



Informe Técnico

Implementación y caracterización de un sensor capacitivo de doble sonda

Asur Guadarrama Santana

Gloria Mata Hernández

13 de septiembre de 2018

Desarrollo Tecnológico

Implementación y caracterización de un sensor capacitivo de doble sonda

Asur Guadarrama Santana*, Gloria Mata Hernández

*ICAT UNAM, Facultad de Ingeniería UNAM

Resumen

Este trabajo describe la implementación y caracterización eléctrica de un Sensor Capacitivo de Doble Sonda, el cual se basa en la interacción de un campo eléctrico entre un electrodo con geometría en punta y un electrodo plano formando una sonda capacitiva. El Sensor Capacitivo de Doble Sonda está formado por un par de sondas con las mismas características las cuales se acoplaron a un sistema de medición capacitivo de bajo ruido. Una sonda funciona como elemento de compensación y la otra como sensor. Los electrodos en punta presentan una geometría conoidal y su vértice tiene un diámetro de curvatura de aproximadamente 100 μm . Estos se encuentran fijos en posición perpendicular a los electrodos planos con una separación alrededor de 250 μm . Un voltaje de excitación alterno aplicado entre los electrodos genera un campo eléctrico entre estos y cuando se coloca una muestra líquida en estudio se presentan perturbaciones del campo eléctrico las cuales se detectan como corrientes eléctricas por medio de mediciones diferenciales. La señal temporal de corriente obtenida está directamente en función de los cambios de impedancia que experimenta una gota de líquido de hasta 5 μl de volumen en un intervalo de tiempo determinado por el proceso de evaporación, en este caso se analiza la componente imaginaria de la corriente eléctrica con el fin de obtener los resultados en términos de la capacitancia eléctrica. Los resultados mostraron que es posible caracterizar eléctricamente diferentes líquidos utilizando los electrodos propuestos con geometrías punta-plano.

Índice

Nomenclatura

Introducción

1	Sensor Capacitivo de Doble Sonda.....	4
1.1	Electrodo en punta.....	5
1.2	Electrodo plano.....	6
2	Montaje de las sondas capacitivas.....	7
2.1	Montura de los electrodos en punta.....	8
2.2	Montura de los electrodos planos.....	9
3	Caracterización eléctrica del Sensor Capacitivo de Doble Sonda.....	10
4	Acoplamiento del Sensor Capacitivo de Doble Sonda a un Sistema de Medición Diferencial.....	11
4.1	Diagrama de bloques del Sistema de Medición Diferencial con el Sensor Capacitivo de Doble Sonda.....	11
4.2	Metodología de medición.....	12
5	Resultados experimentales.....	13
	Conclusiones.....	16
	Referencias Bibliográficas.....	16

Introducción

La investigación, el análisis teórico y las aplicaciones prácticas con el uso del concepto de impedancia, y de manera específica el asociado a la capacitancia ha tenido una gran evolución, proyección y relevancia en diversas disciplinas científicas y de investigación como la electroquímica, biociencias, biomedicina, energía renovable electroquímica, sensores, electrónica y otros campos afines, tanto en sistemas aplicados como en experimentales ya establecidos, emergentes y aun los no convencionales, Aslam (2014).

Investigaciones y aplicaciones potenciales son la actividad eléctrica en células, análisis biológicos, sensores biomédicos, control de corrosión, monitoreo de propiedades electrónicas, almacenamiento de energía y muchos otros más, Lvovich (2012).

Algunos trabajos reportan el uso de sondas con diferente geometría de electrodos fijos y en movimiento en escala micrométrica con gran proyección tecnológica Hrach (2008), de ahí la importancia de realizar desarrollos tecnológicos para aplicarlos en la investigación experimental.

Este trabajo tiene como antecedente y sustento investigaciones y desarrollos documentados en diversos trabajos y artículos, a partir de los cuales se planteó la presente investigación de desarrollo experimental. Dos aspectos fundamentales en los que se basa este proyecto son los siguientes:

1. Se hace referencia a estudios que muestran que una punta fina utilizada como electrodo sensor muy próximo a una superficie puede ser representado teóricamente por un electrodo esférico, a partir de ello, se realiza el análisis teórico de la capacitancia de un electrodo esférico en contacto con un recubrimiento dieléctrico con espesor finito y se identifica que el valor de la capacitancia es independiente del espesor de una muestra cuando el radio de curvatura de la punta es varias veces menor que el espesor de la muestra, Santana (2010).
2. Se ha desarrollado una metodología para realizar mediciones diferenciales capacitivas en forma estática Chatterjee (2015). De manera particular, Martin (2017) describe un sistema de medición capacitivo en cuanto a sus componentes fundamentales como la etapa de acondicionamiento para adaptarlo a diferentes tipos de sensores, utilizado en este trabajo.

Con base en los antecedentes mencionados, en el presente trabajo se conjuntan los dos aspectos y se incorporan variantes creando un nuevo concepto: medición diferencial utilizando un Sensor Capacitivo de Doble Sonda (SCDS) con electrodos de geometría diferente, punta-plano, que puede ser utilizado en la caracterización eléctrica de materiales, procesos físico-químicos y biológicos.

Bajo estos conceptos se propuso el diseño e implementación de dos sondas capacitivas con electrodos de geometría diferente, punta-plano. Las sondas están dispuestas de forma simétrica como capacitores de sensado y de referencia, teniendo la posibilidad de utilizarlos en condiciones estáticas y en movimiento, en una trayectoria predefinida en los ejes XY de los electrodos de superficie plana conductora, mediante una platina XYZ sobre la cual se encuentran colocados.

