

**Medición Continua y Monitoreo del Nivel de Agua en Tanques de Almacenamiento con  
Sensor Capacitivo Construido a Base de Tubos de PE-Al-PE**

**Sergio Alejandro Díaz Sierra  
Néstor Gregorio Pulido López**

**Universidad de Boyacá  
Facultad de Ciencias e Ingeniería  
Ingeniería Mecatrónica  
Tunja  
2022**

**Medición Continua y Monitoreo del Nivel de Agua en Tanques de Almacenamiento con  
Sensor Capacitivo Construido a Base de Tubos de PE-Al-PE**

**Sergio Alejandro Díaz Sierra  
Néstor Gregorio Pulido López**

**Trabajo de Grado para optar por el título de  
Ingeniero Mecatrónico**

**Director (a):  
Julián Andrés Avendaño León  
Ingeniero Mecatrónico**

**Codirector (a):  
Yeison Daniel Molina Monsalve  
Ingeniero Mecatrónico**

**Universidad de Boyacá  
Facultad de Ciencias e Ingeniería  
Ingeniería Mecatrónica  
Tunja  
2022**

**Nota de aceptación:**

Los estudiantes sustentaron y aprobaron su alternativa de grado como trabajo de grado con una nota aprobatoria de 4.1

---

---

---

---

---



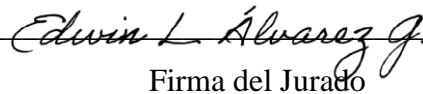
---

Firma del Presidente del Jurado



---

Firma del Jurado



---

Firma del Jurado

Tunja, 27 de octubre de 2022

“Únicamente el graduando es responsable de las ideas expuestas en el presente trabajo”.  
(Lineamientos constitucionales, legales e institucionales que rigen la propiedad intelectual).

Dedicamos este trabajo, inicialmente, a nuestras familias; quienes, con mucho esfuerzo y dedicación, nos han apoyado en todo el proceso académico. Han sido inspiración y motivación ante las adversidades que este camino que empezamos a recorrer hace ya varios años, nos ha presentado y que, gracias a su incondicional apoyo, consejo y compañía, recorreremos cada vez mejor.

También a todas las personas que formaron parte de este proceso de increíble crecimiento conocido como Universidad; personas que cada semestre fueron maestro, compañero, amigo y muchas cosas más. Porque es gracias a ellos que, con los años, fuimos formando un nuevo entorno casi familiar y personal durante nuestro camino universitario.

### **Agradecimientos**

Agradecemos a nuestros ingenieros, por orientarnos y guiarnos en cada etapa del proceso académico universitario. A nuestro ingeniero director de programa Andrés Rodríguez, por su gestión como director, la cual, ha impulsado el desarrollo en pro del programa mismo y, por ende, de nosotros.

Agradecemos a cada ingeniero que nos brindó su aporte en conocimiento para guiarnos a través del satisfactorio proceso de desarrollo de este trabajo de grado. Gracias al Ingeniero Cesar Augusto Castillo, quien nos brindó su conocimiento y amistad en el correcto desarrollo del circuito de acondicionamiento.

Principalmente, gracias a nuestros ingenieros asesores Julián Andrés Avendaño León y Yeison Daniel Molina, por su atención y paciencia durante este largo proceso que nos presentó el desarrollo de este trabajo de grado. Por estar siempre pendientes y prestos para orientarnos ante las incontables dificultades que se nos presentaron.

A nuestros compañeros Duván Santiago Amézquita y Andrés Leonardo Cabra, quienes nos brindaron su apoyo y compañía, para así facilitarnos un óptimo desarrollo de este documento.

## Contenido

	Pág.
Introducción.....	15
Construcción de la sonda capacitiva.....	16
Estructura .....	16
Soporte mecánico.....	18
Capacitancia del sensor.....	18
Diseño del circuito de acondicionamiento.....	23
Generador de onda .....	23
Comportamiento lineal de la señal.....	24
Variador de fase .....	24
Diferenciador.....	27
Simulación variador de fase y diferenciador.....	29
Rectificación de la señal .....	31
Tratamiento del ruido.....	35
Diseño de interfaz gráfica.....	38
Programación en PIC .....	38
Programación en LabView .....	39
Resultados.....	41
Sonda capacitiva .....	41
Capacitancia real .....	42
Circuito de acondicionamiento .....	44
Interfaz gráfica.....	50
Características del sistema de medición .....	51
Rango y alcance .....	52
Exactitud, precisión y error relativo.....	52
Repetibilidad y reproducibilidad.....	55
Sensibilidad y linealidad .....	59
Histéresis .....	61
Zona muerta.....	62

Tiempo de respuesta y tiempo muerto .....	62
Velocidad de respuesta.....	63
Comparativa.....	64
Conclusiones.....	66
Recomendaciones .....	67
Referencias .....	68
Anexos.....	70



**Lista de Tablas**

	Pág.
Tabla 1. Valores de las capacitancias con respecto al nivel de agua.....	21
Tabla 2. Datos de la fase en función de la capacitancia del sensor y nivel .....	26
Tabla 3. Datos Amplitud Resultante en función de la capacitancia del sensor y del nivel .....	28
Tabla 4. Datos valor efectivo en función de la capacitancia del sensor y del nivel .....	35
Tabla 5. Capacitancia real medida.....	43
Tabla 6. Bits equivalentes el nivel de agua .....	50
Tabla 7. Resultado nivel interfaz gráfica con respecto al nivel de agua en el recipiente .....	51
Tabla 8. Precisión, exactitud y error relativo del sistema de medición .....	53
Tabla 9. Precisión, exactitud y error relativo de la sonda capacitiva .....	54
Tabla 10. Valor de constantes K1, K2 y K3.....	55
Tabla 11. Resultado ensayos realizados por cada operador según el nivel de agua.....	56
Tabla 12. Comparación de las características.....	65

### Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Modelo de la estructura del sensor capacitivo .....	16
Figura 2. Diseño de la estructura del sensor capacitivo .....	17
Figura 3. Diseño base inferior del sensor .....	18
Figura 4. Circuito base para el análisis de capacitancias.....	19
Figura 5. Capacitancias presentes en la sonda capacitiva .....	20
Figura 6. Comportamiento C. E. interna, externa y total en función del nivel.....	22
Figura 7. Módulo comercial ICL 8038.....	24
Figura 8. Amplificador Variador de Fase .....	25
Figura 9. Señal de Salida Amplificador Variador de fase .....	25
Figura 10. Diferenciador básico .....	27
Figura 11. Comportamiento Amplitud de Salida del Diferenciador en función del nivel.....	28
Figura 12. Amplificador variador de fase y diferenciador básico simulado .....	29
Figura 13. Amplificador variador de fase y diferenciador básico simulado .....	30
Figura 14. Circuito rectificador de precisión de onda completa en semiciclo positivo.....	31
Figura 15. Circuito rectificador de precisión de onda completa en semiciclo negativo.....	32
Figura 16. Señal de entrada y salida del rectificador de onda completa .....	32
Figura 17. Circuito del rectificador de precisión de onda completa diseñado .....	33
Figura 18. Resultado simulación rectificación .....	33
Figura 19. Resultado simulación valor eficaz de la rectificación.....	34
Figura 20. Simulación valor eficaz señal generada, señal obtenida y resultante.....	36
Figura 21. Comportamiento valor eficaz señal generada, señal obtenida y resultante.....	37
Figura 22. Flujograma de programación del microcontrolador.....	38
Figura 23. Programación LabView .....	39
Figura 24. Interfaz Gráfica LabView .....	40
Figura 25. Sonda construida .....	41
Figura 26. Acople mecánico de la sonda.....	42
Figura 27. Comportamiento real de la capacitancia en función del nivel .....	43
Figura 28. Fuente de alimentación dual del sistema.....	44

Figura 29. Voltaje de salida fuentes en serie .....	45
Figura 30. Señales del generador, amplificador variador de fase y diferenciador básico .....	46
Figura 31. Señales del generador, amplificador variador de fase y diferenciador básico .....	47
Figura 32. Señales de salida del rectificador de precisión de onda completa .....	47
Figura 33. Algunos de los valores medidos.....	48
Figura 34. Comportamiento del voltaje resultante real y simulado, en función del nivel.....	48
Figura 35. Diseño PCB circuito de acondicionamiento .....	49
Figura 36. PCB circuito de acondicionamiento.....	49
Figura 37. Resultados interfaz gráfica en 20 cm y 70 cm de altura .....	51
Figura 38. Curva de calibración del voltaje resultante con respecto al nivel .....	60
Figura 39. Datos usados para calcular la histéresis .....	61
Figura 40. Método de smith.....	62
Figura 41. Curva de reacción del sistema.....	63

**Lista de Anexos**

	Pág.
Anexo A. Anteproyecto .....	71

## Resumen

Medición Continua y Monitoreo del Nivel de Agua en Tanques de Almacenamiento con Sensor Capacitivo Construido a Base de Tubos de PE-Al-PE.

Este trabajo de grado presenta el desarrollo de un sensor de principio capacitivo de medición continúa construido a base de tubos de PE-Al-PE, así como su proceso de caracterización. Ubicando los tubos de manera concéntrica, con el objetivo de usar las capas de aluminio como electrodos y sus respectivos recubrimientos de polietileno como aislante del capacitor. También se diseñó un soporte mecánico para evitar fluctuaciones en la medición por contacto con el agua y facilitar el flujo del agua hacia el interior del sensor.

Posteriormente, se generó una onda de 1,55 v AC a una frecuencia de 8k Hz; la cual ingresa al circuito de acondicionamiento diseñado a base de amplificadores operacionales CMOS LF 353 con sus configuraciones como variador de fase, diferenciador, rectificador de precisión y seguidor de tensión. Adicionalmente, la señal generada también es rectificadora para operar su diferencia con respecto a la señal obtenida del sensor por la variación de la capacitancia del sensor.

Para la visualización de los datos, se implementó un microcontrolador PIC 18F4550 con su configuración ADC de 10 bits, para la recepción de la señal DC obtenida en el circuito de acondicionamiento; además, el PIC transmite el dato de voltaje convertido a nivel de agua mediante un módulo USB RS 232; el cual, envía el dato de nivel de agua a la interfaz gráfica diseñada en LabView.

Finalmente, se tomaron datos obtenidos del sistema de medición para el cálculo de las características del sensor, en donde se determinó un rango de 2 cm a 80 cm, alcance de 78 cm, precisión de 0,26 pF y exactitud de 16% por parte de la sonda capacitiva, -65% de exactitud y precisión de 0,012 mV por parte del circuito de acondicionamiento. También se realizó una tabla comparativa de las características obtenidas y las de investigaciones similares, en donde se concluyó que el sensor cuenta, en su mayoría, con características aceptables.

**Palabras claves:** sensor, capacitivo, caracterización, dinámico, estático

### Abstract

Continuous Measurement and Monitoring of the Water Level in Storage Tanks with a Capacitive Sensor Made of PE-Al-PE Pipes.

This degree work presents the development of a capacitive principle sensor of continuous measurement built based on PE-Al-PE tubes, as well as its characterization process. Placing the tubes concentrically, with the objective of using the aluminum layers as electrodes and their respective polyethylene coatings as capacitor insulator. A mechanical support was also designed to avoid fluctuations in the measurement due to contact with water and to facilitate the flow of water into the sensor.

Subsequently, a wave of 1.55 v AC at a frequency of 8k Hz was generated, which enters the conditioning circuit designed based on CMOS LF 353 operational amplifiers with their configurations such as phase shifter, differentiator, precision rectifier and voltage follower. Additionally, the generated signal is also rectified to operate its difference with respect to the signal obtained from the sensor by varying the capacitance of the sensor.

For data visualization, a PIC 18F4550 microcontroller with its 10-bit ADC configuration was implemented to receive the DC signal obtained in the conditioning circuit; in addition, the PIC transmits the voltage data converted to water level through a USB RS 232 module, which sends the water level data to the graphical interface designed in LabView.

Finally, data obtained from the measurement system were taken to calculate the characteristics of the sensor, where a range of 2 to 80 cm, a reach of 78 cm, a precision of 0.26 pF and an accuracy of 16% were determined for the capacitive probe, -65% accuracy and 0.012 mV precision for the conditioning circuit. A comparative table of the characteristics obtained and those of similar investigations was also made, where it was concluded that the sensor has, for the most part, acceptable characteristics.

**Keywords:** sensor, capacitive, characterization, dynamic, static

## Introducción

El presente trabajo es el desarrollo del proyecto de grado realizado como opción de grado para la carrera de ingeniería mecatrónica. Algunas investigaciones acerca del desarrollo de sensores capacitivos, (Gong et al., 2016), (Loizou et al., 2015), (Bento et al., 2019) han logrado la medición de nivel de manera satisfactoria. Sin embargo, de los resultados obtenidos en estas investigaciones, no se obtuvieron las características estáticas asociadas al rango de medición de los instrumentos como lo son: precisión, exactitud, sensibilidad, tiempo de respuesta, etc.; que son de gran importancia al momento de realizar una selección para el uso de este tipo de sensores.

Un sensor es un objeto que permite que una propiedad varíe ante magnitudes físicas o químicas, dicha propiedad es convertida mediante un transductor en una variable eléctrica; actualmente son muy utilizados para la medición de diferentes variables físicas que facilitan procesos de automatización y control. Existen diferentes métodos para obtener medición continua, como lo son: ultrasónicos (Restrepo et al., 2000), electromagnéticos, de radar y capacitivos (Endress Hauser, 2015). Estos sensores a pesar de su efectividad, presentan un costo de adquisición elevado ya que normalmente son fabricados a las especificaciones del cliente; además todos los sensores cuentan con características estáticas, las cuales describen la actuación del sensor en régimen permanente o con cambios muy lentos de la variable a medir; también cuenta con características dinámicas, que describen el comportamiento del sensor en régimen transitorio (ISC-702, 2014).

Este trabajo presenta el desarrollo de un sensor de principio capacitivo de medición continúa, construido a base de tubos de PE-Al-PE el cual mide y monitorea el nivel del agua. A continuación, se encontrarán 3 capítulos organizados especialmente para cumplir con el objetivo del documento, correspondientes al diseño de la estructura mecánica, circuito de acondicionamiento y la interfaz gráfica. Posteriormente, se encontrará el apartado de resultados en donde se encuentra el proceso de desarrollo real del diseño planteado en los capítulos anteriores, así como el proceso llevado a cabo para la caracterización del sensor.

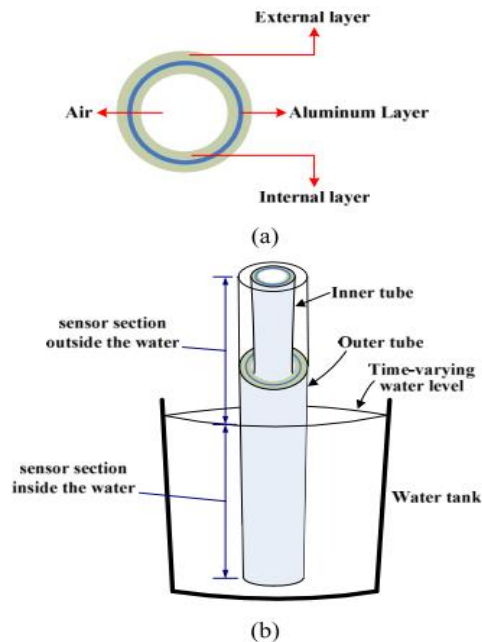
## Construcción de la sonda capacitiva

### Estructura

Para el diseño de la estructura de la sonda, se tomó como referencia el diseño planteado por Loizou et al., 2015, el cual, presenta una estructura de dos tubos de PE-Al-PE concéntricos que se puede observar en la figura 1. Esta estructura fue diseñada para un sensor capacitivo diferencial, por lo cual, el agua ingresa al sensor a través del ducto del tubo de menor diámetro, mientras que no hay espacio entre los dos tubos y la capacitancia total equivalente es constante; por lo que, para aplicarlo en el presente documento, se requieren modificaciones y así lograr una capacitancia equivalente variable.

### Figura 1

*Modelo de la estructura del sensor capacitivo*



Fuente: Loizou, K., Koutroulis, E., Zalikas, D., y Liontas, G. (2015). A low-cost capacitive sensor for water level monitoring in large-scale storage tanks. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*. 1416-1421. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125295>



Nota. La figura 1 presenta un a) corte transversal del tubo y b) el modelo de estructura del sensor capacitivo.

Un sensor capacitivo diferencial requiere un circuito de acondicionamiento más complejo del requerido por un sensor variable; puesto que, el valor hallado en el sensor capacitivo diferencial es la diferencia entre la capacitancia total, que se mantiene constante durante todo el proceso, y alguna de las capacitancias presentes en el sensor (ya sea dentro o fuera el nivel de agua). El sensor capacitivo variable, varía su capacitancia total con respecto al nivel de agua medido (Pallás Areny, 2007), lo que simplifica el tratamiento de la señal obtenida del sensor.

