

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO QUE CALCULE  
EL ASENTAMIENTO DIFERENCIAL DE UN EDIFICIO POR MEDIO DE UN  
ARREGLO DE SENSORES**

**MARISOL JULIO RODRÍGUEZ**

**JEISSON ENRIQUE BELTRÁN REYES**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS**

**BOGOTÁ D.C.**

**2021**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO QUE CALCULE  
EL ASENTAMIENTO DIFERENCIAL DE UN EDIFICIO POR MEDIO DE UN  
ARREGLO DE SENSORES**

**MARISOL JULIO RODRÍGUEZ**

**JEISSON ENRIQUE BELTRÁN REYES**

**PROYECTO DE GRADO PARA ASPIRAR AL TÍTULO DE INGENIERO  
ELECTRÓNICO**

**DIRECTOR: ING. EDWIN FRANCISCO FORERO GARCÍA**

**CODIRECTOR: ING. CARLOS EDUARDO TORRES ROMERO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS**

**BOGOTÁ D.C.**

**2021**

**AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD**

**RECTOR GENERAL**

FRAY JOSÉ GABRIEL MESA ANGULO, O.P.

**VICERRECTOR ACADÉMICO GENERAL**

FRAY EDUARDO GONZÁLES GIL, O.P.

**VICERRECTOR ADMINISTRATIVO Y FINANCIERO GENERAL**

FRAY LUIS FRANCISCO SASTOQUE POVEDA, O.P.

**SECRETARIA GENERAL**

INGRID LORENA CAMPOS VARGAS

**DECANO DIVISIÓN DE INGENIERÍAS**

FRAY LUIS ANTONIO ALFONSO VARGAS, O.P.

**SECRETARIA DIVISIÓN DE INGENIERÍAS**

LUZ PATRICIA ROCHA CAICEDO

**DECANO FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

ING. CARLOS ENRIQUE MONTENEGRO NARVÁEZ

**SECRETARIA FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

SANDRA MILENA CAMARGO

## **DEDICATORIA**

iii

Este trabajo va dedicado a nuestras familias que representan una motivación para nosotros por su apoyo incondicional en los momentos más difíciles, por sus consejos y comprensión a lo largo del camino.

Esto es por y gracias a ustedes.

## AGRADECIMIENTOS

iv

*“Quiero agradecer a mi familia, en especial a mis padres, Maria Del Transito Rodríguez y Jorge Antonio Julio, a mi hermana Angela Rodríguez y a mi hermana gemela Jessica Julio Rodríguez por ser los apoyos incondicionales a cada momento de la carrera.*

*Por último, pero no menos importante doy gracias a los docentes que me acompañaron durante toda esta etapa académica, como es el caso de mi tutor de proyecto Edwin Forero por su paciencia, ayuda y guía en cada una de las etapas para la elaboración de este proyecto”*

*Marisol Julio Rodríguez.*

*“Quiero dar mis agradecimientos sinceros a mi padre Nelson Beltrán y mi madre Consuelo Reyes, quienes siempre estuvieron apoyándome, guiándome, y dando más de lo que podían; agradezco a mi tía Marta Reyes por confiar en mí y brindar ese gran apoyo, a mis padrinos de bautizo José Benavides y Emelina Reyes, que desde que tengo memoria han estado muy pendientes ofreciendo su ayuda y aprecio, agradezco también a mis tíos Oscar Ocacion y Alfonso Ocacion, además al ingeniero y gran amigo Alejandro Bárcenas por ese gran apoyo, por último un agradecimiento general para docentes y estudiantes de todos estos años, que de alguna manera contribuyen a esa formación diaria”*

*Jeisson Enrique Beltrán Reyes.*

## TABLA DE CONTENIDOS

v

|        |                                                                                  |    |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.     | TÍTULO .....                                                                     | 1  |
| 2.     | INTRODUCCIÓN .....                                                               | 2  |
| 3.     | JUSTIFICACIÓN .....                                                              | 3  |
| 4.     | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                                                 | 5  |
| 5.     | ANTECEDENTES .....                                                               | 7  |
| 6.     | OBJETIVOS .....                                                                  | 9  |
| 6.1    | OBJETIVO GENERAL .....                                                           | 9  |
| 6.2    | OBJETIVOS ESPECIFICOS.....                                                       | 9  |
| 7.     | PRESUPUESTO .....                                                                | 10 |
| 7.1    | PRESUPUESTO PROPUESTO .....                                                      | 10 |
| 8.     | MARCO TEÓRICO.....                                                               | 11 |
| 9.     | DISEÑO Y EJECUCIÓN DEL PROYECTO .....                                            | 24 |
| 9.1    | ETAPA DE SELECCIÓN DEL SENSOR .....                                              | 24 |
| 9.1.1  | Acelerómetros. ....                                                              | 24 |
| 9.1.2  | Galgas extensiométricas.....                                                     | 42 |
| 9.1.3  | Sensores de nivel.....                                                           | 48 |
| 9.1.4  | Conclusión selección de sensor. ....                                             | 59 |
| 9.2    | ETAPA DE DISEÑO DE ESTRUCTURA FÍSICA .....                                       | 60 |
| 10.    | RESULTADOS DEL PROYECTO.....                                                     | 63 |
| 10.1   | ESTRUCTURA FÍSICA.....                                                           | 63 |
| 10.2   | DIAGRAMA DE FLUJO .....                                                          | 66 |
| 10.3   | COMPARADOR HIDROSTÁTICO CONTROL DE ASENTAMIENTO CON<br>ARREGLO DE SENSORES ..... | 70 |
| 10.3.1 | Toma de datos y cálculo de errores.....                                          | 75 |
| 10.4   | PRESUPUESTO EJECUTADO.....                                                       | 86 |
| 11.    | IMPACTO SOCIAL .....                                                             | 87 |
| 12.    | CONCLUSIONES .....                                                               | 88 |
| 13.    | TRABAJO FUTURO.....                                                              | 89 |
| 14.    | BIBLIOGRAFÍA .....                                                               | 90 |
| 15.    | ANEXOS .....                                                                     | 93 |

## LISTA DE FIGURAS

vi

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Manguera en punto de control. ....                                                         | 6  |
| Figura 2. Plano con mangueras de referencia. ....                                                    | 6  |
| Figura 3. Tipos de zapatas. ....                                                                     | 12 |
| Figura 4. Tipos de losas. ....                                                                       | 12 |
| Figura 5. Viga y muro. ....                                                                          | 13 |
| Figura 6. Pilote prefabricado. ....                                                                  | 13 |
| Figura 7. Pilote IN SITU. ....                                                                       | 14 |
| Figura 8. Pozos de cimentación. ....                                                                 | 15 |
| Figura 9. Asentamiento total o uniforme. ....                                                        | 17 |
| Figura 10. Asentamiento Diferencial. ....                                                            | 17 |
| Figura 11. Asentamiento Diferencial con puntos de referencia. ....                                   | 18 |
| Figura 12. Raspberry Pi 3 B+. ....                                                                   | 21 |
| Figura 13. Acelerómetro. ....                                                                        | 22 |
| Figura 14. Galga extensiométrica de lámina simple. ....                                              | 22 |
| Figura 15. Sensor de nivel de agua. ....                                                             | 23 |
| Figura 16. Nombre de rotaciones según eje. ....                                                      | 25 |
| Figura 17. Pines de conexión IMU. ....                                                               | 27 |
| Figura 18. Resultados obtenidos en pantalla. ....                                                    | 29 |
| Figura 19. Curva característica del acelerómetro AltIMU-10 v5. ....                                  | 30 |
| Figura 20. Configuración de pines. ....                                                              | 33 |
| Figura 21. Secuencia de movimiento anti horario. ....                                                | 35 |
| Figura 22. Evolución aceleración en eje x giro antihorario. ....                                     | 36 |
| Figura 23. Evolución aceleración en eje y giro antihorario. ....                                     | 36 |
| Figura 24. Aceleración sobre el eje X. ....                                                          | 40 |
| Figura 25. Velocidad sobre eje X. ....                                                               | 40 |
| Figura 26. Posición en el eje X. ....                                                                | 41 |
| Figura 27. Puente de wheatstone . ....                                                               | 44 |
| Figura 28. Base para sostener la Celda de carga SEN-1025. ....                                       | 45 |
| Figura 29. Celda de carga SEN-1025 con peso. ....                                                    | 45 |
| Figura 30. Conexión celda de carga SEN-1025, conversor y arduino. ....                               | 46 |
| Figura 31. Gráfica variación voltaje (mV) Vs peso (Kg). ....                                         | 47 |
| Figura 32. Sensor de nivel de agua. ....                                                             | 49 |
| Figura 33. Divisor de Voltaje para caracterizar el sensor de nivel. ....                             | 49 |
| Figura 34. Practica toma de datos. ....                                                              | 50 |
| Figura 35. Resistencia $R_x$ Vs Nivel de agua en el sensor Adeept. ....                              | 52 |
| Figura 36. Sensor eTape de Milone technologies. ....                                                 | 53 |
| Figura 37. Divisor de voltaje sensor de nivel eTape. ....                                            | 55 |
| Figura 38. Resistencia $R_{sense}$ Vs Nivel de agua en el sensor eTape (divisor de voltaje). ....    | 56 |
| Figura 39. Conexión puente de wheatstone sensor de nivel eTape. ....                                 | 56 |
| Figura 40. Resistencia $R_{sense}$ Vs Nivel de agua en el sensor eTape (puente de wheatstone ). .... | 58 |
| Figura 41. Plano de la mesa de control. ....                                                         | 61 |
| Figura 42. Diseño punto de control sensores. ....                                                    | 62 |
| Figura 43. Estructura de control. ....                                                               | 63 |
| Figura 44. Cimentaciones modelo a escala. ....                                                       | 64 |

|                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 45. Modelo a escala de la estructura.....                                                                                       | 63 |
| Figura 46. Parte interna del modelo a escala junto con el punto de control. ....                                                       | 65 |
| Figura 47. Parte externa del modelo a escala junto con el punto de control.....                                                        | 66 |
| Figura 48. Diagrama de flujo del algoritmo.....                                                                                        | 67 |
| Figura 49. Diagrama de bloques de lazo abierto.....                                                                                    | 70 |
| Figura 50. Programa de arduino que recolecta los datos de los sensores. ....                                                           | 71 |
| Figura 51. Valor que envía el arduino a la raspberry.....                                                                              | 71 |
| Figura 52. Captura de Raspberry pi, donde se muestran las ventanas que se abren al ejecutar el algoritmo de la Raspberry.....          | 72 |
| Figura 53. Captura de Raspberry pi en la que el programa abre WhatsApp y envía la alerta al contacto de Emergencia. Fuente: Autor..... | 73 |
| Figura 54. Captura del WhatsApp del contacto de emergencia. ....                                                                       | 73 |
| Figura 55. Captura de Raspberry pi en la que se busca el Historial de datos.xlsx. ....                                                 | 74 |
| Figura 56. Algunos datos almacenados en el archivo: Historial de datos.xlsx.....                                                       | 75 |
| Figura 57. Estructura nivelada (sin asentamiento).....                                                                                 | 76 |
| Figura 58. Estructura con asentamiento en el punto de control 1. ....                                                                  | 76 |
| Figura 59. Estructura con asentamiento en el punto de control 2. ....                                                                  | 77 |
| Figura 60. Toma de medidas con la regla. ....                                                                                          | 77 |
| Figura 61. Datos y curva de linealización para el Sensor 1.....                                                                        | 80 |
| Figura 62. Datos y curva de linealización para el Sensor 2. ....                                                                       | 82 |

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Presupuesto estimado.....                                                                    | 10 |
| Tabla 2. Distorsión angular.....                                                                      | 19 |
| Tabla 3. Valores máximos asentamiento calculado.....                                                  | 19 |
| Tabla 4. Especificaciones de la Raspberry Pi 3 B +. ....                                              | 20 |
| Tabla 5. Conexión IMU - Arduino. ....                                                                 | 28 |
| Tabla 6. Tabulación de datos obtenidos.....                                                           | 30 |
| Tabla 7. Descripción y función de pines.....                                                          | 33 |
| Tabla 8. Datos obtenidos a partir de la Figura 22 y la Figura 23.....                                 | 37 |
| Tabla 9. Resultado medidas de aceleración para ADXL204. ....                                          | 37 |
| Tabla 10. Valores digitales teóricos.....                                                             | 38 |
| Tabla 11. Valores experimentales.....                                                                 | 38 |
| Tabla 12. Voltaje Vs Peso en celda de carga SEN-1025. ....                                            | 46 |
| Tabla 13. Tabulación de datos sensor de nivel Adeept.....                                             | 51 |
| Tabla 14. Resultados medidas realizadas.....                                                          | 78 |
| Tabla 15. Resultados obtenidos al evaluar la linealidad del Sensor 1. ....                            | 79 |
| Tabla 16. Constantes y $\Delta$ Linealidad máx. Obtenidas al evaluar la linealidad del Sensor 1. .... | 80 |
| Tabla 17. Resultados obtenidos al evaluar la linealidad del Sensor 2. ....                            | 81 |
| Tabla 18. Constantes y $\Delta$ Linealidad máx. Obtenidas al evaluar la linealidad del Sensor 2. .... | 82 |
| Tabla 19. Resultados obtenidos al hallar la exactitud del Sensor 1. ....                              | 83 |
| Tabla 20. Error de exactitud del Sensor 1.....                                                        | 83 |
| Tabla 21. Resultados obtenidos al hallar la exactitud del Sensor 2. ....                              | 84 |
| Tabla 22. Error de exactitud del Sensor 2.....                                                        | 84 |
| Tabla 23. Presupuesto ejecutado.....                                                                  | 86 |

## LISTA DE ANEXOS

ix

|                                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Anexo 1. Código Arduino para mostrar datos del acelerómetro y giroscopio.....                                        | 93  |
| Anexo 2. Código Arduino para conocer el peso que se le esta aplicando a la celda de carga SEN-1025.....              | 94  |
| Anexo 3. Tabulación de datos divisor de voltaje sensor de nivel eTape. ....                                          | 95  |
| Anexo 4. Tabulación de datos puente de wheatstone sensor de nivel eTape. ....                                        | 97  |
| Anexo 5. Código Raspberry Pi 3 B+ para sensores de nivel eTape comparador hidrostático control de asentamiento ..... | 99  |
| Anexo 6. Tabla de datos del archivo de Excel: Historial de datos.xlsx.....                                           | 107 |

**Asentamiento:** Hundimiento o descenso del nivel de una estructura debido a la compresión y deformación del suelo o roca de cimentación.

**Asentamiento diferencial:** Máxima diferencia de nivel entre dos cimentaciones adyacentes de una misma estructura [1].

**Asentamiento diferencial tolerable:** Máximo asentamiento diferencial entre dos elementos adyacentes a la estructura, no causara daños visibles ni problemas cuando se genere.

**Asentamiento por consolidación:** Debido a la expulsión de agua en los poros, el volumen del suelo disminuye, y después de que la sobre presión en el espacio desaparece. La reducción en el volumen se traduce en deformación vertical o asentamiento. Este es un comportamiento típico de la arcilla saturada [2].

**Capacidad portante:** Presión que se puede ejercer sobre el terreno sin peligro alguno.

**Cerramiento:** Cerca construida dentro de la parcela, cuya cara exterior se sitúa sobre los linderos.

**Cimentación:** Parte de la edificación que transmite al subsuelo las cargas de la estructura.

**Consolidación:** Proceso de expulsión de agua que sucede cuando el suelo está saturado, provoca una disminución de volumen. La consolidación puede durar desde un instante hasta años dependiendo de la permeabilidad del suelo.

**Datos:** Representación de una variable que puede ser cuantitativa o cualitativa, indica un valor que se le asigna a las cosas. Los datos son información [3].

**Depósito de suelos blandos:** Son arcillas de origen lacustre depositadas durante los últimos 100.000 años. Estos suelos poseen espesores típicos en la ciudad entre 200m y 300m. Y alcanzan profundidades de 600 m o más al occidente del río Bogotá [4].

**Distorsión angular:** Se define como el cociente entre el asentamiento diferencial entre dos columnas adyacentes y la distancia entre ejes.

**Estratificación:** Es la forma natural en la que se disponen los suelos en la profundidad.

**Estructuras metálicas:** La mayoría de los elementos o partes que las componen son de metal (más del 80%), generalmente de acero. Este grupo de partes conectadas forma un cuerpo principal cuya forma general está diseñada para resistir las fuerzas que actúan sobre el cuerpo.

**Estudio de mecánica de suelos (EMS):** Conjunto de exploraciones e investigaciones de campo, pruebas de laboratorio y análisis de oficina que tienen por objetivo estudiar el comportamiento de los suelos y sus respuestas a las solicitudes estáticas y dinámicas de una edificación [5].

**Fisura:** Grieta que se produce en un objeto.

**Fuerza g:** tiene como unidad de medida a la gravedad ( $g$ ). es decir  $1 \text{ fuerza } G = 9,8m/s^2$ . La gravedad no es una fuerza pero así se la denomina como una medida para identificar a la gravedad, entonces los cambios de aceleración producen Fuerzas  $g$  [6].

**Hormigón:** Material de construcción compuesto por cemento hidráulico, arena, grava y agua. Que al endurecerse adquiere resistencia [7].

**Hormigón armado:** Bloque de hormigón reforzado con barras de hierro o acero para, una vez endurecido, absorber la tensión de tracción a la que queda sometido.

**Licuefacción o licuación:** Fenómeno causado por la vibración sísmica en el suelo granular saturado, lo cual aumenta la presión del agua dentro del suelo con la consecuente reducción de la tensión efectiva. La licuación reduce la capacidad de carga y rigidez del suelo. Según el estado del suelo granular saturado al ocurrir la licuación se produce el hundimiento y colapso de las estructuras cimentadas sobre dicho suelo.

**Muro de cierre:** Se define como la fachada de un edificio que no lleva ninguna carga más que la de su propio peso.

**Pilote:** Pilar enterrado en un terreno, existen dos tipos básicos de pilotes, según su forma de trabajar: punta comprimida; compresión (pilar). Flotante; presión lateral del terreno.

**Presión admisible:** Máxima presión que la cimentación puede transmitir al terreno sin que ocurra asentamientos excesivos (mayores de lo admisible).

**Presión admisible por asentamiento:** Presión que, al ser aplicada por la cimentación, ocasiona un asentamiento diferencial igual al asentamiento admisible.

**Presión de contacto:** Carga transmitida por las estructuras al terreno en el nivel de cimentación, incluyendo el peso propio del cimiento.

**Profundidad de cimentación:** Profundidad a la que se encuentra el plano o desplante de la cimentación de una estructura. Plano a través del cual se aplica la carga, referido al nivel del terreno de la obra terminada.

**Programación:** La acción de crear programas o aplicaciones, a través del desarrollo de un código fuente [8].

**Python:** Es un lenguaje de scripting independiente de la plataforma y orientado a objetos, preparado para realizar cualquier tipo de programa, desde aplicaciones Windows a servidores de red o incluso, páginas web [9].

**Raspberry Pi:** Es un ordenador de placa reducida de bajo coste desarrollado en el Reino Unido por la Fundación Raspberry Pi [10].

**Sensor:** Dispositivo que detecta una determinada acción externa, temperatura, presión, etc., y la transmite adecuadamente [11].

**Suelo colapsable:** Suelo que al ser humedecido sufre un asentamiento o colapso<sup>xiii</sup> relativamente rápido, que pone en peligro a las estructuras cimentadas sobre él.

**Suelo expansivo:** Suelo que al ser humedecido sufre una expansión que pone en peligro a las estructuras cimentadas sobre él.

**Talud:** Inclinação del parámetro de un muro o de un terreno.

## **1. TÍTULO**

Diseño e implementación de un sistema electrónico que calcule el asentamiento diferencial de un edificio por medio de un arreglo de sensores.

## 2. INTRODUCCIÓN

Este proyecto se basa en el diseño e implementación de un sistema electrónico que calcula el asentamiento diferencial de un edificio por medio de un arreglo de sensores, esto con el fin de automatizar un proceso que no solo es riesgoso, sino que requiere de monitoreo constante.

En el desarrollo se implementa un sistema de sensores, que luego de ser instalado y comprobar que funcionan como se desea. El sistema pueda beneficiar tanto a grandes empresas como a personas naturales. Su fin es ayudar a los de ingenieros civiles, o personas que requieran monitorear el asentamiento de una estructura, puesto que pueden ejecutar las medidas necesarias para corregir el asentamiento diferencial de la edificación con algunas técnicas como la cimentación con pilotes, consolidar el terreno mediante inyección de resinas expansivas, entre otras.

El presente documento desarrolla una propuesta realizada desde el punto de vista de la electrónica que se quiere comparar con el sistema convencional para analizar las ventajas y desventajas de este. Y así pueda ser tenido en cuenta en una futura implementación del Comparador hidrostático control de asentamiento.

### 3. JUSTIFICACIÓN

Teniendo en cuenta que la sobrepoblación es considerada como un gran problema, se hace necesaria la construcción gradual de edificios más altos, sin embargo, en una ciudad como Bogotá, 60% construida sobre depósitos lacustres [12], hace que se generen movimientos de tierra, lo cual afecta edificaciones colindantes a estas nuevas construcciones, es por ello que es común encontrar variaciones en los niveles de la cimentación y se hace necesario un reforzamiento o enderezamiento estructural.

Una parte fundamental de este reforzamiento o enderezamiento, es el control constante o seguimiento de la transición de la estructura, para ello se utiliza el comparador hidrostático, un instrumento de poco uso comercial, sin embargo existe carencia de empresas en Colombia trabajando en esta área, después de una investigación de las empresas que se dedican al reforzamiento estructural, se contactaron cuatro de las más destacadas como lo son: LFO Ingenieros, Espinoza & Restrepo, Disepil SAS y Salazar Ferro Ingenieros SAS, las primeras tres no ofrecen ningún tipo de control para el asentamiento, sin embargo el llamado: “Comparador hidrostático control de asentamiento” es instalado únicamente por la empresa Salazar Ferro Ingenieros SAS, y es utilizado como valor agregado de dicha empresa. Otras empresas utilizan los métodos tradicionales para hacer controles topográficos como el banco de nivel (obtenido a partir de un nivel topográfico): “es un instrumento que tiene como finalidad medir desniveles entre puntos que se hallan a distintas alturas” [13], aunque este método es bastante

común, no sirve para hacer un control de asentamiento diferencial (cambios de nivel en cada punto estructural).

Es por ello que este proyecto hace una mejora considerable al comparador hidrostático control de asentamiento, puesto que al aplicar la electrónica se elabora un sistema de monitoreo constante que almacena por igual los datos suministrados por los sensores como la hora exacta en la que fueron tomados. Una de sus características más importantes es el hecho de que este envía una alerta cuando se excede el asentamiento diferencial permitido del edificio. Si el usuario atiende esta alerta de manera oportuna se pueden evitar pérdidas humanas, daños estructurales e incluso el desplome de la estructura. Además de lo mencionado se tiene la certeza que este proyecto será más económico que el sistema usado, específicamente en cuanto a mano de obra; también hay una reducción en el error al tomar los datos al igual que una disminución en el riesgo laboral.

Por último se destaca que el trabajo realizado no se quedará en una idea, sino que buscará entrar al mercado a competir, además de una evolución constante que permita el mejoramiento en general.

#### 4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Desde la aparición de la ingeniería electrónica muchos sistemas usados en diversas áreas han sido reestructurados con la ayuda de dispositivos electrónicos, un ejemplo es la máquina de escribir, totalmente mecánica, que gradualmente fue reemplazada por las computadoras, mejorando sus funciones y capacidades.

Identificar un problema o una necesidad parece no ser tan fácil en estos tiempos, sin embargo, se sabe que se vive en un mundo cuya evolución es constante; no obstante, este proyecto está enfocado en mejorar un instrumento de medida utilizado en la ingeniería civil.

Actualmente en Colombia, dicho instrumento llamado “Comparador hidrostático control de asentamiento” es instalado por la empresa Salazar Ferro Ingenieros SAS. El cual es capaz de identificar la variación vertical en una estructura o edificio, y así determinar posibles asentamientos o elevaciones respecto a un punto de referencia, emplea mangueras llenas de agua, aplicando el principio de la física, denominado: Vasos comunicantes; aunque este instrumento cuenta con un margen de error de  $\pm 3\text{mm}$ , tiene algunas desventajas que inspiran a mejorarlo. La primera es el espacio requerido para instalar una manguera en cada punto de control Figura 1 y otro para ubicar los extremos de cada manguera, utilizados como referencia Figura 2; en la segunda se realiza el monitoreo de forma manual, dando espacio al error humano y al costo en mano de obra, provocando asimismo un retardo en la adquisición de datos.



*Figura 1. Manguera en punto de control.*

*Fuente: Autor, foto tomada en visita técnica bajo la autorización del Ing. Alejandro Bárcenas.*



*Figura 2. Plano con mangueras de referencia.*

*Fuente: Autor, foto tomada en visita técnica bajo la autorización del Ing. Alejandro Bárcenas.*

## 5. ANTECEDENTES

El suelo de la ciudad de Bogotá está constituido geológicamente por depósitos de arcilla formados por la desecación de un antiguo lago de sedimentación de minerales [13], la característica principal de este tipo de suelo es ser expansivos y deficientes para el soporte de estructuras.

En la ciudad se observa un gran número de edificios y casas que tienen daños ocasionados durante su proceso de construcción o durante su vida útil, los cuales incluyen inclinación, grietas, desplomes y tal vez colapsos (concebidos por la mala proyección del comportamiento del suelo con respecto a la estructura o su mala cimentación [14]). A causa de estos daños se presentan pérdidas materiales y en casos agravados pérdidas humanas, por lo que es necesario buscar una solución para monitorear el asentamiento y prevenir daños en la estructura.

Para monitorear y controlar el asentamiento se utiliza una serie de métodos incluido el “comparador hidrostático control de asentamiento”, que funciona bajo el principio de física denominado vasos comunicantes, el cual enuncia que: “si en un conjunto de vasos comunicante se vierte un líquido homogéneo cualquiera, y se deja en reposo se observa que, sin importar la forma o el volumen de los vasos, la superficie superior del líquido en todos ellos alcanza el mismo nivel” [15].

Para instalarlo se ubican las mangueras o tubos flexibles en cada uno de los cimientos de la estructura cuyos extremos irán a un plano como se muestra en la Figura 2, para hacer la respectiva lectura de datos se parte de la medida o nivel de referencia (el punto en el cual

el edificio no representa asentamiento) y con las medidas tomadas se sabe si presenta o no asentamiento.

Basados en el sistema descrito anteriormente se tiene una gran expectativa con la implementación del sensor electrónico que permita el cálculo del asentamiento buscando tener menor margen de error, garantizar el funcionamiento sin importar la temperatura ambiental, menor tamaño y optimizando la instalación.

## **6. OBJETIVOS**

### **6.1 OBJETIVO GENERAL**

Implementar un instrumento electrónico de medida mediante el uso de los sensores apropiados para identificar variaciones de inclinación de una estructura o edificio.

### **6.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Seleccionar el sensor según las características establecidas para el desarrollo del proyecto.
- Diseñar un sistema electrónico que permita mediante el uso de sensores medir el asentamiento diferencial de un edificio.
- Implementar el hardware requerido para la operación del sistema.
- Validar la información obtenida del sistema de medida implementado.