El principio fundamental se basa en utilizar una sonda compuesta con un electrodo de excitación de punta y como electrodo sensor una superficie plana por medio de la cual se puede medir la corriente imaginaria que pasa a través de un material bajo prueba (MBP) depositado entre ambos electrodos, tomando como referencia una segunda sonda idéntica con el fin de realizar una medición diferencial. Lo anterior utilizando un sistema de medición de bajo ruido de la componente imaginaria de la corriente y con la cual se calcula el valor de la función de capacitancia variable en el tiempo que se genera solamente con la interacción del electrodo en punta y el MBP, con o sin movimiento del electrodo plano.

La aportación de este trabajo consiste en implementar, caracterizar y validar el concepto de Sensor Capacitivo de Doble Sonda aplicando una metodología de medición diferencial propuesta para realizar la caracterización eléctrica de diversos líquidos, efectuando mediciones experimentales de forma estática.

1 Sensor Capacitivo de Doble Sonda

La medición de capacitancia con electrodos planos paralelos de geometrías regulares suele presentar problemas en cuanto al paralelismo, rugosidad y efectos de borde entre las superficies. Una alternativa para reducir estos efectos es la de utilizar electrodos con geometrías diferentes como es el caso de un electrodo de punta y uno de superficie plana, que además de disminuir dichos efectos, permite extraer y medir de forma puntual y localmente la contribución de la capacitancia con un medio dieléctrico que existe entre ambos electrodos.

El Sensor Capacitivo de Doble Sonda (SCDS) se compone con dos sondas capacitivas, integradas cada una con electrodos de diferente geometría, un electrodo de punta y el otro de una superficie plana, ambos conductores. Cada electrodo está conectado con cable coaxial para su fácil manipulación en el proceso de medición.

Ambos electrodos interactúan bajo la presencia de un campo eléctrico generado por una señal senoidal de excitación de $1V_{rms}$ aplicada al electrodo de punta. El electrodo de superficie plana actúa como electrodo sensor. El valor de la capacitancia se obtiene de forma indirecta al medir la corriente eléctrica que circula por un medio dieléctrico bajo prueba.

Se propuso un electrodo de punta puesto que cuanto menor es el diámetro de esta es posible minimizar problemas de paralelismo, aspectos de rugosidad y efectos de borde entre las superficies, características que alteran las mediciones de capacitancia. Sin embargo, también está presente la geometría cónica y cuerpo cilíndrico de la punta utilizada, situación que genera también capacitancias parásitas afectando la medición, siendo necesario reducirlas y compensarlas al máximo posible para obtener una medición confiable.

En la figura 1 se muestran las representaciones esquemática y eléctrica del par de sondas del SCDS, así como una vista física del sensor. Los electrodos en punta están representados como una flecha de color ocre, los electrodos planos corresponden a una superficie conductora de cobre de 100 mm^2 en color amarillo. Las terminales de conexión son de cable coaxial de $50\ \Omega$. La distancia entre electrodos punta-plano es de aproximadamente $150\ \mu\text{m}$.

El SCDS dispone de dos sondas capacitivas de características muy semejantes y lo más parecidas en su forma, construcción e impedancia con el fin de poder validar la funcionalidad del dispositivo realizando mediciones diferenciales. El par de sondas capacitivas está dispuesto de forma simétrica, separadas 15 mm entre las dos puntas, una de ellas es de sensado C_s y otra de compensación C_p .

La sonda de sensado se utiliza para detectar las perturbaciones del campo eléctrico cuando un MBP se deposita sobre un sustrato dieléctrico de $150\ \mu\text{m}$, el cual aísla eléctricamente el electrodo plano, la sonda de compensación se usa para obtener el mínimo nivel de referencia a partir del cual se detectan las variaciones de la medición.

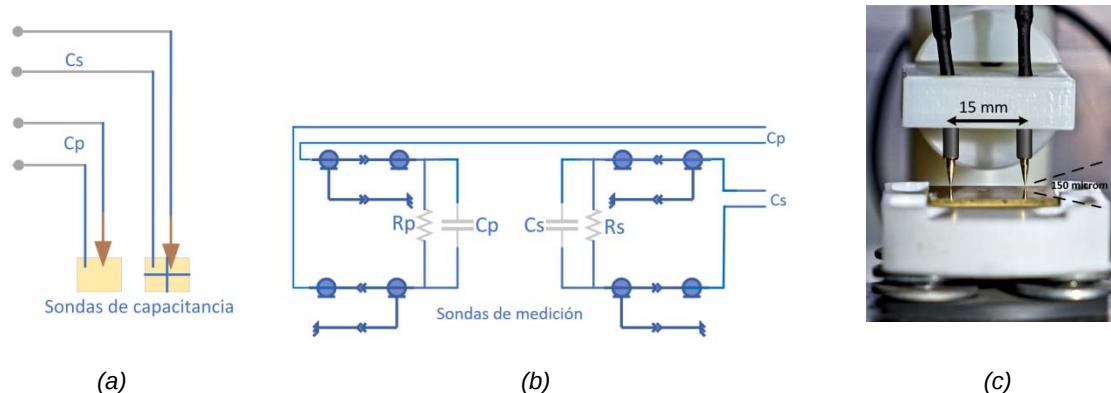


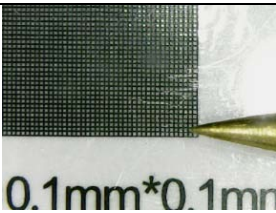
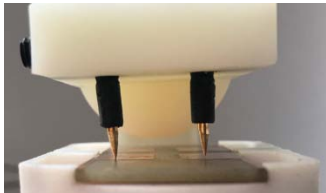
Figura 1. a) Representación esquemática del SCDS, b) Representación eléctrica del SCDS con cable coaxial, c) Vista física del SCDS.