Para el desarrollo de un sensor capacitivo variable, se modificó el modelo para que el agua ingrese al sistema a través de un espacio ubicado en el centro de los dos tubos concéntricos, por lo tanto, se utilizaron dos tubos de un metro de largo; uno de una pulgada y uno de media pulgada. Como se puede ver en figura 2, esta estructura permite que el agua del recipiente a medir ingrese al sistema a través de la separación entre los tubos, y así se obtiene un comportamiento de un sensor capacitivo variable.

## **Figura 2**

*Diseño de la estructura del sensor capacitivo*



Fuente: Elaborado por los autores.

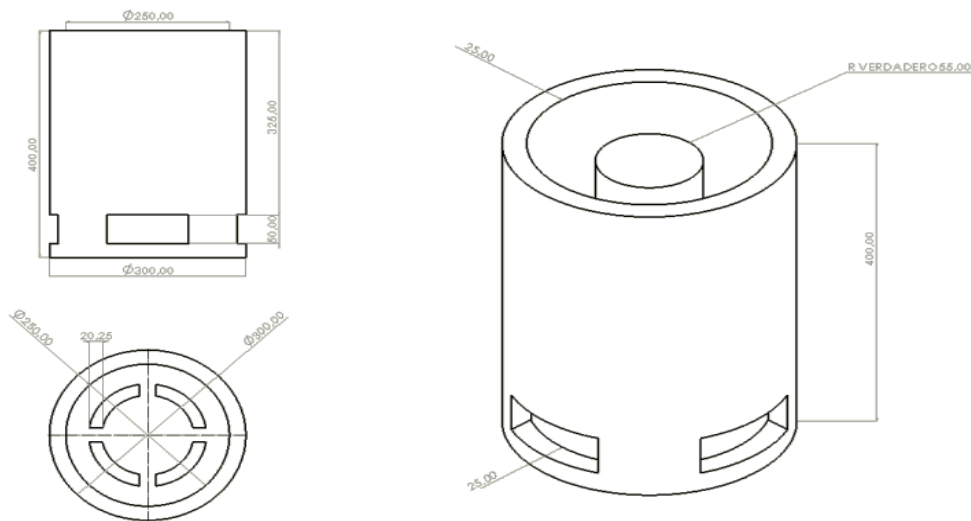
Los tubos, al ser de PE-Al-PE, poseen una capa de aluminio y están recubiertos por polietileno tanto interna como externamente; al utilizar dos tubos concéntricos, se permite utilizar las dos placas como electrodos, para así procesar su capacitancia.

### Soporte mecánico

Para evitar que el agua ingrese por dentro del tubo de menor diámetro y conecte las dos láminas de aluminio, se diseñó un soporte mecánico el cual obstruya el paso del agua por el tubo interno, además de permitir el ingreso del agua por el espacio entre ambos tubos y fijar los tubos para que se mantengan concéntricos y generar una distancia constante en toda su longitud. En la figura 3, se muestra el diseño de la base inferior impresa, con sus respectivas medidas.

### Figura 3

*Diseño base inferior del sensor*



Fuente: Elaborada por los autores.

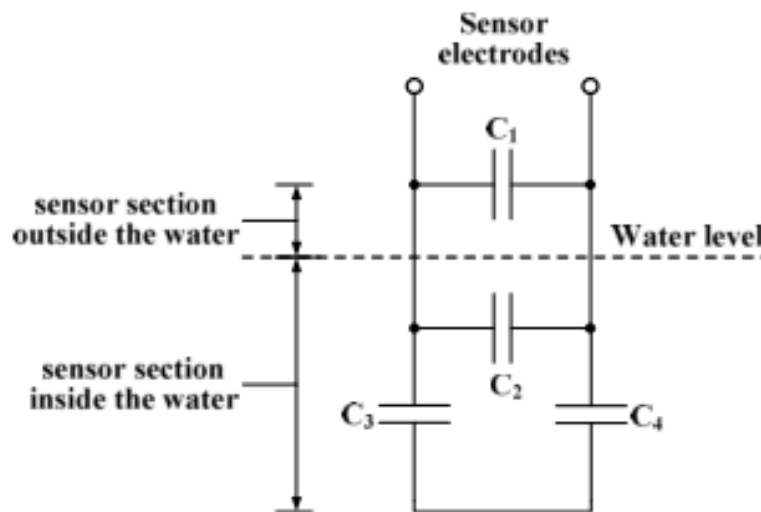
### Capacitancia del sensor

Teniendo en cuenta que el valor equivalente de la capacitancia depende de la longitud de los tubos, así como de la superficie en contacto con el agua; se tomó como guía el análisis de las capacitancias presentes en el circuito propuesto por Loizou et al., 2015; este análisis se

basa en un sensor capacitivo diferencial, dado que el agua entra por el tubo de menor diámetro y no hay distancia de separación entre los dos tubos de PE-Al-PE. Esto hace que el valor de capacitancia equivalente sea constante durante todo el proceso y, para hallar la variación del nivel de agua, se requiere medir la capacitancia interna equivalente o externa, dependiendo si lo que se desea es un aumento o decremento de la capacitancia con respecto a la variación en el nivel de agua. En la figura 5 se presenta el circuito base para el análisis.

#### Figura 4

*Circuito base para el análisis de capacitancias*

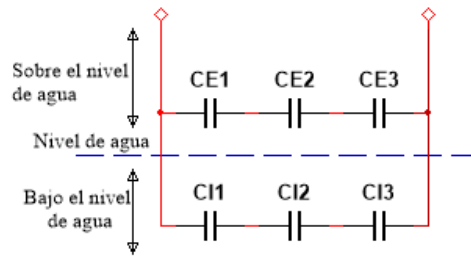


Fuente: Loizou, K., Koutroulis, E., Zalikas, D., y Liontas, G. (2015). A low-cost capacitive sensor for water level monitoring in large-scale storage tanks. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*. 1416-1421. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125295>

Dado que, en el presente proyecto, el agua ingresa al sistema a través de la distancia de separación entre los dos tubos de PE-Al-PE, esto hace que este sensor ya no funcione como diferencial, en cambio, es un sensor capacitivo simple; lo que simplifica el proceso de medición, ya que la capacitancia equivalente total incrementa o decrementa respecto al nivel de agua. Debido a esto, se planteó el análisis de las capacitancias presentes en el proceso de medición vistas en la figura 5.

**Figura 5**

*Capacitancias presentes en la sonda capacitiva*



Fuente: Elaborado por los autores.

En donde las capacitancias generadas se expresaron como “Ce” para aquellas existentes fuera del nivel de agua, e “Ci” para dentro del nivel de agua.

- $C_{e1}$ : Capacitancia fuera del nivel de agua existente entre la superficie interna de la lámina de aluminio del tubo de 1” y la superficie interna de PE del mismo tubo.
- $C_{e2}$ : Capacitancia fuera del nivel de agua existente entre la superficie interna de PE del tubo de 1” y la superficie externa de PE del tubo de ½”.
- $C_{e3}$ : Capacitancia fuera del nivel de agua existente entre la superficie externa de PE del tubo de ½” y la superficie externa de la lámina de Aluminio del mismo tubo.
- $C_{i1}$ : Capacitancia dentro del nivel de agua existente entre el agua externa y la lámina de Al del tubo de 1”.
- $C_{i2}$ : Capacitancia dentro del nivel de agua existente entre la lámina de Al del tubo de 1” y el agua presente en medio de los dos tubos.
- $C_{i3}$ : Capacitancia dentro del nivel de agua existente entre el agua entre los dos tubos y la lámina de Al del tubo de ½”.

Para hallar un estimado teórico del valor individual de cada una de las capacitancias, se implementó la ecuación implementada por (Loizou et al., 2015):

$$C_x = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot h}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)} \quad (1)$$

En donde  $\epsilon_0$  es la permisividad eléctrica del vacío;  $\epsilon_r$ , constante eléctrica del aislante en medio de los electrodos;  $d_2$  y  $d_1$  son los diámetros externos e internos, respectivamente; y,

por último,  $h$ , es la altura del nivel del agua. Teniendo en cuenta que  $\varepsilon_0 = 8,8541 \frac{pF}{m}$  y  $\varepsilon_r = 2,25$ , se reemplaza en la ecuación 1 y se realizan las operaciones requeridas para obtener la variación de la capacitancia con respecto al nivel de agua. En la tabla 1 se listan los valores de la capacitancia en cada capacitor (Ver Figura 5), equivalente interno, externa y equivalente total. Además, se presenta en la figura 6, el comportamiento de la capacitancia respecto al nivel de agua.

**Tabla 1**

*Valores de las capacitancias con respecto al nivel de agua*

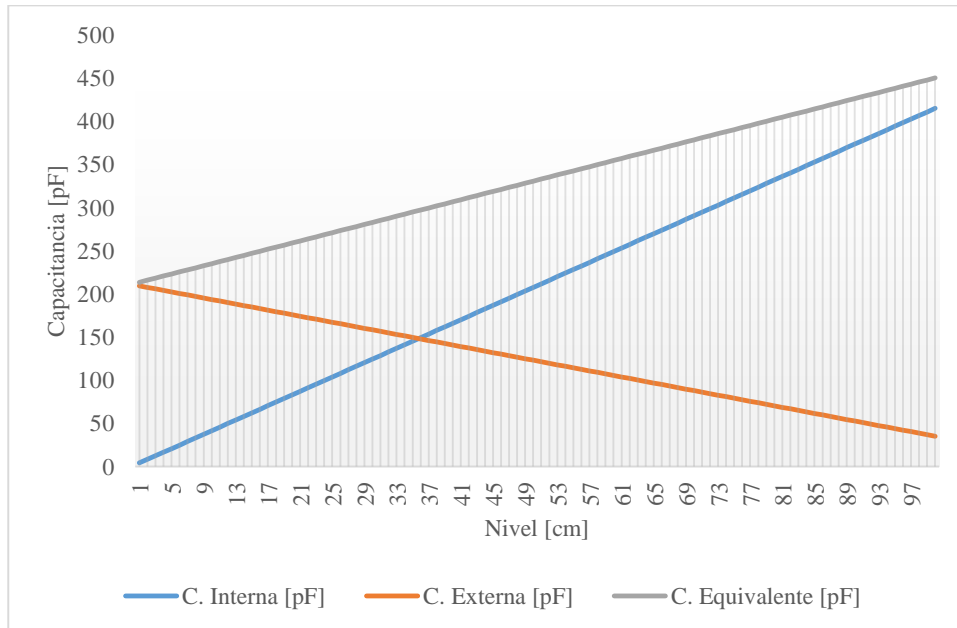
<b>H</b>	<b>Ci1</b>	<b>Ci2</b>	<b>Ci3</b>	<b>CiE</b>	<b>Ce1</b>	<b>Ce2</b>	<b>Ce3</b>	<b>CeE</b>	<b>CE</b>
<b>[cm]</b>	<b>[pF]</b>	<b>[pF]</b>	<b>[pF]</b>	<b>[pF]</b>	<b>[pF]</b>	<b>[pF]</b>	<b>[pF]</b>	<b>[pF]</b>	<b>[pF]</b>
1	13,6	12	11,9	4,15	1430	297	1410	209	213
10	136	120	119	41,5	1320	274	1310	193	235
20	272	240	238	82,9	1200	249	1190	176	259
30	408	360	356	124	1080	224	1070	158	283
40	544	480	475	166	960	199	950	141	307
50	679	600	594	207	840	175	832	123	330
60	815	720	713	249	720	150	713	106	354
70	951	840	832	290	600	125	594	87,9	378
80	1090	960	950	332	480	99,7	475	70,3	402
90	1220	1080	1070	373	360	74,8	356	52,8	426
100	1360	1200	1190	415	240	49,9	238	35,2	450

Fuente: Datos obtenidos con capacímetro.

Nota. Esta tabla presenta los valores correspondientes de las capacitancias con un aumento cada 10 cm. Datos Capacitancia.

**Figura 6**

*Comportamiento C. E. interna, externa y total en función del nivel*



Fuente: Elaborado usando datos obtenidos con capacímetro.

Nota. La Figura 6 representa la gráfica del comportamiento de las capacitancias presentes en el proceso de medición y su variación con respecto al nivel de agua.

### **Diseño del circuito de acondicionamiento**

Teniendo en cuenta que a mayor frecuencia, menor es la componente opositora (Reactancia) del capacitor (Boylestad, 2004), y que el agua se comporta prácticamente como conductor a frecuencias superiores a 100 kHz (Loizou et al., 2015); se planteó una señal senoidal de alimentación de 1,5 VAC con una frecuencia de 8 kHz. Los amplificadores operacionales presentados en las simulaciones y en el circuito real, están alimentados a +12 V y -12 V respectivamente.

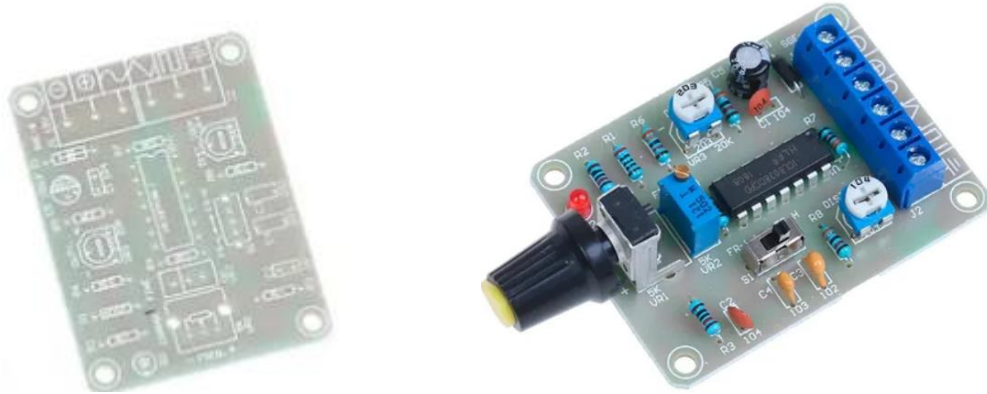
#### **Generador de onda**

Para generar una señal alterna sinusoidal se usó un generador ICL 8038, el cual, es un circuito integrado capaz de producir formas de onda sinusoidales, cuadradas, triangulares, de diente de sierra y de pulso de alta precisión con un mínimo de componentes externos. La frecuencia (o tasa de repetición) puede seleccionarse externamente desde 0,001Hz hasta más de 300kHz utilizando resistencias o condensadores, y la modulación de la frecuencia y el barrido pueden realizarse con una tensión externa. El ICL8038 está fabricado con tecnología monolítica avanzada, utilizando diodos de barrera Schottky y resistencias de película fina, y la salida es estable en una amplia gama de variaciones de temperatura y alimentación.(Intersil, 2001)

Para facilitar el diseño, se adquirió un módulo comercial (ver Figura 7), el cual permite un sencillo ajuste de la frecuencia, alimentación dual y selección de forma de onda deseada. En este caso, una señal senoidal, con alimentación de +12 V y -12 V, y una frecuencia de 8kHz, para obtener una señal de CA senoidal de salida de 1,55 Vp.

**Figura 7**

*Módulo comercial ICL 8038*



Fuente: Moviltronics. (s.f.). *Módulo generador señales Icl8038 senoidal cuadrada triangulo*.  
[https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-628719855-modulo-generador-senales-icl8038-senoidal-cuadrada-triangulo-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-628719855-modulo-generador-senales-icl8038-senoidal-cuadrada-triangulo-_JM)

Posteriormente, se procedió a diseñar un circuito de acondicionamiento de la señal, ubicado a la salida del sensor, para así obtener una relación lineal entre el voltaje en función de la capacitancia.

**Comportamiento lineal de la señal**

Para obtener un comportamiento lineal en la salida de señal, se usó de un amplificador configurado como variador de fase y un diferenciador.