## 7. PRESUPUESTO

### 7.1 PRESUPUESTO PROPUESTO

Para la ejecución de este proyecto se presupuestaron los recursos necesarios para su elaboración, dicho presupuesto se muestra en Tabla 1. Donde se muestran los respectivos valores de cada elemento (en pesos colombianos COP), cantidad y persona encargada de proveer los recursos.

| <i>Concepto</i>                                            | <i>Valor</i>          |                 |              | <i>Financiación</i> |                   |
|------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------|--------------|---------------------|-------------------|
|                                                            | <i>Valor Estimado</i> | <i>Cantidad</i> | <i>Total</i> | <i>Universidad</i>  | <i>Estudiante</i> |
| <b>PERSONAL</b>                                            |                       |                 |              |                     |                   |
| Honorarios de los estudiantes                              | \$877.802             | 6 (Meses)       | \$5.266.812  |                     | X                 |
| Honorarios del director                                    | \$4.389.017           | 6 (Meses)       | \$26.334.102 | X                   |                   |
| <b>EQUIPOS</b>                                             |                       |                 |              |                     |                   |
| Fuente DC                                                  | \$100.000             | 1               | \$100.000    | X                   |                   |
| Multímetro                                                 | \$250.000             | 1               | \$250.000    | X                   |                   |
| Computador                                                 | \$2.000.000           | 2               | \$4.000.000  |                     | X                 |
| Pantalla o TV                                              | \$200.000             | 1               | \$200.000    | X                   |                   |
| <b>MATERIALES</b>                                          |                       |                 |              |                     |                   |
| Sensores                                                   | \$350.000             | 6               | \$2.100.000  |                     | X                 |
| Demás Elementos (Leds, pulsadores, conector, resistencias) | \$80.000              | 1               | \$80.000     |                     | X                 |
| Raspberry Pi 3 B+ Kit                                      | \$300.000             | 1               | \$300.000    |                     | X                 |
| Estructura Carcasa                                         | \$60.000              | 1               | \$60.000     |                     | X                 |
| Imprevistos y otros elementos                              | \$70.000              | 1               | \$70.000     |                     | X                 |
| <b>Total</b>                                               |                       |                 |              | <b>\$38.760.914</b> |                   |

Tabla 1. Presupuesto estimado.

Fuente: Autor.

## 8. MARCO TEÓRICO

Una de las partes más importantes de un edificio son las cimentaciones, puesto que estas transmiten las cargas actuantes sobre la totalidad de la construcción (edificio, casa, puente, estructura, etc.), mediante unas superficies calculadas y diseñadas para el tipo de suelo en que se apoyan. Por lo tanto, no se deben ahorrar materiales ni cuidados para su elaboración, ya que si estas presentan cargas excesivas (superiores a su capacidad resistente) se producirán grietas en la estructura. Los principales requisitos que deben cumplir son:

- El nivel de la cimentación debe estar a una cierta profundidad porque debe evitar los siguientes riesgos: heladas, cambios de volumen del suelo y excavaciones posteriores.
- Sus dimensiones no deben exceder la estabilidad o la capacidad portante del suelo.
- No deben causar asentamientos en el terreno que la estructura no pueda absorber (asentamientos admisibles).

Las cimentaciones se clasifican en superficiales o directas, profundas y semi-profundas. Según las características del terreno descritas por el ingeniero Alberto Otero en el trabajo de investigación [16].

- Superficiales o directas: Cuando en el nivel próximo a la zona inferior de la estructura el terreno presenta características adecuadas (punto de vista técnico y económico) para cimentar sobre este. Este tipo de cimentación se realiza cercana

a la superficie del suelo (con una profundidad de 0,5 m a 4 m) y se distribuyen las cargas en la superficie [16]. Por ejemplo las zapatas evidenciadas en la Figura 3, las losas mostradas en la Figura 4, vigas y muros exhibidas en la Figura 5.

- Zapatas

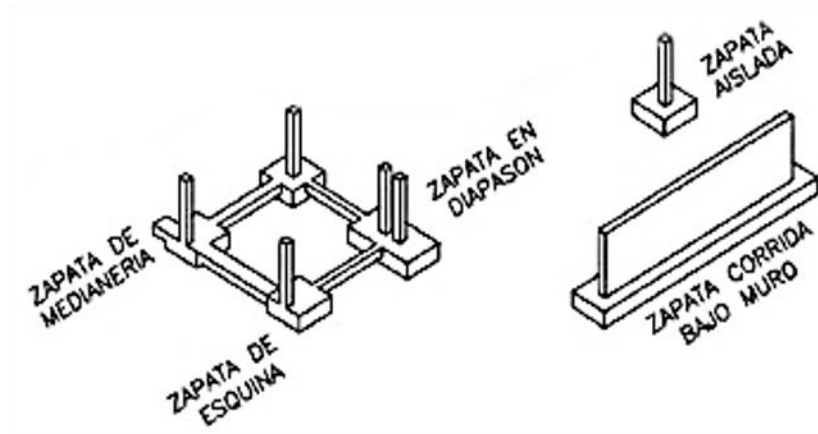


Figura 3. Tipos de zapatas.

Fuente: [16].

- Losas

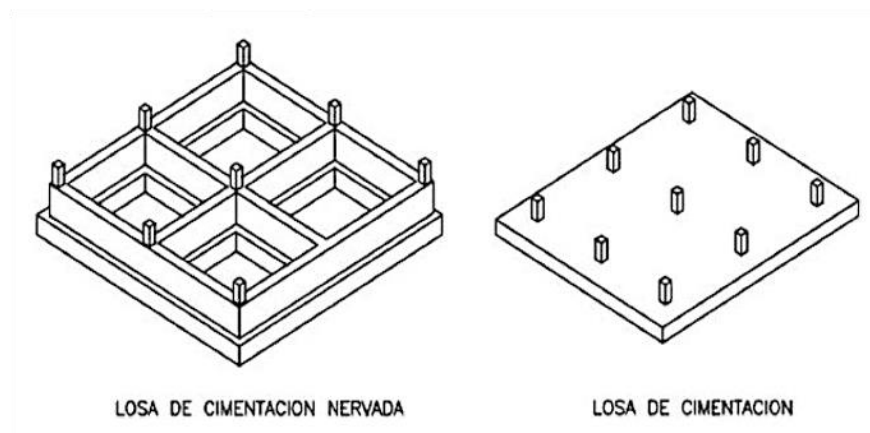


Figura 4. Tipos de losas.

Fuente: [16].

- Viga y muro

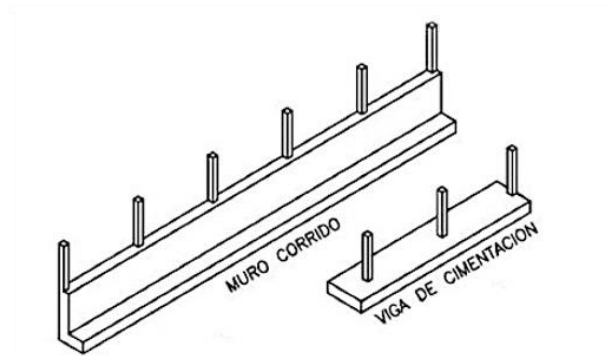


Figura 5. Viga y muro.

Fuente: [16].

- Profundas: Cuando el nivel apto para cimentar está muy por debajo de la zona inferior de la estructura. Son elementos de gran longitud, que se fijan en el terreno o se construyen en una cavidad previamente excavada en el terreno [16].
  - Pilote prefabricado: Pilote previamente construido que se posiciona en el terreno como se ve en la Figura 6.

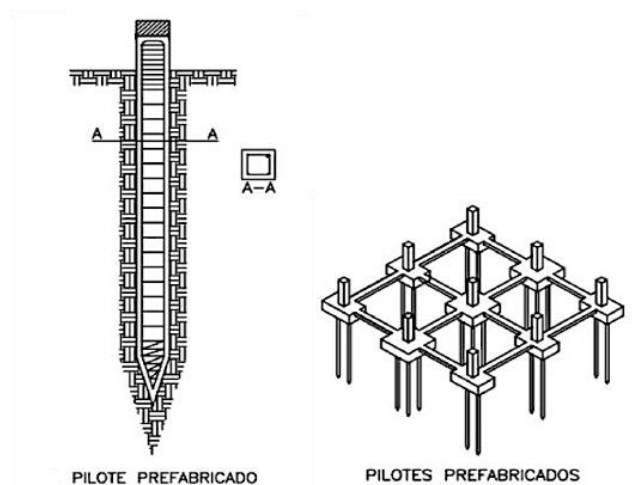


Figura 6. Pilote prefabricado.

Fuente: [16].

- Pilote IN SITU: Pilote que se construye en una cavidad previamente excavada el cual se puede apreciar en la Figura 7.

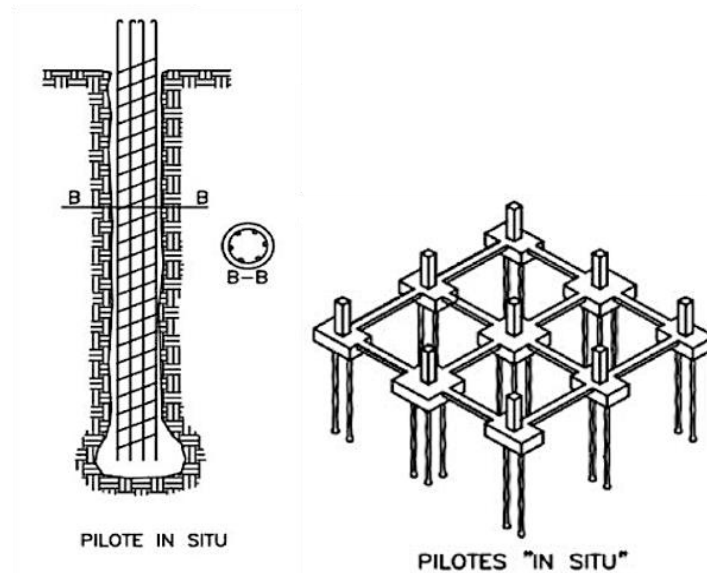


Figura 7. Pilote IN SITU.

Fuente: [16].

- Semi-profundas: Cuando el nivel de cimentación se encuentra a niveles intermedios de los casos anteriores, se usarán los pozos de cimentación representados en la Figura 8. Porque cuando el terreno firme se encuentra a una profundidad de 4 a 6 metros, puede resolver de forma económica la cimentación de un edificio [16].

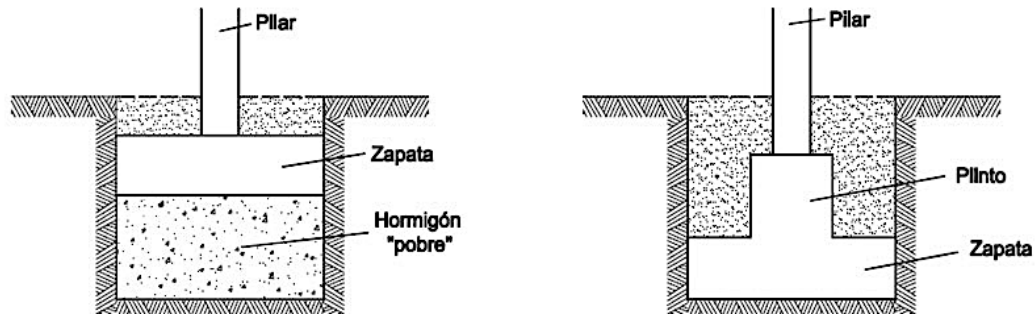


Figura 8. Pozos de cimentación.

Fuente: [16].

### ***La vida útil de los edificios***

Se define como el periodo de tiempo habitable. Cuando este concluye no significa que el edificio se deba derrumbar. Lo que sucede es que su mantenimiento se hace inevitable y compensa más construir uno nuevo.

Algunos de los daños en edificaciones durante su construcción o durante su vida útil se deben a una mala predicción del comportamiento del suelo o de la estructura en contacto con el suelo que lo sostiene.

- Daños causados por el comportamiento del suelo:
  - Asentamiento.
  - Movimientos diferenciales por expansión de arcillas.
  - Fenómenos de remoción en masas.
  - Fallas de taludes por excavaciones profundas con los consecuentes daños a vecinos.
  - Daños por movimientos debido a sismos por licuefacción de arenas durante estos eventos.

Cuando es posible elegir el espacio donde se ubicará el edificio, es favorable optar por un lugar que tenga terreno firme y sin problemas (terreno blando, asentamiento excesivo y pérdida de capacidad de apoyo). Debido a que el suelo también es parte de la estructura que compone la estabilidad del edificio. Si el suelo presenta fallas, el edificio se verá afectado.

En el momento en que, la estructura transfiere las cargas al suelo a través de sus cimentaciones, inevitablemente se producirá un asentamiento (debido a que no se posee un método 100% efectivo para la proyección del comportamiento de la estructura con el suelo). El asentamiento de una edificación se divide en dos partes:

- Asentamiento inmediato: Este caso se nota a medida que se va realizando la construcción.
- Asentamiento por consolidación: Se presenta cuando se incrementa la carga que el edificio transmite al suelo y el volumen de este disminuye debido a la expulsión de agua por sus poros. Dependiendo del tipo de suelo puede durar de días hasta años.

El asentamiento por lo general ocurre en áreas de suelo blando, además del tipo del suelo está la utilización de cimentaciones deficientes para un peso excesivo en áreas donde los suelos son muy compresibles (esto es debido a que las cargas reducen la cantidad de vacíos ya sean de agua o aire, deformándose y asentando el edificio).

Existen dos tipos de asentamientos que causan cambios en el comportamiento de los edificios:

- Asentamientos totales o uniformes: Todo el edificio se asienta de manera uniforme como se aprecia en la Figura 9, estos asentamientos son de importancia relativa porque no causan daños a la estructura (fallas estructurales) [17].

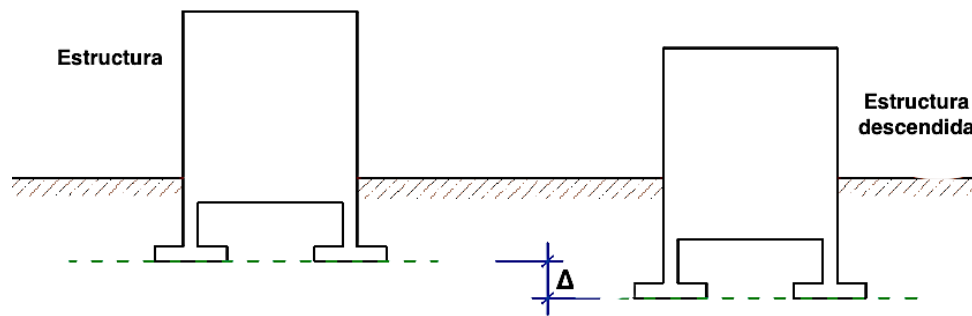


Figura 9. Asentamiento total o uniforme.

Fuente: [17].

- Asentamientos diferenciales: La estructura presenta asentamientos heterogéneos de un punto a otro se muestra en la Figura 10. Esto puede causar un mal funcionamiento del edificio, como desajustes en ventanas y puertas, grietas en paredes y muros estructurales, hasta el desplome de la edificación [17].

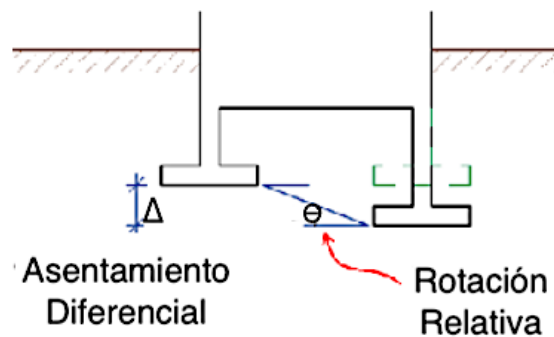


Figura 10. Asentamiento Diferencial.

Fuente: [17].

Con respecto a la norma NSR-10, el límite permitido del asentamiento total de una construcción aislada es de 30 cm, siempre que la conexión no se vea afectada, y el límite

de 15 cm para una construcción medianera (siempre que no afecte a la estructura adyacente) [14].

El asentamiento diferencial que se muestra en la Figura 11 no debe causar una distorsión angular (ecuación (1)) mayor a la indicada en Tabla 2 [5].

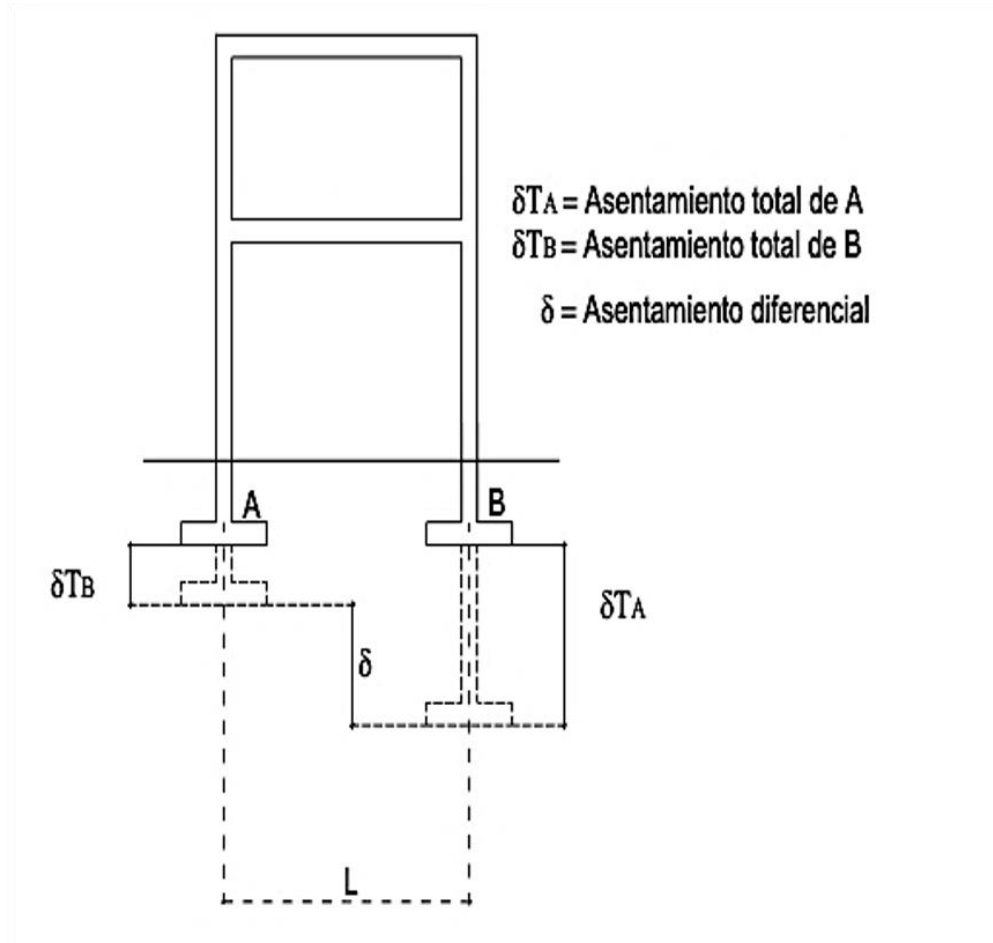


Figura 11. Asentamiento Diferencial con puntos de referencia.

Fuente [5].

$$\text{Distorsión angular}(\alpha) = \frac{\delta}{L} \quad (1)$$

Donde  $\delta$  es la diferencia entre el valor de  $\delta T_A$  (asentamiento total en la columna A) y el valor de  $\delta T_B$  (asentamiento total en la columna B).

| <b><i>Distorsión angular</i></b> | <b><i>Descripción</i></b>                                                                                            |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1/150                            | Límite en el que se debe esperar daño estructural en edificios convencionales.                                       |
| 1/250                            | Límite en que la pérdida de verticalidad de edificios altos y rígidos puede ser visible.                             |
| 1/300                            | Límite en que se debe esperar dificultades con puentes grúas.                                                        |
| 1/300                            | Límite en que se debe esperar las primeras grietas en paredes.                                                       |
| 1/500                            | Límite seguro para edificios en los que no se permiten grietas.                                                      |
| 1/500                            | Límite para cimentaciones rígidas circulares o para anillos de cimentación de estructuras rígidas, altas y esbeltas. |
| 1/650                            | Límite para edificios rígidos de concreto cimentados sobre un solado con espesor aproximado de 1,20 m.               |
| 1/750                            | Límite donde se esperan dificultades en maquinaria sensible a asentamientos.                                         |

Tabla 2. Distorsión angular.

Fuente: [5].

Los valores máximos de asentamiento calculado expresado en función de distancia entre los puntos de apoyo o columnas ( $L$ ), se muestran en Tabla 3.

| <b><i>Tipo de construcción</i></b>                                                                     | <b><i>Asentamiento máximo (<math>\delta_{MÁX}</math>)</i></b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Edificaciones con muros y acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores                   | $L/1000$                                                      |
| Edificaciones con muros de carga en concreto o en mampostería.                                         | $L/500$                                                       |
| Edificaciones con pórticos en concreto sin acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores. | $L/300$                                                       |
| Edificaciones en estructura metálica sin acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores.   | $L/160$                                                       |

Tabla 3. Valores máximos asentamiento calculado.

Fuente: [14].

Luego de conocer los conceptos necesarios para entender el área de ingeniería civil del proyecto, se da paso a conceptos electrónicos de igual forma necesarios para el desarrollo del proyecto.

Inicialmente se va a hablar sobre el ordenador encargado de procesar los datos, tabularlos, almacenarlos. La Raspberry Pi 3 B+ (Figura 12), cuyas especificaciones están en la Tabla 4.

|                                      |                                                                                                                          |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b><i>Sistema en Chip</i></b>        | Broadcom BCM2837                                                                                                         |
| <b><i>CPU</i></b>                    | Quad Core ARMv8 de 64 Bits a 1.4GHz                                                                                      |
| <b><i>Juego de Instrucciones</i></b> | RISC de 64 bits                                                                                                          |
| <b><i>GPU</i></b>                    | Broadcom Video Core IV, OpenGL ES 2.0                                                                                    |
| <b><i>Memoria</i></b>                | 1 Gb compartida con la GPU                                                                                               |
| <b><i>Puertos USB</i></b>            | 4 versión 2.0                                                                                                            |
| <b><i>Entradas de video</i></b>      | Conector MIPI CSI (Modulo instalación de cámara)                                                                         |
| <b><i>Salidas de video</i></b>       | Conector RCA, HDMI, interfaz DSI (Panel LCD)                                                                             |
| <b><i>Salidas de audio</i></b>       | Jack de 3.5 mm, HDMI                                                                                                     |
| <b><i>Almacenamiento</i></b>         | Ranura para micro SD                                                                                                     |
| <b><i>Conectividad de Red</i></b>    | RJ-45 (Ethernet) 10/100/1000Mbps vía USB limitado a 300Mbit/s<br>Wi-Fi 802.11 ac de doble banda<br>Bluetooth versión 4.2 |
| <b><i>Periféricos bajo nivel</i></b> | 17 x GPIO y un bus HAT ID                                                                                                |
| <b><i>Consumo energético</i></b>     | 800mA (4.0W)                                                                                                             |
| <b><i>Fuente de alimentación</i></b> | 5V vía micro USB o puesto GPIO                                                                                           |
| <b><i>Dimensiones</i></b>            | 85mm x 53mm                                                                                                              |
| <b><i>Sistemas operativos</i></b>    | GNU/Linux Raspbian, Fedora, Arch Linux, Slackware Linux                                                                  |

Tabla 4. Especificaciones de la Raspberry Pi 3 B +.

Fuente: [10].

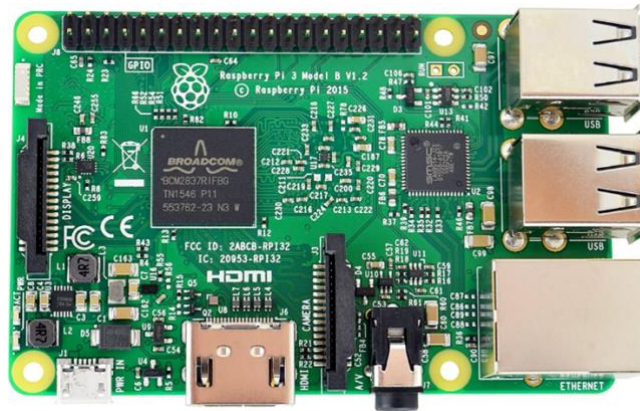


Figura 12. Raspberry Pi 3 B+.

Fuente: [10].

Luego de conocer y mostrar a grandes rasgos el ordenador encargado de procesar la información, ahora se va a hablar de algunos tipos de sensores que se utilizarán más adelante.

### ***Acelerómetros***

El acelerómetro (Figura 13) como su nombre lo dice se encarga de medir los cambios de velocidad ( $dv$ ) que presenta un cuerpo en un intervalo de tiempo velocidad ( $dt$ ), en términos físicos se expresa como:

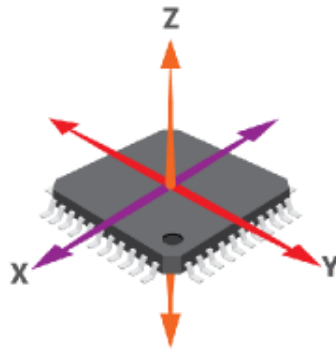
$$\frac{dv}{dt} \quad (2)$$

O en términos de la mecánica newton como:

$$a = \frac{F}{m} \quad (3)$$

En donde  $F$  es la fuerza que actúa sobre el cuerpo y  $m$  su masa. La aceleración se visualiza en unidades de ( $m/s^2$ ) o fuerza  $g$  [6].

Sus principales aplicaciones son en pruebas de choque y vibración, aeroespacial, transporte, automotriz, pruebas de vibraciones del cuerpo humano, además de pruebas de vibraciones torsionales y rotaciones [18].

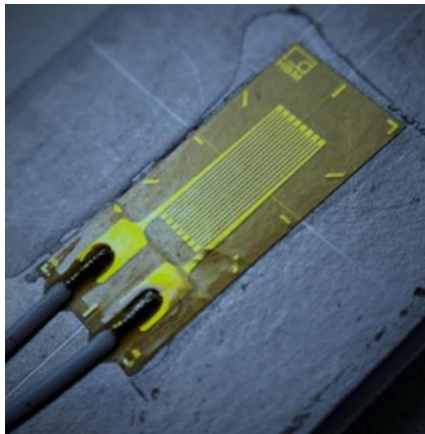


*Figura 13. Acelerómetro.*

*Fuente: [19]*

### ***Galga extensiométrica***

Una galga extensiométrica, también conocida como transductor de deformación, es una lámina resistiva exhibida en la Figura 14, cuya resistencia varía en función de la fuerza, presión, tensión, peso, etc, aplicada sobre esta [20].