Cada sonda está integrada con un sensor capacitivo cuyas terminales están unidas con cables coaxiales hacia un dispositivo de acondicionamiento electrónico de señal, las puntas funcionan como electrodos de excitación y se posicionan a una distancia aproximada de 250 μm de su respectivo electrodo plano de cobre. Los cables coaxiales de conexión con los electrodos se representan en el diagrama eléctrico de la figura 1(b).

1.1 Electrodo en punta

Se fabricaron e implementaron un par de sondas con electrodo en punta, estos presentan una geometría conoidal y su vértice tiene un diámetro de curvatura de aproximadamente 100 μm y el cuerpo cilíndrico tiene un diámetro de 1.7 mm. Las características físicas se presentan en la Tabla 1, así como la vista ampliada de los electrodos en punta, una imagen de las sondas y su distribución en el montaje.

Tabla 1. Dimensiones de los electrodos en punta.

Electrodo de Punta	Par de Sondas-Punta	Características
		Diseño propio Punta fina: terminal RF de bronce Longitud punta: 10 mm Longitud de punta expuesta: 3 mm Diámetro del cuerpo: 1.7 mm Forma de punta: Cilíndrica-Cónica Diámetro de curvatura: 100 μm Cable: Coaxial tipo RG-174/U 50 Ω Longitud del cable: 30 cm Resistencia de aislamiento: 350 $\text{M}\Omega$ ↑ Capacitancia1: 29.7 pF Capacitancia2: 29.6 pF Factor de Disipación: 0.008 en ambas
		

Las sondas se implementaron con cable coaxial con el fin de aislar la señal sensada del ruido eléctrico, de la distorsión que proviene de los hilos adyacentes y del ambiente. El par de sondas con electrodos en punta se colocan en un soporte ad hoc de manera que los electrodos se mantienen fijos y paralelos con una distancia entre puntas de 15 mm.

1.2 Electrodo plano

La disposición de la estructura simétrica de los electrodos planos se presenta en la figura 2. Como se ha mencionado, el sensor capacitivo está formado con una punta conductora utilizada como electrodo de excitación E1 y un segundo electrodo formado por un sustrato de cobre que corresponde a la superficie conductora plana C3 y una placa dieléctrica de vidrio C4, como se representa en la figura 2(a) con vista lateral y 2(b) con vista superior incluyendo las dimensiones en milímetros. La figura 2(c) muestra las terminales de conexión de los electrodos planos, según se seleccione un par entre C1 y C4, y en la figura 2(d) se muestra el plano de tierra. La descripción de la nomenclatura de la figura 2(a) es la siguiente:

E1 punta conductora como electrodo

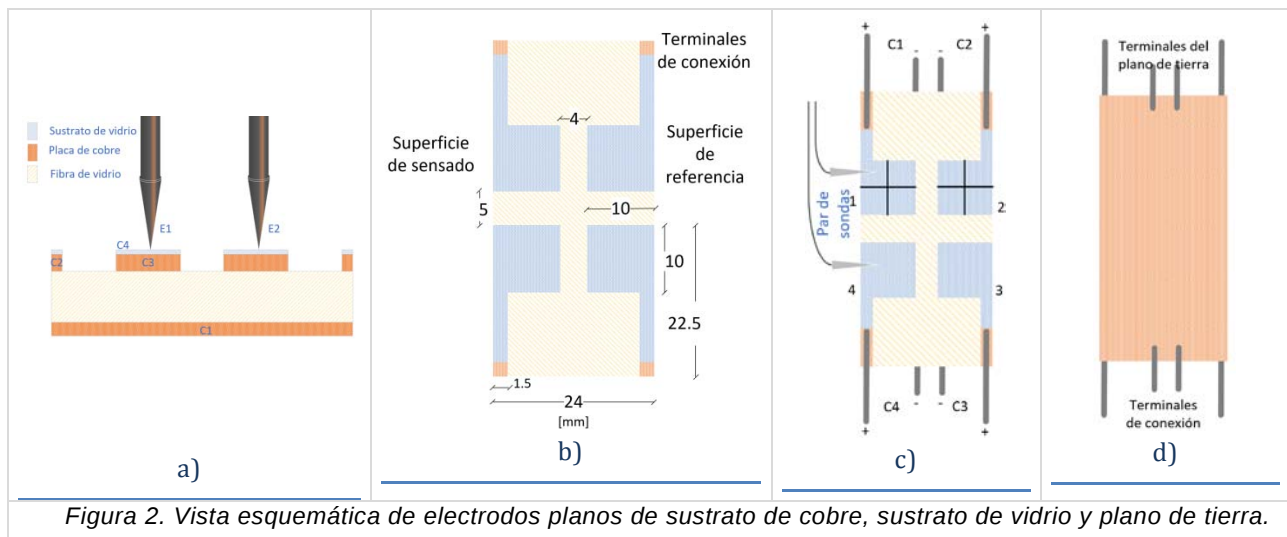
C1 sustrato de cobre para el plano de tierra

C2 terminales de conexión a cada electrodo del sustrato de cobre

C3 electrodos de las superficies de sensado y de compensación

C4 material dieléctrico que puede ser una cubierta de óxido de silicio o también un cubreobjetos de vidrio

Los electrodos planos se fabricaron con una placa fenólica para circuito impreso (PCB) de doble cara. La placa presenta de un lado cuatro superficies conductoras idénticas de 100 mm^2 cada una, el otro se utiliza como plano de tierra. De esta forma se puede disponer de dos superficies simétricas como electrodos planos, uno de sensado y otro de compensación de forma longitudinal o transversal, como se muestra en la figura 2(c). Las terminales de conexión con los cables coaxiales se identifican como C1 a C4 y los electrodos planos están marcados de 1 a 4. La distribución permite seleccionar los dos electrodos planos de acuerdo con el montaje de los electrodos en punta mencionado anteriormente.



