

Capítulo IV. Desarrollo experimental

IV.1. Diseño del sensor

La fabricación del sensor fue realizada sobre una placa fenólica FR4, el diseño de los electrodos del sensor se realizaron en el programa de desarrollo de circuitos impresos Eagle 5.7.0 con las medidas mostradas en la figura IV.1. Dichas medidas proporcionan un área de sensado de $228 \text{ [mm}^2\text{]}$.

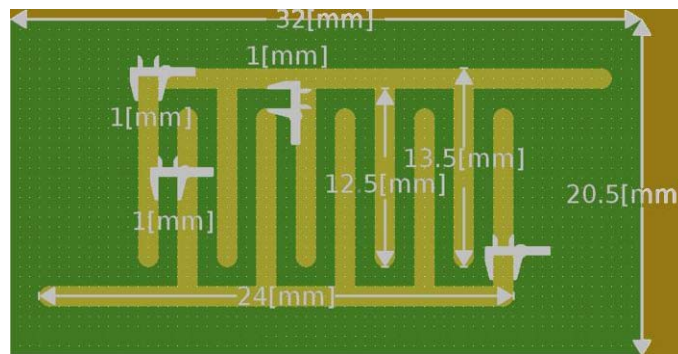


Figura IV.1. Medidas de los electrodos del sensor.

El diseño final del circuito impreso se muestra en la figura IV.2.

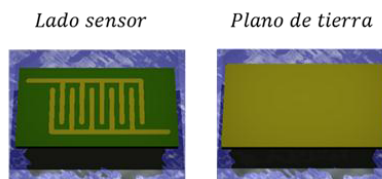


Figura IV.2. Diseño del sensor.

En la figura IV.3 se puede observar la implementación física del sensor en peine.

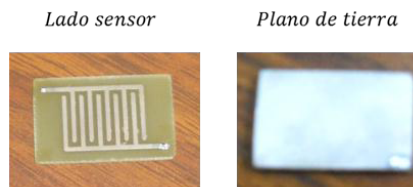


Figura IV.3. Implementación física del sensor.

Se fabricaron sensores con plano de tierra y sin plano de tierra para realizar una mejor elección del sensor, después se les midieron a los dos tipos de sensores su capacitancia (C), su impedancia (Z) y su factor disipación (D) mediante un puente digital. El factor de disipación de un capacitor debe tener un valor muy pequeño o lo más aproximado a cero para que no sufra pérdidas en la capacitancia [1].

En la tabla IV.1 se muestran los parámetros con los cuales se realizaron las mediciones de (C), (Z) y (D).

TABLA IV.1. PARÁMETROS DEL PUENTE DIGITAL Y AMBIENTALES

POLARIZACIÓN (V)	1 [v_{RMS}]
FRECUENCIA (f)	10 [kHz]
NÚMERO DE MUESTRAS A PROMEDIAR (n)	10 [$adim$]
TEMPERATURA (T)	21 [$^{\circ}C$]
HUMEDAD RELATIVA (H_r)	24 [%]

La conexión al puente digital de cada sensor capacitivo se realizó individualmente, los sensores con plano de tierra se conectaron como se muestra en la figura IV.4.

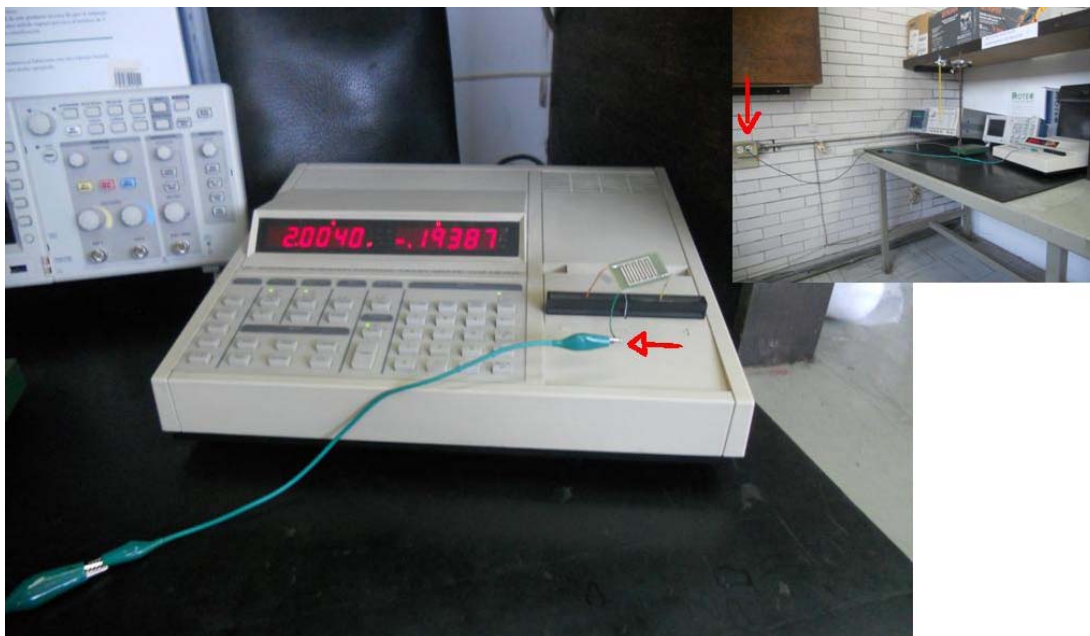


Figura IV.4. Conexión de los sensores capacitivos al puente digital.

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 IV.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 Stanford Research SR715 (los

promedios se tomaron con base en 6 sensores fabricados de cada tipo), con la información mostrada en la tabla IV.2 se eligió el tipo de sensor más conveniente para realizar las mediciones experimentales con MBP.

TABLA IV.2. PROMEDIOS DE LOS SENSORES

TIPO DE SENSOR	SIN PLANO DE TIERRA	CON PLANO DE TIERRA
IMPEDANCIA (Z)	307.9248 [$M\Omega$]	1299.8 [$M\Omega$]
FACTOR DE DISIPACIÓN (D)	0.0357 [$adim$]	0.0245 [$adim$]
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 y su campo eléctrico está controlado. Las características del sensor con el que se realizaron las mediciones experimentales se muestran en la tabla IV.3.