***Variador de fase***

Un variador de fase tiene como función el “*transmitir una señal una onda, sin cambiar su amplitud, pero sí cambiando su ángulo de fase en una cantidad preestablecida.*” (Coughlin y Driscoll, 1993) Esto se logra a través del circuito visto en la figura 8, el cual, consta de dos resistencias  $R$  de igual valor para no afectar la magnitud de la señal, un capacitor de  $0,01\mu\text{F}$  y una resistencia adicional  $R_i$ , cuyo cambio varía el ángulo de fase de la señal entrante. (Coughlin y Driscoll, 1993) también indican que el ángulo de fase se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

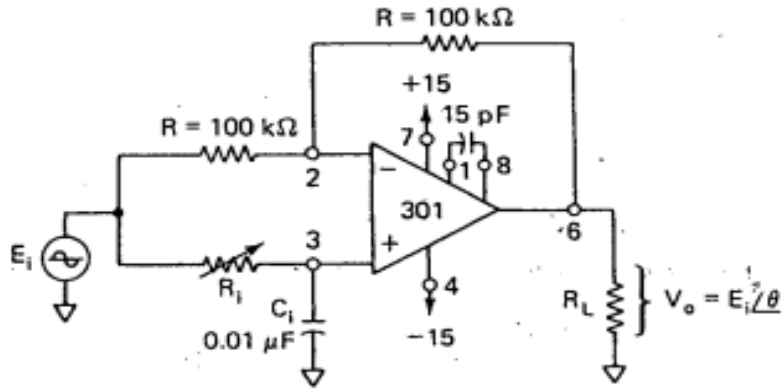


$$\theta = 2 \cdot \tan^{-1}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_i \cdot C_i) \quad (2)$$

En donde  $\Theta$  es el ángulo de fase y  $f$ , la frecuencia.

**Figura 8**

*Amplificador Variador de Fase*

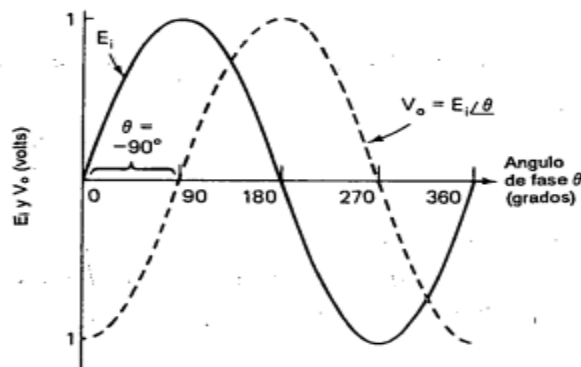


Fuente: Coughlin, R. F., y Driscoll, F. F. (1993). *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*. (4ta ed.). Prentice Hall Hispanoamericana.

En base a la ecuación 2 y al circuito mostrado en la figura 8, se obtiene una señal de salida así:

**Figura 9**

*Señal de salida amplificador variador de fase*



Fuente: Coughlin, R. F., y Driscoll, F. F. (1993). *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales* (4ta ed.). Prentice Hall Hispanoamericana.

Basado en el diseño y teniendo en cuenta que en este caso el sensor varía su capacitancia con respecto al nivel de agua, se estableció  $R_i$  de 10k Ohm's y  $C_i$  como el sensor; con esto, se obtiene una variación del ángulo de fase con respecto al valor de capacitancia dado por el sensor y, por ende, al nivel de agua. Reemplazando en la ecuación 2 los valores ya conocidos, se obtiene los datos presentados en la siguiente tabla.

**Tabla 2**

*Datos de la fase en función de la capacitancia del sensor y nivel*

<b>Nivel</b> <b>[cm]</b>	<b>Capacitancia</b> <b>Sensor [pF]</b>	<b>Fase [°]</b>
1	213,42	12,25
10	234,91	13,47
20	258,80	14,82
30	282,68	16,17
40	306,57	17,52
50	330,45	18,86
60	354,34	20,20
70	378,22	21,53
80	402,11	22,85
90	425,99	24,17
100	449,88	25,48

Fuente: Elaborado usando datos obtenidos con capacímetro.

Nota. La tabla presenta los datos del desfase de la señal a la salida del amplificador.

Ahora que ya se tiene un cambio de una señal con respecto a la capacitancia, se procede a operar estas dos señales, de tal manera que la amplitud varíe linealmente con respecto al nivel del agua; para lograr esto, se usó un amplificador operacional configurado como diferenciador.

**Diferenciador**

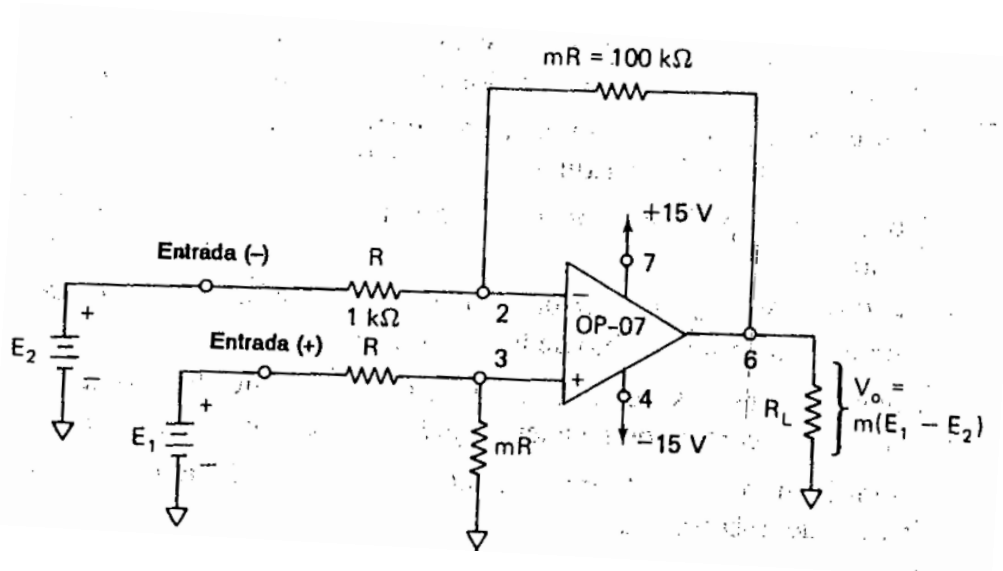
Este amplificador, como su nombre lo indica, brinda la respuesta de la diferencia entre la señal en su terminal no inversora y la inversora. Según (Coughlin y Driscoll, 1993), este circuito visto en la figura 10, cumple el comportamiento de la siguiente ecuación:

$$V_o = m \cdot E_1 - m \cdot E_2 = m \cdot (E_1 - E_2) \quad (3)$$

En donde  $m$  se denomina la ganancia diferencial  $E_1$  y  $E_2$  las señales a operar.

**Figura 10**

*Diferenciador básico*



Fuente: Coughlin, R. F., y Driscoll, F. F. (1993). *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*. (4ta ed.). Prentice Hall Hispanoamericana.

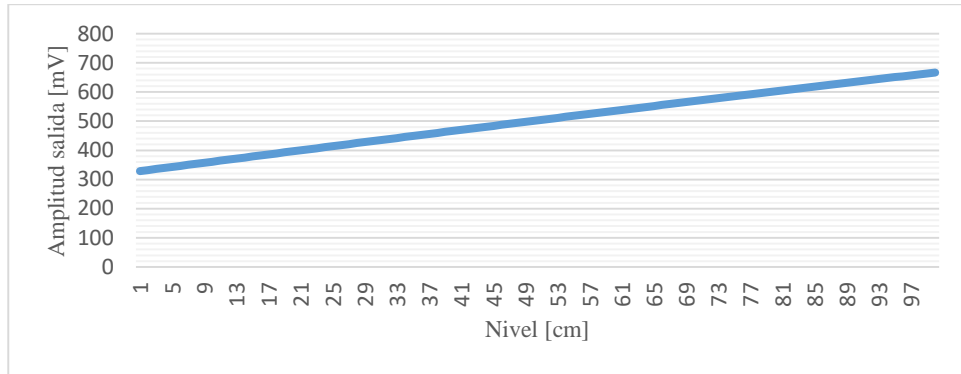
Dadas las resistencias seleccionadas, se tiene  $m=1$  y una amplitud de entrada de  $A_i=1.55V$ , la cual se mantiene en el variador de fase. Usando la ecuación planteada en el libro “*Introducción al Análisis de circuitos*” en el capítulo 13 “*Formas de onda senoidales alternas*” elaborado por (Boylestad, 2004), se tiene:

$$E = A_i \cdot \text{sen}(\omega t \pm \theta) \quad (4)$$

Tomando  $t = 0s$ , la amplitud conocida y los ángulos mostrados en la tabla 2; se reemplaza en la ecuación 3, y se obtiene que la amplitud de la señal con respecto al nivel de agua tiene el comportamiento visto en la figura 11. La tabla 3 presenta algunos de los datos resultantes.

**Figura 11**

Comportamiento Amplitud de Salida del Diferenciador en función del nivel



Fuente: Elaborado usando datos obtenidos con capacímetro.

**Tabla 3**

*Datos Amplitud Resultante en función de la capacitancia del sensor y del nivel*

Nivel [cm]	Capacitancia Sensor [pF]	Amplitud [mV]
1	213,42	328,77
10	234,91	361,01
20	258,80	396,55
30	282,68	431,77
40	306,57	466,62
50	330,45	501,10
60	354,34	535,16
70	378,22	568,80
80	402,11	601,98
90	425,99	634,69
100	449,88	666,91

Fuente: Elaborado usando datos obtenidos de capacímetro.

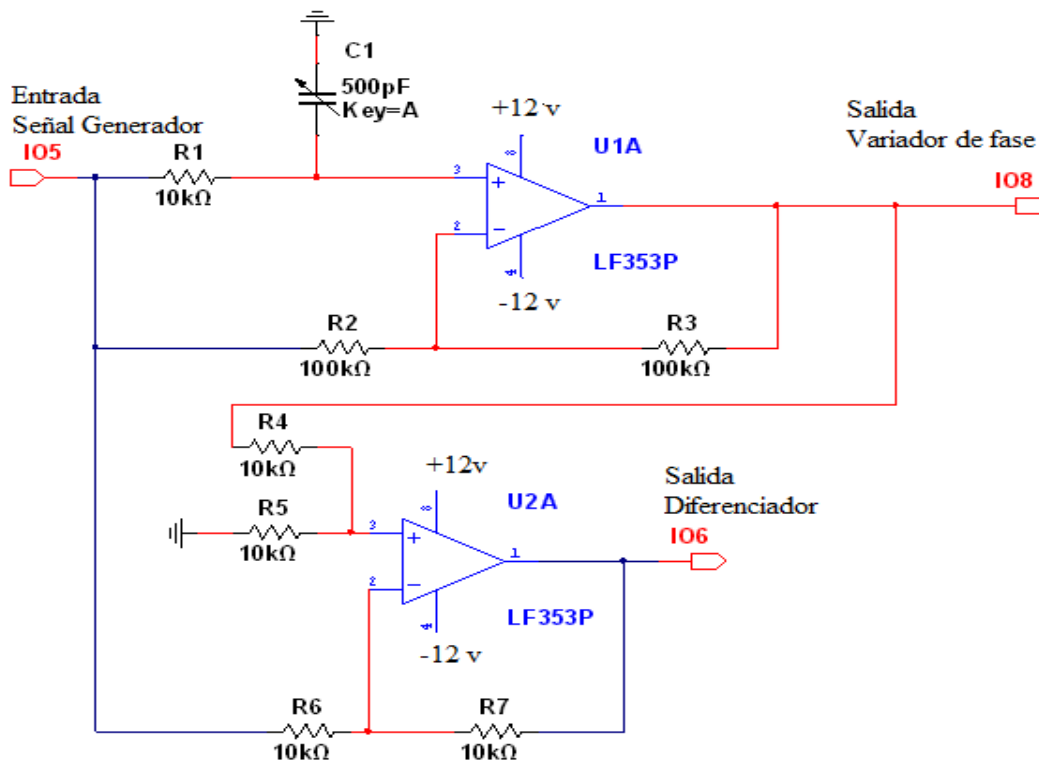
Nota. La tabla presenta los datos de la amplitud la señal a la salida del amplificador diferenciador.

### *Simulación variador de fase y diferenciador*

Una vez planteados los circuitos a implementar, se simularon y se obtuvo el circuito visto en la figura 12, en donde, *C1* es el sensor capacitivo; *IO5*, la señal sinusoidal generada; *IO8*, la señal desfasada; *IO6*, la señal obtenida del diferenciador.

**Figura 12**

*Amplificador variador de fase y diferenciador básico simulado*



Fuente: elaborado por los autores.

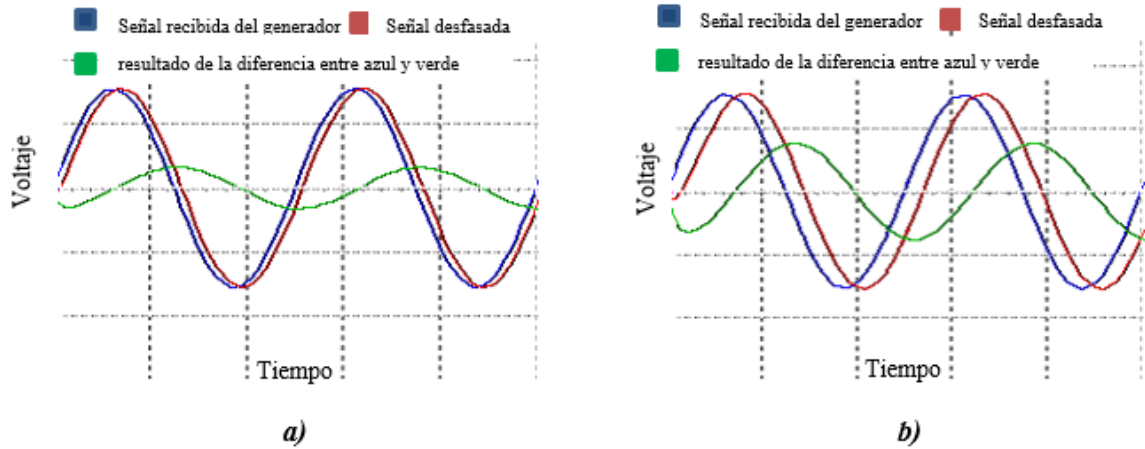
Nota. La figura 12 presenta el circuito simulado en MultiSim del amplificador variador de fase y diferenciador básico, con el sensor el su valor mínimo (200 pF).

Posteriormente, se obtuvieron los resultados vistos en la siguiente figura, en donde a) es la señal con el valor mínimo aproximado de la capacitancia del sensor y b) con el valor máximo

aproximado; la señal azul, es la recibida del generador; roja, desfasada y verde, el resultado de la diferencia entre las dos anteriores.

**Figura 13**

*Amplificador variador de fase y diferenciador básico simulado*



Fuente: elaborado por los autores.

Nota. La figura presenta las señales presentes en la simulación de los amplificadores, en donde a) presenta las señales con el sensor en 212,42 pF y b) con el sensor en 449,88 pF. Para ambas figuras, se cuenta con una escala de 20 us/Div y una división de voltaje de 1 v/div.

Las amplitudes resultantes de la simulación fueron 339,588mV y 696,323 mV para capacitancia mínima y máxima, respectivamente; amplitudes que son aproximadas a el comportamiento presentado en la figura 11 y los datos presentados en la tabla 3. Ahora que se tiene un comportamiento lineal del voltaje respecto al nivel de agua, se rectificó la señal para obtener un valor DC constante.

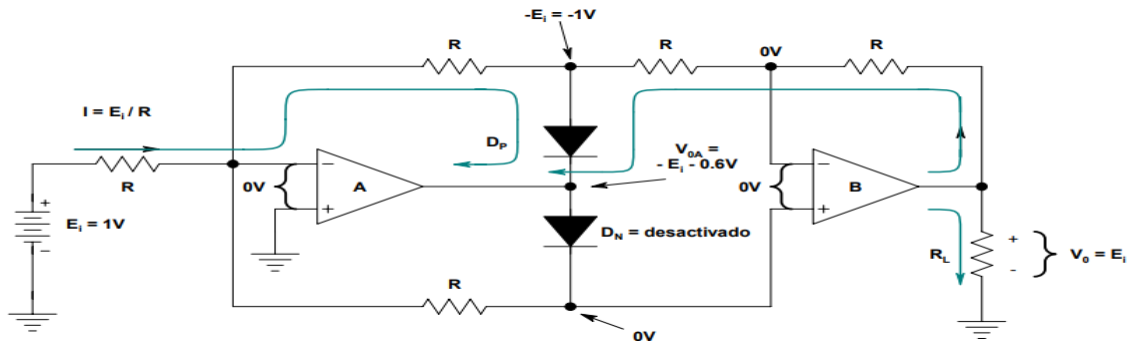
## Rectificación de la señal

Cuando se necesita rectificar señales con baja amplitud de voltaje, se suele usar un puente rectificador con diodos; lo cual, no es lo ideal ya que consume típicamente 1,4v de la señal de entrada, por lo que, al ingresar una señal cercana o menor a este valor para ser rectificadas, no es adecuado. Para darle solución a esto, se usó el rectificador de precisión de onda completa, el cual es capaz de rectificar señales de muy poco voltaje y sin extraer voltaje de la señal de entrada, además de minimizar el ruido en la señal de salida.

Para el diseño de un rectificador de precisión de onda completa, se tomó como referencia el circuito que se observa en la siguiente figura.