*Figura 14. Galga extensiométrica de lámina simple.*

*Fuente: [19].*

### ***Sensor de nivel***

Es un dispositivo electrónico que mide la altura del material, por lo general líquido, dentro de un tanque u otro recipiente [21]. Se dividen en dos tipos principales:

- Sensor de nivel de punto: se usa para marcar la altura de un líquido en un determinado nivel preestablecido, en general se emplea como alarma indicando un sobrellenado cuando el nivel de llenado ha sido adquirido, o por el contrario una alarma de nivel bajo [21].
- Sensor de nivel continuo: se usa para hacer el seguimiento del nivel de un sistema, mide el nivel del fluido en un rango específico produciendo una salida analógica [21] el cual se puede apreciar en la Figura 15.



*Figura 15. Sensor de nivel de agua.*

*Fuente: [22]*

## 9. DISEÑO Y EJECUCIÓN DEL PROYECTO

En esta parte del proyecto se definirán y explicarán paso a paso las diferentes etapas que se siguieron para la realización del mismo, verificando y cumpliendo los objetivos específicos propuestos.

### 9.1 ETAPA DE SELECCIÓN DEL SENSOR

Con el propósito de seleccionar el sensor que cumpla con las características establecidas para el desarrollo del proyecto, se decide hacer pruebas en tres tipos de sensores: sensor de aceleración, sensor de deformación (galgas extensiométricas) y sensor de nivel.

#### 9.1.1 *Acelerómetros.*

Para este apartado se evaluarán dos sensores de aceleración, cada uno con características distintas, al final se obtiene la viabilidad del uso de dichos sensores para el desarrollo del proyecto.

##### 9.1.1.1 *Pololu AltImu-10 v5.*

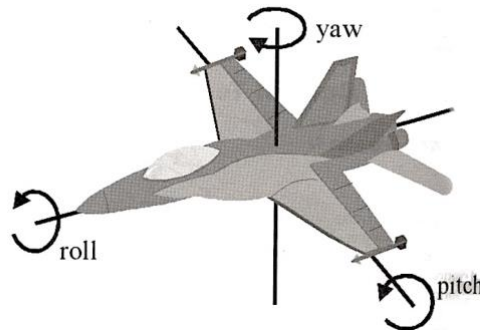
###### 9.1.1.1.1 Descripción general de la unidad de medida (IMU):

Es una unidad de medición inercial que fue construida para brindar información específica sobre un objeto que se encuentra movimiento. Para este fin, el módulo AltIMU-10 v5 desarrollado por la compañía Pololu agrupa diferentes sensores tales como: acelerómetro, giroscopio LSM6DS33, magnetómetro LIS3MDL y barómetro.

Esta IMU establece comunicación con dispositivos lógicos programables (Arduino, PIC, Raspberry, etc.), gracias al protocolo I<sup>2</sup>C, con el fin de poder enviar los datos obtenidos para luego procesarlos.

Como antes se mencionó la IMU posee en su interior estos dos sensores, por lo que es importante conocer que variables manejan, miden y cómo funcionan. la IMU, es capaz de medir la aceleración en los tres planos de referencia (X, Y, Z).

Por otra parte, el giroscopio es un sensor diseñado para medir la velocidad de rotación que produce un objeto al girar sobre cualquiera de sus ejes (X, Y, Z). cada tipo de rotación tiene un nombre específico, cuando se gira en el eje X su calificativo es *pitch* (cabeceo), en el eje Y *roll* (rodar) y en el eje Z *yaw* (guiñado). En la *Figura 16* se puede observar lo descrito.



*Figura 16. Nombre de rotaciones según eje.*

*Fuente: [23].*

#### 9.1.1.1.2 Características generales del sensor:

- Voltaje de operatividad mínimo = 2,5 V.
- Voltaje de operatividad máximo = 5,5 V.
- Ejes X, Y, Z.
- Corriente de alimentación = 5 mA.

- Valores de operatividad del giroscopio de  $\pm 125$ ,  $\pm 245$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$  y  $\pm 2000^\circ/\text{s}$ .
- Valores de operatividad del acelerómetro  $\pm 2$ ,  $\pm 4$ ,  $\pm 8$  y  $\pm 16$  g.
- Formato de salida (I2C) = 16-bit por eje tanto de giro, aceleración y magnético.
- Rango de sensibilidad = 2 g a 16 g acelerómetro, 125 a  $2000^\circ/\text{s}$  en giroscopio.
- 16 bits de lectura por eje para el giroscopio, acelerómetro y magnetómetro.

El AltIMU-10 v5 es una tarjeta electrónica capaz de brindar medidas de aceleración, rotación, presión barométrica, etc. Estas características lo hacen ideal para construir un sistema de referencia y altitud (AHRS). Por lo mismo es muy utilizado en drones o móviles que se desplazan en los tres planos. La tarjeta incluye un regulador de 3,3 V, voltios que son requeridos por los sensores previamente mencionados. Su voltaje de operación está entre 2,5 V y 5,5 V (ideal para casi cualquier sistema micro programado).

#### 9.1.1.1.3 Pines de conexión del AltIMU-10 v5:



Figura 17. Pines de conexión IMU.

Fuente: [24].

El módulo IMU posee 5 pines de conexión descritos en la Figura 17, cada uno de ellos cumple una función específica, para la alimentación se utiliza *VIN* y *GND* recordando que el nivel máximo de tensión es de 5,5 V. luego están los pines *SCL* (serial clock line) y *SDA* (serial data line), por medio de estos se transmite la información desde el módulo hacia el dispositivo lógico programable (Arduino, PIC, Raspberry, etc.), enviando la trama de datos usando el protocolo I<sup>2</sup>C. el pin *VDD* que es una salida de 3,3 V utilizada para cargas no mayores a 150 mA y por último el pin *SA0* que es una entrada de nivel lógico de 3,3 V que determina las direcciones del esclavo para el uso del protocolo I<sup>2</sup>C.

#### 9.1.1.1.4 Conexión AltIMU-10 v5 con Arduino:

Para hacer las pruebas de funcionamiento de la unidad IMU se utilizó un Arduino, la conexión se detalla en la Tabla 5.

| <b><i>AltIMU-10 v5</i></b> | <b><i>Arduino</i></b> |
|----------------------------|-----------------------|
| GND                        | GND                   |
| VIN                        | VCC                   |
| SCL                        | A5                    |
| SDA                        | A4                    |

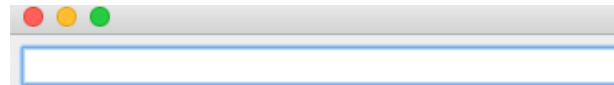
*Tabla 5. Conexión IMU - Arduino.*

*Fuente: Autor.*

Una vez se han realizado las conexiones correspondientes, se procede a programar el dispositivo lógico programable, que para este caso en específico es un Arduino. Teniendo presente que el IMU está conformado por varios sensores, el algoritmo diseñado se enfoca en hacer funcionar el LSM6DS33 que es el módulo que contiene el acelerómetro y giroscopio.

Lo primero que se debe hacer para que el Arduino se pueda comunicar con el IMU y hacer funcionar el LSM6DS33, es descargar la librería *LSM6.H*, la cual está disponible en el gestor de librerías o se puede descargar desde un repositorio GitHub especificado en la página de Pololu [25].

Una vez se ha descargado esta librería se desarrolla el código (Anexo 1). Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 18, donde las tres primeras columnas son los datos relacionados con la aceleración en cada eje y las siguientes tres los ángulos de giro (yaw, roll, pitch), estas medidas se tomaron con el sensor en posición horizontal sobre una mesa plana.



|    |      |       |        |    |     |      |      |
|----|------|-------|--------|----|-----|------|------|
| A: | 992  | -1228 | -16231 | G: | 274 | -444 | -389 |
| A: | 1180 | -1180 | -16290 | G: | 240 | -551 | -350 |
| A: | 1097 | -1177 | -16184 | G: | 172 | -437 | -360 |
| A: | 1137 | -1165 | -16233 | G: | 202 | -397 | -359 |
| A: | 1053 | -1103 | -15904 | G: | 252 | -545 | -394 |
| A: | 1100 | -1150 | -16123 | G: | 350 | -600 | -436 |
| A: | 1109 | -1172 | -16297 | G: | 269 | -497 | -384 |
| A: | 1050 | -1072 | -16200 | G: | 156 | -470 | -384 |
| A: | 1121 | -1171 | -16105 | G: | 181 | -420 | -309 |

Figura 18. Resultados obtenidos en pantalla.

Fuente: Autor.

Los resultados de la Figura 18 no son una medida de grados o fuerza, en realidad es el valor decimal que se obtiene al convertir la lectura de entrada (cuya resolución es de 16 bits y tiene un rango de -32768 a 32767). Para poder obtener un número que represente la aceleración en términos de fuerza g [6], se debe multiplicar por una constante que está especificada en la tabla de características mecánicas del LSM6DS33 [26] conocida como factor de calibración.

Para la configuración que se tiene de  $\pm 2 g$ , el factor de conversión es de 0,061 mg. De este modo un ejemplo para una lectura obtenida del eje z es 16276, en términos de g es:

$$g = 16276 * 0,061 \quad (4)$$

$$g = 0,9928g \quad (5)$$

#### 9.1.1.1.5 Proceso de caracterización del sensor:

Para conocer la curva característica del sensor (Figura 19), se procede a tomar la medida de la fuerza  $g$  que experimenta el sensor en diferentes ángulos y

posiciones (se requiere un solo eje para poder medir el desnivel de un punto de cimentación). Y posteriormente graficar con respecto al valor decimal que obtiene el Arduino como se muestra en la Tabla 6.

| <i>Angulo (°)</i> | <i>Valor aceleración en g (z)</i> | <i>Valor decimal Arduino</i> |
|-------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 0°                | 0,9662                            | 16104                        |
| 15°               | 0,8522                            | 14204                        |
| 30°               | 0,7588                            | 12648                        |
| 45°               | 0,6889                            | 11483                        |
| 60°               | 0,6550                            | 10918                        |
| 75°               | 0,4897                            | 8163                         |
| 90°               | 0,3415                            | 5692                         |
| 105°              | 0,1236                            | 2060                         |
| 120°              | 0,0534                            | -884                         |
| 135°              | 0,0632                            | -1054                        |

Tabla 6. Tabulación de datos obtenidos.

Fuente: Autor.

Fuerza g en el eje Z

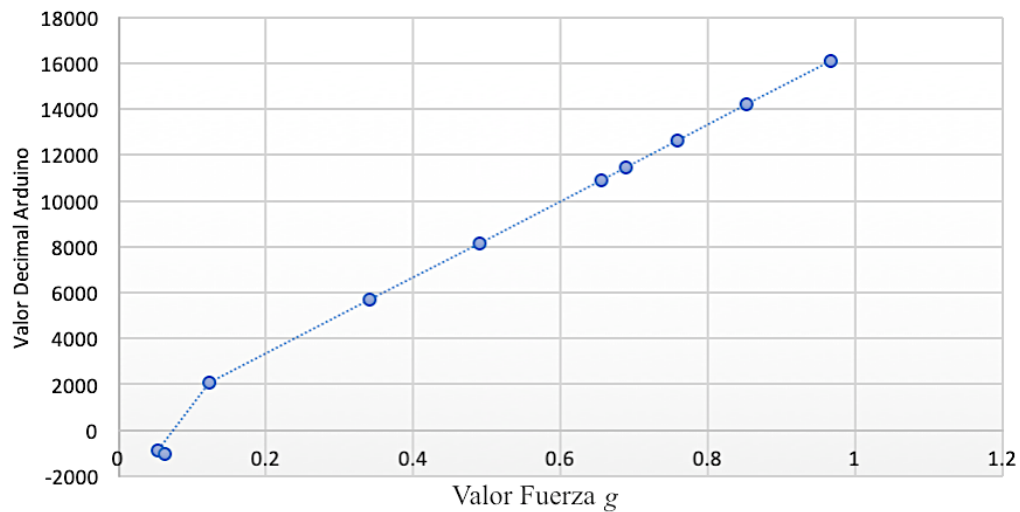


Figura 19. Curva característica del acelerómetro AltIMU-10 v5.

Fuente: Autor.

#### 9.1.1.1.6 Viabilidad del uso del sensor:

Luego de analizar el comportamiento del sensor acelerómetro y giroscopio con ayuda de las pruebas en las cuales solo se toma en cuenta el valor de un eje y revisar los datos obtenidos (Tabla 6), se obtiene que el sensor cumple con la linealidad de los datos a partir de su movimiento, además que la constante de calibración muestra la tabulación de los valores en fuerza  $g$ .

El sensor es ideal para movimientos rápidos y de precisión, como es el ejemplo de los drones, en los cuales se necesitan respuestas rápidas a variaciones de posición, sin embargo, si se hace una centralización a los objetivos de este proyecto, se debe partir que en la estructura o edificación se posee cambios de posición (a nivel vertical), de forma lenta y pequeña (valores en milímetros), lo que requiere una toma de datos continua en cambios muy leves, siendo un sensor sensible estaría expuesto a perturbaciones en su mayoría externas, por ello se concluye que no se tendría una medida precisa al momento de convertir estos datos a posición, estos se mostrarán de forma inexacta (debido a que el sensor tomaría estos datos junto con el ruido) y no se tendría valores exactos.

#### **9.1.1.2 Analog Devices Inc ADXL204.**

##### 9.1.1.2.1 Descripción general del Analog Devices Inc ADXL204:

El ADXL204 es un acelerómetro de doble eje, completo de alta precisión, baja potencia, con salidas de voltaje condicionadas por señal, todo en un solo circuito integrado monolítico. Mide aceleración con un rango de escala completa de  $\pm 1,7$

$g$ ; está probado y especificado para un voltaje de suministros de 3,3 V, funciona bien en un amplio rango de voltaje operativo de 3 V a 6 V.

El ADXL204 puede medir tanto la aceleración dinámica y aceleración estática. El nivel de ruido típico es de  $170 \mu g/\sqrt{\text{Hz}}$  rms, lo que permite señales por debajo 2  $mg$  ( $0,1^\circ$  de inclinación) al resolver la detección de inclinaciones en anchos de banda estrechos ( $<60\text{Hz}$ ).

El usuario selecciona el ancho de banda del acelerómetro usando el Condensador  $C_x$  y Condensador  $C_y$  en los pines  $X_{OUT}$  y  $Y_{OUT}$ . Se pueden seleccionar anchos de banda de 0,5 Hz a 2,5K Hz para adaptarse a lo requerido por el usuario [27].

#### 9.1.1.2.2 Características generales del sensor:

- Fabricante = Analog Devices Inc.
- Acelerómetro de dos ejes (biaxial).
- Resolución de 2  $mg$  a 60 Hz.
- Precisión de  $\pm 1,7 g$ .
- $V_s = 3,3 \text{ V}$ .
- Corriente de 500  $\mu\text{A}$  a configuración típica de 3,3 V.
- Alta sensibilidad de sesgo  $g$  zero.
- Alta precisión de sensibilidad.

#### 9.1.1.2.3 Los Pines de conexión del Analog Devices Inc ADXL204:

Se aprecian en la Figura 20 y se describen en la Tabla 7.

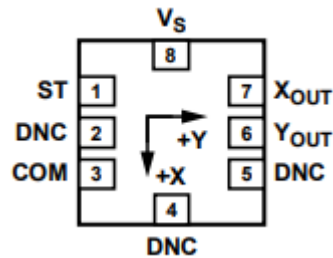


Figura 20. Configuración de pines.

Fuente: Fabricante (Datasheet).

| <b>Pines</b>        | <b>Descripción</b> |
|---------------------|--------------------|
| 1. ST               | Auto testeo        |
| 2. DNC              | No conectar        |
| 3. COM              | Común              |
| 4. DNC              | No conectar        |
| 5. DNC              | No conectar        |
| 6. Y <sub>out</sub> | Salida del canal Y |
| 7. X <sub>out</sub> | Salida del canal X |
| 8. VS               | 3V A 6V            |

Tabla 7. Descripción y función de pines.

Fuente: Fabricante (Datasheet).

#### 9.1.1.2.4 Proceso de caracterización del sensor:

Se elige este sensor por sus características de sensibilidad, precisión y sesgo 0, teniendo en cuenta que se requiere una alta sensibilidad sin que factores externos afecten la toma de datos, para ello se hace un proceso de calibración llamado: Auto Zero Calibration. Para empezar, se deben calibrar los ejes (x, y) y que los valores de las salidas varíen entre 0 y 3,3 V, para obtener los datos de las salidas digitales de 10 Bits en forma analógica se utilizaran las siguientes ecuaciones:

$$A_x(analog) = A_x(dig) * \frac{3,3}{2^{10} - 1} \quad (6)$$

$$A_y(\text{analog}) = A_y(\text{dig}) * \frac{3,3}{2^{10} - 1} \quad (7)$$

Cabe notar que  $A_x(\text{analog})$  y  $A_y(\text{analog})$  son los valores reales que están relacionados con la componente de gravedad  $g$  y que las variables  $A_x(\text{dig})$  y  $A_y(\text{dig})$  son valores equivalentes a datos de 10 Bits, adicionalmente es necesario hallar unas constantes de sensibilidad y sesgo en cada eje denotadas más adelante, para realizar la calibración.

$$A_x = S_x * g + B_x \quad (8)$$

$$A_y = S_y * g + B_y \quad (9)$$

Las constantes:  $S_x$ ,  $S_y$ ,  $B_x$  y  $B_y$  son medidas de sensibilidad y sesgo respectivamente y se calculan de la siguiente forma:

$$S_x = \frac{A_x(1g) - A_x(-1g)}{2g} \quad (10)$$

$$S_y = \frac{A_y(1g) - A_y(-1g)}{2g} \quad (11)$$

$$B_x = \frac{A_x(1g) + A_x(-1g)}{2g} \quad (12)$$

$$B_y = \frac{A_y(1g) + A_y(-1g)}{2g} \quad (13)$$

Se toma el sensor y se toman valores de cuatro posiciones en cada eje  $A_x(\pm 1g)$  y  $A_y(\pm 1g)$ , girando el sensor en sentido anti horario, como se muestra en el

datasheet del fabricante en la Figura 21 , los datos de aceleración tomados son en escala digital.

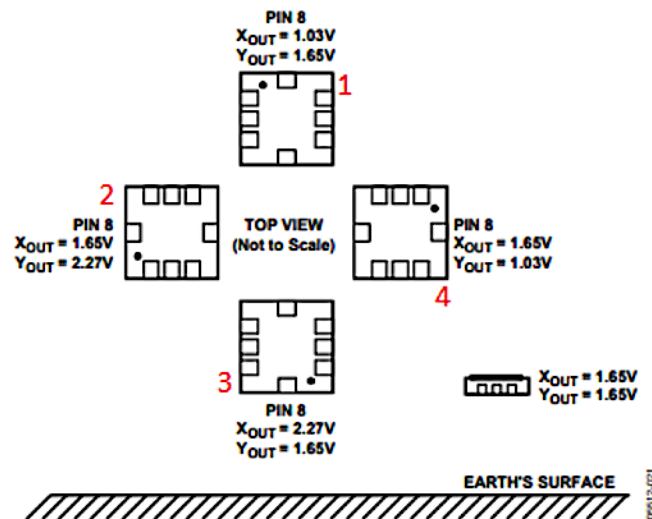


Figura 21. Secuencia de movimiento anti horario.

Fuente: Fabricante (Datasheet).

La gráfica obtenida de la evolución de la aceleración en el eje  $X$  en giro antihorario se presenta en la Figura 22 y la evolución de la aceleración en el eje  $Y$  en giro antihorario se presenta en la Figura 23.

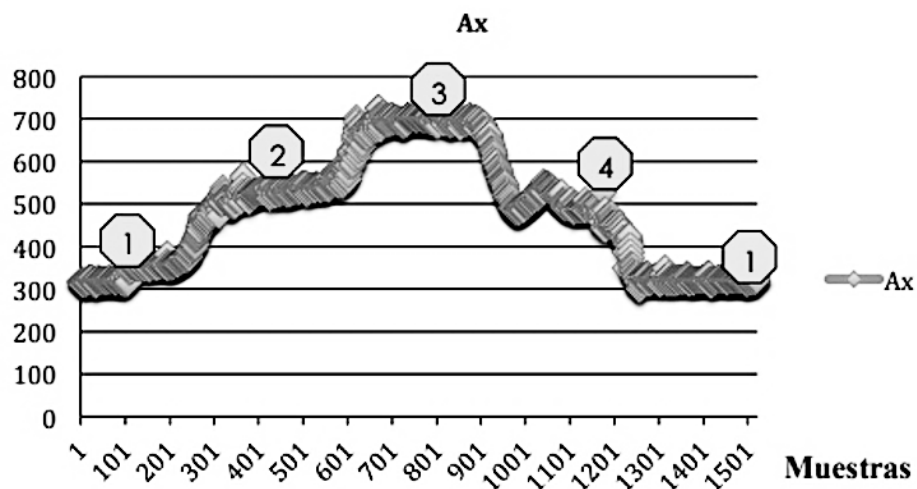


Figura 22. Evolución aceleración en eje x giro antihorario.

Fuente: [28] .

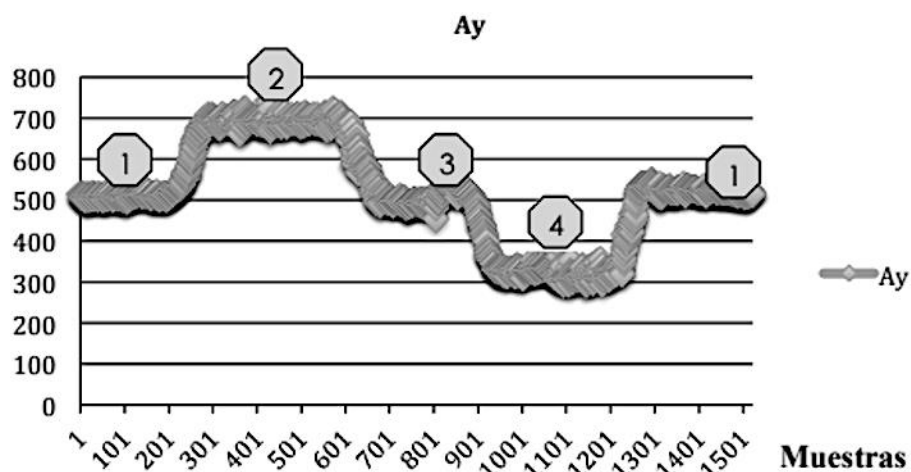


Figura 23. Evolución aceleración en eje y giro antihorario.

Fuente: [28].

De acuerdo con las anteriores muestras se tomará el valor promediado de cada eje en  $+1g$  y  $-1g$ , como se detalla en la Tabla 8. Datos obtenidos a partir de la Figura 22 y la Figura 23.

| <b>Variable</b> | <b>Valor</b> |
|-----------------|--------------|
| $A_x(+1g)$      | 700,686275   |
| $A_x(-1g)$      | 318,32       |
| $A_y(+1g)$      | 694,627451   |
| $A_y(-1g)$      | 313          |

Tabla 8. Datos obtenidos a partir de la Figura 22 y la Figura 23.

Fuente: Autor.

Teniendo en cuenta las ecuaciones (10), (11), (12) y (13) se pueden hallar las constantes descritas en la Tabla 9.

| <b>Variable</b> | <b>Valor</b> |
|-----------------|--------------|
| $S_x$           | 191,183137   |
| $B_x$           | 509,503137   |
| $S_y$           | 190,813725   |
| $B_y$           | 503,813725   |

Tabla 9. Resultado medidas de aceleración para ADXL204.

Fuente: Autor.

Por último, se realiza la verificación y/o comparación según sea el caso de los datos obtenidos con los datos teóricos para calcular el error absoluto y verificar su viabilidad; en primer lugar, se toman muestras del sensor sin inclinar e inclinado levemente, en cada eje, generando un ángulo a partir de la función arco tangente.

$$\tan \alpha = \frac{A_x}{A_y} \quad (14)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{A_x(con)}{A_y(con)}\right) - \arctan\left(\frac{A_x(sin)}{A_y(sin)}\right) \quad (15)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{0,172366g}{0,992252g}\right) - \arctan\left(\frac{0,07571g}{1,002215g}\right) \quad (16)$$

$$\alpha = 9,865831^\circ - 4,320071^\circ \quad (17)$$

$$\alpha = 5,54576^\circ \quad (18)$$

Donde  $A_x(con)$  y  $A_y(con)$  son los valores del sensor con inclinación y  $A_x(sin)$  y  $A_y(sin)$  son los valores del sensor sin inclinación. Para la obtención del valor teórico y con lo obtenido por el Auto Zero Calibration se obtienen dos valores de las salidas digitales (una para cada eje) de igual manera valores con inclinación y sin inclinación como se percibe en la Tabla 10.

|                        | $A_x (dig)$ | $A_y(dig)$ |
|------------------------|-------------|------------|
| <i>Sin Inclinación</i> | 529.3979    | 701.5642   |
| <i>Con Inclinación</i> | 547.8721    | 699.6563   |

Tabla 10. Valores digitales teóricos.

Fuente: Autor.

Para hallar el ángulo teórico es necesario despejar las fórmulas que incluyen la sensibilidad y el sesgo. Como se muestra a continuación:

Para los datos en el eje X, se despeja g de la ecuación (8):

$$g = \frac{A_x - B_x}{S_x} \quad (19)$$

Para los datos en el eje Y, se despeja g de la ecuación(9):

$$g = \frac{A_y - B_y}{S_y} \quad (20)$$

De acuerdo a lo anterior, se obtiene cada valor con inclinación y sin inclinación, mostrados en la Tabla 11.

|                        | $A_x$       | $A_y$       |
|------------------------|-------------|-------------|
| <i>Sin Inclinación</i> | 0,104061285 | 1,036353517 |
| <i>Con Inclinación</i> | 0,200692193 | 1,02635476  |

Tabla 11. Valores experimentales.

Fuente: Autor.

A partir de estos datos y con la función de arco seno (función análoga a arco tangente), se obtiene el ángulo teórico:

$$\sin \vartheta = \frac{A_x}{A_y} \quad (21)$$

$$\vartheta = \arcsin\left(\frac{A_x(con)}{A_y(con)}\right) - \arcsin\left(\frac{A_x(sin)}{A_y(sin)}\right) \quad (22)$$

$$\vartheta = \arcsin\left(\frac{A_x(0,200692193g)}{A_y(1,02635476g)}\right) - \arcsin\left(\frac{A_x(0,104061285g)}{A_y(1,036353517g)}\right) \quad (23)$$

$$\vartheta = 11,2762013^\circ - 5,76283775^\circ \quad (24)$$

$$\vartheta = 5,51336358^\circ \quad (25)$$

Adquiriendo los valores de los ángulos teórico y experimental, se obtiene el error absoluto:

$$\alpha - \vartheta = \text{error absoluto}^\circ \quad (26)$$

$$\text{error absoluto} = 5,54576^\circ - 5,51336358^\circ \quad (27)$$

$$\text{error absoluto} = 0,03239 \quad (28)$$

Las siguientes gráficas parten de una aceleración constante con una velocidad muy parecida con pequeñas excitaciones, es decir los tiempos de reposo solo son al comienzo y al final, los resultados de aceleración sobre el eje  $X$  están en la Figura 24, los de velocidad sobre el eje  $X$  están en la Figura 25 y la posición en m del eje  $X$  están en la Figura 26.

