

# Diseño y construcción de un sensor capacitivo de nivel

## Vladimir, Prada Jiménez

Ingeniero en Mecatrónica. Grupo de investigación VOLTA, Bogotá, Colombia. Joven Investigador. Universidad Militar Nueva Granada. volta@unimilitar.edu.co

## Astrid Rubiano Fonseca

Ingeniero en Mecatrónica. Bogotá, Colombia. Docente de la Facultad de Ingeniería programa de Tecnología en Electrónica y Comunicaciones. Universidad Militar Nueva Granada. astrid.rubiano@unimilitar.edu.co

## Darío Amaya

Ingeniero Electrónico. Grupo de investigación GAV, Docente de la Facultad de Ingeniería Mecatrónica. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia gav@unimilitar.edu.co

**Resumen—** Este artículo muestra el desarrollo de un sensor de nivel para ser utilizado en la industria con el fin de medir la cantidad de un líquido en tanques. Se comienza por explicar cómo se afrontaron los principales problemas para la construcción, interferencias y aislamiento del sensor. Se realiza el diseño del sensor en CAD y la construcción a partir de los planos generados en el software. Con el sensor construido se evalúa el comportamiento ante diferentes tipos de líquido y se elabora el diseño del circuito para eliminar los ruidos y linealizar el comportamiento. Con el previo diseño del circuito se realiza el ensamble entre el sensor y el PC. Se elabora un entorno gráfico en el PC vía USB para que el usuario pueda supervisar el comportamiento del sensor, en la programación del entorno gráfico se diseña un filtro pasa-bajo discreto con el fin de mejorar la respuesta del sensor ante perturbaciones. De acuerdo a los datos obtenidos se verifica el modelo matemático y se estiman los valores de capacitancia de diferentes líquidos al trabajar como dieléctrico. El comportamiento del sensor es lineal y funciona para tanques con diferentes diámetros, una altura máxima de 25 cm y para diferentes líquidos.

**Palabras clave—** Capacitancia, Dieléctrico, Faradios, Culombios, Teflón.

**Abstract—** This article shows the development of a level sensor for use in industry to measure the amount of liquid in tanks. It begins by explaining how confront the problems of construction, interference and isolation of sensor. Is performed the sensor design in CAD and construction from the plans generated by the software. With the built sensor is evaluated the performance with different types of liquid and makes the circuit design to eliminate noise and linearize the behavior. With the previous design of the circuit is made the assembly between the sensor and the PC. It develops a graphical environment on the PC via USB for the user can to monitor the behavior of the sensor, in the programming of graphical environment is designed a discrete low-pass filter to improve the sensor response to disturbances. According to the dates obtained is verified the

mathematical model and estimate the capacitance values of different fluids working as dielectric. The behavior of the sensor is linear and it works for tanks with different diameters, a height maximum of 25 cm and to different liquids.

**Keywords—** Capacitance, Dielectric, Faradios, Culombios, Teflon.

## I. INTRODUCCIÓN

Los sensores capacitivos suelen ser muy utilizados en distintas aplicaciones, como en el control de nivel de tanques, para detectar el contenido de contenedores, y medir el caudal en una sección de tubería o en máquinas empacadoras para detectar la variación de materiales [1].

Algunos elementos que pueden ser detectados por estos sensores son:

- Sólidos: madera, cerámica, vidrio, apilamientos de papel, plástico, piedra, goma, hielo, materiales no férricos, y materias vegetales.
- Líquidos: agua, aceite, adhesivo y pinturas.
- Granulados: granulados plásticos, semillas, alimentos, y sal.
- Polvos: tintas, polvo de jabón, arena, cemento, fertilizantes, azúcar, harina y café.

La función del detector capacitivo consiste en señalar un cambio de estado, basado en la variación del estímulo de un campo eléctrico, este estímulo va a ser generado por la variación del nivel del dieléctrico dentro del campo eléctrico. La capacitancia depende de la constante dieléctrica del material a detectar, su masa, tamaño y la distancia entre placas del sensor capacitivo [2].

La capacidad o capacitancia es una propiedad de los condensadores o capacitores, esta propiedad rige la relación entre la diferencia de potencial (o tensión) existente entre las placas del capacitor y la carga eléctrica almacenada en este.