**Figura 14**

*Circuito rectificador de precisión de onda completa en semiciclo positivo*

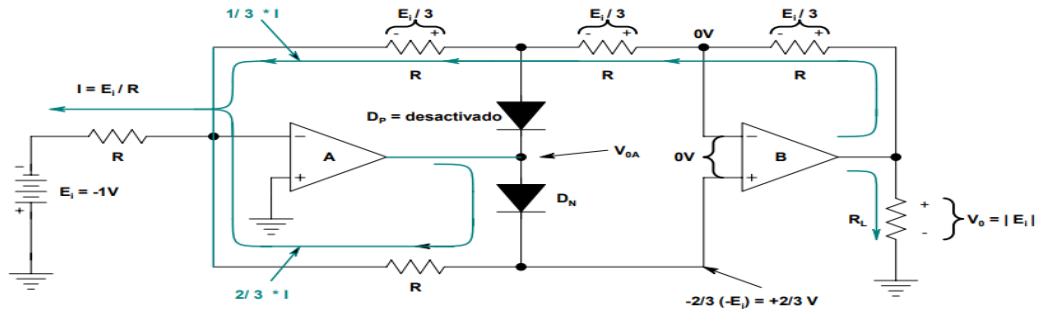


Fuente: Coughlin, R. F., y Driscoll, F. F. (1993). *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*. (4ta ed.). Prentice Hall Hispanoamericana.

Todas las resistencias de este circuito son iguales y su impedancia de entrada es igual a  $R$ , en la Figura 14 se muestran las direcciones de la corriente y las polaridades de voltaje para señales de entrada positivas. El diodo  $D_p$  conduce de manera que los amplificadores operacionales A y B funciona como inversores y  $V_o = +E_i$ . Cuando las entradas son negativas,  $D_n$  conduce y su análisis se ve reflejado en la siguiente figura.

**Figura 15**

*Circuito rectificador de precisión de onda completa en semiciclo negativo*

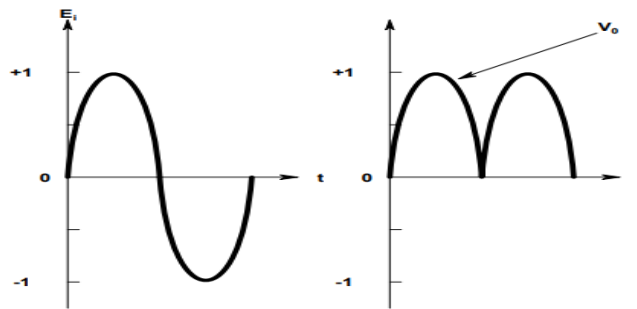


Fuente: Coughlin, R. F., y Driscoll, F. F. (1993). *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales* (4ta ed.). Prentice Hall Hispanoamericana.

Gracias a el comportamiento de los diodos y a la inversión de la señal, se obtienen señales de entrada y salida vistas en la siguiente figura.

**Figura 16**

*Señal de entrada y salida del rectificador de onda completa*



Fuente: Coughlin, R. F., y Driscoll, F. F. (1993). *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales*. (4ta ed.). Prentice Hall Hispanoamericana.

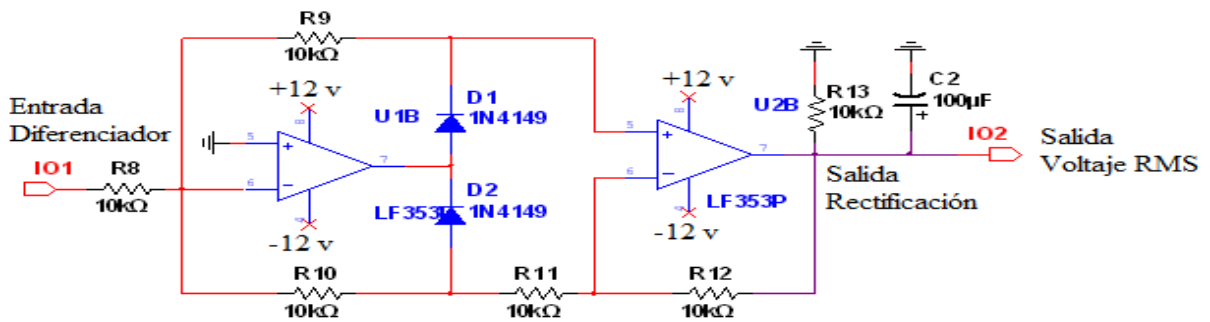
Nota. La figura representa las señales de la onda de entrada (Izquierda) y salida (Derecha) del circuito rectificador de precisión de onda completa.

Ahora que el diseño fue planteado y dado que la impedancia de entrada del circuito rectificador depende directamente del valor de resistencia utilizado en el circuito, se usaron resistencias de 10k para el diseño, el cual se ve en la siguiente figura.



**Figura 17**

*Circuito del rectificador de precisión de onda completa diseñado*



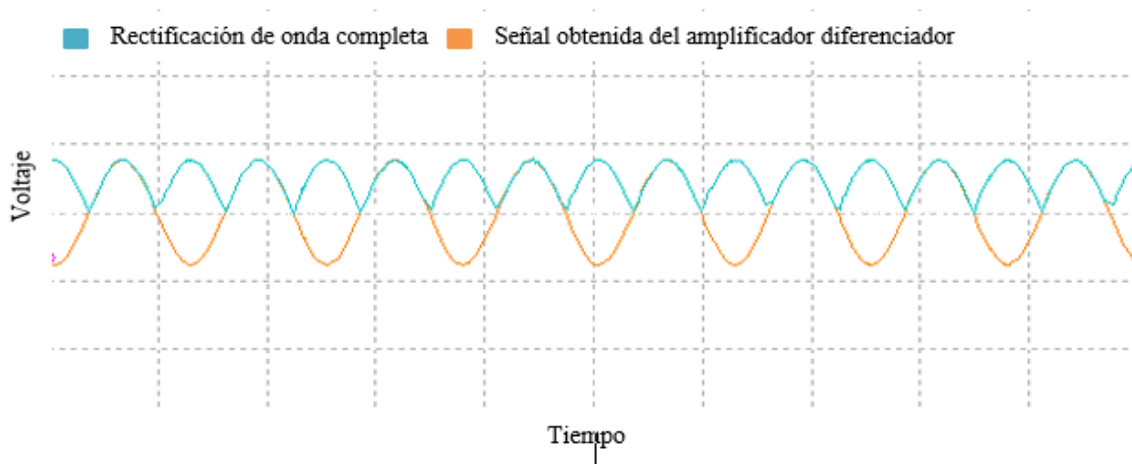
Fuente: elaborado por los autores.

En donde IO1 indica la entrada de la señal resultante del amplificador diferenciador. Ahora que se tiene una señal de salida rectificada y visualmente estable, se procede a añadir un capacitor de 100 µF en paralelo con la resistencia de salida del 2do amplificador operacional utilizado, para así obtener una señal de salida DC aproximadamente constante, la cual se identifica IO2 en la figura anterior.

La figura 18 presenta las señales presentes en el circuito de rectificación, con la capacitancia del sensor en 500 pF. La figura 19, presenta la señal a la salida IO2 después del capacitor de 100µF, teniendo como respuesta el valor eficaz de la señal.

**Figura 18**

*Resultado simulación rectificación*



Fuente: elaborado por los autores.

Nota. La figura 18 presenta la rectificación de onda completa (en color cian) y la señal obtenida del amplificador diferenciador (en color naranja).

**Figura 19**

*Resultado simulación valor eficaz de la rectificación*



Fuente: elaborado por los autores.

Nota. La figura presenta la señal a la salida del diferenciador (Azul) y la señal a la salida del capacitor del rectificador (Rojo).

Tomando la ecuación presentada en el capítulo 13 “Formas de onda senoidales alternas” en el libro “Introducción al Análisis de Circuitos” de (Boylestad, 2004), se tiene que el valor eficaz o efectivo, es “el valor de corriente directa equivalente de la cantidad senoidal” y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$E_m = E_{efectivo} \cdot \sqrt{2} \tag{5}$$

Teniendo  $E_m$  como amplitud de la señal, o valor pico, y  $E_{efectivo}$  como el valor efectivo; se despeja  $E_{efectivo}$  de la ecuación 5, y se reemplaza por la amplitud presentada en la tabla 3, de donde se obtiene el valor efectivo es:

**Tabla 4***Datos valor efectivo en función de la capacitancia del sensor y del nivel*

<b>Nivel</b>	<b>Capacitancia</b>	<b>V. Rms</b>
<b>[cm]</b>	<b>Sensor [pF]</b>	<b>[mV]</b>
1	213,42	232,47
10	234,91	255,28
20	258,80	280,41
30	282,68	305,30
40	306,57	329,95
50	330,45	354,33
60	354,34	378,42
70	378,22	402,20
80	402,11	425,67
90	425,99	448,80
100	449,88	471,58

Fuente: Elaborado usando datos obtenidos de capacímetro.

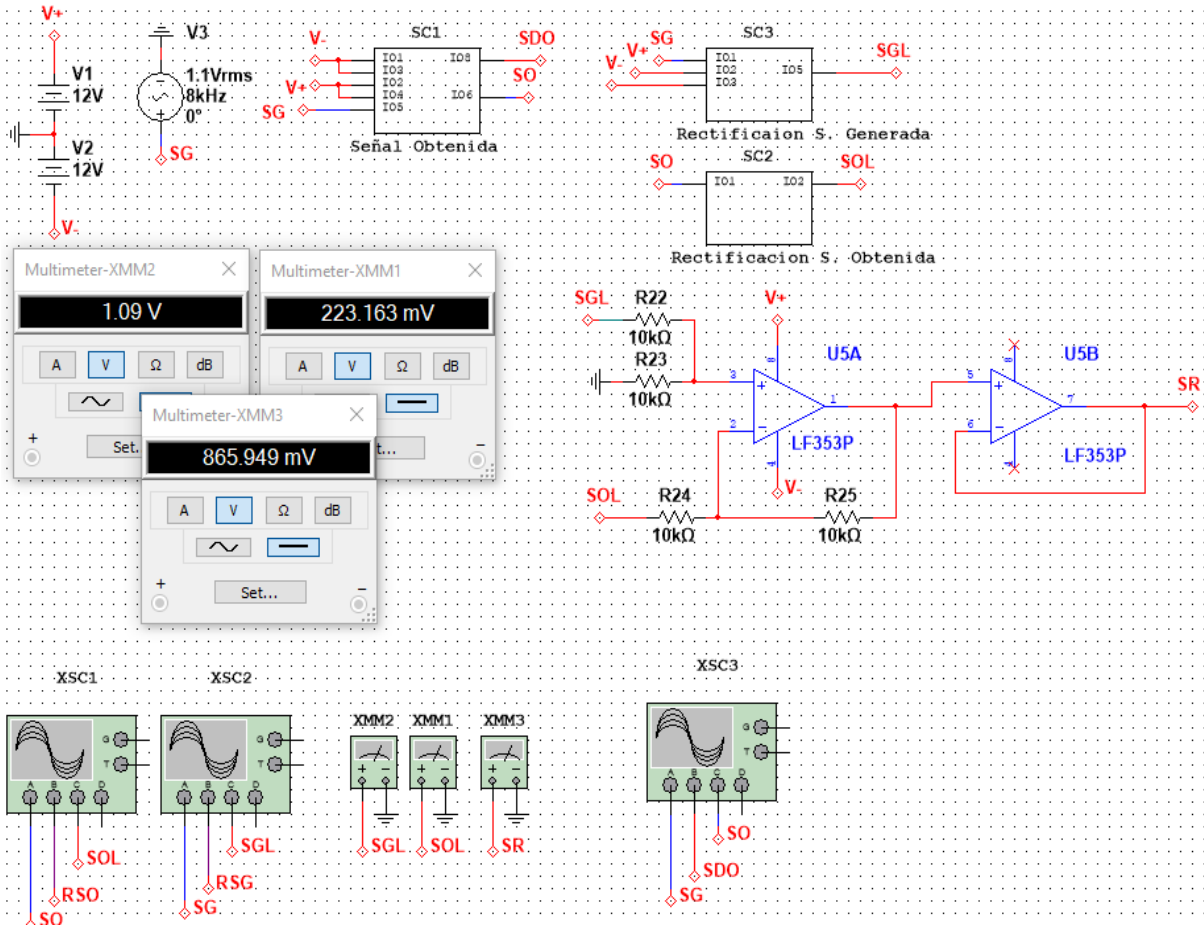
Nota. La tabla presenta los datos del valor eficaz a la salida del amplificador rectificador.

### **Tratamiento del ruido**

A pesar de tener un comportamiento lineal y un valor dc ya establecido, la simulación presenta variación en los datos de +/-20 mV, por lo que, se repitió el proceso de rectificación con la señal generada; de esta manera, se resta el valor eficaz obtenido con el valor eficaz proveniente de la señal afectada por el sensor (Tabla 4) mediante el uso de un amplificador diferenciador básico adicional. La siguiente figura presenta el resultado del valor eficaz de la señal generada de la simulación, el valor eficaz de la señal obtenida y la resta entre estas, respectivamente.

**Figura 20**

*Simulación valor eficaz señal generada, señal obtenida y resultante*



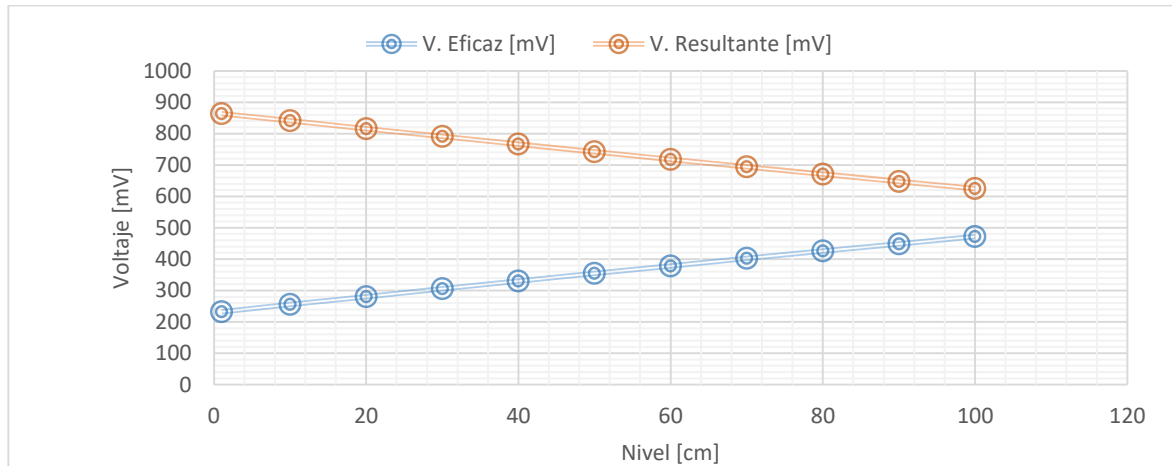
Fuente: Elaborado por los autores.

Nota. La figura presenta el resultado de la simulación del valor eficaz de la señal (SGL), el valor eficaz de la señal obtenida con el sensor con 200 pF (SOL) y la resta entre estas, respectivamente (SR).

Con el proceso anteriormente descrito implementado, el valor eficaz presenta una variación de +/- 5 mV. El comportamiento de la señal respecto al nivel de agua se presenta en la siguiente figura. Después de la resta entre ambos voltajes, no solamente se disminuye el ruido, sino que invierte el comportamiento de la señal respecto al cambio de nivel en el recipiente. El comportamiento del voltaje resultante (SR), sigue siendo un comportamiento lineal, pero ahora es inversamente proporcional al cambio en el nivel de agua; lo que indica que, a medida que el nivel de agua y la capacitancia aumenta, disminuye el valor del voltaje final del circuito.

**Figura 21**

*Comportamiento valor eficaz señal generada, señal obtenida y resultante*



Fuente: Elaborado usando datos obtenidos por multímetro.

Nota. La figura presenta el comportamiento del voltaje eficaz de la señal obtenida, y el resultado de la resta entre el valor eficaz de la señal generada y el de la señal obtenida.

Ahora que se obtiene una señal estable del circuito acondicionamiento en la simulación, se procedió a implementarlo, para su posterior uso para el desarrollo de la interfaz gráfica que se presenta en el siguiente capítulo.

