

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. G¹, Flores-Cuautle, J. J. A.² , Rodríguez-Jarquin, J. P.¹ , Lara-Hernandez, G.¹ 
(*larag_139@hotmail.com)

Recibido: 8 de junio de 2023 Aceptado: 2 de agosto de 2023

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.

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

²CONACYT- Tecnológico Nacional de México/I.T. Orizaba.



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].

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.

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

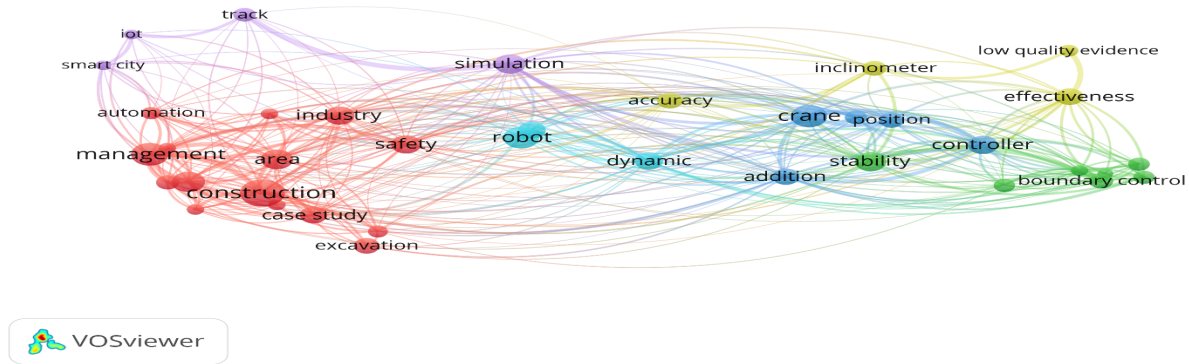


FIGURA 1. Análisis lingüístico de artículos publicados en los últimos cinco años y su respectiva relación. Las palabras que aparecen con mayor frecuencia son: Construcción, estabilidad, construcción, excavación, seguridad, área, entre otras.

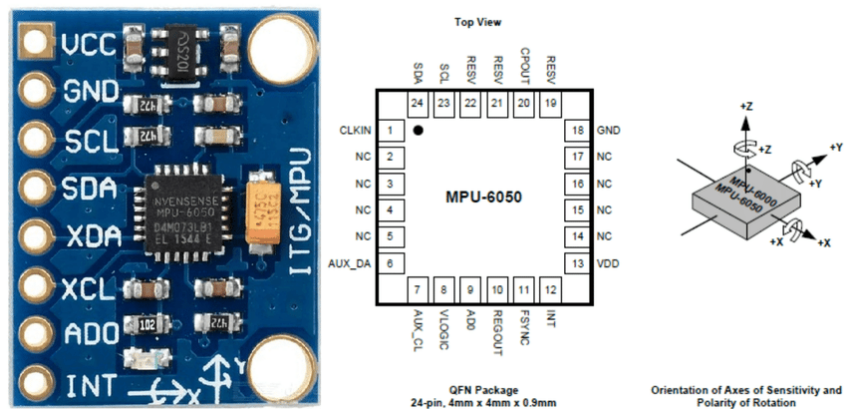


FIGURA 2. MPU6050 con la disposición de pin y orientación de ejes de sensibilidad y polaridad de rotación.

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 manera correcta (Figura 3).

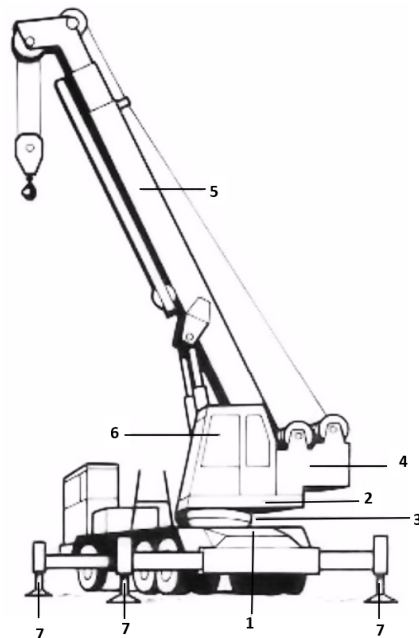


FIGURA 3. Partes y nomenclatura básica de una grúa 1) Chasis, 2 Plataforma base, 3 corona de orientación, 4 equipo de elevación, 5 flecha telescópica, 6 cabina de mando, 7 estabilizadores, Reproducida bajo términos de Open Access [2].