Actualmente en la industria y el sector petrolero utiliza sensores ultrasónicos, infrarrojos con técnicas de fabricación complejas y un costo bastante alto para sensar líquidos corrosivos o agresivos químicamente. En algunos casos se supervisa el nivel de los tanques visualmente. Una desventaja que presentan los sensores de nivel es el mantenimiento, por otra parte la robustez para la oposición a las perturbaciones causadas por cambios de temperatura, densidad y composición del líquido aumenta aun más los costos. Para dar solución a dichas limitaciones se diseñó y construyó un sensor capacitivo de nivel a bajo costo [12], [13], para ser utilizado en aplicaciones industriales que requiera sensar niveles de líquido corrosivos o agresivos, sin la necesidad de ser supervisado por un operario y con la ventaja que la instrumentación requerida es sencilla y económica.

## II. MÉTODO

El propósito del sensor es medir diferentes niveles de líquido (agua, diesel) dando una solución a la medición del nivel en un tanque hermético el cual no tiene la posibilidad de ser controlado exteriormente. En esta aplicación se varía el nivel de diferentes líquidos que a su vez pueden ser granulados, metales, o aislantes trabajando como dieléctrico. El dieléctrico es sometido a un campo eléctrico generado por una diferencia de potencial, esta diferencia de potencial se genera debido a la separación de dos placas o tubos ubicados concéntricamente.

A partir de la construcción del sensor se procede a variar el nivel del agua y así obtener una variación de la capacitancia representada mediante la ecuación:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (1)$$

Donde C es la capacidad, medida en faradios, esta unidad es relativamente pequeño y suelen utilizarse submúltiplos como el microfaradio o picofaradio, Q es la carga eléctrica almacenada, medida en culombios y V es la diferencia de potencial (o tensión) medida en voltios.

En la práctica, la dinámica eléctrica del condensador se expresa mediante la siguiente ecuación diferencial (2), la cual es la derivada de (1) con respecto al tiempo.

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV}{dt} \quad (2)$$

Donde  $i$  representa la corriente eléctrica, medida en amperios.

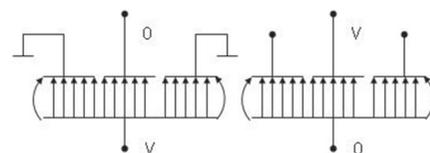
Cabe destacar que la capacidad es siempre una cantidad positiva y que depende de la geometría del capacitor considerado (de placas paralelas, cilíndrico, esférico), otro factor del que depende es del dieléctrico que se introduzca entre las dos superficies del condensador, cuanto mayor sea la constante dieléctrica del material no conductor introducido, mayor es la capacidad.

Pero la capacidad C es función de la geometría del conductor y del material del dieléctrico, por tanto, al variar la geometría o el dieléctrico se puede usar para medir un fenómeno físico. Los problemas que presenta este tipo de medidor son:

- Efecto de los bordes.
- El aislamiento entre placas debe ser alto y constante.
- Existen muchas interferencias capacitivas.
- Los cables de conexión generan condensadores parásitos.

El efecto de bordes es importante ya que la capacitancia C está afectada por la distancia entre las placas. Realmente está afectada por la distancia que recorren los electrones desde una placa a la otra. Lo anterior considerado que se desplazan perpendicularmente sobre las placas; sin embargo en la práctica el desplazamiento en los bordes es angular, recorriendo una distancia mayor, y generando errores los cuales serán minimizados mediante una delimitación en esta sección físicamente por medio de guardas. La guarda consiste en rodear uno de los electrodos con un anillo puesto al mismo potencial del mismo electrodo. La Fig. 1 representa este fenómeno [11], [14].

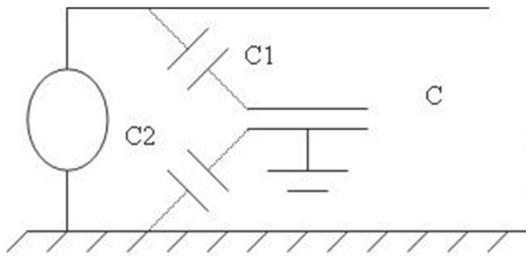
FIG. 1. REPRESENTACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ENTRE PLACAS



El aislamiento entre placas debe ser alto para lo cual se comenzó probando con una capa de barniz dieléctrico y una de laca obteniendo resultados no repetitivos por el deterioro del recubrimiento por lo tanto se recubrió el sensor con teflón el cual presenta una mayor resistencia a la manipulación y resiste al contacto con el agua obteniendo así un aislamiento alto y constante. La aplicación de la capa de teflón se hace mediante aspersión con pistola y una etapa de horneado para completar la reacción hasta obtener una capa sólida y con un grosor por el orden de las micras.

