



Informe Técnico

Implementación y Caracterización de un Sistema de Medición de Impedancia con Instrumentación Virtual

**Jorge Alberto Uc Martín
Asur Guadarrama Santana**

10 de diciembre de 2019

Desarrollo Tecnológico

Implementación de un Sistema de Medición de Impedancia con Instrumentación Virtual

Jorge Alberto Uc Martín, Asur Guadarrama Santana

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología – UNAM

Resumen

Este trabajo describe la implementación de un *Sistema de Medición de Impedancia con Instrumentación Virtual* el cual ayudara y/o complementara las técnicas de medición y caracterización eléctrica de componentes pasivos y diversos materiales bajo prueba que se estudian en el laboratorio de *Física de Sensores* perteneciente al grupo académico de *Sensores del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología*. Una de las líneas de investigación está enfocada en la generación de nuevo conocimiento y tecnologías para la medición de parámetros eléctricos de algún material de interés, empleando principalmente sensores de campo eléctrico. El sistema de medición propuesto será una herramienta importante de apoyo para desarrollar nuevos mecanismos y métodos de caracterización eléctrica que permitirán realizar mediciones de manera rápida, versátil, confiable y exacta. Considerando los requerimientos mencionados, se describe el desarrollo del sistema con instrumentación virtual. Para el desarrollo e implementación de este sistema se emplearon plataformas de diseño de circuito impreso y de instrumentación virtual. Paralelamente, se realizó la fabricación de una placa de acoplamiento de conexión que sustituye a una montura de conexiones (*test fixture*) la cual es un accesorio independiente del medidor de impedancia y que se tiene que adquirir de forma independiente al medidor de impedancias utilizado. Este accesorio es indispensable para realizar las mediciones y minimizar las fuentes de ruido. La placa de acoplamiento de conexiones fabricada facilitó la conexión y/o acoplamiento entre los sensores de campo eléctrico y el medidor de impedancias E4980AL de la marca *Keysight Technologies*.

Nomenclatura

Z – impedancia
 L – inductancia
 C – capacitancia
 R – resistencia
LCR – medidor de impedancias
 I_a – corriente alterna
MBP – material bajo prueba
PFQ – proceso físico químico
UV – ultravioleta
PB – proceso biológico
SCDS – sensor capacitivo de doble sonda
SCEC- sensor capacitivo de electrodos coplanarios
SMTC – sistema de monitoreo temporal capacitivo
SMIIV – sistema de medición de impedancia con instrumentación virtual
PCB – printed circuit board
VI – virtual instrumentation
PAC – placa de acondicionamiento de conexiones
 SiO_2 – dióxido de silicio
PC – computadora personal
 ΔR – resistencia diferencial
 ΔC – capacitancia diferencial
 $N\Delta C_{RMS}$ – Ruido RMS de la capacitancia diferencial
 V – voltaje
 V_{RMS} – voltaje RMS
 R_p – resistencia en paralelo
 R_s – resistencia en serie
 C_p – capacitancia en paralelo
 C_s – capacitancia en serie
 L_p – inductancia en paralelo
 L_s – inductancia en serie

Índice

Introducción.....	5
1.- Sensores Capacitivos.....	6
2.- Sistema de Medición de Impedancia con Instrumentación Virtual (SMIV).....	8
2.1.- Generalidades.....	8
2.2.- Plataformas de cómputo empleadas.....	8
2.3.- Instrumentación Virtual (VI).....	9
2.3.1.- Interface Computadora-Medidor LCR E4980AL.....	9
2.3.2.- Algoritmo utilizado en la Instrumentación Virtual.....	11
3.- Diseño y fabricación de una placa de acondicionamiento de conexiones (PAC).....	15
3.1.- Medidor LCR E4980AL.....	15
3.2.- Diseño de la PAC.....	17
3.3.- Fabricación de la PAC.....	18
4.- Mediciones Eléctricas.....	21
4.1.- Metodología de medición.....	21
4.2.- Configuración panel de control del VI.....	21
Resultados.....	23
Conclusiones.....	24
Referencias Bibliográficas.....	25

Introducción

La impedancia (Z), la inductancia (L) la capacitancia (C) y la resistencia eléctrica (R) son parámetros eléctricos importantes que se usan para caracterizar circuitos electrónicos, componentes pasivos, materiales bajo prueba (MBP), etc. El parámetro (Z) generalmente se define como la oposición total que un dispositivo o componente ofrece al flujo de una corriente alterna (CA) a una frecuencia determinada, y se representa como una cantidad compleja, Keysight Technologies (2016).