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 realizó 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 modelo B con sistema operativo Raspberry Pi OS [7, 8], 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.

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

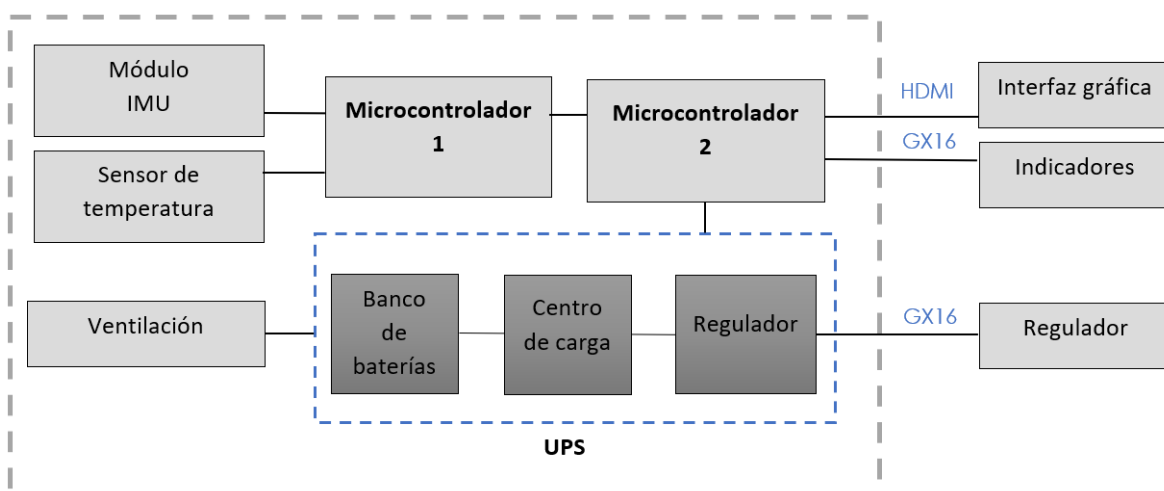


FIGURA 4. Diagrama a bloques de los módulos que integran el sistema desarrollado, el sistema incluye un sistema de alimentación de emergencia (UPS) línea discontinua azul, en tanto que los diferentes protocolos de comunicación se muestran con letra azul.

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.

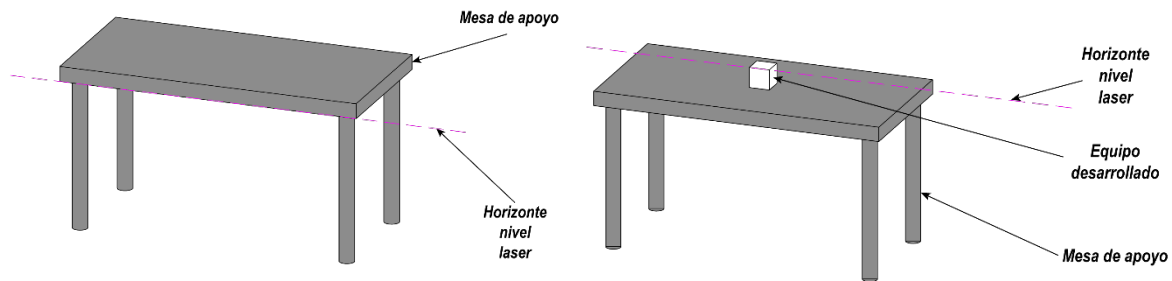


FIGURA 7. *Proceso de calibración, a) alineación de la mesa de trabajo, b) comprobación de alineación del sensor.*

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.