Las interferencias capacitivas consiste en que entre cada conductor existen condensadores parásitos. Una solución en este caso es apantallar el cable para llevar todos los posibles contactos a tierra ver Fig. 2 o la utilización de un toroide [5]-[7], [11].

FIG. 2. MÉTODO PARA REDUCIR LAS CAPACITANCIAS PARÁSITAS



Otro problema mencionado son los cables de conexión. Al apantallar el cable para reducir las interferencias capacitivas, se introduce un nuevo error aparecen capacidades en paralelo a lo largo del cable.

La linealidad es otro elemento a destacar ya que según sea el parámetro que se seleccione, se puede obtener una salida directamente proporcional o inversamente proporcional, y por tanto no lineal. Al variar la distancia  $d$  y se mide la admitancia (proporcional a  $C$ ), la medida sería no lineal. Pero si se mide la impedancia, la medida sería lineal. El uso de sensores diferenciales permitirá superar esta dificultad.

Otro problema importante es la alta impedancia de salida de este tipo de sensores, determinada por el dieléctrico no conductor utilizado.

Para resolver este inconveniente existen dos alternativas:

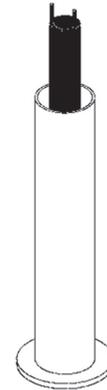
- a. Diseñar un sistema electrónico de acondicionamiento.

- b. Implementar el acople de impedancias.

A. Diseño

Se realizó el diseño del sensor capacitivo en CAD con forma cilíndrica y así determinar la forma más adecuada de hacer el ensamble físico y las mediciones ver Fig. 3.

FIG. 3. SENSOR EN CAD



De acuerdo a este diseño se calculó que la capacitancia del sensor sin dieléctrico mediante (3) teniendo el aire como dieléctrico de acuerdo a la geometría es:

$$C_{\min} = \frac{2 * \pi * \epsilon_{\text{aire}} * h}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3)$$

$$C_{\min} = 36.63 \text{ pF}$$

La capacitancia del sensor de acuerdo a la geometría teniendo como dieléctrico agua lleno en su totalidad es:

$$C_{\max} = \frac{2 * \pi * \epsilon_{\text{agua}} * h}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

$$C_{\max} = 331.13 \text{ pF}$$

El volumen del depósito hasta la altura del sensor o nivel máximo para sensar se determino por medio de (4):

$$V = \frac{\pi * d^2 * h}{4} \quad (4)$$

$$V = 0.00025086 \text{ m}^3$$

$$V = 250.86 \text{ ml}$$

y la sensibilidad con la ecuación (5),

$$S = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{V} \quad (5)$$

$$S = 0.8468 \text{ pF} / \text{ml}$$

#### B. Construcción.

De acuerdo con la selección del sensor con una forma cilíndrica, se colocaron dos tubos de cobre de diferente diámetro concéntricamente. Estos dos tubos son de cobre debido a su capacidad de conductor; a estos se les recubrió de una capa de teflón para aislarlos del dieléctrico como se ve en la Fig. 4 y 5. Para que el dieléctrico pueda ingresar entre las placas se perforaron varios orificios al final del tubo externo.

FIG. 4. SENSOR AISLADO CON BARNIZ Y LACA



FIG. 5. SENSOR AISLADO CON TEFLÓN



### III. ELECTRÓNICA DE ACONDICIONAMIENTO

#### A. Liberalización y obtención de los datos

Con este diseño y aislado con teflón se realizaron varias pruebas con diferentes tipos de líquidos ver Fig. 6, 7, 8, 9 con los cuales se obtienen los siguientes resultados mediante el quómetro que mide capacitancia e impedancia. Como se puede apreciar en las Fig. 6, 7, 8, 9 el sensor presenta repetitividad ya que los valores son similares después de 3 ensayos y su comportamiento es lineal de acuerdo a la variación del nivel de líquido. Se pudo determinar que el valor de capacitancia e impedancia depende de la capacidad dieléctrica del líquido por lo que se hace necesario realizar calibraciones ante diferentes tipos de líquidos a sensor.

