

DESARROLLO DE SENSORES CAPACITIVOS DE BAJO COSTE PARA LABORATORIOS DOCENTES

C. QUINTÁNS^{1,2}, J. MARCOS¹ Y J. FARIÑA¹

¹*Departamento de Tecnología Electrónica. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial. Universidad de Vigo. España.*

²*Departamento de Ingeniería Eléctrica Electrónica y de Control. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Centro Asociado de Pontevedra. España.*

En este trabajo se presenta una forma de obtener sensores capacitivos didácticos, y sus circuitos de acondicionamiento, que sean de bajo coste, muestren el principio físico con claridad y sean fáciles de manejar por los alumnos. Se han desarrollado diversos sensores capacitivos para medida de nivel de agua y de aceite utilizando materiales reciclados de uso común que resultan familiares para los alumnos. Los alumnos han caracterizado estos sensores y han realizado dos acondicionamientos sencillos de primer orden, uno pasivo y otro activo. En los cursos 2006-2007 y 2007-2008 se han utilizado estos sensores de forma experimental en el Laboratorio de Sensores y Acondicionadores.

1. Introducción

La formación en instrumentación y medida de los alumnos de las escuelas de ingeniería presenta grandes dificultades operativas, económicas y de tiempo. Gracias al avance de la Microelectrónica se ha conseguido en los últimos años que la parte de adquisición de datos [1] sea más económica, de mejores prestaciones [2] y más fáciles de utilizar [3] por los alumnos.

En lo que respecta a los sensores [4] el avance también ha sido espectacular, se han conseguido sensores más inteligentes, más precisos y más funcionales. Sin embargo, desde un punto de vista didáctico, este avance ha significado un retroceso, ya que éstos siguen siendo caros, poco accesibles y difíciles de incluir en maquetas robustas y didácticas que reproduzcan los procesos. Esta problemática lleva a que el personal docente encargado de los laboratorios de sensores y acondicionadores realice un esfuerzo constante para conseguir acercar, de la forma más amigable posible, el estudio de los sensores a los alumnos. Por tanto, el objetivo principal es la obtención de sensores didácticos, y sus circuitos de acondicionamiento, que sean de bajo coste, muestren el principio físico con claridad y sean fáciles de manejar por los alumnos.

En este trabajo se presenta un conjunto de sensores capacitivos construidos utilizando materiales reciclados de uso común que resultan familiares para los alumnos. Se han desarrollado dos tipos de condensadores para medida de nivel. El primer tipo son condensadores planos que se construyen aprovechando la caja de un CD (Disco Compacto) a cuyas caras interiores se pegan las placas, que están hechas con papel de aluminio plastificado. El segundo tipo es un condensador cilíndrico construido con dos segmentos de tubería de cobre de diámetros diferentes y que se montan de forma coaxial.

Para su utilización, dichos sensores se han ubicado en unas maquetas ya existentes, pero su utilización en maquetas caseras de bajo coste es inmediata, mediante la utilización de cualquier recipiente en el que se pueda introducir el condensador desarrollado. Con los condensadores planos basados en CDs se han realizado medidas de nivel de agua y con el cilíndrico se han realizado medidas de nivel de aceite. Los alumnos han caracterizado cuatro sensores diferentes y han realizado dos acondicionamientos sencillos de

primer orden, uno activo y otro pasivo. En el siguiente apartado se describen los sensores construidos y su caracterización según la metodología docente seguida.

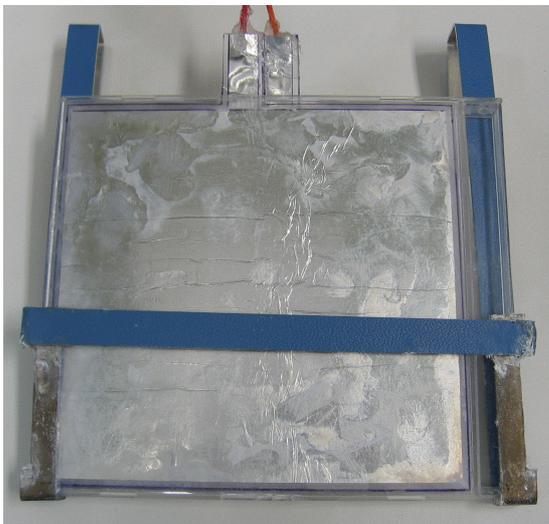
2. Metodología docente para la caracterización de los sensores desarrollados