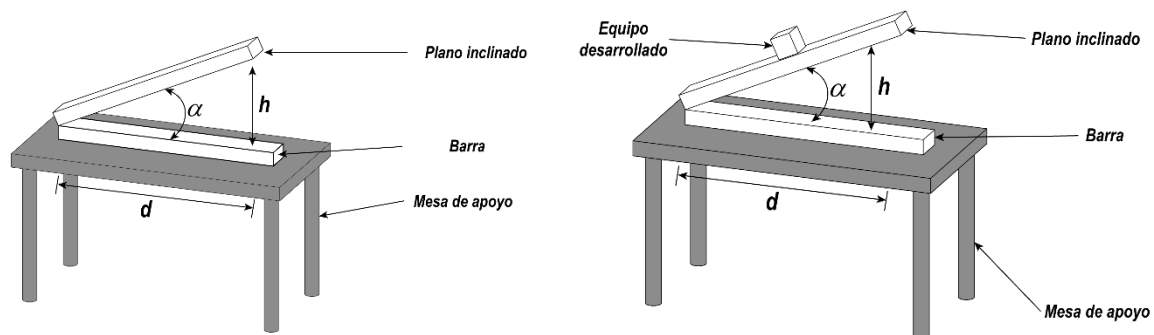


FIGURA 8. *Método de barra de senos para calibración del inclinómetro, a) formación del plano inclinado, b) sensor ubicado en la barra de senos para su calibración.*

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 Butadiene Styrene*) [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.

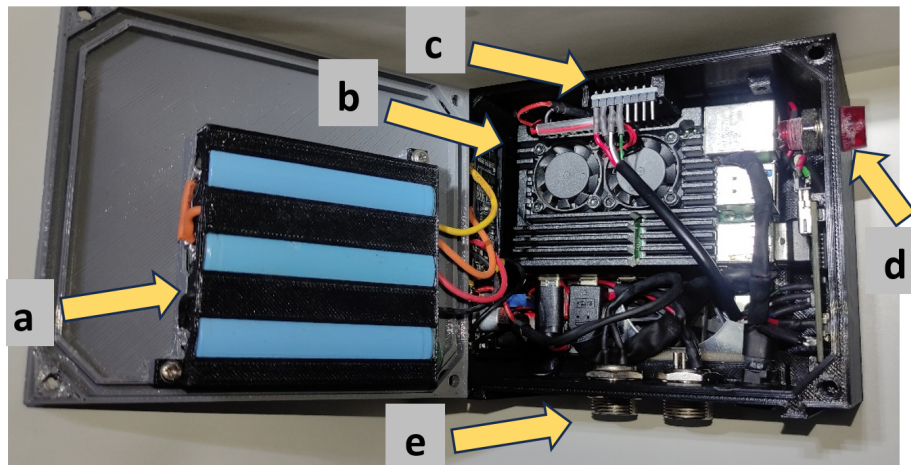


FIGURA 9. Gabinete del equipo desarrollado, a) banco de baterías, b) Raspberry, c) Sensor inercial, d) indicador de encendido, e) puertos de entrada/salida.

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).

