el programa de AutoCAD.

Figura 43. Verificación de los puntos levantados del estribo del puente.





Fuente: Elaboración propia

Los equipos RTK con sistema GNSS es de mayor confiabilidad para realizar cualquier levantamiento ya sea para monitorear una estructura o levantamientos topográficos con mayor precisión. Las distancias obtenidas de la losa del puente a lo largo partiendo desde A-D es de 42.00 m. y A1 – D1 es de 41.99 m. obteniendo una diferencia de 1 cm.; desde B -C es de 42.06 m. y B1 – C1 es de 42.07 m. EL ancho del puente partiendo desde A – B es de 7.77 y A1 – B1 es de 7.75 obteniendo una diferencia de 2cm. Las medidas que se realizaron en el puente varían entre sí por el tiempo de construcción que se realizó.

4.3.2.1. Colocación de puntos de referencia.

Se procedió a la colocación de los puntos de referencia. Estos puntos de referencia se los levanto con el equipo rtk los cuales quedaron georreferenciados para a futuro realizar el monitoreo de los estribos del puente. Estos puntos se las coloco a un costado del puente aguas arriba.

Figura 44. Puntos de referencia para el monitoreo de los estribos del puente.



Fuente: Elaboración propia

Tabla 14

Tabla de los puntos de referencia para el monitoreo de los estribos del puente

PUNTOS DE REFERENCIA			
N	E	Z	D
9683473.856	724408.539	2534.154	BM 1
9683492.289	724404.446	2534.513	BM 2

Fuente: Elaboración propia

4.4. Implementación del sistema de monitoreo sistema GNSS.

El proceso de implementación con sistema PPP-GNSS es medir las distancias en tiempo real entre los estribos del puente

El sistema de monitoreo se implementó de la siguiente manera:

1. Se establece un receptor geodésico de referencia. Para poder determinar el punto de partida se debe esperar 20 min. para que el receptor reciba señal con precisión.

Figura 45. Receptor geodésico establecido como base



Fuente: Elaboración propia

2. El segundo receptor se establece como Rover o colectoras de datos.

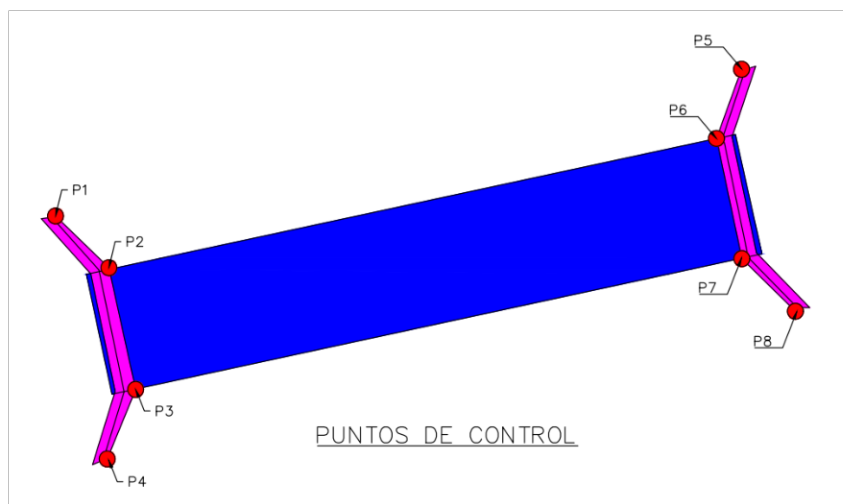
Figura 46. Colectora de datos con sistema GNSS



Fuente: Elaboración propia

3. Una vez que el receptor base este con señal se procede la obtención de coordenadas en tiempo real con precisión centimétrica.
4. Se identifica los puntos de control las que van a ser levantadas para generar el monitoreo de los estribos.

Figura 47. Puntos de control en el estribo del puente.