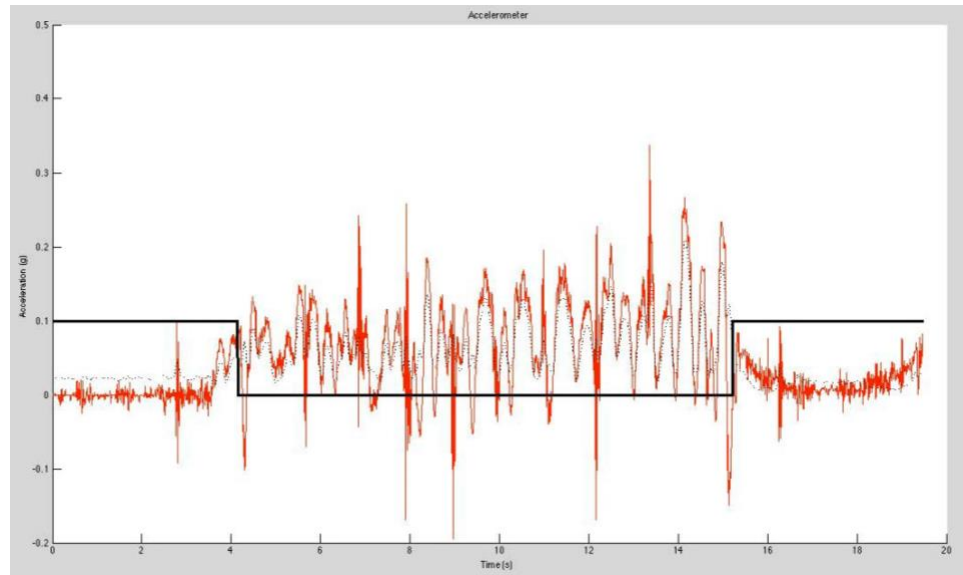


Figura 24. Aceleración sobre el eje X.

Fuente: Autor.

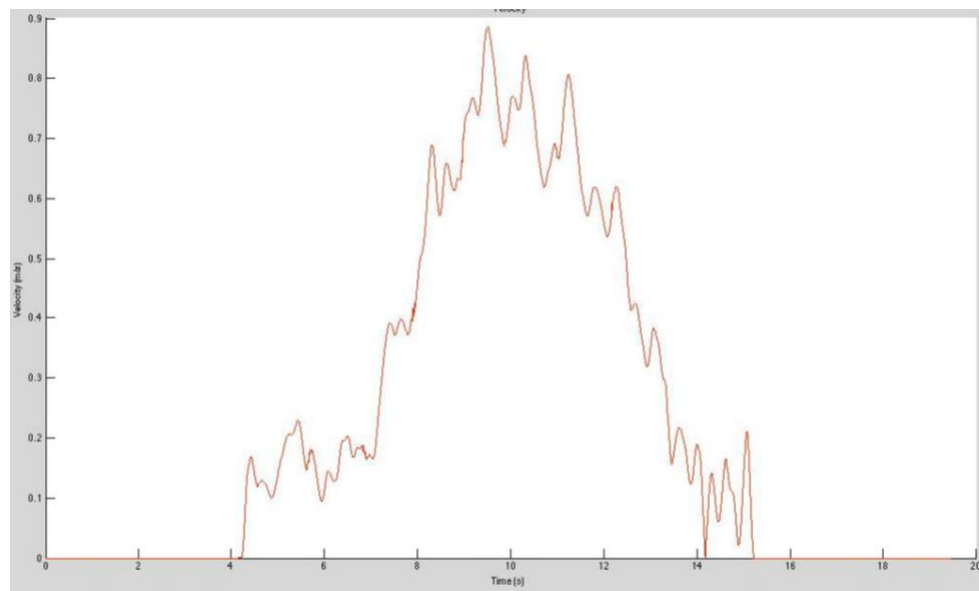
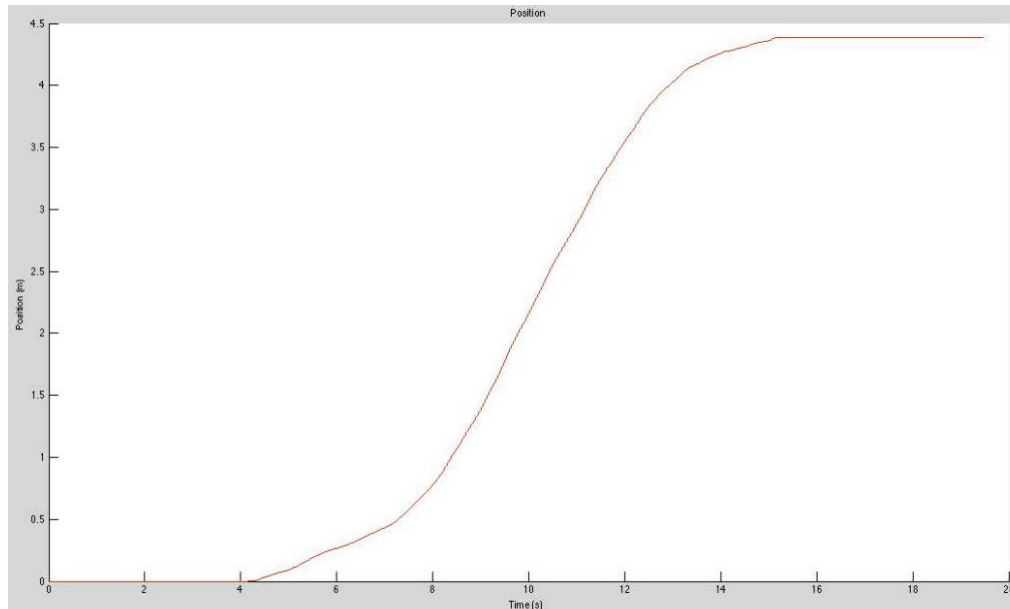


Figura 25. Velocidad sobre eje X.

Fuente: Autor.



*Figura 26. Posición en el eje X.*

*Fuente: Autor.*

#### 9.1.1.2.5 Viabilidad del uso del sensor:

Este sensor tiene un mejor comportamiento y se adapta más que el sensor anterior. Es necesario tener presente que para la ejecución del proyecto se adapta, pero es requerido obtener o calcular el valor de la posición a través del tiempo, en teoría bastaría con una doble integral a los valores de la aceleración, sin embargo, se debe tener muy presente los tiempos de reposo, ruido y vibraciones, para verificar su correcto funcionamiento.

Posee una característica especial en cuanto a su función de auto calibración cero, ya que al encontrar sus valores constantes de sesgo y sensibilidad su respuesta además de tener precisión también será más exacta; como se observó en el desarrollo de la técnica de calibración. Y su comparación entre un pequeño ángulo entre el valor teórico y practico, establece una buena exactitud; permite

aumentar su sensibilidad sin que una perturbación (ruido, temperatura, vibración, entre otras) intervenga en la toma de datos.

Como se mencionó para el desarrollo del proyecto se requieren datos exactos, partiendo de cambios muy pequeños en un solo eje (vertical) y en periodos de tiempo largos. Sin embargo, como trabajo futuro se pretende realizar análisis más a fondo sobre este sensor.

### **9.1.2 Galgas extensiométricas.**

Continuando con la evaluación de sensores, en los apartados siguientes se van a valorar las galgas extensiométricas para explorar su comportamiento y viabilidad.

#### **9.1.2.1 Celda de carga SEN-10245.**

##### **9.1.2.1.1 Descripción general de la Celda de carga SEN-1025:**

Es una celda que en su interior está compuesta por una o más galgas extensiométricas (sensores de deformación) que detectan los valores de deformación es utilizada en las básculas de peso corporal. Tiene la propiedad de variar el valor de resistencia cada vez que es sometida a una fuerza externa (que la deforma).

##### **9.1.2.1.2 Principales características de la Celda de carga SEN-1025:**

- Voltaje de operación DC = 3 V a 10 V.
- Sensibilidad de salida =  $1 \pm 0,1 \text{ mV} / \text{V}$ .
- No linealidad = 0,03% FS.
- Repetibilidad = 0,03% FS.

- Histéresis = 0,03% FS.
- Resistencia de entrada =  $1000\Omega \pm 20$ .
- Resistencia de salida =  $1000\Omega \pm 20$ .
- Temperatura de funcionamiento = 0 °C a 50 °C.

#### 9.1.2.1.3 Proceso de caracterización del sensor:

Con el fin de conocer el comportamiento y poder caracterizar la celda, fue necesario diseñar un experimento con el cual se mostrará el umbral de trabajo y así conseguir la ecuación característica.

Se mide la diferencia de potencial que se genera en un circuito cada vez que la resistencia de la celda cambia (se mide el voltaje para procesar la señal). Una vez obtenido el valor del voltaje, mediante un conversor análogo-digital y una tarjeta de desarrollo. Se interpretan los datos y se hace la conversión de voltaje a peso.

Materiales:

- Celda de carga SEN-1025.
- 2 resistencias de  $1K\Omega$ .
- Cables de conexión.
- Tarjeta de adquisición de datos (arduino).
- Conversor hx711.

El circuito a utilizar es el puente de wheatstone el cual se muestra en la Figura 27

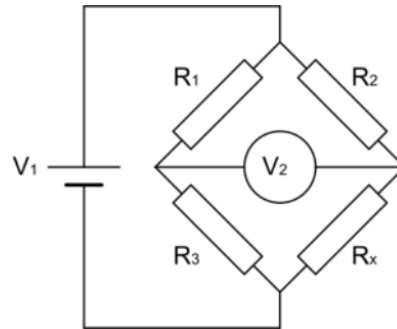
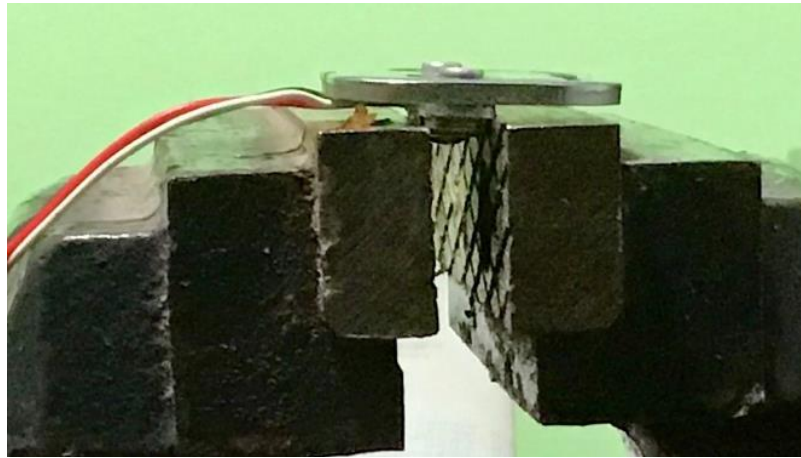


Figura 27. Puente de wheatstone .

Fuente: [29].

Donde  $R_1$  y  $R_x$  son las resistencias de la galga. Este circuito es utilizado para conocer el valor de una resistencia o para medir voltajes muy pequeños en circuitos de instrumentación. El punto señalado como  $V_2$  es donde se toma el valor de voltaje de salida, este será con el que se alimentará el conversor. Al cambiar los valores de las resistencias el voltaje de salida también varía, de esta manera se logra la conversión de un valor resistivo a un voltaje en función de la galga.

Para el montaje experimental se colocó la galga extensiométrica y su base en una prensa para garantizar que el peso colocado sobre ella no se distribuyera en otras superficies como se aprecia en la Figura 28



*Figura 28. Base para sostener la Celda de carga SEN-1025.*

*Fuente: Autor.*

Como se puede ver en la Figura 28, la celda de carga está sostenida en su base por una prensa, de este modo queda suspendida en el aire y se asegura que todo el peso sea aplicado en su área superficial.

En seguida se procede a ubicar peso sobre la celda (Figura 29), se utilizaron discos de 2,3 Kg y 1,2 Kg para efectuar las respectivas mediciones.



*Figura 29. Celda de carga SEN-1025 con peso.*

*Fuente: Autor.*

Para conectar la galga al Arduino, se utilizó el circuito mostrado en la Figura 30.

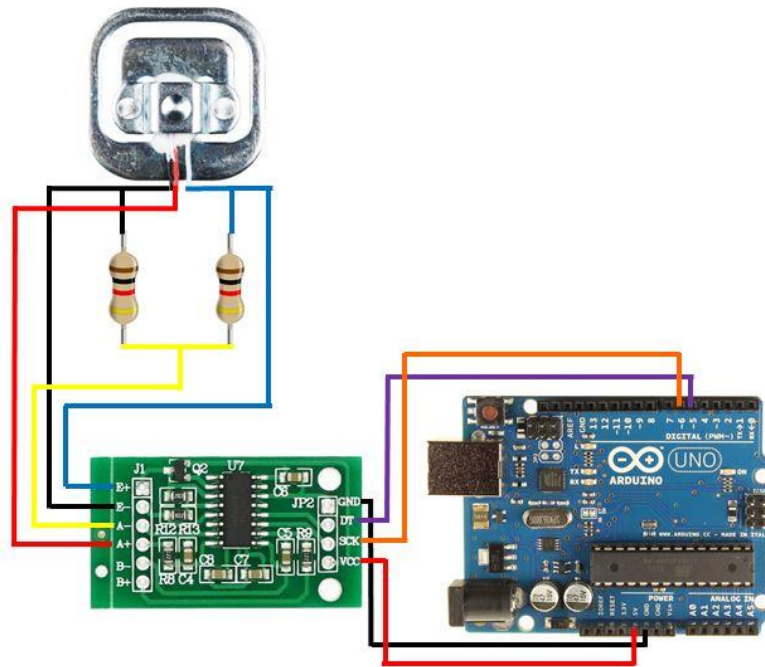


Figura 30. Conexión celda de carga SEN-1025, conversor y arduino.

Fuente: [30].

Se procede a realizar el código (Anexo 2) con el que se busca conocer el peso que se le pone a la celda (para poder calibrarla se debe colocar un peso conocido por el usuario).

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 12.

| <b>Voltaje (mV)</b> | <b>Peso (Kg)</b> |
|---------------------|------------------|
| 7,719               | 0                |
| 7,847               | 1,2              |
| 7,959               | 2,2              |
| 8,082               | 3,4              |
| 8,158               | 4,2              |
| 8,339               | 5,6              |
| 8,471               | 7,1              |
| 8,594               | 8,3              |
| 8,713               | 9,5              |
| 8,837               | 10,7             |

Tabla 12. Voltaje Vs Peso en celda de carga SEN-1025.

Fuente: Autor.

Al tabular los datos se obtiene la Figura 31.

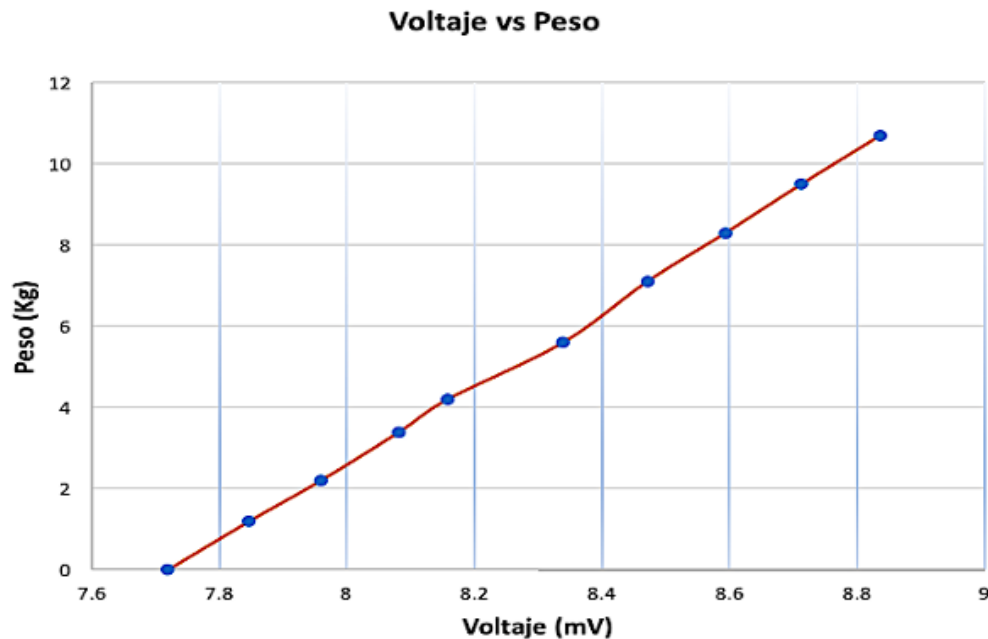


Figura 31. Gráfica variación voltaje (mV) Vs peso (Kg).

Fuente: Autor.

#### 9.1.2.1.4 Viabilidad del uso del sensor:

Al revisar los datos obtenidos (Figura 31) y la variación de los resultados obtenidos con el conversor se muestra que la respuesta del sensor es apropiada, cumple con hacer una variación aproximadamente lineal de la tensión;

Llevándolo a términos estructurales, un pequeño movimiento en esta, haría una presión considerable y existen galgas industriales que se adaptan a grandes cambios de presión, sin embargo, se determina que la utilización de este sensor no es adecuada para el fin de este proyecto debido a que, La galga no puede ubicarse o superponerse en un lugar de la estructura para que los datos tomados sean valores exactos de los cambios que posee la edificación, se debe tener en cuenta

que cuando hay un cambio en el asentamiento, la estructura puede moverse uniformemente o llegar a fracturarse según sea el caso.

Por otro lado, es importante recordar que hacer la instalación del sensor dentro de la estructura no es recomendado, puesto que se requeriría un estudio del material de los cimientos, costos adicionales para las modificaciones solicitadas para que el sensor funcione sin alterar su estructura ni funcionamiento.

Por las objeciones mencionadas anteriormente se concluye que no es necesario realizar pruebas con otra galga.

### **9.1.3 Sensores de nivel.**

En los apartados siguientes se van a valorar dos sensores de nivel para explorar su comportamiento y viabilidad.

#### **9.1.3.1 Sensor de nivel de agua Adeept.**

##### **9.1.3.1.1 Descripción general del sensor de nivel de agua Adeept:**

Este sensor esta incluido en un kit para arduino de la compañía Adeept (Figura 32) es del tipo resistivo, cuenta con dos salidas análogas y no necesita alimentación.

El valor de la resistencia va cambiando en función del nivel de agua es necesario contar con un conversor análogo digital para poder procesar los datos y así poder caracterizar el sensor.

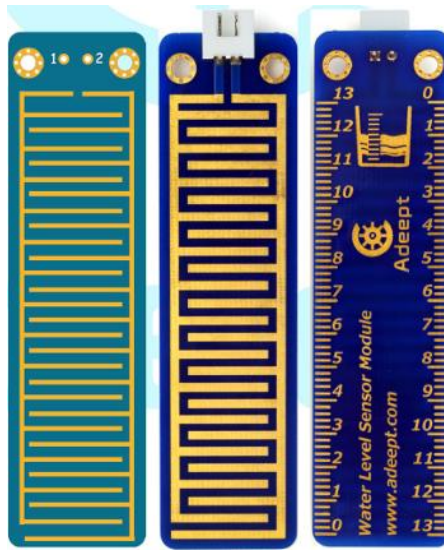


Figura 32. Sensor de nivel de agua.

Fuente: [31].

Acto seguido de implementar el conversor análogo digital y de configurar un divisor de voltaje (Figura 33), se prosigue a tomar los valores del voltaje de salida ( $V_g$ ) por cada unidad (0, 5 cm) de nivel.

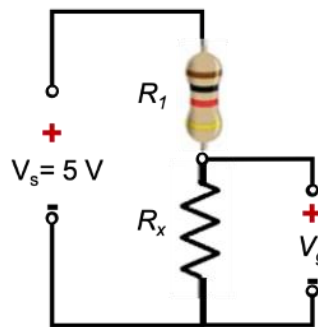


Figura 33. Divisor de Voltaje para caracterizar el sensor de nivel.

Fuente: Autor.

Donde  $R_1$  es de  $1K\Omega$ ,  $R_x$  es la resistencia variable y el voltaje de entrada ( $V_s$ ) es de 5 V. Se procede a despejar la  $R_x$  de la ecuación del divisor:

$$V_g = \left( \frac{R_x}{R_1 + R_x} \right) * V_s \quad (29)$$

$$V_g(R_1 + R_x) = V_s R_x \quad (30)$$

$$V_g R_1 + V_g R_x = V_s R_x \quad (31)$$

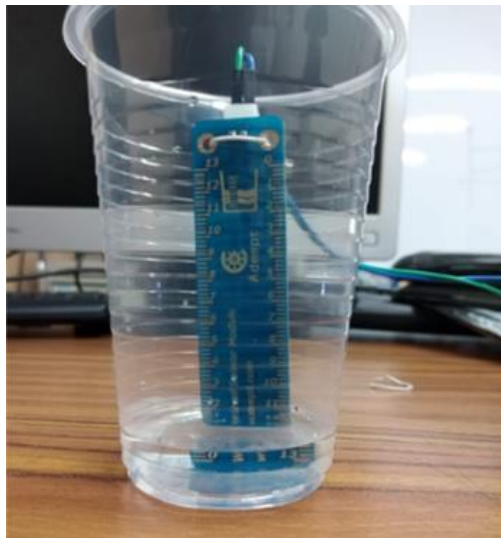
$$V_g R_1 = V_s R_x - V_g R_x \quad (32)$$

$$V_g R_1 = R_x (V_s - V_g) \quad (33)$$

$$R_x = \frac{V_g R_1}{V_s - V_g} \quad (34)$$

$$R_x = \frac{V_g (1k\Omega)}{1 - V_g} \quad (35)$$

Tomando los valores de voltaje de salida ( $V_g$ ) para cada una de las unidades de nivel de agua (Figura 34) se puede encontrar los valores de la resistencia variable ( $R_x$ ), como se muestra en la Tabla 13.



*Figura 34. Practica toma de datos.*

*Fuente: Autor.*

| <b>Unidad</b> | <b>Altura (cm)</b> | <b>Medida Digital</b> | <b><math>V_g</math> (V)</b> | <b><math>R_x</math> (<math>\Omega</math>)</b> |
|---------------|--------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------|
| 0             | 0,5                | 1023                  | 1,85                        | 587,3016                                      |
| 1             | 1                  | 100                   | 1,8                         | 562,5                                         |
| 2             | 1,5                | 71                    | 1,76                        | 543,2099                                      |
| 3             | 2                  | 52                    | 1,68                        | 506,0241                                      |
| 4             | 2,5                | 49                    | 1,35                        | 369,863                                       |
| 5             | 3                  | 41                    | 1,15                        | 298,7013                                      |
| 6             | 3,5                | 39                    | 1,08                        | 275,5102                                      |
| 7             | 4                  | 30                    | 1,01                        | 253,1328                                      |
| 8             | 4,5                | 26                    | 0,9                         | 219,5122                                      |
| 9             | 5                  | 21                    | 0,88                        | 213,5922                                      |
| 10            | 5,5                | 16                    | 0,8                         | 190,4762                                      |
| 11            | 6                  | 13                    | 0,58                        | 131,2217                                      |
| 12            | 6,5                | 8                     | 0,52                        | 116,0714                                      |
| 13            | 7                  | 7                     | 0,44                        | 96,4912                                       |

*Tabla 13. Tabulación de datos sensor de nivel Adeept.*

*Fuente: Autor.*

Luego de revisar la Tabla 13 se observa que tanto el valor digital recibido del sensor, como la salida del divisor de voltaje son datos que cambian de manera descendente que están afines con el nivel del agua y la resistencia resultante ( $R_x$ ). Sin embargo, se detalla que el primer dato la medida digital es aproximadamente 10 veces mayor al siguiente dato, por lo que se deduce que su rango óptimo de operación es a partir de la unidad uno (1 cm).

De acuerdo con los valores de resistencia obtenidos se realiza una gráfica (Figura 35) altura Vs resistencia para analizar su linealidad.

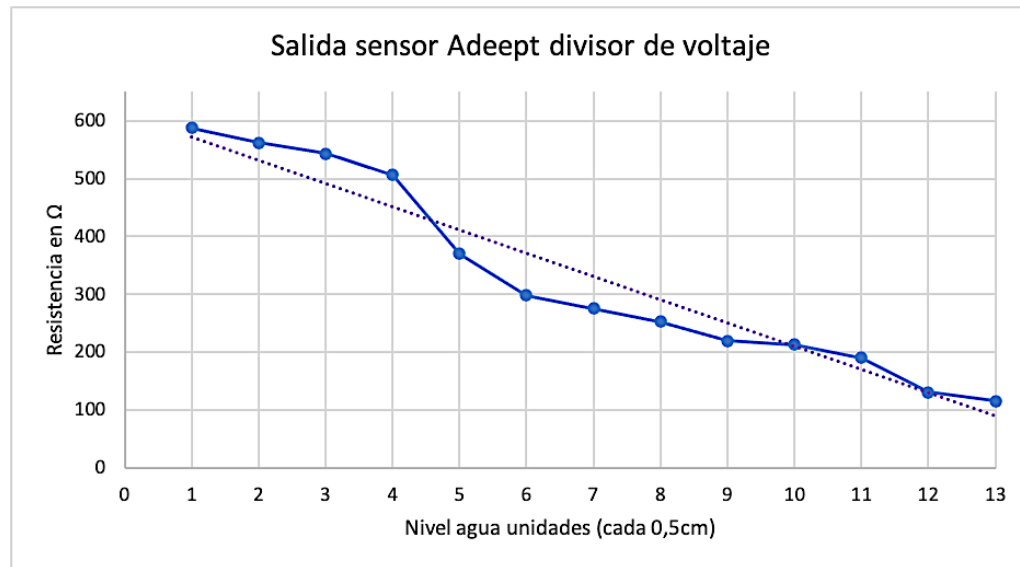


Figura 35. Resistencia  $R_x$  Vs Nivel de agua en el sensor Adept.

Fuente: Autor.

#### 9.1.3.1.2 Viabilidad del uso del sensor:

Partiendo de que este sensor está diseñado para implementar proyectos sencillos, se establece que para poder utilizarlo es recomendable omitir los niveles bajos, es decir, que su rango funcional inicia desde el primer centímetro de altura; en general se observó que el resultado de la linealización es adecuado, pero para el proyecto no cumple con algunas características necesarias, como la precisión, exactitud y rango de medida.

Aun así, da pie a utilizar un sensor del mismo tipo, pero con características más robustas, se sabe que puede llegar a ser costoso, pero el resultado será el deseado, además al ser resistivo no requerirá alimentación extra para su funcionamiento.

### 9.1.3.2 Sensor eTape de Milone technologies.

#### 9.1.3.2.1 Descripción general del sensor eTape de Milone technologies:

Este es un sensor de estado sólido con una salida resistiva que varía según el nivel de fluido (agua, líquidos no corrosivos a base de agua y polvo). Funciona debido a que la envoltura del sensor se comprime por la presión hidrostática del fluido en el que está sumergido Figura 36, como resultado se obtiene un cambio en la resistencia directamente proporcional a la distancia desde la parte superior del sensor a la superficie del fluido. La salida resistiva es inversamente proporcional a la altura del líquido.

