



CCADET

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Sistema de medición capacitivo para monitorización de procesos físico-químicos

Proyecto: Desarrollo de sensores capacitivos de alta resolución
Grupo de Sensores Ópticos y Eléctricos
Departamento de Instrumentación y Medición

Asur Guadarrama Santana
Francisco Pérez Jiménez

30 de octubre de 2014

Desarrollo tecnológico

Sistema de medición capacitivo para monitorización de procesos físico-químicos

Asur Guadarrama Santana, Francisco Pérez Jiménez

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico - UNAM

Resumen

En este trabajo describimos el diseño e implementación de un prototipo de sistema de medición y monitorización de procesos físico-químicos basado en sensores capacitivos coplanares. El sistema de medición es sensible a cambios temporales de capacitancia de un material bajo prueba (MBP) depositado sobre un sustrato dieléctrico y este a su vez colocado sobre un arreglo de electrodos coplanares los cuales forman un sensor capacitivo. Las perturbaciones de campo eléctrico presentes en el sensor capacitivo son provocadas por variaciones de la función dieléctrica del MBP y cambios de fase de una señal alterna de excitación aplicada al MBP. El sistema propuesto realiza mediciones diferenciales de la componente compleja de la corriente que se genera por la impedancia propia del MBP. Se utiliza un Amplificador Lock-in (ALI) para reducir al máximo el ruido del sistema con una señal senoidal de referencia de 10kHz y $1V_{rms}$ en un ancho de banda de 1.2 Hz. Se monitorizaron procesos de evaporación de diferentes solventes obteniéndose resoluciones en el orden de décimas de femtoFaradios con un ruido base en el orden de los 50 attoFaradios.

Índice

Nomenclatura.....	3
Introducción.....	4
1. Implementación del sensor capacitivo.....	5
2. Parámetros eléctricos del cable de conexión del sensor.....	7
3. Etapa de acondicionamiento electrónico.....	8
4. Diseño del soporte mecánico del sensor.....	10
5. Elección de los cables del sistema de acondicionamiento de la señal.....	10
6. Blindaje de la electrónica de acondicionamiento.....	11
7. Ajustes iniciales del sistema.....	12
8. Resultados experimentales.....	14
Conclusiones.....	18
Agradecimientos.....	18
Referencias Bibliográficas.....	19

Nomenclatura

AI – amplificador de instrumentación

C – capacitancia

C_P – capacitancia de compensación

C_S – capacitancia de sensado

C_{SP} – capacitancia parásita en cables

D – factor de disipación

ϵ_r – permitividad relativa

f – frecuencia

H_R – humedad relativa

$Im[i]$ - Componente compleja de corriente que proporciona el amplificador Lock-in.

n – número de muestras

R_B – resistencia variable para ajuste de fase

R_E – resistencia variable para ajuste de amplitud

S/R – relación señal a ruido

T – temperatura

V – voltaje de polarización

V_{ca} – señal con amplitud variable

V_{cf} – señal con fase variable

V_{ref} – señal de referencia

V_O – voltaje de salida del amplificador de instrumentación

Z – impedancia

Z_P – impedancia del capacitor de compensación

Z_S – impedancia del capacitor sensor

Introducción

Las mediciones de capacitancia eléctrica son convenientes para la monitorización de procesos físico-químicos y biológicos así como para la caracterización no destructiva de materiales. Sin embargo, algunas veces se requiere realizar mediciones eléctricas muy pequeñas en función de una variable física de un material bajo prueba (MBP) y esta señal eléctrica podría estar inmersa en ruido. Esta es una situación muy común cuando se monitorizan señales eléctricas temporales y es necesario medir cambios de señal muy pequeñas. Por lo tanto, es necesario reducir y compensar el ruido en un sistema de medición con el fin de solo obtener la señal eléctrica resultante de interés de un material bajo prueba (MBP) sometido a algún estímulo eléctrico, óptico, físico o químico.

Describimos el desarrollo e implementación de un prototipo de sistema de medición para la monitorización temporal de procesos físico-químicos basado en sensores capacitivos coplanares. Los sensores capacitivos coplanares son convenientes para la monitorización temporal de cambios de capacitancia de un MBP sobre un sustrato dieléctrico debido a perturbaciones del campo eléctrico de alguna variable física como la constante dieléctrica, humedad, espesor, temperatura etc. Se aplica una señal senoidal con una frecuencia de referencia al MBP para generar una corriente alterna muy pequeña debido a la impedancia propia del MBP. Esta entra al sistema de medición para ser acondiciona electrónicamente en fase y amplitud con el fin de compensar la capacitancia parásita presente en el sistema por medio de una etapa diferencial. Se obtiene una señal diferencial de referencia con mínimo offset antes de realizar una medición. La etapa de amplificación Lock-in extrae la señal resultante de interés inmersa en ruido, del MBP a una señal de excitación con frecuencia central de 10 kHz con un ancho de banda de 1.2Hz. Los valores temporales de capacitancia de todo el proceso físico-químico están en función de la componente imaginaria de la corriente (corriente de defasamiento), su impedancia capacitiva y su función dieléctrica (Niall y Magner, 2005).

Se monitorizaron procesos de evaporación de solventes con el fin de obtener la respuesta y resolución del sistema obteniendo muy buena relación señal a ruido S/R en las mediciones con un ruido base promedio de 50 aF/ $\sqrt{\text{Hz}}$. Los resultados obtenidos de la monitorización del proceso de evaporación de solventes nos muestran que es posible aplicar esta técnica de medición a otros campos como el de los biosensores (Berggren et al., 2001).

1. Implementación del sensor capacitivo

La fabricación del sensor se diseñó sobre una placa fenólica FR4, el diseño de los electrodos del sensor se realizó con el programa de desarrollo de circuitos impresos Eagle 5.7.0 con las medidas mostradas en la figura 1. Dichas medidas proporcionan una superficie de sensado de 228 [mm²].

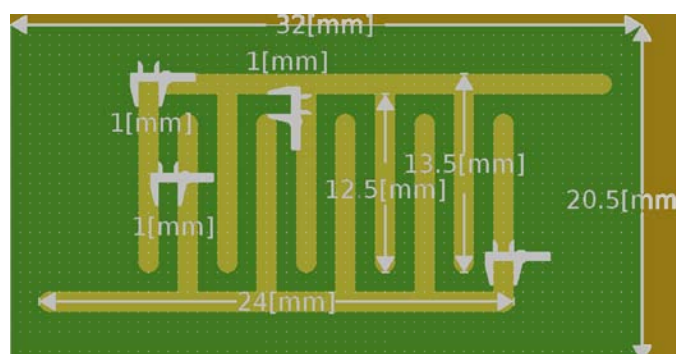


Figura 1. Dimensiones de los electrodos del sensor.