A partir de las mediciones con el quómetro y observado que el sensor presenta un aumento de capacitancia proporcional al aumento del nivel de dieléctrico se procedió a realizar el circuito electrónico capaz de tomar la variación de capacitancia y convertirla en voltaje. Para esto se utilizó un circuito que se representa en el siguiente diagrama de bloques, como se puede observar en la Fig. 10.

FIG. 6. DATOS DEL SENSOR DE CAPACITANCIA CON AGUA COMO DIELECTRICO

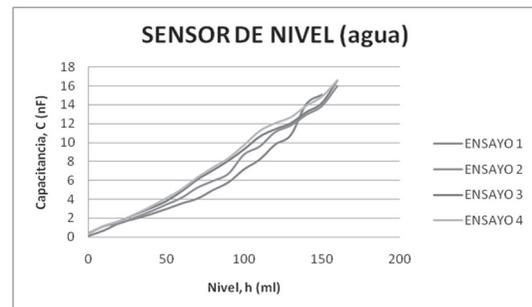


FIG. 7. DATOS DEL SENSOR DE RESISTENCIA CON AGUA COMO DIELECTRICO

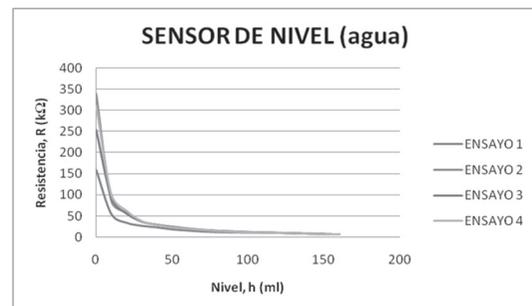


FIG. 8. DATOS DEL SENSOR DE CAPACITANCIA CON DIESEL COMO DIELECTRICO

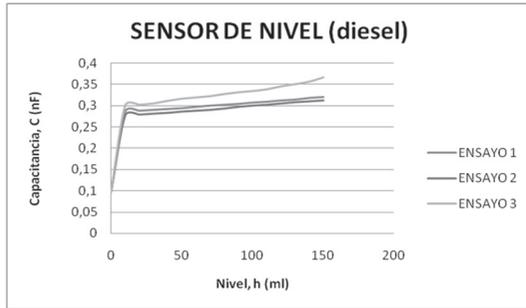


FIG. 9. DATOS DEL SENSOR DE RESISTENCIA CON DIESEL COMO DIELECTRICO

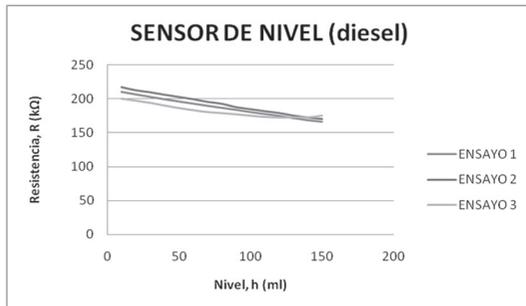
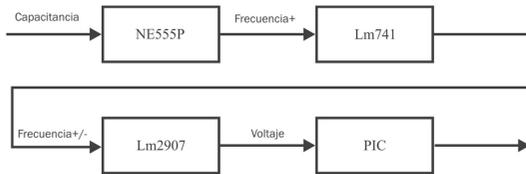


FIG. 10. DIAGRAMA DE BLOQUES CIRCUITO ELECTRÓNICO



El circuito que describe el anterior diagrama de bloques fue simulado en CAD (ver Fig. 11) con la siguiente configuración electrónica, se toma la variación de capacitancia del sensor Fig. 12 y se implementa como variable de oscilación en el integrado NE555P, es decir, al variar la capacitancia varía la frecuencia de las oscilaciones Fig. 13. El NE555P es configurado para un ciclo útil del 50% estable y un rango de frecuencia entre 40kHz - 400kHz.