Fuente: Elaboración propia

5. Levantamiento de los puntos de control y puntos de la subestructura del puente.

Figura 48. Levantamientos de puntos



Fuente: Elaboración propia

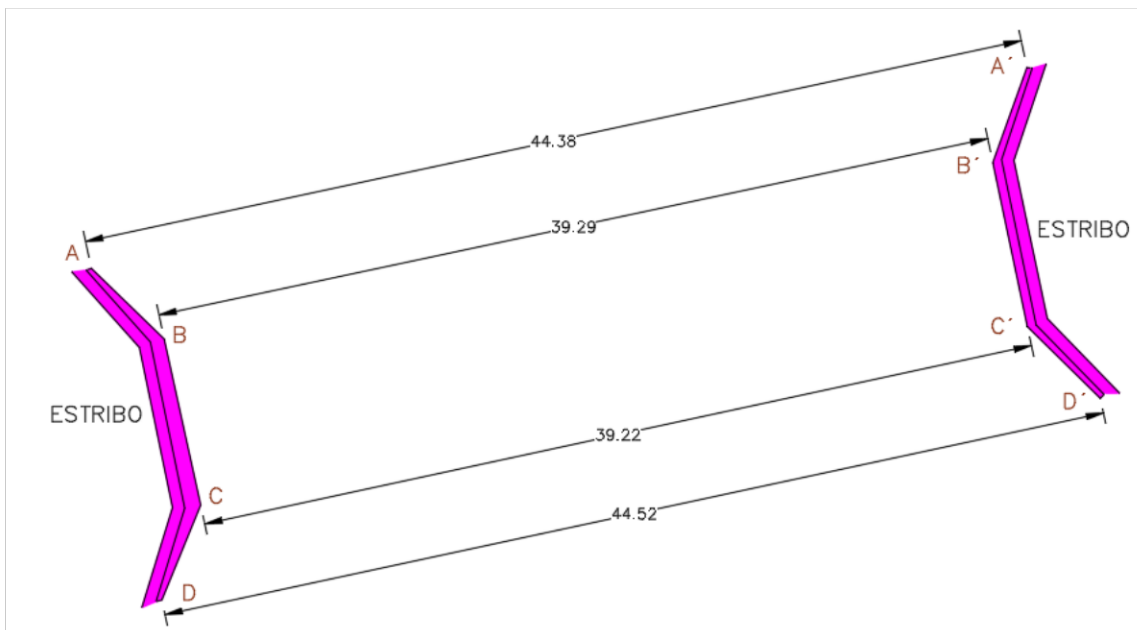
6. Las precisiones obtenidas en las coordenadas del levantamiento dependerán de varios factores como errores accidentales cometidos, precisión de las coordenadas de la red.

4.5. Análisis de resultados

Una vez levantado los puntos se procede a importar al ordenador AutoCAD. Los puntos levantados de los estribos del puente son las que están construido en este momento.

Los estribos vistos en planta se analizan desacuerdo a las distancias que hay entre ellos. Como se muestra en la figura.

Figura 49. Distancia entre estribos obtenido del levantamiento de los puntos



Fuente: Elaboración propia

Tomando en cuenta las distancias desde el punto A hasta A' ($d= 44.38\text{m.}$) y desde el punto D hasta D' ($d= 44.52 \text{ m.}$) teniendo una diferencia de distancia de 14 cm. Así mismo se toma en consideración las distancias desde B hasta B' (39.29 m.) y desde el punto C hasta C' ($d= 39.22 \text{ m.}$) con una diferencia de distancia de 7cm. Con las medidas obtenidas de las diferencias de las distancias los estribos han sometido una rotación de debido a los años de construcción obtenida y al uso de la misma.

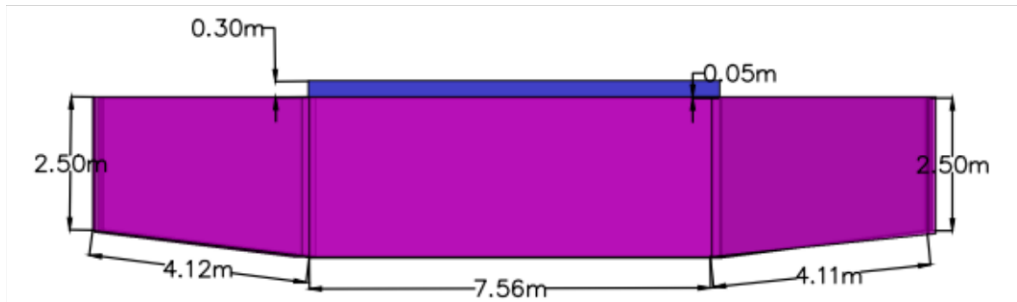
El estribo del puente es un elemento estructural donde se apoya el tablero o losa. Se procedió a verificar si el estribo está a nivel. Una vez realizado el mismo el estribo tiene un desnivel de 5cm. Este desnivel del estribo se puede deducir que el suelo ha sufrido un asentamiento por la carga sometida y por los años de construcción del mismo. El giro que se ha generado en los estribos es por el asentamiento del suelo y su cimentación

Figura 50. Subestructura del puente



Fuente: Elaboración propia

Figura 51. Estribo del puente con un desnivel de 5cm



Fuente: Elaboración propia

El puente ha generado un daño por asentamiento debido a la rotación de la estructura y se puede ver a simple vista las fisuras generadas en el estribo.