Uno de los dispositivos utilizados que permite realizar una caracterización eléctrica de los parámetros Z , C y R de un MBP a partir de su respuesta eléctrica, son los sensores de campo eléctrico. Estos tienen una amplia gama de aplicaciones en los sistemas de instrumentación y medición. Con ellos se detectan cambios/perturbaciones del campo eléctrico debido a un MBP, a un proceso físico-químico (PFQ) o a un proceso biológico (PB), por mencionar algunos ejemplos. Estas perturbaciones se representan en señales eléctricas proporcionales a las variaciones del campo eléctrico y que permiten realizar caracterizaciones de la respuesta eléctrica en diferentes condiciones de estudio de algún material. Como ejemplo de aplicaciones podemos mencionar; sensores de gas, Toda *et al.* (1999), detección de bacterias, Mannoer *et al.* (2010), sensores sensibles al ultravioleta UV, Chen *et al.* (2007), medidor de pH capacitivo casero, Veeradasan *et al.* (2013), etc.

Una línea de trabajo de investigación que se desarrolla en el grupo académico de *Sensores del ICAT*, es el estudio e implementación de sensores de campo eléctrico, así como el desarrollo de metodologías de medición de bajo ruido para detectar variaciones de Z y C de algún MBP en estado sólido, líquido o gaseoso o a un PFQ o PB. Esto con el fin de estudiar y caracterizar muestras biológicas y/o identificar contaminantes en líquidos.

Actualmente el grupo cuenta con dos prototipos de sensores de campo eléctrico:

Uno es denominado *Sensor Capacitivo de Doble Sonda* (SCDS) y el otro *Sensor Capacitivo de Electrodo Coplanarios* (SCEC). Ambos sensores pueden acoplarse a un *Sistema de Monitoreo Temporal Capacitivo* (SMTC) de bajo ruido para llevar a cabo mediciones temporales de un MBP, PFQ o PB. El SMTC de bajo ruido está conformado básicamente por una etapa de sensado y acondicionamiento electrónico diferencial y por una etapa de amplificación Lock-in, Guadarrama *et al.* (2014).

El presente trabajo describe el desarrollo e implementación de un sistema de medición de impedancia con instrumentación virtual (SMIV) que incluye el uso/configuración de un medidor LCR Precision E4980AL de la marca *Keysight Technologies*, el empleo de programas de creación de circuitos impresos (PCB) y la implementación de instrumentación virtual (VI). También se describe el diseño propuesto de una placa de acondicionamiento de conexiones (PAC) la cual sustituye a una montura de conexiones (*test fixture*) comercial que se adapta al medidor LCR.

1 Sensores Capacitivos

A continuación se da una descripción breve de los sensores capacitivos desarrollados en el Grupo de Sensores para caracterizar eléctricamente diversos materiales:

El SCDS se compone por dos sondas, cada una formada por dos electrodos de diferentes geometrías. Un electrodo de excitación de punta fina curvada y otro como electrodo sensor plano, Mata *et al.* (2018), como se observa en la figura 1.

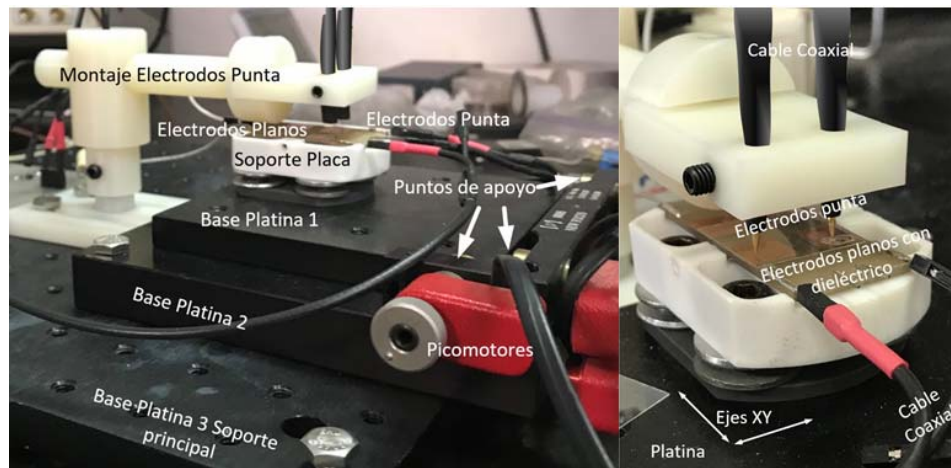


Figura 1. Vista esquemática del sensor capacitivo de Doble-Sonda.

El SCEC presenta dos geometrías de arreglo de electrodos coplanarios, rectos y en espiral, figuras 2(a) y 2(b) respectivamente. Estos se encuentran depositados sobre un sustrato de vidrio y aislados con un recubrimiento de dióxido de silicio (SiO_2), figura 2. El área sensitiva está formada por los electrodos y el campo eléctrico que se distribuye sobre estos interactúa directamente con algún MBP y con el medio ambiente, Uc (2017).