En la figura 2 se puede observar la implementación física del arreglo de electrodos coplanares que forman el sensor capacitivo.

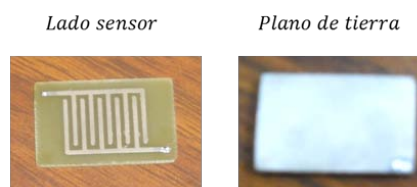


Figura 2. Vista superior e inferior de la implementación física del sensor.

Se fabricaron sensores con plano de tierra y sin plano de tierra para realizar una mejor elección del sensor midiendo la capacitancia C , la impedancia Z y el factor disipación D mediante un puente digital LCR Stanford Research 715. El factor de disipación (D) de un capacitor debe tener un valor muy pequeño o lo más aproximado a cero con el fin de contar con el mínimo de pérdidas en la capacitancia (User Manual Model SR715 LCR Meters, 1991).

En la tabla 1 se muestran los parámetros con los cuales se realizaron las mediciones de C , Z , y D para caracterizar los sensores.

Tabla 1. Parámetros del puente digital y ambientales.

Polarización (V)	1 V _{RMS}
Frecuencia (f)	10 [kHz]
Número de muestras a promediar (n)	10
Temperatura (T)	21 °C
Humedad Relativa (H_R)	24%

Para realizar las mediciones de cada sensor primero se limpió el área sensible de los electrodos con el fin de eliminar las impurezas presentes en la superficie; las cuales, alteran el valor de la capacitancia del sensor. En la tabla 2 se muestran los valores promedio de impedancia Z , factor de disipación D y capacitancia C de los sensores sin plano de tierra y con plano de tierra medidos con un puente de impedancias digital LCR. La conexión al puente digital de cada sensor capacitivo se realizó individualmente, los sensores se conectaron como se muestra en la figura 3.

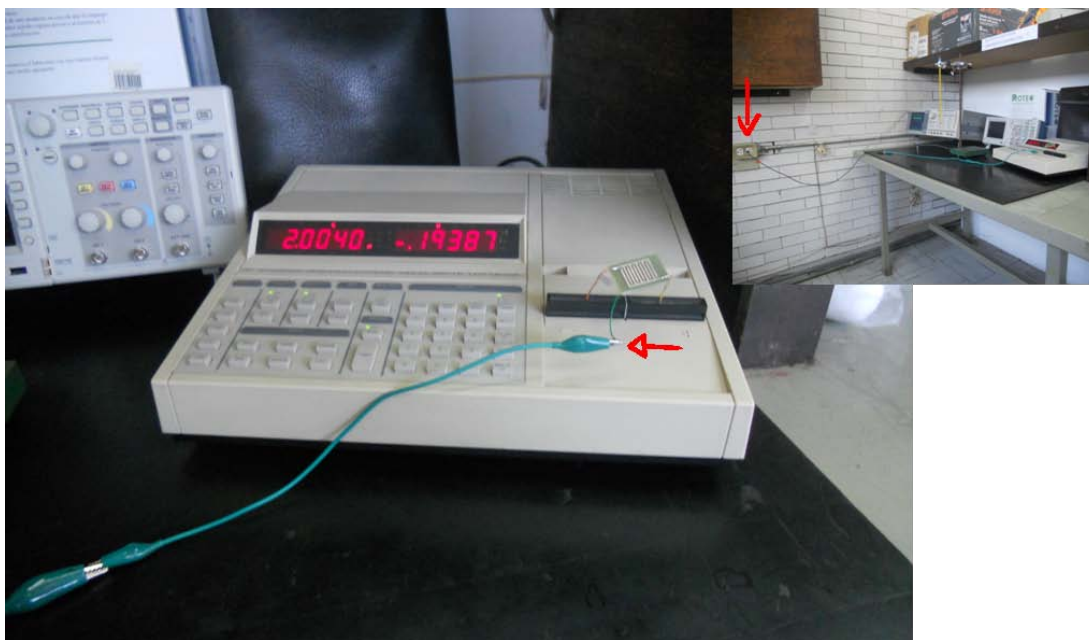


Figura 3. Conexión de los sensores capacitivos al puente digital LCR.

Los valores promedio se tomaron con base en 6 sensores fabricados de cada tipo, con la información mostrada en la tabla 2 se eligió el tipo de sensor más conveniente para realizar las mediciones experimentales con el material bajo prueba (MBP).

Tabla 2. Valores de impedancia promedio de los sensores.

Sensor	Sin plano de tierra	Con plano de tierra
Impedancia (Z)	307.9248 [M Ω]	1299.8 [M Ω]
Factor de disipación (D)	0.0357	0.0245
Capacitancia (C)	3.7944 [pF]	1.8317 [pF]

Se eligieron los sensores con plano de tierra para hacer las mediciones del MBP porque su factor de disipación es menor, su impedancia es mayor. Las características del sensor con el que se realizaron las mediciones experimentales se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Características eléctricas del sensor

Impedancia (Z)	4300.6 [M Ω]
Factor de Disipación (D)	0.00209
Capacitancia (C)	2.0731 [pF]

2. Parámetros eléctricos del cable de conexión del sensor

Los cables utilizados para realizar las conexiones eléctricas del sistema capacitivo fueron con malla conectada a tierra física, estos cables realizan un blindaje para reducir interferencias presentes en el ambiente y corrientes parásitas.

Los cables presentan una capacitancia interna porque se tiene el forro aislante que cubre al conductor de permitividad relativa ϵ_r , el cable lleva la señal de excitación y la malla conectada al plano de tierra. Las características eléctricas del cable de conexión medidas con puente de impedancias digital LCR se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Características eléctricas del cable de conexión del sensor.

Impedancia (Z)	5.1939[M Ω]
Factor de Disipación (D)	0.49724
Capacitancia (C)	4.2851 [pF]

3. Etapa de acondicionamiento electrónico

Se diseñó la etapa de acondicionamiento electrónico requerida para acoplar la señal proveniente del sensor capacitivo a la entrada de un Amplificador Lock-in (ALI) Stanford Research SR 850, como se muestra en el diagrama esquemático de la figura 4. Se monitorizó la fase y amplitud de la señal para probar los ajustes de compensación antes de realizar las mediciones con el fin de compensar corrientes parásitas en la etapa de acondicionamiento electrónico y obtener una señal con mínimo offset.

