

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO / INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

TÍTULO DE LA TESIS

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ASISTENCIA COGNITIVA VISUAL PARA
NIVELACIÓN DE GRÚAS TODO TERRENO.

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PRESENTA:

ING. GRANADOS SALAZAR LOUIS GIOVANNI

DIRECTOR DE TESIS

DR. JOSÉ DE JESÚS AGUSTÍN FLORES CUAUTLE

CODIRECTOR DE TESIS

DRA. GEMIMA LARA HERNÁNDEZ

Fecha: Septiembre 2023

OG-13-F06 Orizaba, Veracruz, 14/septiembre/2023

Dependencia: División de Estudios de
Posgrado e Investigación

Asunto: Autorización de Impresión
OPCION: I

C. LOUIS GIOVANNI GRANADOS SALAZAR
Candidato(a) a Grado de Maestro(a) en:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PRESENTE.-

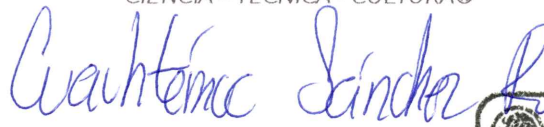
De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

" DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ASISTENCIA COGNITIVA VISUAL PARA NIVELACIÓN DE GRÚAS TODO TERRENO"

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA - CULTURA®



Dr. CUAUHTÉMOC SÁNCHEZ RIVAS
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, 4/septiembre/2023
Asunto: Revisión de trabajo escrito

C. CUAUHTÉMOC SÁNCHEZ RAMÍREZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.

LOUIS GIOVANNI GRANADOS SALAZAR

La cual lleva el título de:
"DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ASISTENCIA COGNITIVA
VISUAL PARA NIVELACIÓN DE GRÚAS TODO TERRENO"

Y concluyen que se acepta.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA – TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DR. JOSÉ DE JESÚS AGUSTÍN FLORES
CUAUTLE


FIRMA

SECRETARIO: DR. JOSÉ PASTOR RODRÍGUEZ JARQUIN


FIRMA

VOCAL: DR. IGNACIO HERRERA AGUILAR


FIRMA

VOCAL SUP.: DRA. GEMIMA LARA HERNÁNDEZ


FIRMA

TA-09-18



CONTENIDO

Lista de Figuras	4
Lista de Tablas	5
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 INTRODUCCIÓN	8
1.2 PROBLEMÁTICA	10
1.3 JUSTIFICACIÓN	12
1.4 HIPÓTESIS	13
1.5 OBJETIVO GENERAL	14
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.7 METODOLOGÍA	15
1.8 ESTADO DEL ARTE	18
1.9 ESTADO DEL CAMPO	24
CAPÍTULO II. MICROCONTROLADORES Y SENSORES	27
2.1 RESUMEN	27
2.2 DESARROLLO	27
2.2.1 MICROCONTROLADOR 1	27
2.2.2 MICROCONTROLADOR 2	29
2.2.3 INTERFAZ GRÁFICA	29
2.3 EXPERIMENTACIÓN	30
2.3.1 PROGRAMACIÓN DE MICROCONTROLADOR 1	30
2.3.2 PROGRAMACIÓN DE MICROCONTROLADOR 2	32
2.3.3 INTERFAZ GRÁFICA	32

2.4 RESULTADOS	33
CAPÍTULO III. ELECTRÓNICA	36
3.1 RESUMEN CAPÍTULO	36
3.2 DESARROLLO	36
3.2.1 CONEXIONES DE MICROCONTROLADOR 1	36
3.2.2 CONEXIONES DE MICROCONTROLADOR 2	37
3.2.3 DISEÑO UPS	38
3.3 EXPERIMENTACIÓN	39
3.3.1 DISEÑOS DE CONEXIONES DE MICROCONTROLADOR 1	39
3.3.2 DISEÑOS DE CONEXIONES DE MICROCONTROLADOR 2	39
3.3.3 CONSTRUCCIÓN DEL UPS	41
3.4 RESULTADOS	41
CAPÍTULO IV. CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DEL SISTEMA	42
4.1 RESUMEN CAPÍTULO	42
4.2 DESARROLLO	42
4.2.1 DISEÑO DEL GABINETE 3D	42
4.2.2 MÉTODO PARA CALIBRACIÓN DEL SISTEMA	43
4.3 EXPERIMENTACIÓN	44
4.3.1 CONSTRUCCIÓN DEL CASE 3D	44
4.3.2 CALIBRACIÓN Y COLOCACIÓN DEL SISTEMA	45
4.4 RESULTADOS	46
CONCLUSIONES	49
PRODUCTOS DE LA TESIS	50
ARTÍCULOS	50
REGISTRO DE SOFTWARE	50
REFERENCIAS	51

ANEXO A.....	54
SENSOR DE INCLINACIÓN DE TIPO ÓPTICO.....	54
IMPLEMENTACIÓN DE SENSOR IMU PARA LA ASISTENCIA DE NIVEL EN GRÚAS TODOTERRENO	61

Lista de Figuras

Figura 1 Mapa conceptual de la problemática del proyecto, elaboración propia (2023).....	10
Figura 2 Proceso de la metodología, elaboración propia (2022).	15
Figura 3 Análisis lingüístico de artículos publicados en los últimos cinco años y su respectiva relación mediante el software VOSviewer [3], elaboración propia (2023).	18
Figura 4 Vista general del funcionamiento del sistema, reproducido de [4] con número de permiso 54654654654654.	19
Figura 5 Composición del nodo de medición, reproducido de [4] con número de permiso 54654654654654.	20
Figura 6 Configuración del sensor para captura de movimiento crítico, basado en [5].	21
Figura 7 Sensor SICK TMM88B-AKC090, basado en [9]	25
Figura 8 MPU6050 con la disposición de pin y orientación de ejes de sensibilidad y polaridad de rotación.	31
Figura 9 Captura de la interfaz gráfica del usuario.	33
Figura 10 Esquema de los procesos del microcontrolador 1 a los sensores.....	33
Figura 11 Esquema de conexiones salientes del microcontrolador 1, basado en [16].....	36
Figura 12 Conexión de USB mini-B a USB A, basado en [23]	37
Figura 13 Esquema de conexiones salientes del microcontrolador 2, basado en [18].....	37
Figura 14 Diagrama a bloques de los módulos que integran el sistema desarrollado, el sistema incluye un sistema de alimentación de emergencia (UPS) línea discontinua azul, en tanto que los diferentes protocolos de comunicación se muestran con letra azul, elaboración propia (2023). ...	38
Figura 15 Conector USB mini-B a USB A.....	39
Figura 16 Interfaz gráfica.....	40
Figura 17 Indicador sonoro.	40
Figura 18 Conexión de cardador con baterías en el UPS.	41
Figura 19 Diseño de gabinete con montaje de piezas, elaboración propia (2022).....	43

Figura 20 Método de barra de senos para calibración del inclinómetro con la formación del plano inclinado y la ubicación del sensor, elaboración propia (2023).....	44
Figura 21 Sistema de nivelacion desarrollado.....	45
Figura 22 Implementación del método de calibración usando el equipo desarrollado.	46
Figura 23 Matriz 2D generada de la calibracion.....	47
Figura 24 colocacion del sistema desarrollado. a) preparacion del operador, b) enfoque de la ubicación del sensor.....	47
Figura 25 Instalación del inclinómetro en la tornamesa de en una grúa con capacidad de 45 toneladas, a) fotografía de la grúa, b) detalle del sensor.	48
Figura 26 Instalación del inclinómetro en la tornamesa en una grúa con capacidad de 90 toneladas.	48

Lista de Tablas

Tabla 1 Datos técnicos del sensor de inclinación IKM360R, basado en [11].....	26
Tabla 2 Datos técnicos del microcontrolador 1, basado en [16].....	28
Tabla 3 Datos técnicos del microcontrolador 2, basado en [18].....	29

RESUMEN

Las grúas de construcción son máquinas complejas y costosas, dadas las actividades en las cuales son empleadas, es frecuente su uso en terrenos accidentados. Por otro lado, en virtud de que una de las principales actividades a realizar con las grúas es el levantamiento, movilización y ubicación de cargas, es frecuente que este tipo de máquinas sean sometidas a grandes esfuerzos mecánicos.

Entre las medidas de seguridad a tener en cuenta cuando se emplea una grúa de construcción, es el verificar que la misma se encuentre nivelada, esto es, que la plataforma móvil de la grúa se encuentre paralela al piso, esto para evitar que los brazos de palanca generados durante la manipulación de cargas. El proceso de nivelación de la grúa es uno de los pilares fundamentales en la seguridad durante la operación de una grúa.

A pesar de la importancia de la nivelación de las grúas, muchos modelos carecen de un indicador de nivel que venga integrado de fábrica en la grúa, si bien es cierto que los fabricantes ofrecen esta clase de dispositivos como un accesorio adicional a la grúa, no es menos cierto que el costo de estos es en la mayor de las veces prohibitivo. Aunado a lo anterior, los indicadores de nivel de las grúas solo están disponibles para modelos de grúas recientes, o con una elevada capacidad de carga.

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de un sistema de asistencia cognitiva visual para nivelación de grúas todo terreno, este sistema permite ser un auxiliar durante el proceso de nivelación de una grúa y previo al levantamiento de cargas. Para el diseño de este sistema, se tomaron en consideración los requisitos de seguridad, así como las condiciones ambientales y de trabajo a las que se expondrá el sistema. Como resultado del diseño, se obtuvo un sistema de asistencia que cumple con los requisitos establecidos por los operadores de grúas.

El sistema fue calibrado de acuerdo con métodos estándar y ha sido probado en grúas con capacidades que van desde las 5 hasta las 90 toneladas.

ABSTRACT

Construction cranes are complex and expensive machines, given the activities in which they are used and frequently used in rough terrain. On the other hand, given that one of the main activities to be carried out with cranes is the lifting, moving, and positioning of loads, it is common for this type of machine to be subjected to mechanical stress.

Among the safety measures to consider when using a construction crane is to verify that it is level, that is, that the mobile platform of the crane is parallel to the floor, to prevent the lever arms generated during the handling of loads. The crane leveling process is one of the fundamental pillars of safety during crane operation.

Despite the importance of crane leveling, many models lack a crane level indicator that is factory-integrated into the crane. While it is true that manufacturers offer this type of device as an additional accessory to the crane, it is also true that the cost is often prohibitive. In addition, crane level indicators are only available for recent models of cranes or those with a high load capacity.

This work presents the design and implementation of a visual cognitive assistance system for all-terrain crane leveling. This system allows it to be an auxiliary during the process of leveling a crane and before lifting loads. For the design of this system, safety requirements were taken into consideration, as well as the environmental and working conditions to which the system will be exposed. As a result of the design, an assistance system was obtained that meets the requirements established by crane operators.

The system was calibrated according to standard methods and tested on cranes with capacities ranging from 5 to 90 tons.

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

De acuerdo a la RAE, una grúa es una “máquina compuesta de un aguilón montado sobre un eje vertical giratorio, y con una o varias poleas, que sirve para levantar pesos y llevarlos de un punto a otro, dentro del círculo que el brazo describe o del movimiento que pueda tener la grúa” [1].

Dichas maquinas forman parte importante en la industria y su uso es cada vez más común, son usadas en obras muy extensas para llevar material suspendido muy pesado (Construcción de infraestructuras, minas, etc.). Existen varios tipos de grúas, sin embargo, nuestro enfoque va dirigido a las denominadas “todo terreno”. Las grúas todo terreno son consideradas como híbridas, ya que se pueden considerar un híbrido entre la grúa sobre camión y una grúa RT (terreno rudo o rústico) debido a que combinan la capacidad de transporte de las grúas montadas sobre camión y la maniobrabilidad de las grúas para terreno difícil [2]. Además, brindan variadas actividades de manipulación de cargas de peso variable, de acuerdo con su capacidad (Grúa GROVE RT600E, capacidad de 40 a 45 t, longitud máxima de la pluma de 10 m a 32 m, según manual de usuario GROVE RT600E), en diversas circunstancias climáticas y zonas geográficas complicadas. Además, la corta distancia de sus ejes perfecciona la maniobrabilidad de la grúa y sus grandes neumáticos dan facilidad de movimiento en terrenos complicados.

Antes de poder llevar a cabo una maniobra de carga con grúa, se deben considerar factores importantes que llevarán al éxito, estos factores repercuten en el desarrollo de la maniobra. Algunos factores que resaltan para el éxito de la maniobra de carga con grúa son: el peso de carga, el volumen, el centro de gravedad (de la grúa y de la carga), la nivelación y material de fabricación. Para una operación de levantamiento de carga, se debe preparar la grúa antes de su funcionamiento considerando los factores mencionados. Es de importancia resaltar el riesgo implícito en una maniobra de carga debido al gran tonelaje suspendido en movimiento que manipula la grúa, por lo que se debe tener la mayor seguridad posible y tomar las precauciones adecuadas; comprobando que la zona sea estable, no debe ubicarse ninguna persona u objeto que interrumpa con la estabilidad de la grúa, extender los largueros, fijar los estabilizadores (*outriggers*) con las placas de apoyo y verificar la correcta nivelación de la grúa.

En la actualidad, existen grúas que ya incluyen diversos sensores de inclinación (Grove GRT8100, GRT8120, RT700E). No obstante, los modelos de grúas más recientes y su mantenimiento

preventivo-correctivo son altamente costosos en la industria por lo que algunas empresas optan por modelos anteriores más económicos sin sensor de inclinación, lo que conlleva a un aumento del tiempo de nivelación de la grúa, riesgo de volcaduras, nivelación errónea y el riesgo de un accidente fatal.

Habiendo mencionado lo anterior se presenta en el siguiente documento el diseño e implementación de un sistema embebido para nivelación asistida de grúas todo terreno de bajo costo, con el fin de otorgar los valores de inclinación biaxial de la plataforma de la grúa en tiempo real, reduciendo el tiempo de nivelación, el riesgo de accidentes fatales y la volcadura de la grúa. El sistema embebido será probado en la empresa Grúas GRISA (Grúas GROVE RT600E) proporcionando las herramientas necesarias a los operadores para efectuar el proceso de nivelación de la plataforma en terrenos irregulares.

En este documento se encuentra en el capítulo I la problemática a resolver, la justificación del tema de tesis, las hipótesis de las cuales partimos, el objetivo general, así como los objetivos particulares, la metodología a seguir para llevar a cabo el presente trabajo, así como el estado del arte y del campo. En el capítulo II se presenta lo realizado en la programación de los microcontroladores y sensores utilizados y los resultados obtenidos en este capítulo. En el capítulo III se abarca lo realizado en la parte de la electrónica en todas las partes del sistema embebido. En el capítulo IV se encuentra el trabajo relacionado a la construcción del sistema y su debida calibración antes del uso del sistema en las grúas y como resultado de este capítulo se presentan imágenes de la instalación del sistema en tres diferentes modelos y capacidades de grúas con las que la empresa Grúas GRISA decidió que se colocaría el sistema. Además de las conclusiones a las que se llegaron en la fabricación del sistema de asistencia cognitiva visual para la nivelación de grúas todo terreno y las referencias de las cuales se obtuvieron de la revisión de literatura que es la fase 1 de la metodología planteado.

En este trabajo se obtuvieron cuatro logros importantes como son la publicación de dos artículos que se encuentran en el anexo A y dos registros de softwares que están en trámite.

1.2 PROBLEMÁTICA

La empresa “Grúas GRISA” desempeña sus actividades en torno a funciones que implican el uso cotidiano de grúas todo terreno en el área de Orizaba y sus alrededores. Esta propuesta de sensor surge con base a una serie de problemas tanto internos como externos de la empresa.

En los factores internos, la empresa actualmente cuenta con una nivelación que carece de supervisión posterior a la nivelación inicial. Por lo tanto, durante la maniobra de la carga, se ignora si los valores de inclinación permanecen dentro del margen aceptado. La figura 1 muestra mediante un mapa conceptual donde se observa la relación directa que se tiene al no contar con un sensor de nivelación con diversos riesgos.

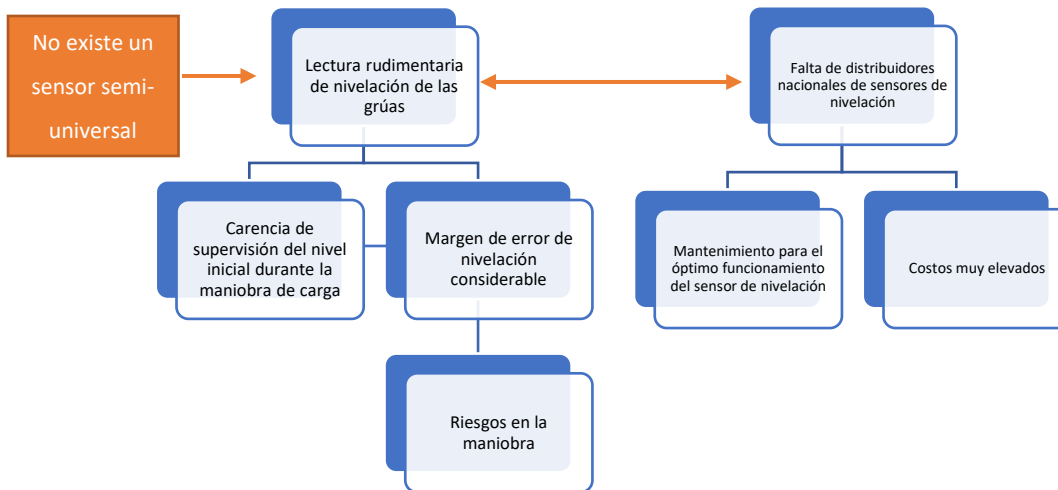


Figura 1 Mapa conceptual de la problemática del proyecto, elaboración propia (2023).

En la actualidad la empresa antes mencionada hace uso de indicadores de nivel manuales, que son colocados en distintos puntos de la grúa para así determinar si la máquina está lista para empezar con la maniobra de carga. Este método, a pesar de que cuenta con fundamentos profesionales comprobables de que la nivelación de la grúa es la adecuada, no maneja una estandarización del proceso de nivelación, el cual es sumamente necesario para comenzar a usar una grúa. Por lo tanto, existe un margen de error por parte del operador o personal encargado de nivelar la plataforma de la grúa que conlleva a riesgos en la maniobra.

Uno de los factores externos es la falta de distribuidores nacionales de sensores de nivelación y mantenimiento para el tipo de grúas Grove. Los únicos distribuidores existentes de la marca se encuentran en el extranjero, motivo que eleva extremadamente los costos ya que requieren de previas citas al solicitar un servicio ya sea de instalación de sensores, de mantenimiento preventivo-

correctivo, los cuales provocan un paro laboral por tiempo indefinido lo que significa una pérdida económica.

Por otro lado, podemos agregar que a nivel global no existe un sensor semi-universal que se pueda adaptar a diferentes modelos de grúas todo terreno. Ya sea utilizando un sensor en cada maquinaria o bien, hacer uso de un mismo sensor solo quitando de una maquinaria y colocándolo en la maquinaria que se utilizará.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La empresa Grúas GRISA es una de las industrias de grúas más grande de la región que brinda servicios integrales para la renta de grúas industriales y vehículos para transporte de maquinaria pesada o de gran volumen. Dentro de su amplia gama de productos y servicios, se encuentran las grúas todo terreno de marcas líderes a nivel mundial como Grove (empresa alemana), sin embargo, los modelos de grúas que utilizan carecen de un sistema de nivelación asistida.