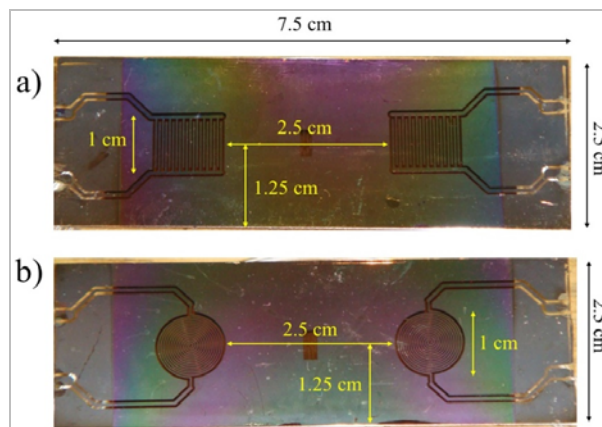


Figura 2. SCEC. a) Sensor tipo peine. b) Sensor tipo espiral.

También se cuenta con un tercer prototipo de sensor capacitivo que en este caso está conformado por electrodos de placas paralelas. Consiste en una cavidad cilíndrica de acrílico, en cuya base se encuentra un electrodo plano de acero inoxidable de sección transversal circular. La separación de este respecto a un segundo electrodo, de iguales características, se controla a través de un

embolo que se introduce por el otro extremo de la cavidad, Acevedo (2017). En la cavidad se deposita una muestra líquida a estudiar, como se observa en la figura 3.

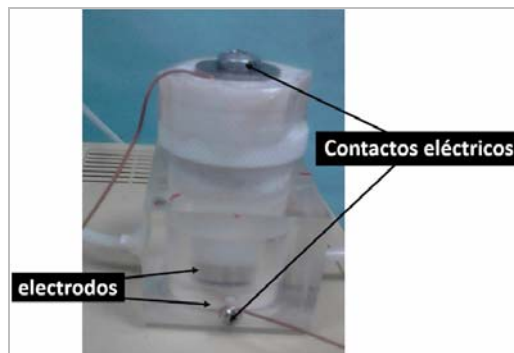


Figura 3. Sensor capacitivo de placas paralelas diseñado en laboratorio.

Los sensores mencionados anteriormente pueden ser acoplados al medidor de LCR *E4980AL*, equipo que se encuentra disponible en el laboratorio de *Sensores*. Con este equipo de medición se pueden realizar mediciones directamente de los parámetros eléctricos ***Z***, ***C*** y ***R*** de una muestra sólida o líquida bajo estudio.

2 Sistema de Medición de Impedancia con Instrumentación Virtual

El sistema de medición de impedancia con instrumentación virtual (SMIIV) está conformado por un dispositivo de sensado capacitivo, un medidor LCR *E4980AL* de *Keysight Technologies* y un instrumento virtual (VI) basado en la plataforma de LabView de National Instruments en una computadora personal (PC).

2.1 Generalidades

El VI implementado permite personalizar el medidor LCR *E4980AL* por medio de una computadora al agregarle funcionalidades de configuración y visualización de gráficos que ayudan a monitorizar en tiempo real las mediciones. En la figura 4 se puede observar conceptualmente los elementos que conforman el SMIIV: un medidor LCR *E4980AL* de precisión, una placa de acondicionamiento de conexiones PAC de bajo costo, una computadora portátil/escritorio que contiene la instrumentación virtual (VI) y un sensor de campo eléctrico.

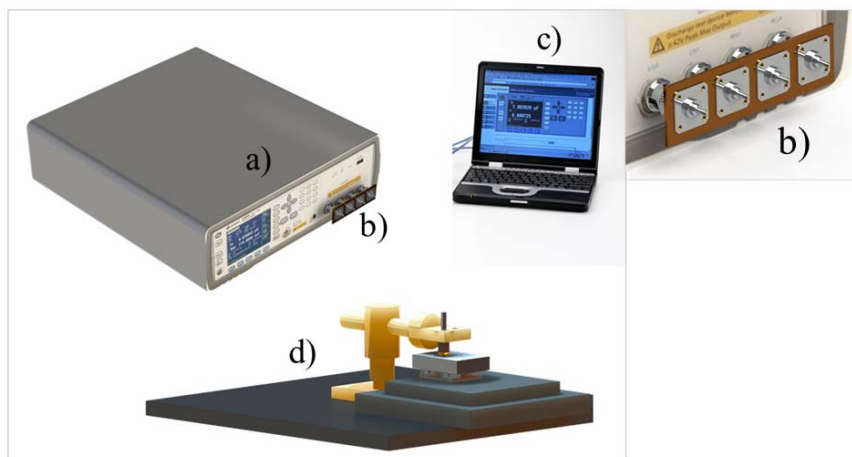


Figura 4. Sistema de Medición de Impedancia con Instrumentación Virtual. a) LCR Precision E4980AL. b) PAC. c) Computadora portátil/escritorio. d) Sensor de campo eléctrico (SCDS).