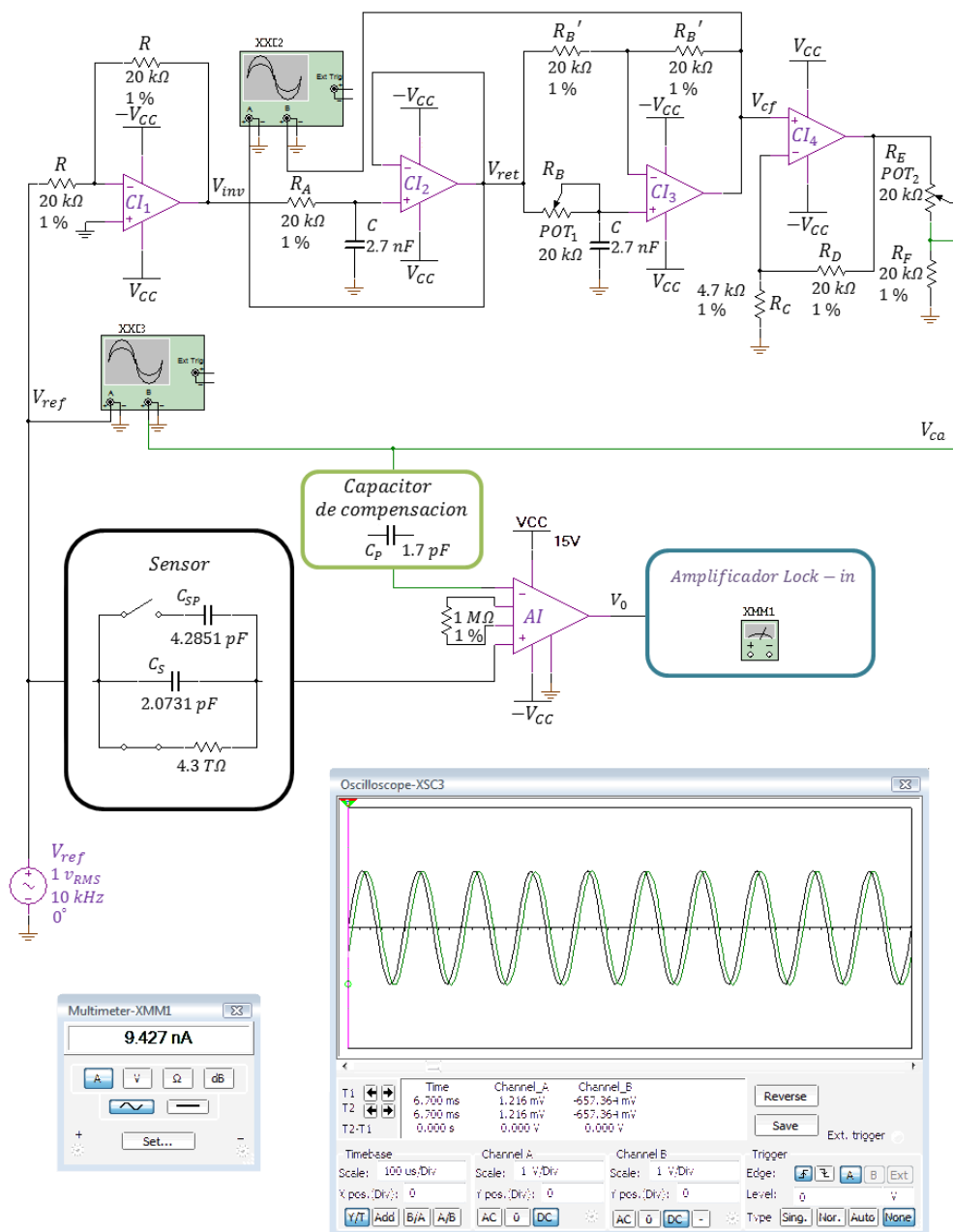


Figura 4. Diagrama esquemático del circuito de acondicionamiento electrónico.

El circuito impreso se realizó con el programa de desarrollo de circuitos impresos Eagle 5.7.0, se colocó un plano de tierra en la parte superior del circuito para disminuir señales no deseadas que pudieran interferir al momento de realizar las mediciones, estas señales pueden ser generadas por ruido electromagnético presente en el ambiente. La simulación del diseño del circuito impreso con los componentes electrónicos se muestra en la figura 5.

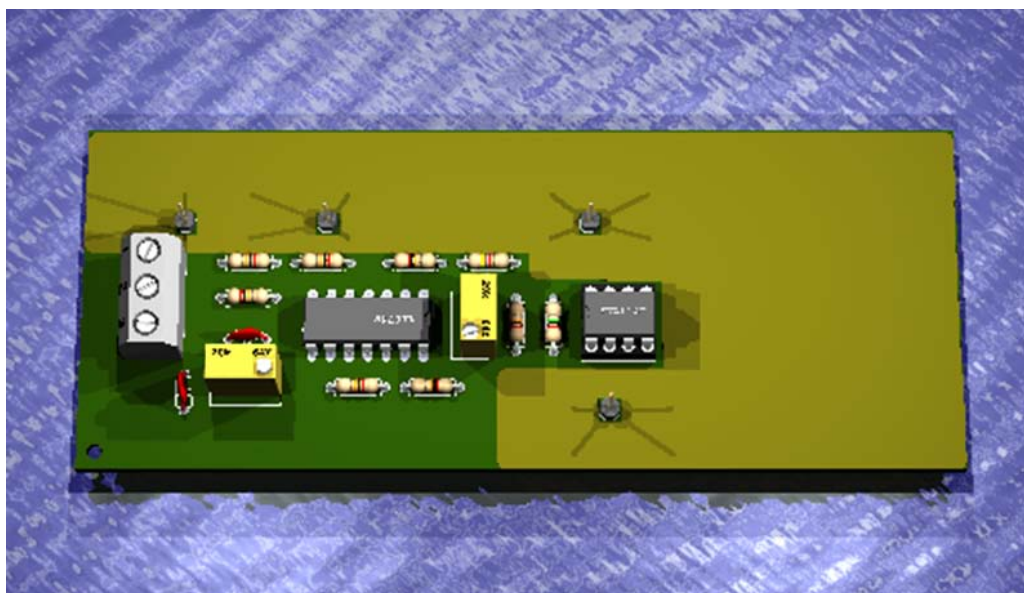


Figura 5. Diseño del circuito impreso.