TABLA IV.3. CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR

IMPEDANCIA (Z)	4300.6 [$M\Omega$]
FACTOR DE DISIPACIÓN (D)	0.00209 [$adim$]
CAPACITANCIA (C)	2.0731 [pF]

IV.2. Diseño de la estructura mecánica del sensor

Una vez elegido el sensor se buscó la mejor forma de mantener al sensor sin movimiento y libre en su área sensible, de tal forma que fuera posible mantener los electrodos en forma horizontal, para que la capacitancia parásita sea lo menor posible y pueda compensarse en la calibración inicial, la montura tiene una abertura de forma transversal con el fin de colocar o retirar fácilmente el sensor para su limpieza o cambio por otro. Una vez realizada esa estructura se diseñó una base para sostener la montura de teflón con acrílico. El área sensible del sensor queda libre y es posible hacer mediciones, con una muestra de un MBP que puede ser colocada directamente sobre los electrodos (en la figura IV.5 se puede observar la base de acrílico que sostiene el teflón con los tornillos que aprisionan al sensor).



Figura IV.5. Estructura mecánica que mantiene al sensor fijo.

IV.3. Elección 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 capacitancias parásitas (ver figura IV.6).

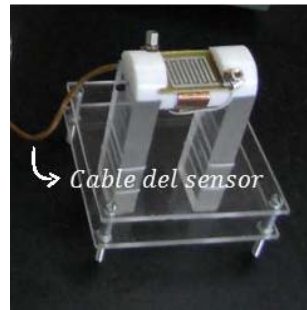


Figura IV.6. Cable del sensor.

Un cable puede ser visto como un capacitor porque se tiene el forro aislante que cubre al conductor de permitividad relativa (ϵ_r), el cable que lleva la señal de excitación y la malla conectada al plano de tierra forman los electrodos. Las características eléctricas del cable de conexión medidas con un puente de impedancias digital Stanford Research SR715 se muestran en la tabla IV.4.

Tabla IV.4. CARACTERÍSTICAS DEL CABLE DE CONEXIÓN DEL SENSOR

IMPEDANCIA (Z)	5.1939 [$M\Omega$]
FACTOR DE DISIPACIÓN (D)	0.49724 [$adim$]
CAPACITANCIA (C)	4.2851 [pF]

IV.4. Diseño de la electrónica de acondicionamiento

La electrónica requerida para realizar el acondicionamiento de la señal fue probada en una placa de pruebas (protoboard) con las cuales se probaron todas las etapas mostradas en el capítulo III. Se observaron las fases y amplitudes para probar el control de fase y el control de amplitud, ambos controles funcionaron como se esperaba, la calibración de cero resultó inferior al ruido en 60 [Hz], este fue el punto de partida para realizar el diseño del circuito impreso. 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 medir, estas señales pueden ser generadas por campos

electromagnéticos del ambiente. La simulación del diseño del circuito impreso con los componentes electrónicos se muestra en la figura IV.7.

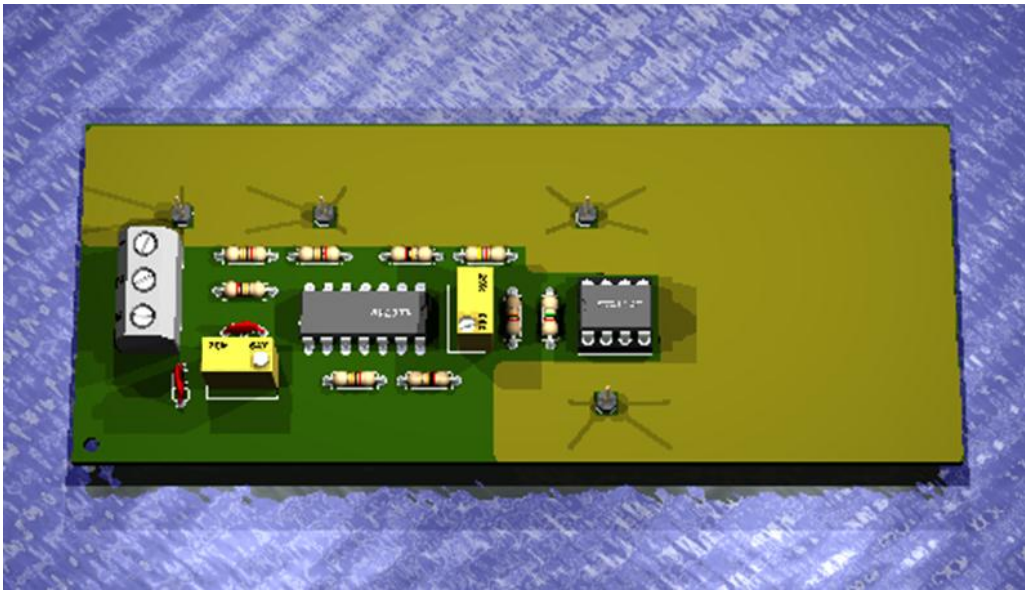


Figura IV.7. Diseño del circuito impreso.

La distribución física de los componentes electrónicos sobre el circuito impreso de la etapa de acondicionamiento de la señal del sensor capacitivo se muestra en la figura IV.8.

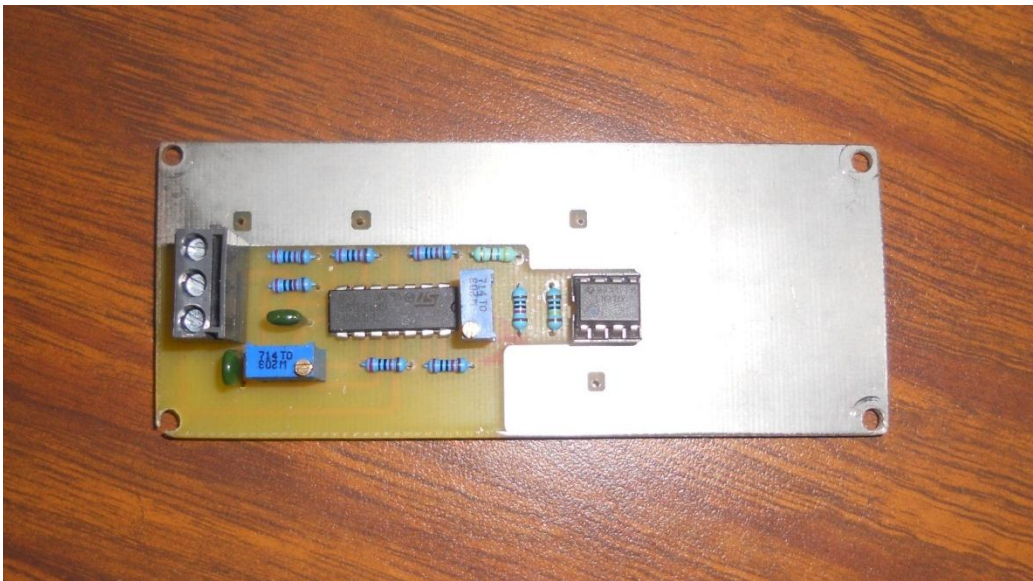


Figura IV.8. Implementación física del sistema electrónico de acondicionamiento de la señal.