El diseño y desarrollo del SMIIV está adaptado para realizar mediciones de los parámetros eléctricos de impedancia y visualizar en tiempo real sus cambios empleando los sensores antes mencionados.

2.2 Plataformas de programación empleadas

En la tabla 1, se presentan las plataformas de programación empleadas para el desarrollo e implementación del VI y de la PAC.

Tabla 1. Plataformas de cómputo utilizadas

Labview	Es una plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas de instrumentación, con un lenguaje de programación visual gráfico pensado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido.
----------------	--

Altium Designer	Programa de automatización de diseño electrónico para PCB (placa de circuito impreso), simulación y montaje.
Solidworks	Programa para modelado micro mecánico en 3D. Permite modelar piezas complejas, y ensamblarlos. El proceso consiste en traspasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto.

Nota: Cabe resaltar, que estos paquetes de programación no son los únicos que se pueden emplear. Existen una amplia gama de plataformas en el mercado que ofrecen las mismas características y que el uso de alguno depende de la familiarización del usuario.

2.3 Instrumentación Virtual (VI)

Para el desarrollo de la instrumentación virtual (VI) se utilizó la plataforma LabView, ya que contiene una extensa variedad de herramientas para adquirir, analizar, visualizar y almacenar datos, así como una interface con el medidor LCR E4980AL, muy amigable para el usuario.

Instrumento Virtual	Un VI es un instrumento de medición reutilizable creado para agregar hardware y software a una computadora de uso general, y que utiliza la pantalla de computadora para proporcionar la interfaz visual del instrumento real, Nuccio <i>et al.</i> (2002).
----------------------------	---

Se requirió de igual manera la instalación y uso de sub-módulos los cuales se mencionan en la tabla 2.

Tabla 2. Sub-Módulos requeridos

NI-VISA	Proporciona una interfaz de programación entre el hardware y los entornos de desarrollo como LabView. Incluye bibliotecas de software, utilidades interactivas como VISA Interactive Control, y programas de configuración para todas las necesidades de desarrollo.
Measurement & Automation Explorer (MAX)	Configura el hardware y software de National Instruments. Copia o replica de datos de configuración. Crea y edita canales, tareas, interfaces, escalas e instrumentos virtuales. Ejecutar diagnósticos del sistema. Visualiza dispositivos e instrumentos conectados a su sistema

Nota: Se requiere tener una cuenta/registro gratuito de usuario en la página de National Instruments.

2.3.1 Interface Computadora-Medidor LCR E4980AL

Como primer paso se estableció una comunicación y/o reconocimiento del medidor LCR E4980AL por parte de la computadora (PC). Este medidor ofrece una conectividad flexible para la PC y velocidad de transferencia rápida de datos a través de la interface GPIB-USB-HS de National Instruments. Cabe mencionar que este desarrollo también es compatible con una interface USB-USB.

Para esto, se realizó la conexión entre el LCR a través de su puerto GPIB y del puerto USB de la PC (GPIB-USB). Seguidamente se desplegó el panel principal de NI MAX donde se observó que en el apartado “*Devices and Interfaces*” se mostró la información correspondiente al medidor, lo cual significa que ya existe un “reconocimiento” por parte de la PC, como se aprecia en la Figura 5.

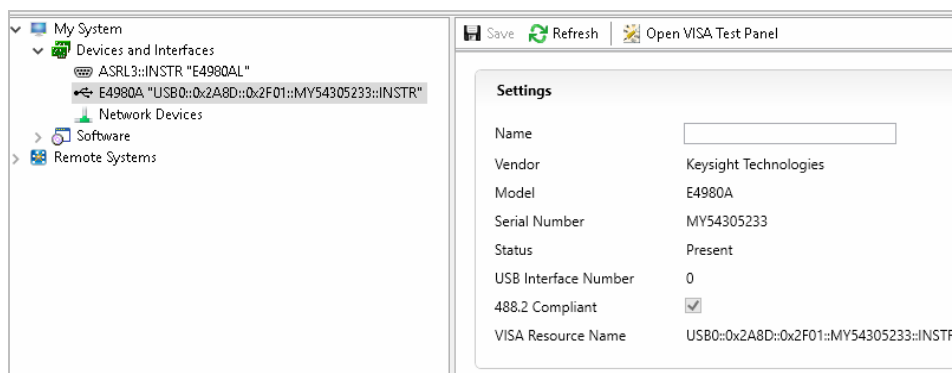


Figura 5. Establecimiento de la comunicación/reconocimiento computadora-medidor LCR.

Para controlar/configurar el medidor, es indispensable instalar los controladores pertinentes, los cuales nos permitieron realizar operaciones programáticas, como configurar, leer, escribir, activar el medidor. En la página de National Instruments (2019) se pueden encontrar los controladores de una amplia gama de dispositivos de medición.