En la figura 3(a) y 3(b) se muestra la placa de PCB que contiene los electrodos planos y en la figura 3(b) las sondas capacitivas con sus respectivos electrodos punta-plano que forman el SCDS montado en dos monturas mecánicas que permiten mantener una posición perpendicular entre los electrodos.



(a)



(b)



(c)

Figura 3. 3(a) se muestra la distribución de los electrodos planos sobre la tarjeta fenólica, en la figura 3(b) se muestra la tarjeta con los sensores planos con sus respectivos cables de conexión y en la figura 3(c) se muestra la disposición física de las sondas capacitivas sujetas a una montura manteniéndolas perpendicularmente a los electrodos planos formando en conjunto el SCDS.

En la Tabla 2 se presentan los valores característicos de los electrodos planos, obtenidos con el medidor de impedancia LCR SR715.

Tabla 2. Valores característicos de electrodos planos.

Electrodo plano	Capacitancia [pF]	Factor de Disipación D	Resistencia de Aislamiento [MΩ]
Ep1	4.76	0.007	437
Ep2	5.97	0.0048	450
Ep3	5.05	0.0067	470
Ep4	4.9	0.0075	430
Coaxial 1 Longitud 35 cm	27.309	0.00312	344
Coaxial 2 Longitud 35 cm	28.602	0.0021	306

2 Montaje de las sondas capacitivas

El SCDS está integrado con dos sondas capacitivas, cada sonda está compuesta con electrodos punta-plano conectados mediante cables coaxiales. Se requiere que las sondas sean de las mismas características, valores y disposición física. Esto asegura una compensación y ajuste inicial de medición diferencial a un valor mínimo de referencia que permite obtener el máximo rango dinámico del sistema de medición.

montaje están identificados en la imagen como G1 a G5, fijándose cada pieza con prisioneros. Esta movilidad permite colocarlo en cualquier parte de la base principal a distancias, alturas y posiciones convenientes. En los espacios indicados G5 se colocan y ajustan ambos cables con los electrodos en punta.

2.2 Montura para los electrodos planos

El montaje de los electrodos planos se muestra en la figura 6, la montura se encuentra sujeta mecánicamente a una platina XYZ la cual incluye mecanismos para su nivelación. Al estar fijo el montaje de los electrodos planos a la platina, es posible programar y controlar su movimiento mediante un barrido lineal en los ejes XY, de manera que los electrodos planos pueden quedar en una posición estática o bien en movimiento para realizar en cualquiera de las dos formas una medición diferencial de algún MBP.

En la figura 7 se muestra una imagen ampliada del SCDS. En la imagen se observan las sondas capacitivas paralelas entre ellas a una distancia de 15 mm entre puntas y perpendiculares a los electrodos planos, ambos con sus respectivos cables coaxiales formando los electrodos punta-plano. Sobre los electrodos planos se tiene un portaobjetos de vidrio y en el electrodo de punta de la derecha se ve una gota de una muestra de líquido bajo prueba

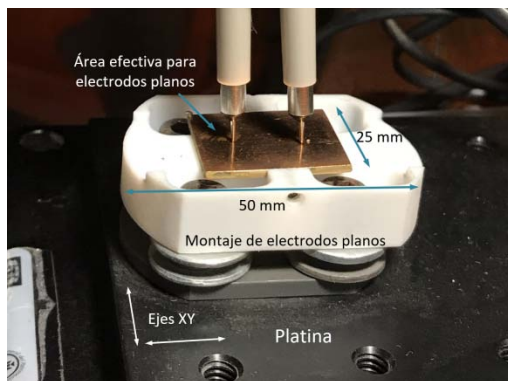


Figura 6. Montaje para los electrodos planos.



Figura 7. Montaje completo del Sensor Capacitivo de Doble Sonda.

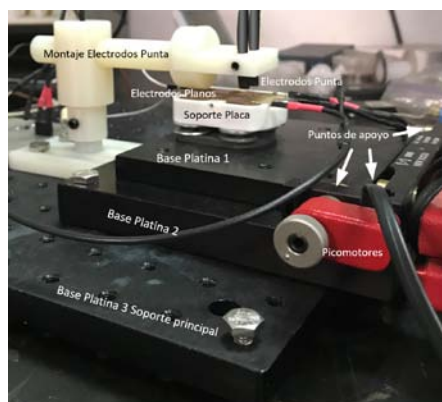


Figura 8. Montaje completo del SCDS sobre una platina XYZ.

En la figura 8 se muestra el montaje completo del SCDS montado sobre una platina XYZ New Focus 8753 la cual es opcional si se requiere realizar desplazamientos superficiales XYZ de los electrodos planos.

3 Caracterización eléctrica del SCDS

Se realizaron mediciones eléctricas de los electrodos punta-plano y sus respectivos cables coaxiales con diferentes referencias utilizando un medidor de impedancias LCR SR715 con la configuración que se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Configuración del LCR SR715 para realizar las mediciones de caracterización eléctrica

Voltaje de excitación	1 V _{rms}
Frecuencia	10 kHz
Conexión	Paralelo
Promedio de mediciones	10

En la tabla 5 se muestran los valores de las mediciones de capacitancia realizadas con los componentes que forman las sondas capacitivas.