FIG. 11. IMPLEMENTACIÓN DEL CIRCUITO MEDIANTE SOFTWARE

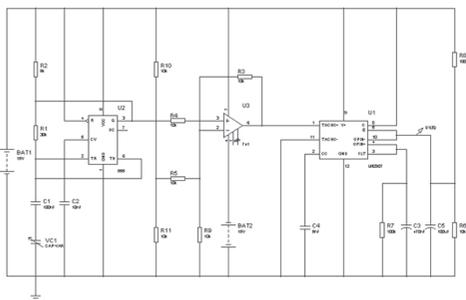


FIG. 12. CAPACITANCIA MEDIDA EN EL QUÓMETRO AL VARIAR EL NIVEL DE LÍQUIDO

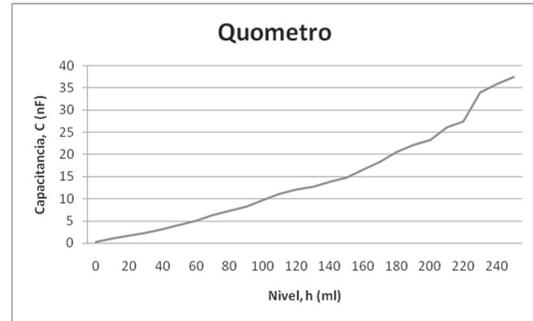
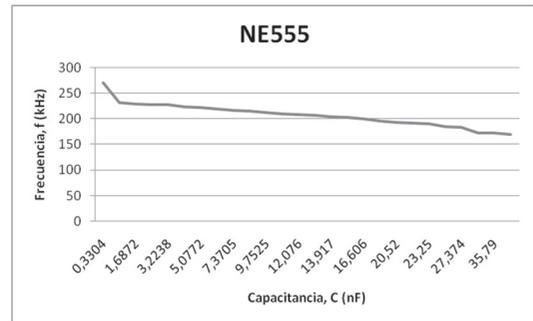
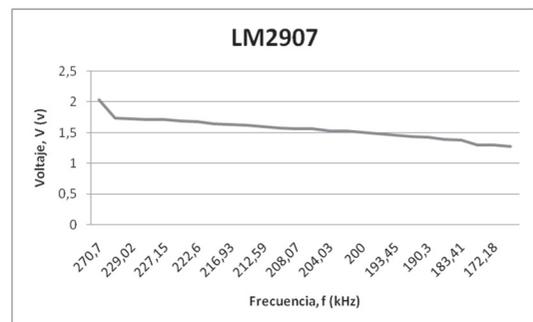


FIG. 13. FRECUENCIA AL VARIAR LA CAPACITANCIA



Al tener esta variación de frecuencia se tiene una señal oscilante con una amplitud entre 0 y 12v, por lo cual es necesario implementar un restador con un LM741 que nos provea una señal entre 12 y -12v para ser ingresada al convertor LM2907 el cual trabaja entre estos niveles de voltaje y a la frecuencia en que fue configurado el NE555P. El LM2907 es un convertor de frecuencia a voltaje el cual a determinado valor de frecuencia genera un valor de voltaje proporcional como puede verse en la Fig. 14. Este valor de voltaje es ingresado a un puerto del PIC que hace la conversión de análogo a digital y la envía al PC para ser visualizada por un usuario.

FIG. 14. VOLTAJE AL VARIAR LA FRECUENCIA

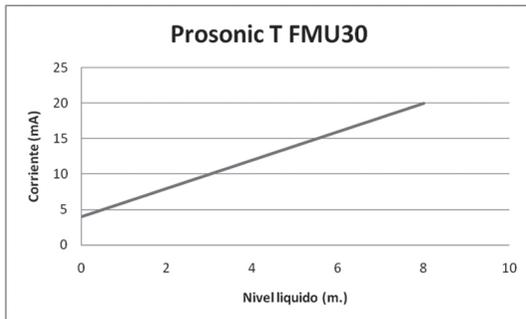


En las Fig. 12, 13, 14 se observa la linealidad al pasar por los diferentes elementos del circuito,

determinando la viabilidad en utilizar este circuito para la medición de nivel y la ausencia de ruido en la señal.

Comparando el comportamiento del sensor capacitivo con el sensor de nivel ultrasónico Prosonic T FMU30 se puede observar que el sensor presenta una considerable linealidad ya que el rango de medición del sensor capacitivo está entre 0-250ml y la del sensor Prosonic T FMU30 está entre 0-8m ver Fig. 15, lo cual es el 3.125% del sensor industrial.