Las hojas de especificaciones de los amplificadores se muestran en el apéndice D

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

Tomando en cuenta que la señal de calibración de cero tiene una magnitud inferior a la del ruido cuando se probó en la placa de pruebas donde se determinó que el cable de la señal debía 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 IV.9 se muestran los cables con los bornes de conexión al amplificador Lock-in y el cable de polarización para el circuito impreso.

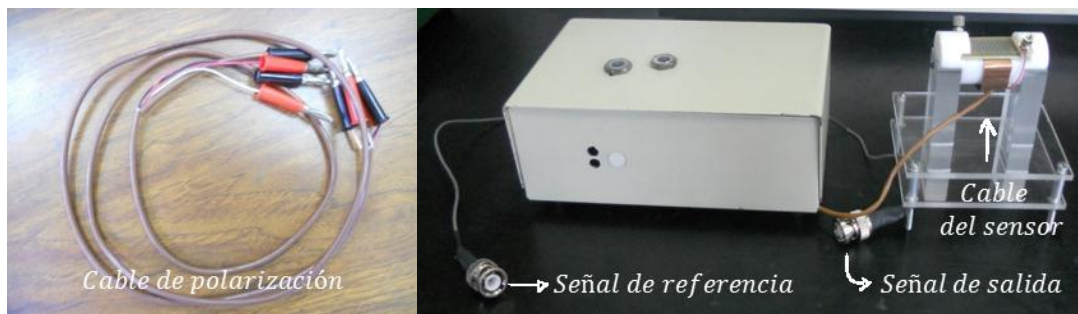


Figura IV.9. Cables de polarización y de conexión al amplificador Lock-in.

IV.6. Blindaje de la electrónica de acondicionamiento

Una vez realizadas las conexiones de la electrónica de acondicionamiento, de la fuente de polarización del circuito y del amplificador Lock-in, se implementó un blindaje conectado a tierra física y que encierra a la electrónica de acondicionamiento. La solución a este problema fue utilizar una caja metálica, los cables de polarización están conectados en serie a un interruptor de dos polos y dos tiros, la referencia de cero del circuito está conectada directamente al circuito. En la figura IV.10 se puede observar la caja de blindaje del circuito de acondicionamiento.

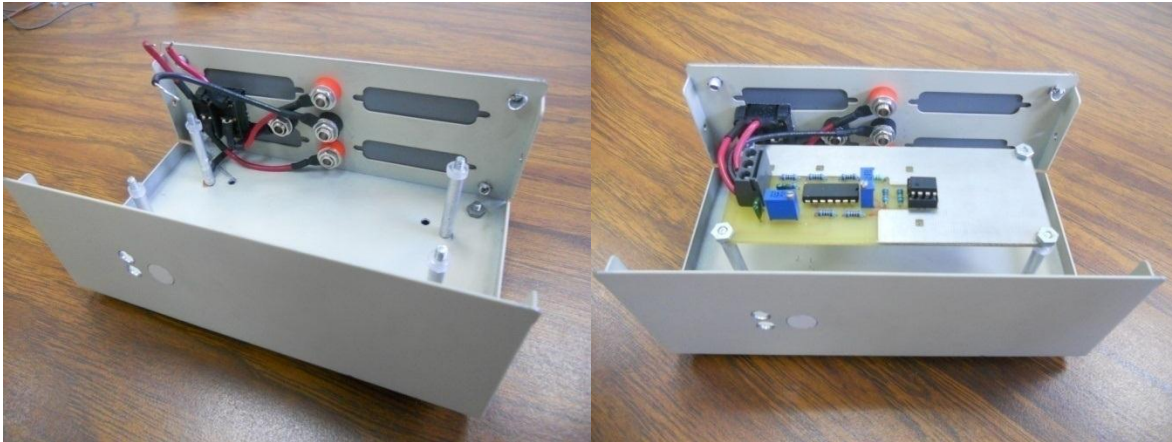


Figura IV.10. Blindaje del acondicionamiento de la señal.

IV.7. Calibración de cero

Resumiendo las etapas mostradas en el capítulo III, se tienen dos rangos de ajuste en fase y amplitud (ver figura IV.11) con el fin de realizar una calibración de cero a la salida de la etapa diferencial, controlados mediante las resistencias variables R_B y R_E .

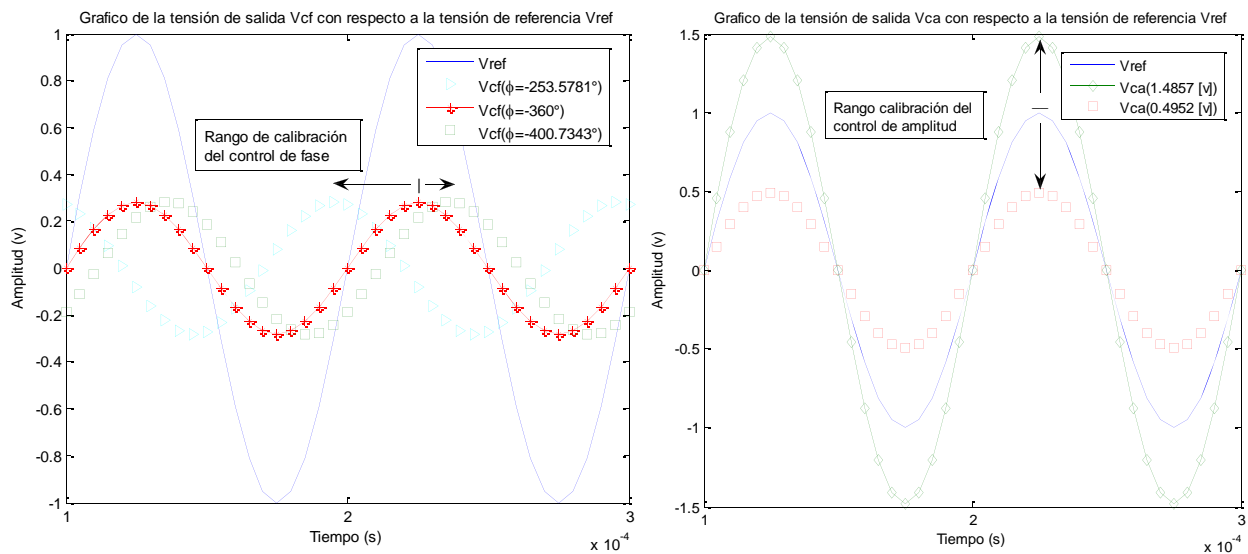


Figura IV.11. Rangos de ajuste en fase y amplitud para calibrar a cero.