Estabilizar una grúa todo terreno es fundamental, permite evitar accidentes y disminuye el riesgo laboral en las maniobras de la grúa. Se debe tomar en cuenta antes de estabilizar la grúa, que la zona en la que se ubica el equipo sea estable y que no se encuentre ninguna persona u objeto que impida la estabilización del equipo, no se debe confiar en la primera nivelación ya que puede existir hundimiento en algún apoyo en algún momento posterior. Por lo anterior, una vez establecida la nivelación inicial, es preciso corroborar la estabilidad de la grúa levantando la carga de 10 a 15 cm para confirmar la correcta nivelación, en caso de algún hundimiento se debe detener la maniobra para volver a nivelar correctamente la maquinaria.

Las zonas de maniobras de dichas grúas no siempre cuentan con un terreno plano. En muchas ocasiones se debe operar en zonas con terrenos irregulares lo que dificulta al operador la nivelación. Por lo anterior es evidente que un sensor que sea de fácil implementación en diferentes tipos de grúas, de bajo costo, y que ayude en el proceso de nivelación mostrando los valores de nivelación en tiempo real es una herramienta valiosa. Adicionalmente, el contar con una interfaz gráfica fácil de comprender para el operador, y que muestre los valores de nivelación durante todo el proceso de carga notificando con indicadores visuales y sonoros del estado de inclinación durante la maniobra de carga podrá proporcionar las herramientas necesarias al operador de grúas todo terreno para efectuar el proceso de nivelación de la plataforma en terrenos irregulares, otorgando seguridad y confiabilidad al observar los grados de inclinación en tiempo real; disminuyendo el margen de error en la nivelación, tiempo del proceso de nivelación y reduciendo los costos de los sensores y mantenimientos existentes en el mercado.

1.4 HIPÓTESIS

La correcta implementación de un sistema de monitoreo para nivelación asistida de grúas todo terreno, permitiría que los operadores conozcan los valores adecuados para los estabilizadores desde un dispositivo instalado en el interior de la cabina de mando. Dicho dispositivo, proporcionaría indicadores de seguridad visuales y auditivos al operador para efectuar y mantener la nivelación adecuada de la plataforma.

1.5 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema de monitoreo para nivelación asistida de grúas todo terreno.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar documentos con validez científica que respalden y fundamenten la autenticidad y justificación del proyecto mediante contenido teórico de referencias confiables.
- Determinar el sistema de monitoreo que se adapte mejor a las necesidades de grúas todo terreno.
- Seleccionar el lenguaje de programación apropiado para el sistema mediante el estudio e investigación previa.
- Definir los sensores y componentes que se van a utilizar para la adquisición de datos.
- Desarrollar una interfaz gráfica que permita al usuario conocer los valores resultantes.
- Indagar el enlace del hardware y software designados.
- Realizar el diseño de conexión sistema de censado con la interfaz gráfica.
- Implementar el sensor en una grúa proporcionada para pruebas de nivelación de plataforma.

1.7 METODOLOGÍA

Para llevar a cabo la debida realización de un sistema de monitoreo para la nivelación asistida de grúas, con el fin de alcanzar los objetivos planteados en la sección anterior, se propone una metodología que consiste en cuatro fases como lo muestra la Figura 2.

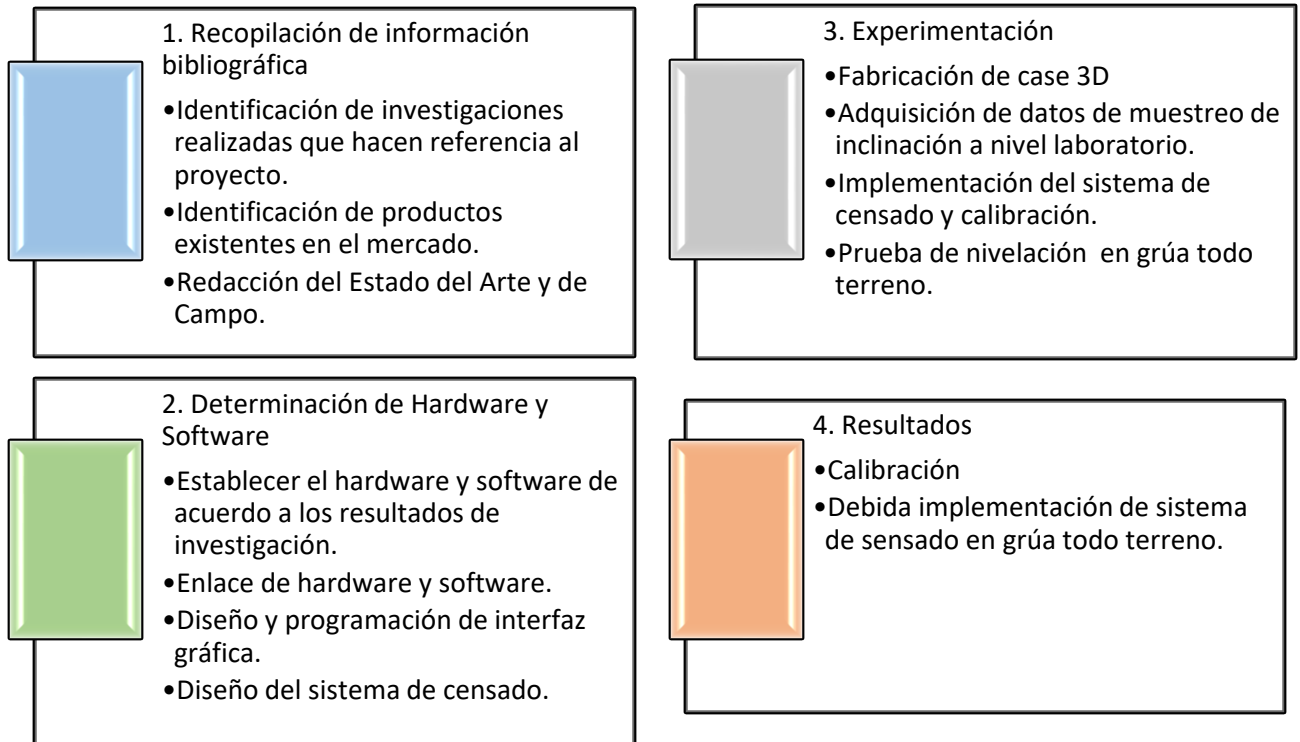


Figura 2 Proceso de la metodología, elaboración propia (2022).

En la primera fase de la metodología, que se refiere a la recopilación de información, se tiene que identificar toda la información necesaria que hace referencia al proyecto basada en investigaciones anteriores. Es esta etapa, la base donde se fundamenta la autenticidad y justificación del proyecto. Esta fase consiste en extraer y recopilar información relevante para adquirir nuevo conocimiento con el que se podrá desarrollar y complementar el trabajo.

En la segunda fase, que es el Estudio de Hardware y Software, es necesario determinar cuáles son los elementos que son los indicados para llevar a cabo el trabajo y estudiar los diferentes tipos de hardware, software y las variables a medir, ya que estas serán la clave para el desarrollo del sistema.

En la cuestión de Hardware se deben analizar diversas características necesarias para poder utilizar dicho hardware en la medición de los valores de inclinación que se desean conocer, como lo es ser de bajo costo sin comprometer el resultado, fácil de adquirir en el mercado, compatibles con el software destinado, de uso libre, disponibilidad de la información adecuada para su uso, orientado al desarrollo de aplicaciones y prototipos desde entornos gráficos, respuesta en tiempo real, contar con comunicación I²C, alimentación adecuada, procesador IMU (unidad de medición inercial).

En esta parte se estudiarán diversos sensores, como galgas, sensores de proximidad, movimiento, presencia, entre otros. Además de indicadores analógicos, tanto, visuales como auditivos.

En lo que respecta a Software, es necesario que este cumpla con los requisitos para poder controlar todos los elementos como sistema operativo, lenguaje de programación, interfaz gráfica y paqueterías y herramientas, de ser necesario determinar el S.O que cuente con los recursos para poder hacer posibles los objetivos.

En esta etapa se busca también que el lenguaje de programación sea más amigable con el hardware elegido y que tenga previa documentación para su facilidad de uso y comprensión; facilitando así el programar el código que se requiere para adquirir los datos de inclinación obtenidos por un sensor de inclinación.

Después de esto, se busca enlazar los elementos de hardware y software, recibiendo valores de un sensor de inclinación y conectar los resultados con la programación correspondiente con la interfaz gráfica que se muestra al usuario y los indicadores visuales y auditivos. Para adecuar el sistema de censado a las dimensiones de la base de la grúa y bajo las condiciones que debe ser un sistema que será usado en la intemperie, bajo costo y de peso y volumen reducido, se debe diseñar la parte de la cubierta (case 3D) y montaje de dicho sistema, haciendo uso de un programa de diseño 3D tomando en cuenta las dimensiones del hardware y los tipos de conexión para la comunicación con el software.

En la tercera fase que es referente a la experimentación, teniendo en cuenta las dimensiones de la parte de hardware, se diseñará una cubierta de un material elegido, también se llevará a cabo la adquisición de datos de muestreo de inclinación, se llevaran a cabo pruebas a nivel laboratorio y, por último, se llevará a cabo el montaje de dicho sistema en una grúa de baja capacidad para pruebas de nivelación de la plataforma en terrenos irregulares.

En la cuarta fase que se refiere a los resultados se realizará la calibración del sistema de censado y la implementación del sistema de censado en alguna grúa Grove que la empresa Grúas GRISA tenga en disposición, debido a la alta demanda de sus maquinarias.

1.8 ESTADO DEL ARTE

Como un primer acercamiento al estado del arte, se llevó a cabo una búsqueda semántica empleando los términos más comunes en el ámbito de desarrollo electrónico y que sean referentes a grúas. Es necesario hacer la aclaración que, debido a que la mayor parte de la literatura científica se encuentra en idioma inglés, la búsqueda se realizó en dicho idioma. Para la búsqueda semántica se emplearon los términos: *crane*, *sensor*, *tilt*, *advances* y las diversas combinaciones entre los términos, la búsqueda se llevó a cabo dentro de una base de datos de términos científicos [3]. Los siguientes trabajos de investigación giran en torno al uso de sensores que incluyen acelerómetros, giroscopios y magnetómetros con el fin de lograr la estabilización de distintos tipos de plataformas o medios de transporte, ver figura 3.

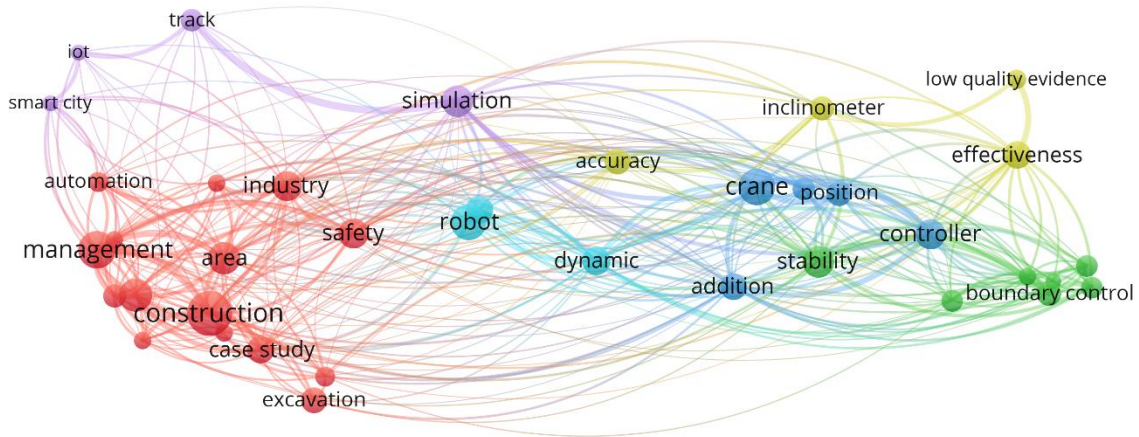


Figura 3 Análisis lingüístico de artículos publicados en los últimos cinco años y su respectiva relación mediante el software VOSviewer [3], elaboración propia (2023).

Si bien los sensores son de gran utilidad en muchas ramas, conocer el uso que se le puede dar en distintos sectores nos brinda un panorama más amplio de su uso y beneficios. Es por ello que, en el presente estado del arte, encontramos trabajos que abarcan desde plataformas robóticas móviles [4], sistemas de telemetría para monitorear el movimiento de los barcos, hasta el tema principal de este trabajo que consiste en la estabilización de grúas todo terreno.

De acuerdo con un trabajo realizado en conjunto con la Escuela Naval Militar de España y la Universidad de Vigo [4] se llevó a cabo un sistema de telemetría autónomo, en tiempo real para monitorear el movimiento de los barcos basados en sensores inerciales, fácil de implementar y sobre todo un sistema de bajo costo en comparación con los ya existentes que en su mayoría son diseños personalizados y cuyas piezas y mantenimiento son exageradamente costosos.

Este trabajo está compuesto por un sistema dividido en dos segmentos: una instalación ubicada en tierra y un equipo a bordo de la embarcación en cuestión. El equipo a bordo se instala en diferentes partes del barco y se encarga de recopilar, almacenar y transmitir datos en tiempo real a la instalación que se encuentra en tierra, como se muestra en la Figura 4. Para lograr obtener los datos de monitoreo, se utilizaron tres módulos IMU que constan de tres magnetómetros triaxiales, tres acelerómetros axiales y un giroscopio que forman el sensor de inercia. La redundancia en los sensores hace que, al pasar los datos a través de un filtro, estos sean de alta precisión y se eliminen las perturbaciones de alta frecuencia.

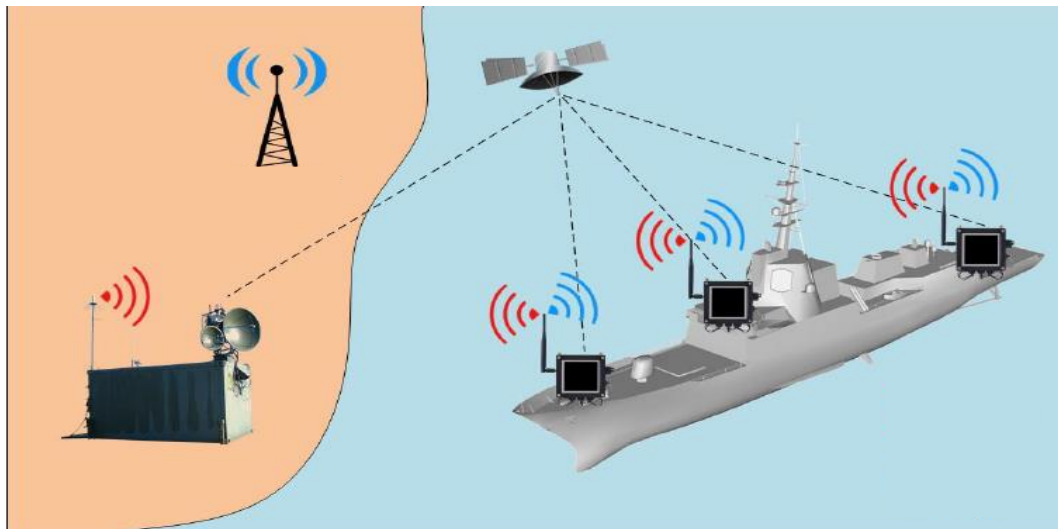


Figura 4 Vista general del funcionamiento del sistema, reproducido de [4] con número de permiso 54654654654654.

Los tres dispositivos MPU-9250 (InvenSense, San José, CA, EE. UU.) que conforman el bloque IMU están compuestos por acelerómetros, giroscopios y magnetómetros MEMS (*Micro Electro-Mechanical Systems*, por sus siglas en inglés). Sin embargo, el rendimiento de este tipo de dispositivos se degrada por defectos de fabricación, asimetrías en las estructuras producidas, desalineación de los mecanismos de actuación, desviaciones del centro de masa del centro geométrico y estrés térmico formado en la soldadura del sensor durante el proceso de soldadura por reflujo, errores de desalineación del paquete de IMU y errores de desalineación de sensor a sensor de IMU. Por lo tanto, se requiere un procedimiento para calibrar los sensores de manera efectiva para reducir los errores y aumentar la precisión del bloque IMU.

El procedimiento de calibración propuesto que se utiliza por su simplicidad, que incluye un esquema de calibración y un algoritmo de calibración. El procedimiento consiste en colocar el bloque IMU en sus seis posiciones estándar. En cada una de las seis posiciones, la salida del acelerómetro, giroscopio y magnetómetro se medirá durante unos segundos y luego se promediará para reducir el ruido de las mediciones. Este procedimiento se realiza automáticamente, como se muestra en la Figura 5, utilizando un posicionador de tres grados de libertad (DoF).

La colisión entre las plumas de las grúas automáticas y diversos obstáculos presentes en el entorno industrial o de construcción, es un problema muy común, que pueden ocasionar graves daños tanto para el equipo de trabajo, como para el operador de la grúa [5]. En vista de esta situación, una posible solución y estrategia para evitar este tipo de percance es por medio del desarrollo de tecnología 6G propuesta por Fang y colaboradores [5] se puede obtener datos entre múltiples grúas y compartir en tiempo real la información para poder controlar de forma más precisa la maquinaria y así garantizar la seguridad en general.

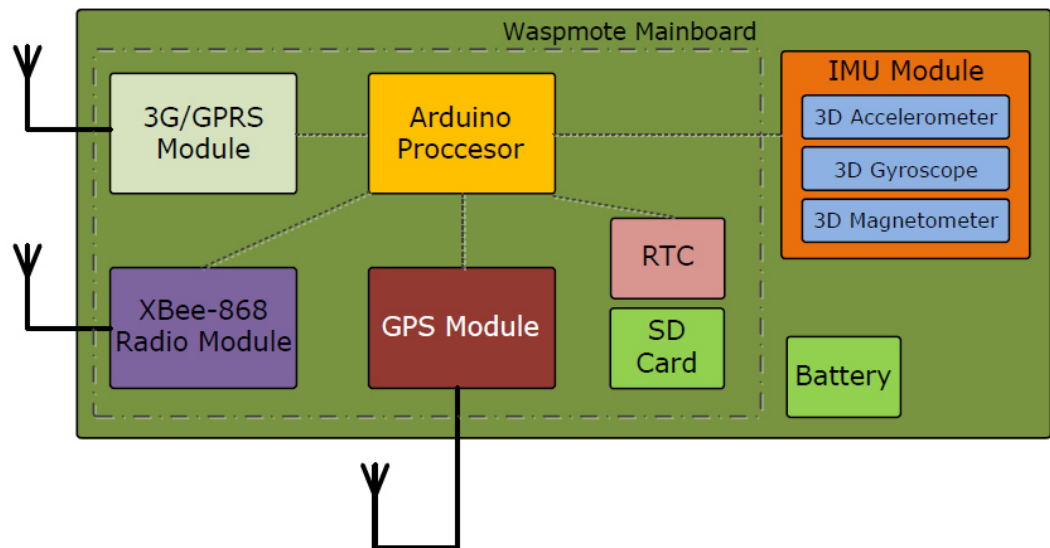


Figura 5 Composición del nodo de medición, reproducido de [4] con número de permiso 54654654654654.

El elemento clave en este trabajo es una estrategia que solucione el cálculo de la distancia entre el obstáculo y la pluma por medio de un modelo cinemático que permita determinar la posición y orientación del extremo de diversos objetos. Para lograr ubicar la posición espacial del obstáculo, se instalan sensores que incluyan una o más cámaras, un sensor de campo eléctrico y un radar de ondas milimétricas. Con estos sensores se logra determinar la longitud de la distancia entre la pluma

y el obstáculo, el ángulo de inclinación y el rumbo del ángulo de la longitud entre la máquina y el objeto por medio de coordenadas X , Y y Z que, en conjunto, podrán describir completamente la posición relativa entre la pluma de la grúa y el obstáculo. Para lograr evitar la colisión, se establece un radio de seguridad alrededor del obstáculo que no le permita a la pluma ingresar más allá de los valores establecidos y únicamente le sea posible moverse hacia atrás de ese radio de seguridad.