## Diseño de interfaz gráfica

### Programación en PIC

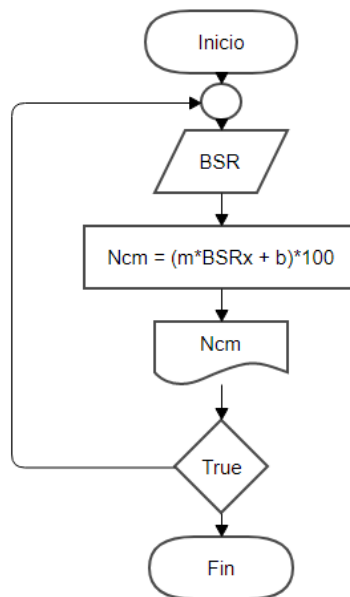
Para la programación en el PIC, se estableció un convertidor ADC de 10 bits, por lo que los valores leídos por los puertos análogos del PIC tendrán valores entre 0-1023 bits equivalentes a 0-5v, respectivamente. Teniendo en cuenta eso y los voltajes de la tabla 2, se estableció una ecuación de comportamiento lineal del tipo:

$$Y = m \cdot x + b \quad (6)$$

En donde Y corresponde al nivel y x a los bits leídos por el microcontrolador. Con base a esto, se programó el PIC consiguiendo el flujograma de la figura 22.

### Figura 22

*Flujograma de programación del microcontrolador*



Fuente: elaborado los autores.

Nota. La figura presenta el flujograma que se tuvo en cuenta al momento de programar el microcontrolador, en donde BSR es el valor en bits de Señal Resultante (SR) del circuito; y Ncm, el nivel en cm.

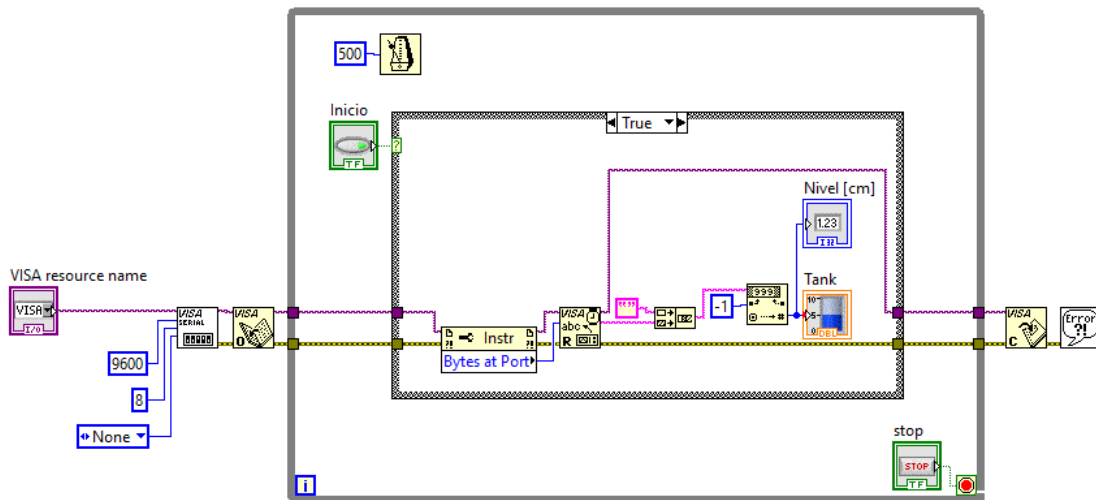
Se programó la transmisión de datos correspondientes al nivel de agua, en centímetros, calculado por el microcontrolador a través de un módulo USB RS232 al computador, para su posterior visualización a través de LabView.

### Programación en LabView

Inicialmente, haciendo uso del módulo NI VISA de LabVIEW, se configura la selección del puerto en el cual se conecta en módulo USB y recibirá el dato; posteriormente se leen los Bits recibidos por el puerto (equivalentes al valor del nivel de agua) y se muestran tanto textualmente como visualmente. La figura 23 muestra la programación implementada en LabVIEW.

**Figura 23**

*Programación LabView*



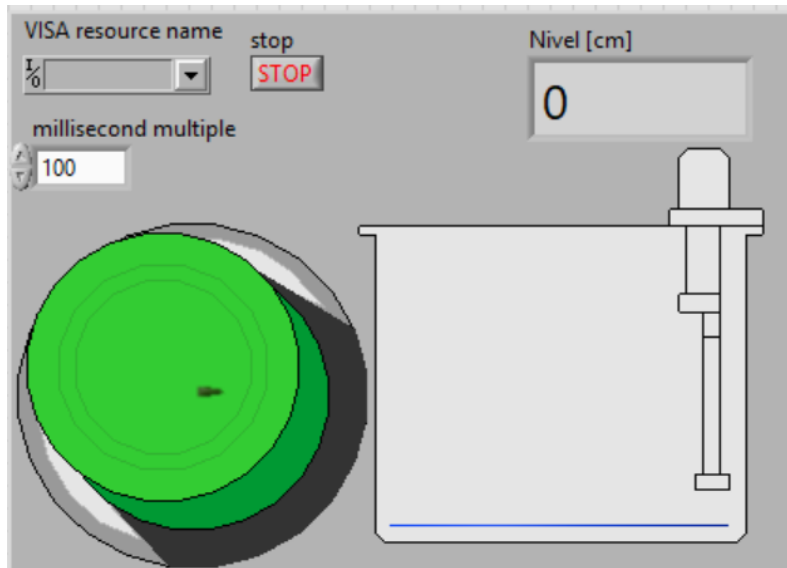
Fuente: elaborado por los autores.

Nota. La figura 23 representa la programación de la recepción y visualización de datos a través de LabVIEW.

Con la programación realizada, se plantea una interfaz vista en la figura 24 que cumpla con las condiciones habladas anteriormente y, además, permita un inicio/fin del sistema a elección del usuario.

### Figura 24

*Interfaz Gráfica LabView*



Fuente: elaborada por los autores.

Nota. La figura presenta la interfaz gráfica diseñada en LabView.



## Resultados

Tenga en cuenta que las pruebas y resultados mostrados a continuación, fueron llevados a cabo en condiciones de laboratorio.

### Sonda capacitiva

Durante el proceso de construcción de la sonda capacitiva, siguiendo las instrucciones establecidas en el capítulo 1, se obtuvo una sonda con una longitud de 95 cm, después del debido proceso requerido para enderezar ambos tubos, y así permitir el diseño y adaptación del acople mecánico. La siguiente figura muestra la sonda construida y la ubicación de los tubos de PE-Al-PE.

### Figura 25

*Sonda construida*



Fuente: elaborado por los autores.

Nota. La figura presenta a) la sonda construida y b) la ubicación de los tubos de PE-Al-PE.

Posterior a la construcción del sensor, se imprimió y ensambló al sensor la base encargada de la estabilidad de la sonda y correcto ingreso del agua hacia el sistema. En la siguiente figura se puede observar la base impresa en 3D.

### **Figura 26**

*Acople mecánico de la sonda*



Fuente: elaborado por los autores.

### ***Capacitancia real***

Una vez hecho el ensamble de la sonda capacitiva, se realizaron las primeras pruebas de medición en donde se empleó un tubo de 4" usado como tanque para contener el agua, y poder sumergir la sonda capacitiva. Para efectos de las pruebas, el tubo de 4" se llenó 2 cm por cada toma de datos, teniendo un rango de medición de 2 cm a 80 cm, para mantener segura la conexión entre la sonda capacitiva y el circuito de acondicionamiento. Este experimento se realizó dos veces, midiendo la capacitancia con un capacímetro con referencia de 10 kHz, de donde se tomaron 3 datos de medición por cada 2 cm añadidos de volumen de agua. Se realizaron dos tomas de datos, cada una con 3 valores, que fueron promediados entre sí y entre el promedio dado por cada toma realizada. La Tabla 5 muestra algunos de los valores obtenidos, y la figura 27 presenta el comportamiento de la capacitancia total según el volumen de agua en el tubo.

**Tabla 5**

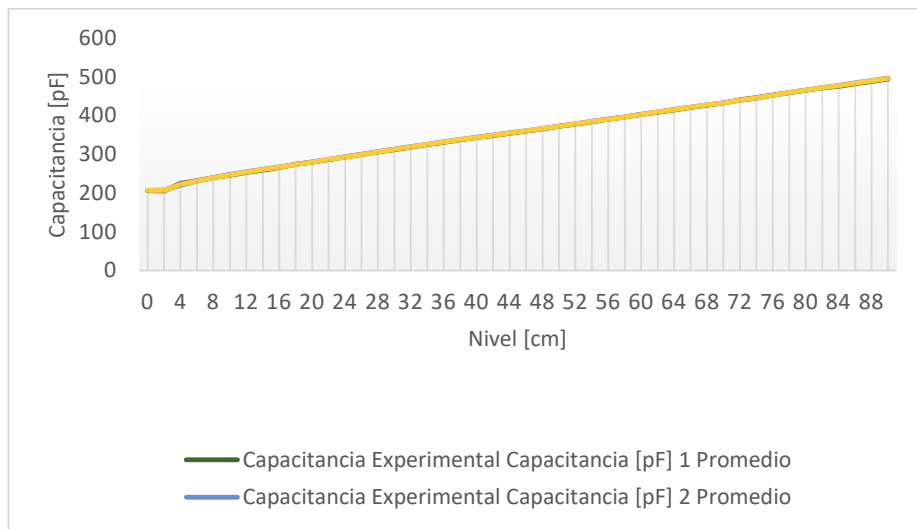
*Capacitancia real medida*

Nivel [cm]	Capacitancia [pF]		
	1	2	Prom.
	promedio	promedio	General
0	205,9	207,3	206,6
2	205,6	207,9	206,8
20	279,6	280,1	279,8
40	343,1	344,2	343,6
60	402,4	403,5	402,9
80	465,4	465,9	465,6
90	494,7	497,3	496,0

Fuente: Elaborado usando datos obtenidos con capacímetro.

**Figura 27**

*Comportamiento real de la capacitancia en función del nivel*



Fuente: elaborado usando datos obtenidos con capacímetro.

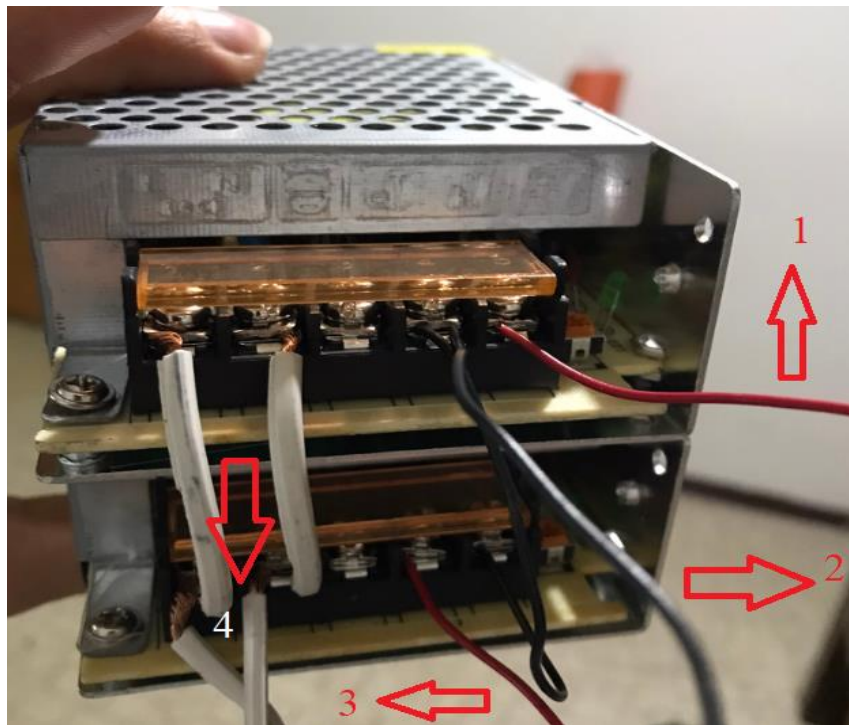
Nota. La figura 27 presenta el comportamiento real de la capacitancia de la sonda capacitiva construida.

### Circuito de acondicionamiento

Para la alimentación del circuito se utilizó dos fuentes conmutadas conectadas en serie, las cuales fueron conectadas 110V AC del toma corriente (4). El polo positivo de la primera fuente alimenta los +12 v (1) requeridos por los amplificadores operacionales, el polo negativo se conecta al positivo de la segunda fuente para establecer la tierra (2) del circuito, y el polo negativo de la segunda fuente se encarga de brindar -12 v (3) al circuito, de esta manera se asegura un comportamiento de los amplificadores operacionales aproximado al visto en las simulaciones. Esto se puede ver en la siguiente figura.

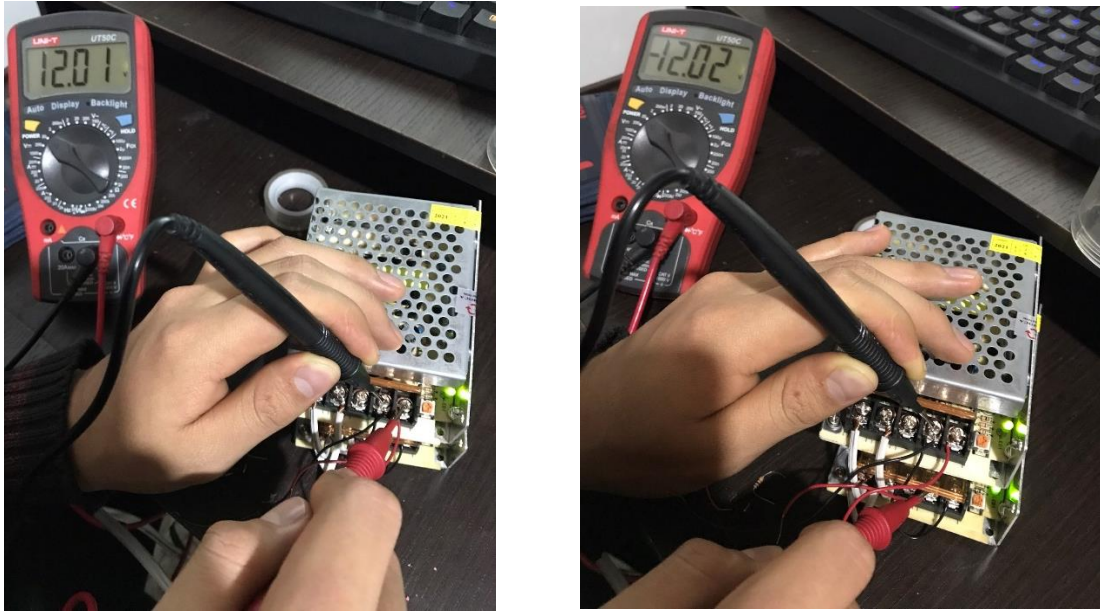
#### Figura 28

*Fuente de alimentación dual del sistema*



Fuente: elaborado por los autores.

Una vez configuradas las fuentes de voltaje, se obtuvieron los voltajes de alimentación requeridos para el módulo generador y los amplificadores operacionales; este voltaje se puede apreciar en la siguiente figura.

**Figura 29***Voltaje de salida fuentes en serie*

Fuente: elaborado por los autores.

Nota. La figura 29 muestra el voltaje de salida positivo (Izquierda) y negativo (Derecha) ofrecidos por las fuentes de voltaje conectadas en serie.

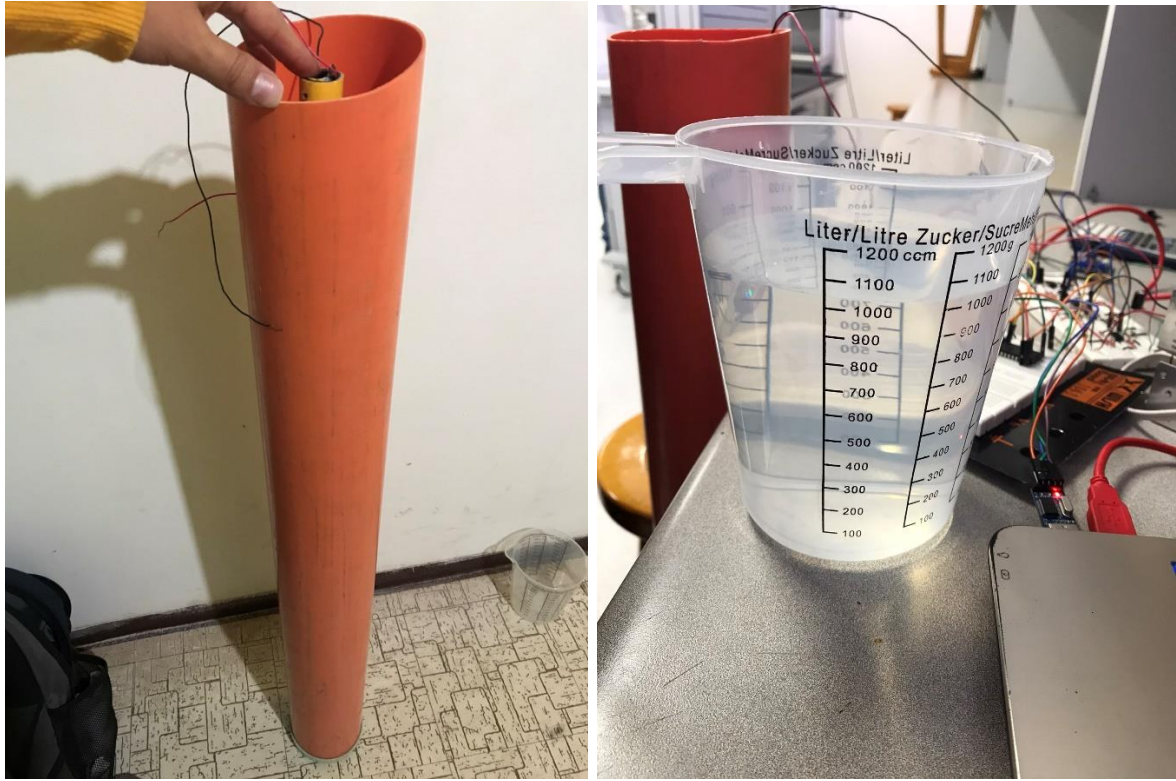
Para la prueba del sistema de medición, se utilizó un tubo de 4.5' de diámetro y una longitud de 1m. Las pruebas se hicieron cada 10 cm, por lo que se calculó el volumen que ocupada el agua a 10 cm de altura mediante la siguiente ecuación:

$$V_{10cm} = \pi \cdot r^2 \cdot h = 1038,689 \text{ cm}^3$$

Con el volumen requerido establecida, se dosificó en un recipiente que permitiese comprobar visualmente que el volumen utilizado. A continuación, se presenta una figura en la cual se puede ver el recipiente de almacenamiento de agua, así como el recipiente utilizado para medir el volumen equivalente a 10 cm de altura.