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 sensor las tensiones que llegan al

amplificador de instrumentación también son diferentes debido a la impedancia del capacitor de compensación (Z_P) y a la impedancia del sensor (Z_S). En la figura IV.12 se muestran las conexiones del circuito.

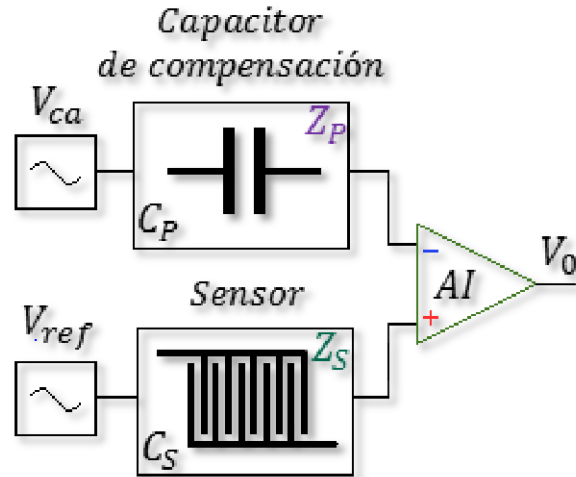


Figura IV.12. Diagrama de conexiones del circuito.

La salida V_0 del amplificador de instrumentación AI es una salida diferencial de las señales de los sensores que entran al mismo amplificador. El objetivo de realizar una calibración inicial es hacer que la salida del amplificador AI tienda a cero con los ajustes de fase y amplitud mencionados anteriormente. La salida del amplificador AI entrará a una etapa de amplificación Lock-in en la cual se realizarán las mediciones de corrientes finales.

La impedancia de entrada del amplificador Lock-in es $1 [k\Omega]$ que convierte la señal de tensión a corriente eléctrica, después esa corriente llega a un amplificador de transimpedancia que convierte esa corriente a voltaje, internamente el amplificador Lock-in separa la corriente real de la compleja. En la figura IV.13 se muestra como a la salida del amplificador de instrumentación (AI) está conectada una resistencia en serie cuya corriente es convertida a voltaje a la salida del amplificador Lock-in

Como se puede observar en la figura IV.13 el valor del capacitor de compensación $C_P = 1.7 [pF]$ es menor al que se tiene en el sensor $C_S = 2.0731 [pF]$ y que es provocado por una capacitancia parásita en los cables $C_{SP} = 4.2851 [pF]$.

El programa utilizado para la simulación de circuitos fue Multisim 11.0.

La simulación de la calibración de cero en el programa de simulación de circuitos responde muy lentamente y además no se puede obtener la corriente imaginaria, es por ello que la calibración solamente se debe hacer experimentalmente con el amplificador Lock-in el cual permite separar la corriente en parte real e imaginaria.

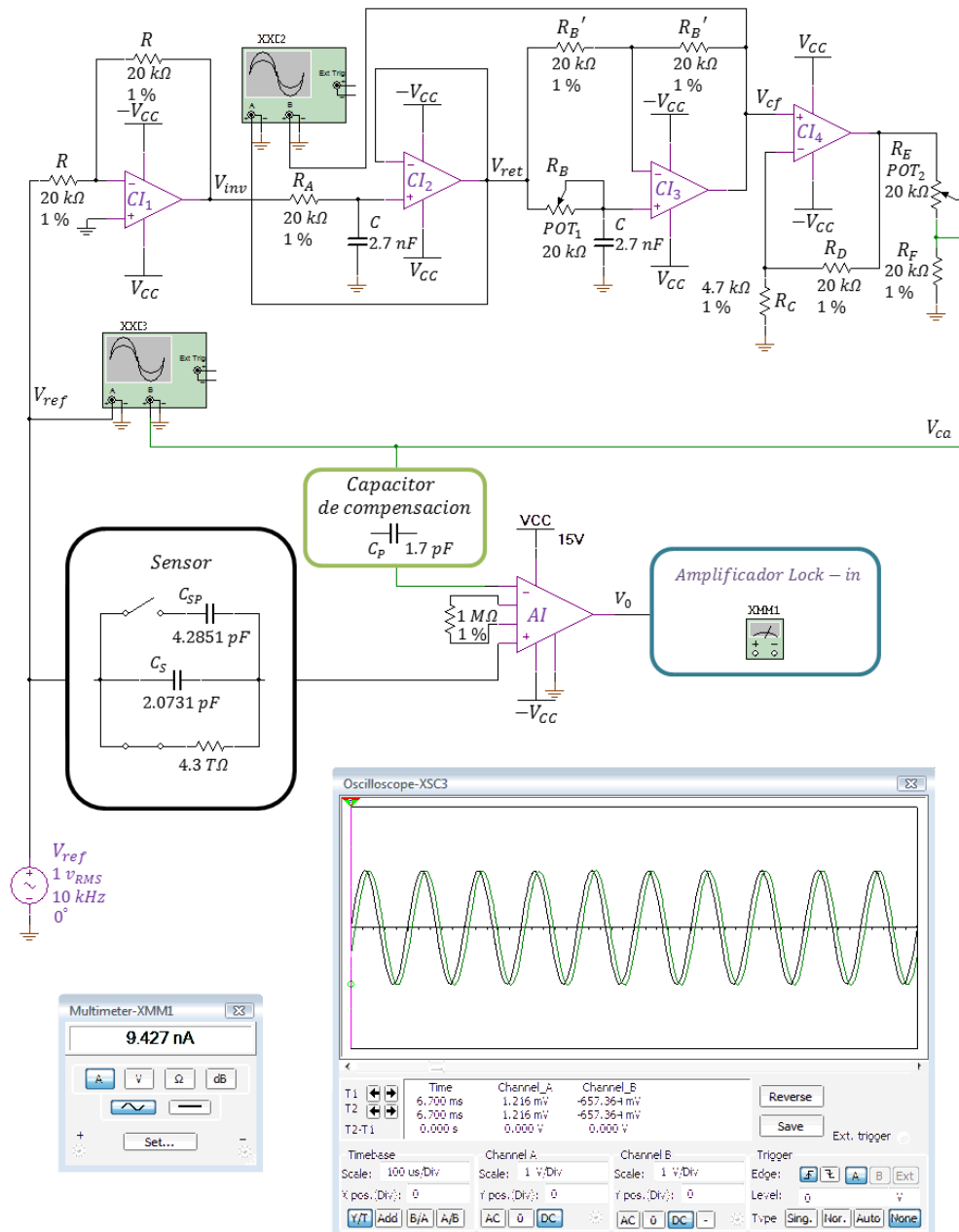


Figura IV.13. Calibración de cero.