Las grúas son consideradas como uno de los equipos de construcción más peligrosos debido a la complejidad del uso de estas, dada la magnitud de estas máquinas, además del espacio que ocupan en un área de trabajo, los posibles accidentes o pérdidas materiales están a la orden del día [5]. Son varios los motivos que pueden generar accidentes relacionados con las grúas, por lo tanto, con el fin de mejorar la conciencia situacional de los operadores, se desarrolló un marco de un sistema de asistencia de seguridad para operaciones de levantamiento de grúas móviles habilitado por monitoreo de movimiento de grúa en tiempo real, análisis de peligros proactivo y visualización 3D.



Figura 6 Configuración del sensor para captura de movimiento crítico, basado en [5].

La estructura para este sistema de asistencia requiere de un modelado de las condiciones del sitio (previo a cualquier tipo de manipulación de la grúa), para la asistencia en tiempo real se llevó a cabo una captura de los movimientos críticos por medio de un módulo de manipulación (que mide los codificadores rotativos con ángulos y longitudes) y un módulo de suspensión que con sensores IMU que permiten una orientación de la posición (los movimientos de balanceo de la carga se pueden simplificar a un movimiento pendular típico de 3 dimensiones (3D) y dada la orientación angular medida en cada eje y la longitud del cable, la posición estimada de la carga relativa al punto fijo se puede calcular convirtiendo las medidas del ángulo de Euler a coordenadas cartesianas en el sistema de coordenadas local). Estos módulos generan una sincronización de datos que a su vez permiten el análisis proactivo de peligros que se pueden apreciar mediante una tableta que funciona como un dispositivo de cálculo para el análisis de peligros mientras muestra al operador el sitio del ascensor de reconstrucción.

En el artículo titulado “la evaluación de la estabilidad como criterio de estabilización de la trayectoria de movimiento de los elementos de trabajo de la grúa móvil” [6], de la Revista Internacional de Mecánica Aplicada e Ingeniería (*Int. J. of Applied Mechanics and Engineering*) se establecen criterios importantes a considerar cuando se busca estabilizar una grúa ya que la carga de grandes pesos en condiciones inadecuadas puede conducir a la pérdida de la estabilidad necesaria para funcionar adecuadamente y provocar la volcadura de la grúa.

En este nuevo enfoque, por medio de un sistema de simulación a través de CAD/CAE se evalúa la eficacia de la grúa para diversas condiciones de carga y trayectorias de desplazamiento. Para poder determinar la estabilidad de una grúa (en este caso se trató de un modelo HIAB XS 111) se consideraron los siguientes elementos básicos:

- Modelo paramétrico de todos los elementos del sistema de la grúa en el programa CAD para su configuración.
- Determinación de las condiciones de estabilidad del sistema (ecuaciones que constituyen un modelo matemático para calcular la trayectoria de los centros de masa/gravedad de los elementos del sistema de la grúa, la reacción de la base en el sistema de estabilizadores, el torque de estabilización y el torque de vuelco.
- Construcción de un modelo cinemático de la grúa y realización de pruebas de simulación en el sistema CAD/CAE.

- Análisis de las cantidades cinemáticas y dinámicas del sistema de grúa durante la manipulación en relación con un equilibrio constante (estabilidad).
- Optimización de las trayectorias de los desplazamientos de los sistemas de trabajo de la grúa para asignaciones específicas teniendo en cuenta el indicador de seguridad de movimiento considerando las condiciones límite. (Al conocer el valor del indicador de seguridad durante los movimientos de trabajo, es posible realizar una evaluación del riesgo de pérdida de la estabilidad de la grúa y seleccionar la trayectoria de desplazamiento óptima.)

Una vez obtenidos los datos matemáticos de la simulación, se puede determinar si se cumplen las condiciones de estabilidad y así establecer una trayectoria de desplazamiento óptima o bien hacer las correcciones pertinentes para que los estabilizadores no sufran algún tipo de ruptura y así se encuentren totalmente seguros.

El trabajo aportado por los autores Feliu-Talegon, San-Millan y Feliu Batlle trata de una forma novedosa para la implementación de una base móvil para manipuladores ligeros como lo es, por ejemplo, un brazo robótico [7]. Generalmente, este tipo de actuadores cuentan con múltiples enlaces montados en una plataforma móvil, sin embargo, la innovación por medio de este trabajo consiste en el desarrollo de un nuevo modelo cinemático y el diseño de una estrategia de control del sistema. Existen muchos factores a considerar dentro de estos actuadores, uno de ellos es la poca capacidad de almacenamiento de energía, por lo tanto, es necesario incorporar lo menos posible en peso para tratar de disminuir el consumo energético y así, lograr un mayor tiempo de trabajo.

En dicho trabajo se presenta un dispositivo mecánico capaz de transportar grandes manipuladores ligeros. Sus principales objetivos son: transportar el manipulador, incrementar la estabilidad del sistema cuando alcanza un objetivo específico y ayudar en el posicionamiento de la punta del manipulador. Si bien es cierto que hay muchos modelos existentes, la innovación implementada en esta plataforma móvil consiste en la inclusión de cuatro patas controladas que agrandan el polígono de estabilidad, evitando el vuelco de la plataforma.

Uno de los componentes que forma parte de la plataforma móvil es un sensor inercial llamado ADIS16448 que incluye un giroscopio triaxial, un acelerómetro y un magnetómetro triaxiales. Dicho sensor fue colocado en la parte central de la base de la plataforma móvil para medir la orientación de la base de la misma. El método empleado para describir la orientación de los marcos utilizados son los conocidos ángulos de balanceo (W), cabeceo (Y) y guiñada (Z) sobre ejes

fijos. Por otro lado, el control y análisis de la información se obtiene por medio de un controlador embebido de alto rendimiento en tiempo real (NI-PXIe-1082). Finalmente, el modelo cinemático del sistema se puede obtener asignando diferentes marcos de coordenadas.

En resumen, se puede decir que esta nueva plataforma móvil cumplió al realizar las pruebas con un prototipo experimental demostrando que este control de bucle abierto de inclinación y postura proporciona un posicionamiento lo suficientemente preciso para no únicamente las plataformas móviles, sino muchas aplicaciones más.

1.9 ESTADO DEL CAMPO

Hace algunos años, los inclinómetros (también conocidos como sensores de inclinación, calibrador de inclinación o medidor de inclinación) era un péndulo que cambiaba la dirección mediante el movimiento de inclinación. Este cambio de dirección se evaluaba entonces de forma óptica, capacitiva, inductiva o electrónica [8]. Actualmente, los inclinómetros están perfectamente diseñados y adecuados para detectar pequeños ángulos de rotación con respecto al centro de la tierra y enviar esta información de retroalimentación en forma de una señal de posición a un tipo de control que permita usar dicha información de la mejor manera.

Hoy día existen diversas empresas que desarrollan inclinómetros para diversos usos, una estas de estas empresas dedicadas al desarrollo de sensores, es SICK. Una empresa alemana que lleva más de 75 años en el mercado global. SICK es uno de los fabricantes líderes de sensores inteligentes que trabajan en tiempo real, y que otorgan grandes soluciones en el ámbito industrial; por ejemplo, automatizar sistemas de producción. Su amplio catálogo de productos incluye diversos sensores, controladores, codificadores, lectores de código, analizadores, escáneres, además de accesorios y servicios los cuales constituyen la base perfecta para llevar a cabo trabajos de control seguro y procesos de manera eficaz. En la parte de protección a personas y para la prevención de accidentes cuenta con entrenadores calificados y cursos de forma remota y presencial. Trabajar con estos dispositivos diseñados bajo las normas se tiene seguridad permite trabajar con mayor certeza, y con la garantía de que no generaran daños medioambientales. Como es de saber, existen una gran variedad de aplicaciones por lo que sus soluciones que ofrecen este tipo de empresas deben ser diseñadas con carácter multidisciplinar. De acuerdo con la página web de Sick [9] acerca de sus sensores de inclinación para tareas de posición en grúas (ver Figura 6), se menciona lo siguiente:

“para evitar daños por sobrecarga o vuelco, se usan soluciones de sensores destinadas a limitar el par de carga en las grúas móviles”, estos sensores son óptimos en estas circunstancias donde existen vibraciones.

En el mercado existen diversos sensores de inclinación como el TMM88 de la marca Sick, que trabaja en 1 y 2 dimensiones, este último es el de nuestro interés. Además, es adecuado para facilitar a la grúa móvil la nivelación automática, dispone de sensibilidad cruzada compensada y supresión de vibraciones parametrizables y si es colocado en el brazo de la grúa permite detectar la posición de

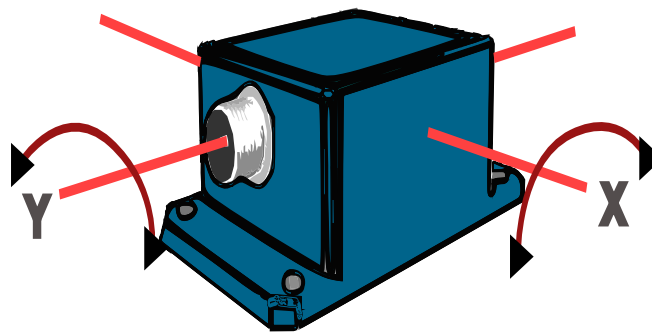


Figura 7 Sensor SICK TMM88B-AKC090, basado en [9]

este ya que está diseñado para tecnología de elevación. Hablando de su campo de medición existen los que trabajan a $\pm 90^\circ$ y de 360° y el punto cero de ajuste libre permiten una aplicación flexible en diversas situaciones de montaje, de dimensiones pequeñas ($90\text{mm} \times 58\text{mm} \times 30\text{mm}$) con una precisión de 0.01° , con carcasa de aluminio y con un peso de 200 gramos.

Siko, también es otra empresa también de origen alemana que cuenta con años de experiencia en la producción de sensores de distintos tipos [10]. Unos de ellos son los sensores de inclinación en los modelos IKM360R, IK360 e IK360L cuyos valores son transmitidos mediante RS232, CANopen o también señales analógicas a un control supraordenado. El sensor IKM360R de Siko, es un sensor de inclinación de seguridad desarrollado especialmente para su empleo en máquinas móviles, el cual se puede utilizar en aplicaciones donde se necesiten seguridades críticas, cuenta con una estructura especialmente robusta, un interfaz redundante opcional CANopen o CANopen Safety y está perfectamente adecuado para el duro trabajo en máquinas móviles. Cuenta con sensores de un eje que va de los 0° a los 360° y de dos ejes que va hasta los $\pm 80^\circ$, con dimensiones y características técnicas que se especifican en la tabla 1.

Cuando se habla de inclinómetros se habla sensores de inclinación con tecnología MEMS (Micro-Electronic-Mechanical System, por sus siglas en inglés), formado de una serie de electrodos en un chip sellado herméticamente y su potencial entre los electrodos se mide capacitivamente. La detección se realiza tanto en un eje de 0° a 360 °, con una precisión máxima del sistema de 0.1 ° y una resolución de 0.01 °. Los datos de medición se indican directamente de forma analógica de 0 a 10 V o de 4 a 20 mA, digital por el puerto serial RS-232 o mediante CANopen que es un Bus con un máximo de 127 nodos.

En general, las ventajas que busca tener en los inclinómetros es que se pueden programar mediante software libres, diversos parámetros como lo son los filtros, rotación y punto cero mediante un PIN por separado mediante la función Teach-in.

Tabla 1 Datos técnicos del sensor de inclinación IKM360R, basado en [11].

Características	Datos técnicos
Voltajes de operación	8 - 36 V DC
Precisión del sistema	$\pm 0.2^\circ$ (a 20°C) y $\pm 0.8^\circ$ (>20°C)
Carcasa	Plástico/acero fino
Tipo de montaje	Montaje de 3 puntos
Peso	0.149 kg
Dimensiones	60 mm × 35.5 mm × 70 mm
Largo × Ancho × Alto	

CAPÍTULO II. MICROCONTROLADORES Y SENSORES

2.1 RESUMEN

En este capítulo se presenta lo referente a los microcontroladores, así como los sensores empleados en este trabajo, en particular se presenta una introducción general a los microcontroladores, en particular, arduino nano y Raspberry pi 4. Se describe de una forma breve como la plataforma de Arduino se enlaza mediante el IDE y Wiring para crear una interfaz gráfica mediante lenguaje de programación basado en C y en C++.

Los resultados de este capítulo se pueden apreciar en forma de la interfaz gráfica que se muestra al usuario para que pueda visualizar las diferentes partes que componen el sistema realizado. El empleo de Qt Designer, facilita a los desarrolladores de software, la creación de interfaces de usuario robustas y atractivas para sus diferentes necesidades y aplicaciones.

2.2 DESARROLLO

Un microcontrolador también conocido como circuito integrado es el principal componente de una aplicación embebida que controla elementos de entrada/salida, procesador y memoria (*Flash* y *RAM*). Su función es procesar información y automatizar procesos [12].

Existen diversos microcontroladores y lenguajes de programación, pero solo nos enfocaremos en Arduino nano con lenguaje de programación basado en Wiring y Raspberry pi 4 con lenguaje de programación Python 3.

Se entiende por programación a un conjunto de instrucciones que sigue el ordenador para realizar algún tipo de tarea, está formada por signos, palabras y símbolos permitiendo la interacción entre el programador y el ordenador. Dichas instrucciones están escritas en un lenguaje de programación que son traducidas a lenguaje maquina con la finalidad de ser interpretadas y ejecutadas por el ordenador [13].

2.2.1 MICROCONTROLADOR 1

El primer microcontrolador que se usa es un Arduino Nano de hardware y software libre, además de fácil comprensión requerida para proyectos electrónicos. Está constituido por un circuito programable y un IDE (Entorno de Desarrollo Integrado, por sus siglas en ingles *Integrated*

Development Environment) instalado en una computadora para compilar y cargar el código al Arduino [14].

Una de las características de Arduino es poseer la facultad de leer entradas (luz de sensor, temperatura de sensor, etc.), permite decidir qué hacer con los valores obtenidos enviando una serie de instrucciones al microcontrolador, para ello se utiliza el lenguaje de programación Arduino basado en Wiring y el software de Arduino (IDE) basado en Processing [15].

El Arduino nano es una opción ideal a usar como microcontrolador 1 ya que cuenta con una gran comunidad de usuarios y desarrolladores, cuenta con pequeñas dimensiones, su entorno es multiplataforma, un lenguaje de programación de fácil comprensión, de bajo costo, de hardware y software libre [14]. En la tabla 2 se muestran las especificaciones del Arduino Nano [16].

Tabla 2 Datos técnicos del microcontrolador 1, basado en [16].

Características	Datos técnicos
Microcontrolador	ATmega328
Arquitectura	AVR
Tensión de funcionamiento	5V
Memoria flash	32 KB de los cuales 2 KB son utilizados por el gestor de arranque
SRAM	2 KB
Velocidad de reloj	16 MHz
Pines de entrada analógica	8
EEPROM	1 KB
Corriente CC por pines de E/S	40 mA (pines de E/S)
Voltaje de entrada	7 - 12 V
Pines de E/S digitales	22 (de los cuales 6 son PWM)
El consumo de energía	19 mA
Tamaño de la placa de circuito impreso	18 × 45 mm
Peso	7 gramos

2.2.2 MICROCONTROLADOR 2

El siguiente microcontrolador que se usa es Raspberry pi 4 que tiene la función de un ordenador compacto de alto rendimiento, versátil, de bajo costo que se puede usar para una amplia gama de proyectos, puede ser utilizado desde centro de medios, sistemas de automatización de hogares hasta aplicaciones de robótica e internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés). Raspberry pi 4 puede utilizarse con mouse y teclado estándar, también se puede visualizar y manipular vía remota [17].

Raspberry pi 4 es una opción ideal a usar como microcontrolador 2 ya que es sencillo de utilizar, de hardware y software libre, trabaja con diversos sistemas operativos, por ejemplo: Raspbian, Kali Linux, Pidora, Windows 10; su lenguaje de programación (Python) es de fácil comprensión, tiene dimensiones pequeñas y además cuenta con entradas y salidas periféricas que pueden ser utilizadas para desarrollo de software para sistemas embebidos [17].

Tabla 3 Datos técnicos del microcontrolador 2, basado en [18].

Características	Datos técnicos
Procesador	Broadcom BCM2711, Cortex-A72 de cuatro núcleos (ARM v8) de 64 bits a 1,8 GHz
SDRAM	LPDDR4-3200 de 8 GB
Conectividad	2,4 GHz y 5,0 GHz IEEE 802.11ac inalámbrico, 2 puertos USB 3.0; 2 puertos USB 2.0.
GPIO	40 pines estándar de Raspberry Pi
Video	2 × puertos micro-HDMI (compatible con hasta 4kp60)
Soporte de tarjeta SD	Ranura para tarjeta micro-SD para cargar sistema operativo y almacenamiento de datos
Voltaje de entrada	5V CC mediante conector USB-C (mínimo 3A) 5 V CC a través del cabezal GPIO (mínimo 3 A)
Temperatura de funcionamiento	0 – 50°C

2.2.3 INTERFAZ GRÁFICA

Para llevar a cabo el diseño de las interfaces graficas se hace uso de la herramienta Qt Designer. Esta herramienta otorga a los desarrolladores diseñar, editar formularios, cuadros de dialogo,

herramientas, crear interfaces sin tener que escribir código, Qt genera automáticamente el código para los elementos de la interfaz y se realiza de manera muy visual con las herramientas de arrastrar y soltar, por lo que permite pueden crear diseños complejos de forma rápida y sencilla sin la necesidad del código subyacente. Qt Designer contiene una amplia gama de herramientas la cual incluye botones, etiquetas, casillas de verificación, botones de opción, cuadros combinados y editores de texto brindando la facilidad para que el usuario pueda crear herramientas personalizadas ocupando el marco Qt y así tener una vista previa que facilita al desarrollador ver la interfaz de usuario final [19].

2.3 EXPERIMENTACIÓN

Para llevar a cabo la programación en ambos microcontroladores es necesario utilizar softwares de uso libre y que estén enfocados en la dirección de objetos para que se pueda llevar a cabo la adquisición de datos del módulo IMU y el sensor de temperatura, además de aplicar la interfaz gráfica y los indicadores de forma remota con los que debe contar el sistema embebido para nivelación en tiempo real.

2.3.1 PROGRAMACIÓN DE MICROCONTROLADOR 1

El lenguaje de programación utilizado para programar el controlador 1 está basado en Wiring que es una plantilla, esquema o estructura que permite trabajar de una forma más sencilla y es de código abierto. Wiring está escrito en los lenguajes de programación C y C++, debido a esto su sintaxis es muy parecida a estos, una de sus ventajas es la gran variedad de microcontroladores que soporta, uno de ellos es ATmega que es usado por Arduino nano. Wiring al igual que Arduino cuenta con un IDE basado en Processing, donde se pueden programar los microcontroladores de forma libre y multiplataforma. Ahora bien, para poder escribir un código se requiere un entorno IDE que está basado en Processing para lograr crear, compilar y cargar el código [20].

El lenguaje de programación C, es un lenguaje de medio nivel que permite manejar de una manera eficiente los recursos del microcontrolador y es un lenguaje compilado que permite crear un archivo que después se puede cargar al microcontrolador.

El lenguaje de programación C++, es una extensión del lenguaje C con el objetivo de manipular objetos, con la ventaja de ser multiplataforma y un lenguaje actualizado de alto rendimiento. Entre

sus principales características se encuentra brindar una gran compatibilidad con bibliotecas, puede ser orientada a objetos y de compilación rápida [21].

En ambos lenguajes de programación se hace uso de librerías, códigos o programas creados por terceros, con funciones que permite utilizar componentes de una manera más fácil ya que se pueden utilizar con un código breve entendible y de fácil comprensión al programador [22].