Figura 52. Fisura en el estribo



Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

1. Se realizó el prototipo con la metodología gsm/gprs con programación de Arduino con una sensibilidad de inclinación de 5 grados que se asemeja a la técnica PPP-GNSS
2. Al realizar los estados de campo, levantamientos de puntos con el modelo gsm/gprs presenta errores tanto en planta con un error de 30cm como en elevación con un error de 3m.
3. No se implementó el sistema de red inalámbrica por lo que se necesita de 3 prototipos para realizar la misma y así poder disminuir el margen de error tanto en planta como en elevación.
4. Para determinar la salud estructural del estribo del puente se realizó el levantamiento de los puntos con el equipo rtk que al triangular los datos disminuye el error hasta 3 cm.
5. Se procedió a realizar la comprobación de las coordenadas de los puntos del levantamiento del puente a través del equipo rtk y la estación total. Donde las diferencias entre estos equipos están en el rango de 3cm entre ellos.
6. Las coordenadas de los puntos de los estribos se encuentran georreferenciadas para futuros monitoreos.
7. Al momento de obtener el sistema de red inalámbrica con la metodología gsm/gprs se podrá implementar el dispositivo en monitoreos periódicos que permitiría evaluar el daño acumulado en algunos elementos estructurales.
8. La tecnología gsm/gprs es una solución técnicamente viable para realizar el monitoreo de un determinado riesgo del puente ya que se puede colocarlo en cualquier tipo de puente, pues esto es una solución que abarata costos por su reducido consumo de recursos de red y adecuado tiempo en enviar información que permite mantener la conexión para controlar el desplazamiento.
9. El prototipo realizado se puede emplear en el puente colocándolo en la base del estribo para el monitoreo del mismo, en la cual envía datos en tiempo real

Recomendaciones

1. Mejorar el prototipo para que la sensibilidad en inclinación sea menor a los 5 grados e implementar una aplicación de almacenamiento de datos para así hacerlo más eficiente.
2. Se recomienda mejorar el prototipo, generar una red para disminuir el error e implementar el sistema de monitoreo continuo para puente, terrenos o taludes.
3. Se recomienda hacer un estudio de la salud estructural del tablero existen elementos diafragma fracasados y algunas conexiones que ha perdido su rigidez.
4. Se recomienda intervenir con un mantenimiento preventivo en toda la estructura
5. Se recomienda hacer ensayos no destructivos en los estribos de puente para una evaluación estructural a detalle.
6. El prototipo debe colocarse en un espacio abierto para una mejor recepción de la señal y teniendo en cuenta las condiciones climáticas, también es necesario realizar pruebas a diferentes distancias para observar los resultados y obtener el posicionamiento.
7. Para llevar a cabo una medición precisa y confiable de los puntos levantados del puente, con el equipo rtk GNSS es necesario tener por lo menos 20 minutos encendido el equipo antes de realizar el levantamiento.