FIG. 15. MEDICIÓN SENSOR INDUSTRIAL



#### B. Acondicionamiento de señal y características del sensor

Hasta el momento se ha analizado las características del sensor cuando se miden cantidades estables, o sea, mientras no presentan variaciones bruscas en su magnitud. Ahora bien, puede ocurrir que la cantidad bajo medición sufra una variación en un momento determinado y, por lo tanto, es necesario que conocer el comportamiento dinámico del instrumento cuando sucedan estas variaciones. Para realizar el análisis dinámico del sensor se le aplica un cambio brusco de un estado a otro (la función escalón) y determinar las características para esta respuesta mediante parámetros de diseño.

Se parte realizando el acondicionamiento de señal con un filtro pasa-bajo de segundo orden al establecer los parámetros "ts" y "Mp" en (6) y (7) y se obtendrá la función de transferencia del filtro. Para esto se tuvo en cuenta una frecuencia de establecimiento (ts) de 100ms y un sobre-impulso máximo (Mp) de 0.26 y se hará uso de las siguientes expresiones:

$$Mp = e^{-\frac{\delta\pi}{\sqrt{1-\delta^2}}} \quad (6)$$

$$ts = \frac{\pi}{\delta * Wn} \quad (7)$$

Despejando  $\delta$  de (6) obtenemos que  $\delta=0.394$  y con este valor reemplazamos en la ecuación 7 para obtener  $Wn=159,47$ .

Con estos valores se obtiene la función de transferencia a través de la siguiente ecuación (8):

$$H(s) = \frac{Wn^2}{s^2 + 2\xi Wns + Wn^2} \quad (8)$$

Reemplazando:

$$H(s) = \frac{6357.83}{s^2 + 56.55s + 6357.83} \quad (8)$$

Mediante el software MATLAB se obtuvo la función de transferencia en z para poder ser implementado digitalmente:

```
num=[6357.83];
```

```
den=[1 56.55 6357.83];
```

```
Ts=1/20;
```

```
[numDz,denDz]=c2dm(num,den,Ts,'zoh');
```

$$H(z) = \frac{1.2537z + 0.2108}{z^2 + 0.4053z + 0.0592}$$

$$H(z) = \frac{1.2537z^{-1} + 0.2108z^{-2}}{1 + 0.4053z^{-1} + 0.0592z^{-2}}$$

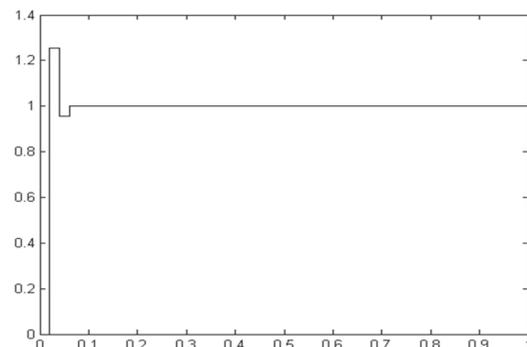
```
[x] = dstep (numDz,denDz,51);
```

```
t=0:0.02:1;
```

```
stairs(t,x);
```

La respuesta del sensor a una entrada escalón con una magnitud de 1 se puede ver en la Fig. 16:

FIG. 16. RESPUESTA FILTRO PASA-BAJO DE SEGUNDO ORDEN EN MATLAB (V VS. T)



El tiempo de respuesta de este sensor es de 0.08 segundos, y es el tiempo transcurrido entre la aplicación de la función escalón y el instante en que el instrumento indica un cierto porcentaje (90%, 95% o 99%) del valor final. El sobre-impulso es del 21%, y es la diferencia entre el valor el máxi-

mo y el valor final de la señal. Estos valores son aceptables de acuerdo con las especificaciones de diseño dadas al realizar el diseño del acondicionamiento de señal.

Características del sensor	
Tiempo de respuesta	0.08 seg.
Sobre-impulso	21%

Teniendo el filtro en la transformada inversa  $z$  se puede implementar el filtro en c Chart así:

$$x(k) + 0.4053x(k-1) + 0.0592x(k-2) \\ = 1.2537u(k-1) + 0.2108u(k-2)$$

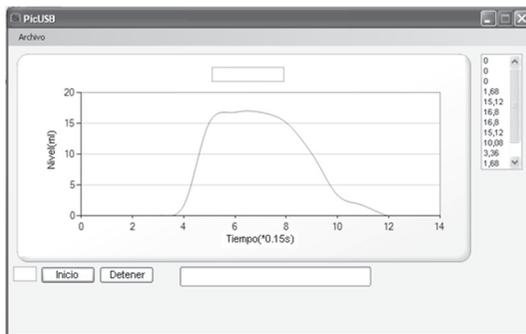
Siendo  $u(k)$  la entrada del sistema.