2.3.1.1 MÓDULO IMU

Para llevar a cabo el monitoreo de los grados de inclinación de la grúa, es necesario incorporar en el sistema un Giroscopio IMU (Unidad de movimiento inercial) 6050 (ver figura 8) como se dijo anteriormente, utiliza tecnología MEMS. Todo esto nos permite conocer en tiempo real la estabilización de la grúa.

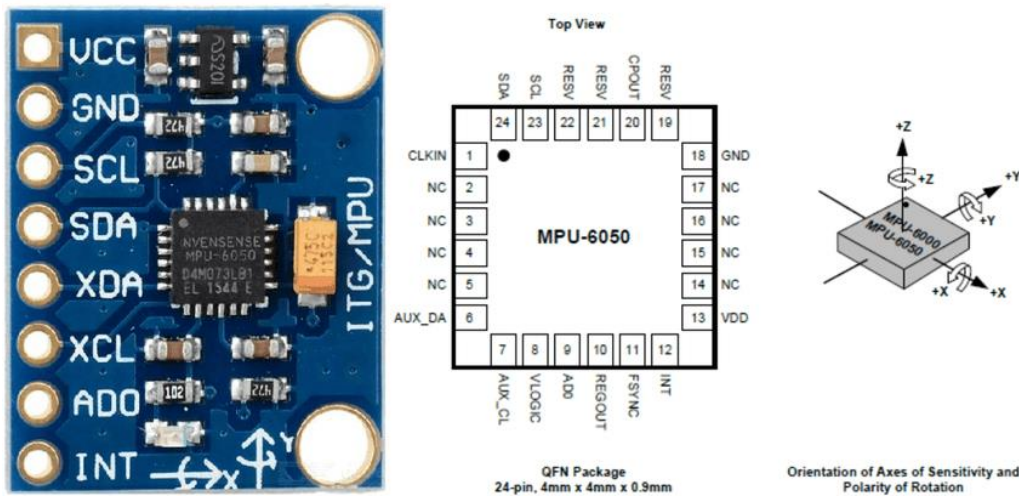


Figura 8 MPU6050 con la disposición de pin y orientación de ejes de sensibilidad y polaridad de rotación.

2.3.1.2 SENSOR DE TEMPERATURA

Se hace uso de un sensor de temperatura LM35, el cual es un sensor análogo que sirve para monitorear temperaturas que van de -55°C a 150°C, con el cual se obtiene un voltaje linealmente proporcional a la temperatura de 10 mV/°C; por ello se realiza la conversión con la ecuación 1:

$$Temperatura = \frac{ValSen \times 5 \times 100}{1023} \quad \text{Ecuación 1}$$

Siendo, Va/Sen el valor de entrada del sensor, con un voltaje interno de 5 V, 1024 que se refiere a los valores posibles. De donde tenemos una exactitud de 0.5 grados y una precisión de 4.8810 mV/°C.

2.3.2 PROGRAMACIÓN DE MICROCONTROLADOR 2

Por medio de la programación en Python, que es un lenguaje orientado a objetos al igual que C++ y adquirido en el programa de estudio y que además es de uso libre, se logra convertir en el marco QT que se envía a la interfaz. En esta parte se diseña una interfaz gráfica y los indicadores pensando en las necesidades del usuario, mostrando así diferentes vistas de los valores de interés como son los ángulos de inclinación en cada eje de diversas formas y la temperatura a la que se encuentra trabajando el sistema.

En el microcontrolador 2 se usan librerías para hacer uso de funciones, de imágenes QT, temporizadores, graficas en tiempo real, vectores con corrimiento, para el módulo I²C con las que cuenta Python, luego se declara las variables globales de una longitud de corrimiento máxima de 100 datos, seguido de la importación de la interfaz gráfica de QT para luego generar la ventana principal de la que hablaremos en la sección 2.3.3.

2.3.3 INTERFAZ GRÁFICA

En esta parte se diseña una interfaz gráfica pensando en las necesidades del usuario, mostrando diferentes vistas de los valores de interés. Como lo son los ejes "X" y "Y" en forma de barra y de número, gráfico y la temperatura también en número e icono. Como se muestra en la figura 9, la parte izquierda de la interfaz la cual se encuentran dos barras una en posición horizontal indicando el valor de inclinación en el eje X (izquierda-derecha) y otra barra en posición vertical indicando el valor de inclinación en el eje Y (adelante-atrás) y se utiliza una imagen en el centro haciendo alusión a la grúa. En la parte central de la interfaz encontramos los valores de "X" y "Y" en números enteros y debajo de ellos un indicador preventivo de color verde que cambiará a rojo en caso necesario, en la parte derecha superior encontramos con una vista atractiva utilizando una herramienta llamada PlotWidget, donde se observan los valores con corrimiento y actualización de los nuevos valores entrantes en forma de gráfica, con línea roja los grados de inclinación en el eje "X" y en línea azul los grados en el eje "Y". Además, debajo de dicha gráfica se tiene una pequeña tabla donde se almacenan los valores de interés usando una cifra significativa y, por último, en la parte

inferior para colocación de los valores de temperatura en número con dos cifras significativas y en icono.

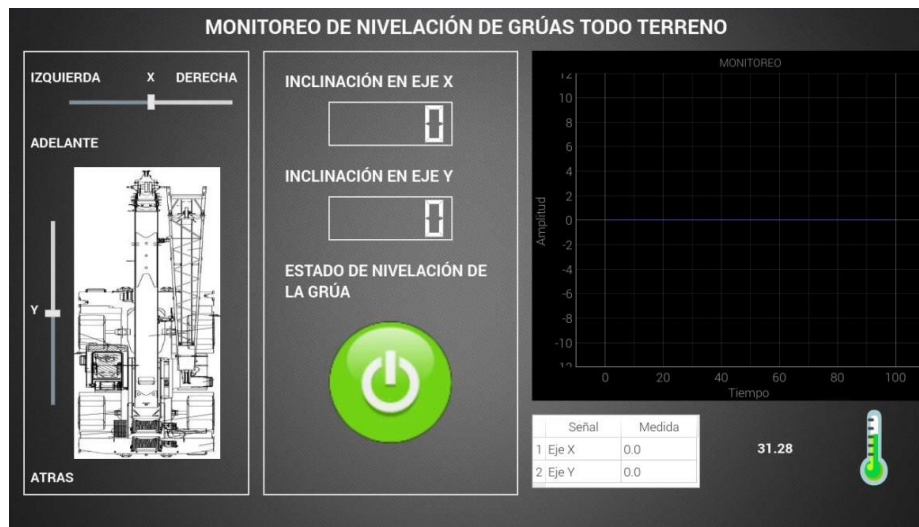


Figura 9 Captura de la interfaz gráfica del usuario.

2.4 RESULTADOS

En la figura 10 se muestra el esquema del proceso por el que pasan los datos de cada sensor, se indica que la entrada de datos del sensor IMU es leída, promediada, debidamente filtrada y enviada al microcontrolador 2. De igual manera los datos del sensor de temperatura (LM35) que ingresan son leídos y son seguidos de una conversión análogo-digital y son enviados microcontrolador 2.

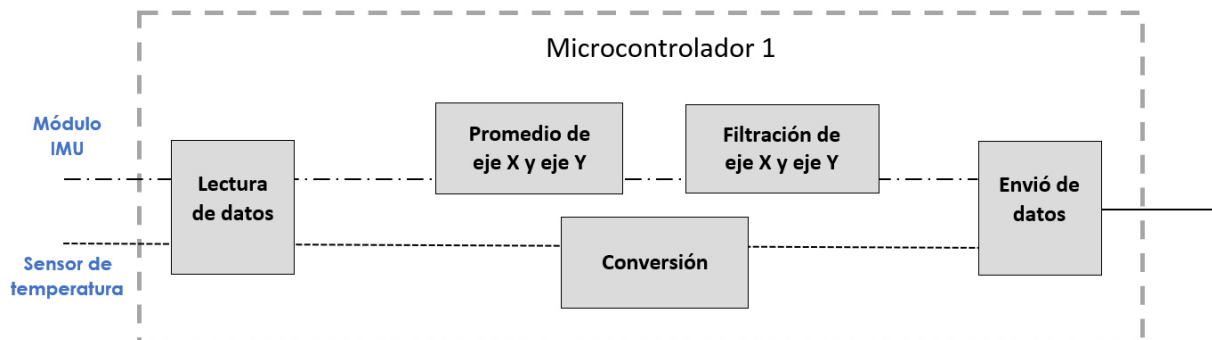


Figura 10 Esquema de los procesos del microcontrolador 1 a los sensores.

Para lograr esto se requirió de librerías específicas como son: `#include "I2Cdev.h"`, `#include "MPU6050.h"` y `#include "Wire.h"`. Para leer los valores de temperatura del puerto analógico se utiliza el siguiente código:

```
#define LM35 A6
```

```
pinMode(LM35,INPUT);  
ValSen = analogRead(LM35):
```

De la ecuación 1 queda programada de la siguiente forma:

```
Temperatura = (ValSen * 5.0 * 100.0)/1023.0;
```

Debido a las temperaturas a las que trabajan las grúas en la intemperie es normal que el sensor diseñado se eleve a unos cuantos grados más. Por ello; no es necesario aumentar la precisión y sacrificar trabajar a temperaturas mayores.

Luego se realiza el promedio para el eje "X" y "Y" tomando paquetes de 40 muestras, el cual se muestra a continuación.

```
const int numReadings = 40;  
int readings[numReadings];  
int index = 0;  
int total = 0;  
float averageX = 0;
```

El siguiente paso es filtrar los valores obtenidos de los ejes "X" y "Y".

```
total = total - readings[index];  
readings[index] = accel_ang_x_deg;  
total = total + readings[index];  
index = index + 1;  
if (index >= numReadings)  
    index = 0;  
averageX = total / numReadings;
```

Para finalizar se debe enviar mediante el puerto serial cada valor separado por comas, por ejemplo

```
Serial.println(String(Temperatura) + "," + String(averageX) + "," + String(averageY)
```

En la programación del microcontrolador 2 las variables globales son asignadas al módulo IMU usando las siguientes líneas de código con la función de que es una función de corrimiento que va desde los valores reales de cero a cien.

```
Y = deque([0], maxlen = 100)  
Y2 = deque([0], maxlen = 100)
```

Siendo Y el valor de Gy y Y2 el valor de Gx, se usan las siguientes líneas de código para que la barra X y Y adquiera los valores correspondientes.

```
self.XSLIDER.setValue(int(Gx))
self.YSLIDER.setValue(int(Gy))
```

y para generar el gráfico es mediante las siguientes líneas de código, donde el ángulo de inclinación en Y será en línea de color rojo y en X será visualizada en color azul.

```
self.PLOT.plot(Y, pen='r', clear=True)
self.PLOT.plot(Y2, pen='b')
```

además, cuando el ángulo de giro ya se en el eje X o en el eje Y, sea $\geq 6^\circ$ y $\leq -6^\circ$ se colocará en rojo el indicador circular verde que en la figura 9, y el indicador de la temperatura pasará de verde a rojo cuando supere los 50°C en el sistema.

En la parte del gráfico se muestra en el eje X el tiempo que va de cero a cien y en el eje Y se muestra el ángulo de giro que va de $\pm 10^\circ$ que es suficiente para los grados que de inclinación que se trabaja en las grúas, mediante las siguientes líneas de código.

```
self.PLOT.setXRange(0,100)
self.PLOT.setYRange(-10,10)
```

CAPÍTULO III. ELECTRÓNICA

3.1 RESUMEN CAPÍTULO

En este capítulo se muestra la forma de llevar a cabo el hardware controlado por el software descrito en el capítulo anterior, se muestran todas las conexiones hechas a los diferentes microcontroladores. En este capítulo se aborda de manera breve el diseño y fabricación de cables de conexión especial necesarios para poder llevar a cabo es las conexiones requeridas. Dichos cables fueron fabricados debido a que no se encuentran disponibles en el mercado cables que cumplan con las características y requerimientos técnicos para esta aplicación.

Adicionalmente, en este capítulo se describe la implementación de un sistema de energía de reserva (UPS) necesario para poder proveer de energía eléctrica al sistema desarrollado cuando se interrumpe la alimentación de energía principal.

3.2 DESARROLLO

En la parte de la electrónica del sistema embebido requiere conexiones específicas entre ambos microcontroladores, sensores, indicadores y sistema de enfriamiento.

3.2.1 CONEXIONES DE MICROCONTROLADOR 1

Para llevar a cabo la conexión del módulo IMU al microcontrolador 1 se hace uso de los puertos analógicos A4 y A5, donde se lee el eje X y eje Y. Para la conexión del sensor de temperatura se hace mediante la entrada A6 y para conectar el microcontrolador 2 es por el puerto USB mini-B, como se observa en la figura 11.

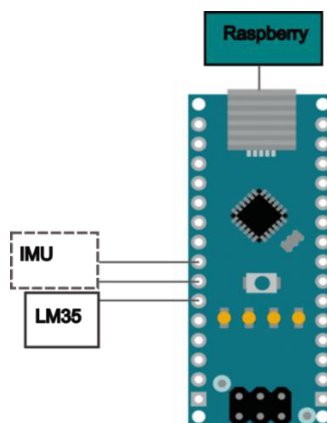


Figura 11 Esquema de conexiones salientes del microcontrolador 1, basado en [16]

Tanto el módulo IMU y el sensor LM35 se conectan al voltaje +5V y a GND del microcontrolador 1. La información de la programación sale al microcontrolador 2 del microcontrolador 1 es mediante una comunicación por el puerto USB mini-B al microcontrolador2 por USB 2.0-A como se logra ver en la figura 12 indicando con colores distintos.

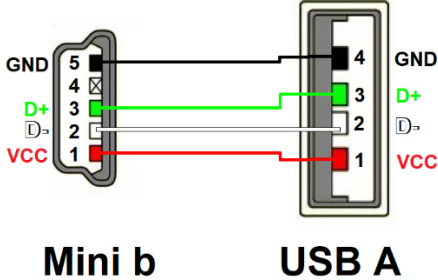


Figura 12 Conexión de USB mini-B a USB A, basado en [23]

3.2.2 CONEXIONES DE MICROCONTROLADOR 2

En el microcontrolador 2 se conectan en líneas independientes los voltajes y tierras del ventilador del propio microcontrolador 2 y un led indicador de encendido, esto es para cubrir cada pin en caso de alguna falla, como se observa en la figura 13.

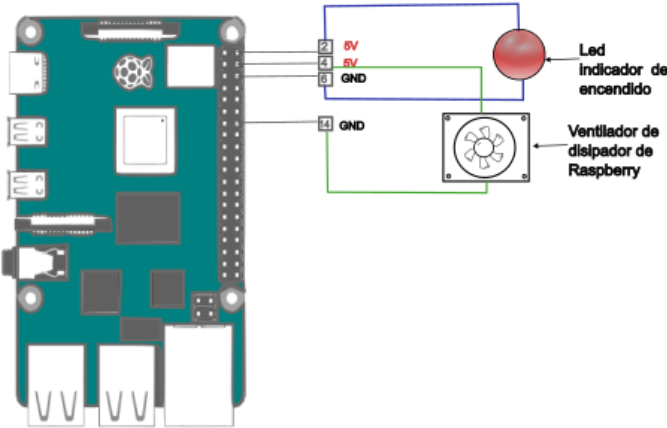


Figura 13 Esquema de conexiones salientes del microcontrolador 2, basado en [18]

Mediante una conexión por HDMI 2.0 que va conectado del microcontrolador 2 se logra obtener la comunicación a la interfaz gráfica (que es un monitor de 7 pulgadas TFT el cual es alimentado por 12V que viene de la grúa), por otro lado el conector GX16 (que es de uso confiable en la industria principalmente por ser de uso rudo y de 5 pines) es usado de manera que el macho va anclado a la case 3D y la hembra a los indicadores, y se hace uso de otro conector de 2 pines que va de regulador 1 al UPS.

3.2.3 DISEÑO UPS

El voltaje que proporciona la grúa alrededor es de 13-14V o bien cuando presenta alguna falla puede llegar hasta de 18V y entra al regulador 1 (Módulo regulador 4015) que tiene una entrada de 4V a 38V y salida de 1.25 a 36V con una corriente máxima de salida de 5 Amperes, pero para fines de este trabajo se coloca a 12.6V. Este regulador 4015 debe alimentar paralelamente al regulador 2 y al centro de carga que se encuentra conectado en serie y este último al banco de batería que consta de 3 baterías de 3.7V a 5 Amperes. Esta parte del sistema está diseñado de esta forma con el objetivo de que en el tiempo cuando el regulador 1 no tiene suministro de energía, es el centro de carga es quien suministra voltaje del banco de barias al regulador 2, hasta el momento en el que llega a su voltaje mínimo de trabajo 10.8V. El regulador 2 (LM2596) para bajar la diferencia de potencial que entra al microcontrolador 2 que trabaja 5.2V a 3 Amperes.

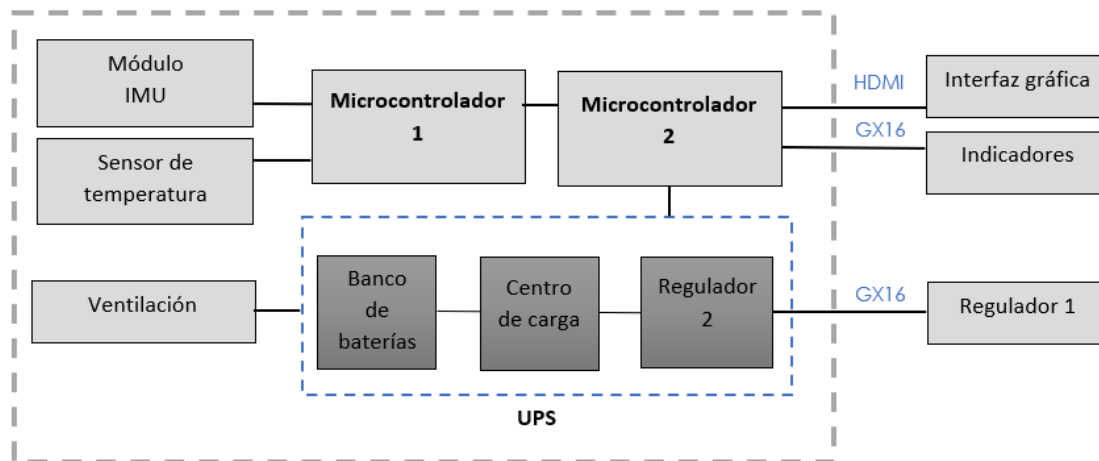


Figura 14 Diagrama a bloques de los módulos que integran el sistema desarrollado, el sistema incluye un sistema de alimentación de emergencia (UPS) línea discontinua azul, en tanto que los diferentes protocolos de comunicación se muestran con letra azul, elaboración propia (2023).

3.3 EXPERIMENTACIÓN

Debido a que el sistema embebido se busca que sea de tamaño compacto para que sea un sensor semi-universal y sea colocado en cualquier tipo de grúa que se necesite, además de que no ocupe demasiado espacio y que soporte lluvia, salpicaduras y temperaturas hasta de 90°C, es necesario fabricar las partes necesarias para cumplir con los objetivos de este trabajo.

3.3.1 DISEÑOS DE CONEXIONES DE MICROCONTROLADOR 1

Como se menciona en la sección 3.2.1 de este trabajo, es necesario llevar a cabo la construcción de una conexión para la comunicación del microcontrolador 1 con el microcontrolador 2 que es por medio de un tipo USB mini-B a USB A, respectivamente. Como se observa en la figura 15 la conexión es de una longitud pequeña y necesaria cumplir con su objetivo.



Figura 15 Conector USB mini-B a USB A.