La distribución física de los componentes electrónicos sobre el circuito impreso de la etapa de acondicionamiento electrónico, como se muestra en la figura 6.

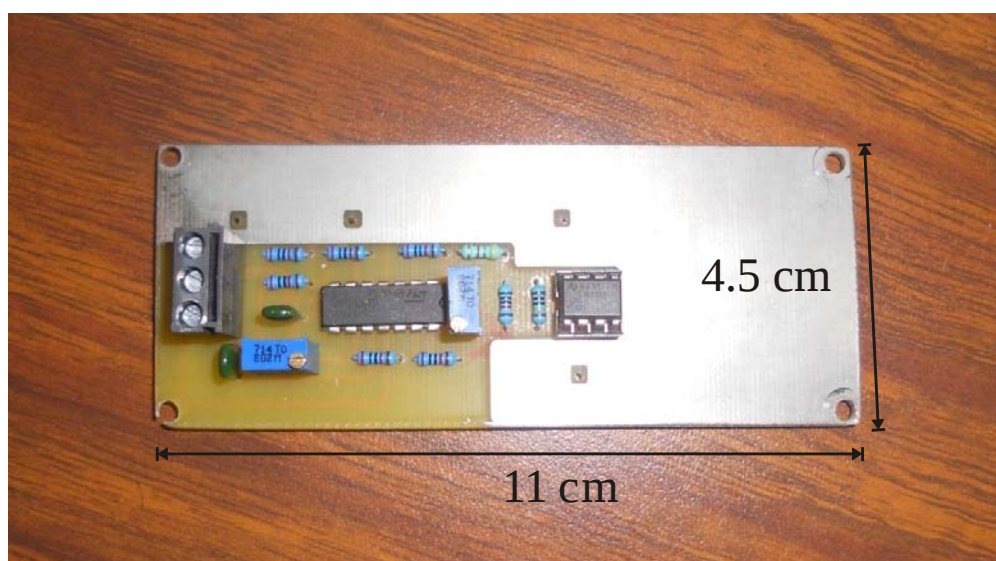


Figura 6. Implementación física del sistema electrónico de acondicionamiento de la señal.

4. Diseño del soporte mecánico del sensor

Una vez elegido el sensor se buscó la mejor forma de mantener al sensor sin movimiento y libre en su superficie sensitiva, de tal forma que fuera posible mantenerla en posición horizontal, con el fin de disminuir la capacitancia parásita y realizar un ajuste inicial con mínimo offset. La montura tiene una abertura de forma transversal con el fin de retirar fácilmente el sensor para su limpieza o sustituirlo por otro. Una vez realizada la estructura se diseñó una base de acrílico para sostener la montura de teflón. El área sensible del sensor queda libre y es posible realizar mediciones con una muestra de algún MBP que puede ser colocado directamente sobre los electrodos (en la figura 7 se puede observar la base de acrílico que sostiene la montura de teflón con los tornillos que aprisionan al sensor).

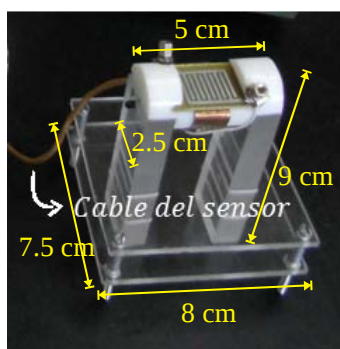


Figura 7. Soporte mecánico que mantiene al sensor fijo.

5. Elección de los cables del sistema de acondicionamiento de la señal

Tomando en cuenta que la señal de ajuste inicial presentó una magnitud inferior a la del ruido cuando se probó en la placa de pruebas, se determinó que el cable de la señal debería estar blindado al igual que el cable del sensor, el cable de polarización del circuito está conectado a una fuente de tensión bipolar y regulada Tektronix PS280, en la figura 8 se muestran los cables con los bornes de conexión al Amplificador Lock-in y el cable de polarización para el circuito impreso así como el chasis metálico que encierra el circuito electrónico.

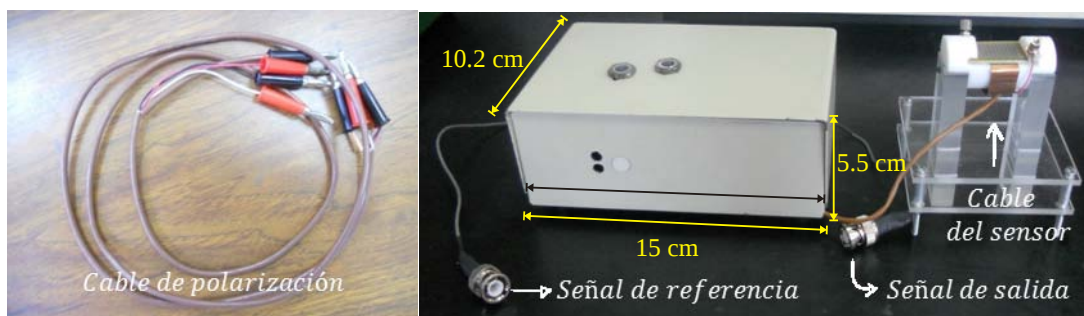


Figura 8. Cables de polarización y de conexión al Amplificador Lock-in.

6. Blindaje de la electrónica de acondicionamiento

La electrónica de acondicionamiento se colocó dentro de un chasis metálico en donde se adaptaron los conectores para la fuente de polarización del circuito y del amplificador Lock-in. Los cables de polarización están conectados en serie a un interruptor de dos polos y dos tiros. En la figura 9 se puede observar la caja de blindaje del circuito de acondicionamiento.