Preparación del sistema de medición antes de realizar la calibración a cero:

- Antes de empezar a realizar mediciones todos los equipos deben estar desconectados, si no lo están hay que desconectarlos.
- Encender el amplificador Lock-in 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 contra tiempo y otra en barra (la corriente compleja es la que se debe medir y esto es porque la corriente real la producen los elementos resistivos, y los elementos que almacenan energía solo pueden ser un inductor o un capacitor, como no se tienen inductores en el sistema el sensor capacitivo es el único elemento que puede proporcionar una corriente compleja).
- Encender la fuente de alimentación bipolar y conectarla como se muestra en el apéndice B de tal forma que se tenga una polarización de $\pm 9 [v]$.
- Si se desean monitorizar los cambios de temperatura y humedad este es el momento de colocar un termómetro y un detector 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 de referencia del amplificador Lock-in 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 sensible del sensor.
- Conectar la entrada de corriente en la terminal A de amplificador Lock-in.

Los pasos a seguir para realizar la calibración de cero se enuncian a continuación:

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 en las instalaciones del CCADET, donde se realizaron las pruebas, se tiene un nivel de ruido alto de 10:00 [Hrs] a 16:00 [Hrs] el nivel de ruido subirá en algunos casos a 20 [aF] en una medición normal, por ejemplo de 37 [aF] subirá a 57 [aF] y la señal de referencia de cero puede estar en 10 [aF] cuando está descalibrado, por ejemplo de 11 [aF] a 21 [aF]. A partir de las 16:00 [Hrs] el nivel de ruido disminuye a sus valores normales, para ello se realizaron mediciones durante 3 meses para corroborar estos niveles de ruido.
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 (es necesario que no haya objetos y/o personas en movimiento en todo el transcurso de una medición eso afecta bastante una medición y se deberá repetir el experimento, de preferencia el personal y/o un robot debe depositar la muestra y después permanecer sin movimiento hasta que concluya la medición).

IV.8. Resultados experimentales

La forma de obtener el cálculo de la capacitancia de forma indirecta se calcula mediante la siguiente ecuación:

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

C : Capacitancia medida.

$Im\{i\}$: Corriente compleja que proporciona el amplificador Lock-in.

f : Frecuencia de la señal de tensión de referencia V_{ref} (10 [kHz]).

V_{ref} : Diferencia de potencial aplicado al sensor capacitivo (1 [v]).

La calibración de cero del sensor fue el primer resultado que se obtuvo, debe recordarse que cuando se realiza una calibración de cero esta es tomada como el mínimo valor que puede ser registrado en el amplificador Lock-in al momento de medir. Los resultados de la calibración se muestran en la tabla IV.4.

TABLA IV.4. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DE CERO

SEÑAL DE CALIBRACION DE CERO (S)	11 [aF]
RELACIÓN SEÑAL-RUIDO (S_R)	0.23 [$adim$]
RUIDO EN EL AMPLIFICADOR LOCK-IN (R_L)	43.1 [$\frac{aF}{\sqrt{Hz}}$]
TIEMPO DE CALIBRACIÓN (t)	100 [s]
TEMPERATURA (T)	23 [$^{\circ}C$]
HUMEDAD RELATIVA (H_r)	21 [%]

Después se realizaron mediciones con tiempos mayores: veinte minutos y una hora para ver si la calibración del sensor en el transcurso del tiempo presentaba el fenómeno llamado *drift* (cuando una calibración de cero presenta drift significa que la calibración de cero puede moverse y cambiar su valor de calibración a uno diferente en un tiempo determinado; si esto ocurre, se producirá un error al momento de medir). Los resultados obtenidos en la calibración variaban muy poco y no presentaron drift, se observó también que en las mañanas y por las tardes el ruido alcanzaba los 10 [aF] y la calibración de cero podía aumentar hasta 18 [aF].

Los segundos resultados de las mediciones de capacitancia se realizaron con muestras de vidrio con 1 [mm] y 100 [μm] de espesor, teflón con 1 [mm] de espesor y PDMS (el PDMS es un polímero biocompatible de nombre *polidimetilsiloxano*) con 3 [mm] de espesor, cada una de estas 4 muestras cubrían el área sensible y daban valores cuasi-constantes en la medición de su capacitancia.

Después de hacer varias mediciones e intercambiando los materiales, se hizo una prueba con PDMS y se trató de calibrar a cero con ese material: ¡la calibración fue exitosa!, de igual forma se intentó calibrar el sensor con los otros 3 materiales y las calibraciones de cero resultaron de igual forma exitosas, después se pretendieron medir cambios en la capacitancia poniendo al PDMS, al teflón y al vidrio (1 [mm] y 100 [μm]) con una gota de agua, se observó que la tensión superficial de una gota no permitía que la gota se expandiera y abarcara a todos los electrodos: tocaba uno o dos electrodos en el mejor de los casos y tardaba más de media hora en evaporarse una gota de agua sobre el sensor, se retiró el agua y se hicieron mediciones con alcohol isopropílico los cambios de capacitancia con los substratos de PDMS, teflón y vidrio de 1 [mm] no fueron exitosos debido a la profundidad de penetración del campo eléctrico con estos espesores, pero en el vidrio de 100 [μm] si fue posible detectar los cambios de capacitancia. *Esto dio paso para monitorizar un MBP sobre el vidrio de 100 [μm] utilizándolo como substrato.*

Como en toda pintura se tiene un solvente, fue necesario medir en primera instancia el proceso de evaporación de los solventes dado que el secado de una pintura tarda más tiempo. El solvente de una pintura se evapora y al evaporarse éste, se quedan los residuos en la superficie donde se colocó la pintura. Para monitorizar los cambios de capacitancia diferenciales se tomaron otros solventes además del alcohol isopropílico como el thinner, la acetona y el etanol, aplicando

la misma técnica se monitorizaron los demás solventes a medida que se iban evaporando (ver figura IV.14).