De acuerdo a la geometría del condensador que forma el sensor primario se desarrollaron dos tipos distintos de sensores capacitivos que son: condensador de placas planas y de placas cilíndricas. Las variaciones en la variable física, en este caso el nivel de un líquido, provocan un cambio en el material del dieléctrico, de forma que cuando el nivel del líquido es nulo el dieléctrico está formado por aire (ϵ_{aire}), y cuando hay un cierto nivel h de líquido hay una porción de dieléctrico que sigue siendo aire y otra que esta formada por el propio líquido ($\epsilon_{\text{líquido}}$) cuyo nivel se está midiendo. Por tanto, en este tipo de sensores es la variación del dieléctrico la que provoca un cambio en la capacidad, esta última depende, además, del área A del condensador y de la distancia d entre las placas (Ec. 1).

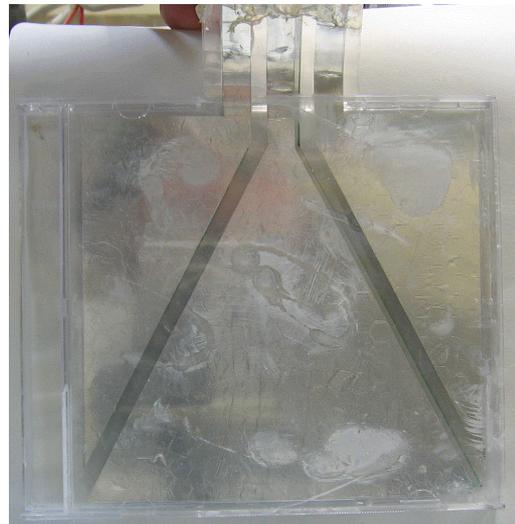
$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \frac{A}{d} = \epsilon \frac{A}{d} \quad (1)$$

2.1. Condensadores planos

Este tipo de condensador se construye a partir de una caja de un CD en cuyas caras interiores se pegan dos placas hechas con papel de aluminio plastificadas (Fig. 1). Las placas se recortan dejando unas aletas a las que se fijan los hilos conductores. De esta forma los condensadores están formados por dos placas paralelas separadas una distancia d dada por el tipo de carcasa de CD utilizada, ya que se puede utilizar una caja de perfil normal ($d \sim 5$ mm) o estrecho ($d \sim 2$ mm).



a)



b)

Figura 1. Fotografías de los sensores capacitivos planos basados en CD, a) sensor plano normal, b) sensor plano de triángulos.

Para analizar su funcionamiento se considera que la porción de placas cuyo dieléctrico esta constituido por aire esta en paralelo con el resto de placa que está sumergida según sea el nivel del líquido objeto de la medida (Fig. 2). Como las capacidades en paralelo se suman, a partir de la Ec. 1 se obtiene la

expresión general representada por la Ec. 2, que indica que la curva característica del sensor es una recta, lo cual es un buen ejemplo para el caso en que no se pretenda linealizar la respuesta.

$$C_{Total} \cong C_{aire} + C_{liquido} = \epsilon_{liquido} \cdot \frac{a \cdot h}{d} + \epsilon_{aire} \frac{a \cdot (b-h)}{d} = \frac{a}{d} \cdot [h \cdot (\epsilon_{liquido} - \epsilon_{aire}) + \epsilon_{aire} \cdot b] \quad (2)$$

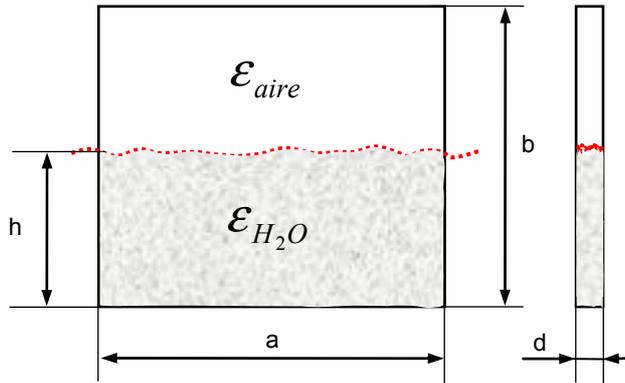


Figura 2. Alzado y perfil del esquema del sensor capacitivo plano.