Al implementar el filtro en el software y generar un entorno gráfico, en la Fig. 17 se observa la señal al variar el nivel del agua.

#### IV. CONCLUSIONES

Se determinó que el funcionamiento del sensor asilado con teflón presentó resistencia a la manipulación y que al contacto con los líquidos, no se deterioraba ni desprotegía al sensor.

FIG. 17. VISUALIZACIÓN PC



El método propuesto generó un gran beneficio al momento de diseñar y construir el sensor ya que se localizaron las principales dificultades y en cómo darles solución. Una de las soluciones fue la utilización de un software de diseño para la construcción y ensamble del sensor ahorrando tiempo y costos.

El recubrimiento del sensor con la capa de teflón generó que la capacitancia medida con el quómetro se incrementara. Además al evaluar la repetitividad y estabilidad de los datos sensados, el recubrimiento fue la mejor solución.

El circuito implementado para convertir la capacitancia en voltaje generó buenos resultados en cuestión de ruido y linealidad. Este circuito presenta ventajas ya que los elementos necesarios son pocos y de bajo costos comparado con los utilizados actualmente en la industria.

Una desventaja que presenta el sensor capacitivo es que al momento de medir líquidos con diferentes valores de conductividad eléctrica, hay que realizar calibraciones en las mediciones del nivel, por lo que se aconseja realizar una tabla con un factor de ajuste para los líquidos a manejar.

#### REFERENCIAS

- [1] O. P. Thakur and A. K. Singh, "Modeling of Capacitive Sensor filled with Elastic Dielectrics and its Advantages," in Proc. IEEE IMTC, Dec 2008, 3rd International Conference on Sensing Technology.
- [2] Ch. Chiang and Yu Huang, "A Semicylindrical Capacitive Sensor With Interface Circuit Used for Flow Rate Measurement," in Proc. IEEE IMTC, Dec 2006, vol. 6, N° 6. pp. 1564 – 1570.
- [3] J. P. Holman, Experimental methods for engineers (6th edition) McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [4] W. G. Cady, Piezoelectricity, Dover, New York, 1964. J. M. Herbert, Ferroelectric Transducers and sensors, Gordon and Breach, New York 1982.
- [5] D. Landau and E. M. Lifshitz, Electrodynamics of Continuous Media, Pergamon, New York 1984.
- [6] J. A. Stratton, Electromagnetic theory, McGraw-Hill, New York. 1941.
- [7] H. Y. Lee, Y. Peng, and Y. M. Shkel, Estrain-dielectric response of dielectrics as foundation for electrostriction stresses. S. J. Appl. Phys. 98. 074104,2005.
- [8] K. Baxter, Capacitive sensors: Designs and Applications. IEEE. New York, 1997.
- [9] Y. M. Shkel, Electrostriction enhancement of solid state capacitive sensing, S IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. Vol. 8. No.3. 2003.
- [10] Michalski and S. Wincenciak, "Method of optimization of primary transducer for electromagnetic flow meter," in Proc. IEEE IMTC, Jun. 1996, vol. 2, pp. 1350–1353.

- [11] A. Michalski, J. Starzynski, and S. Wincenciak, "Eliminating short ending effects in the primary transducer of electromagnetic flow meters," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, no. 2, pp. 1035–1039, Mar. 2003.
- [12] T. N. Toth and G. C. M. Meijer, "A low-cost smart capacitive position sensor," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 41, no. 6, pp. 1041–1044, Dec. 1992.
- [13] L. K. Baxter, *Capacitive Sensors Design and Applications*. New York: IEEE Press, 1997.
- [14] H. J. Ahn, I. H. Kim, and D. C. Han, "Nonlinear analysis of cylindrical capacitive sensor," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 3, pp. 699–706, Mar. 2005. Disponible en: [https://portal.endress.com/wa001/dla/50002987029/000/00/TI-440FEN\\_1209.pdf](https://portal.endress.com/wa001/dla/50002987029/000/00/TI-440FEN_1209.pdf). (2010).