3.3.2 DISEÑOS DE CONEXIONES DE MICROCONTROLADOR 2

Por medio del conector HDMI se realiza la comunicación del microcontrolador 2 a la interfaz gráfica que es lo que observa el usuario de la grúa en el momento de la nivelación antes del trabajo a realizar. Se utiliza una pantalla LCD a color de estas características debido a que debe colocarse en la cabina donde se encuentra el usuario y se cuenta con poco espacio y de uso rudo.

En la figura 16 se observa que el ángulo de inclinación es inferior a -6° por lo que el indicador en forma de botón en la parte inferior central se encuentra en rojo, lo que le indica al usuario que debe realizar maniobras necesarias para estabilizar la grúa.

Además de la interfaz gráfica, se cuenta con un indicador sonoro como se observa en la figura 17. Esto es con el objetivo de tener diferentes indicadores al usuario que alerten que la grúa está en una posición no adecuada para el comienzo del trabajo a realizar.



Figura 16 Interfaz gráfica.

Como se observa también en la figura 17 para la colocación del indicador sonoro en la cabina, es necesario colocarlo en un soporte que se adecue a este y que no limite su funcionamiento. Para ello se diseñó y construyó la pieza que contiene el zumbador.

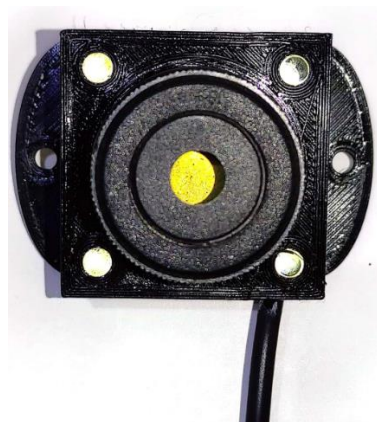


Figura 17 Indicador sonoro.

3.3.3 CONSTRUCCIÓN DEL UPS

Para la construcción de la parte del UPS se hace uso de un cargador para tres baterías de litio de 10.8V a 12.6V como se observa en la figura 18 y como lo especifica la sección 3.2.3. Este cargador a su vez va conectado al regulador 2.

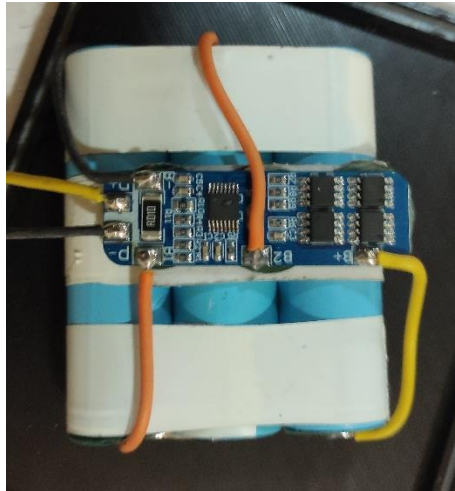


Figura 18 Conexión de cargador con baterías en el UPS.

3.4 RESULTADOS

En este capítulo se obtiene como resultado un UPS que llega a tener la característica de una duración que va desde 3 a 3.5 horas en caso de que apague la grúa en un clima cálido y que podría llegar a alimentar hasta por 8 horas en un clima frío, ya que no serían necesario el funcionamiento de los ventiladores los cuales son los componentes con mayor consumo de corriente. Cabe mencionar que el centro de carga, así como ambos reguladores están provistos de protecciones para que, en caso de alguna contingencia (sobre carga, descarga, temperatura, corto circuito, etc.) proteger en caso de falla para no arriesgar el sistema completo, además del costo en caso de reemplazo de algún componente.

En la parte de la interfaz se llega a tener un buen contraste de colores, luego de la retroalimentación de los interesados.

CAPÍTULO IV. CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

4.1 RESUMEN CAPÍTULO

En este capítulo se describen la construcción del sistema, en particular los criterios tomados en cuenta para poder elaborar un gabinete que cumpla con todos los requisitos, tanto mecánicos, eléctricos y de seguridad necesarios para la aplicación propuesta.

En el diseño del gabinete, se consideraron, no solo los requisitos técnicos, sino que se buscó reducir el tamaño de mismo; de igual manera, en el diseño del gabinete, se consideraron los criterios de reproducibilidad y fabricación, esto para poder obtener un sistema que sea fácil de reproducir no solo a nivel de prototipo sino incluso en fabricación en cadena.

Por otro lado, en este capítulo se describe la forma en la que se llevó a cabo la calibración del sistema, empleando métodos que se describen en las Instituciones encargadas de la metrología en el país como lo es el Centro Nacional de Metrología.

4.2 DESARROLLO

Para llevar a cabo la construcción del sistema, previamente debe ser diseñado el gabinete o case 3D, todo esto contemplando el tamaño de cada componente, la optima ubicación de cada uno de los componentes tratando de obtener el espacio mínimo con los objetivos de utilizar el menor espacio y de utilizar en menor material por cuestiones de optimización de recursos.

4.2.1 DISEÑO DEL GABINETE 3D

El gabinete junto con las piezas realizadas anteriormente se modela en Tinkercad, el cual es un software de uso libre y en línea, se contemplan la posición del led indicador que sea en la cara frontal para que los usuarios vean rápidamente si el sistema está encendido o apagado, el diseño incorpora además, un canal en dos partes y que tiene por finalidad colocar un aislamiento mecánico para que el sistema no sea vulnerable a la introducción de lluvia o polvo que supondría un mal funcionamiento en el sistema, también se toma en cuenta el banco de baterías y su centro de carga, como se observa en la figura 19 el banco de baterías se encuentra en la tapa y el centro de carga en la otra parte del gabinete, esto está diseñado de tal forma para que el banco de baterías permita ser acoplado sobre el microcontrolador 2 y el extractor.

Otra parte que se contempla en el diseño son los rieles que lleva el sistema, esto para colocarse se forma rápida a la grúa; debido a que dependiendo del modelo y la capacidad de la grúa el sistema es colocado en diferente zona. Esto arroja las medidas de altura 10.3 cm con rieles, de ancho 12.0 cm y una profundidad de 6.7 cm.

Otras importantes a tomar en cuenta es la posición del módulo IMU para que vaya de acuerdo con lo anteriormente programado y su fijación al gabinete, y la ubicación de los puertos periféricos para que no exista una indebida colocación del sistema ya que van conectados con cables gruesos.

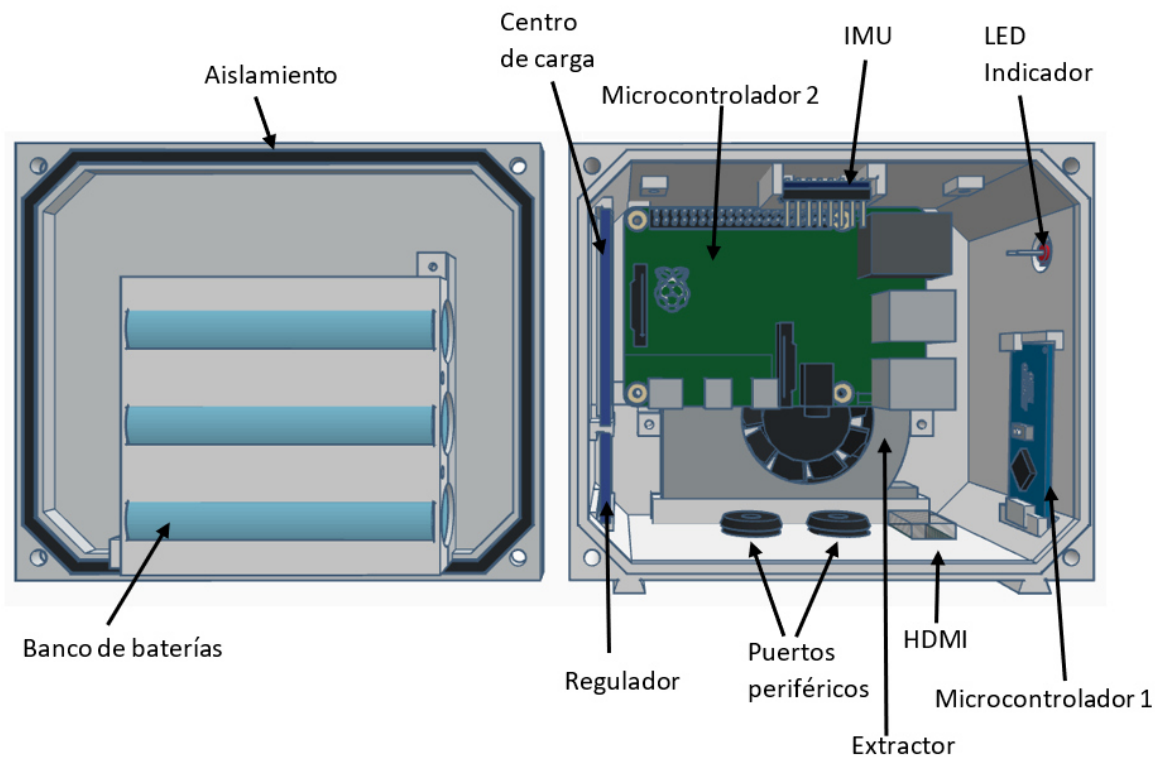


Figura 19 Diseño de gabinete con montaje de piezas, elaboración propia (2022).

4.2.2 MÉTODO PARA CALIBRACIÓN DEL SISTEMA

La calibración del sistema se basó en el método de ángulos pequeños, este método consiste en generar un triángulo rectángulo mediante una distancia d , una altura h y un plano inclinado, de esta forma se genera un ángulo (α) teniendo como catetos a la distancia d y la altura h . Cuando la distancia d es suficientemente grande respecto a la altura h , el ángulo α puede ser determinado con

razonable precisión. La figura 20 muestra un diagrama esquemático del montaje experimental implementar el método de 'ángulos pequeños

La generación del ángulo pequeño se lleva a cabo mediante una construcción de una barra de senos, este método es aceptado para generar ángulos precisos y llevar a cabo calibraciones de ángulos tal como se menciona en el Centro Nacional de Metrología (CENAM) [24]. La precisión del ángulo generado está limitada por la precisión con la que se mida la altura h y la distancia b .

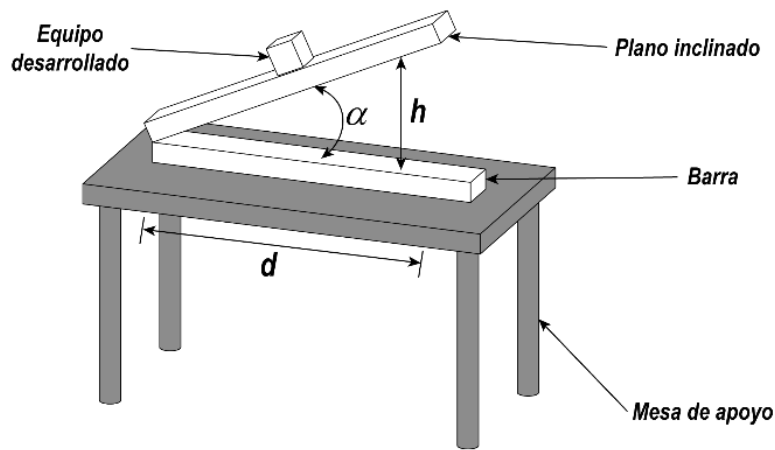


Figura 20 Método de barra de senos para calibración del inclinómetro con la formación del plano inclinado y la ubicación del sensor, elaboración propia (2023).

4.3 EXPERIMENTACIÓN

Seguido del diseño del sistema y con la electrónica completa se lleva a cabo la construcción del gabinete. Además, para llevar a cabo la calibración se diseña y construyen piezas para obtener diferentes alturas y generar distintos ángulos de giro. Teniendo el sistema desarrollado se procede a la debida calibración por medio del método de generación de ángulos pequeños.

4.3.1 CONSTRUCCIÓN DEL CASE 3D

El gabinete es de material ABS (*Acrylonitril Butadien Styreen*) para obtener un sistema resistente mecánicamente y la construcción es por medio de FDM (*Fused Deposition Modeling*), el empaque para aislamiento es impreso de TPU flexible (*Thermoplastic Polyurethane*) [25-27]. Para llevar a cabo este proceso se usó una impresora 3D creality Ender-3 y otra impresora, una creality Ender-6 para las piezas para generar los distintos ángulos con los que se trabaja en la parte de la calibración.

En la figura 21 se puede observar el gabinete con la colocación del banco de baterías y parte de sus conexiones, también se observa el microcontrolador1 a un lado del indicador de encendido, el módulo IMU, el microcontrolador 2 se encuentra debajo del sistema de ventilación.



Figura 21 Sistema de nivelacion desarrollado.

4.3.2 CALIBRACIÓN Y COLOCACIÓN DEL SISTEMA

Para llevar a cabo la calibración de nuestro sistema se utilizaron barras estructurales de aluminio para generar nuestra barra de senos [28]. Para nuestro caso la distancia b consta de 2.5 metros \pm 0.6 cm, en tanto que la altura h se midió con un calibrador (tipo SCALA, marca SURTEK, modelo 222-A) con una precisión de 0.03 mm, para llevar a cabo una calibración, se emplearon 6 alturas diferentes para generar ángulos de 1°, 2°, 3°, 4°, 5°, y 6°.

Para llevar a cabo la calibración se colocó una mesa de trabajo, y sobre ella nuestra barra de aluminio (d) nivelada mediante un nivel laser (KKmoon, Multifuncional 3D), dicho nivel laser tiene una precisión de ± 0.2 mm/m, esto se puede ver en la figura 22.

Se generaron 6 diferentes ángulos para cada uno de los ejes, tanto X como Y , tanto en dirección positiva como en dirección negativa, los ángulos medidos con el sistema desarrollado se almacenaron en una computadora para su posterior procesamiento.

Cada una de las mediciones fue repetida al menos 3 veces, esto con la finalidad de determinar la repetitibilidad de las mediciones arrojadas por el sistema, así como su repetitibilidad.

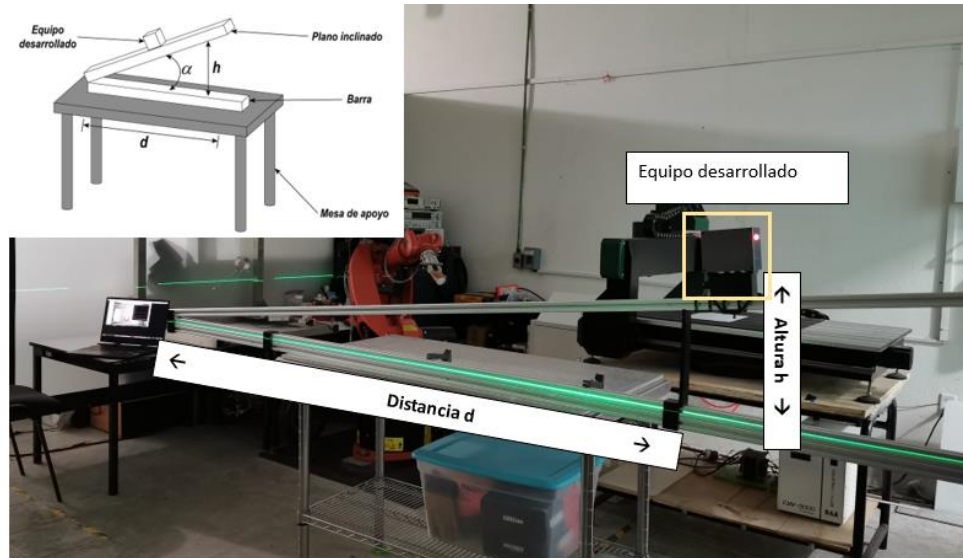


Figura 22 Implementación del método de calibración usando el equipo desarrollado.

4.4 RESULTADOS

La calibración se llevó a cabo en cinco días distintos y se midieron tres veces cada día, los valores generados fueron colocados en una matriz 2D, para la colocación de la matriz y generar su grafico de contorno. En el gráfico se definen los niveles con los que se requiere trabajar y se define la paleta de colores con los que se trabajó. En la figura 23 se muestra el Grafico 2D que se obtuvo, además se colocaron las líneas en los ángulos ceros, además de las líneas de bordes que se generan con las mediciones en la calibración. También se puede observar que, cuando se va acercando a los ángulos ± 5 los ejes X y Y este va saliendo de la zona verde central ya que la grúa puede estar en una posición inestable para comenzar a trabajar.

Cabe mencionar que los valores trabajados son con los datos de ángulo de giro con cinco cifras significativas para tener mejor precisión y tener una mejor calibración. Aunque para los interesados basta trabajar con números enteros.

Teniendo el sistema de asistencia para nivelación con todos los requisitos necesarios para llevar a cabo sus funciones en tiempo real, se preparó a los operadores de las grúas y comenzó su instalación

en una grúa de ocho toneladas como se observa en la figura 24, esto para que se fueran familiarizando con los indicadores y la interfaz gráfica.

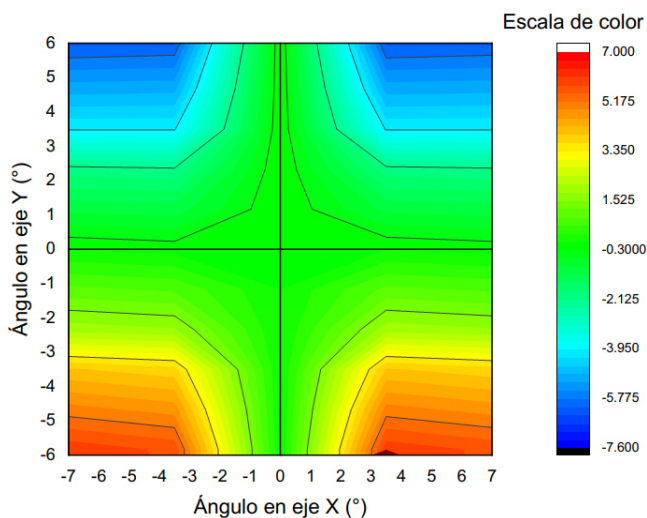


Figura 23 Matriz 2D generada de la calibración.

En esta la grúa de ocho toneladas se coloca en la parte de enfrente, como se indica en el inciso b) de la figura 24.



Figura 24 colocacion del sistema desarrollado. a) preparacion del operador, b) enfoque de la ubicación del sensor.

Después fue colocado en una grúa de cuarenta y cinco toneladas (ver figura 25), esta instalación fue en la tornamesa ya que en esa ubicación se contaba con espacio donde los operadores pueden acceder rápidamente para saber si el sistema se encuentra encendido o apagado al principio del

proceso de nivelación de la grúa y para futuro mantenimiento del sistema. Adicionalmente, la tornamesa es el lugar que garantiza la estabilidad de la grúa debido a que este tipo de grúa es montada sobre un camión.



Figura 25 Instalación del inclinómetro en la tornamesa de en una grúa con capacidad de 45 toneladas, a) fotografía de la grúa, b) detalle del sensor.

Como una tercera prueba, se colocó el sistema en una grúa todo terreno con una capacidad de 90 toneladas. Al igual que en la grúa de cuarenta y cinco toneladas, en la instalación del sistema en una grúa de noventa toneladas fue sobre la tornamesa. Al ser un sistema compacto se pudo colocar con facilidad en las tres grúas con éxito.



Figura 26 Instalación del inclinómetro en la tornamesa en una grúa con capacidad de 90 toneladas.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se emplearon los criterios de manufactura, diversos lenguajes de programación, impresión 3D y herramientas de electrónica para llevar a cabo el Diseño e implementación de un sistema de asistencia cognitiva visual para nivelación de grúas todo terreno.