**Figura 30**

*Señales del generador, amplificador variador de fase y diferenciador básico*



Fuente: elaborado por los autores.

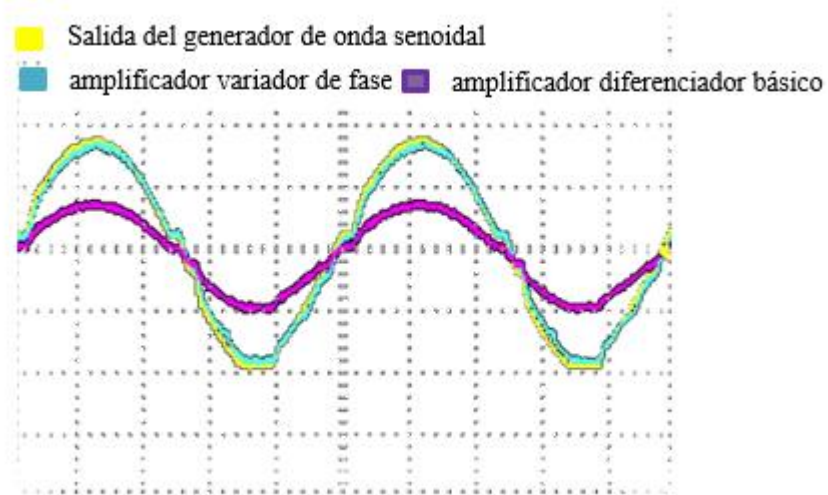
Nota. La figura 30 muestra el recipiente utilizado para almacenar agua (Izquierda) y el utilizado para dosificar la cantidad de volumen adecuada equivalente a 10 cm de altura (Derecha).

Posteriormente se tiene la alimentación necesaria para el circuito, se alimentó circuito y se obtuvieron las señales del módulo generador de señal (Amarillo), así como los amplificadores operacionales variador de fase (Cian) y diferenciador básico (Morado), vistas en la figura 30.

Posteriormente, se comprobó el correcto funcionamiento del rectificador de onda completa, la cual nos brindó una señal de salida vista en la figura 32. Después, se repitió el proceso de rectificación con salida DC, para la señal generada tal y como se explicó en el capítulo 2. Algunos de los datos obtenidos se presentan en la figura 33; la figura 34 presenta el comportamiento de la señal de salida.

**Figura 31**

*Señales del generador, amplificador variador de fase y diferenciador básico*

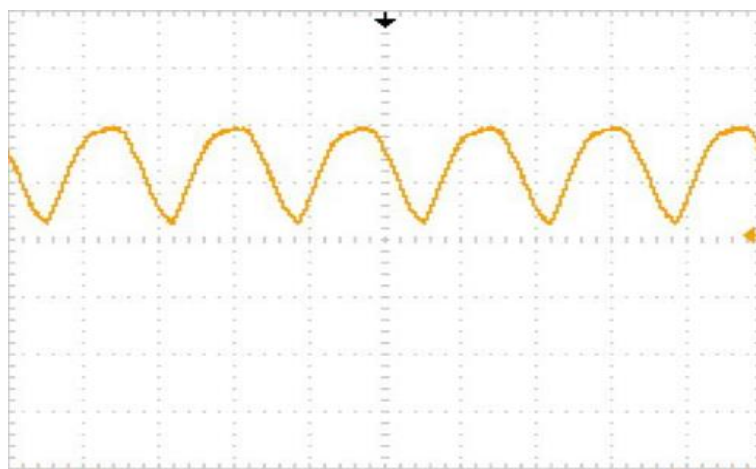


Fuente: elaborado por los autores.

Nota. La figura 31 presenta las señales obtenidas a la salida del generador de onda senoidal (Amarilla), el amplificador variador de fase (Cian) y el amplificador diferenciador básico (Morado); esta cuenta con un valor de voltaje máximo de 1,55 v, un voltaje mínimo de -1,9 v, división de tiempo de 25  $\mu$ s y una división de voltaje de 1 v/div.

**Figura 32**

*Señales de salida del rectificador de precisión de onda completa*

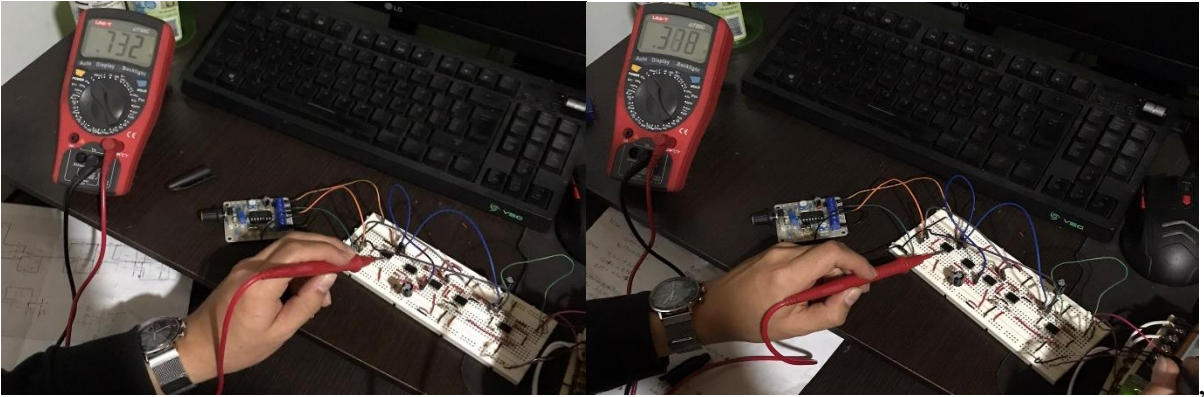


Fuente: elaborado por los autores.

Nota. La figura 32 presenta la salida del rectificador de precisión de onda completa, la cual cuenta con un valor de voltaje máximo de 0,9 v, un voltaje mínimo de 0,1 v, una división de tiempo de 25  $\mu$ s y una división de voltaje de 0,5 v/div.

### Figura 33

*Algunos de los valores medidos*

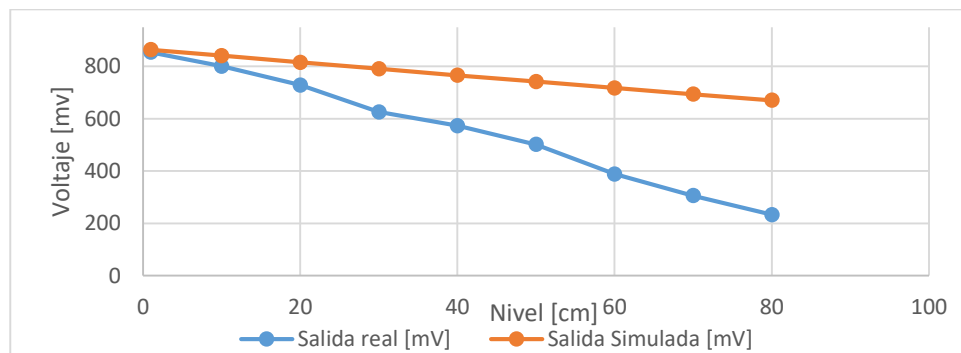


Fuente: elaborado por los autores.

Nota. La figura 33 presenta algunos valores de los medidos a la salida del circuito de acondicionamiento, con la respuesta equivalente a 20 cm (Izquierda) y 60 cm (Derecha). Elaborado por los autores.

### Figura 34

*Comportamiento del voltaje resultante real y simulado, en función del nivel*



Fuente: Elaborado usando datos obtenidos con multímetro.

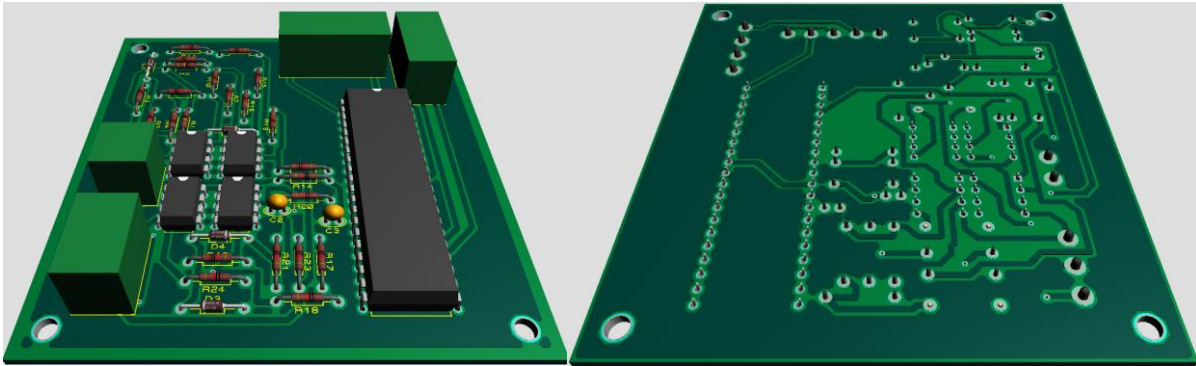


Nota. La figura presenta el comportamiento del voltaje resultante tanto real (Azul) como el simulado (Rojo) del circuito de acondicionamiento de la señal.

Ahora que se tiene un comportamiento esperado de la señal, se confirma que el circuito de acondicionamiento y se diseña la PCB del circuito vista en la figura a continuación.

### Figura 35

*Diseño PCB circuito de acondicionamiento*

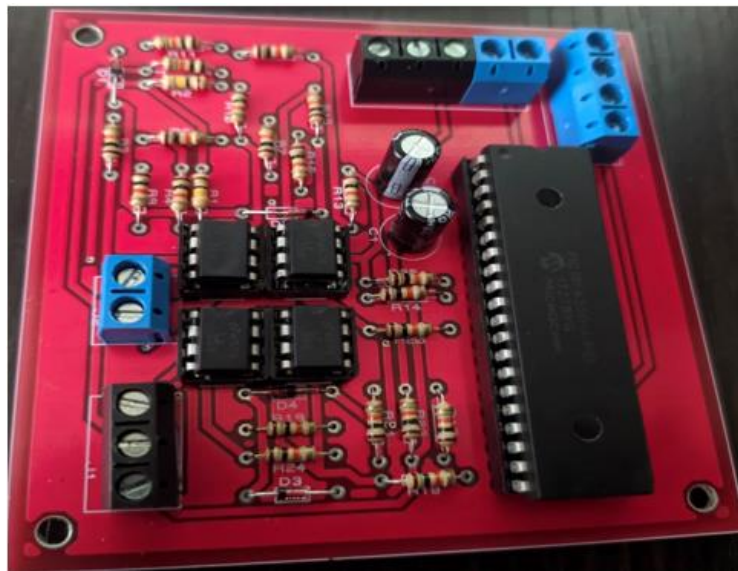


Fuente: elaborado por los autores.

Nota. La figura presenta el diseño de la placa PCB del circuito de acondicionamiento.

### Figura 36

*PCB circuito de acondicionamiento*



Fuente: elaborado por los autores.

## Interfaz gráfica

Tomando voltajes vistos en la figura 34 y teniendo en cuenta que 5V equivalen a 1023 bits en el microcontrolador; se halló el equivalente de los voltajes en bits y se calcularon los valores de m y b de la ecuación 6. La siguiente tabla muestra los bits obtenidos cada 10 cm de altura.

**Tabla 6**

*Bits equivalentes el nivel de agua*

Nivel [cm]	Bits
2	179
10	164
20	147
30	130
40	113
50	96
60	79
70	63
80	46

Fuente: Elaborado usando los datos obtenidos del microcontrolador.

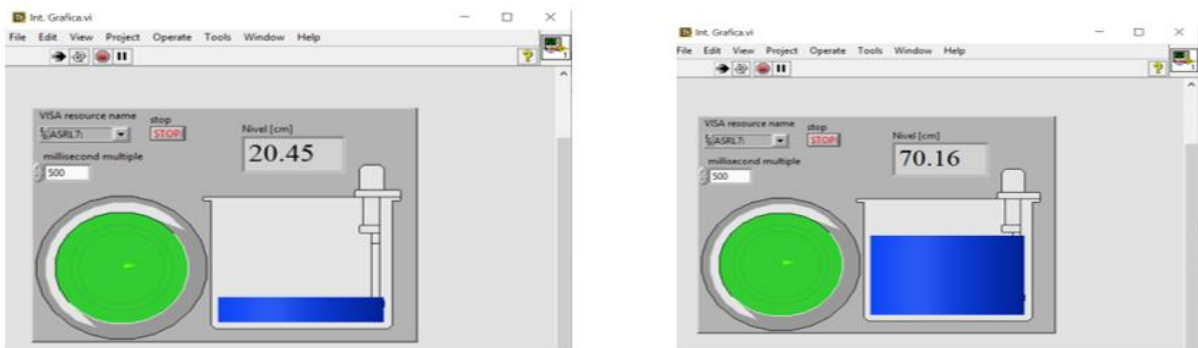
Con ayuda de Excel, la ecuación 6 quedó así:

$$Y = -0,59 \cdot x + 107,11 \quad (7)$$

En donde m = -0,59, b = 107,11 y x son los bits leídos en el microcontrolador que, una vez leídos, se reemplazan en la ecuación 7 para obtener su equivalente en el nivel de agua, presentado en cm; dicho dato se envía a través de un módulo USB RS 232 al computador, para ser mostrado posteriormente en la interfaz diseñada en LabView. La figura a continuación muestra los valores presentados en la interfaz en 20 cm y 70 cm de nivel de agua.

**Figura 37**

*Resultados interfaz gráfica en 20 cm y 70 cm de altura*



Fuente: elaborado por los autores.

Los valores de nivel tomados en la interfaz se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 7**

*Resultado nivel interfaz gráfica con respecto al nivel de agua en el recipiente*

Nivel Agua	Nivel Interfaz
10	9,91
20	20,45
30	30,21
40	40,06
50	49,85
60	59,93
70	70,16
80	79,89

Fuente: Elaborado usando los datos obtenidos por la interfaz gráfica.

**Características del sistema de medición**

Usando los datos de la figura 34, se calcularon las características del sensor explicadas a continuación.

### ***Rango y alcance***

Como se explicó anteriormente, el sensor capacitivo fue construido con dos tubos de 1 metro de longitud, adicionando 2 cm por la base ensamblada para evitar el contacto de las placas con el agua y asegurar un flujo de agua adecuado en el interior del sistema. Debido a las adecuaciones para conectar los electrodos al circuito de acondicionamiento, se dio un rango de seguridad de 20 cm en el límite superior del tubo, para asegurar que el agua no entre en contacto con los electrodos a través de la soldadura. Por lo tanto, se estableció un rango de medición de [2 cm, 80 cm], y un alcance de 78 cm. Este rango y alcance puede variar dependiendo del requerimiento del diseño del sensor.