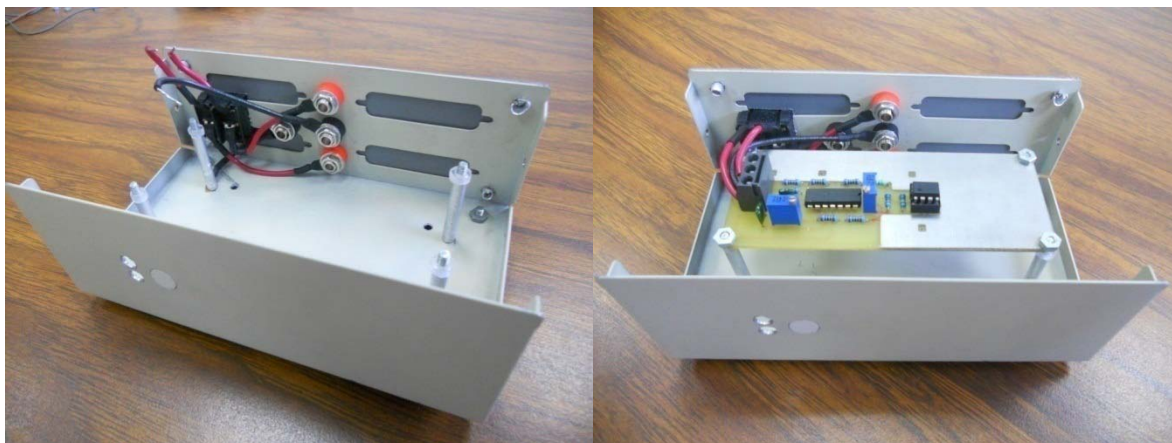


Figura 9. Blindaje del acondicionamiento de la señal.

En la figura 10 se muestra el Sistema de Medición Capacitivo propuesto con las conexiones al ALI y sensor. Además se muestra un osciloscopio para realizar un ajuste inicial en fase y amplitud y el puente digital LCR con el cual se obtuvieron los parámetros eléctricos de caracterización del sensor capacitivo.



Figura 10. Sistema de medición capacitivo completo.

7. Ajustes iniciales del sistema.

Se tienen dos rangos de ajuste en fase y amplitud (ver figura 4) con el fin de realizar un ajuste inicial y obtener un valor de referencia muy cercano a cero en la salida de la etapa diferencial, controlados mediante las resistencias variables R_B y R_E .

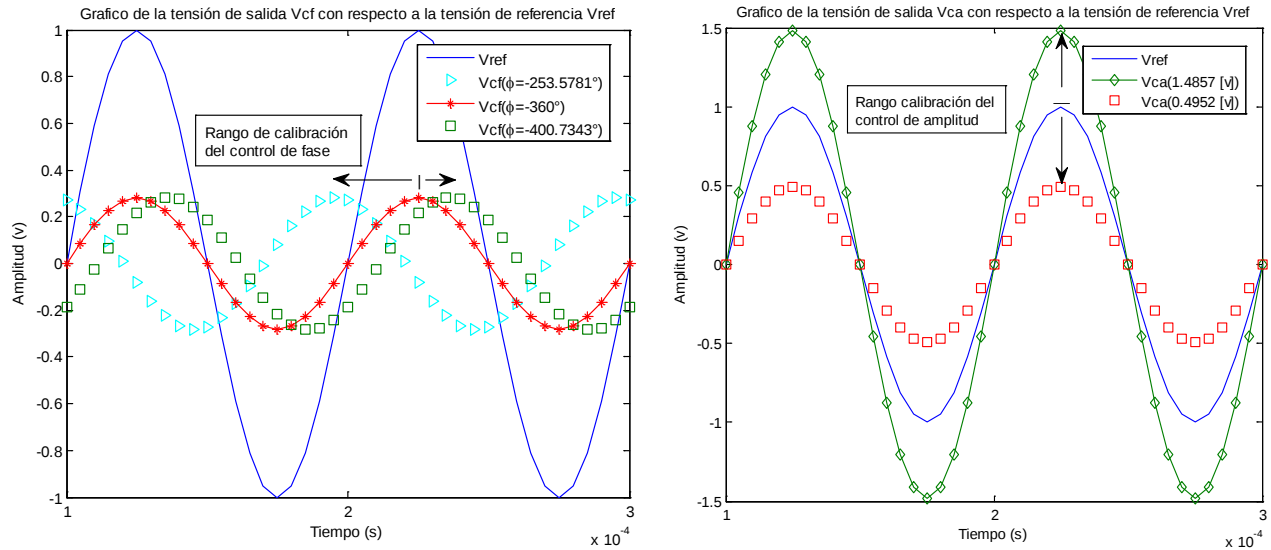


Figura 11. Rangos de ajuste en fase y amplitud para calibración inicial.

La respuesta de los controles de fase y amplitud se ven reflejadas en la tensión de salida del control de amplitud V_{ca} que llega al capacitor de compensación. Como la capacitancia del capacitor de compensación es diferente a la capacitancia del capacitor sensor las tensiones que llegan al amplificador de instrumentación también son diferentes debido a las impedancias propias del capacitor de compensación Z_P y a la impedancia del capacitor sensor Z_S . En la figura 12 se muestran las conexiones del circuito.

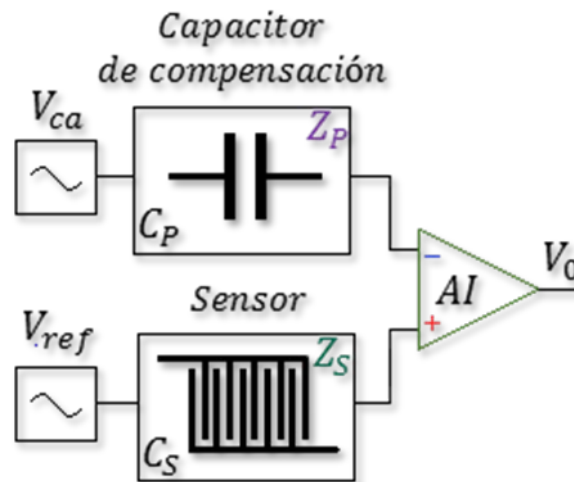


Figura 12. Diagrama de conexiones del circuito.

La salida V_O del amplificador de instrumentación $A1$ es una salida diferencial de las señales de los sensores que entran al mismo amplificador. El objetivo de realizar un ajuste diferencial inicial es hacer que la salida del amplificador $A1$ tienda a cero con los ajustes de fase y amplitud mencionados anteriormente. La salida del amplificador $A1$ entra a una etapa de amplificación Lock-in en la cual se realizarán las mediciones de corriente finales.

La impedancia de entrada del amplificador Lock-in es $1\text{ [k}\Omega\text{]}$ que convierte la señal de tensión a corriente eléctrica por medio de una etapa de transimpedancia, internamente el amplificador Lock-in separa las componentes real y compleja de la corriente de acuerdo con el Manual del Amplificador Lock-in SR-850 (1992). Como se puede observar en la figura 4 el valor del capacitor de compensación $C_p = 1.7\text{ [pF]}$ es menor al que se tiene en el sensor $C_s = 2.0731\text{ [pF]}$ y que es provocado por una capacitancia parásita en los cables $C_{SP} = 4.2851\text{ [pF]}$.