Figura IV.14. Solventes.

Después de tener calibrado a cero se monitorizaron los incrementos en la capacitancia poniendo gotas de volumen no controlado sobre el substrato de vidrio, los resultados obtenidos solo eran para ver la respuesta del sensor, el área que abarcaba la gota en el área sensible no estaba controlada tampoco, por lo que los resultados solo eran 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 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 substrato de vidrio con $100\ [\mu\text{m}]$ de espesor y resina epoxi como se muestra en la figura IV.15. La celda fabricada permite depositar $30\ [\mu\text{L}]$ de volumen.



Figura IV.15. Substrato de vidrio de $100\ [\mu\text{m}]$ con la resina epoxi.

El substrato de la figura IV.15 es colocado sobre el área sensible del sensor capacitivo, se calibra a cero la corriente compleja, después se monitoriza en el amplificador Lock-in y mediante la ecuación (IV.1) se calculó la su capacitancia del MBP de forma indirecta.

Se realizó 12 veces el experimento para cada solvente obteniendo repetibilidad en sus respuestas; el tiempo de monitorización fue de 15 minutos (ver figura IV.16). En general, el ruido la señal de calibración de cero y las condiciones ambientales a las que se realizó cada monitorización de capacitancia se muestran en la tabla IV.5.

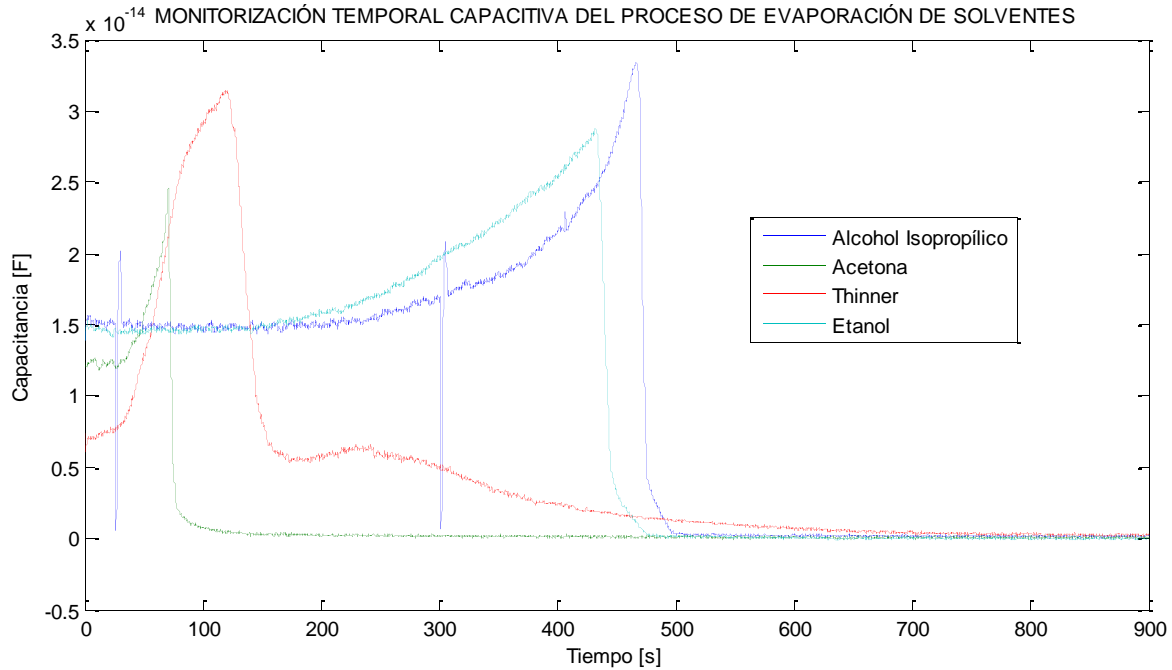


Figura IV.16. Monitorización temporal capacitiva del proceso de evaporación de solventes.

TABLA IV.5. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DE CERO

SEÑAL DE CALIBRACION DE CERO (S)	0.3 [aF]
RELACIÓN SEÑAL-RUIDO (S_R)	0.005 [adim]
RUIDO EN EL AMPLIFICADOR LOCK-IN (R_L)	51.62 $\left[\frac{aF}{\sqrt{Hz}}\right]$
TIEMPO DE CALIBRACIÓN (t)	100 [s]
TEMPERATURA (T)	27 [°C]
HUMEDAD RELATIVA (H_r)	20 [%]

La figura IV.16 muestra los resultados experimentales sobre proceso de evaporación de los solventes, el orden de los solventes es el siguiente:

- Acetona.
- Thinner.

- Etanol.
- Alcohol Isopropílico.

Observé 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 calibración de cero, esto no ocurrió con el thinner, ya que tardó más tiempo en evaporarse aunque después regresó a su estado de calibración de cero. También se observó que si se tiene un solvente contaminado no regresa a su estado de calibración de cero (en este caso no se realizaron mezclas de solventes). En la gráfica del alcohol isopropílico se registraron dos picos en las mediciones debido a alguna fuente de ruido, pudo ser un transitorio en la red eléctrica o alguna vibración en el edificio del CCADET.

En comparación con los resultados obtenidos en la simulación hecha en el capítulo II de un sensor sin plano de tierra, con 6 electrodos, sin sustrato de vidrio y de las figuras II.8 y II.9. La explicación del comportamiento de los solventes en la figura IV.6 no es fácil de interpretar dado que el espesor del solvente está cambiando en el tiempo y la profundidad de penetración del campo eléctrico es menor debido al sustrato de vidrio sobre el sensor [2]. Cuando se calibra a cero la contribución de capacitancia de la placa fenólica, del cable, del sustrato de vidrio y del aire son compensadas, esto significa que la capacitancia registrada solo contenga la información de cada solvente y debido a que la intensidad de campo eléctrico pasa primero por el sustrato de vidrio disminuye la profundidad de penetración del campo eléctrico hacia el MBP por lo que las capacitancias registradas tienen valores menores de capacitancia. En la simulación mostrada en la figura II.7 el MBP fue tratado como un medio no conductor, una forma de explicar que la capacitancia aumenta y quizá no sea la forma más certera de explicar este fenómeno sea que el MBP se vuelva más conductor, ya que al ser más conductor el valor de tensión que llega a la terminal V_{in}^+ de amplificador de instrumentación es mayor a la tensión en la terminal V_{in}^- , lo que daría como resultado sería que el valor de la corriente registrada tenga una amplitud mayor. Otra forma de explicar el comportamiento consistiría en partir de la ecuación II.2 donde se concluiría que la constante dieléctrica del MBP aumenta, si se tomase en cuenta que es posible encerrar a cualquiera de los dos electrodos del sensor (electrodo de excitación o electrodo sensor) dentro de una superficie gaussiana para calcular la carga encerrada en un electrodo y que la distancia entre electrodos permanece constante.