Abriendo el panel principal de Labview, se presionó en la opción >Find Instrument Drivers lo que desplego una nueva ventana de opciones. En esta nueva ventana llamada NI Instrument Driver Finder se hizo clic en la opción >Scan for Instruments, para que nos desplegara los instrumentos que se encontraban conectados a la computadora, como se muestra en la Figura 6.

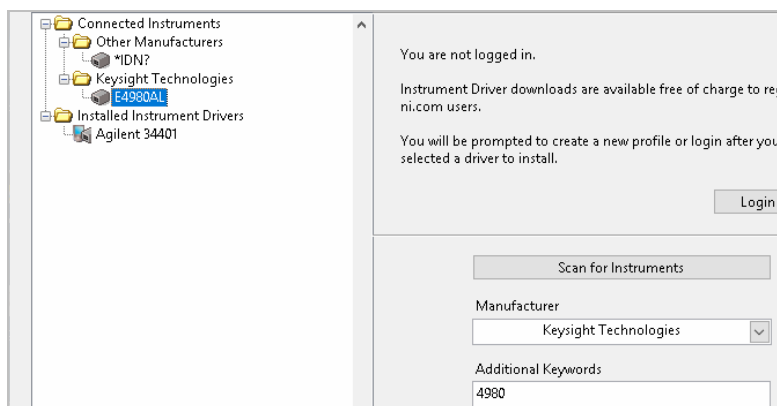


Figura 6. Instrumentos conectados a la computadora

En nuestro caso, se seleccionó el medidor E4980AL, y se buscó manualmente el nombre fabricante Keysight Technologies en el apartado >Manufacturer. Luego se escribió el número del modelo 4980 en el apartado >Additional Keywords. Seguidamente se presionó >Search para realizar la búsqueda del driver compatible con el medidor. El resultado de la búsqueda se puede observar en la figura 7.

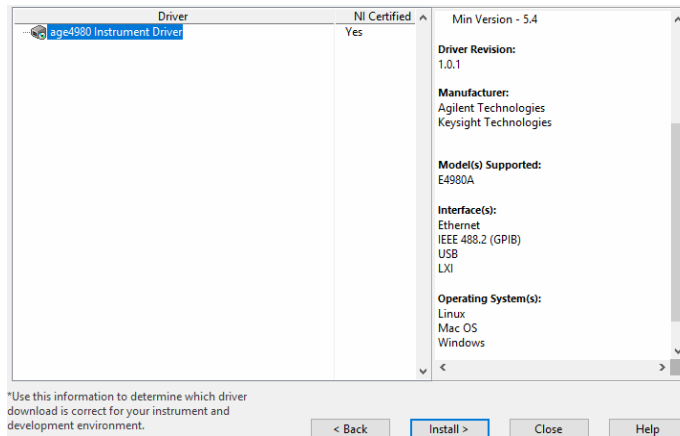


Figura 7. Driver del medidor E4980AL.

Se hizo clic en *>Install*, en este punto fue necesario ingresar una cuenta gratuita de usuario de National Instruments. Una vez realizado lo anterior se procedió a hacer clic en *>Star Using This Driver* para iniciar la instalación, como se ve en la figura 8.

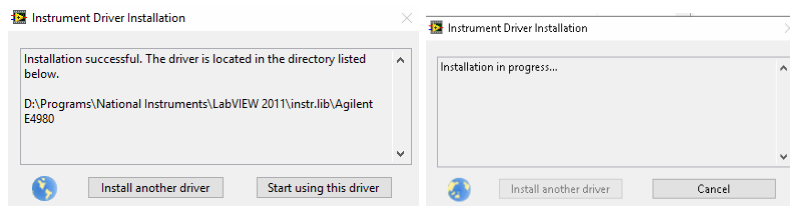


Figura 8. Proceso de instalación del Driver age4980.

Una vez finalizado la instalación, se despliega una pantalla donde se muestra la carpeta de instalación de la paleta con los VIs necesarios para controlar/configurar el medidor y algunos ejemplos básicos.

2.3.2 Algoritmo utilizado en la Instrumentación Virtual

Se utilizó la biblioteca Agilent E4980.lvlib ya disponible en la paleta de VIs anteriormente instalada. Esta biblioteca nos permitió reducir el tiempo de desarrollo del algoritmo del SMIV para controlar el medidor.

Desplegando la ventana principal de LabView se realizó un clic en un nuevo *>Block Diagram* para poder observar la paleta con la biblioteca de librerías recién instaladas las cuales se pueden ver en la figura 9.