BIBLIOGRAFÍA

- Abheetha, P., Sun, C., & Harik, I. (2018). Lecciones aprendidas de seis sistemas diferentes de monitoreo de la salud estructural en puentes de carreteras. *SAGE Journals*, 23. <https://doi.org/10.1177%2F1461348418815406>
- Arduino. (15 de diciembre de 2021). *Arduino Pro Mini*. <https://www.arduino.cc/>
- Ashraf, A., Amgad, S., Abdelhamid, A., & Reda, A. (2020). Efficiency of Using GNSS-PPP for Digital Elevation Model (DEM) Production. *Sciendo*, 55(1), 17-28.
- Cadena, J. (2021). *Diseño e implementación de sistema electrónico de seguridad para monitoreo en tiempo real del exceso de velocidad en el vehículo*. Tesis de Pregrado, Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10961>
- Claudiu, C., Taranu, N., Boaca, G., & Scutaru, M. (2017). Structural health monitoring system of bridges. *Procedia Engineering*, 199, 2054-2059. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.472>
- Constro Facilitator. (12 de enero de 2021). *Smart Structural Health Monitoring System*. <https://www.constrofacilitator.com/smart-structural-health-monitoring-system/>
- Cuesta, I. (2021). *La fatiga en los materiales, clave en la vida de las construcciones*. Fundación MAPFRE: <https://www.mapfreglobalrisks.com/gerencia-riesgos-seguros/articulos/la-fatiga-en-los-materiales-clave-en-la-vida-de-las-construcciones/>
- DGFI-TUM. (2019). *Centro de Análisis SIRGAS DGFI-TUM*. <https://www.sirgas.org/es/>
- ECO. (2019). *Consejos técnicos para levantamiento GNSS*. <https://www.ecomexico.net/noticias/detalle/24>
- Electrobes. (JULIO de 2019). *NEO-6M GPS Shield for Arduino with microSD Card Slot and Active Antenna*. <https://electrobes.com/product/gps-shield-for-arduino-with-microsd-card-slot-and-active-antenna/#tab-specification>
- Euspa. (3 de diciembre de 2021). *What is GNSS?* Obtenido de The EU Space Programme: <https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-gnss>
- Firdausi, A., Shaik, N., & Tiwari, G. (23 de diciembre de 2020). *Capacitor Types*. <https://www.toppr.com/guides/physics/electrostatics/capacitor-types/>
- Fractura, M. d. (23 de Enero de 2022). https://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica_de_la_fractura.

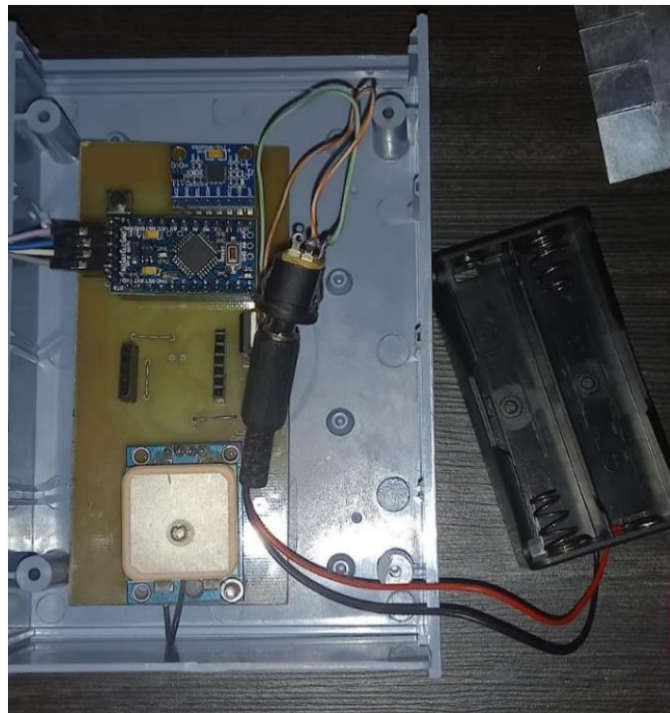
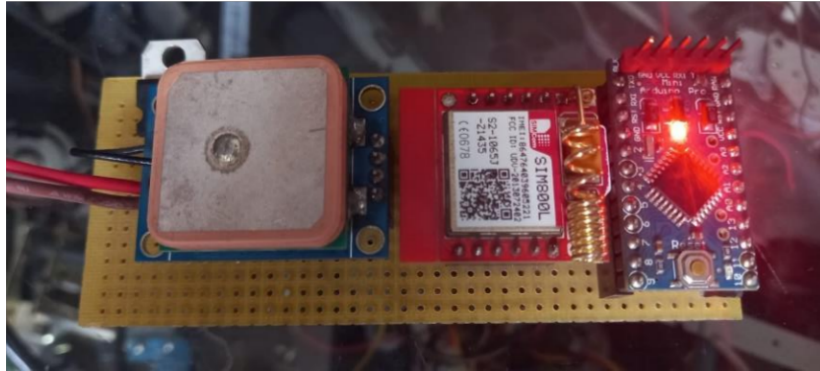
- Geek factory. (7 de diciembre de 2021). *Módulos y tarjetas*. <https://www.geekfactory.mx/>
- IERS. (2017). *The International Terrestrial Reference Frame (ITRF)*. Recuperado el 6 de diciembre de 2020, de <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/ITRF/itrf.html>
- Instituto Geografico Militar. (2017). *Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas*. <http://www.geograficomilitar.gob.ec/adopcion-del-uso-del-sistema-de-referencia-geocentrico-para-las-america-sirgas/>
- Leedeo Engineering. (2019). *Antena de GPS y Sistemas GPS Mejorados*. <https://www.leedeo.es/l/antena-de-gps-y-sistemas-gps-mejorados/>
- Lovse, J., Teskey, W., Lachapelle, G., y Cannon, M. (1995). Dynamic deformation monitoring of tall structure using gps technology. *Journal of surveying engineering*, 121(1):35–40.
- Maldonado, J. (enero de 2016). *Análisis de fatiga de un puente atirantado. Análisis de fatiga del puente Concordia*. (Tesis de Maestría), Universidad Nacional Autónoma de México. <http://132.248.52.100:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/11349>
- McMullin, P. (Agosto de 2016). https://www.structuremag.org.translate.goog/?p=10311&_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sc.
- Mecánica de la Fractura. (24 de Enero de 2022). https://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica_de_la_fractura.
- Mejía, A., & Salazar, J. (2019). *Diseño e implementación de un prototipo para el análisis de salud estructural de un puente a través de una red de sensores inalámbricos utilizando el software matlab*. [Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana], Repositorio digital. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16827>
- Nicopolitidis, O. (14 de febrero de 2015). Global Navigation Satellite System (GNSS). (1-39). <https://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F07/GNSS.pdf>
- Novatel. (2020). *Precise Point Positioning (PPP)*. <https://novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-5-resolving-errors/precise-point-positioning-ppp>
- Ontiveros, R., Vazquez, E., Quintana, J., Carriond, F., Guzman, M., & Camacho, R. (2021). Implementation of PPP-GNSS measurement technology in the probabilistic SHM of bridge structures. *Elsevier*, 173, 15-45.