Sin embargo, con el sensor de la Fig. 1.b. las placas del condensador se han dividido en tres triángulos que proporcionan curvas características de segundo grado (Ec. 3) para los condensadores C_1 , C_2 y C_3 (Fig. 3), lo cual hace que el alumno tenga que tener en cuenta esta no linealidad.

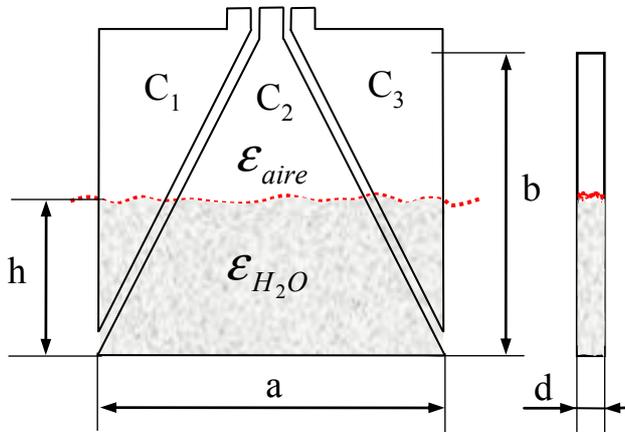


Figura 3. Alzado y perfil del esquema de los sensores capacitivos triangulares.

$$C_1 = C_3 = \frac{a}{4 \cdot d} \cdot \left[h^2 \cdot \frac{\epsilon_{liquido} - \epsilon_{aire}}{b} + \epsilon_{aire} \cdot b \right] \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{a}{2 \cdot d} \cdot \left[\frac{(b-h)^2}{b} \cdot (\epsilon_{aire} - \epsilon_{liquido}) + \epsilon_{liquido} \cdot b \right] \quad (4)$$

Para obtener la curva característica del sensor plano de la Fig. 1.a. se ha introducido en posición vertical en el interior de un depósito de agua. Inicialmente el condensador está totalmente seco, es decir, el dieléctrico es aire y las placas no tienen restos de agua. Bajo estas condiciones, al ir subiendo el nivel de agua el sensor presenta la curva de la Fig. 4.a. En la misma gráfica, una vez se ha saturado el sensor y se comienza a disminuir el nivel se aprecia que la capacidad es mayor, esto es debido a que las placas del condensador quedan humedecidas. Este comportamiento no se observa en los siguientes ciclos de llenado y vaciado ya que el condensador queda siempre humedecido. En la Fig. 4.b. se presenta el promedio de los datos tomados subiendo el nivel y bajándolo (el experimento se repite 5 veces). A partir de estas dos curvas se obtienen las curvas de tendencia de la Fig. 4.c., en las que se aprecia que la repetibilidad es de 23 pF, que en el margen de variación total significa un 1.5% sobre el fondo de escala.

Finalmente, la característica promedio total del sensor se muestra en la Fig. 4.d, de la que se deduce que la altura de agua en función de la capacidad viene dada por la de la Ec. 5. Ahora solo queda saber cuál es la incertidumbre de la medida [5]. Para ello se tienen en cuenta: (1) la desviación típica que se obtiene de las cinco veces que se repitió el experimento, (2) la resolución de la medida de capacidad (1 pF) y (3) la de la medida de longitud (1 mm). Para realizar los cálculos se supone: (1) que la incertidumbre introducida por los instrumentos tiene una distribución uniforme y (2) que no hay correlación entre las tres causas de la incertidumbre, esto es, se usará el método de SSR (*Square Sum Root*) para evaluar el error total.