### ***Exactitud, precisión y error relativo***

Usando los datos obtenidos del voltaje resultante en la figura 21 (Simulación) y voltaje resultante de la figura 34 (Experimental), se tomó como Voltaje de Referencia (V. Ref) el obtenido a través de la simulación; además, se calculó la precisión y exactitud mediante el promedio de los datos, desviación estándar muestral y error relativo, las cuales se calculan mediante las siguientes ecuaciones obtenidas del libro “*Instrumentos industriales, su ajuste y calibración,*” en el capítulo 1 “*Generalidades*” elaborado por (Creus Sole, 2009)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (8)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (9)$$

$$Er = \frac{\bar{x} - x_t}{x_t} * 100\% \quad (10)$$

Con estas ecuaciones, se procede a desarrollar la siguiente tabla:

**Tabla 8***Precisión, exactitud y error relativo del sistema de medición*

Nivel [cm]	V. Ref [mV]	V. Real [mV]	$\bar{x}$ [mV]	s	%Er
20 cm	0,816	0,732	0,724	0,012	-11,263
		0,706			
		0,728			
		0,729			
40 cm	0,766	0,578	0,558	0,016	-27,193
		0,541			
		0,563			
		0,549			
60 cm	0,718	0,378	0,387	0,011	-46,035
		0,400			
		0,392			
		0,379			
80 cm	0,670	0,233	0,229	0,007	-65,876
		0,236			
		0,221			
		0,225			

Fuente: Elaborado usando datos obtenidos con multímetro.

Nota. La tabla presenta los datos tenidos en cuenta para el cálculo de la exactitud y precisión del sistema de medición, mediante el error relativo y la desviación estándar, calculados según el voltaje obtenido en función del nivel de agua.

Además, también se calcularon estas variables para el comportamiento de la sonda capacitiva, de esta manera se puede inferir un correcto funcionamiento ya sea en la sonda o en el circuito de acondicionamiento. Para la siguiente tabla, se tomó la capacitancia de referencia (C. Ref) con los datos de Capacitancia Equivalente presentados en la figura 6 y se tomó la capacitancia real con los datos presentados en la figura 27, de donde se obtuvo como resultado la siguiente tabla:

**Tabla 9***Precisión, exactitud y error relativo de la sonda capacitiva*

Nivel [cm]	C. Ref [pF]	C. Real [pF]	$\bar{x}$ [pF]	s	%Er
20	258,80	279,70	279,73	0,26	8,09
		279,60			
		279,50			
		280,10			
40	306,57	343,10	343,38	0,56	12,01
		343,00			
		343,20			
		344,20			
60	354,34	402,40	402,65	0,51	13,63
		402,30			
		402,50			
		403,40			
80	399,72	465,50	465,53	0,26	16,46
		465,40			
		465,30			
		465,90			

Fuente: Elaborado usando datos obtenidos con capacímetro.

Nota. La tabla presenta los datos tenidos en cuenta para el cálculo de la exactitud y precisión de la sonda capacitiva; mediante el error relativo y la desviación estándar, calculados según la capacitancia obtenida en función del nivel de agua.

***Repetibilidad y reproducibilidad***

El método de la media y el rango ( $\bar{X}$  &  $R$ ) es un enfoque que proporcionará una estimación tanto de la repetibilidad como de la reproducibilidad de un sistema de medición. A diferencia del método “Rango”, este enfoque permitirá descomponer la variación del sistema de medición en dos componentes separados, la repetibilidad y la reproducibilidad. Sin embargo, la variación debida a la interacción entre el evaluador y la pieza/equipo no se tiene en cuenta en el análisis. (Chrysler Group LLC et al., 210 C.E.) Para determinar estas características, se tendrá en cuenta el valor de las constantes seleccionado de la siguiente tabla:

**Tabla 10**

*Valor de constantes K1, K2 y K3.*

Número de ensayos	2	3
K1	0,8862	0,5908
Número de operadores	2	3
K2	0,7071	0,5231
Numero de Partes	3	4
K3	0,5231	0,4467

Fuente: Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, y General Motors Corporation Supplier. (210 C.E.). *Measurement systems analysis* (4ta ed.). AIAG.

Nota. La tabla presenta el valor de K1, K2 y K3 según el número de ensayos, operadores y partes, respectivamente.

A continuación se presentan los pasos seguidos para determinar la repetibilidad y reproducibilidad planteados por (Chrysler Group LLC et al., 210 C.E.)

1. Determinar el número de muestras a ensayar (n), número de operadores (m) y el número de ensayos que efectuará cada inspector (r). Estableciendo n como los valores de nivel a tener en cuenta, se toman estas variables así: n = 4, r = 3 y m = 2.
2. Cada operador lleva a cabo los ensayos en cada valor de nivel de agua correspondiente, recopilando los resultados obtenidos. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 11**

*Resultado ensayos realizados por cada operador según el nivel de agua*

Nivel	Operador 1			Operador 2		
	1	2	3	1	2	3
20 cm	0,732 V	0,706 V	0,728 V	0,718 V	0,73 V	0,729 V
40 cm	0,573 V	0,541 V	0,563 V	0,553 V	0,565 V	0,549 V
60 cm	0,378 V	0,4 V	0,392 V	0,388 V	0,376 V	0,379 V
80 cm	0,233 V	0,236 V	0,221 V	0,224 V	0,212 V	0,225V

Fuente: Elaborado usando datos obtenidos con multímetro.

Nota. La figura presenta los resultados de los ensayos realizados por los operadores en cada uno de los ensayos, en cada uno de los niveles descritos.

3. Se repiten las mediciones, en diferente orden y sin observar las mediciones anteriormente realizadas.
4. Con los datos de la tabla 11, se calcula el rango y promedio en cada valor de nivel, de cada operador, mediante las siguientes ecuaciones, dadas por (Llamosa et al., 2007).

$$R_i = x_{m\acute{a}x} - x_{m\acute{i}n} \tag{11}$$

$$X_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m x_i \tag{12}$$

En donde x indica en dato en cada ensayo.

5. Se promedia los rangos obtenidos por cada operador, mediante la siguiente ecuación dada por (Llamosa et al., 2007):

$$\bar{R}_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \tag{13}$$



Reemplazando, se obtuvo:  $\bar{R}_1 = 0,024 \text{ V}$  y  $\bar{R}_2 = 0,013 \text{ V}$ .

6. Calcular el promedio de los rangos de cada operador, así:

$$\bar{\bar{R}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{R}_i \quad (14)$$

Reemplazando, se obtuvo:  $\bar{\bar{R}} = 0,019 \text{ V}$ .

7. Se calcula el promedio de los valores obtenidos de la ecuación 12, mediante la siguiente ecuación:

$$\bar{X}_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_i \quad (15)$$

De donde se obtienen los valores  $\bar{X}_1 = 0,4753 \text{ V}$  y  $\bar{X}_2 = 0,4707 \text{ V}$ .

8. Se calcula el rango entre  $\bar{X}_1$  y  $\bar{X}_2$ , utilizando la siguiente ecuación:

$$\bar{X}_{Diff} = \bar{X}_1 - \bar{X}_2 = 0,0046 \text{ V} \quad (16)$$

9. Se calcula el promedio de los datos de ambos operadores en cada nivel, de donde se obtienen  $X_{20cm} = 0,72 \text{ V}$ ,  $X_{40cm} = 0,56 \text{ V}$ ,  $X_{60cm} = 0,39 \text{ V}$  y  $X_{80cm} = 0,23 \text{ V}$ .

10. Se halla en rango entre los promedios de cada nivel, de la siguiente ecuación:

$$X_p = X_{20cm} - X_{80cm} \quad (17)$$

De donde se obtiene  $X_p = 0,50 \text{ V}$ .

11. Se calcula la Repetibilidad o Variación del Equipo (EV), mediante la siguiente ecuación y el valor de k1 tomado de la tabla 10.

$$EV = \bar{\bar{R}} \cdot k_1 \quad (18)$$

De donde se obtiene  $EV = 0,011 \text{ V}$ .

12. Se calcula la Reproducibilidad o Variación Asociada con respecto al operador (AV), mediante la siguiente ecuación y el valor de k2 tomado de la tabla 10.

$$AV = \sqrt{\left(\bar{X}_{Diff} \cdot k_2\right)^2 - \left(\frac{EV^2}{n \cdot r}\right)} \quad (19)$$

Reemplazando con los valores obtenidos, se obtiene que  $AV = 0,001 \text{ V}$ .

13. Se calcula la Repetibilidad – Reproducibilidad denominada GRR, mediante la siguiente ecuación:

$$GRR = \sqrt{EV^2 + AV^2} \quad (20)$$

Reemplazando y operando, se obtiene  $GRR = 0,011$  V.

14. Se calcula la variación de la parte (PV) en este caso, nivel, mediante la siguiente ecuación:

$$PV = R_p \cdot k_2 \quad (21)$$

Reemplazando, se obtiene  $PV = 0,22$  V.

15. Se calcula la variación total (TV), mediante la siguiente ecuación:

$$TV = \sqrt{GRR^2 + PV^2} \quad (22)$$

Reemplazando, se obtiene una variación total  $TV = 0,223$  V.

16. Ahora que se conoce la variación total, se calcula el %Repetibilidad, %Reproducibilidad y el %GRR, mediante las siguientes ecuaciones:

$$\%Repetibilidad = \frac{EV}{TV} \cdot 100 \quad (23)$$

$$\%Reproducibilidad = \frac{AV}{TV} \cdot 100 \quad (24)$$

$$\%GRR = \frac{GRR}{TV} \cdot 100 \quad (25)$$

Reemplazando, se obtiene  $\%Repetibilidad = 4,901\%$ ,  $\%Reproducibilidad = 0,332\%$  y  $\%GRR = 4,912\%$ .

17. Según (Llamosa et al., 2007), los resultados se interpretan mediante los siguientes parámetros.

- a. Si  $\%GRR < 10\%$ , el sistema de medición es aceptable
- b. Si  $10\% \leq \%GRR \leq 30\%$ , el sistema de medición puede ser aceptable según su uso, aplicación, costo del instrumento de medición, costo de reparación.
- c. Si  $30\% > \%GRR$  el sistema de medición es considerado como no aceptable y requiere de mejoras en cuanto al operador, equipo, método, condiciones y demás.

Después de analizar la información que resulta del estudio de repetibilidad y reproducibilidad, es posible evaluar las causas que originan la variación del sistema o del instrumento:

- a. Si la repetibilidad es mayor a la reproducibilidad las posibles causas son: El instrumento necesita mantenimiento, el equipo requiere ser rediseñado para ser más rígido, el montaje o ubicación donde se efectúan las mediciones necesita ser mejorado y/o, existe una variabilidad excesiva entre las partes.
- b. Si la reproducibilidad es mayor que la repetibilidad, las causas pueden ser: El operador necesita mejor entrenamiento en cómo utilizar y como leer el instrumento, la indicación del instrumento no es clara, No se han mantenido condiciones de reproducibilidad (ambientales, montaje, ruidos, etc.) y/o el instrumento de medición presenta deriva.

### *Sensibilidad y linealidad*

Según (Pallás Areny, 2007), “la sensibilidad o factor de escala es la pendiente de la curva de calibración, que puede ser constante o no a lo largo de la escala de medida” y, para calcular esta característica, se graficaron los datos (Ver Figura 37) obtenidos dispersos y, con ayuda de Excel, se representó la línea de tendencia o curva de calibración, y se halló la ecuación de linealidad, así como su coeficiente de determinación  $R^2$ , la cual, según (Gutiérrez Pulido y Salazar, 2012) se define como “la proporción de la variabilidad en los datos, que es explicada por el modelo”. De donde se obtuvieron la ecuación 6 y 7:

$$V_{R[V]} = -0,008 \cdot x + 0,878 \quad (26)$$

$$R^2 = 0,9958 \quad (27)$$

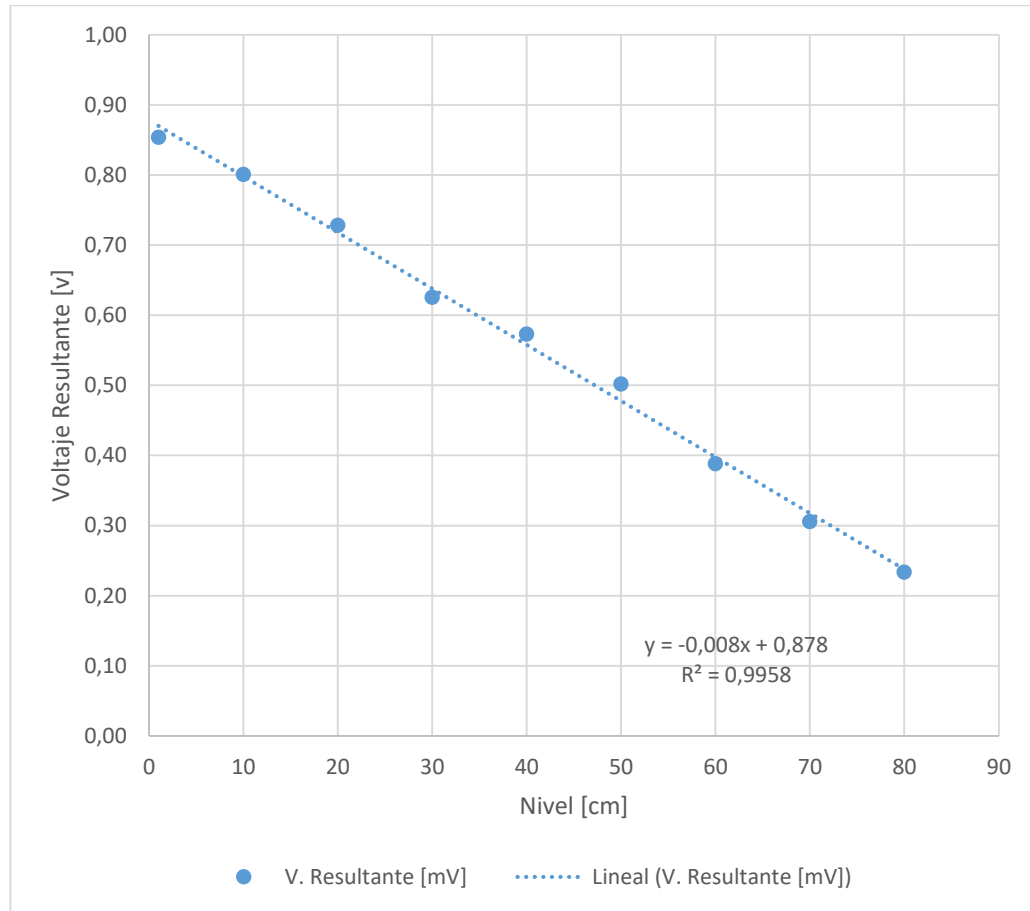
De donde  $V_r$  es el voltaje resultante dado en  $V$  y  $x$  es el nivel en  $cm$ . Teniendo en cuenta un comportamiento lineal visto en la ecuación 6, se obtiene que la pendiente es  $m = -0,008$  y  $b = 0,878$ . Según (Pallás Areny, 2007), la sensibilidad  $S$  para un sensor con respuesta lineal está dada por la siguiente ecuación.

$$S = \frac{d(m \cdot x + b)}{dx} \quad (28)$$

Reemplazando la ecuación 26 en 28, se obtiene que  $S = m$ , por lo tanto, la sensibilidad del sensor es  $S = -0,008 \text{ V/cm}$ .

**Figura 38**

*Curva de calibración del voltaje resultante con respecto al nivel*



Fuente: elaborado usando datos obtenidos con multímetro.

Nota. La figura presenta los valores de voltaje resultante obtenidos experimentalmente con respecto al nivel de agua, además, presenta la ecuación de comportamiento de la curva de calibración y el coeficiente de determinación.

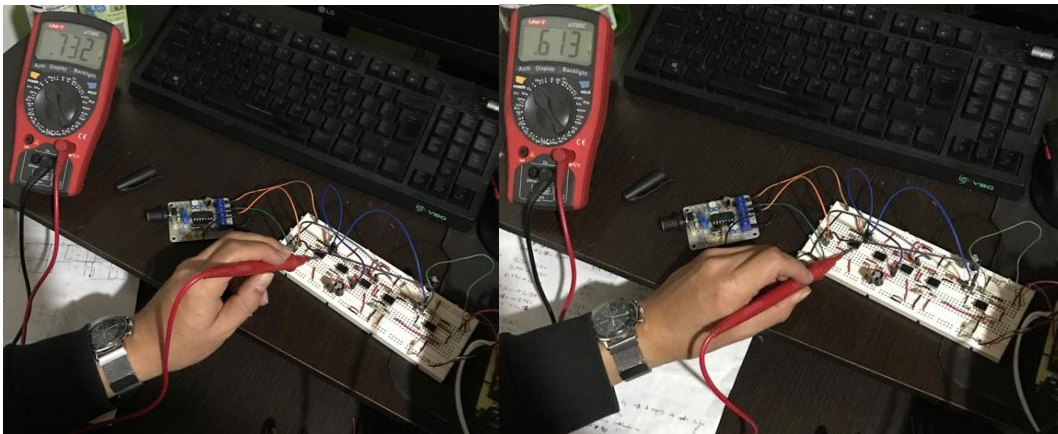
Teniendo en cuenta el coeficiente de determinación dado en la ecuación 27, se puede decir que el 99,58% de la variación observada en el voltaje resultante, es explicado por el modelo de línea recta.