- Perez, A. (2019). *Estudio de Array de Antenas de Referencia para GNSS*. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Madrid. https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/688644/perez_quintana_adri%C3%A1n_tfm.pdf?sequence=1
- Pérez, S., & Moreno, E. (2020). *Prototipo: Sistema Central De Adquisición, Procesamiento Y Transmisión De Datos Para El Monitoreo De Vehículos Terrestres En La Ciudad De Bogotá D.C.* [Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas], Repositorio digital. <http://hdl.handle.net/11349/25631>
- Predictiva 21. (2019). *Monitorización de la salud estructural (SHM) en estructuras aeroespaciales*. <https://predictiva21.com/monitorizacion-salud-estructural-shm/>
- Prometec. (2022). *Arduino y componentes*. Recuperado el 31 de enero de 2022, de www.prometec.net
- Seguel, J. (2019). *Bases metodológicas para implementación de sistemas de instrumentación y monitoreo de salud estructural en tiempo real de puentes en Chile*. (Tesis de Pregrado), Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/173750>
- SIRGAS. (2017). Guía para la coordinación de la Red SIRGAS de Operación Continua (SIRGAS-CON). 7. https://sirgas.ipgh.org/docs/Guias/2017_03_Guia_para_la_coordinacion_de_SIRGAS-CON_V1_4.pdf
- SIRGAS. (14 de mayo de 2020). Actividades y productos de los centros de análisis SIRGAS. 24. Santiago de Chile, Chile. <https://www.sirgas.org/es/sirgas-definition/>
- Solis, A. (2019). *Análisis comparativo de las características de los sistemas GNSS operativos a nivel mundial (GPS, GLONAS y GALILEO)*. Informe Preliminar, Universidad UTE. <https://www.studocu.com/ec/institution/universidad-ute/2932>
- Sousa, H., Félix, C., Bento, J., & Figueiras, J. (2011). Design and implementation of a monitoring system applied to a long-span prestressed concrete bridge. *Structural concrete*, 12(2), 82-93. <https://doi.org/10.1002/suco.201000014>
- Tecnológico de Costa Rica. (2019). *Inventario de puentes en rutas nacionales de Costa Rica 2014-2018*. Programa de Evaluación de Estructuras de Puentes. https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/informe_final_inventario_y_evaluacion_puentes_-_2014-2018.pdf