La simulación de los ajustes iniciales con el programa de simulación Multisim 11.0 para circuitos responde muy lentamente y además no es posible obtener la corriente imaginaria, es por ello que los ajustes solamente se realizaron experimentalmente con el amplificador Lock-in el cual permite obtener la componente de corriente compleja.

Preparación del sistema de medición:

- Antes de empezar a realizar mediciones todos los equipos deben estar desconectados, si no lo están hay que desconectarlos.
- Encender el amplificador Lock-in SR 850 y poner la terminal A como una entrada de corriente.
- Se varía la sensibilidad en el amplificador Lock-in hasta que se alcance un punto óptimo de trabajo de 10 [nA] (entre más pequeño sea este valor se pueden despreciar más señales no deseadas, pero habrá un punto en el que no será posible tomar lectura alguna porque estaremos en la escala del ruido del amplificador y nuestra señal se perderá (estará al nivel del ruido)).
- Se deberán mostrar en el amplificador Lock-in la corriente compleja en dos modos: una gráfica temporal y otra en barra. La corriente compleja es la que se debe medir.
- Encender la fuente de alimentación bipolar regulada de tal forma que se tenga una polarización de $\pm 9\text{ [V]}$. Si se desean monitorizar los cambios de temperatura y humedad este es el momento de colocar un termómetro y un sensor de humedad.
- Se conecta la fuente de alimentación al sistema de acondicionamiento de la señal fabricado mediante los conectores banana-banana (el cable blanco se conecta a la polarización negativa $(-V_{CC})$, el cable café se conecta a tierra física (GND) , el cable negro se conecta a la referencia de 0 [V] y el cable rojo se conecta a la polarización positiva $(+V_{CC})$.
- Verificar con un multímetro u osciloscopio que se mantengan las señales de la fuente de alimentación. Y desde este momento evitar tocar con las manos el sistema electrónico de acondicionamiento de la señal.
- Conectar la señal senoidal de referencia del amplificador Lock-in con amplitud de $1V_{rms}$ al módulo de acondicionamiento electrónico y verificar que las señales V_{ca} y V_{ref} lleguen respectivamente al capacitor de compensación C_p y al sensor capacitivo C_s .

- Cada vez que se realice una medición el substrato debe estar limpio y hay que evitar tocar la superficie donde se coloca el Material Bajo Prueba (MBP) así como la superficie del sensor.
- Conectar la entrada de corriente en la terminal A de amplificador Lock-in.

Metodología para realizar ajuste inicial:

1. Ajustar la fase de la señal mediante la resistencia variable R_B hasta obtener una corriente compleja mínima en el amplificador Lock-in.
2. Observar en un osciloscopio que las tensiones a la entrada del amplificador de instrumentación V^+ y V^- estén en fase (en caso de que se desconozca si están en fase o no ambas señales).
3. Una vez ajustada la señal en fase se deberá ajustar la amplitud de la señal mediante la resistencia variable R_E hasta obtener una corriente compleja aún menor.
4. Monitorizar la corriente compleja en un lapso de 100 [s] del sistema calibrado, hay que tomar en cuenta que el nivel de ruido puede variar dependiendo de las condiciones ambientales y ruido electromagnético presente en el laboratorio.
5. Cuando hay cambios bruscos en una medición o algo que no es normal en una medición, por ejemplo puede ser un pico o un drift se deberá repetir el paso 4, las vibraciones del ambiente afectan, si no hay vibraciones con una repetición del paso 4 será suficiente y se puede realizar esto con un máximo de 3 veces, si el sistema sigue marcando algo erróneo se deberán repetir todos los pasos.
6. Si se han realizado satisfactoriamente los pasos anteriores se podrán monitorizar los incrementos de la señal diferencial de corriente compleja con el amplificador Lock-in. Las mediciones se realizaron en condiciones ambientales no controladas.

8. Resultados experimentales

El sistema de medición se aplicó primero para monitorizar la velocidad del proceso de evaporación de cuatro solventes obteniendo medidas temporales diferenciales de la componente compleja de la corriente debida a la impedancia del MBP y de su función dieléctrica, Niall y Magner (2005) . La forma de obtener el cálculo de la capacitancia de forma indirecta fue mediante la siguiente ecuación obtenida de un análisis de impedancias del sistema:

$$C = \frac{Im[i]}{2\pi f \cdot V_{ref}}, \quad (1)$$

C: Capacitancia medida.

$Im[i]$: Componente compleja de corriente que proporciona el amplificador Lock-in.

f : Frecuencia de la señal senoidal de referencia, 10 [kHz]

V_{ref} : Amplitud de señal de referencia aplicado al sensor capacitivo, 1[V_{rms}].

Se utilizó un sustrato de vidrio de $100\mu\text{m}$ de espesor sobre la superficie sensible del sensor capacitivo para aislar eléctricamente los electrodos coplanarios. De esta forma, fue posible sensar el proceso de evaporación de tres diferentes solventes, alcohol isopropílico, thinner, ethanol y acetona, figura 13.



Figura 13. Solventes utilizados.

Después de un ajuste inicial del sistema de medición se monitorizaron los incrementos en la capacitancia depositando gotas de volumen no controlado sobre el sustrato de vidrio, el área que abarcaba la gota de solvente en el área sensible tampoco estaba controlada, por lo que los resultados sirvieron para caracterizar la sensibilidad del sensor, determinar la relación señal a ruido, ver el tiempo de respuesta del sensor y verificar que los solventes presentarán una respuesta temporal capacitiva diferente al evaporarse.

Una vez realizadas las primeras mediciones se implementó una celda en donde se depositó la misma cantidad de volumen para cada solvente con el fin de realizar las mediciones con volumen controlado. La celda fue construida sobre un sustrato de vidrio con $100\mu\text{m}$ de espesor y resina epoxi como se muestra en la figura 14. La celda fabricada permite depositar $30\mu\text{L}$ de volumen de líquido.