### *Histéresis*

Según (Creus Sole, n.d.), para calcular la histéresis se halla “la diferencia máxima que se observa en los valores indicados por el índice o señal de salida para el mismo valor cualquiera del campo de medida, cuando la variable recorre toda la escala en los 2 sentidos, ascendente y descendente”. Igualmente, presenta la ecuación para calcular la histéresis en el capítulo 1 “Generalidades” del libro “Instrumentación Industrial”. Para el cálculo de la histéresis se utilizarán los valores de voltaje vistos en la siguiente figura.

### **Figura 39**

*Datos usados para calcular la histéresis*



Fuente: elaborado por los autores.

Los datos obtenidos en la anterior figura, fueron tomados en 20 cm con el nivel de agua ascendente (Izquierda) y descendente (Derecha). Teniendo en cuenta un rango de medida de 0 a 80 cm, la ecuación queda así:

$$H = \frac{0,75 - 0,613}{80} * 100 = 0,171\% \quad (29)$$

De donde se obtiene una histéresis  $H = 0,171\%$ .

### ***Zona muerta***

El sistema de medición presenta una zona muerta de entre 0 cm y 2 cm de altura, debido a la altura del soporte mecánico diseñado, lo que le impide presentar variaciones en la capacitancia del sensor. Por lo tanto, la zona muerta tiene un valor de 2,5%.

### ***Tiempo de respuesta y tiempo muerto***

Dado que la señal de salida posee un comportamiento de un sistema de primer orden, se tendrá en cuenta las ecuaciones 30 y 31 indicadas en (Alfaro Ruíz, 2011) para el cálculo del tiempo muerto  $t_m$  y el tiempo de respuesta  $\tau$ .

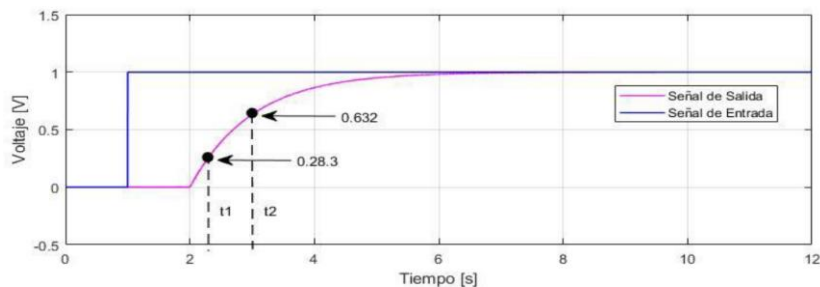
$$\tau = \frac{3}{2} \cdot (t_{63,2\%} - t_{28,3\%}) \quad (30)$$

$$t_m = t_{63,2\%} - \tau \quad (31)$$

En donde 63,2% y 28,3% son los puntos seleccionados por Smith de la curva de reacción del sistema, por lo tanto,  $t_{63,2\%}$  y  $t_{28,3\%}$  son el tiempo medido en el que se llegó al valor de los puntos. La ubicación de los puntos de Smith se puede ver en la siguiente figura.

**Figura 40**

*Método de smith*



Fuente: Henriquez, J., y Martínez, J. (2019). *Identificación y sintonización de controladores PID para procesos de integración. Métodos de sintonización*. (Trabajo de grado, Universidad de la Costa - CUC)

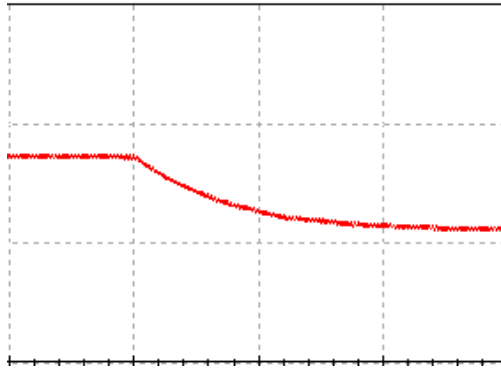
<https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/5557/Identificaci%C3%B3n%20y%20sintonizaci%C3%B3n%20de%20controladores%20PID%20para%20procesos%20de%20integraci%C3%B3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Nota. La imagen presenta la ubicación de los puntos del método de smith en la curva de reacción del sistema.

Una vez conocida la ubicación de los puntos de Smith, haciendo uso de la simulación, se visualizó la curva de reacción del sistema en un cambio de capacitancia equivalente a los niveles de agua de 2 cm y 80 cm; obteniendo así la respuesta vista en la figura 41.

### Figura 41

*Curva de reacción del sistema*



Fuente: elaborado por los autores.

Nota. La figura presenta la curva de reacción del sistema en un cambio de capacitancia equivalente desde 2 cm a 80 cm del nivel de agua en el recipiente. La escala en el eje vertical es de 500 mV/Div y 2 us/Div en el eje horizontal.

De esta curva, se obtuvieron los puntos  $t_{63,2\%} = 1,634$  ms y  $t_{28,3\%} = 0,615$  ms; reemplazando estos valores de tiempo en la ecuación 30 y, posteriormente, en la ecuación 31, se obtuvo un tiempo de respuesta  $\tau$  de 1,528 ms y un tiempo muerto  $t_m$  de 0,106 ms.

### *Velocidad de respuesta*

Para el cálculo de la velocidad de respuesta, se calculó el cociente entre la variación de voltaje vista en el la curva de reacción del sistema, y el tiempo de respuesta calculado anteriormente. De donde se obtuvo:

$$V_r = \frac{\Delta V}{\tau} = \frac{301,132 \text{ mV}}{1,528 \text{ ms}} = 197,076 \frac{\text{V}}{\text{s}}$$

***Comparativa***

Se estableció una tabla comparativa en donde se presentan las características obtenidas por el presente documento, y por otras investigaciones, las cuales se presentaron anteriormente en el anteproyecto. De esta manera, establecer un adecuado o inadecuado funcionamiento del sensor. Dicha tabla se presenta a continuación. La tabla se presenta a continuación.



**Tabla 12**

*Comparación de las características*

Característica	Actual	(Rairán Antolines et al., 2003)	(Quintáns et al., 2010)	(Jiménez et al., 2010)	(Milosavljević et al., 2012)	(Loizou et al., 2015)	(Qurthobi et al., 2016)	(Gong et al., 2016)	(Geethamani et al., 2018)
Rango	2cm-80cm	0cm-50cm	0cm-12cm	-	0cm-100cm	0cm-200cm	0cm-30cm	0mL-50mL	0cm-18cm
Alcance	78cm	50cm	12cm	-	100cm	200cm	30cm	-	18 cm
Exactitud (Er)	-11,263% -65,876%	-	0,469%	-	-	0,61%	-	~6%.	-
Precisión (s)	0,012 0,007	2,2 %	-	-	-	-	-	-	-
%Repetibilidad	4,901%	16 %	-	-	-	-	-	-	-
%Reproducibilidad	0,332%	-	-	-	-	-	-	-	-
Sensibilidad	-8 mV/cm	-	-	-	-	-	-	-	3,5 mV/mm
Linealidad ( $R^2$ )	99,58%	Lineal	-	“Lineal”	-	-	“Aprox lineal”	-	-
%Histéresis	0,171%	-	-	-	-	-	-	-	-
Zona Muerta	2,5%.	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Elaborado usando datos obtenidos de marco teórico y resultados experimentales.

*Nota. La tabla presenta los datos obtenidos de las características del presente documento, con respecto a algunos otros documentos desarrodos con sensores de igual principios de funcionamiento*

## Conclusiones

Teniendo en cuenta que la precisión, según (Creus Sole, 2009), es “el grado de dispersión del resultado de la medida cuando esta se repite un número determinado de veces bajo condiciones especificadas.” Y viendo los valores obtenidos de las tablas 8 y 9, se puede inferir que tanto el sistema de medición como la sonda capacitiva, poseen una buena precisión, puesto su valor  $s$  es aproximado a 0. Por otra parte, según (Creus Sole, 2009), la exactitud es “el grado de aproximación al valor verdadero. En otras palabras, es la cualidad de un instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al verdadero valor de la magnitud medida.” Y, viendo los valores obtenidos en el error relativo ( $E_r$ ) (De -11% a -65% para el sistema y de 8% a 16% de la sonda capacitiva), se puede inferir que la sonda capacitiva tiene una exactitud promedio, mientras que el sistema de medición posee una mala exactitud.

Por otra parte, el circuito de acondicionamiento tiene una amplia oportunidad de mejora, puesto que a pesar de contar con unas muy buenas características tales como precisión, repetibilidad, reproducibilidad, linealidad, entre otras, como se puede apreciar en la tabla 12. Si se compara la exactitud obtenida por (Loizou et al., 2015) en la cual asegura un 0,61%, lo cual es considerado bueno por su proximidad a 0; se puede concluir que la exactitud obtenida el circuito de acondicionamiento (MAX -65%) es deficiente. Eso se puede deber a ruidos en el sistema producidos por estática, teniendo en cuenta que los amplificadores operacionales CMOS LF 353 son sensibles a la misma, además de ruidos producidos por capacitancias e inductancias parásitas presentes en las conexiones de la sonda capacitiva con el circuito de acondicionamiento.

Con las conclusiones expuestas anteriormente y comparando las características obtenidas en el presente documento, con las características existentes en las demás investigaciones de la misma área (Vistas en la tabla 12), se puede concluir que el sensor cuenta con buenas características.

### **Recomendaciones**

Se recomienda el uso de amplificadores operacionales más específicos (Tales como amplificadores de instrumentación, o de precisión) que posean un ancho de banda de trabajo por encima de 100 kHz, para disminuir la reactancia producida por el agua y estabilizar la señal de la capacitancia del sensor que ingresa al circuito de acondicionamiento. Además de, por supuesto, generar una señal AC de altas frecuencias ( $f \geq 100\text{k Hz}$ ) que aprovechen el ancho de banda de los amplificadores operacionales.

También, se recomiendan configuraciones al circuito de acondicionamiento que brinden un aislamiento a la estática, aislamiento de tensión, cable de instrumentación para la sonda y un convertidor ADC de más de 10 bits. Lo anterior, con el objetivo de obtener una reducción del error relativo máximo obtenido (De -61%) probablemente hasta en un 40%. Esto permitiría el uso de este sensor en aplicaciones con medidas superiores a 1 m, ya que se presentan variaciones de aproximadamente 80 mv por cada 10 cm de altura; además de que la precisión también se vería afectada positivamente por estos cambios, ya que también mitigaría los ruidos presentados por capacitancias o inductancias parásitas presentes en las conexiones de la sonda capacitiva y el circuito de acondicionamiento. Con estas mejoras, se permitiría al sensor el ser usado en aplicaciones más precisas, que requieran esta mejora en las características.

### Referencias

- Alfaro Ruíz, V. M. (2011). *Identificación de procesos sobrearmortiguados utilizando técnicas de lazo abierto*. *Revista Ingeniería*, 11(1–2). <https://doi.org/10.15517/ring.v11i1-2.605>
- Bento, R. T., Silva, R. W. O., Dias, L. A., Ferrus Filho, A., y Pitta, A. J. C. (2019). Design, development and application of a real-time capacitive sensor for automatically measuring liquid level. *SN Applied Sciences*, 1(7), 1–8. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0770-3>
- Boylestad, R. (2004). *Introducción al análisis de circuitos*. (10a ed.). Pearson Education Inc.
- Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, y General Motors Corporation Supplier. (sf). *Measurement systems analysis* (4a ed.). AIAG.
- Coughlin, R. F., y Driscoll, F. F. (1993). *Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales* (4a ed.). Prentice Hall Hispanoamericana.
- Creus Sole, A. (sf). *Instrumentación industrial* (8a ed.). Alfaomega.
- Creus Sole, A. (2009). *Instrumentos industriales, su ajuste y calibración*. (3a ed.). Alfaomega.
- Endress Hauser. (2015). *Medición y detección de nivel: gama de productos para aplicaciones con líquidos y sólidos granulados*. [https://hhcck.business.page/p/Water-Level-Sensor-for-Tank/100?hl=en&gclid=CjwKCAiA7IGcBhA8EiwAFfUDsY01nuV7wH3yOhq7YaH\\_5S6Rl8ZuWxWpr9OVkReZJJW3Oefqc9hS1hoCoRMQAvD\\_BwE](https://hhcck.business.page/p/Water-Level-Sensor-for-Tank/100?hl=en&gclid=CjwKCAiA7IGcBhA8EiwAFfUDsY01nuV7wH3yOhq7YaH_5S6Rl8ZuWxWpr9OVkReZJJW3Oefqc9hS1hoCoRMQAvD_BwE)
- Geethamani, R., Sheeba Rani, S., Ramyarani, N., Pavithra, C., y In, G. A. (2018). Non-contact continuous capacitive liquid level sensing. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 119(12), 1921–1930.
- Gong, C. A., Member, S., Chiu, H. K., Huang, L. R., Lin, C. H., Hsu, Z. D., y Tu, P. (2016). Low-cost comb-electrode capacitive sensing. *IEEE Sensors Journal*, 16(9), 2896–2897.
- Gutiérrez Pulido, H., y Salazar, R. (2012). Análisis y diseño de experimentos. *Métodos y técnicas cualitativas y cuantitativas aplicables a la investigación en ciencias sociales* (3a ed.). McGraw-Hill/Interamericana. <http://eprints.uanl.mx/8625/1/7>. Metodología cap 19 solo capítulo.pdf%0Ahttps://www.academia.edu/40887991/Estadística\_Elemental\_10ma\_Edición\_Robert\_Johnson%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/44401609\_Analisis\_y\_Disenio\_de\_Experimentos
- Intersil. (2001). Precision waveform generator/voltage controlled oscillator. *Data Sheet*, 2864,

1–12.

- Jiménez, V. P., Rubiano Fonseca, A., y Amaya, D. (2010). Diseño y construcción de un sensor capacitivo de nivel. *Iteckne*, 7(2), 199–206. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v7i2.288>
- Llamosa, L. E., Meza Contreras, L. G., y Botero, M. (2007). Estudio de repetibilidad y reproducibilidad utilizando el método de promedios y rangos para el aseguramiento de la calidad de los resultados de calibración de acuerdo con la norma técnica NTC-ISO/IEC. *Scientia et Technica*. 35, 455–460.
- Loizou, K., Koutroulis, E., Zalikas, D., y Liontas, G. (2015). A low-cost capacitive sensor for water level monitoring in large-scale storage tanks. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, 2015*, 1416–1421. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125295>
- Milosavljević, V., Mihajlović, Ž., Rajs, V., y Živanov, M. (2012). Implementation of low cost Liquid Level Sensor (LLS) using embedded system with integrated capacitive sensing module. 2012 Mediterranean Conference on Embedded Computing, *MECO, 2012*, 58–61.
- Moviltronics. (s.f.). *Módulo generador señales Icl8038 senoidal cuadrada triangulo*. [https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-628719855-modulo-generador-senales-icl8038-senoidal-cuadrada-triangulo-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-628719855-modulo-generador-senales-icl8038-senoidal-cuadrada-triangulo-_JM)
- Pallás Areny, R. (2007). *Sensores y acondicionadores de señal*. (4a ed.). Marcombo S.A.
- Quintáns, C., Marcos, J., y Pérez, S. A. (2010). Developing of low cost capacitive sensors for laboratory classes. 2010 IEEE Education Engineering Conference. *EDUCON. 2010*, 445–450. <https://doi.org/10.1109/EDUCON.2010.5492542>
- Qurthobi, A., Iskandar, R. F., Krisnatal, A., y Weldzikarvina. (2016). Design of capacitive sensor for water level measurement. *Journal of Physics: Conference Series*, 776(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/776/1/012118>
- Rairán Antolines, J. D., Olarte Novoa, Y., y Peñuela Méndez, C. (2003). Diseño y construcción económica de sensores, un aporte a la industria y a la academia. *Ingeniería* 8(1), 50–57.
- Restrepo, A., Barco, J., Caicedo Bravo, E., y Barandica, A. (2000). *Medicion de nivel en líquidos inmiscibles con un sensor ultrasónico inteligente*. [https://www.researchgate.net/publication/279752617\\_MEDICION\\_DE\\_NIVEL\\_EN\\_LIQUIDOS\\_INMISCIBLES\\_CON\\_UN\\_SENSOR\\_ULTRASONICO\\_INTELIGENTE](https://www.researchgate.net/publication/279752617_MEDICION_DE_NIVEL_EN_LIQUIDOS_INMISCIBLES_CON_UN_SENSOR_ULTRASONICO_INTELIGENTE)