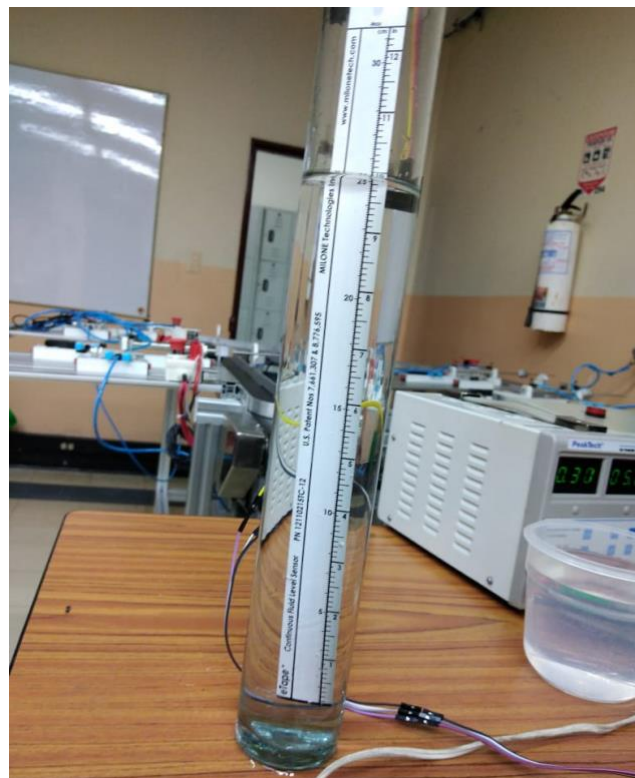


Figura 36. Sensor eTape de Milone technologies.

Fuente: Autor.

#### 9.1.3.2.2 Especificaciones del sensor eTape de Milone technologies:

- Longitud nominal = 12 pulgadas (30,48 cm).
- Longitud del sensor = 14,2 pulgadas (36,1 cm).
- Longitud activa = 12,4 pulgadas (31,5 cm).
- Salida del sensor = 400 a 2000 $\Omega$   $\pm$  20 %.
- Resistencia de referencia = 2000 $\Omega$   $\pm$  20 %.
- Grosor = 0,015 pulgadas (0,038 cm).
- Ancho = 1 pulgada (2,54 cm).
- Resolución = < 0,01 pulgadas (0,0254 cm).
- Gradiente de resistencia = 150  $\Omega$  / pulgada (60  $\Omega$  / cm).
- Potencia nominal = 0,5 W ( $V_{max}$  = 10 V).
- Rango de temperatura = -9°C a 65°C.

#### 9.1.3.2.3 Proceso de caracterización del sensor:

Se realizaron dos conexiones distintas para la recolección de datos, la primera fue un divisor de voltaje Figura 37, según la hoja de datos del sensor y la segunda configuración por medio de un puente de wheatstone, también siguiendo las recomendaciones del datasheet los datos fueron tomados cada 0,5 cm (un total de 62 muestras).

Para el divisor de voltaje se toma un voltaje de entrada de 5 V para este caso la resistencia de referencia es de 2600 $\Omega$  mostrando un aumento del 10 % de lo descrito en el datasheet.

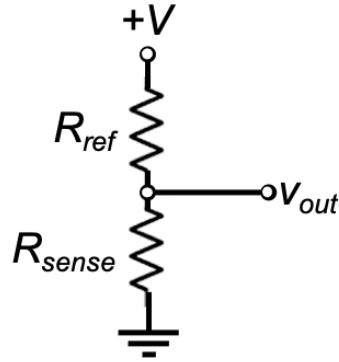


Figura 37. Divisor de voltaje sensor de nivel eTape.

Fuente: Datasheet.

$$V_{out} = \left( \frac{R_{sense}}{R_{ref} + R_{sense}} \right) V \quad (36)$$

$$V_{out}(R_{ref} + R_{sense}) = VR_{sense} \quad (37)$$

$$V_{out}R_{ref} + V_{out}R_{sense} = VR_{sense} \quad (38)$$

$$V_{out}R_{ref} = R_{sense}(V - V_{out}) \quad (39)$$

$$R_{sense} = \frac{2,6K\Omega * V_{out}}{5V - V_{out}} \quad (40)$$

Luego de tomar los datos, se insertan en una tabla (Anexo 3) y se calcula la  $R_{sense}$  para cada una de las muestras, más tarde se grafican los resultados y se aprecian en la Figura 38.

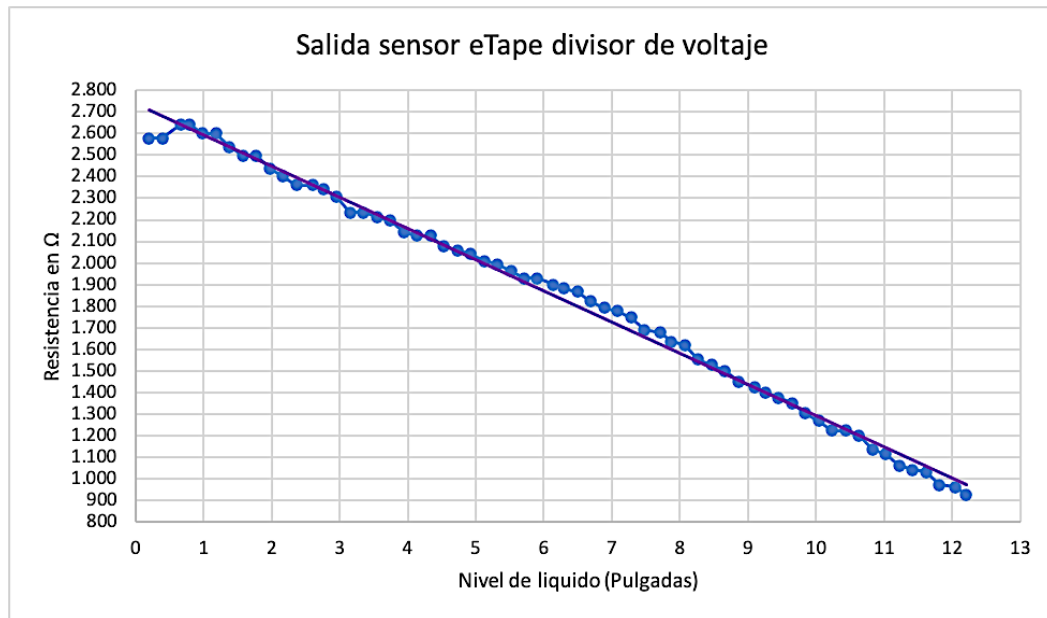


Figura 38. Resistencia  $R_{sense}$  Vs Nivel de agua en el sensor eTape (divisor de voltaje).

Fuente: Autor.

Para la configuración del wheatstone mostrado en la Figura 39 y teniendo en cuenta el diagrama representado en la hoja de datos del sensor se toma el mismo voltaje de entrada (5 V), resistencias ( $R_1$  y  $R_2$ ) del mismo valor que en este caso es de  $1K\Omega$  y la  $R_{ref}$  mencionada anteriormente de  $2,6K\Omega$ .

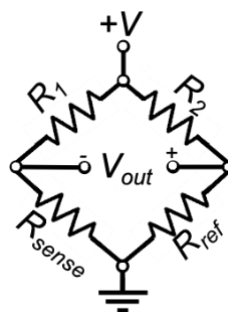


Figura 39. Conexión puente de wheatstone sensor de nivel eTape.

Fuente: Datasheet.

$$V_{out} = \left( \frac{R_{ref}}{R_{ref} + R} - \frac{R_{sense}}{R + R_{sense}} \right) * V \quad (41)$$

$$\frac{V_{out}}{V} = \left( \frac{R_{ref}}{R_{ref} + R} - \frac{R_{sense}}{R + R_{sense}} \right) \quad (42)$$

$$\frac{V_{out}}{V} = \frac{R_{ref}R + R_{ref}R_{sense} - R_{ref}R_{sense} - R_{sense}R}{(R_{ref} + R)(R + R_{sense})} \quad (43)$$

$$\frac{V_{out}}{V} = \frac{R_{ref}R - R_{sense}R}{(R_{ref} + R)(R + R_{sense})} \quad (44)$$

$$V_{out}(R_{ref} + R)(R + R_{sense}) = V(R_{ref}R - R_{sense}R) \quad (45)$$

$$\begin{aligned} V_{out}R_{ref}R + V_{out}R_{ref}R_{sense} + V_{out}R^2 + V_{out}R_{sense}R \\ = VR_{ref}R - VR_{sense}R \end{aligned} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} VR_{sense}R + V_{out}R_{ref}R_{sense} + V_{out}R_{sense}R \\ = -V_{out}R_{ref}R - V_{out}R^2 + VR_{ref}R \end{aligned} \quad (47)$$

$$\begin{aligned} R_{sense}(VR + V_{out}R_{ref} + V_{out}R) \\ = -V_{out}R_{ref}R - V_{out}R^2 + VR_{ref}R \end{aligned} \quad (48)$$

$$R_{sense} = \frac{VR_{ref}R - V_{out}(R^2 + R_{ref}R)}{VR + V_{out}(R_{ref} + R)} \quad (49)$$

Sabiendo que  $R = R_1 = R_2 = 1K\Omega$ ,  $V = 5V$  y  $R_{ref} = 2,6K\Omega$ , la ecuación queda así:

$$R_{sense} = \frac{(5V * 2,6K * 1K) - V_{out}(1K^2 + 2,6K * 1K)}{5 * 1K + V_{out}(2,6K + 1K)} \quad (50)$$

$$R_{sense} = \frac{13M - V_{out}3,6M}{5K + V_{out}3,6K} \quad (51)$$

Acorde con la ecuación(51) se sustituye el valor de  $V_{out}$  que es distinto para cada una de las alturas y asimismo se obtienen los valores de  $R_{sense}$  (resistencia variable

del sensor), se ingresan los resultados en una tabla (Anexo 4) y la gráfica del comportamiento del sensor se aprecia en la Figura 40.

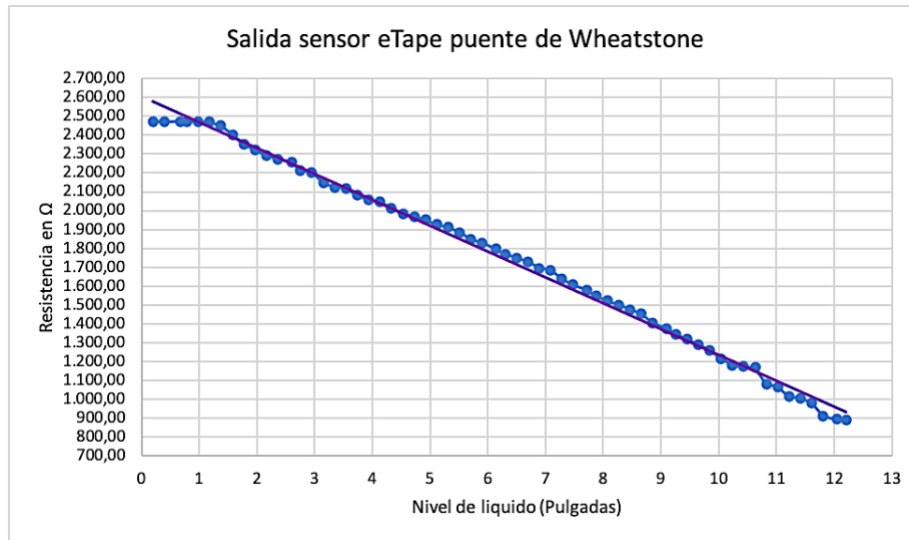


Figura 40. Resistencia  $R_{sense}$  Vs Nivel de agua en el sensor eTape (puente de wheatstone ).

Fuente: Autor.

#### 9.1.3.2.4 Viabilidad del uso del sensor:

Al cabo de tomar las 62 muestras y al obtener un buen resultado sin aplicar ninguna técnica de linealización se puede concluir que este sensor es el indicado para suplir las necesidades del proyecto; es un sensor poco comercial, el fabricante tiene disponibles varios tamaños, desde 5 pulgadas hasta 32 pulgadas, teniendo en cuenta el uso que se le dará, se determinó que 12 pulgadas son una medida adecuada; además de considerar el largo del sensor, se debe tener en cuenta la resolución, esta característica es menor a 0,01 pulgadas esto es 0,0254 centímetros, es decir, que si se tiene un margen de error este sería en el orden de los milímetros.

Igualmente cabe comentar que el fabricante indica que del nivel 0 al 1 (en pulgadas) el sensor no es lineal. Y esto es notable en la Figura 38 y la Figura 40. Debido a esto ese segmento del sensor no se empleará estableciendo un rango de 11 pulgadas (27,94 cm), de 1 pulgada (2,54 cm) a 12 pulgadas (30,48) un rango apto para lo requerido.

El sensor será implementado y se comparará con el sistema convencional del control hidrostático, esperando que el sistema con sensores sobresalga.

En cuanto al diferencial de costos, se puede dividir en dos partes, instalación y monitoreo; respecto al primer ítem, puede que el costo de materiales supere al sistema actual, pero se compensa con la anulación del costo de monitoreo manual en contraste al: “control hidrostático de asentamiento”.

Luego de asegurar que las pruebas con el sensor cumplen con los parámetros necesarios, se puede afirmar que es un proyecto viable. Cabe aclarar que la función principal de este instrumento es llevar el control del asentamiento de un edificio, sin ejecutar acciones correctivas.

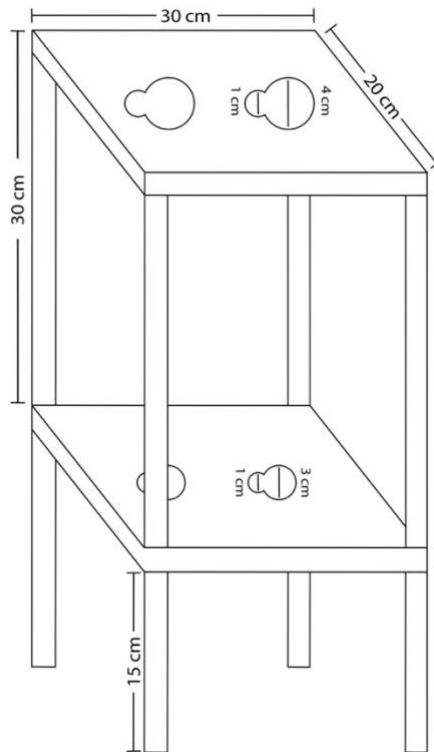
#### **9.1.4 Conclusión selección de sensor.**

Al cabo de realizar un complejo estudio de los sensores que se creían que podían mostrar éxito en el desarrollo del proyecto, se obtuvieron datos interesantes y pie para cambiar el modelo de cómo se toman los datos para trabajo futuro, es el caso del sensor acelerómetro, que como se describió antes es necesario al momento de seleccionarlo, que cuente con algunas características muy particulares, es el ejemplo de la alta sensibilidad, algunas técnicas para reducir al máximo o casi del todo las perturbaciones externas y su

precisión al momento de tomar datos a partir de movimientos muy pequeños; otros sensores que por el contrario se determinó que ninguno de ese tipo podría ser usado para la resolución y desarrollo, es el caso de las galgas extensiométricas, que aunque su función es medir el cambio de presión, no se encontró un lugar en donde puedan ser instaladas sin necesidad de alterar la estructura, y que los valores que se vayan obteniendo sean valores exactos que determinen el asentamiento diferencial. Ya para terminar fue gratificante ver los resultados que tuvo el sensor de nivel eTape, debido a su respuesta, se notó en la toma de datos que en una pequeña variación de posición, se obtiene una reacción lineal en una respuesta en términos de resistividad, también cabe resaltar que no es necesaria una fuente de alimentación directa y en sí su instalación no es compleja, sin embargo como desventajas se puede describir que utilizando este sensor no es posible eliminar el uso del líquido (agua) para realizar las mediciones, situación que no se presentaría al utilizar un acelerómetro.

## **9.2 ETAPA DE DISEÑO DE ESTRUCTURA FÍSICA**

La estructura que se va a diseñar para el proyecto se compondrá de dos partes, la primera es la mesa de control en la cual estarán ubicadas las mangueras con los sensores (Figura 41) y la segunda es el modelo a escala de una estructura.



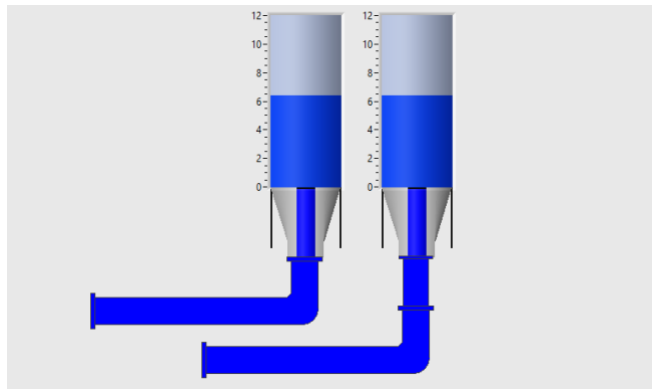
*Figura 41. Plano de la mesa de control.*

*Fuente: Autor.*

Al realizar el estudio de los diferentes tipos de sensores, se seleccionó el sensor de nivel eTape de la compañía Milone Technologies, como se mencionó anteriormente, fue adquirida en su versión Estándar eTape assembly, cuyo tamaño de largo es 12 pulgadas (30 cm) de región activa, debido a su costo comercial y su importación, la demostración o simulación física se hará con dos sensores o puntos de control.

Basados en el principio de física de vasos comunicantes se usa una manguera transparente con agua, en la cual en uno de sus extremos va al punto de la estructura en donde se quiere llevar la muestra de altura, esta debe ser marcada con un nombre o número que la identifique después en el plano de la edificación.

Los otros extremos de las mangueras son llevados a un mismo punto, cada una debe llevar un acople para adaptar un tubo de acrílico en donde se pueda insertar el sensor de aproximadamente 15 pulgadas de largo y 1 pulgada de ancho como se plantea en la Figura 42, estos puntos de control deben tener la capacidad de calibrarse para siempre estar nivelado, cabe aclarar que los extremos de las mangueras deberán estar a la misma altura.



*Figura 42. Diseño punto de control sensores.*

*Fuente: Autor.*

Volviendo al punto central de control, se ubican los tubos de forma vertical uno al lado del otro, adicionalmente debe ir el sistema de procesamiento de datos el encargado de hacerlo es la Raspberry Pi 3 B+.

## 10. RESULTADOS DEL PROYECTO

### 10.1 ESTRUCTURA FÍSICA

La estructura de control se realizó en madera, como se muestra en la Figura 43 y las dimensiones mencionadas en el plano (Figura 41).



*Figura 43. Estructura de control.*

*Fuete: Autor.*

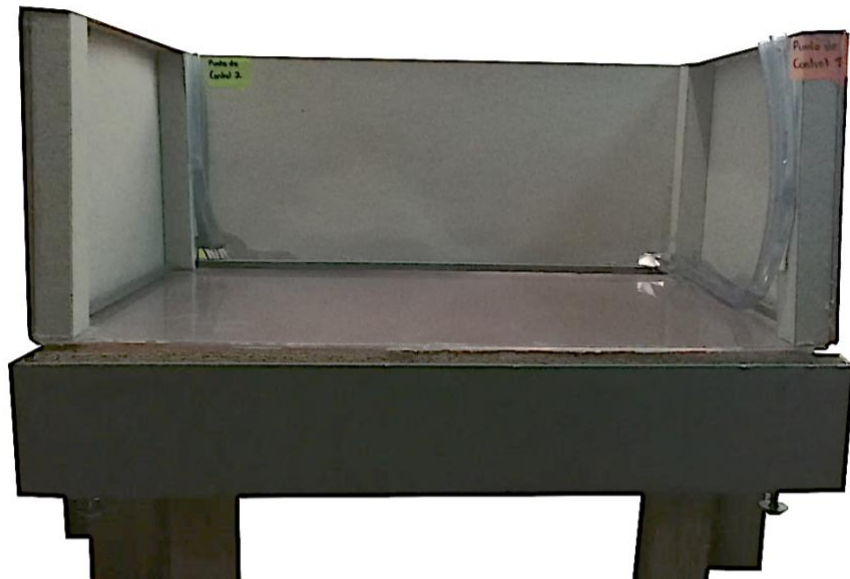
Para la estructura del modelo a escala se hicieron dos partes; la primera es la simulación de un suelo (Figura 44), en el que por medio de tornillos y resortes, se crea un cambio controlado en el asentamiento.



*Figura 44. Cimentaciones modelo a escala.*

*Fuente: Autor.*

La segunda parte es el modelo a escala de una estructura ubicada encima de la primera parte (Figura 44), esta tiene forma rectangular y en cada extremo posee una columna (Figura 45). Se colocaron dos puntos de control para el Comparador hidrostático control de asentamiento.



*Figura 45. Modelo a escala de la estructura.*

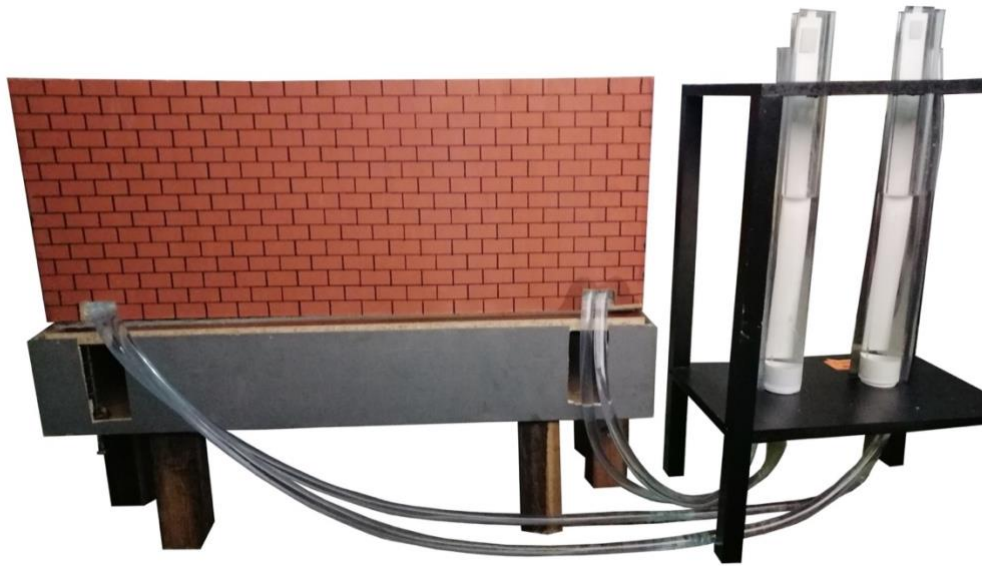
*Fuente: Autor.*

La estructura se coloca junto al punto de control y se instalan las mangueras. Como se muestra en la Figura 46 y la Figura 47.



*Figura 46. Parte interna del modelo a escala junto con el punto de control.*

*Fuente: Autor.*



*Figura 47. Parte externa del modelo a escala junto con el punto de control.*

*Fuente: Autor.*

## **10.2 DIAGRAMA DE FLUJO**

Para desarrollar el programa que cumpla con los objetivos, se procede a desarrollar un diagrama de flujo del algoritmo (Figura 48) .

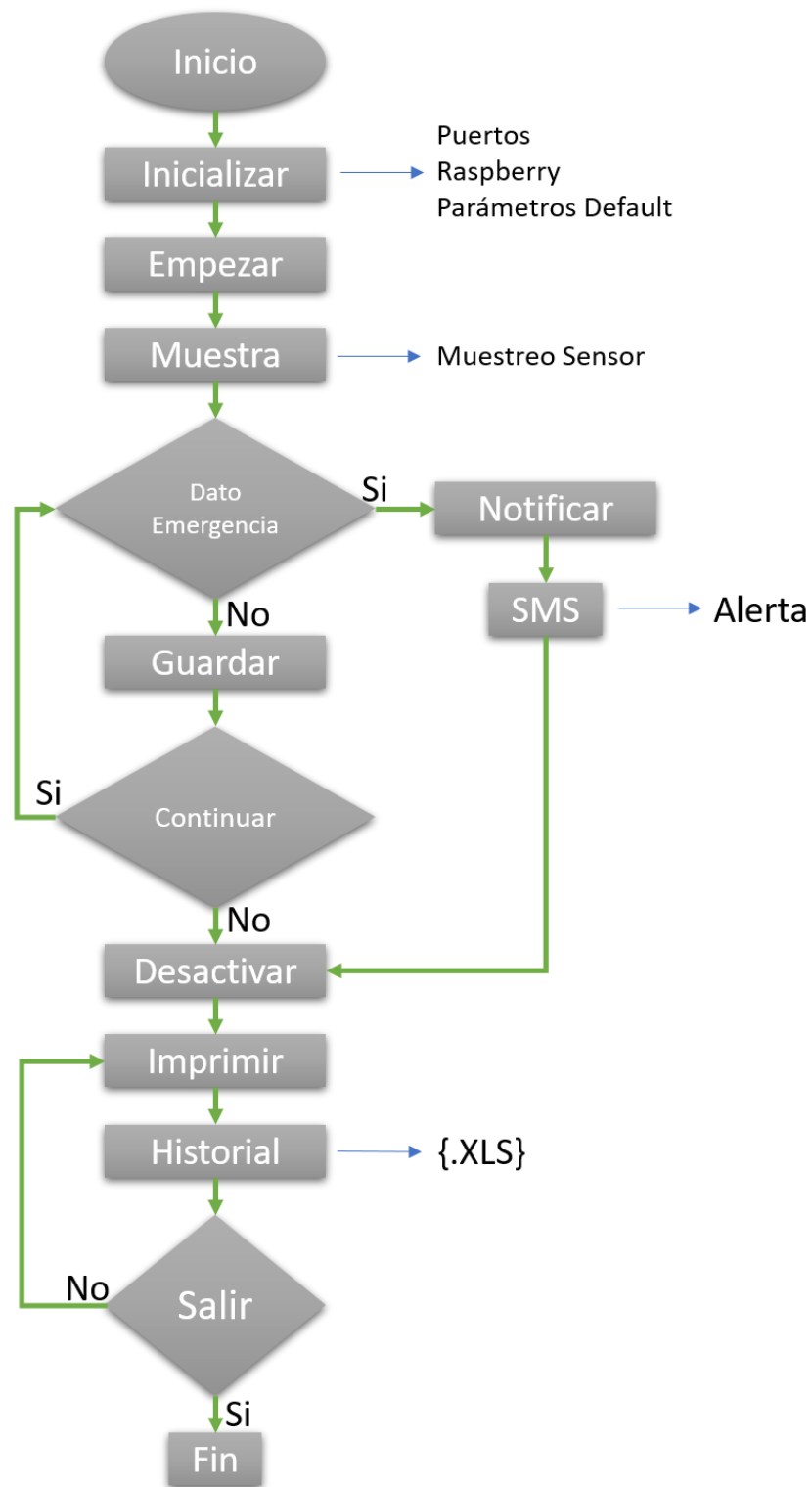


Figura 48. Diagrama de flujo del algoritmo.

Fuente: Autor.