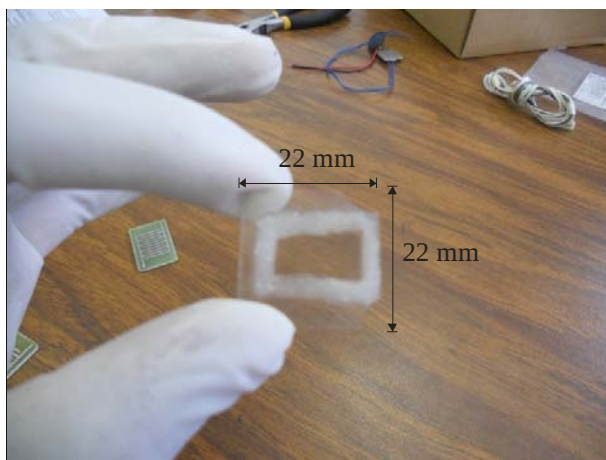


Figura 14. Sustrato de vidrio de $100\mu\text{m}$ de espesor con la resina epoxi.

El sustrato de la figura 14 es colocado sobre el área sensible del sensor capacitivo, se realiza un ajuste cercano a cero de la corriente compleja, después se monitoriza con el amplificador Lock-in y mediante la ecuación (1) se calcula la capacitancia del MBP de forma indirecta.

Las condiciones a las que se realizaron las mediciones se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5. Condiciones iniciales de las mediciones

Ruido base	51.62 aF/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Lapso de tiempo	100 s
Temperatura	27 °C
Humedad Relativa	20%

Con estas condiciones se monitorizaron los procesos temporales de evaporación de los cuatro solventes mencionados obteniéndose las siguientes gráficas de la figura 15.

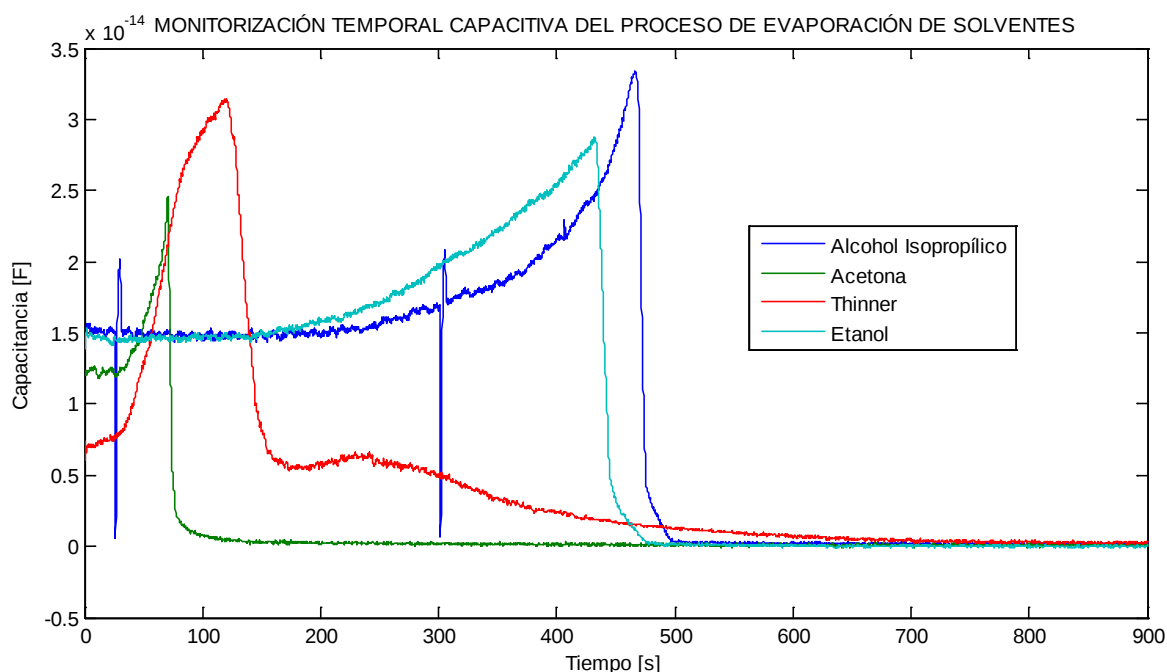


Figura 15. Monitorización temporal capacitiva del proceso de evaporación del Alcohol Isopropílico, Acetona, Etanol y Thinner.

Se puede observar que en todos los casos se tiene una capacitancia inicial cuando el tiempo es cero, y sin excepción todos los solventes aumentan su valor de capacitancia hasta un nivel máximo. Con la acetona, etanol y alcohol isopropílico después de que llegan a su valor máximo se evaporan rápidamente y regresan al estado de referencia inicial, esto no ocurrió con el thinner, ya que tardó más tiempo en evaporarse aunque después regresó a su estado inicial de referencia inicial. También se observó que si se tiene un solvente contaminado no regresa a su estado de referencia inicial (en este caso no se realizaron mezclas de solventes). En la gráfica del alcohol isopropílico se registraron dos artefactos (picos) en las mediciones debido a alguna fuente de ruido como un transitorio en la red eléctrica.

Como segunda aplicación se monitorizó el secado de una película de pegamento blanco Resistol 850 con aproximadamente $100\mu\text{m}$ de espesor el cual se depositó sobre un sustrato de vidrio también de $100\mu\text{m}$, como se muestra en la figura 16. Las condiciones iniciales fueron las mismas que se obtuvieron en la aplicación anterior, mostradas en la tabla 5.

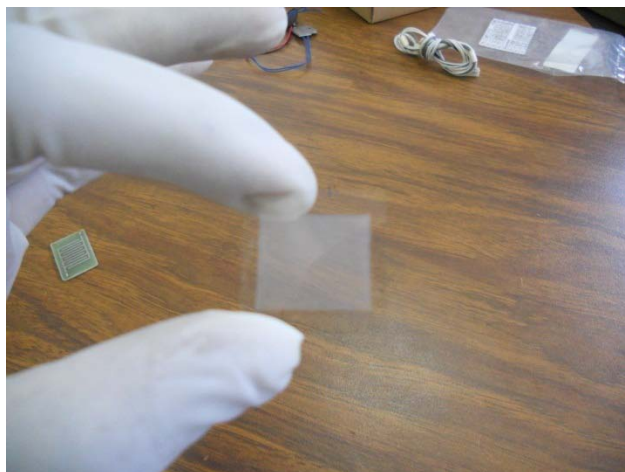


Figura 16. Película de Resistol 850 sobre un sustrato de vidrio con $100\mu\text{m}$ de espesor.

En la figura 17 se muestra el proceso de secado de una película con $100\mu\text{m}$ de espesor de Resistol 850 con base de agua. El proceso de secado en función del proceso temporal de evaporación se monitoreo por un lapso de tiempo de 12h en condiciones ambientales no controladas.