- Topo Servis. (2021). *Diferencia entre GNSS y GPS*. <https://www.toposervis.com/diferencia-entre-gnss-y-gps/>
- UNIT Electronics. (2021). *Módulo GPS NEO6M V2*. Obtenido de <https://uelectronics.com/producto/mdulo-gps-neo6m-v2/>
- Vazquez, R. (2019). *Implementación de la técnica PPP-GNSS para el monitoreo de la salud estructural en puentes*. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Sinaloa], Repositorio digital. https://www.researchgate.net/publication/337852642_Implementacion_de_la_tecnica_PPP-GNSS_para_el_monitoreo_de_la_salud_estructural_en_puentes
- Viviescas, A., Carrillo, J., & Vargas, L. (Enero de 2018). <https://revistascientificas.cuc.edu.co/index.php/ingecuc/article/view/1686>.
- Yue, N., & Aliabi, M. (2020). Hierarchical approach for uncertainty quantification and reliability assessment of guided wave-based structural health monitoring. *SAGE Journals*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/1475921720940642>
- Yujun, D., Jinling, W., Chris, R., & Ahmed, E.-M. (2021). Vulnerabilities and integrity of precise point positioning for intelligent transport systems: overview and analysis. *Satellite Navigation*(3), 20-46. <https://satellite-navigation.springeropen.com/articles/10.1186/s43020-020-00034-8>
- Yunfan, Z., Hui, L., Shengnan, S., Guohao, Z., Yun, Y., Zefeng, L., Wu, Z. (12 de julio de 2019). Investigation of Acoustic Injection on the MPU6050 Accelerometer. *Sensors*, 19(14), 1-23. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.3390%2Fs19143083>

ANEXOS

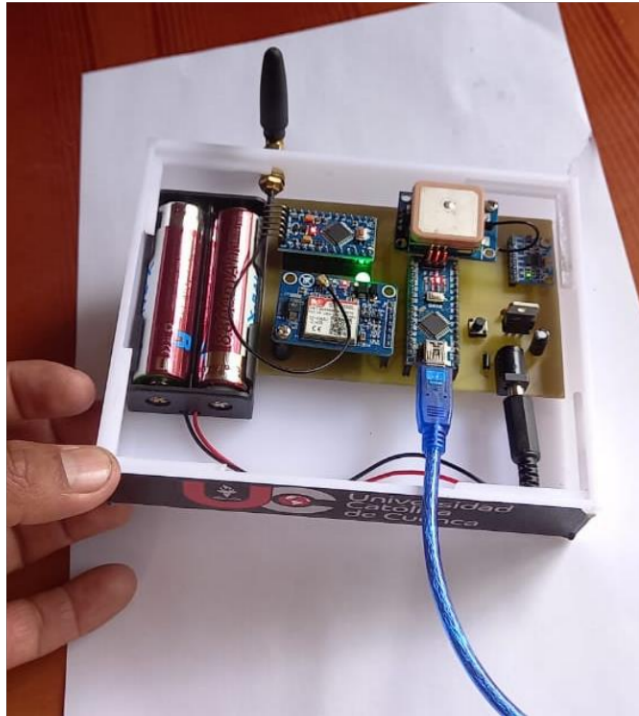
Anexo 1. Prototipo en placa perforada y placa electrónica para pruebas



Anexo 2. Prototipo final colocado en una caja para su debida transportación del mismo



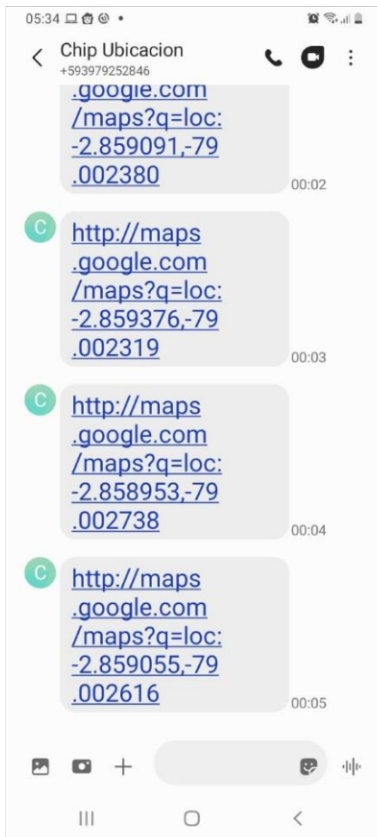
Anexo 3. Funcionamiento del módulo MPU6050 al realizar un movimiento



Anexo 4. Verificación de los puntos con estación total y el prototipo



Anexo 5. Obtención de datos enviados desde el prototipo hacia el celular.