- Inicio: Abre el programa.
- Inicializar: En esta etapa del código el usuario calibrará manualmente el eje de referencia o eje de los sensores y se cargarán los valores por defecto de la aplicación, también se configura el tipo de señal de emergencia que espera tener el usuario, para el ejemplo un SMS.
- Empezar: en esta etapa comienza el bucle de función del programa.
- Muestra: se tomará una muestra después de N tiempo, N tiempo hace parte de los parámetros que configura en inicializar el usuario.
- Dato de emergencia? (Condicional): Se realizará un análisis entre los datos obtenidos por los sensores y se determina si el dato es significativo de manera negativa (catalogado como una emergencia). En caso de que el dato sea detectado como una emergencia se procede a la etapa de notificar. Si el dato leído no es relevante (no implica una emergencia) se procede al camino del No, es decir la etapa de guardar.
- Notificar: etapa en la cual se envía un SMS y se espera una interacción del usuario.
- Guardar: etapa donde se almacena: fecha y hora de la toma de muestra y el valor leído por los sensores (se guarda en un archivo de formato .XLS)
- Continuar: Condicional booleano que indica que el usuario terminó de ver la gráfica en tiempo real y quiere ver los datos.
- Desactivar: etapa en la que se desactiva la notificación de emergencia después de la interacción del usuario.

- Imprimir (botón condicional): es un condicional que depende si el usuario tomo la decisión de imprimir. En caso de que el usuario presione la tecla de imprimir se desactiva la toma de muestras y se dejan en estado OFF o stand by los sensores. Y se imprime la gráfica del histórico de datos.
- Salir (botón condicional): es un condicional que depende si el usuario tomo la decisión de salir para finalizar el proceso y cerrar la app.

### 10.3 COMPARADOR HIDROSTÁTICO CONTROL DE ASENTAMIENTO CON ARREGLO DE SENSORES

Se diseñó el diagrama de bloques del sistema (Figura 49) que se implementó para cumplir con los objetivos propuestos del proyecto.

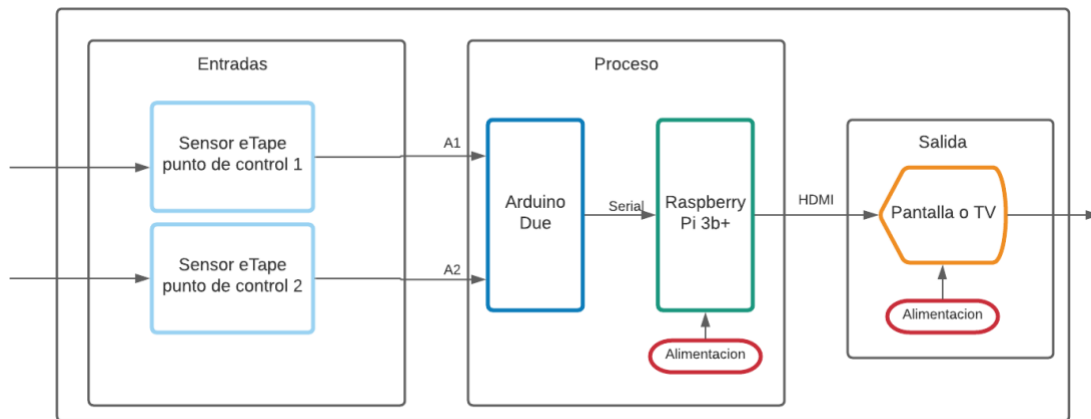


Figura 49. Diagrama de bloques de lazo abierto.

Fuente: Autor.

Al estar desarrollando el proyecto después de haber comprado la raspberry (que se compró para que el sistema no necesitara de un computador para su monitoreo, además de ocupar menos espacio), seleccionar el sensor. Se revisa el datasheet de la raspberry que para conectarla con los sensores requiere de un módulo debido a que no cuenta con pines de entrada analógicos, por lo que era imposible conectar los sensores de manera directa. Al buscar la solución encontramos un módulo (tarjeta AD DA RPI), que en el mercado tiene un precio \$165.410 COP, que se decidió no comprar, puesto que el presupuesto se incrementa y se pretende hacer el sistema funcional, pero no tan costoso por lo cual se busca una solución más accesible arduino due (precio de mercado de 60.000 COP) que ya se poseía.

Se comunicó por puerto serial el arduino y la raspberry para que esta obtuviera los valores de los sensores. En el arduino se crea un programa (Figura 50) que obtenga los valores de los sensores.

```
int sensor1 = 0;
int sensor2 = 0;

void setup()
{
  Serial.begin(115200);
  analogReadResolution(12);
  pinMode(A1, INPUT);
  pinMode(A2, INPUT);
}

void loop()
{
  sensor1 = analogRead(A1);
  sensor2 = analogRead(A2);
  Serial.println(sensor1);
  Serial.println(sensor2);
  delay(300);
}
```

Figura 50. Programa de arduino que recolecta los datos de los sensores.

Fuente: Autor.

El valor que retorna el programa es un entero entre 0 y 4095 (Figura 51) que se va a escalar en unidades de voltaje.

```
Sensor1:1688
Sensor2:1756
```

Figura 51. Valor que envía el arduino a la raspberry.

Fuente: Autor.

Al ejecutar el programa de la raspberry (Anexo 5) se abrirán dos ventanas (como se muestra en la Figura 52). La ventana izquierda contiene la presentación del proyecto

(título, estudiantes, director, codirector) y la ventana de la derecha son las gráficas (#muestra Vs Nivel del agua en cm) obtenidas de cada sensor (en el Sensor 1 la variación máxima en la medida de cm es de 0,4cm y en el Sensor 2 es de 0,5 cm que se puede disminuir cambiando el arduino por el módulo previamente mencionado).

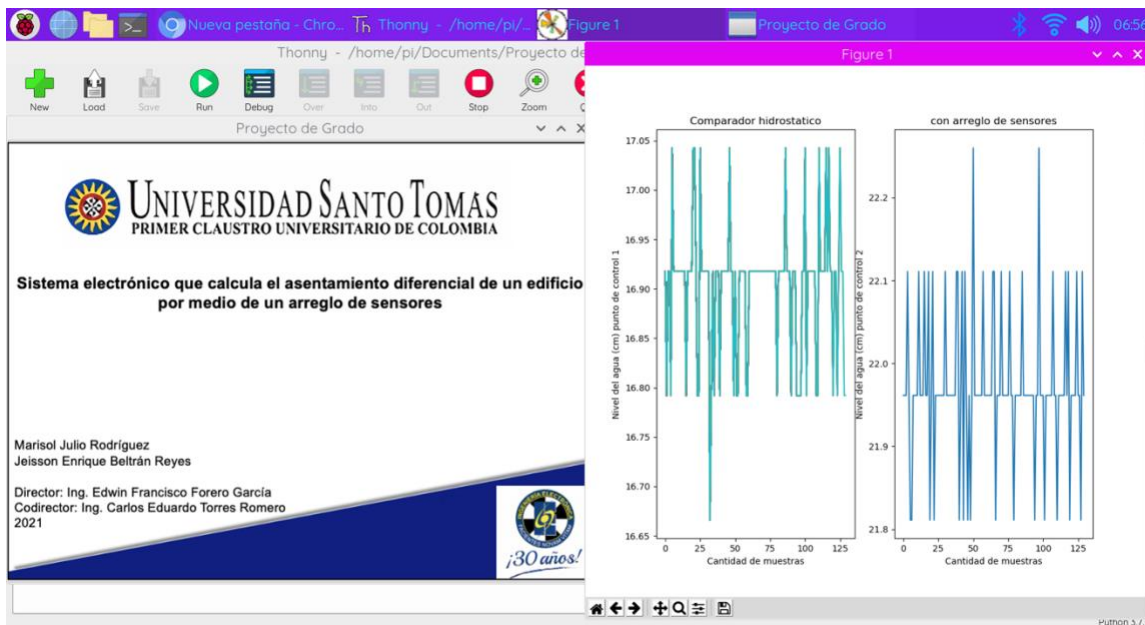


Figura 52. Captura de Raspberry pi, donde se muestran las ventanas que se abren al ejecutar el algoritmo de la Raspberry.

Fuente: Autor.

Las ventanas de la Figura 52 se mantienen hasta que se presente una alerta o el usuario desee revisar el historial de datos. En caso de que se genere una alerta el programa se detiene (no almacena más datos), abre WhatsApp y envía un mensaje de alerta al número de emergencia establecido por el usuario (Figura 53). Al finalizar sale un mensaje que confirma que el mensaje de alerta fue enviado.

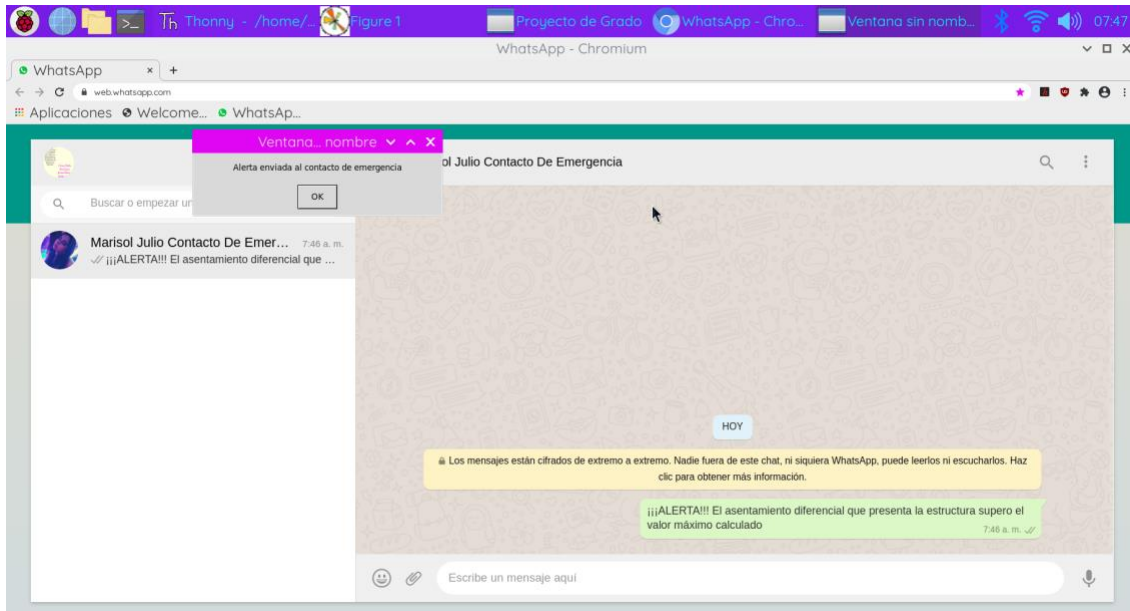


Figura 53. Captura de Raspberry pi en la que el programa abre WhatsApp y envía la alerta al contacto de Emergencia. Fuente: Autor.

En el celular se recibe el mensaje de alerta como se puede ver en la Figura 54.

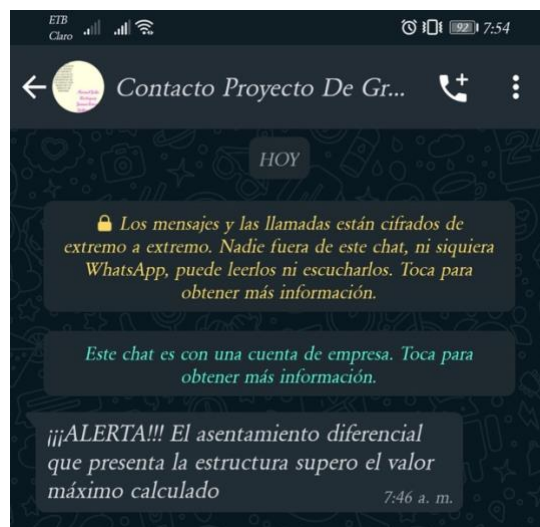


Figura 54. Captura del WhatsApp del contacto de emergencia. Fuente: Autor.

Después de que el usuario responda a la alerta, puede volver a ejecutar el programa o revisar los datos almacenados en el Excel (Historial de datos obtenidos con fecha y hora.

Anexo 6) que se encuentra en la carpeta del programa Figura 55.

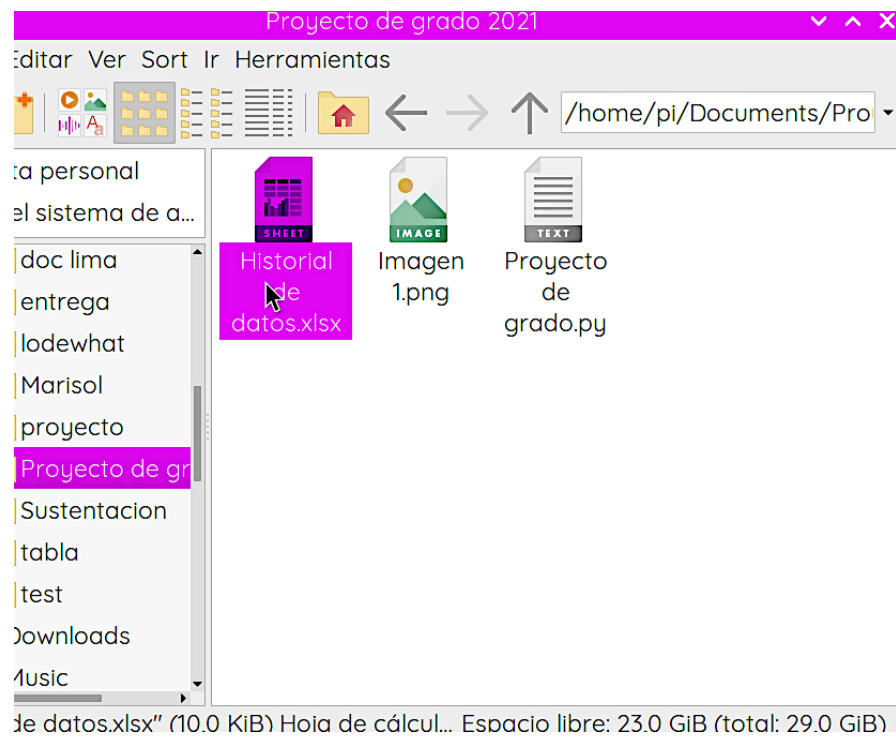
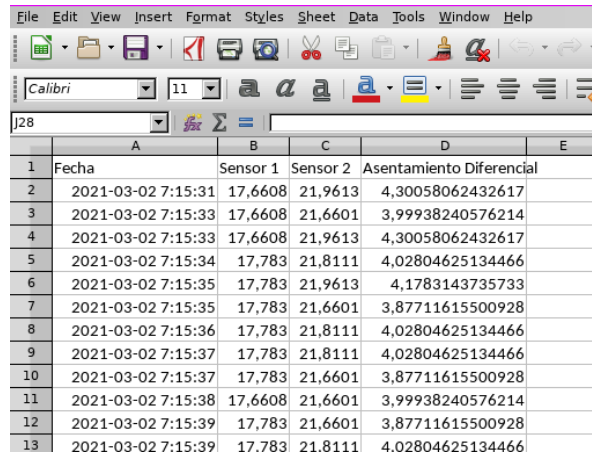


Figura 55. Captura de Raspberry pi en la que se busca el Historial de datos.xlsx.

Fuente: Autor

Al abrir el archivo Historial de datos.xlsx (Figura 56) se tienen 4 columnas (Fecha, Sensor 1, Sensor 2 y Asentamiento Diferencial). Estos son los datos que se entregan al ingeniero civil para que pueda corregir el asentamiento de la estructura si se requiere.



|    | A                  | B        | C        | D                        | E |
|----|--------------------|----------|----------|--------------------------|---|
| 1  | Fecha              | Sensor 1 | Sensor 2 | Asentamiento Diferencial |   |
| 2  | 2021-03-02 7:15:31 | 17,6608  | 21,9613  | 4,30058062432617         |   |
| 3  | 2021-03-02 7:15:33 | 17,6608  | 21,6601  | 3,99938240576214         |   |
| 4  | 2021-03-02 7:15:33 | 17,6608  | 21,9613  | 4,30058062432617         |   |
| 5  | 2021-03-02 7:15:34 | 17,783   | 21,8111  | 4,02804625134466         |   |
| 6  | 2021-03-02 7:15:35 | 17,783   | 21,9613  | 4,1783143735733          |   |
| 7  | 2021-03-02 7:15:35 | 17,783   | 21,6601  | 3,87711615500928         |   |
| 8  | 2021-03-02 7:15:36 | 17,783   | 21,8111  | 4,02804625134466         |   |
| 9  | 2021-03-02 7:15:37 | 17,783   | 21,8111  | 4,02804625134466         |   |
| 10 | 2021-03-02 7:15:37 | 17,783   | 21,6601  | 3,87711615500928         |   |
| 11 | 2021-03-02 7:15:38 | 17,6608  | 21,6601  | 3,99938240576214         |   |
| 12 | 2021-03-02 7:15:39 | 17,783   | 21,6601  | 3,87711615500928         |   |
| 13 | 2021-03-02 7:15:39 | 17,783   | 21,8111  | 4,02804625134466         |   |

Figura 56. Algunos datos almacenados en el archivo: Historial de datos.xlsx.

Fuente: Autor.

### 10.3.1 Toma de datos y cálculo de errores

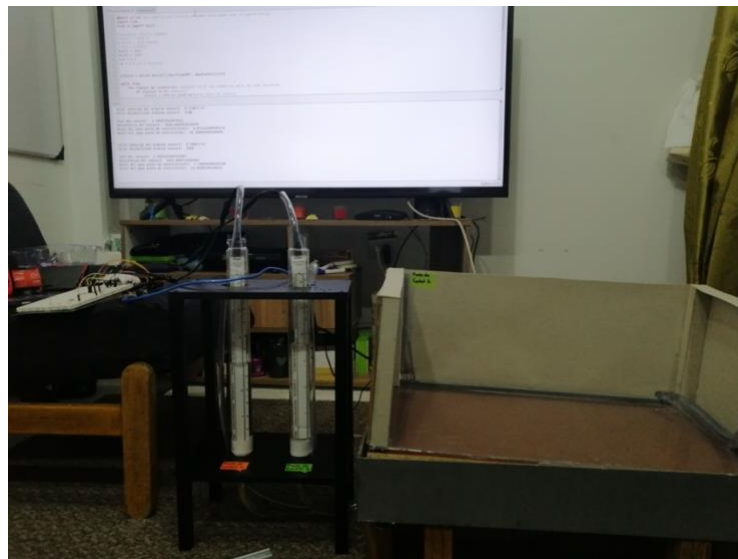
Se hace la comparación del sistema con el arreglo de sensores y el comparador hidrostático control de asentamiento. Para realizar las medidas se estableció el punto de referencia como 20 cm, altura en la cual deberían estar todos los puntos de control para que la estructura no presente asentamiento diferencial. Como se muestra en la Figura 57.



*Figura 57. Estructura nivelada (sin asentamiento).*

*Fuente: Autor.*

Se comienzan a variar los asentamientos en cada punto de control como se observa en la Figura 58 y la Figura 59. Para comparar los datos obtenidos con los sensores y los medidos con la regla (Figura 60).



*Figura 58. Estructura con asentamiento en el punto de control 1.*

*Fuente: Autor.*

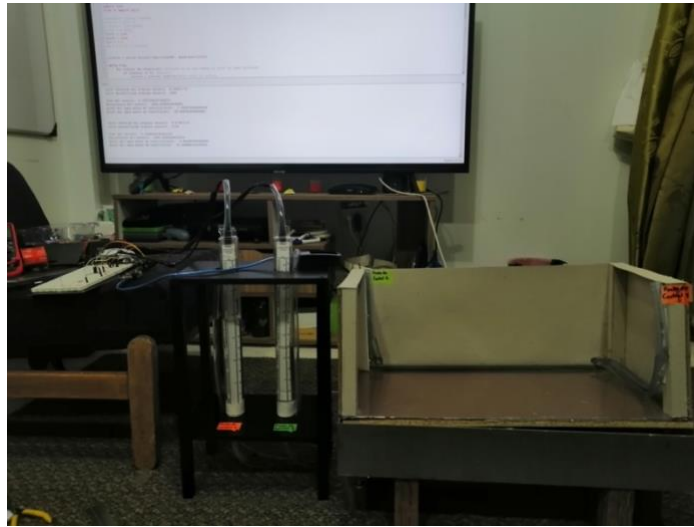


Figura 59. Estructura con asentamiento en el punto de control 2.

Fuente: Autor.



Figura 60. Toma de medidas con la regla.

Fuente: Autor.

Las mediciones efectuadas se muestran en la Tabla 14 y son las siguientes:

| Medida tomada con regla (cm) |                    | Asentamiento diferencial teorico (cm) | Medida obtenida de los sensores (cm) |                    | Asentamiento diferencial practico (cm) |
|------------------------------|--------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|--------------------|----------------------------------------|
| Punto de control 1           | Punto de control 2 |                                       | Punto de control 1                   | Punto de control 2 |                                        |
| 20                           | 20                 | 0                                     | 19,94                                | 19,85              | 0,09                                   |
| 19                           | 20                 | 1                                     | 18,99                                | 20,04              | 1,05                                   |
| 18                           | 20                 | 2                                     | 18,02                                | 20,04              | 2,02                                   |
| 17                           | 20                 | 3                                     | 16,83                                | 20,23              | 3,4                                    |
| 16                           | 20                 | 4                                     | 16,03                                | 20,04              | 4,01                                   |
| 20                           | 19                 | 1                                     | 20,34                                | 18,89              | 1,45                                   |
| 20                           | 18                 | 2                                     | 19,94                                | 17,9               | 2,04                                   |
| 20                           | 17                 | 3                                     | 19,94                                | 17,1               | 2,84                                   |
| 20                           | 16                 | 4                                     | 19,94                                | 15,89              | 4,05                                   |
| 20                           | 21                 | 1                                     | 19,94                                | 21                 | 1,06                                   |
| 20                           | 22                 | 2                                     | 19,94                                | 22,1               | 2,16                                   |
| 20                           | 23                 | 3                                     | 19,94                                | 22,79              | 2,85                                   |
| 20                           | 24                 | 4                                     | 19,82                                | 24,08              | 4,26                                   |
| 21                           | 24                 | 3                                     | 21,03                                | 24,08              | 3,05                                   |
| 22                           | 24                 | 2                                     | 22,22                                | 24,08              | 1,86                                   |
| 23                           | 24                 | 1                                     | 22,95                                | 24,23              | 1,28                                   |
| 23                           | 22                 | 1                                     | 23,06                                | 22,11              | 0,95                                   |
| 23                           | 21                 | 2                                     | 23,06                                | 21,05              | 2,01                                   |
| 23                           | 20                 | 3                                     | 23,06                                | 20,11              | 2,95                                   |
| 23                           | 19                 | 4                                     | 23,06                                | 19,31              | 3,75                                   |

Tabla 14. Resultados medidas realizadas.

Fuente: Autor.

Para obtener el porcentaje de error de linealidad de los sensores se procede a evaluarla en cada sensor [32]. Se tiene en cuenta la ecuación :

$$Q = AM + B \quad (52)$$

Donde:

Q: Resistencia obtenida con el sensor.

M: Valores del nivel del agua en cm.

A: Contante (pendiente de la recta).

B: Constante (error de cero).

$$A = (Q_{max} - Q_{min}) / (M_{max} - M_{min}) \quad (53)$$

$$B = Q_n - A * M_n \quad (54)$$

El error de linealidad se obtiene mediante:

$$\%_{Linealidad} = \frac{\Delta_{Linealidad}}{FSC} * 100 \quad (55)$$

Los resultados obtenidos al evaluar la linealidad en el Sensor 1, se muestran en la Tabla 15, y son los siguientes:

| <i>Nivel del agua Sensor 1 (cm)</i> | <i>Resistencia Sensor 1</i> | <i><math>\Delta</math> linealidad</i> | <i>Valor Recta</i> |
|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| 16,03                               | 1904,58                     | 0,37462519                            | 1926,276287        |
| 16,83                               | 1838,65                     | 0,713024512                           | 1879,944566        |
| 18,02                               | 1904,58                     | 1,61537481                            | 1811,026131        |
| 18,99                               | 1754,13                     | 0,01241342                            | 1754,848919        |
| 19,82                               | 1699,82                     | 0,120172668                           | 1706,779758        |
| 19,94                               | 1699,83                     | 7,10543E-15                           | 1699,83            |
| 20,34                               | 1686,49                     | 0,16966105                            | 1676,664139        |
| 21,03                               | 1634,1                      | 0,044945965                           | 1636,70303         |
| 22,22                               | 1545,93                     | 0,377358648                           | 1567,784595        |
| 22,95                               | 1503,42                     | 0,381369799                           | 1525,506899        |
| 23,06                               | 1497,44                     | 0,37462519                            | 1519,136287        |

Tabla 15. Resultados obtenidos al evaluar la linealidad del Sensor 1.

Fuente: Autor.

En la Tabla 16 se muestran los valores de las constantes A y B y el error de linealidad para el Sensor 1.

|                                                |              |
|------------------------------------------------|--------------|
| <b>A</b>                                       | -57,91465149 |
| <b>B</b>                                       | 2854,648151  |
| <b><math>\Delta</math> Linealidad(max)/FSC</b> | 0,016245672  |
| <b>%Linealidad</b>                             | 1,624567174  |

Tabla 16. Constantes y  $\Delta$  Linealidad máx. Obtenidas al evaluar la linealidad del Sensor 1.

Fuente: Autor.

Se procede a graficar los datos obtenidos y la linealización realizada como se muestra en la Figura 61.

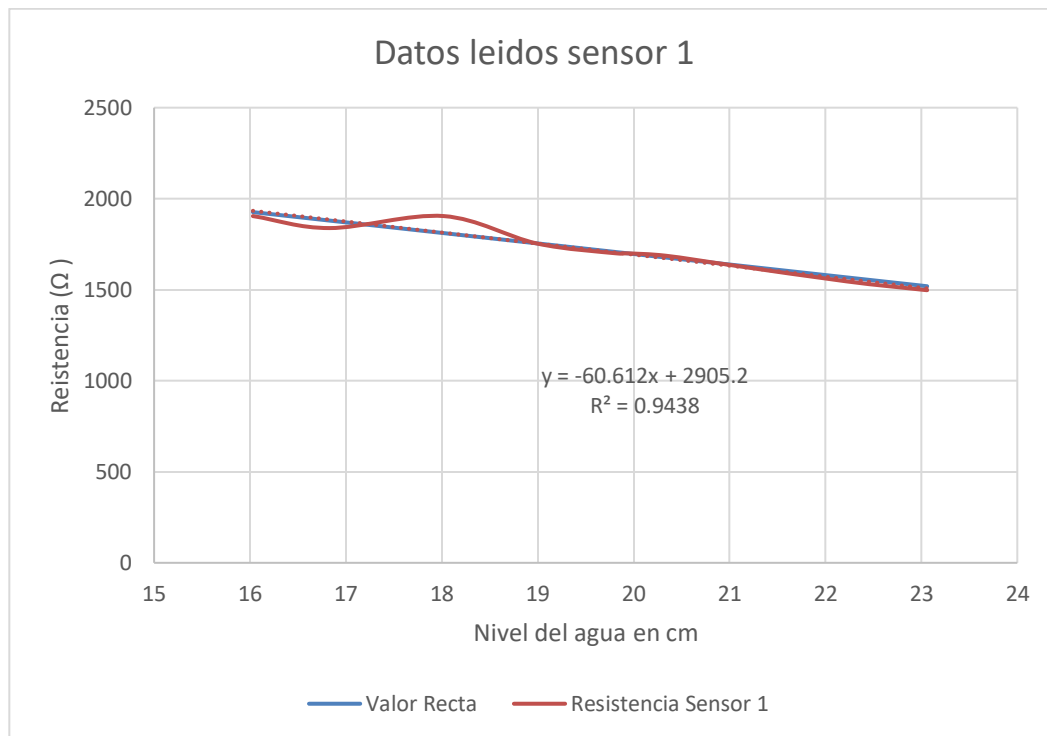


Figura 61. Datos y curva de linealización para el Sensor 1.