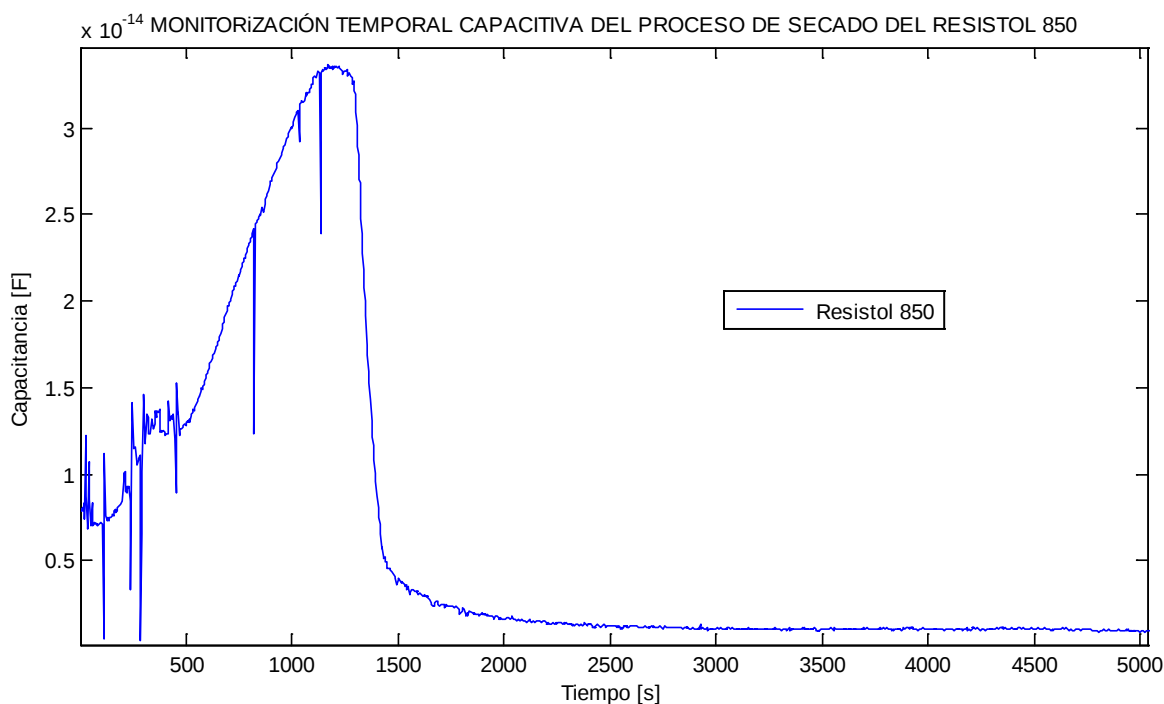


Figura 17. Monitorización temporal capacitiva del proceso de secado de la película de Resistol 850.

Es posible determinar el tiempo de secado del solvente desde el momento que no se presentan cambios temporales de capacitancia, en este caso desde los 5000s o 83.3min en donde los valores de capacitancia son casi constantes, como se observa en la figura 17. Los cambios temporales de capacitancia se calcularon en función de la componente imaginaria de la corriente obtenida con el ALI.

La curva trazada en la figura 17 muestra los incrementos de capacitancia asociados a este experimento. La capacitancia actúa de forma similar a las curvas de capacitancia obtenidas con los solventes, en el sentido de que aumenta hasta un valor máximo y a medida que se va evaporando la base del pegamento alcanza un valor constante de capacitancia de $C=1.058pF$, diferente del valor de referencia inicial. Este valor de capacitancia es debido a la función dieléctrica de la superficie de pegamento que quedo al secarse.

La interpretación del secado de pegamento blanco esta "ligada" a la evaporación de solventes; el secado del resistol consiste en la pérdida del solvente en las distintas capas del resistol, Masschelein y Liliane (2004). Si se toma como primera capa a la superficie del resistol en contacto con el aire el solvente en su superficie será el primero en evaporarse por lo cual la superficie quedaría seca lo cual impide el paso del solvente de la segunda capa (debajo de la primera capa). El secado de la película del pegamento blanco depende de la evaporación del solvente en la segunda capa.

Conclusiones

El sistema de medición basado en sensores capacitivos coplanares propuesto presento un ruido base de alrededor de 50 aF/√Hz, lo que permitió registrar variaciones de capacitancia en el orden de décimas de femtoFaradios obteniendo una relación de señal a ruido muy conveniente en la monitorización del proceso de evaporación de solventes. El tiempo de evaporación de 30 μL de solvente fue de algunos segundos dependiendo del tipo de solvente. En el caso del proceso de secado del pegamento el tiempo fue de horas y en el cual fue posible registrar la película depositada en el sustrato de vidrio una vez que el solvente se evaporo. Esta técnica de medición permite realizar pruebas de caracterización de procesos físico-químicos de una forma práctica ya que solamente es necesario intercambiar los sustratos dieléctricos en donde se deposita el MBP sin necesidad de cambiar el sensor capacitivo. Es posible cambiar la sensibilidad del sensor modificando el número y/o las dimensiones de los electrodos coplanares y por lo tanto la superficie sensitiva del sensor completo. Finalmente, esta técnica de medición puede ser utilizada en otras áreas como la bioquímica y electrofisiología.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Técnico en fabricación Rosa María García Vega del Departamento de Diseño Gráfico del CCADET por su apoyo con la fabricación de los circuitos impresos.

Referencias bibliográficas

1. Christine Berggren, Bjarmi Bjarnason and Gillis Johanson, (2001): "Review Capacitive Biosensors". **Electroanalysis**, 13, No. 3, 173-180.
2. Masschelein Kleiner; Liliane, (2004): "Los solventes". **Centro Nacional de Conservación y Restauración (CNCR)**, pp. 25-37.
3. Niall J. O'reilly and Edmond Magner, (2005): "Electrochemistry of Cytochrome c in Aqueous and Mixed Solvent Solutions: Thermodynamics, Kinetics and the Effect of Solvent Dielectric Constant". <http://lounge.ssradiouk.com/listen.plsonstant>. **Langmuir**, 21, pp. 1009-1014.
4. Stanford Research Systems (SRS), User Manual Model SR715 LCR Meters, (1991). Revision 1.2 (5/92)
5. Stanford Research Systems (SRS), User Manual Model SR850 Lock-in Amplifier, (1992). Revision 2.0 (01/2007)