Tabla 5. Mediciones de capacitancia realizadas con el LCR SR715.

Nomenclatura	Elementos capacitivos	Valor Capacitancia [pf]	Factor de disipación D	Resistencia de aislamiento [MΩ]
Cs	Electrodos punta-substrato de sensado	1.85		
Cp	Electrodos punta-substrato de compensación	1.63		
Ce1	Entre electrodos punta	1.53		
Ce2	Entre electrodos substrato	1.26		
Cc1	Cable Coaxial en electrodo punta de compensación	17.26		
Cc2	Cable Coaxial en electrodo substrato sensor de compensación	17.309		
Cc3	Cable Coaxial en electrodo punta de sensado	16.94		
Cc4	Cable Coaxial en electrodo substrato de compensación	16.602		
Ct1	Electrodo punta de compensación y plano de tierra	0.576	0.007	
Ct2	Electrodo substrato de compensación y plano de tierra	4.76	0.0067	N/D
Ct3	Electrodo punta de sensado y plano de tierra	0.538	0.007	> 437
Ct4	Electrodo substrato sensado y plano de tierra	5.59	0.006	> 390
Cp1	Parásitas de conexión	S/M		
Cp2	Parásitas de conexión	S/M		
Cp3	Parásitas de conexión	S/M		
Cp4	Parásitas de conexión	S/M		
Rs	Resistencia de aislamiento asociada a Cp	S/M		
Rp	Resistencia de aislamiento asociada a Cs	S/M		

4 Acoplamiento del Sensor Capacitivo de Doble Sonda a un Sistema de Medición Diferencial

El SCDS se acopla a un Sistema de Medición Diferencial (SMD) con el fin de verificar experimentalmente la interacción del campo eléctrico presente entre un electrodo con geometría en punta y un líquido sobre un sustrato dieléctrico que se encuentra colocado sobre un electrodo plano, por medio de mediciones diferenciales de corriente. La metodología de medición diferencial capacitiva se basa en la medición de la componente imaginaria de la corriente que pasa por una muestra de líquido y un sustrato dieléctrico cuando se aplica una diferencia de potencial entre los electrodos de punta-plano, considerando condiciones estáticas de los electrodos planos. El SCDS se acopla a una etapa de acondicionamiento electrónico para obtener una señal diferencial la cual entra a una etapa de Amplificación Lock-in (ALI) SR 850 en donde se procesa para su despliegue y obtención de datos temporales. La función del acondicionamiento electrónico de la señal es compensar por la disparidad en el par de sondas capacitivas del SCDS, minimizar los efectos debidos a las capacitancias parásitas producidas por artefactos implícitos y explícitos, acondicionando la señal para realizar una medición diferencial en el ALI y obtener el nivel mínimo de ruido rms con mínimo offset, a partir del cual se detectan las señales eléctricas temporales de algún material bajo prueba. La medición diferencial de la parte compleja de la corriente permite obtener de forma indirecta el valor de la capacitancia diferencial por medio de la ecuación (1).

$$\Delta C = \frac{Im\{\Delta I_{ALI}\}}{\omega V_{AC}} \quad (1)$$

En donde ΔC es el valor de la capacitancia diferencial calculada, $Im\{\Delta I_{ALI}\}$ es la componente compleja de la corriente diferencial obtenida con el ALI, ω es la frecuencia angular calculada como $2\pi f$, f es la frecuencia de referencia del SMD y V_{AC} es el voltaje de excitación aplicado entre los electrodos del SCDS a la frecuencia f .

4.1 Diagrama de bloques del Sistema de Medición Diferencial con Sensor Capacitivo de Doble Sonda

En términos generales se representa el SCDS y el SMD mediante el diagrama de bloques de la figura 9, mostrando sus respectivos componentes de medición y control de movimiento de una platina XYZ.

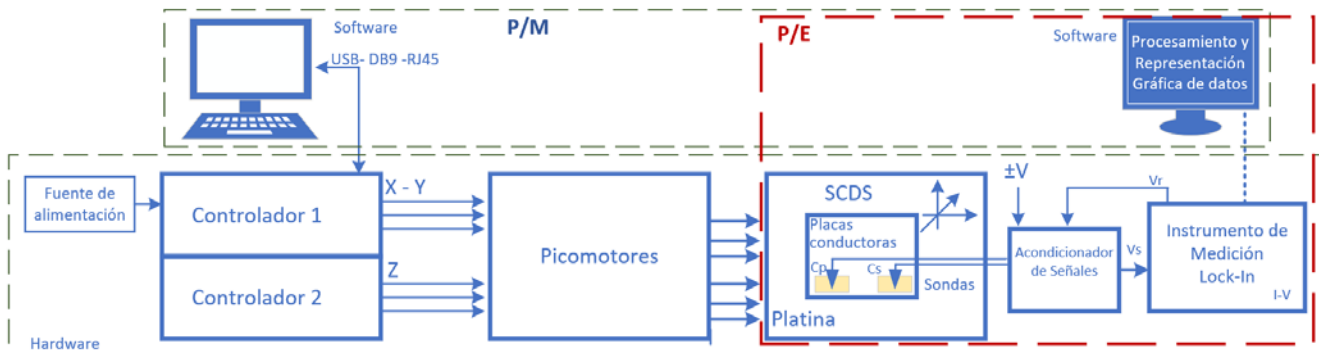


Figura 9. Diagrama de bloques del SMD-SCDS con platina XYZ.