Fuente: Autor.

Se nota que los datos obtenidos no son lineales, pero al graficar la curva de linealización se ve que se comportan de forma lineal después de los 19 cm. No es lo ideal, pero el error lineal es de 1,624567174%. Que se puede mejorar al utilizar el módulo (tarjeta AD DA RPI), para la adquisición de datos.

Después de evaluar la linealidad del Sensor 1, se procede a evaluarla en el Sensor 2. Los resultados obtenidos al evaluar la linealidad en el Sensor 2, se muestran en la Tabla 17, y son los siguientes:

| <b><i>Nivel del<br/>agua<br/>Sensor 2<br/>(cm)</i></b> | <b><i>Resistencia<br/>Sensor 2</i></b> | <b><i><math>\Delta</math> linealidad</i></b> | <b><i>Valor Recta</i></b> |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------|
| 15,89                                                  | 2883,06                                | 1,05893989                                   | 2947,97657                |
| 17,1                                                   | 2859,86                                | 0,22738573                                   | 2873,79951                |
| 17,9                                                   | 2814,12                                | 0,17351126                                   | 2824,75682                |
| 18,89                                                  | 2758,14                                | 0,09667495                                   | 2764,0665                 |
| 19,31                                                  | 2660,59                                | 1,26794179                                   | 2738,31909                |
| 19,85                                                  | 2703,45                                | 0,02879574                                   | 2705,21528                |
| 20,04                                                  | 2692,66                                | 0,01480568                                   | 2693,56764                |
| 20,23                                                  | 2681,92                                | 0                                            | 2681,92                   |
| 20,11                                                  | 2608,11                                | 1,32401236                                   | 2689,2764                 |
| 21                                                     | 2587,44                                | 0,77118802                                   | 2634,71641                |
| 21,05                                                  | 2546,67                                | 1,38624132                                   | 2631,65125                |
| 22,1                                                   | 2457,52                                | 1,79048468                                   | 2567,28272                |
| 22,11                                                  | 2477,02                                | 1,46239443                                   | 2566,66969                |
| 22,79                                                  | 2409,48                                | 1,88412854                                   | 2524,98341                |
| 24,08                                                  | 2381,16                                | 1,05609345                                   | 2445,90207                |
| 24,23                                                  | 2371,79                                | 1,05893989                                   | 2436,70657                |

*Tabla 17. Resultados obtenidos al evaluar la linealidad del Sensor 2.*

*Fuente: Autor.*

En la Tabla 18 se pueden apreciar los valores de las constantes A y B y el error de linealidad para el Sensor 2:

|                                                |              |
|------------------------------------------------|--------------|
| <b>A</b>                                       | -61,30335731 |
| <b>B</b>                                       | 3922,086918  |
| <b><math>\Delta</math> Linealidad(max)/FSC</b> | 0,043703669  |
| <b>%Linealidad</b>                             | 4,370366879  |

Tabla 18. Constantes y  $\Delta$  Linealidad máx. Obtenidas al evaluar la linealidad del Sensor 2.

Fuente: Autor.

Se procede a graficar los datos obtenidos y la linealización realizada como se muestra en la Figura 62.

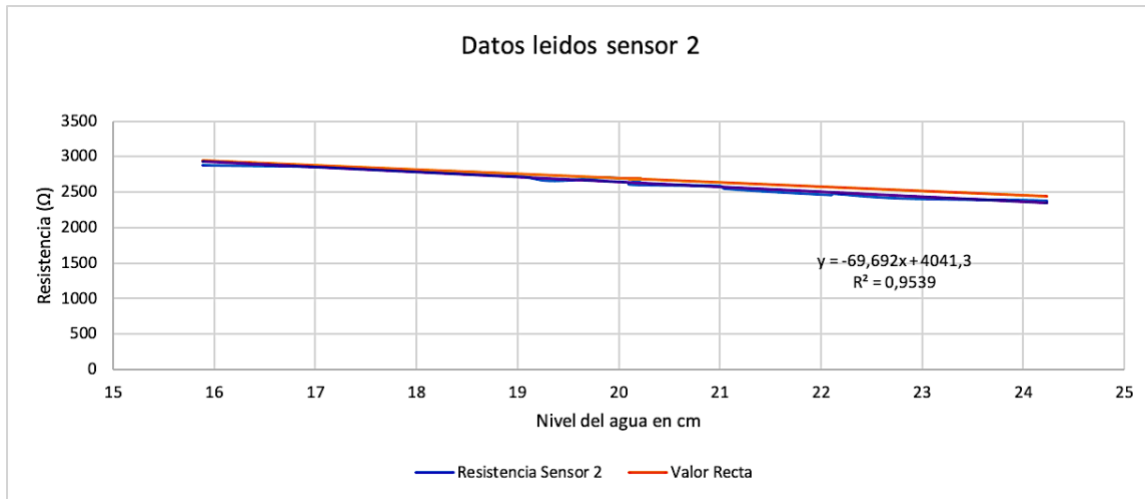


Figura 62. Datos y curva de linealización para el Sensor 2.

Fuente: Autor.

Se observa que los datos obtenidos casi lineales, No es lo ideal, pero el error lineal es de 4,370366879%. Que se puede mejorar al utilizar el módulo (tarjeta AD DA RPI), para la adquisición de datos. Se ve que el comportamiento de la resistencia de este sensor no es el ideal que se muestra en el dataheet [33].

Para hallar el error de exactitud se tiene en cuenta la siguiente ecuación:

$$\%Linealidad = \frac{\Delta_{Exactitud}}{FSC} * 100 \quad (56)$$

Se comparan los datos obtenidos por el Sensor 1 y los tomados con la regla, como se muestra en la Tabla 19.

| <b>Nivel del agua tomado con regla (cm)</b> | <b>Nivel del agua Sensor 1 (cm)</b> | <b><math>\Delta</math> Exactitud</b> | <b>% Exactitud</b> |
|---------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| 16                                          | 16,03                               | 0,001875                             | 0,1875             |
| 17                                          | 16,83                               | 0,01                                 | 1                  |
| 18                                          | 18,02                               | 0,0011111111                         | 0,1111111111       |
| 19                                          | 18,99                               | 0,000526316                          | 0,052631579        |
| 20                                          | 19,82                               | 0,009                                | 0,9                |
| 20                                          | 19,94                               | 0,003                                | 0,3                |
| 20                                          | 20,34                               | 0,017                                | 1,7                |
| 21                                          | 21,03                               | 0,001428571                          | 0,142857143        |
| 22                                          | 22,22                               | 0,01                                 | 1                  |
| 23                                          | 22,95                               | 0,002173913                          | 0,217391304        |
| 23                                          | 23,06                               | 0,002608696                          | 0,260869565        |

Tabla 19. Resultados obtenidos al hallar la exactitud del Sensor 1.

Fuente: Autor.

Al hallar el error de exactitud para el Sensor 1 los resultados se aprecian en la Tabla 20.

|                                               |             |
|-----------------------------------------------|-------------|
| <b><math>\Delta</math> Exactitud(max)/FSC</b> | 0,002608696 |
| <b>%Exactitud</b>                             | 0,260869565 |

Tabla 20. Error de exactitud del Sensor 1.

Fuente: Autor.

Se puede concluir que el sensor tiene un error de linealidad alto pero un error de exactitud pequeño (0,260869565%). Por lo que su comportamiento es ideal para dar con exactitud el nivel del agua.

Después de evaluar la linealidad del Sensor 1, se procede a evaluarla en el Sensor 2. Se comparan los datos obtenidos por el Sensor 2 y los tomados con la regla, como se muestra en la Tabla 21.

| <i>Nivel del agua tomado con regla (cm)</i> | <i>Nivel del agua Sensor 2 (cm)</i> | <i><math>\Delta</math> Exactitud</i> | <i>% Exactitud</i> |
|---------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| 16                                          | 15,89                               | 0,006875                             | 0,6875             |
| 17                                          | 17,1                                | 0,00588235                           | 0,58823529         |
| 18                                          | 17,9                                | 0,00555556                           | 0,55555556         |
| 19                                          | 18,89                               | 0,00578947                           | 0,57894737         |
| 19                                          | 19,31                               | 0,01631579                           | 1,63157895         |
| 20                                          | 19,85                               | 0,0075                               | 0,75               |
| 20                                          | 20,04                               | 0,002                                | 0,2                |
| 20                                          | 20,23                               | 0,0115                               | 1,15               |
| 20                                          | 20,11                               | 0,0055                               | 0,55               |
| 21                                          | 21                                  | 0                                    | 0                  |
| 21                                          | 21,05                               | 0,00238095                           | 0,23809524         |
| 22                                          | 22,1                                | 0,00454545                           | 0,45454545         |
| 22                                          | 22,11                               | 0,005                                | 0,5                |
| 23                                          | 22,79                               | 0,00913043                           | 0,91304348         |
| 24                                          | 24,08                               | 0,00333333                           | 0,33333333         |
| 24                                          | 24,23                               | 0,00958333                           | 0,95833333         |

Tabla 21. Resultados obtenidos al hallar la exactitud del Sensor 2.

Fuente: Autor.

Al hallar el error de exactitud para el Sensor 2 los resultados se pueden apreciar en la Tabla 22.

|                                               |             |
|-----------------------------------------------|-------------|
| <i><math>\Delta</math> Exactitud(max)/FSC</i> | 0,009583333 |
| <i>%Exactitud</i>                             | 0,958333333 |

Tabla 22. Error de exactitud del Sensor 2.

Fuente: Autor.

Se puede concluir que el sensor tiene un error de linealidad alto pero un error de exactitud pequeño (0,958333333%). Por lo que su comportamiento es ideal para dar con exactitud el nivel del agua. Cabe resaltar que el Sensor 1 tiene una mejor respuesta que el Sensor 2. Se nota que los instrumentos reales a pesar de ser iguales sus comportamientos son distintos porque a pesar de ser teóricamente iguales en la práctica son distintos.

Las medidas tomadas con la regla fueron exactas porque al ser un modelo a escala y un ambiente controlado ningún factor las afecta, por esta razón no presento ningún porcentaje de error. Pero al hacerlo en una edificación interferirían más factores haciendo que el error de exactitud o el error de linealidad sean iguales o mayores a los que presentan los sensores. La mejor cualidad del sistema implementado es la no necesidad de un usuario para la toma de datos debido a que los toma sin retrasos y con precisión.

#### 10.4 PRESUPUESTO EJECUTADO

Al realizar una comparación entre el presupuesto propuesto para el proyecto y el ejecutado descrito en la Tabla 23. Se evidencian diferencias claras, desde las horas de ejecución del proyecto que afectaron los honorarios presupuestados, algunos de los equipos que se tuvieron que comprar o implementar debido a la cuarentena, además para disminuir costos algunos sensores se simularon en lugar de comprarlos.

| <i>Concepto</i>                                            | <i>Valor</i>          |                 |                     | <i>Financiación</i> |                   |
|------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------|---------------------|---------------------|-------------------|
|                                                            | <i>Valor Estimado</i> | <i>Cantidad</i> | <i>Total</i>        | <i>Universidad</i>  | <i>Estudiante</i> |
| <b>PERSONAL</b>                                            |                       |                 |                     |                     |                   |
| Honorarios de los estudiantes                              | \$877.802             | 12 (Meses)      | \$10.533.624        |                     | X                 |
| Honorarios del director                                    | \$4.389.017           | 12 (Meses)      | \$52.668.204        | X                   |                   |
| <b>EQUIPOS</b>                                             |                       |                 |                     |                     |                   |
| Fuente DC                                                  | \$100.000             | 1               | \$100.000           | X                   |                   |
| Multímetro                                                 | \$250.000             | 1               | \$250.000           |                     | X                 |
| Computador                                                 | \$2.000.000           | 2               | \$4.000.000         |                     | X                 |
| Pantalla o TV                                              | \$200.000             | 1               | \$200.000           | X                   |                   |
| <b>MATERIALES</b>                                          |                       |                 |                     |                     |                   |
| Sensores                                                   | \$80.000 a \$300.000  | 6               | \$598.000           |                     | X                 |
| Demás Elementos (Leds, pulsadores, conector, resistencias) | \$80.000              | 1               | \$361.100           |                     | X                 |
| Raspberry Pi 3 B+ Kit                                      | \$300.000             | 1               | \$300.000           |                     | X                 |
| Estructura Carcasa                                         | \$60.000              | 1               | \$60.000            |                     | X                 |
| Arduino Due                                                |                       |                 | \$78.000            |                     | X                 |
| Imprevistos y otros elementos                              | \$70.000              | 1               | \$221.454           |                     | X                 |
| <b>Total</b>                                               |                       |                 | <b>\$69.370.382</b> |                     |                   |

Tabla 23. Presupuesto ejecutado.

Fuente: Autor.

## **11. IMPACTO SOCIAL**

El presente proyecto permite combinar la ingeniería electrónica con la ingeniería civil para mejorar una actividad en esta última área. Además, busca promover en la comunidad Tomasina la intención de ejecución de proyectos con estrategias de emprendimiento. Puesto que la idea desarrollada en el proyecto, al día de hoy nadie más la ha implementado y como se planea ejecutar para el futuro se espera tener una gran rentabilidad.

Con un buen grupo combinado de ingenieros de distintas áreas, la instalación del Comparador hidrostático control de asentamiento podría convertirse accesible para todo tipo de personas, ayudando además a prevenir el asentamiento diferencial con el monitoreo constante de la estructura, puesto que se pretende disminuir el precio de instalación y además la interfaz es amigable con el usuario para que pueda manejarla de forma autónoma.

## 12. CONCLUSIONES

- Se implementó un sistema electrónico que calcula el asentamiento diferencial de una estructura por medio de un arreglo de sensores de nivel (eTape). De esta forma, integrando la Raspberry Pi 3 B+, los sensores y una pantalla se garantiza el monitoreo constante del asentamiento diferencial.
- Después de analizar todos los posibles tipos de sensores se pudo determinar que un acelerómetro que tenga una alta exactitud en la medición, corrección o minimización de sesgo y alta sensibilidad, puede resultar una mejor opción para el desarrollo, no por los datos mostrados sino por montajes y espacio, sin embargo, el costo de estos sensores es muy alto, además que faltó un lugar para hacer las pruebas de campo.
- Según el estudio de factibilidad, la inversión inicial del sistema implementado no es tan grande. A partir de esto, la inversión inicial es un costo que cualquier persona puede asumir.
- El desarrollo e implementación del sistema ha sido elaborado a pequeña escala; para realizar un despliegue mayor de esta herramienta no implica un desarrollo adicional sino un aumento de recursos que facilite la adquisición de más sensores y la posibilidad de acceder a servidores web, entre otros servicios que mejoren el sistema.
- Se aprovechó el principio de vasos comunicantes utilizado convencionalmente, el proyecto es viable, ya que se logra automatizar la forma como se reciben los datos, evitando errores humanos y gastos adicionales en mano de obra.

### **13. TRABAJO FUTURO**

Como trabajo futuro para este proyecto, se sugiere modificar tanto el hardware como el software como agregar más sensores (según el número de puntos de control requeridos para cada estructura) además de poder conectar el sistema a un punto de red ya sea de manera alámbrica o inalámbrica, para que el usuario lo pueda monitorear de manera remota, además de la posibilidad de crear uno o varios perfiles, cada uno con diferentes niveles de permisos para que varias personas puedan acceder a la información de la aplicación.

Así mismo, se busca implementar mejoras en el hardware del proyecto como agregar una cámara. Para que se pueda ver el estado del edificio, ya sea porque se tiene una falla estructural o por una alarma que se activó por un asentamiento diferencial excesivo.

Por último, en un plazo mayor, el gran objetivo es crear una empresa que pueda suministrar los servicios necesarios para controlar y corregir el asentamiento diferencial de las estructuras.

## 14. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gobierno Nacional, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, «NSR-10, Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente,» 2i5, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Bogotá D.C., 2010.
- [2] P. A. Veloza Velandia y A. M. Velandia Torres, «Análisis del comportamiento del suelo de cimentación de edificaciones pequeñas, sometidas a incrementos de esfuerzos generados por contrucciones vecinas de mayor tamaño,» Bogotá, 2016.
- [3] concepto.de, 2021. [En línea]. Available: <https://concepto.de/dato/>.
- [4] El viceministro de vivienda y construcción y el servicio nacional de capacitacion para la industria de la construcción SENCICO, «Norma E.050 Reglamento nacional de construcciones. Suelos y cimentaciones,» Lima, Peru, 1997.
- [5] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, «NORMA E.50 SUELOS Y CIMENTACIONES,» 1997. [En línea]. Available: <http://www.jorgealvahurtado.com/files/N.T.E.%20E%20050%20-%20Suelos%20y%20Cimentaciones.pdf>.
- [6] «panamahitek,» 12 febrero 2015. [En línea]. Available: <http://panamahitek.com/acelerometros-de-3-ejes-lo-que-necesitas-saber/>.
- [7] EcuRed, «Hormigón armado,» EcuRed, [En línea]. Available: [https://www.ecured.cu/Hormig%C3%B3n\\_armado#Hormig.C3.B3n](https://www.ecured.cu/Hormig%C3%B3n_armado#Hormig.C3.B3n).
- [8] concepto.de, [En línea]. Available: <https://concepto.de/programacion/>. [Último acceso: 2021].
- [9] Desarrolloweb, [En línea]. Available: <https://desarrolloweb.com/articulos/1325.php>. [Último acceso: 2021].
- [10] raspberrypi, «raspberrypi,» [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.org/>.
- [11] «RAE,» 2020. [En línea]. Available: <https://dle.rae.es/sensor>.
- [12] F. P. Ángel, «Cerca del 60 % de Bogotá está construido sobre humedales,» *RCN Radio*, 18 Febrero 2016.
- [13] Agencia de Noticias Universidad Nacional de Colombia, «Suelos arcillosos de Bogotá, proclives al hundimiento,» *Universia*, 10 Septiembre 2012.
- [14] L. F. Orozco, «Asentamientos totales y diferenciales en Bogotá - recuperación de la verticalidad de edificios,» Bogotá D.C., 2011.
- [15] B. F. y. Pérez, Curso elemental de Física experimental y aplicada y nociones de química inorgánica, Barcelona: Imprenta de Jaime jepús, 1886, p. 89.
- [16] A. V. Otero, «Tema IV cimentaciones,» España, 2010.
- [17] Dokumen, «Asentamiento diferencial de estructuras,» [En línea]. Available: <https://dokumen.tips/documents/asentamiento-diferencial-de-estructurasdocx.html>. [Último acceso: 17 Mayo 2020].
- [18] dewesoft, «<https://dewesoft.com/es/daq/que-es-un-sensor#accelerometers>,» [En

- línea]. [Último acceso: 2021].
- [19] Dewesoft, «Qué es un sensor y Qué hace?,» 08 03 2020. [En línea]. Available: <https://dewesoft.com/es/daq/que-es-un-sensor#what-do-sensors-do>.
  - [20] flintec, [En línea]. Available: <https://www.flintec.com/co/sensores-de-peso/celdas-de-carga/galgas-extensiométricas>. [Último acceso: 2021].
  - [21] omega, «omega,» [En línea]. Available: <https://es.omega.com/prodinfo/sondas-de-nivel-medicion.html>. [Último acceso: 2021].
  - [22] Scidle Science and technology, «Scidle Science and technology,» [En línea]. Available: <https://scidle.com/es/como-usar-sensor-de-nivel-de-agua-con-arduino/>. [Último acceso: 2021].
  - [23] Lucky's notes, «Tag: Euler Angles-Visualizing Quarternions with Unity,» Lucky's notes, 24 noviembre 2014. [En línea]. Available: <https://luckytoilet.wordpress.com/tag/euler-angles/>.
  - [24] Pololu, «Pololu,» Pololu, [En línea]. Available: <https://www.pololu.com/product/2739>.
  - [25] D. kevin-pololu, «GitHub,» 08 03 2017. [En línea]. Available: <https://github.com/pololu/lsm6-arduino>.
  - [26] STlife.augmented, *LSM6DS33, Datasheet - production data. iNEMO inertial module: always-on 3D accelerometer and 3D gyroscope*, 2015.
  - [27] ALLDATASHEET, «ALLDATASHEET Analog Devices,» 2006. [En línea]. Available: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/166611/AD/ADXL204/24/1/ADXL204.html>.
  - [28] H. Charte, «Daily activity monitoring using an inertial measrement unit,» Sergio Bermejo, 2014.
  - [29] HBM, «El circuito de puente de Wheatstone,» HBM, [En línea]. Available: <https://www.hbm.com/es/7163/el-puente-de-wheatstone-galgas-extensométricas/>. [Último acceso: 2020].
  - [30] Ferretrónica, «Celda de Carga 50Kg Sensor de Peso,» Ferretrónica, [En línea]. Available: <https://ferretronica.com/products/celda-de-carga-50kg-sensor-de-peso>. [Último acceso: 2020].
  - [31] Adeept, Adeept, 4 enero 2019. [En línea]. Available: [https://wiki.adeept.com/pub:cm\\_water\\_level\\_sensor\\_module](https://wiki.adeept.com/pub:cm_water_level_sensor_module). [Último acceso: 2020].
  - [32] E. F. F. García, «Evaluación del funcionamiento y análisis de linealidad del sistema ultrasónico OPCARD - 01/100 mediante la norma ASTM E797,» Universidad Santo Tomás, Bogotá, 2019.
  - [33] Milone technologies, «Continuous fluid level sensor PN-12110215TC-X».
  - [34] Universidad De Mendoza, «Cimentaciones,» Universidad De Mendoza, [En línea]. Available: <http://www.um.edu.ar/um/fau/estructura5-anterior/CIMENTACIONES.htm>.
  - [35] Geologíaweb, «Geologíaweb,» [En línea]. Available:

<https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/cimentaciones-superficiales/>. [Último acceso: 17 Mayo 2020].

- [36] Geotecnia Fácil, «Tipos cimentaciones superficiales o directas: Zapatas, losas y pozos de cimentación,» Geotécnia Fácil, [En línea]. Available: [http://geotecniafacil.com/tipos-cimentaciones-superficiales-o-directas/#Pozos\\_de\\_cimentacion](http://geotecniafacil.com/tipos-cimentaciones-superficiales-o-directas/#Pozos_de_cimentacion). [Último acceso: 26 mayo 2020].
- [37] Rechner sensors, [En línea]. Available: <https://www.rechner-sensors.com/es/documentacion/knowledge/el-sensor-de-nivel>.
- [38] Raspberrypi, [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberrypi-3-model-b-plus/>. [Último acceso: 2021].

## 15. ANEXOS

Anexo 1. Código Arduino para mostrar datos del acelerómetro y giroscopio.

Fuente: Autor.

```
#include <Wire.h> // libreria utilizada para comunicacion I2C
#include <LSM6.h> // con esto controlamos el LSM6DS33

LSM6 imu;// declara objeto IMU como LSM6

char report[80];// arreglo para acumular trama de datos

void setup()
{
  Serial.begin(9600);// incia comunicacion serial
  Wire.begin();// inicia comunicacion I2C

  if (!imu.init())// pregunta si hay datos en el IMU
  {
    Serial.println("Failed to detect and initialize IMU!");
    while (1);
  }
  imu.enableDefault();
}

void loop()
{
  imu.read();

  snprintf(report, sizeof(report), "A: %6d %6d %6d    G: %6d %6d %6d",
    imu.a.x, imu.a.y, imu.a.z,
    imu.g.x, imu.g.y, imu.g.z);
  Serial.println(report);// muestra los datos a de Aceleracion y Grados tabulados

  delay(700);// espera 700ms para volver a mostrar datos
}
```

Anexo 2. Código Arduino para conocer el peso que se le esta aplicando a la celda de carga SEN-1025.

Fuente: Autor.

```
#include "HX711.h" // libreria

// Pin de datos y de reloj
byte pinData = 3;
byte pinClk = 2;

HX711 bascula;
// Parámetro para calibrar el peso y el sensor
float factor_calibracion = 20780.0; //Este valor del factor de calibración funciona

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("HX711 programa de calibracion");
  Serial.println("Quita cualquier peso de la bascula");
  Serial.println("Una vez empiece a mostrar informacion de medidas, coloca un peso conocido encima de la bascula");
  Serial.println("Presiona + para incrementar el factor de calibracion");
  Serial.println("Presiona - para disminuir el factor de calibracion");

  //iniciar sensor
  bascula.begin(pinData, pinClk);

  //Aplicar calibracion
  bascula.set_scale();

  //iniciar la tarea no debe haber peso en el sensor
  bascula.tare();

  // Obtener una lectura de referencia
  long zero_factor = bascula.read_average();
  // Mostrar la primera desviación
  Serial.println("zero_factor:");
  Serial.println(zero_factor);
}

void loop() {

  //Aplicar calibracion
  bascula.set_scale(factor_calibracion);

  // Mostrar la información para ajustar el factor de calibración
  Serial.print("Leyendo: ");
  Serial.print(bascula.get_units(), 1);
  Serial.print(" kgs");
  Serial.print(" factor_calibracion: ");
  Serial.print(factor_calibracion);
  Serial.println();

  // Obtener información desde el monitor serie

  if (Serial.available())
  {
    char temp = Serial.read();
    if (temp == '+')
      factor_calibracion += 10;
    else if (temp == '-')
      factor_calibracion -= 10;
  }
}
```

Anexo 3. Tabulación de datos divisor de voltaje sensor de nivel eTape.