En el diseño del sistema desarrollado, se tomaron en cuenta principalmente, los requisitos técnicos establecidos por los operadores de las grúas hacia las cuales se destina, este diseño. Adicional a los requisitos técnicos, durante el proceso de diseño se tomó en cuenta el ambiente de trabajo al cual se someterá este sistema. Finalmente, la opinión de los operadores en cuanto a apariencia visual respecto al despliegue de datos sirvió de base para la elaboración de la interfaz gráfica implementada.

Como un criterio adicional, para el diseño y construcción de este sistema, se enfatizó el uso de herramientas de hardware y software de acceso libre, así mismo el empleo de tecnologías de bajo costo fue un valor adicional a este diseño.

Como resultado de este trabajo, se elaboró una interfaz gráfica que permite el despliegue de datos del sistema de nivelación. Los elementos que conforman esta interfaz son resultado de múltiples sesiones de retroalimentación con los operadores y técnicos expertos en operación y reparación de grúas.

Por otro lado, los diseños electrónicos con los que cuenta este sistema responden a las condiciones de trabajo del medio ambiente en el cual se empleará este sistema, esto es, la electrónica que compone este sistema soporta altas temperaturas y vibraciones.

El gabinete diseñado en el presente trabajo incorpora medidas para ser colocado a la intemperie, mediante el uso de conectores de uso industrial, sellado para evitar la filtración de agua y salpicaduras, así como un sistema de ventilación que permite el flujo de aire para evitar el sobrecalentamiento.

La integración entre el software en forma de una interfaz gráfica, la programación para la lectura de los diversos sensores que componen el sistema, así como la implementación de comunicación entre los microcontroladores empleados dan prueba de los conocimientos adquiridos y empleados durante el desarrollo del presente trabajo.

El desarrollo de este sistema pone de manifiesto las capacidades, habilidades y conocimientos necesarios para la integración de las diversas partes que componen al sistema, y que van desde la impresión 3D, programación, análisis de datos, hasta la fabricación de tablillas de circuitos impresos.

El sistema desarrollado ha sido probado in situ en los equipos para los cuales ha sido diseñado con comentarios positivos por parte de los usuarios a los cuales se destina este sistema. Finalmente, como resultado de este trabajo, se lograron diversos productos académicos entre los que se puede mencionar un artículo en una revista arbitrada, un artículo en un congreso y dos registros de software los cuales se encuentran al momento de la elaboración de este documento en trámite ante INDAUTOR.

PRODUCTOS DE LA TESIS

ARTÍCULOS

1. L. G. Granados Salazar, J. J. A. Flores Cuautle, J. P. Rodríguez Jarquin, G. Lara Hernández, **Implementación de sensor para la asistencia de nivel en grúas todo terreno**, Ideas en ciencias de la Ingeniería 2023 (ACEPTADO)
2. L. G. Granados Salazar, G. Lara Hernández, J.P. Rodríguez Jarquín, J.J. A. Flores Cuautle, **Sensor de inclinación de tipo óptico**, Coloquio de Investigación Multidisciplinaria CIM 2022 (PUBLICADO)

REGISTRO DE SOFTWARE

1. L.G. Granados Salazar, J.J.A. Flores Cuautle, J.P. Rodríguez Jarquin, B.E. González Sánchez, **Interfaz gráfica para sensor de inclinación**, (EN TRAMITE)
2. L.G. Granados Salazar, J.J.A. Flores Cuautle, G. Lara Hernández, O.O. Sandoval González, **Software de adquisición y despliegue de datos de sensor de inclinación**, (EN TRAMITE)

REFERENCIAS

- [1] Real Academia Española. "Grúa." Asociación de academias de la Lengua Española. <https://dle.rae.es/gr%C3%BAa> (accessed 01-12-2022, 2022).
- [2] Gruas y equipos García. "Características de las grúas All Terrain (Todo Terreno)." Gruas y equipos García. <https://www.gruasyequiposgarcia.com/caracteristicas-de-las-gruas-todo-terreno/#:~:text=Las%20gr%C3%BAas%20todoterreno%2C%20se%20pueden,las%20gr%C3%BAas%20para%20terreno%20dif%C3%ADcil> (accessed 01-12-2022, 2023).
- [3] J. Adams, H. Draux, P. Jones, I. Osipov, S. Porter, and M. Szomszor, "Dimensions-A collaborative approach to enhancing research discovery," *Digital Science*, 03/03/2022 2018. [Online]. Available: <https://www.dimensions.ai/resources/a-collaborative-approach-to-enhancing-research-discovery/>
- [4] J. M. Núñez, M. G. Araújo, and I. García-Tuñón, "Real-Time Telemetry System for Monitoring Motion of Ships Based on Inertial Sensors," *Sensors*, vol. 17, no. 5, p. 948, 2017. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/5/948>.
- [5] Y. Fang, Y. K. Cho, and J. Chen, "A framework for real-time pro-active safety assistance for mobile crane lifting operations," *Automation in Construction*, vol. 72, pp. 367-379, 2016/12/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.025>.
- [6] W. Kacalak, Z. Budniak, and M. Majewski, "Stability Assessment as a Criterion of Stabilization of the Movement Trajectory of Mobile Crane Working Elements," *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, journal article vol. 23, no. 1, pp. 65-77, 2018, doi: 10.1515/ijame-2018-0004.
- [7] D. Feliu-Talegon, A. San-Millan, and V. Feliu-Batlle, "A New Kinematic Model and Control Strategy for a Mobile Platform for Transporting Lightweight Manipulators," *Electronics*, vol. 7, no. 12, p. 441, 2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-9292/7/12/441>.
- [8] L. G. Granados Salazar, G. Lara Hernández, J. P. Rodríguez Jarquin, and J. d. J. A. Flores Cuautele, "Sensor de tipo óptico para medir inclinación," presented at the Coloquio de Investigación Multidisciplinaria, Orizaba, Veracruz, 2022.
- [9] SICK sensor intelligence, "TMS/TMM88, TMS/TMM55 Inclination sensors with current / voltage interface," SICK sensor intelligence, 2018. [Online]. Available: https://www.sick.com/media/docs/2/52/852/Technical_information_TMM55_TMS_TMM88_en_IM0064852.PDF
- [10] SIKO. "Sensores y sistemas de posicionado." Siko. <https://www.siko-global.com/es-mx> (accessed 01-05-2023, 2023).
- [11] SIKO. "Sensor de inclinación IKM360R." SIKO. <https://www.siko-global.com/es-mx/productos/rotoline-codificador-rotatorio/sensores-de-inclinacion/ikm360r> (accessed 10-06-2023, 2023).

- [12] R. Marmolejo. "Microcontrolador – qué es y para que sirve." Hetpro. <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/microcontrolador/> (accessed 05-06-2023, 2023).
- [13] El tintero. "Definición de Programación Informática." Concepto-Definicion. <https://conceptodefinicion.de/programacion-informatica/> (accessed 16-07-2023, 2023).
- [14] L. G. Corona Ramirez, 1, Ed. *Sensores y actuadores con arduino*. Mexico: Patria, 2015.
- [15] Aula 21. "Arduino: todo lo que necesitas saber." Centro de formación técnica para la industria. <https://www.cursosaula21.com/arduino-todo-lo-que-necesitas-saber/> (accessed 15-06-2023, 2023).
- [16] Arduino. "Nano." Arduino. <https://docs.arduino.cc/hardware/nano> (accessed 4-6-2023, 2023).
- [17] S. Luchetti. "Arduino vs Raspberry Pi." Tribalyte Technologies. <https://tech.tribalyte.eu/blog-arduino-vs-raspberry-pi> (accessed 05/06/2023).
- [18] MCIElectronics. "¿Que es Raspberry Pi?" MCIElectronics. <https://raspberrypi.cl/que-es-raspberry/> (accessed 05/06/2023, 2023).
- [19] Qt Company. "Qt Designer Manual." Qt Company. <https://doc.qt.io/qt-6/qt designer-manual.html> (accessed 06/06/2023, 2023).
- [20] L. de Valle Hernandez. "Processing, Wiring y Arduino." Programar facil. <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/processing-wiring-arduino/> (accessed 8-02023, 2022).
- [21] S. R. Davis, *C++ for Dummies*. John Wiley & Sons, 2014.
- [22] Prometec. "Guía a la programación de Arduino." Prometec. <https://www.prometec.net/funciones-iii/> (accessed 08-11-2022, 2023).
- [23] V. Pankov. "Diagrama de cableado para cable usb. Asignación de pines del conector USB." Squeak. <https://squeak.ru/es/mts/shema-podklyucheniya-provodov-na-yusb-kabel-raspinovka-usb-shtekera.html> (accessed 05-18-2023, 2023).
- [24] CENAM. "Patrón Nacional de Ángulo." <https://www.cenam.mx/dimensional/patronesnal/angulo> (accessed 22/05/2023, 2023).
- [25] X. Gao, N. Yu, and J. Li, "Influence of printing parameters and filament quality on structure and properties of polymer composite components used in the fields of automotive," in *Structure and Properties of Additive Manufactured Polymer Components*, K. Friedrich, R. Walter, C. Soutis, S. G. Advani, and I. H. B. Fiedler Eds.: Woodhead Publishing, 2020, pp. 303-330.
- [26] A. Sharma, D. Chhabra, R. Sahdev, A. Kaushik, and U. Punia, "Investigation of wear rate of FDM printed TPU, ASA and multi-material parts using heuristic GANN tool," *Materials Today: Proceedings*, vol. 63, pp. 559-565, 2022/01/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.015>.

- [27] B. Khatri, K. Lappe, M. Habedank, T. Mueller, C. Megnin, and T. Hanemann, "Fused Deposition Modeling of ABS-Barium Titanate Composites: A Simple Route towards Tailored Dielectric Devices," *Polymers*, vol. 10, no. 6, p. 666, 2018. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-4360/10/6/666>.
- [28] B. Acko, "Calibration of electronic levels using a special sine bar," *Precision Engineering*, vol. 29, no. 1, pp. 48-55, 2005/01/01/ 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2004.04.004>.
- [29] Lara Hernández, G., Flores Cuautle, J. J. A., Granados Salazar, L. G., Rodríguez Jarquín, J. P. (2023). Implementación De Sensor IMU Para La Asistencia De Nivel En Grúas Todo Terreno. *Ideas en Ciencias de la Ingeniería* (2), 62-73%V 61. <https://doi.org/10.36677/ideaseningenieria.v1i2.21476>
- [30] Granados Salazar L. G., Lara Hernández G., Rodríguez Jarquín J.P., Flores Cuautle J.J. A., Sensor de inclinación de tipo óptico, Coloquio de Investigación Multidisciplinaria CIM 2022,

SENSOR DE INCLINACIÓN DE TIPO ÓPTICO

Coloquio de Investigación Multidisciplinaria 2022
Journal CIM Vol. 10, Núm. 1
Octubre de 2022

ISSN: 2007 8102

Sensor de tipo óptico para medir inclinación

L. G. Granados Salazar ¹, G. Águila Rodríguez ¹, G. Lara Hernández¹, J.P. Rodríguez Jarquin ¹, J.J.A. Flores Cuautle ^{2*}

¹ Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Orizaba,
² CONACYT-Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Orizaba
jflores_cuautle@hotmail.com

Área de participación: Ingeniería Electrónica

Resumen

En el área de la ingeniería, es importante monitorear diversas variables físicas, el valor de dichas variables debe de pasar por un proceso de conversión de la variable de interés a una variable electrónica de forma tal, que esta pueda ser cuantificada y procesada por la electrónica relacionada. En el caso de la inclinación puede ser de interés para diversos casos dentro de la ingeniería, que van desde evitar malfuncionamiento de maquinaria, hasta medir la posición y desplazamiento de miembros y articulaciones del ser humano para fines de rehabilitación. En este trabajo se presenta un sensor de inclinación de tipo óptico que presenta un rango de medición de -90 a 90 grados respecto a la vertical. El sensor desarrollado puede ser empleado en aplicaciones donde la medición de la inclinación es necesaria.

Palabras clave: Inclinación, camino óptico, resolución

Abstract

In the engineering area, it is essential to monitor various physical variables; the value of these variables must go through a conversion process from the variable of interest to an electronic variable so that it can be quantified and processed by electronics. In the case of inclination, this can be of interest for various cases within engineering, from preventing malfunctioning machinery to measuring the position and displacement of limbs and joints of the human being for rehabilitation purposes. This work uses an optical-type tilt sensor with a measurement range of -90 to 90 degrees concerning the vertical. The sensor obtained can be used in applications where tilt measurement is necessary.

Keywords: Optical path, tilt, resolution

Introducción

La inclinación se puede definir como el grado de desviación de un objeto respecto a la vertical, siendo esta última, la línea de acción de la gravedad trazada desde el objeto en cuestión hacia el centro de la tierra. En el área de la ingeniería medir la posición de un objeto respecto a la vertical es una de las mediciones más comunes. La determinación del grado de inclinación de un objeto puede ser empleada en una gran variedad de aplicaciones que van desde sistemas de posicionamiento y microposicionamiento en mecánica, hasta el monitoreo de rutinas de rehabilitación en ingeniería biomédica.

Los sensores de inclinación más antiguos están basados en el movimiento de un fluido dentro de una cavidad determinada cuya orientación es paralela a la superficie a la cual se desea determinar la inclinación, dicha cavidad es llenada parcialmente con un fluido, dejando espacio suficiente sin llenar con la finalidad de alojar una burbuja de aire en el fluido en cuestión (Figura 1), de esta forma, la diferencia de densidades entre el fluido y la burbuja de aire, harán que esta última flote, señalando la parte superior del sensor. Mediante marcas concéntricas hechas a intervalos regulares en la superficie del sensor, es posible determinar el grado de inclinación.

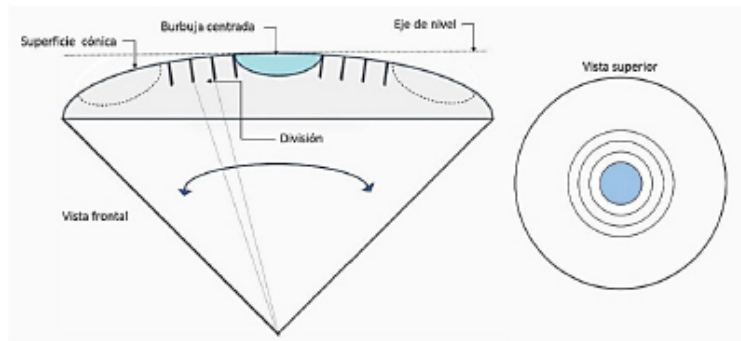


Figura 1 Esquema de funcionamiento del nivel de burbuja.

Una aproximación similar se ocupa en los sensores de inclinación de tipo electrónico, en los cuales se utiliza una gota de mercurio dentro de una cavidad de vidrio, la gota de mercurio puede desplazarse libremente dentro de la cavidad, sin embargo, la principal característica de este sensor, es que cuando el sensor se encuentra paralelo a la superficie que se desea medir, la gota de mercurio hace contacto físico y por lo tanto eléctrico con las dos terminales del sensor, por lo cual este sensor, actúa como un switch normalmente abierto y solo cierra el circuito cuando el sensor se encuentra totalmente horizontal, como se muestra en la Figura 2A, en tanto que la figura 2B muestra un diagrama esquemático de la forma de conectar este tipo de sensores.

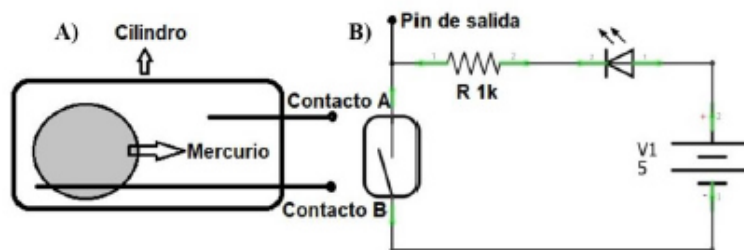


Figura 2 A) Esquema de sensor de inclinación electrónico (gota mercurio), B) circuito electrónico estándar empleado con este sensor.

Existen sensores de inclinación más modernos que incorporan tecnología mems, fluidos magnéticos, fibras ópticas [1-3], dichos sensores son empleados en diversos campos tales como detección de caídas, estimulación eléctrica, mouse de computadora [4-6], todos ellos presentan sus propias ventajas y desventajas [1], sin embargo, en este trabajo se presenta un sensor de fácil construcción que pueda ser implementado en una gran variedad de aplicaciones.

Metodología

Materiales

El sensor propuesto está formado por una fuente de luz azul dirigida hacia la parte inferior del sensor, la luz generada por esta fuente incide sobre dos fotorresistencias (LDR 5 mm modelo 5528) las cuales se ubican en extremos opuestos (ver Figura 3B) [7], se emplea una fuente de luz azul (490 nm) debido a que esta longitud de onda es cercana al pico de sensibilidad de las fotorresistencias utilizadas las cuales presentan mayor sensibilidad en la longitud de onda de 540 nm [8]. El sensor utiliza la gravedad para determinar generar un vector desde el centro geométrico del sensor hacia abajo en tanto que una tablilla bloquea parcialmente la luz. El conjunto de la tablilla con un contrapeso genera un péndulo mediante el cual se determina el vector de gravedad [9]. Cuando el sensor se encuentra en posición horizontal la cantidad de luz que incide en ambas fotorresistencias es mínima, en tanto que cualquier inclinación provoca una diferencia de luminosidad de una de las dos fotorresistencias respecto a la otra tal como se ilustra en la figura 3A y 3B.

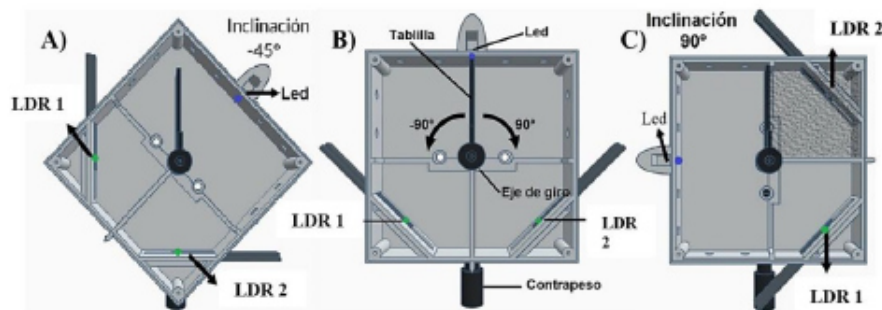


Figura 3 Esquema de funcionamiento del sensor de inclinación con diferentes grados de inclinación; A) -45° , B) 0° , C) 90° .

Con la finalidad de determinar la diferencia de voltaje, que se genera como producto de la diferente intensidad luminosa incidente en cada una de las fotorresistencias se empleó un puente de Wheatstone configurado para determinar dicho valor. Es necesario mencionar que el puente de Wheatstone está diseñado para acondicionar la señal de los LDR [10], sin embargo, su salida se encuentra en un rango de voltajes limitado, por lo cual se hace necesario el uso de un amplificador para escalar la señal de salida del puente y que al mismo tiempo funcione como interfaz entre el puente y un indicador visual.

El procesamiento de la señal llevada a cabo consta de la detección, acondicionamiento e indicador visual. La Figura 4 muestra un diagrama a bloques de las partes que componen la electrónica asociada al sensor de inclinación.



Figura 4 Diagrama a bloques del procesamiento de la señal del sensor de inclinación.

La figura 5 muestra el diagrama electrónico del circuito de acondicionamiento [11], donde se indica mediante líneas punteadas cada parte de la que está constituido el circuito electrónico que acondiciona la señal proveniente de los LDR's.