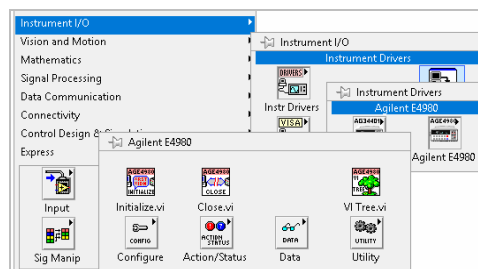


Figura 9. Paleta de librerías E4980.

En la tabla 3, se describen las principales librerías que fueron empleadas para ejecutarse dentro de las diferentes estructuras o secuencias del algoritmo desarrollado.

Tabla 3. Principales librerías utilizadas

	Establece la comunicación con el medidor y opcionalmente realiza una consulta de identificación de este y/o un reinicio.
	Configura las opciones de medición y rangos de impedancia.
	Establece la señal de salida del oscilador interno del medidor y su magnitud, que se aplica a un MBP. Puede establecerse un voltaje o corriente.
	Establece el modo de tiempo de medición y el promedio de medición.
	Adquiere las mediciones realizadas por el medidor.
	Finaliza la conexión del software, realizando una verificación de no error en el medidor.

Como primer paso para la implementación del algoritmo, se realizó la conexión en serie entre las librerías mencionadas en la tabla 3, en el orden en que fueron presentadas. Estas a su vez se introdujeron en un While Loop. La función de esta estructura es obtener los datos de medición correspondientes del medidor. Esta estructura se observa en la figura 10.

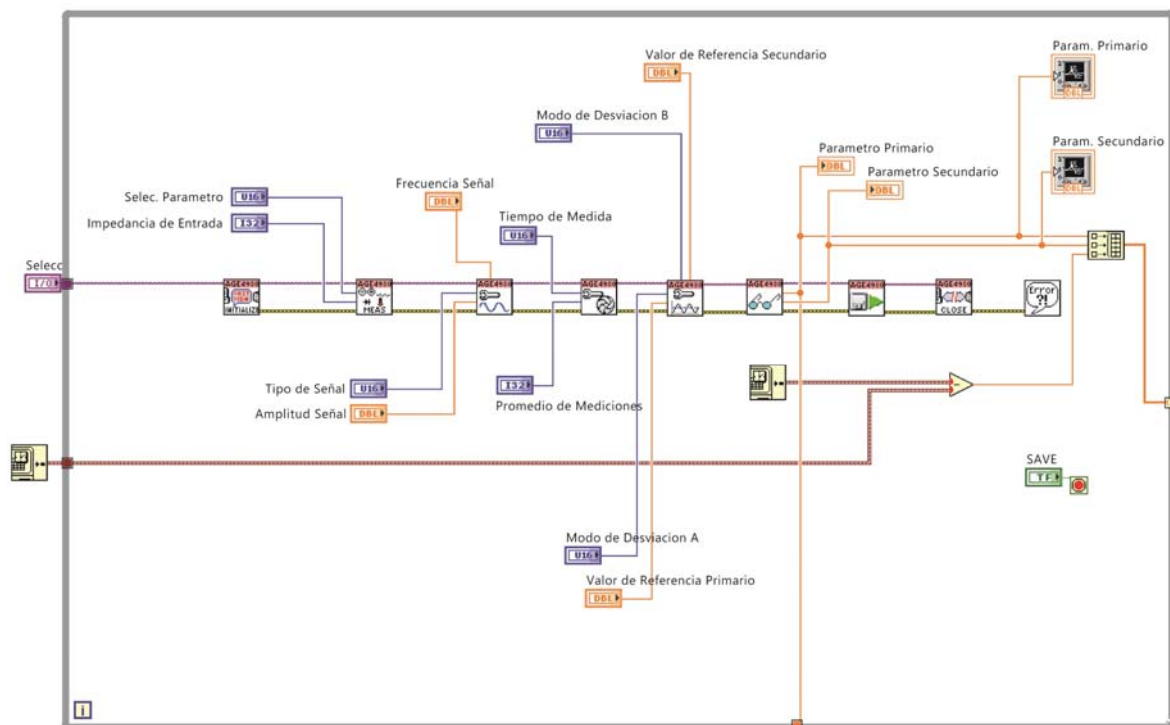


Figura 10. Estructura While Loop

Seguidamente se implementó un Flat Sequence Estructure que consiste en 3 subdiagramas o cuadros, que se ejecutan secuencialmente. En el primer cuadro se introdujo la estructura While Loop, mencionada anteriormente. Una vez finalizada la ejecución de este primer cuadro, los datos obtenidos salen para ingresar al segundo cuadro, el cual al ejecutarse despliega una ventana de

dialogo con una opción positiva y otra negativa. Si se selecciona la opción positiva se ejecuta el tercer cuadro que contiene un Case Structure el cual guardara los datos obtenidos del primer cuadro en un archivo *.txt. En caso de seleccionar la opción negativa no se ejecutará este último cuadro. En la figura 11, se observa esta estructura.