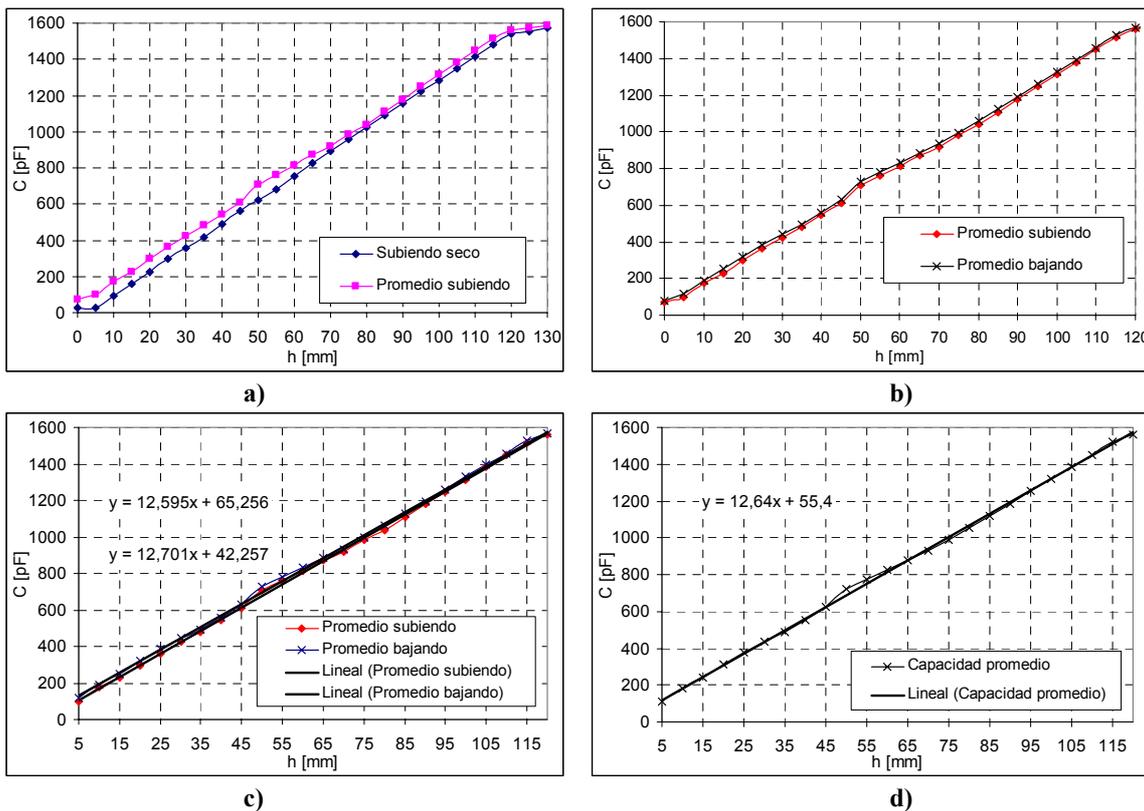


Figura 4. Respuesta del sensor plano de la Fig. 3.a. **a)** Respuesta cuando el sensor está inicialmente seco. **b)** Respuestas subiendo y bajando el nivel después de varios ciclos de medida completos. **c)** Rectas de tendencia de las curvas subiendo y bajando. **d)** Curva promedio total y recta de tendencia.

La desviación típica promedio de las medias es de $\sigma = 9.2$ pF y para trabajar con un margen de confianza (suponiendo que la distribución estadística de las medidas es una distribución normal) superior al 95% se toma el doble de la desviación típica, esto es 18.4 pF, lo que supone un 1.22% de error. En cuanto al error introducido por los instrumentos de medida, el de la medida de capacidad es del 0.04% y el de la medida de longitud del 0.46%. Según la ec. 5, los errores en la medida de capacidad se traducen en errores de nivel multiplicándolos por la pendiente de la curva, esto es, por 0.0791. Por tanto, la incertidumbre total en la medida de nivel serían debidos a las siguientes incertidumbres:

- Incertidumbre introducida en la medida del nivel (0.46%).
- Incertidumbre introducida en la medida de la capacidad (0.0031%)
- Incertidumbre introducida en las medidas realizadas (0.096%).

Ahora, a partir de los datos anteriores, se obtiene la incertidumbre total que, según sea el método utilizado, puede ser:

- Método del peor caso, se suman algebraicamente todas las incertidumbre, esto es 0.5591%.
- Método SSR, se suman en cuadratura: $\sqrt{0.46^2 + 0.0031^2 + 0.096^2} = 0.469\%$

$$h = 0.0791 \cdot C(pF) - 4.383 \quad (\pm 0.56) \text{ mm} \quad (5)$$

2.2. Condensador cilíndrico

El sensor capacitivo cilíndrico consiste en dos tubos de cobre coaxiales, dispuestos según la Fig. 5.a., de 17 mm y 27 mm respectivamente. La respuesta teórica del sensor, que es lineal, corresponde con la Ec. 6. En la Fig. 5.b. se muestra una fotografía del montaje del sensor, que es de unos 12 cm de longitud, en el interior de una probeta en la que se introduce el fluido dieléctrico del que se medirá el nivel. El sensor está suspendido por los propios cables que conectan las placas del condensador y sirven para subir o bajar el sensor y así poder medir las variaciones en la altura del cilindro sumergida en el fluido. Para las prácticas realizadas se ha utilizado aceite de girasol como fluido, ya que es económico, fácil de conseguir y relativamente poco viscoso.