El siguiente experimento fue monitorizar el secado de una película de pegamento blanco comercial: Resistol 850 con $100 [\mu m]$ de espesor aproximadamente colocado sobre el sustrato de vidrio de $100 [\mu m]$ como se muestra en la figura IV.17. Las condiciones de la calibración de cero fueron las mismas que se realizaron en el experimento de los solventes mostrados en la tabla IV.5. En la figura IV.18 se muestra el proceso de secado de una película de Resistol 850 con $100 [\mu m]$ de espesor, el proceso de secado se monitoreo por 12 [h], con el fin de registrar el valor de capacitancia cuando la película del pegamento blanco estuviera ya seca. A los 5000 [s] o

83.3 [min] se consideró que ya no habían cambios de capacitancia y este fue el intervalo que se trazó en la figura IV.18

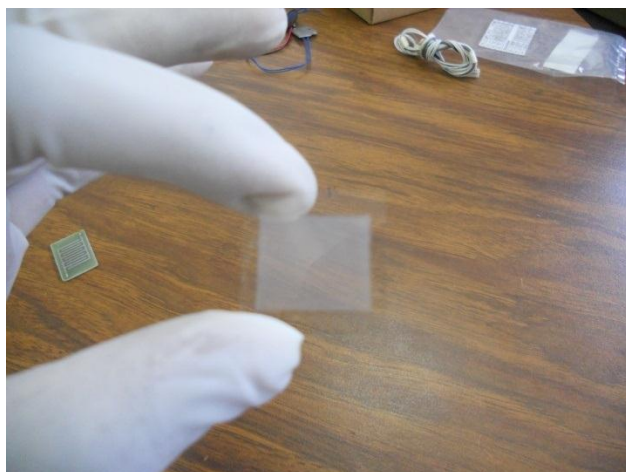


Figura IV.17. Película de Resistol 850 sobre un sustrato de vidrio con 100 [μm] de espesor.

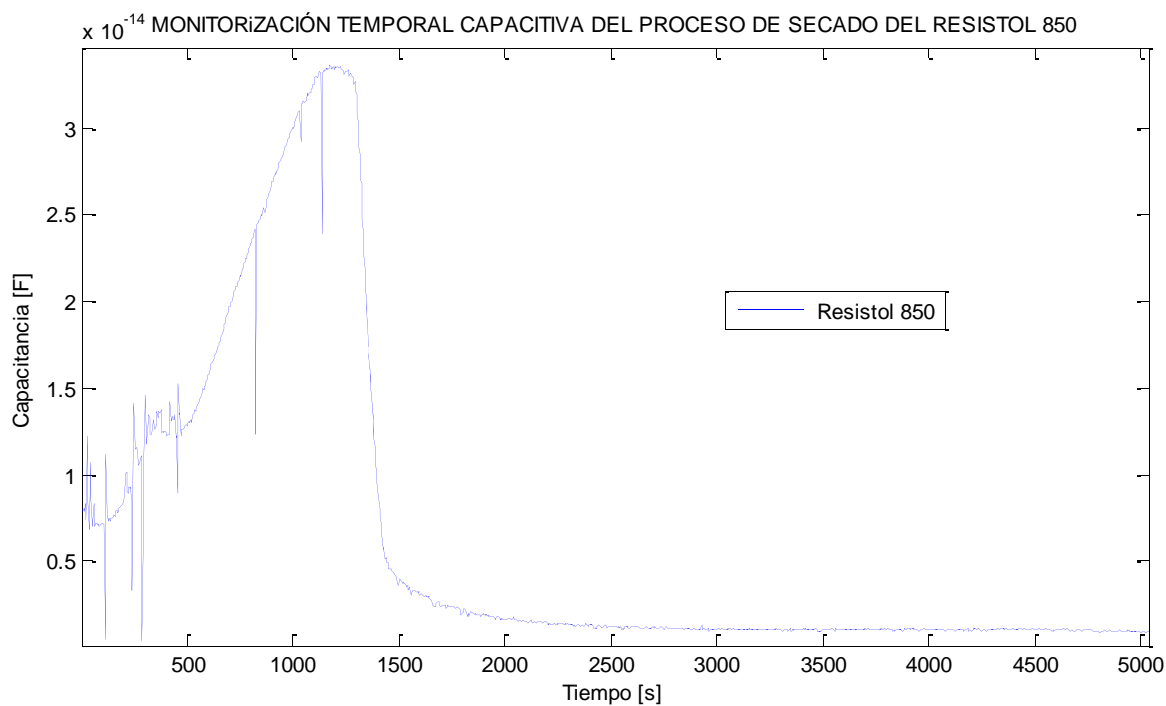


Figura IV.18. Monitorización temporal capacitiva del proceso de secado de la película de Resistol 850.

La curva trazada en la figura IV.18 muestra los incrementos de capacitancia asociados a este experimento. La capacitancia actúa de forma parecida 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

secado toma un valor constante de capacitancia diferente de cero de referencia de calibración, en este caso $C = 1.058 [pF]$.

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 [3]. 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.

Finalmente se monitorizó el incremento de capacitivo del proceso de secado de una película de Pintura Serilustre, en la figura IV.19 se muestra la película de pintura sobre el substrato de vidrio con $100 [\mu m]$ de espesor.

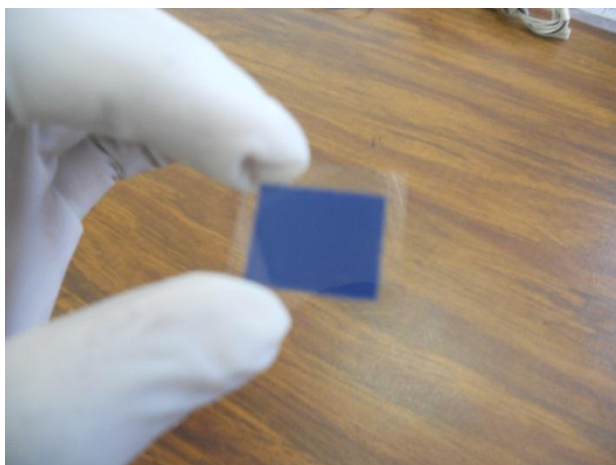


Figura IV.19. Película de Pintura Serilustre sobre un substrato de vidrio con $100 [\mu m]$ de espesor.