Los Componentes que integran al sistema de medición incluyen:

- Platina XYZ New Focus
- Red de Picomotores Modelo 8095
- Controladores de Picomotores New Focus 8753
- Sensor Capacitivo de Doble Sonda (SCDS)
- Acondicionador de Señales

- Amplificador Lock-In SR 850

4.2 Metodología de medición

Con el fin de caracterizar la respuesta del SCDS se utilizaron diferentes líquidos solventes por su rápido proceso de evaporación, los cuales permitieron sensor una señal eléctrica temporal en función de las perturbaciones del campo eléctrico presentes en cada proceso físico-químico.

Ajustes mecánicos

Antes de realizar una medición es necesario realizar los ajustes mecánicos de la montura del SCDS para mantener los electrodos en punta perpendiculares a su respectivo sustrato de vidrio de 150 μm de espesor, los cuales están colocados sobre los electrodos planos, además de mantener una separación de 100 μm entre el vértice de los electrodos en punta y la superficie del sustrato de vidrio, como se muestra en la figura 7.

Configuración del SMD

Se configura el ALI para obtener el ruido base temporal sin MBP en el SCDS, este se conecta al SMD y se realizan los ajustes en fase, amplitud, ganancia y sensibilidad principalmente con el fin de obtener la señal base con mínimo offset y mínimo ruido. Una vez que se obtuvo la señal base se puede depositar una gota de algún líquido en el electrodo sensor y obtener su respectiva señal eléctrica temporal. La gota de líquido se deposita manualmente con una pipeta graduada en micro litros. En la tabla 6 se muestra la configuración del ALI para realizar las mediciones experimentales.

Tabla 6. Parámetros de configuración del ALI.

Parámetro	Ajuste
Referencias y Fases	
Fase de referencia	0 grados
Referencia de Fuente	Interna
frecuencia de referencia	10 kHz
Armónica	1
Salida Senoidal (señal de excitación)	1 Vrms
Entrada y Filtros	
Fuente	I
Ganancia de Corriente	1M
Conexión a Tierra	Tierra
Acoplamiento	CA
Filtros de línea	Ambos
Ganancia y Constante de Tiempo	
Sensibilidad	1 nA (se inicia con este valor)
Constante de Tiempo	100 ms
AB	1.2 Hz
Filtro	12 dB/oct.
Traza y Barrido	
Traza	1-Y, 2-Y
Tasa de Muestreo	16 Hz (variable según la medición)

Longitud del Barrido	1000 s (variable según la medición)
Ejecución	1 barrido
Despliegue y Escala	
Despliegue Superior	Traza 1 Chart
Despliegue Inferior	Traza 2 Barra

5 Resultados experimentales

Siguiendo la metodología de medición propuesta se realizaron mediciones experimentales estáticas con tres líquidos solventes, alcohol Isopropílico, Etanol y Acetona monitorizando el proceso de evaporación de gotas de 3 μl de cada líquido, depositadas secuencialmente con una pipeta graduada sobre la superficie del sustrato de vidrio que cubre al electrodo sensor plano.

Las gráficas de la señal temporal para cada muestra de solvente que se muestran en las figuras 10, 11 y 12. En cada figura se representa el proceso de evaporación de tres gotas de 3 μl de cada solvente respectivamente, las cuales se depositaron secuencialmente sobre un sustrato de vidrio en el electrodo sensor. Los segmentos identificados como D1, D3, D5 y D7 corresponden al nivel de ruido base presente durante las mediciones, la línea roja representa su tendencia en cada segmento mientras que los segmentos D2, D4 y D6 corresponden al tiempo de evaporación de las gotas del solvente. La escala izquierda está graduada de acuerdo con los datos obtenidos con el ALI. La escala de la derecha corresponde a los valores de capacitancia obtenidos mediante cálculo directo con la ecuación (1). Los parámetros del nivel de ruido base N_{RMS} en cada segmento se concatenaron con el fin de obtener un sólo valor, así mismo se presentan los valores de la relación señal a ruido máxima $(S/R)_{\text{max}}$, los tiempos de evaporación y los valores de corriente y capacitancia máximas en las tablas 7 a 12 para cada solvente respectivamente.

Alcohol Isopropílico

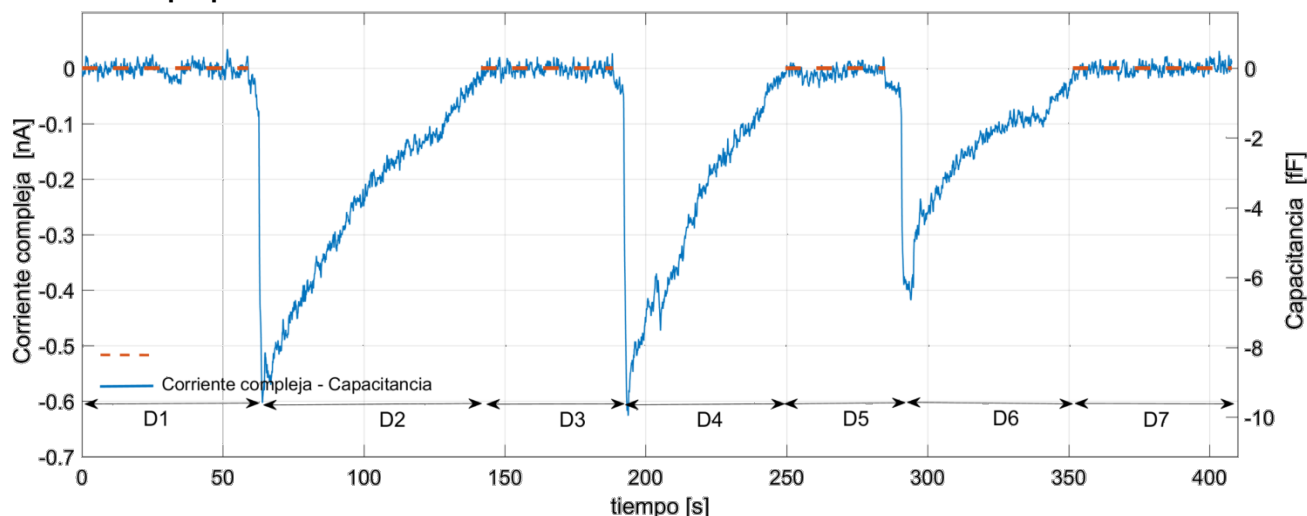


Figura 10. Señal temporal del proceso de evaporación de tres gotas de 3 μl de alcohol isopropílico.