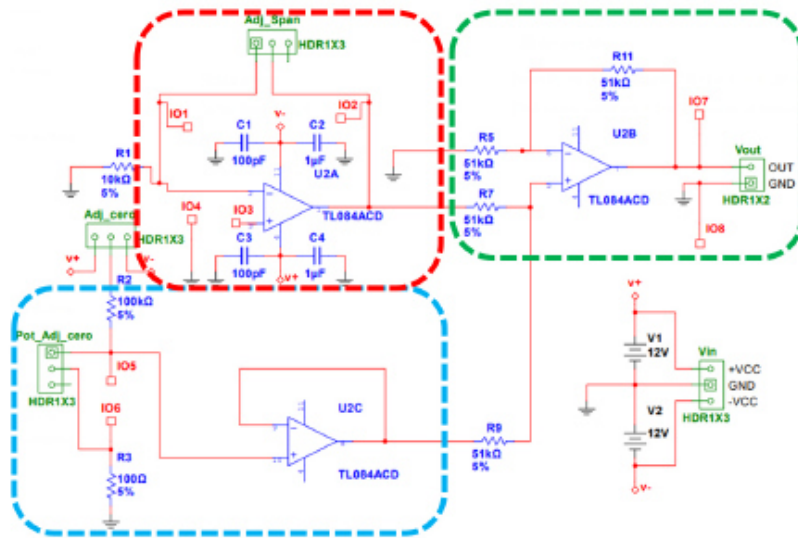


Figura 5 Diagrama esquemático del acondicionamiento de la señal del sensor, en línea punteada Roja, la sección de ajuste de rango de medición (span), en azul el ajuste a cero y en verde el escalador.

Calibración

Se realizó un ajuste iterativo, considerando una entrada de voltaje mínima de 0.3V con una salida de 1V, voltaje de entrada máxima de 0.8V con una salida de 4V, otra entrada mínima de 0.2V con una salida de 1V y una entrada máxima de 0.8V con salida de 5V; mediante la manipulación de los potenciómetros correspondientes al ajuste de Span y ajuste de cero. Bajo las condiciones anteriores, se realizaron simulaciones del comportamiento de la sensibilidad.

Indicador visual

Con la finalidad de tener un indicador visual se diseñó un vúmetro basado en el circuito integrado LM3914, el cual cuenta con 10 salidas las cuales se utilizan para conectar leds indicadores, las salidas del circuito integrado tienen dos posibles estados de salida, bajo y alto y se activan de acuerdo con el voltaje presente en la entrada. El voltaje de entrada debe de encontrarse en un intervalo de trabajo entre 0 y 5V. Debido al funcionamiento del circuito integrado, es necesario linealizar el voltaje con el cual se excita dicho integrado, para lo cual se determinó la función matemática que modela la sensibilidad del escalador.

Resultados

El comportamiento de la sensibilidad del escalador se muestra en la Figura 6. Los datos obtenidos de forma experimental se representan mediante cuadros negros sólidos, se aprecia que el voltaje de salida presenta un comportamiento de tipo exponencial, por lo cual para poder linealizar dicho voltaje se determinó la ecuación que modela el comportamiento del puente de Wheatstone (Ecuación 1).

$$V_{wh} = 6.31 - 2.67 \times e^{-(V_{in}/0.19)} \quad (1)$$

El modelo matemático de la ecuación 1 es mostrado en la Figura 6 mediante una línea sólida de color rojo, en tanto que los datos experimentales se muestran en la Figura 6 en forma de cuadros. A Partir de la ecuación 1 se puede obtener e el voltaje de saturación del puente de Wheatstone, el cual toma un valor de 6.31 Volts, V_{in} corresponde al voltaje de entrada.

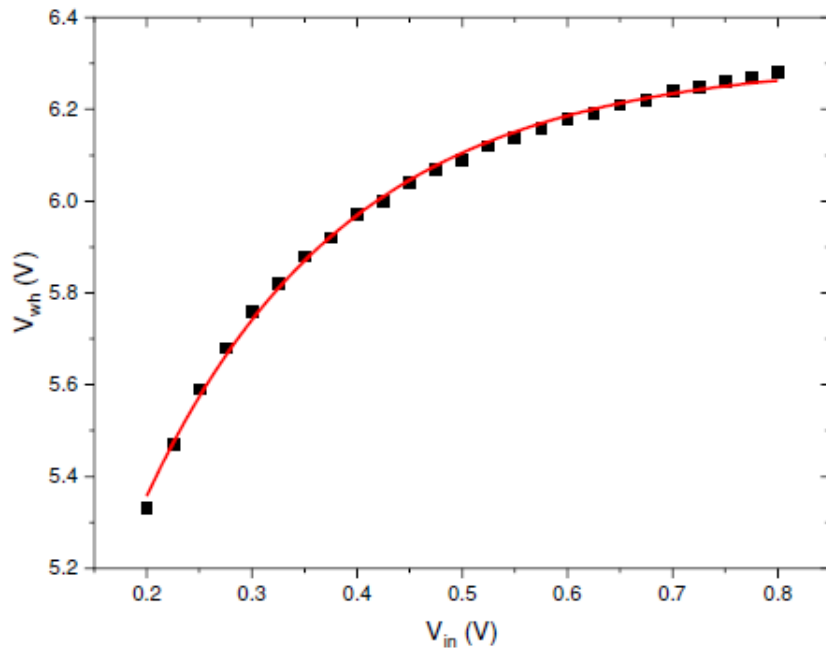


Figura 6 Sensibilidad del escalador, los cuadros negros representan los datos experimentales en tanto que la línea roja corresponde al modelo matemático (Ecuación 1) obtenida a partir de los datos experimentales.

El proceso de linealización se lleva a cabo mediante un circuito escalador donde se obtiene una salida de voltaje del sensor correspondiente a una función lineal (ver Figura 7) con el fin de obtener los datos de voltaje una manera fácil de interpretar, donde V_{esc} es el voltaje acondicionado de salida del sensor.

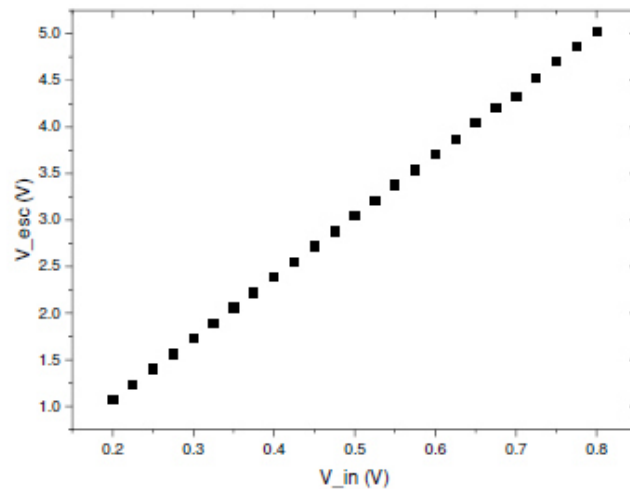


Figura 7 Voltaje de salida del sensor después de pasar por el proceso de linealización.

Como se hizo mención, el indicador visual es de tipo vúmetro con diez leds como indicadores y un voltaje de entrada en el rango de 0 a 5V procedentes del circuito escalador linealizado. Para dar una idea del indicador visual y su correspondiente placa de circuito impreso se presenta en la Figura 8 que muestra las conexiones del indicador visual

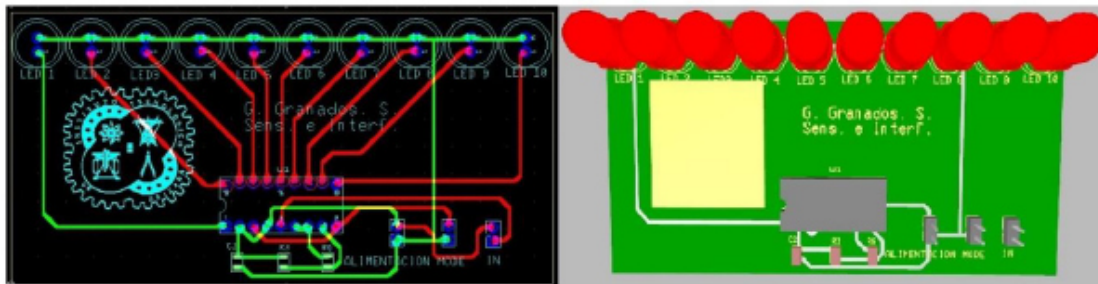


Figura 8 Diagrama esquemático y representación del indicador visual.

Discusión

En el sensor de inclinación, el efecto de péndulo es la parte principal de su funcionamiento, lo cual puede tener algunas desventajas, principalmente en la estabilidad del sensor cuando es empleado en mediciones que involucran transiciones de alta frecuencia, cuando la inclinación del sensor se ubica en frecuencias bajas, la estabilidad del sensor mejora considerablemente. Es necesario mencionar, que la frecuencia máxima de trabajo del sensor puede modificarse mediante un ajuste en el contrapeso o en su defecto mediante la longitud del contrapeso mismo, con lo cual, el sensor puede adaptarse a diversas aplicaciones. El uso de componentes plásticos en el diseño del sensor limita la posible interferencia electromagnética del sensor, sin embargo, este punto no fue comprobado totalmente, por lo que se deja como opción de futuros trabajos.

Trabajo a futuro

El sensor de inclinación responde de manera adecuada en el rango de medición, sin embargo, es necesario realizar pruebas de durabilidad, así como de estabilidad del sensor a largo plazo, finalmente se deja como trabajo futuro las pruebas en condiciones de humedad y temperatura superiores a las condiciones estándar.

Conclusiones

El sensor desarrollado es capaz de determinar inclinaciones en el intervalo de -90 a $+90$ grados respecto a la vertical, lo cual confirma que puede ser empleado en una gran variedad de aplicaciones. El uso de un indicador visual proporciona una estimación rápida del grado de inclinación, así como la dirección de este, estos datos suelen ser especialmente útiles en aquellas aplicaciones en las cuales es importante corregir rápidamente el grado de inclinación.

El empleo de una fuente de luz de color azul, así como el diseño del sensor limitan la posible interferencia luminosa de fuentes de luz ajenas al sensor.

Referencias

- [1] S. Łuczak and M. Ekwińska, "Electric-contact tilt sensors: a review," *Sensors*, vol. 21, no. 4, p. 1097, 2021.
- [2] R. Olaru and D. Dragoi, "Inductive tilt sensor with magnets and magnetic fluid," *Sensors and actuators A: Physical*, vol. 120, no. 2, pp. 424-428, 2005.
- [3] H. Jung, C. J. Kim, and S. H. Kong, "An optimized MEMS-based electrolytic tilt sensor," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 139, no. 1-2, pp. 23-30, 2007.
- [4] R. Dai, R. B. Stein, B. J. Andrews, K. B. James, and M. Wieler, "Application of tilt sensors in functional electrical stimulation," *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 63-72, 1996.
- [5] Y.-L. Chen, "Application of tilt sensors in human-computer mouse interface for people with disabilities," *IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 289-294, 2001.
- [6] T. Uchimura *et al.*, "Precaution and early warning of surface failure of slopes using tilt sensors," *Soils and Foundations*, vol. 55, no. 5, pp. 1086-1099, 2015.
- [7] D. E. Anchundia Padilla, "placa de prueba como recurso didáctico en las prácticas de circuito digitales de la carrera de tecnologías de la información de la Universidad Estatal del Sur de Manabí," Jipijapa. UNESUM, 2021.
- [8] Sparkfun. "CdS photoconductive cells." <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/LightImaging/SEN-09088.pdf> (accessed 2022).
- [9] D. Halliday, R. Resnick, K. S. Krane, and L. Cicala, *Física*. CEA, 2003.
- [10] M. Coramik, "Calibration of an LDR-Lux meter using a smartphone," *Physics Education*, vol. 56, no. 3, p. 035009, 2021.
- [11] W. Jung, *Op Amp applications handbook*. Newnes, 2005.

IMPLEMENTACIÓN DE SENSOR IMU PARA LA ASISTENCIA DE NIVEL EN GRÚAS TODOTERRENO

IMPLEMENTACIÓN DE SENSOR IMU PARA LA ASISTENCIA DE NIVEL EN GRÚAS TODOTERRENO

IMPLEMENTATION OF IMU SENSOR FOR LEVEL ASSISTANCE IN ALL-TERRAIN
CRANES

Granados-Salazar, L. G.¹; Flores-Cuautle, J. J. A.²; Rodríguez-Jarquín, J. P.¹; Lara-Hernández, G.^{1,}*

¹*Instituto Tecnológico Nacional de Orizaba, Av. Instituto Tecnológico (Oriente 9) No. 852, Col. Emiliano Zapata, C.P. 94330 Orizaba, Ver. México.*

²*CONACYT- Tecnológico Nacional de México/I.T. Orizaba
larag_139@hotmail.com

RESUMEN

Los inclinómetros son herramientas cada vez más importantes en diversos campos, ya que facilitan la nivelación de estructuras, equipos pesados, autos modernos y barcos. En el presente trabajo, se desarrolló un inclinómetro para ser utilizado en grúas todoterreno con el fin de asistir al operador en la nivelación de la grúa. Cabe destacar que la importancia de realizar una correcta nivelación en una grúa todoterreno es de vital importancia antes de llevar a cabo cualquier maniobra, ya que es un requisito indispensable de seguridad para evitar algún tipo de volcadura. Mediante el uso de software y herramientas de acceso libre se llevó a cabo este desarrollo, con el fin de disminuir los costos de fabricación del inclinómetro, innovar y satisfacer la necesidad actual.

PALABRAS CLAVE: GRÚAS DE CONSTRUCCIÓN; INCLINÓMETRO; BARRA DE SENOS

ABSTRACT

Inclinometers are tools becoming increasingly important in various fields, as they facilitate the leveling of structures, heavy equipment, modern cars, and ships. In the present work, an inclinometer was developed to be used in all-terrain cranes to assist the operator in leveling the crane. It should be noted that proper all-terrain crane leveling is vital before maneuvering since it is an indispensable safety requirement to avoid any rollover. Through software and free access tools, this development was carried out to reduce the inclinometer's manufacturing costs, innovate, and satisfy the current need.

KEYWORDS: CONSTRUCTION CRANES; INCLINOMETER; SINUS BAR.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, las grúas representan una parte importante en la industria, su uso facilita la realización de una gran variedad de tareas en diversos campos como la construcción, la minería y todas aquellas actividades que impliquen la elevación de materiales y elementos de grandes dimensiones y peso. Sin embargo, existen diversos riesgos inherentes al uso de grúas en la construcción [1, 2]. Los riesgos asociados al uso de las grúas se dan durante el proceso de

nivelación de la grúa y durante su uso al levantar las cargas [3]. Una mala nivelación de la grúa tiene como consecuencia un incremento en los riesgos asociados a la volcadura [4].

Para monitorear la estabilidad de las grúas de construcción, se hace uso de diversas tecnologías como lo son sensores de estabilidad, medición de parámetros de funcionamiento de la grúa, simulaciones e imágenes térmicas [4]. La elección del sensor o sensores, así como la tecnología empleada para monitorear la grúa, dependerá del modelo específico de la grúa, de sus características y de los requisitos en una aplicación determinada.

Actualmente, las grúas más sofisticadas hacen uso de sensores de inclinación que ayudan al operador durante el proceso de nivelación y estabilización, con la finalidad de alcanzar una mejor nivelación. A pesar de que en el mercado existen sensores de inclinación diseñados para grúas, estos sólo pueden ser implementados en grúas de modelos recientes y su inclusión en la grúa trae consigo un incremento considerable en los precios.

Por otro lado, la innovación y desarrollo de sensores de inclinación para la nivelación de grúas todoterreno es limitada. Una búsqueda estructurada revela que, en los últimos cinco años, el número de publicaciones a este respecto es de sólo 55 trabajos [5]. La Figura 1 muestra un análisis de las principales líneas de investigación relacionadas con grúas e inclinómetros. Dicho análisis, se implementó por medio del software VOSviewer [6].

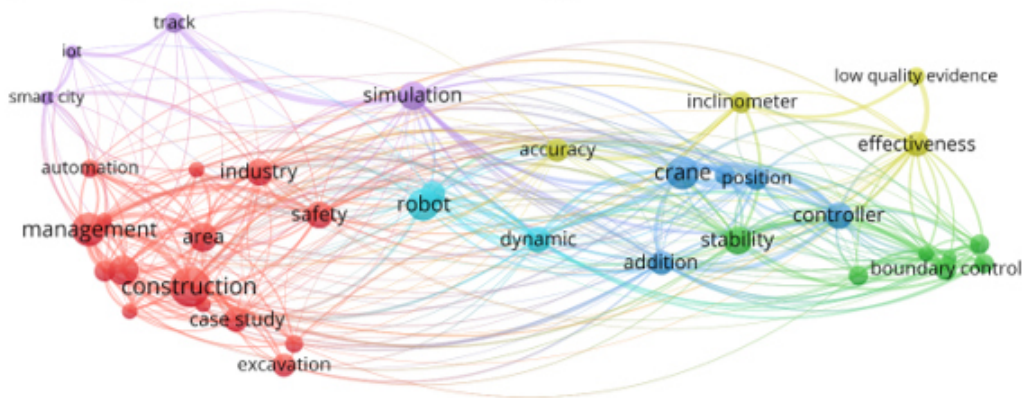


Figura 1. Análisis lingüístico de artículos publicados en los últimos cinco años y su respectiva relación. Las palabras que aparecen con mayor frecuencia son: Construcción, estabilidad, construcción, excavación, seguridad, área, entre otras.

Luego de la búsqueda de información se considera el uso de una Unidad de Medición Inercial (IMU por sus siglas en inglés, Figura 2), la cual es cada vez más empleada en la industria, ya que permite innovar en diferentes áreas de complejidad laboral. En este trabajo se presenta el prototipo de un inclinómetro, diseñado para asistir al operador en la nivelación de una grúa todoterreno. El inclinómetro funciona monitoreando el estado de inclinación de la grúa en tiempo real y mostrando el estado de nivelación de la grúa en una pantalla instalado en la cabina de control proporcionando al operador, los parámetros para una correcta nivelación antes, durante y después del proceso de

nivelación y estabilización de la grúa, disminuyendo de esta forma la probabilidad de volcadura de la grúa.

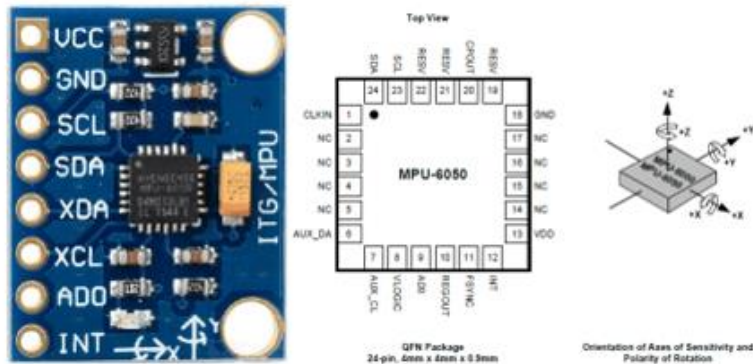


Figura 2. MPU6050 con la disposición de pin y orientación de ejes de sensibilidad y polaridad de rotación

El proceso de estabilización de una grúa todoterreno es un paso previo a la maniobra principal, los pasos básicos para la estabilización de una grúa son los siguientes: primero, buscar un terreno apropiado para estacionar la grúa, asegurarse que el freno esté siempre puesto, encender la grúa y mantenerla en funcionamiento; posteriormente se marca el área de la grúa por razones de seguridad, luego se quita la seguridad del estabilizador, inmediatamente se extraen los estabilizadores por completo; en seguida se levanta la pluma de 55 a 60°; después se extraen los cilindros de gato de estabilizador buscando que el nivel de la cabina de control se encuentre en 0° (ya que es el punto de equilibrio de la carga), en la nivelación y estabilización de la grúa es necesario no tener una desviación mayor a 5° de desnivel, el vehículo debe compartir la carga en todos los estabilizadores; por último, se debe bloquear los estabilizadores por seguridad de acuerdo con lo establecido en el manual de usuario de la grúa. Al ser una maniobra de alto riesgo, es necesario darle la importancia para que el proceso de nivelación se culmine de la manera correcta (Figura 3).