Las condiciones de calibración de cero para monitorizar este proceso de secado se muestran en la tabla IV.6, las condiciones de temperatura y humedad relativa son parecidas a las que se obtuvieron cuando se monitorizó el secado del Resistol 850. Se utilizó la técnica de serigrafía para colocar las muestras de pintura sobre el substrato. El espesor de la pintura fue de $100 [\mu m]$.

TABLA IV.6. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN DE CERO

SEÑAL DE CALIBRACION DE CERO (S)	4.97 [aF]
RELACIÓN SEÑAL-RUIDO (S_R)	0.1 [$adim$]
RUIDO EN EL AMPLIFICADOR LOCK-IN (R_L)	45.59 [$\frac{aF}{\sqrt{Hz}}$]
TIEMPO DE CALIBRACIÓN (t)	100 [s]
TEMPERATURA (T)	27 [$^{\circ}C$]
HUMEDAD RELATIVA (H_r)	22 [%]

La monitorización temporal capacitiva del proceso de secado de la película de pintura serilustre realizó en un lapso de 12 [h] donde se obtuvo la curva mostrada en la figura IV.20, la monitorización de la capacitancia durante el secado de la pintura serilustre se realizó dos veces en los cuales se observó que la lectura no llegó a un valor máximo como ocurrió con los solventes y el resistol 850, sin embargo lo que se puede observar es lo siguiente: a medida que se va secando la pintura se puede observar que la capacitancia disminuye el valor máximo de capacitancia aproximadamente $C = 1.1 [pF]$ de forma gradual hasta llegar a un valor mínimo $C = 944 [fF]$ cuando ya está seca la pintura. Es posible que las moléculas que conforman a la pintura no se evaporen o puede ser que reaccionen con el aire para coagularse [2]. La medición comenzó a las 16:00 [Hrs], se puede observar como disminuyen las variaciones de capacitancia alrededor de las 21:00 [Hrs] en adelante.

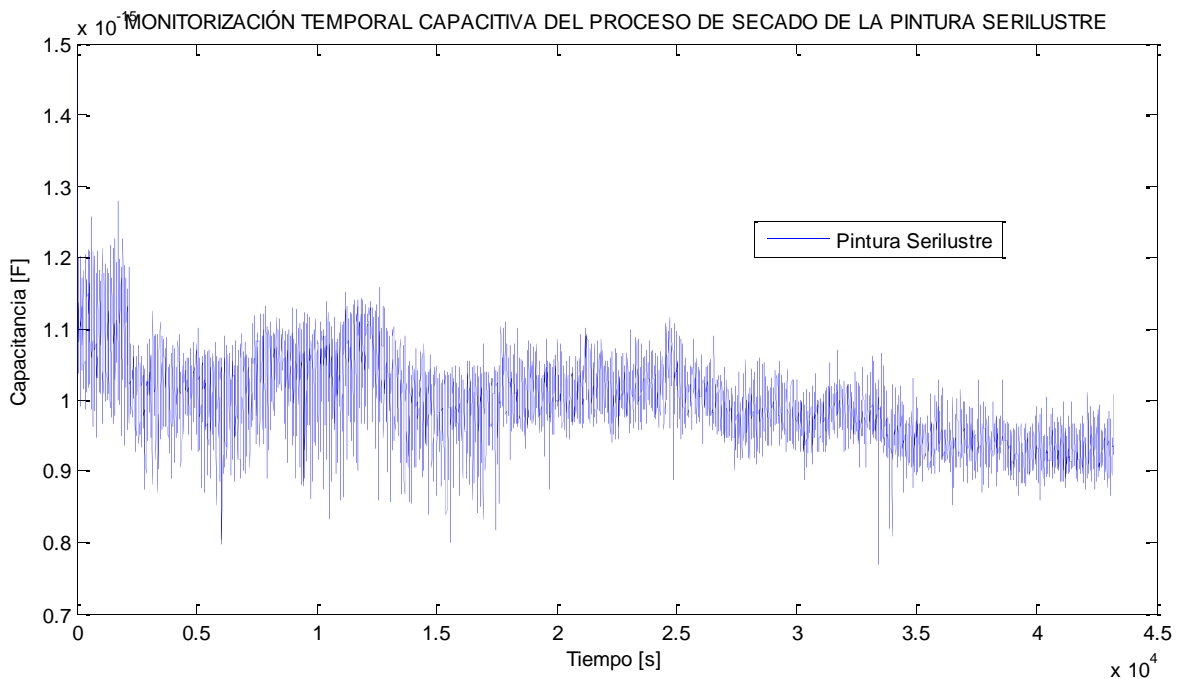


Figura IV.20. Monitorización temporal capacitiva del proceso de secado de la película de pintura serilustre.

Se puede observar que las variaciones de capacitancia y la relación señal a ruido son menores en este proceso de secado que con los dos procesos anteriores con los solventes y con el resistol. En este caso la variación máxima de capacitancia que se registró con el sistema de medición propuesto fue $0.3 [fF]$.

De la misma forma que en el secado de la película de pegamento blanco, el secado consiste en las pérdidas del solvente en la película de pintura, a diferencia del resistol el secado de una pintura de uso profesional para trabajos de serigrafía es un proceso más estricto dado que no deben existir porosidades, cuando la primera capa se seca, esta tiene una cantidad menor de porosidades por las cuales no es posible que el solvente se evapore [3], el solvente al no poderse

evaporar se encuentra fluctuando, las fluctuaciones del proceso de evaporación del solvente en la pintura por capacitancia están registrados en la figura IV.20.

IV.9. Referencias

1. (1991), Model SR715 LCR Meters, Stanford Research Systems (SRS), Revision 1.2 (5/92)
2. Hu, Xiaohui y Yang, Wuqiang, (2010) "Planar Capacitive Sensors – Designs and Applications", Sensor Review, Vol. 30 Iss: 1, pp. 24–39
3. Masschelein Kleiner y Liliane, (2004), "Los solventes", Centro Nacional de Conservación y Restauración (CNCR), pp. 25-37