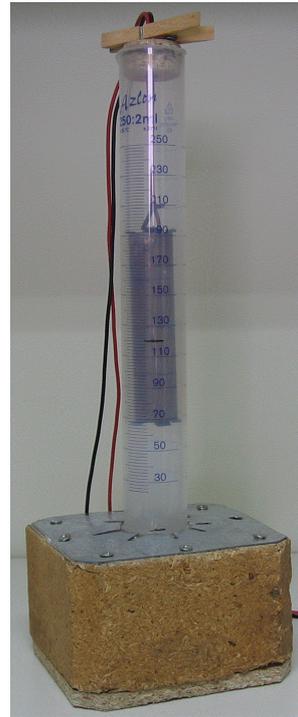
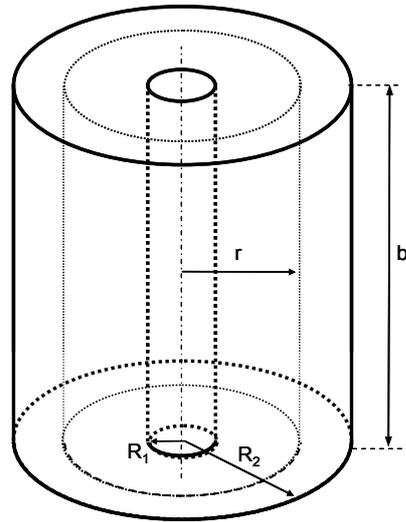
$$C \cong \frac{2 \cdot \pi}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \cdot [h \cdot (\epsilon_{\text{liquido}} - \epsilon_{\text{aire}}) + b \cdot \epsilon_{\text{aire}}] \quad (6)$$

En la Fig. 6.a. se presentan los resultados de las medidas realizadas para caracterizar el sensor, y a partir de la Fig. 6.b. se obtiene la ecuación característica (Ec. 8). Siguiendo el mismo procedimiento que el caso de los sensores planos se obtiene la incertidumbre para dicha Ec. 8, que resulta de aplicar el método SSR a las siguientes incertidumbres (Ec. 7):

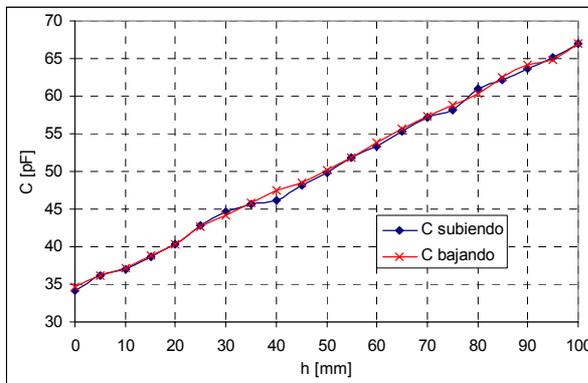
- Incertidumbre introducida en la medida del nivel (0.58%).
- Incertidumbre introducida en la medida de la capacidad (2.623%)
- Incertidumbre introducida en las medidas realizadas (2.25%).

$$\sqrt{0.58^2 + 2.623^2 + 2.25^2} = 3.54\% \quad (7)$$

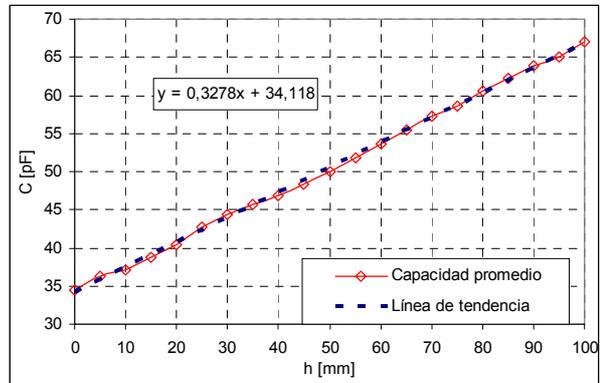
$$h = 3.0506 \cdot C(pF) - 104.081 \quad (\pm 3.54) \text{ mm} \quad (8)$$



a) **b)**
Figura 5. Esquema y fotografía del sensor cilíndrico.



a)



b)

Figura 6. Respuesta del sensor cilíndrico de la Fig. 5.b. **a)** Respuestas subiendo y bajando el nivel. **b)** Curva promedio total y recta de tendencia.