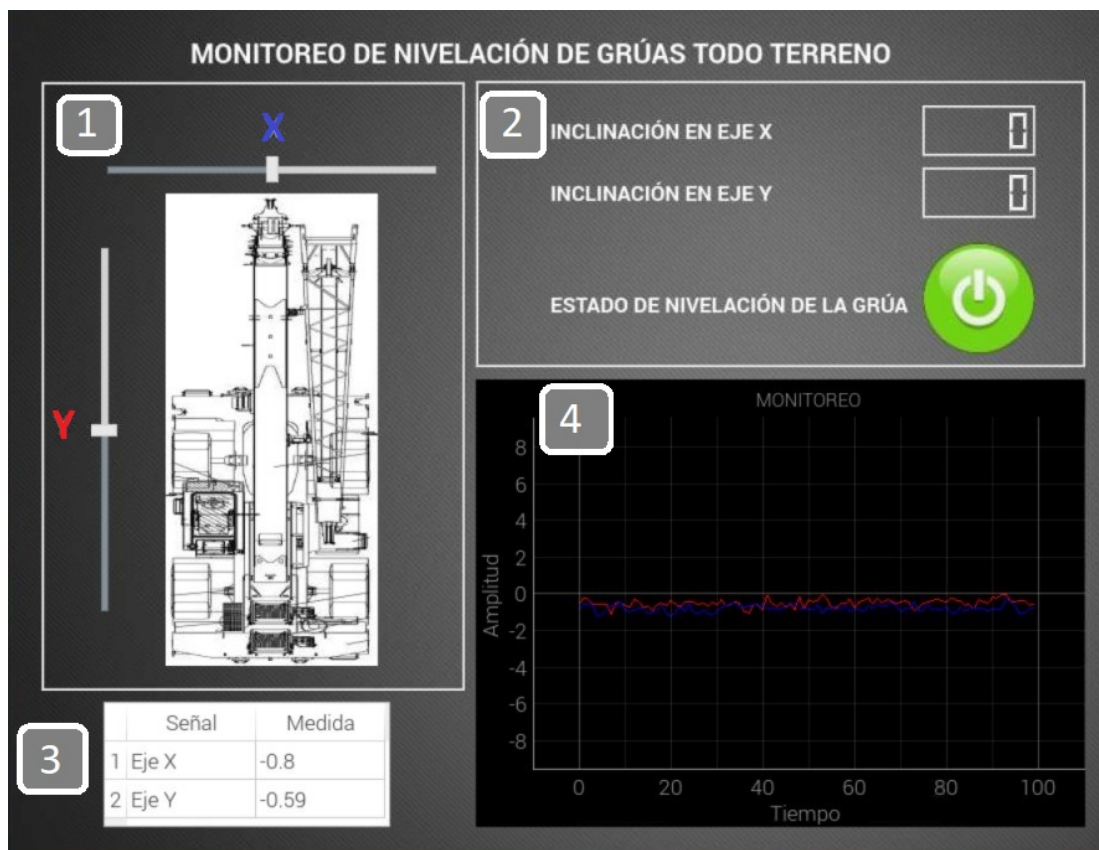


FIGURA 10. Interfaz gráfica y sus elementos 1) indicador deslizante de nivel, 2) indicador numérico, 3) tabla de valores, 4) gráfica de posición del inclinómetro.

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

- [1] Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Grúa móvil. Technical report, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, España, 1989.
- [2] I. Silos Millan. NTP 208: Grua Móvil. Technical report, Ministerio de trabajo y asuntos sociales España, 1988. [En línea]. Disponible en: https://www.insst.es/documents/94886/327166/ntp_208.pdf/c9231f60-9ce84a509a6f-e7be63e61a6c
- [3] F. Fahmi, F. Nainggolan, B. Siregar, Soeharwinto, and M. Zarlis. User experience study on crane operator erection simulator using senso glove in a virtual reality environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 851, no. 1, p. 012023, 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/851/1/012023
- [4] S. Minera. Riesgos y medidas de prevención en la operación de grúas móviles autopulsadas. *Revista seguridad Minera*, 2023. <https://www.revistaseguridadminera.com/operaciones-mineras/grua-autopulsada-riesgos-asociados-y-medidas-de-prevencion>

- [5] J. Adams, P. Jones, S. Porter, M. Szomszor, H. Draux, and I. Osipov. Dimensions-A collaborative approach to enhancing research discovery. Technical report, vol. 21, pp. 2021, 2018. [Online]. Available: https://www.dimensions.ai/wp-content/uploads/2019/04/Dimensions_Report_A_Collaborative_Approach.pdf
- [6] N. J. Van Eck and L. Waltman. VOSviewer manual. Leiden: Univeristeit Leiden, vol. 1, no. 1, pp. 1–53, 2013.
- [7] S. Luchetti. Arduino vs Raspberry Pi. Tribalyte Technologies, 2023. <https://tech.tribalyte.eu/blog-arduino-vs-raspberry-pi>
- [8] MCIElectronics. ¿Que es Raspberry Pi? MCIElectronics, 2023. <https://raspberrypi.cl/que-es-raspberry/>
- [9] Qt Designer Manual. Qt Company, 2023. <https://doc.qt.io/qt-6/qt designer-manual.html>
- [10] B. Acko. Calibration of electronic levels using a special sine bar. *Precision Engineering*, vol. 29, no. 1, pp. 48–55, 2005. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2004.04.004
- [11] CENAM. Patrón Nacional de Ángulo. 2023. <https://www.cenam.mx/dimensional/patronesnal/angulo>
- [12] 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.
- [13] 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. <https://www.mdpi.com/2073-4360/10/6/666>
- [14] 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. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.04.015
- [15] C. Ursini and L. Collini. FDM Layering Deposition Effects on Mechanical Response of TPU Lattice Structures. *Materials*, vol. 14, no. 19, p. 5645, 2021. <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/19/5645>