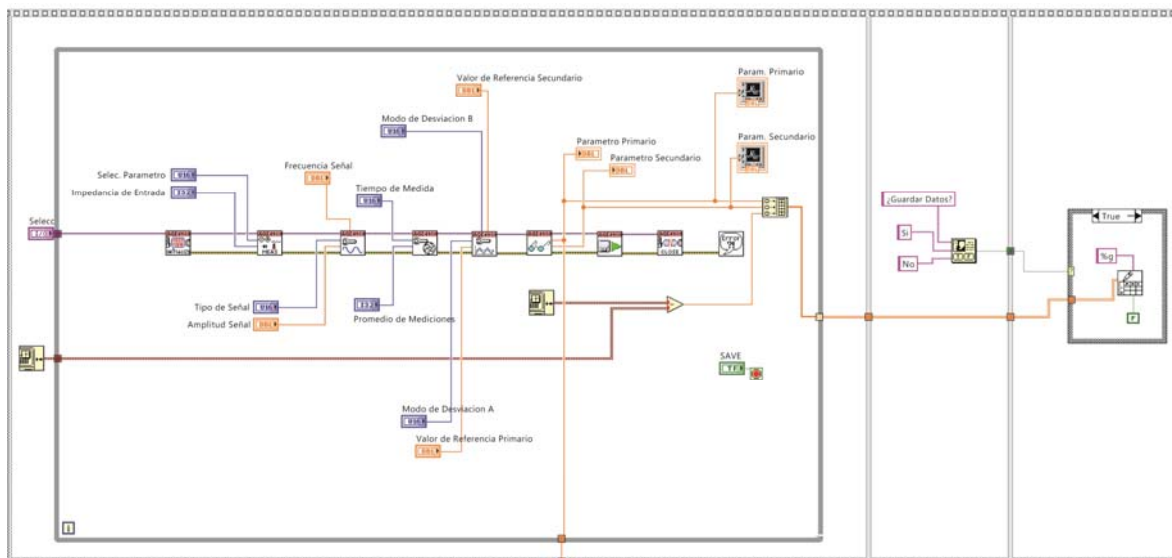


Figura 11. Estructura Flat Sequence. Algoritmo final.

En la figura 12 se muestra el diagrama de flujo general del funcionamiento del VI propuesto. Configurando las opciones de medición se puede obtener los valores de los diferentes parámetros eléctricos (C , R , Z , D , L) de un MBP en estudio. Activando la opción ΔABS (Medición Diferencial) nos permite desplegar un valor que representa la diferencia de la medición en tiempo real y un valor de referencia almacenado. Al finalizar la medición se pueden guardar los datos obtenidos.

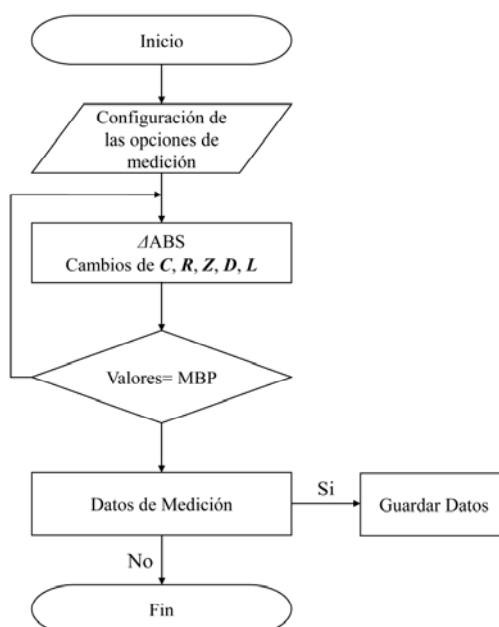


Figura 12. Diagrama de flujo del Instrumento Virtual desarrollado.

Se emplearon las diferentes herramientas que ofrece LabVIEW para diseñar un panel de control en la ventana principal con el fin de desplegar los gráficos que ayudaran al usuario a observar el proceso de medición en tiempo real. De igual forma se añadieron menús para la configuración del medidor. El panel de control principal del VI se observa en la figura 13.