Anexo 6. Implementación de prototipo en el Puente ubicado vía Javier Maldonado sobre el rio Machángara sector feria de ganado



Anexo 7. Indicaciones del funcionamiento del equipo RTK por parte de la Universidad Católica de Cuenca sede Azogues de la facultad de Ing. Civil.



Anexo 8. Colocación del receptor como base en la estancia Luis Cordero y receptor Rover.

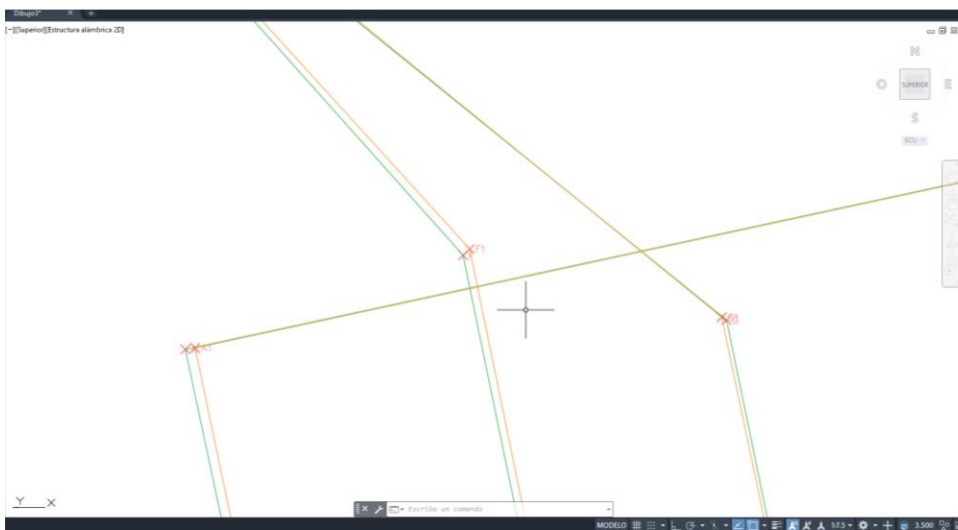
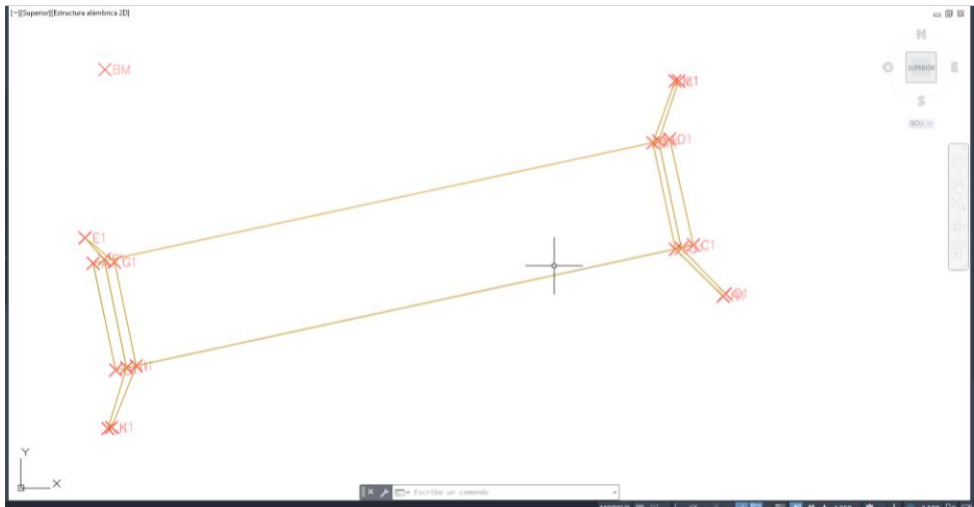