En este caso no existe un periodo de estabilización de la señal. Al aplicar el líquido inmediatamente inicia el proceso de evaporación. Aun cuando en la tercera gota también fue de 3 μl , la señal es de menor

amplitud, probablemente debido a que no se haya depositado todo el líquido contenido en la pipeta y a los propios errores sistemáticos.

Tabla 7. Valores de ruido base y relación S/R máxima para el Alcohol Isopropílico.

Segmento	N_{RMS} [nA]	N_{RMS} [f F]	N_{RMS} [f F/ $\sqrt{\text{Hz}}$]	$(S/R)_{max}$	$(S/R)_{max}$ [dB]
D1, D3,D5,D7	0.0099	0.1576	0.1438	63.2661	36.0234

Tabla 8. Valores de tiempo de evaporación y capacitancia máxima para el Alcohol Isopropílico.

Segmento	Tiempo de evaporación [s]	ΔC_{MAX} [f F]	ΔI_{max} [nA]
D2	77.6100	9.9725	-0.62659
D4	58.3		
D6	56.5		

Etanol

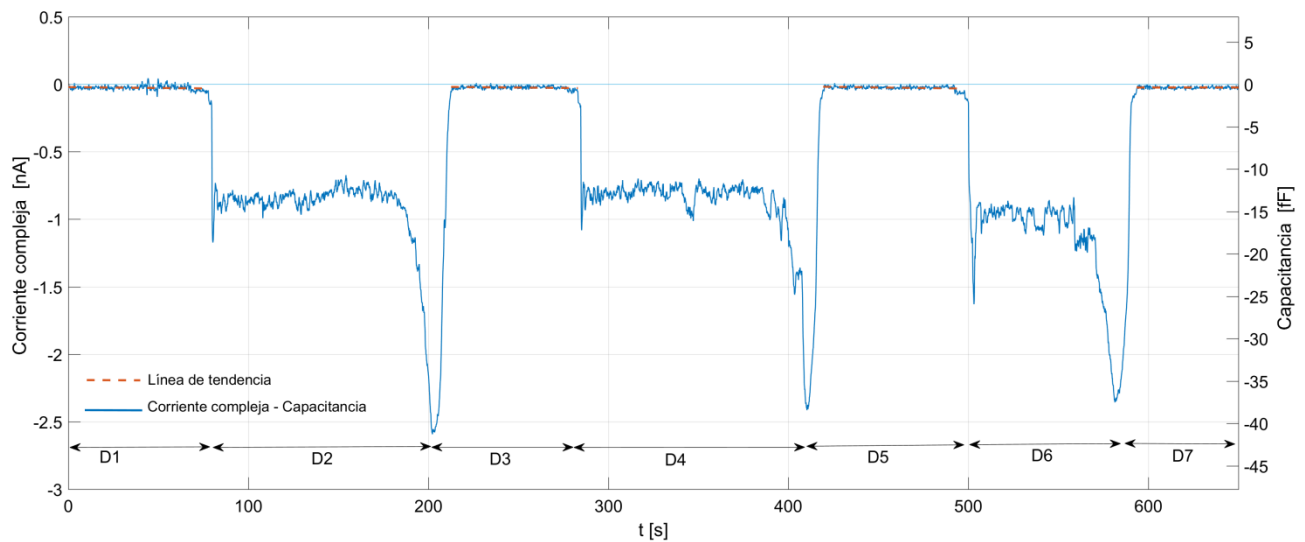


Figura 11. Señal temporal del proceso de evaporación de tres gotas de $3\mu\text{l}$ de Etanol.

La señal temporal para cada gota de este solvente presenta un periodo de tiempo de estabilidad para después crecer exponencialmente y decaer abruptamente al nivel de referencia.

Tabla 9. Valores de ruido base y relación S/R máxima para el Alcohol Isopropílico.

Segmento	N_{RMS} [nA]	N_{RMS} [f F]	N_{RMS} [f F/ $\sqrt{\text{Hz}}$]	$(S/R)_{max}$	$(S/R)_{max}$ [dB]
D1, D3,D5,D7	0.0139	0.2206	0.2014	187.0449	45.4389

Tabla 10. Valores de tiempo de evaporación y capacitancia máxima para el Alcohol Isopropílico.