3. Metodología docente para el acondicionamiento de los sensores desarrollados

La metodología docente para realizar el acondicionamiento de los sensores consiste en que el alumno simule, primero el comportamiento del sensor de nivel mediante el programa OrCAD PSpice [6], y luego, el circuito de acondicionamiento. Después se analizan los resultados de simulación, y se montan un prototipo del sistema completo. Por ejemplo, para el sensor cilíndrico, a partir de su ecuación característica mostrada en la Fig. 6.b, se diseña una simple red RC en la que el condensador es el sensor (Fig. 7.a) y se simula haciendo un barrido en frecuencia paramétrico (con el nivel de agua como

parámetro). Se comprueba que, como el circuito RC actúa como un filtro paso-bajo y la atenuación de una señal de entrada sinusoidal es proporcional al valor del condensador C1 (el sensor), si se establece una frecuencia del generador de entrada constante (en este ejemplo de 40 kHz), se consigue una variación proporcional al nivel de 142 mV por voltio de entrada.

Después de tener claro cómo funciona el sensor, cómo se simula, y cual es el principio utilizado para el acondicionamiento, se simula un acondicionamiento completo, que proporcione, por ejemplo, una señal de salida de 0-5 V. En la Fig. 8 se muestra el diagrama de bloques del sistema completo de medida que está formado por una serie de bloques básicos que los alumnos ya conocen y que han simulado previamente. El sistema de medida consiste en un primer paso amplificador, en un rectificador de precisión, en un filtro paso-pajo, en un *offset* y, finalmente, en un segundo paso amplificador. El circuito completo tiene un tiempo de establecimiento de unos 35 ms, según indica la Fig. 9, en la que se muestra, además, que la variación de la salida en el rango de medida es de 5 V, tal y como se pretendía. Esta señal es adecuada para conectar al sistema de adquisición de datos [1], [2].

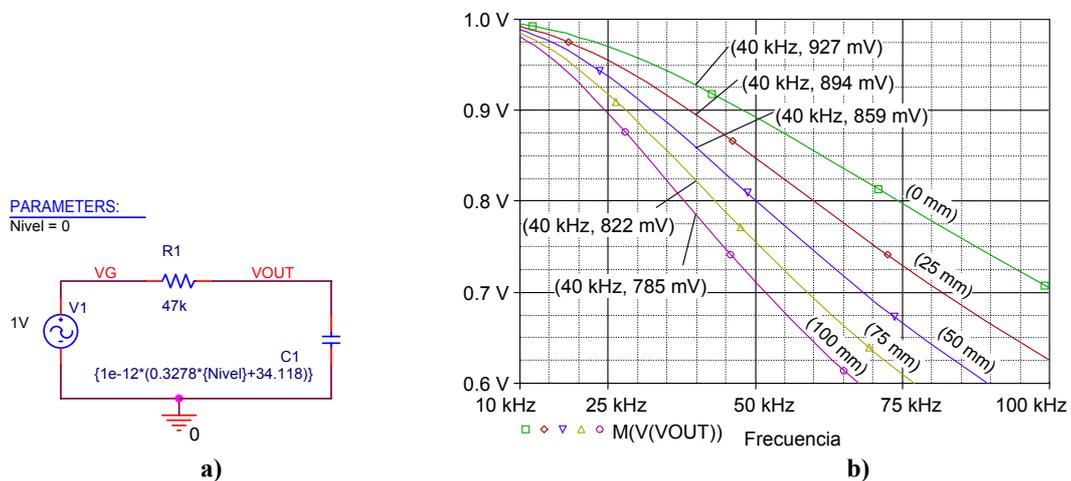


Figura 7. Simulación del sensor de nivel capacitivo cilíndrico. **a)** Circuito de OrCAD. **b)** Respuesta del circuito.