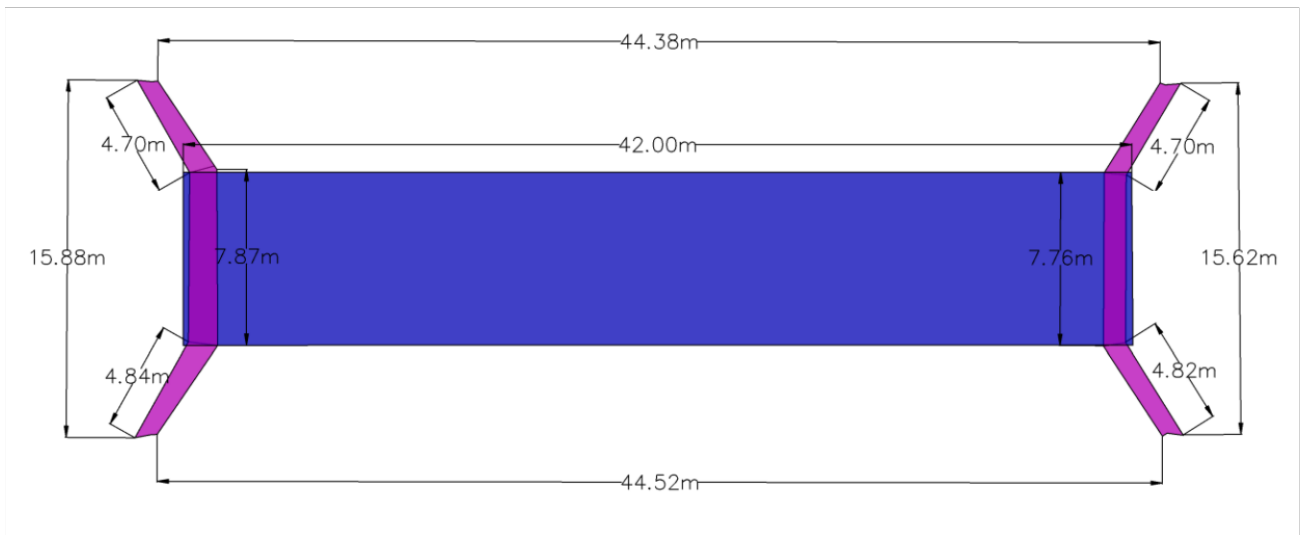
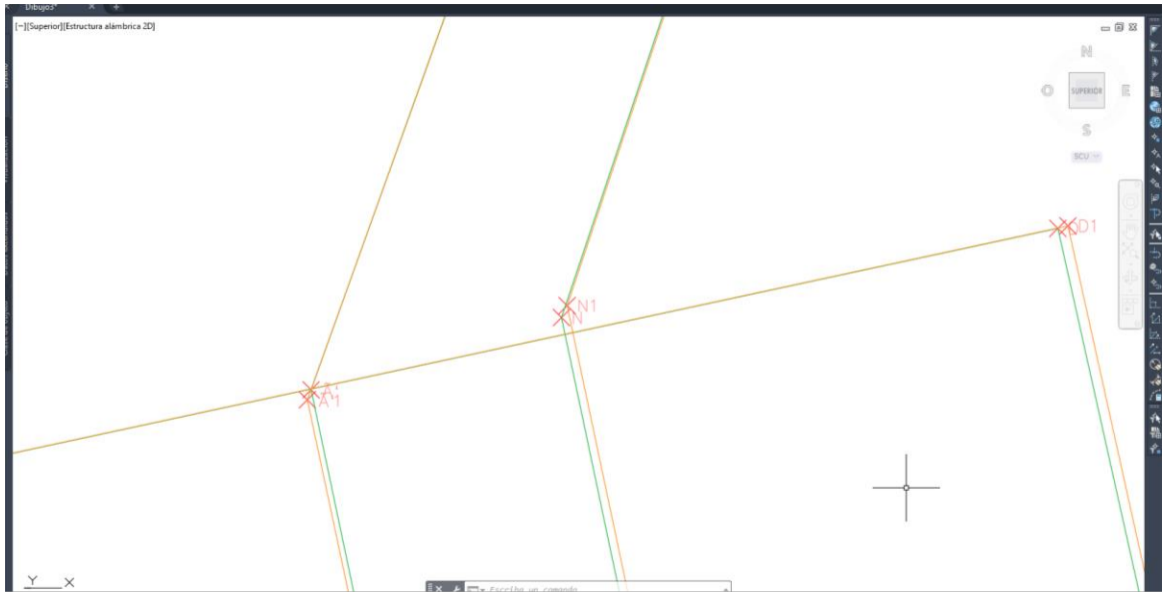
Anexo 9. Implementación del equipo RTK y estación total.





Anexo 10. Comprobación de los puntos levantados en AutoCAD





PUENTE VISTO EN PLANTA

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Néstor Alejandro Barbecho Sinchi portador de la cédula de ciudadanía N.º 0104828728. En calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “MONITOREO DE LA SALUD ESTRUCTURAL DE UN PUENTE UTILIZANDO LA TÉCNICA PPP-GNSS” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 22 de abril de 2022



Néstor Alejandro Barbecho Sinchi
0104828728