Segmento	Tiempo de evaporación [s]	ΔC_{MAX} [f F]	ΔI_{max} [nA]
D2	133.71	41.2614	-2.5925
D4	137		
D6	92.2		

Acetona

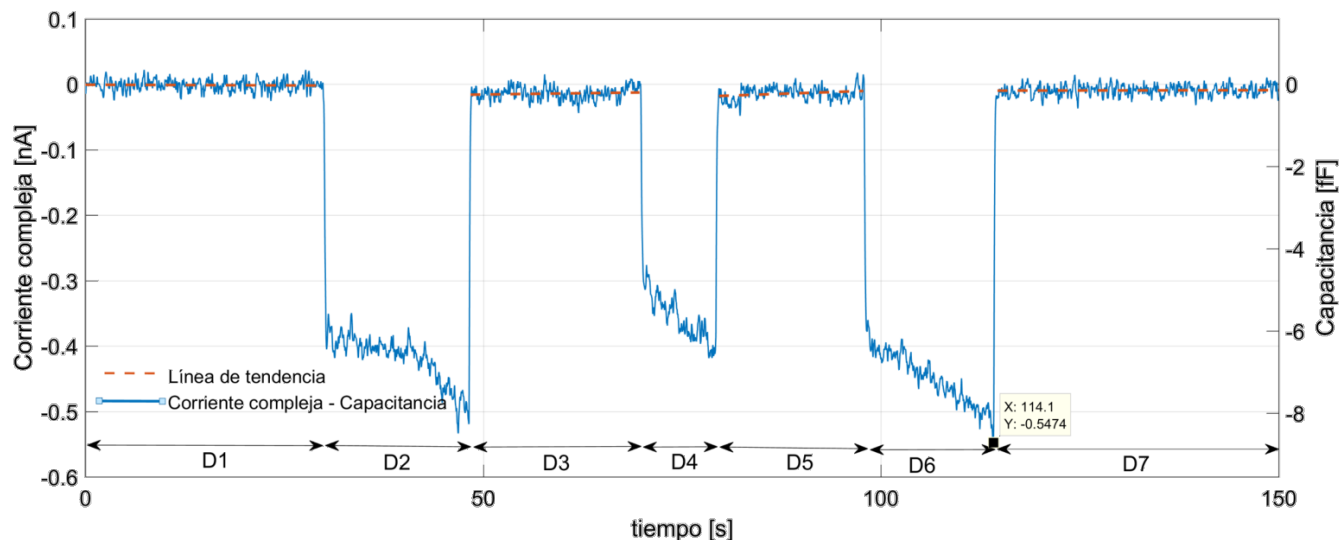


Figura 11. Señal temporal del proceso de evaporación de tres gotas de 3 µl de Acetona.

La grafica muestra que las señales eléctricas para cada gota difieren en tiempo de evaporización y amplitud aún cuando se aplicaron 3 µl con una pipeta graduada, es muy posible que se haya quedado algún residuo en la pipeta en el depósito de la segunda gota.

Tabla 11. Valores de ruido base y relación S/R máxima para el Acetona.

Segmento	N_{RMS} [nA]	N_{RMS} [f F]	N_{RMS} [f F/ $\sqrt{Hz}$]	$(S/R)_{max}$	$(S/R)_{max}$ [dB]
D1, D3,D5,D7	0.0103	0.1643	0.15	53.0594	34.4952

Tabla 12. Valores de tiempo de evaporación y capacitancia máxima para la Acetona.

Segmento	Tiempo de evaporación [s]	ΔC_{MAX} [f F]	ΔI_{max} [nA]
D2	19.07		
D4	9.84		
D6	17.02	8.7177	-0.54775

Conclusiones

Las graficas obtenidas para cada líquido solvente presentan una respuesta característica en forma, amplitud y tiempo de evaporización principalmente indicando que las perturbaciones del campo eléctrico entre los electrodos punta-plano dependen de la función dieléctrica y en general de la impedancia de cada líquido solvente durante su proceso de evaporación. A pesar de que las señales para cada solvente difieren en tiempo y amplitud, debido a que el proceso de depositar la muestra líquida es manual, la forma de la señal se mantiene. El SMD junto con el SCDS propuesto presentaron un ruido base máximo N_{RMS} de alrededor de 0.2 [f F/ $\sqrt{Hz}$] lo que permitió obtener una relación $(S/R)_{max}$ de hasta 45.44 dB para el caso del Etanol con una gota de líquido de 3 μ l. Los resultados experimentales obtenidos indican que es posible utilizar el SCDS propuesto para identificar diferentes líquidos solventes analizando las características eléctricas de la señal temporal obtenida del proceso de evaporación con solo una gota de líquido. Estos resultados no son concluyentes es necesario realizar más pruebas experimentales y mejorar el diseño mecánico de las monturas así como el diseño del SCDS. Sin embargo, las señales obtenidas con el prototipo propuesto muestran que es factible aplicar estas geometrías de electrodos capacitivos para caracterizar eléctricamente procesos físico-químicos en tiempo real.

Referencias Bibliográficas

- Aslam, M. T. (2014). *Differential capacitive sensor based interface circuit design for accurate measurement of water content in crude oil*. 2014 5th International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS) Intelligent and Advanced Systems (ICIAS), 2014 5th International Conference. IEEE.
- Chatterjee Karunamoy, M. S. (2015). *An interfacing circuit for differential capacitive sensor and its performance analysis*. 2015 International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE) Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE). IEEE.
- Hrach, D. F. (2008). *Investigation of field electrode geometries in capacitive flow measurement*. IEEE Sensors. SENSORS.
- Lvovich, V. F. (2012). *Impedance Spectroscopy*. Wiley.
- Martín, J. A. (2017). *Diseño y caracterización de sensores capacitivos coplanarios sobre substratos dieléctricos para caracterización de procesos físico-químicos y biológicos*. Tesis Maestría, UNAM. México.
- Santana, A. G. (2010). *Caracterización no destructiva de recubrimientos con sensores de capacitancia eléctrica*. Tesis Doctorado, UNAM. México.
- Stanford Research Systems(SRS), V. R. (1992). Model SR715 LCR Meters.
- Stanford Research Systems (SRS), R. 2. (1992). Model SR850 Lock-In DSP Amplifier.