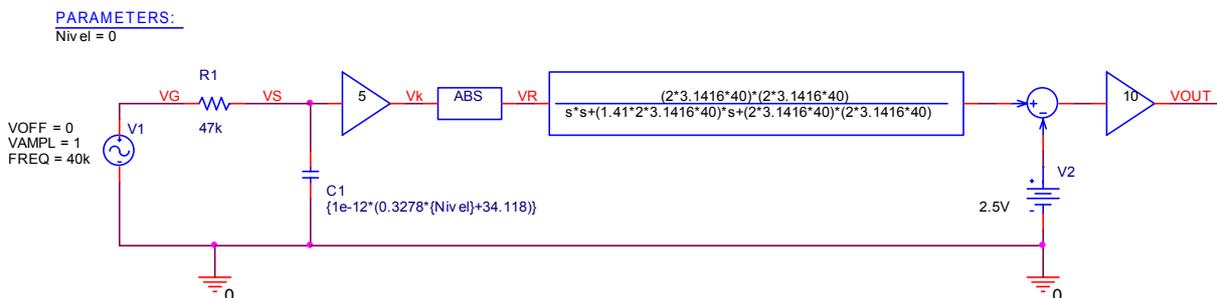


Figura 8. Sistema completo de medida de nivel simulado con OrCAD.

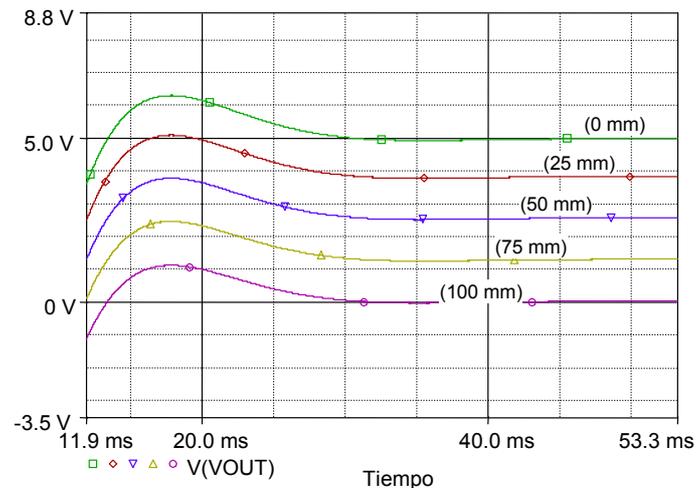


Figura 9. Resultado de la simulación del sistema de medida de nivel.

4. Conclusiones

En los cursos 2006-2007 y 2007-2008 se han utilizado estos sensores de forma experimental en el Laboratorio de Sensores y Acondicionadores de la titulación de Ingeniero de Telecomunicaciones, y en el presente curso se ha extendido su uso a las prácticas de sensores de la titulación de Ingeniero Industrial. La sencillez de los sensores desarrollados ha permitido al alumno ver físicamente el elemento primario de medida y comprobar su funcionamiento. Además, por ser elementos simples han contribuido a desmitificar el sensor, que frecuentemente aparece como una caja negra. Se destaca la utilidad de las experiencias realizadas en el estudio de características importantes como: repetibilidad, sensibilidad, zona muerta, saturación, estimación de la incertidumbre, así como en los métodos de acondicionamiento de sensores capacitivos, cuyo aspecto más relevante es el hecho de que el alumno incluya el sensor y la variable física (en este caso el nivel de un líquido) en la propia simulación eléctrica realizada mediante el OrCAD, de forma que simule el sistema completo, es decir, el proceso físico del sensor y el acondicionamiento.

Referencias

- [1] Keithley Instruments, Inc. *Data Acquisition and Control Handbook*. (2001).
- [2] National Instruments Corporation. *USB-6008/6009 User Guide and specifications*. [En línea]. Disponible: <http://www.ni.com>
- [3] National Instruments Corporation. *LabView*. [En línea]. Disponible: <http://www.ni.com>
- [4] R. Pallás-Areny and J.G. Webster. *Sensors and Signal Conditioning*. John Wiley & Sons (2001).
- [5] Centro Español de Metrología. *Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida* (versión española). Ministerio de fomento (1998).
- [6] C. Quintáns. *Simulación de circuitos electrónicos con OrCAD 16 DEMO*. Marcombo (2008).