Fuente: Autor.

| <i>Altura (cm)</i> | <i>Altura (Pulgadas)</i> | <i>V<sub>out</sub> (V)</i> | <i>R<sub>sense</sub> (Ω)</i> |
|--------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 0,5                | 0,19685                  | 2,49                       | 2.579                        |
| 1                  | 0,3937                   | 2,49                       | 2.579                        |
| 1,7                | 0,66929                  | 2,52                       | 2.642                        |
| 2                  | 0,7874                   | 2,52                       | 2.642                        |
| 2,5                | 0,98425                  | 2,5                        | 2.600                        |
| 3                  | 1,1811                   | 2,5                        | 2.600                        |
| 3,5                | 1,37795                  | 2,47                       | 2.538                        |
| 4                  | 1,5748                   | 2,45                       | 2.498                        |
| 4,5                | 1,77165                  | 2,45                       | 2.498                        |
| 5                  | 1,9685                   | 2,42                       | 2.439                        |
| 5,5                | 2,16535                  | 2,4                        | 2.400                        |
| 6                  | 2,3622                   | 2,38                       | 2.362                        |
| 6,6                | 2,59842                  | 2,38                       | 2.362                        |
| 7                  | 2,7559                   | 2,37                       | 2.343                        |
| 7,5                | 2,95275                  | 2,35                       | 2.306                        |
| 8                  | 3,1496                   | 2,31                       | 2.233                        |
| 8,5                | 3,34645                  | 2,31                       | 2.233                        |
| 9                  | 3,5433                   | 2,3                        | 2.215                        |
| 9,5                | 3,74015                  | 2,29                       | 2.197                        |
| 10                 | 3,937                    | 2,26                       | 2.145                        |
| 10,5               | 4,13385                  | 2,25                       | 2.127                        |
| 11                 | 4,3307                   | 2,25                       | 2.127                        |
| 11,5               | 4,52755                  | 2,22                       | 2.076                        |
| 12                 | 4,7244                   | 2,21                       | 2.059                        |
| 12,5               | 4,92125                  | 2,2                        | 2.043                        |
| 13                 | 5,1181                   | 2,18                       | 2.010                        |
| 13,5               | 5,31495                  | 2,17                       | 1.994                        |
| 14                 | 5,5118                   | 2,15                       | 1.961                        |
| 14,5               | 5,70865                  | 2,13                       | 1.930                        |
| 15                 | 5,9055                   | 2,13                       | 1.930                        |
| 15,6               | 6,14172                  | 2,11                       | 1.898                        |
| 16                 | 6,2992                   | 2,1                        | 1.883                        |
| 16,5               | 6,49605                  | 2,09                       | 1.867                        |
| 17                 | 6,6929                   | 2,06                       | 1.822                        |
| 17,5               | 6,88975                  | 2,04                       | 1.792                        |

|      |          |      |       |
|------|----------|------|-------|
| 18   | 7,0866   | 2,03 | 1.777 |
| 18,5 | 7,28345  | 2,01 | 1.748 |
| 19   | 7,4803   | 1,97 | 1.690 |
| 19,6 | 7,71652  | 1,96 | 1.676 |
| 20   | 7,874    | 1,93 | 1.635 |
| 20,5 | 8,07085  | 1,92 | 1.621 |
| 21   | 8,2677   | 1,87 | 1.553 |
| 21,5 | 8,46455  | 1,85 | 1.527 |
| 22   | 8,6614   | 1,83 | 1.501 |
| 22,5 | 8,85825  | 1,79 | 1.450 |
| 23,1 | 9,09447  | 1,77 | 1.425 |
| 23,5 | 9,25195  | 1,75 | 1.400 |
| 24   | 9,4488   | 1,73 | 1.376 |
| 24,5 | 9,64565  | 1,71 | 1.351 |
| 25   | 9,8425   | 1,67 | 1.304 |
| 25,5 | 10,03935 | 1,64 | 1.269 |
| 26   | 10,2362  | 1,6  | 1.224 |
| 26,5 | 10,43305 | 1,6  | 1.224 |
| 27   | 10,6299  | 1,58 | 1.201 |
| 27,5 | 10,82675 | 1,52 | 1.136 |
| 28   | 11,0236  | 1,5  | 1.114 |
| 28,5 | 11,22045 | 1,45 | 1.062 |
| 29   | 11,4173  | 1,43 | 1.041 |
| 29,5 | 11,61415 | 1,42 | 1.031 |
| 30   | 11,811   | 1,36 | 971   |
| 30,6 | 12,04722 | 1,35 | 962   |
| 31   | 12,2047  | 1,31 | 923   |

Anexo 4. Tabulación de datos puente de wheatstone sensor de nivel eTape.

Fuente: Autor.

| <i>Altura (cm)</i> | <i>Altura (Pulgadas)</i> | <i>V<sub>out</sub> (V)</i> | <i>R<sub>sense</sub> (Ω)</i> |
|--------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|
| 0,5                | 0,19685                  | 0,0508                     | 2.472,97                     |
| 1                  | 0,3937                   | 0,0514                     | 2.471,53                     |
| 1,7                | 0,66929                  | 0,0511                     | 2.472,25                     |
| 2                  | 0,7874                   | 0,0512                     | 2.472,01                     |
| 2,5                | 0,98425                  | 0,0514                     | 2.471,53                     |
| 3                  | 1,1811                   | 0,0516                     | 2.471,04                     |
| 3,5                | 1,37795                  | 0,0603                     | 2.450,21                     |
| 4                  | 1,5748                   | 0,0807                     | 2.402,31                     |
| 4,5                | 1,77165                  | 0,103                      | 2.351,46                     |
| 5                  | 1,9685                   | 0,1161                     | 2.322,28                     |
| 5,5                | 2,16535                  | 0,1308                     | 2.290,15                     |
| 6                  | 2,3622                   | 0,1385                     | 2.273,56                     |
| 6,6                | 2,59842                  | 0,1469                     | 2.255,66                     |
| 7                  | 2,7559                   | 0,1667                     | 2.214,22                     |
| 7,5                | 2,95275                  | 0,1715                     | 2.204,33                     |
| 8                  | 3,1496                   | 0,1999                     | 2.147,05                     |
| 8,5                | 3,34645                  | 0,212                      | 2.123,26                     |
| 9                  | 3,5433                   | 0,214                      | 2.119,37                     |
| 9,5                | 3,74015                  | 0,234                      | 2.080,93                     |
| 10                 | 3,937                    | 0,247                      | 2.056,44                     |
| 10,5               | 4,13385                  | 0,252                      | 2.047,13                     |
| 11                 | 4,3307                   | 0,27                       | 2.014,07                     |
| 11,5               | 4,52755                  | 0,288                      | 1.981,71                     |
| 12                 | 4,7244                   | 0,295                      | 1.969,32                     |
| 12,5               | 4,92125                  | 0,305                      | 1.951,79                     |
| 13                 | 5,1181                   | 0,319                      | 1.927,59                     |
| 13,5               | 5,31495                  | 0,329                      | 1.910,55                     |
| 14                 | 5,5118                   | 0,345                      | 1.883,69                     |
| 14,5               | 5,70865                  | 0,367                      | 1.847,56                     |

|      |          |       |          |
|------|----------|-------|----------|
| 15   | 5,9055   | 0,378 | 1.829,83 |
| 15,6 | 6,14172  | 0,398 | 1.798,16 |
| 16   | 6,2992   | 0,416 | 1.770,25 |
| 16,5 | 6,49605  | 0,43  | 1.748,93 |
| 17   | 6,6929   | 0,443 | 1.729,42 |
| 17,5 | 6,88975  | 0,467 | 1.694,13 |
| 18   | 7,0866   | 0,474 | 1.684,00 |
| 18,5 | 7,28345  | 0,507 | 1.637,29 |
| 19   | 7,4803   | 0,528 | 1.608,39 |
| 19,6 | 7,71652  | 0,551 | 1.577,47 |
| 20   | 7,874    | 0,573 | 1.548,56 |
| 20,5 | 8,07085  | 0,594 | 1.521,57 |
| 21   | 8,2677   | 0,611 | 1.500,14 |
| 21,5 | 8,46455  | 0,632 | 1.474,16 |
| 22   | 8,6614   | 0,65  | 1.452,32 |
| 22,5 | 8,85825  | 0,691 | 1.403,97 |
| 23,1 | 9,09447  | 0,717 | 1.374,29 |
| 23,5 | 9,25195  | 0,742 | 1.346,44 |
| 24   | 9,4488   | 0,769 | 1.317,08 |
| 24,5 | 9,64565  | 0,794 | 1.290,54 |
| 25   | 9,8425   | 0,826 | 1.257,45 |
| 25,5 | 10,03935 | 0,868 | 1.215,44 |
| 26   | 10,2362  | 0,907 | 1.177,81 |
| 26,5 | 10,43305 | 0,913 | 1.172,13 |
| 27   | 10,6299  | 0,916 | 1.169,30 |
| 27,5 | 10,82675 | 1,017 | 1.078,23 |
| 28   | 11,0236  | 1,032 | 1.065,36 |
| 28,5 | 11,22045 | 1,093 | 1.014,59 |
| 29   | 11,4173  | 1,103 | 1.006,51 |
| 29,5 | 11,61415 | 1,137 | 979,5    |
| 30   | 11,811   | 1,232 | 907,75   |
| 30,6 | 12,04722 | 1,25  | 894,74   |
| 31   | 12,2047  | 1,256 | 890,44   |

## Anexo 5. Código Raspberry Pi 3 B+ para sensores de nivel eTape comparador hidrostático control de asentamiento

Fuente: Autor.

```
##Proyecto de grado

from re import split

from numpy import*

from openpyxl import Workbook

from tkinter import*

import matplotlib.pyplot as plt

import serial #se importa una libreria estandar para poder usar el puerto serial

import time

import datetime

import pyautogui as pg

import webbrowser as web


#Variables

#se crea el libro de trabajo de excel

wb = Workbook()


#se activa el libro de trabajo de excel y se almacena en ws

ws = wb.active
```

```
# Inicialización Tabla de Excel
```

```
ws['A1'] = 'Fecha'
```

```
ws['B1'] = 'Sensor 1'
```

```
ws['C1'] = 'Sensor 2'
```

```
ws['D1'] = 'Asentamiento Diferencial'
```

```
ws.column_dimensions['A'].width = 20
```

```
ws.column_dimensions['D'].width = 20
```

```
Rref1 = 2725.25
```

```
Rref2 = 2532.818182
```

```
Vin = 5.0
```

```
ns = 2 # son 2 sensores
```

```
contador =0
```

```
x = []
```

```
y1 = []
```

```
y2 = []
```

```
lcm1 =0
```

```
lcm2 =0
```

```
#Niveles del agua para hallar ec recta S1 cm
```

```
NivelaguaS1p1 = 16.0
```

NivelaguaS1p2 = 22.0

#Niveles del agua para hallar ec recta S2 cm

NivelaguaS2p1 = 16.0

NivelaguaS2p2 = 22.0

#variables del mensaje de alerta

phone\_no="+57númerodecontacto"

parsedMessage="¡¡¡ALERTA!!! El asentamiento diferencial que presenta la estructura  
supero el valor máximo calculado"

# se hallan las resistencias para voltajes medidos en el punto 1 y punto2 pulgadas de cada  
sensor

ResistenciaS1p1 = (Rref1\*2.44)/(Vin-2.44)# voltajes tomados en 16cm para sensor1

ResistenciaS1p2 = (Rref1\*2.19)/(Vin-2.19)# voltajes tomados en 22cm para sensor1

ResistenciaS2p1 = (Rref2\*2.95)/(Vin-2.95)# voltajes tomados en 16cm para sensor2

ResistenciaS2p2 = (Rref2\*2.77)/(Vin-2.77)# voltajes tomados en 22cm para sensor2

#Se inicia la ventana principal

Vprincipal = Tk()

Vprincipal.title("Proyecto de Grado")

```

Vprincipal.geometry('927x693')

Universidad = PhotoImage(file="Imagen 1.png")

Fondo = Label(Vprincipal, image=Universidad)

Fondo.place(x=0,y=0,relwidth=1, relheight=1)

Vprincipal.focus_set()# provoca que la ventana tome el focus

```

```

#Inicia el proceso general del programa

```

```

arduino = serial.Serial("/dev/ttyACM0", baudrate=115200)

```

```

while True:

```

```

    for nsensor in range(0,ns): #nsensor es el que cambia su valor en cada iteracion

```

```

        if (nsensor == 0): #sensor1

```

```

            sensor1 = arduino.readline()#lee datos de arduino

```

```

            valor1 = sensor1.decode()#se decodifica

```

```

            valors1 = int(valor1)

```

```

            fvalor1 = float(valors1)

```

```

            vout1 = fvalor1*(Vin/1023.0)#se pone en voltios, se pone 4096 para que no llege

```

```

a vin y salga error

```

```

            Rsense1 = ((Rref1*vout1)/(Vin-vout1)) #Rsense para divisor de voltaje

```

```
lcm1 = (NivelaguaS1p1*Rsense1-NivelaguaS1p2*Rsense1-
NivelaguaS1p1*ResistenciaS1p2+NivelaguaS1p2*ResistenciaS1p1)/(ResistenciaS1p1-
ResistenciaS1p2)
```

```
linch1 = lcm1*(0.393701)
```

```
print("Valor obtenido del arduino sensor1: ",sensor1)
```

```
print("Valor decodificado arduino sensor1: ",valor1)
```

```
print("Vout del sensor1: ",vout1)
```

```
print("Resistencia del sensor1: ",Rsense1)
```

```
print("Nivel del agua punto de control1(Inch): ",linch1)
```

```
print("Nivel del agua punto de control1(Cm): ",lcm1)
```

```
print("\n")
```

```
#time.sleep(3)
```

```
nsensor = 1
```

```
else:
```

```
sensor2 = arduino.readline()#lee datos de arduino
```

```
valor2 = sensor2.decode()#se decodifica
```

```
valors2 = int(valor2)
```

```
fvalor2 = float(valors2)
```

$vout2 = fvalor2 * (Vin/1023.0)$  #se pone en voltios, se pone 4096 para que no llege a 3.3 y salga error

$Rsense2 = ((Rref2 * vout2) / (Vin - vout2))$  #Rsense para divisor de voltaje

$lcm2 = (NivelaguaS2p1 * Rsense2 - NivelaguaS2p2 * Rsense2 -$   
 $NivelaguaS2p1 * ResistenciaS2p2 + NivelaguaS2p2 * ResistenciaS2p1) / (ResistenciaS2p1 -$   
 $ResistenciaS2p2)$

$linch2 = lcm2 * (0.393701)$

```
print("Valor obtenido del arduino sensor2: ",sensor2)
print("Valor decodificado arduino sensor2: ",valor2)
print("Vout del sensor2: ",vout2)
print("Resistencia del sensor2: ",Rsense2)
print("Nivel del agua punto de control2(Inch): ",linch2)
print("Nivel del agua punto de control2(Cm): ",lcm2)
print("\n")
#se grafican las salidas de los sensores
x.append(contador)
y1.append(lcm1)
plt.subplot(1, 2, 1)
plt.title("Comparador hidrostático")
plt.xlabel("Cantidad de muestras")
plt.ylabel("Nivel del agua (cm) punto de control 1")
```

```

plt.plot(x,y1)

y2.append(lcm2)

plt.subplot(1, 2, 2)

plt.title("con arreglo de sensores")

plt.xlabel("Cantidad de muestras")

plt.ylabel("Nivel del agua (cm) punto de control 2")

plt.plot(x,y2)

#se halla asentamiento diferencial

Asentamiendodif = abs(lcm1-lcm2)

ws.append([datetime.datetime.now(), lcm1, lcm2,Asentamiendodif])

plt.pause(0.05)

contador = contador + 1

plt.cla()#limpia grafica temporalmente para que se vea la animacion

nsensor = 0

wb.save("Historial de datos.xlsx") #guarda el espacio de trabajo bajo el nombre
de sample

#se genera mensaje de alerta

if(Asentamiendodif > 5):

web.open('https://web.whatsapp.com/send?phone='+phone_no+'&text='+parsedMessage)

time.sleep(15)

for i in range(8):

```

```
pg.press('enter')  
  
time.sleep(2)  
  
pass  
  
pg.alert('Alerta enviada al contacto de emergencia')  
  
arduino.close()
```

Anexo 6. Tabla de datos del archivo de Excel: Historial de datos.xlsx.

Fuente: Autor.

| <i>Fecha</i>       | <i>Sensor 1</i> | <i>Sensor 2</i> | <i>Asentamiento<br/>Diferencial</i> |
|--------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------------|
| 2021-03-02 7:15:31 | 17,66076        | 21,96134        | 4,300580624                         |
| 2021-03-02 7:15:33 | 17,66076        | 21,66014        | 3,999382406                         |
| 2021-03-02 7:15:33 | 17,66076        | 21,96134        | 4,300580624                         |
| 2021-03-02 7:15:34 | 17,78302        | 21,81107        | 4,028046251                         |
| 2021-03-02 7:15:35 | 17,78302        | 21,96134        | 4,178314374                         |
| 2021-03-02 7:15:35 | 17,78302        | 21,66014        | 3,877116155                         |
| 2021-03-02 7:15:36 | 17,78302        | 21,81107        | 4,028046251                         |
| 2021-03-02 7:15:37 | 17,78302        | 21,81107        | 4,028046251                         |
| 2021-03-02 7:15:37 | 17,78302        | 21,66014        | 3,877116155                         |
| 2021-03-02 7:15:38 | 17,66076        | 21,66014        | 3,999382406                         |
| 2021-03-02 7:15:39 | 17,78302        | 21,66014        | 3,877116155                         |
| 2021-03-02 7:15:39 | 17,78302        | 21,81107        | 4,028046251                         |
| 2021-03-02 7:15:40 | 17,78302        | 21,66014        | 3,877116155                         |
| 2021-03-02 7:15:41 | 17,66076        | 21,66014        | 3,999382406                         |
| 2021-03-02 7:15:41 | 17,78302        | 21,96134        | 4,178314374                         |
| 2021-03-02 7:15:42 | 17,66076        | 21,81107        | 4,150312502                         |
| 2021-03-02 7:15:42 | 17,78302        | 21,66014        | 3,877116155                         |
| 2021-03-02 7:15:43 | 17,66076        | 21,81107        | 4,150312502                         |
| 2021-03-02 7:15:43 | 17,66076        | 21,81107        | 4,150312502                         |
| 2021-03-02 7:15:44 | 17,78302        | 21,81107        | 4,028046251                         |
| 2021-03-02 7:15:45 | 17,78302        | 21,81107        | 4,028046251                         |
| 2021-03-02 7:15:45 | 17,66076        | 21,81107        | 4,150312502                         |
| 2021-03-02 7:15:46 | 17,66076        | 21,81107        | 4,150312502                         |
| 2021-03-02 7:15:47 | 17,78302        | 21,81107        | 4,028046251                         |
| 2021-03-02 7:15:47 | 17,66076        | 21,81107        | 4,150312502                         |
| 2021-03-02 7:15:48 | 17,66076        | 21,66014        | 3,999382406                         |
| 2021-03-02 7:15:49 | 17,78302        | 21,81107        | 4,028046251                         |
| 2021-03-02 7:15:49 | 17,78302        | 21,66014        | 3,877116155                         |
| 2021-03-02 7:15:50 | 17,78302        | 21,81107        | 4,028046251                         |
| 2021-03-02 7:15:50 | 17,66076        | 21,66014        | 3,999382406                         |
| 2021-03-02 7:15:51 | 17,66076        | 21,96134        | 4,300580624                         |
| 2021-03-02 7:15:52 | 17,66076        | 21,81107        | 4,150312502                         |
| 2021-03-02 7:15:53 | 17,66076        | 21,66014        | 3,999382406                         |
| 2021-03-02 7:15:53 | 17,66076        | 21,81107        | 4,150312502                         |
| 2021-03-02 7:15:54 | 17,66076        | 21,81107        | 4,150312502                         |

|                    |          |          |             |
|--------------------|----------|----------|-------------|
| 2021-03-02 7:15:55 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:15:56 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:15:56 | 17,66076 | 21,66014 | 3,999382406 |
| 2021-03-02 7:15:57 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:15:58 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:15:59 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:00 | 17,53803 | 21,81107 | 4,27303497  |
| 2021-03-02 7:16:00 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:16:01 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:02 | 17,66076 | 21,66014 | 3,999382406 |
| 2021-03-02 7:16:02 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:16:03 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:04 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:05 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:05 | 17,66076 | 21,96134 | 4,300580624 |
| 2021-03-02 7:16:06 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:16:07 | 17,66076 | 21,66014 | 3,999382406 |
| 2021-03-02 7:16:08 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:16:08 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:10 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:11 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:16:12 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:13 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:14 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:15 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:16:15 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:16 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:16:17 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:16:18 | 17,66076 | 21,96134 | 4,300580624 |
| 2021-03-02 7:16:19 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:16:20 | 17,66076 | 21,96134 | 4,300580624 |
| 2021-03-02 7:16:21 | 17,66076 | 21,66014 | 3,999382406 |
| 2021-03-02 7:16:22 | 17,66076 | 21,66014 | 3,999382406 |
| 2021-03-02 7:16:23 | 17,66076 | 21,96134 | 4,300580624 |
| 2021-03-02 7:16:24 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:24 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:16:25 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:16:26 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:27 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |

|                    |          |          |             |
|--------------------|----------|----------|-------------|
| 2021-03-02 7:16:28 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:29 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:30 | 17,66076 | 21,66014 | 3,999382406 |
| 2021-03-02 7:16:31 | 17,66076 | 21,66014 | 3,999382406 |
| 2021-03-02 7:16:32 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:33 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:34 | 17,66076 | 21,96134 | 4,300580624 |
| 2021-03-02 7:16:35 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:16:36 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:37 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:16:38 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:16:39 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:16:40 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:41 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:16:42 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:16:43 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:16:44 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:45 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:16:46 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:47 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:16:49 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:16:50 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:16:51 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:16:52 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:16:53 | 17,66076 | 21,66014 | 3,999382406 |
| 2021-03-02 7:16:54 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:56 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:16:57 | 17,66076 | 21,96134 | 4,300580624 |
| 2021-03-02 7:16:58 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:16:59 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:17:00 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:17:02 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:17:03 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:17:04 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:17:05 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:17:06 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:17:08 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:17:09 | 17,66076 | 21,96134 | 4,300580624 |
| 2021-03-02 7:17:10 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |

|                    |          |          |             |
|--------------------|----------|----------|-------------|
| 2021-03-02 7:17:11 | 17,90484 | 21,66014 | 3,755303582 |
| 2021-03-02 7:17:12 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:17:13 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:17:15 | 17,66076 | 21,96134 | 4,300580624 |
| 2021-03-02 7:17:16 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:17:17 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:17:18 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:17:20 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:17:21 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:17:22 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:17:24 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:17:25 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:17:26 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:17:28 | 17,66076 | 21,66014 | 3,999382406 |
| 2021-03-02 7:17:29 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:17:30 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:17:32 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:17:33 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:17:35 | 17,66076 | 21,66014 | 3,999382406 |
| 2021-03-02 7:17:36 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:17:38 | 17,90484 | 21,66014 | 3,755303582 |
| 2021-03-02 7:17:39 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:17:41 | 17,53803 | 21,81107 | 4,27303497  |
| 2021-03-02 7:17:42 | 17,66076 | 21,96134 | 4,300580624 |
| 2021-03-02 7:17:44 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:17:45 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:17:47 | 17,66076 | 21,50854 | 3,847785951 |
| 2021-03-02 7:17:48 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:17:50 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:17:51 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:17:53 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:17:54 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:17:56 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:17:58 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:18:00 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:18:01 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:18:03 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:18:05 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:18:06 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |

|                    |          |          |             |
|--------------------|----------|----------|-------------|
| 2021-03-02 7:18:08 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:18:10 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:18:11 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:18:13 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:18:14 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:18:16 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:18:18 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:18:19 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:18:21 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:18:23 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:18:24 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:18:26 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:18:28 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:18:30 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:18:31 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:18:33 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:18:35 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:18:37 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:18:38 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:18:40 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:18:42 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:18:43 | 17,90484 | 22,11095 | 4,206112295 |
| 2021-03-02 7:18:45 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:18:47 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:18:49 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:18:50 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:18:52 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:18:54 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:18:56 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:18:58 | 17,66076 | 21,66014 | 3,999382406 |
| 2021-03-02 7:19:00 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:19:01 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:19:03 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:19:05 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:19:07 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:19:09 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:19:11 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:19:13 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:19:15 | 17,90484 | 21,66014 | 3,755303582 |

|                    |          |          |             |
|--------------------|----------|----------|-------------|
| 2021-03-02 7:19:17 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:19:19 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:19:21 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:19:23 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:19:25 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:19:27 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:19:29 | 17,90484 | 21,66014 | 3,755303582 |
| 2021-03-02 7:19:31 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:19:33 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:19:35 | 17,66076 | 21,66014 | 3,999382406 |
| 2021-03-02 7:19:37 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:19:39 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:19:41 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:19:44 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:19:46 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:19:48 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:19:50 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:19:53 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:19:55 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:19:57 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:19:59 | 18,0262  | 21,66014 | 3,633942167 |
| 2021-03-02 7:20:01 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:20:03 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:20:05 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:20:06 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:20:09 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:20:10 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:20:12 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:20:14 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:20:16 | 18,0262  | 21,66014 | 3,633942167 |
| 2021-03-02 7:20:18 | 17,66076 | 21,96134 | 4,300580624 |
| 2021-03-02 7:20:20 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:20:22 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:20:24 | 17,90484 | 21,96134 | 4,056501801 |
| 2021-03-02 7:20:26 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:20:28 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:20:30 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:20:32 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:20:34 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |

|                    |          |          |             |
|--------------------|----------|----------|-------------|
| 2021-03-02 7:20:36 | 17,78302 | 21,50854 | 3,725519701 |
| 2021-03-02 7:20:38 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:20:40 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:20:42 | 17,90484 | 21,66014 | 3,755303582 |
| 2021-03-02 7:20:44 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:20:46 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:20:48 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:20:50 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:20:52 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:20:54 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:20:57 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:20:59 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:21:01 | 17,66076 | 21,66014 | 3,999382406 |
| 2021-03-02 7:21:03 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:21:05 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:21:07 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:21:10 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:21:12 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:21:14 | 17,90484 | 21,66014 | 3,755303582 |
| 2021-03-02 7:21:16 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:21:18 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:21:21 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:21:23 | 17,66076 | 21,96134 | 4,300580624 |
| 2021-03-02 7:21:25 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:21:27 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:21:30 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:21:33 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:21:36 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:21:39 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:21:41 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:21:44 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:21:47 | 17,66076 | 21,96134 | 4,300580624 |
| 2021-03-02 7:21:50 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:21:53 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:21:56 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:21:59 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:22:02 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:22:05 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:22:08 | 18,14711 | 21,81107 | 3,663959505 |

|                    |          |          |             |
|--------------------|----------|----------|-------------|
| 2021-03-02 7:22:11 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:22:13 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:22:16 | 17,78302 | 21,66014 | 3,877116155 |
| 2021-03-02 7:22:19 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:22:21 | 17,66076 | 21,66014 | 3,999382406 |
| 2021-03-02 7:22:24 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:22:26 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:22:29 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:22:32 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:22:34 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:22:37 | 17,66076 | 21,66014 | 3,999382406 |
| 2021-03-02 7:22:40 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:22:42 | 17,78302 | 21,50854 | 3,725519701 |
| 2021-03-02 7:22:45 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:22:48 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:22:51 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:22:54 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:22:57 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:22:59 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:22:59 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:23:00 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:23:01 | 17,66076 | 21,66014 | 3,999382406 |
| 2021-03-02 7:23:01 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:23:02 | 17,90484 | 21,66014 | 3,755303582 |
| 2021-03-02 7:23:03 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:23:04 | 17,66076 | 21,66014 | 3,999382406 |
| 2021-03-02 7:23:05 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:23:05 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:23:06 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |
| 2021-03-02 7:23:07 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:23:08 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:23:09 | 17,90484 | 21,66014 | 3,755303582 |
| 2021-03-02 7:23:10 | 17,90484 | 21,81107 | 3,906233679 |
| 2021-03-02 7:23:11 | 17,66076 | 21,81107 | 4,150312502 |
| 2021-03-02 7:23:12 | 17,78302 | 21,81107 | 4,028046251 |
| 2021-03-02 7:23:12 | 17,78302 | 21,96134 | 4,178314374 |