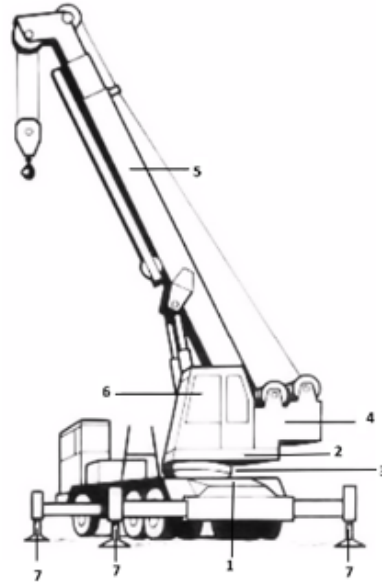


Figura 3. Partes y nomenclatura básica de una grúa 1) Chasis, 2) Plataforma base, 3) corona de orientación, 4) equipo de elevación, 5) flecha telescópica, 6) cabina de mando, 7) estabilizadores, Reproducida bajo términos de Open Access (Tamborero del Pino, 2016).

METODOLOGÍA

La metodología empleada para el diseño del inclinómetro se basó en cuatro etapas las cuales son, recopilación de información bibliográfica, determinación de hardware y software, experimentación y finalmente implementación.

En la etapa de recopilación de información se llevó a cabo una búsqueda semántica de investigaciones relacionadas con inclinómetros, identificación de productos existentes en el mercado e identificación del área de oportunidad. Con base en lo encontrado en la literatura, se determinó emplear software de acceso libre; así mismo, se llevó a cabo la elección del sensor IMU empleado y un bosquejo de la interfaz gráfica.

En la etapa de experimentación se fabricó la case del inclinómetro, la adquisición de datos a nivel laboratorio, así como la calibración del inclinómetro. Finalmente, se llevó a cabo la prueba del inclinómetro en tres diferentes tipos de grúas todoterreno.

En el diseño del inclinómetro se consideró el concepto de redundancia por lo cual se utilizaron 3 sensores inerciales (IMU 6050) para determinar la inclinación de la grúa, cada sensor inercial proporciona lecturas de forma independiente y el valor final mostrado es el resultado del promedio aritmético de cada uno de los sensores inerciales.

Obtención de datos y programación en Raspberry PI4 - QT5

Para la obtención y procesamiento de datos se utilizó un microcontrolador Arduino nano y un microcomputador Raspberry PI 4 [7, 8] modelo B con sistema operativo Raspberry Pi OS, para la programación se utilizó el lenguaje de programación Python 3 y el software IDLE, para el

desarrollo de la interfaz gráfica QT5 Designer [9]. La forma en la que se interconectaron los diferentes módulos del sistema se presenta en la Figura 4.

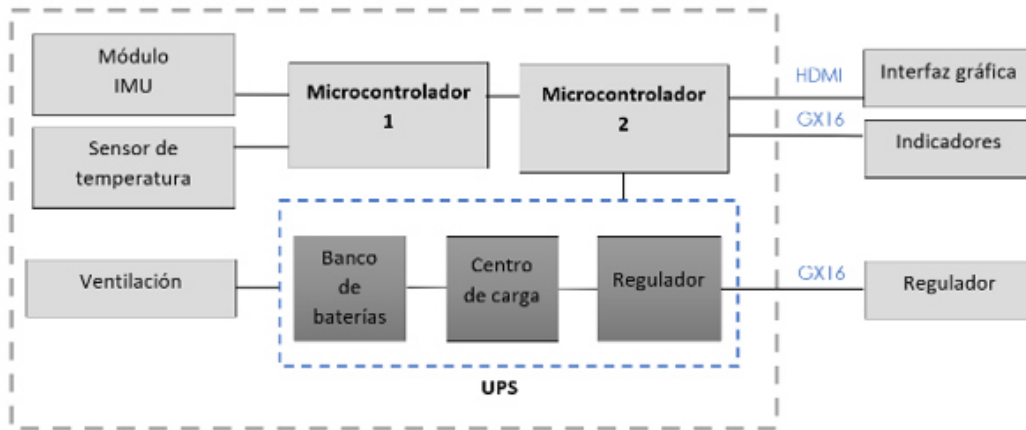


Figura 4. Diagrama a bloques de los módulos que integran el sistema desarrollado, el sistema incluye un sistema de alimentación de emergencia (UPS) línea discontinua azul, en tanto que los diferentes protocolos de comunicación se muestran con letra azul.

Se utilizó el lenguaje de programación C++ para tener una comunicación entre Arduino y el módulo IMU enviando los valores obtenidos y filtrados hacia la tarjeta Raspberry pi4 mediante el puerto serial

Se declararon dos variables locales para poder obtener los datos de inclinación X , Y . La instrucción 'deque' (max length 'maxlen= x ' máxima longitud vector) permitió crear un intervalo de trabajo en forma de lista iniciando un valor en 0 y otorgando la actualización en tiempo real en la gráfica.

Programación de interfaz gráfica

La interfaz gráfica contiene 4 diferentes formas de visualizar los datos obtenidos de las variables de interés, dos de ellas son indicadores visuales, esto con la finalidad de ser de fácil comprensión para el operador. Para las dos formas restantes de visualizar los datos (Gráfica y Tabla) se requiere de programación específica para configurar los parámetros de monitoreo.

En la gráfica se debe indicar la longitud de los ejes ' X , Y '. Se colocó una malla para una mejor visualización colocando etiquetas y título (Figura 5).

```
# Grafica
self.PLOT.showGrid(x=True,y=True, alpha=.5)#mostrarrejilla
self.PLOT.setLabel('bottom','Tiempo')# coloca etiqueta grafica
self.PLOT.setLabel('left','Amplitud')# coloca etiqueta grafica
self.PLOT.setTitle('MONITOREO')#setTitle coloca titulo a la grafica
self.PLOT.setXRange(0,100)
self.PLOT.setYRange(-8,8)
```

Figura 5. Código para configurar los parámetros de la gráfica.

Ahora bien, con el uso del código mostrado en la Figura 6, se configuraron los parámetros de la tabla de 2 columnas por 2 filas.

```

#PROPIEDADES TABLA QT
self.TABLA.setRowCount(2) # colocar numero de filas
self.TABLA.setColumnCount(2) # colocar numero de columnas
self.TABLA.setHorizontalHeaderLabels(["Señal", "Medida"]) # Colocar etiquetas horizontales
self.TABLA.setItem(0,0, QTableWidgetItem("Eje X")) # colocar objeto en celda 0,1
self.TABLA.setItem(1,0, QTableWidgetItem("Eje Y")) # colocar objeto en celda 1,1

```

Figura 6. Código para configurar los parámetros de la tabla.

Calibración

Para la calibración de los sensores inerciales se hizo uso de un sensor de nivel láser comercial (KKmoon, Multifuncional 3D), el cual cuenta con una precisión de $\pm 0.2\text{mm/m}$, el procedimiento consistió en colocar el equipo desarrollado en una mesa habilitada para ser inclinada en cualquier dirección, se colocó el nivel láser en el borde inferior del equipo desarrollado alineándolo en el eje XY tal como se ilustra en la Figura 7a, mediante la programación de cada uno de los sensores se estableció el nivel cero del equipo desarrollado y se comprobó revisando la alineación del sensor (Figura 7b); este mismo procedimiento se realizó para cada uno de los planos que constituyen el equipo desarrollado.

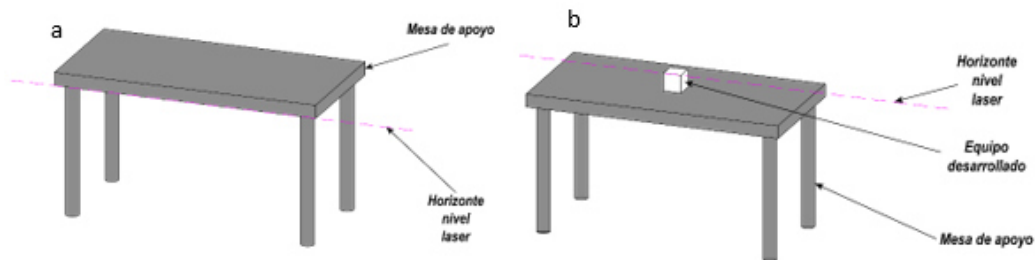


Figura 7. Proceso de calibración, a) alineación de la mesa de trabajo, b) comprobación de alineación del sensor.

Para verificar la correcta lectura de inclinación del equipo desarrollado, se empleó el método de ángulos pequeños mediante la implementación de una barra de senos [10, 11], dicho método consiste en colocar el equipo sobre un plano inclinado tal como se muestra en la Figura 8, el grado de inclinación se determinó utilizando las medidas del triángulo rectángulo formado por la mesa de apoyo, el plano inclinado y la altura del plano inclinado.

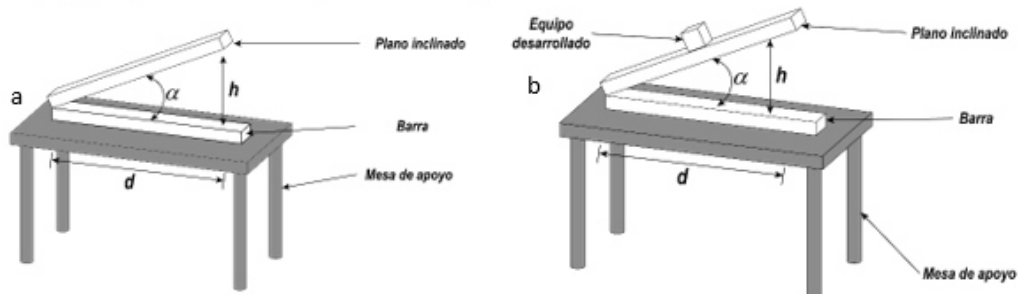


Figura 8. Método de barra de senos para calibración del inclinómetro, a) formación del plano inclinado, b) sensor ubicado en la barra de senos para su calibración

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Diseño de case 3D

La case 3D fue diseñada e impresa mediante FDM (*Fused Deposition Modeling*) [12] para almacenar los componentes principales (*Raspberry Pi4*, *Arduino nano* y *sensor inercial*), permitiendo el libre conexionado de los componentes, una perforación inferior para la conexión del suministro de energía y monitoreo mediante una pantalla conectada al puerto Micro HDMI (*High-Definition Multimedia Interface*) (Figura 9).

El diseño cuenta con dimensiones apropiadas para convertirse en un módulo semi universal entre las grandes marcas de grúas todoterreno, se consideró que se contara con una case robusta fabricada con ABS (*Acrylonitril Butadien Styreen*) [13] aislada de polvo y salpicaduras de líquidos ya que cuenta con tapones herméticos para las perforaciones de entradas y salidas de puertos periféricos y una tapa con una junta TPU (*Thermoplastic Polyurethane*) [14, 15] (Figura 9). Estos materiales fueron seleccionados con base en la resistencia mecánica y resistencia a la humedad; dichas características son necesarias para este diseño. Tanto la resistencia mecánica como la resistencia a la humedad fueron determinadas en pruebas anteriores.

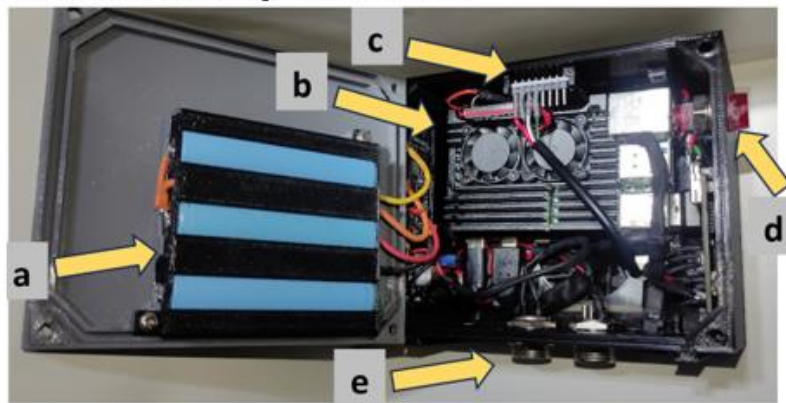


Figura 9. Gabinete del equipo desarrollado, a) banco de baterías, b) Raspberry, c) Sensor inercial, d) indicador de encendido, e) puertos de entrada/salida

Interfaz Gráfica

La interfaz gráfica se diseñó utilizando el software QT5 Designer con el objetivo de mostrar los valores de inclinación de la grúa en una gráfica en tiempo real mostrando los valores del eje X y del eje Y , una tabla para observar todos los valores de los ejes X y Y , también se agregó un cuadro que muestra el estado de nivelación de la grúa. La interfaz gráfica (Figura 10) muestra sus elementos divididos en secciones de acuerdo con el objetivo que cumple cada sección:

1. Indicadores de inclinación visual del eje X y Y para facilitar la comprensión al operador.
2. Se presentan los datos enteros obtenidos de inclinación y el estado de nivelación de la grúa indicando la correcta nivelación en verde y un estado de contingencia en Rojo.
3. Tabla de datos. Se dan a conocer los resultados obtenidos de una forma ordenada y con datos flotantes de los valores de inclinación.
4. Gráfica. Se muestra una gráfica en tiempo real de todos los datos obtenidos del eje X (Azul) y Y (Rojo).

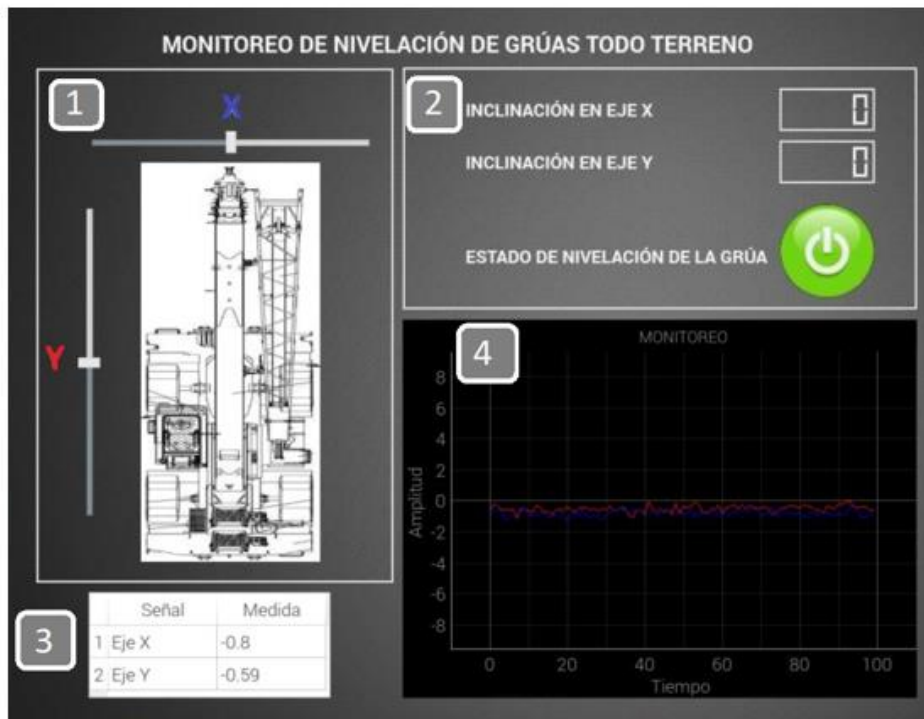


Figura 10. Interfaz gráfica y sus elementos 1) indicador deslizante de nivel, 2) indicador numérico, 3) tabla de valores, 4) gráfica de posición del inclinómetro.

Implementación del sensor IMU

Luego de la debida calibración del sensor IMU por el método de ángulos pequeños a nivel laboratorio, se procedió a la instalación en una grúa de 45 toneladas, como se muestra en la Figura 11. En este paso, se instaló el inclinómetro en tres diferentes grúas de 15, 45 y 90 toneladas, donde se llevaron a cabo la familiarización del operador con la interfaz gráfica y seguido a eso se realizaron maniobras necesarias para tener evidencias del correcto uso y funcionamiento del sensor.



Figura 11. Instalación del inclinómetro en la tornamesa de en una grúa con capacidad de 45 toneladas, a) fotografía de la grúa, b) detalle del sensor.

Para su correcto funcionamiento, el inclinómetro se debe colocar sobre la tornamesa de la grúa buscando siempre ser lo más cercana al centro de gravedad de la grúa y se fija a una superficie, plana, limpia y lisa mediante una base de sujeción semi universal. Como características adicionales, es necesario mencionar que el inclinómetro está diseñado para trabajar en un ambiente con vibraciones y a la intemperie, esto último debido a que presenta un diseño contra el agua.

CONCLUSIONES

El trabajo presentado logró proporcionar una herramienta para el sistema industrial en el área de grúas todoterreno la cual demuestra que es posible realizar la nivelación mediante el uso de nuevas tecnologías de bajo costo, hardware y software libre, todo esto sin comprometer la seguridad y precisión en los resultados. Gracias a esta innovación se permite conocer los niveles de inclinación en tiempo real, asistiendo al operador en el proceso de nivel de los estabilizadores.

Llevar a cabo una ayuda visual para el operador como lo es la interfaz gráfica permite tener noción de cada operación de movimiento que se está realizando y determinar si la maniobra se ejecuta apropiadamente. Por otro lado, el diseño presentado presenta una adecuada resistencia mecánica, así como a la humedad, características indispensables dado el ambiente de trabajo para este diseño. Finalmente, el inclinómetro diseñado cuenta con un banco de baterías interno que le permite continuar en funcionamiento aún cuando se interrumpa el suministro eléctrico.

REFERENCIAS EN ESTILO IEEE

- Acko, B. (2005). Calibration of electronic levels using a special sine bar. *Precision Engineering*, 29(1), 48-55. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2004.04.004>
- Adams, J., Draux, H., Jones, P., Osipov, I., Porter, S., & Szomszor, M. (2018). *Dimensions-A collaborative approach to enhancing research discovery*. <https://www.dimensions.ai/resources/a-collaborative-approach-to-enhancing-research-discovery/>
- CENAM. (2023). *Patrón Nacional de Ángulo*. Retrieved 22/05/2023 from <https://www.cenam.mx/dimensional/patronesnal/angulo>
- Company, Q. (2023). *Qt Designer Manual*. Qt Company. Retrieved 06/06/2023 from <https://doc.qt.io/qt-6/qt designer-manual.html>
- Fahmi, F., Nainggolan, F., Siregar, B., Soeharwinto, & Zarlis, M. (2020). User experience study on crane operator erection simulator using senso glove in a virtual reality environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 851(1), 012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/851/1/012023>
- Gao, X., Yu, N., & Li, J. (2020). Influence of printing parameters and filament quality on structure and properties of polymer composite components used in the fields of automotive. In K. Friedrich, R. Walter, C. Soutis, S. G. Advani, & I. H. B. Fiedler (Eds.), *Structure and Properties of Additive Manufactured Polymer Components* (pp. 303-330). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819535-2.00010-7>
- Khatri, B., Lappe, K., Habedank, M., Mueller, T., Megnin, C., & Hanemann, T. (2018). Fused Deposition Modeling of ABS-Barium Titanate Composites: A Simple Route towards Tailored Dielectric Devices. *Polymers*, 10(6), 666. <https://www.mdpi.com/2073-4360/10/6/666>
- Luchetti, S. (2021). *Arduino vs Raspberry Pi*. Tribalyte Technologies. Retrieved 05/06/2023 from <https://tech.tribalyte.eu/blog-arduino-vs-raspberry-pi>
- MCIElectronics. (2023). *¿Que es Raspberry Pi?* MCIElectronics. Retrieved 05/06/2023 from <https://raspberrypi.cl/que-es-raspberry/>