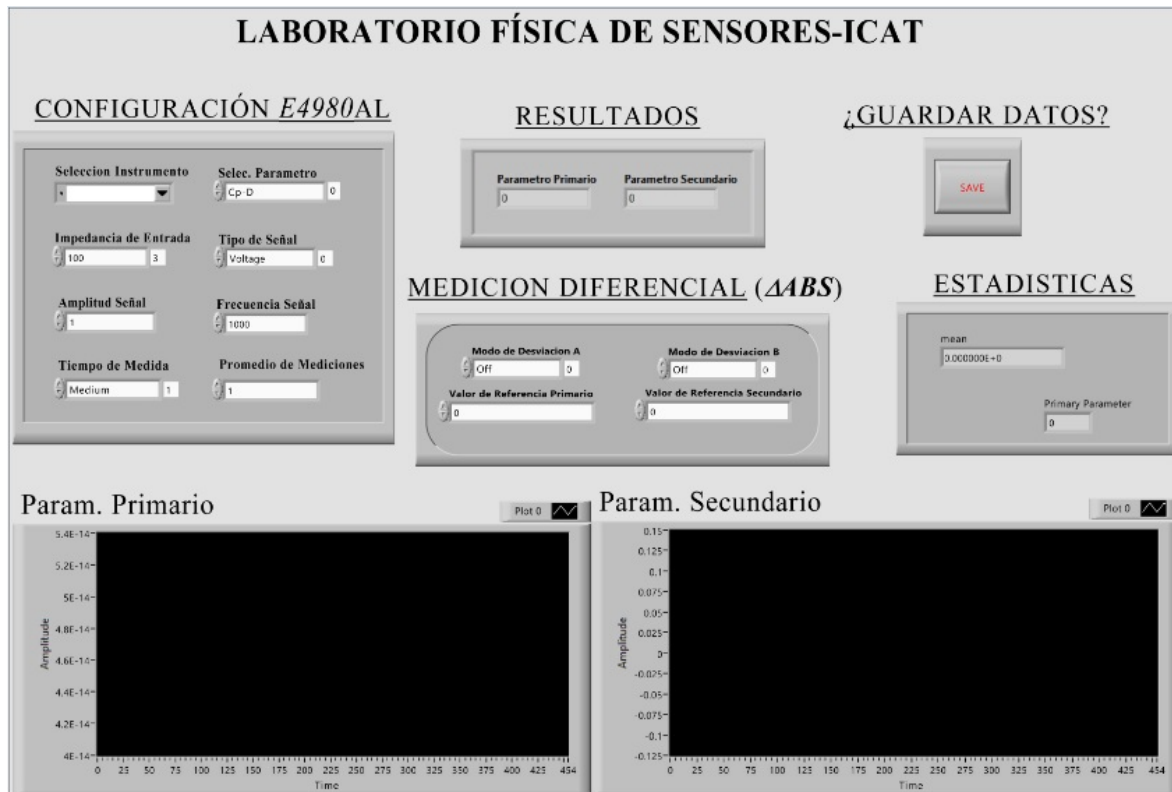


Figura 13. Panel de control principal del instrumento virtual desarrollado.

Una ventaja significativa de desarrollar el VI modular es que puede ser adaptable, extendible y aplicable a diferentes sistemas de medición existentes en el laboratorio de *Sensores* (por ejemplo Sistema de Medición Temporal Capacitivo), únicamente instalando los drives correspondientes para formar el algoritmo antes descrito. Además se puede acoplar a diferentes sistemas de medición para realizar mediciones simultáneas. Es decir, se puede llevar acabo actualizaciones al VI añadiendo nuevas funciones con el fin de ofrecer una interface de acuerdo con las diferentes necesidades del usuario.

3 Diseño y fabricación de una placa de acondicionamiento de conexiones (PAC)

En esta sección se describe el diseño de una PAC que sustituye a una montura de conexiones (*test fixture*), mencionando los resultados que se obtuvieron al implementarlo en el SMIIV.

3.1 Medidor LCR E4980AL

Algunas de las características principales del medidor LCR E4980AL son las siguientes:

- Permite realizar mediciones en un rango de bajas frecuencias de prueba de 20 [Hz] a 300 [kHz] con resolución de cuatro dígitos.
- Permite el uso de señales de prueba en el rango de 100 [μV_{rms}] a 2 [V_{rms}] y de 1 [μA] a 20 [mA].
- Ofrece una memoria interna de almacenamiento de datos que puede contener hasta 201 valores de medición.
- Ofrece conectividad con una PC a través de las interfaces de control GPIB / LAN / USB.
- El medidor LCR E4980AL mide simultáneamente dos parámetros de Z (denominados parámetro primario y parámetro secundario) en un ciclo de medición.

Medidor LCR	Un medidor LCR es un instrumento utilizado para medir inductancia (L), capacitancia (C) y resistencia (R) de un componente eléctrico, sensor u otro. Miden la corriente (I)/voltaje (V) a través de un MBP y el ángulo de fase entre V e I medidos, IET Labs, Inc (2019).
--------------------	---

En la figura 14 podemos observar el panel de control principal del medidor de impedancias existente en el laboratorio de *Sensores*. Está equipado con cuatro terminales de conexión BNC denominados *Hcur*, *Hpot*, *Lpot* y *Lcur*. Donde por medio del oscilador interno del medidor se genera y aplica una señal de prueba a una de las terminales de nuestros sensores. Esta señal generada se emite a través de la terminal *Hcur* por medio de la resistencia de fuente.

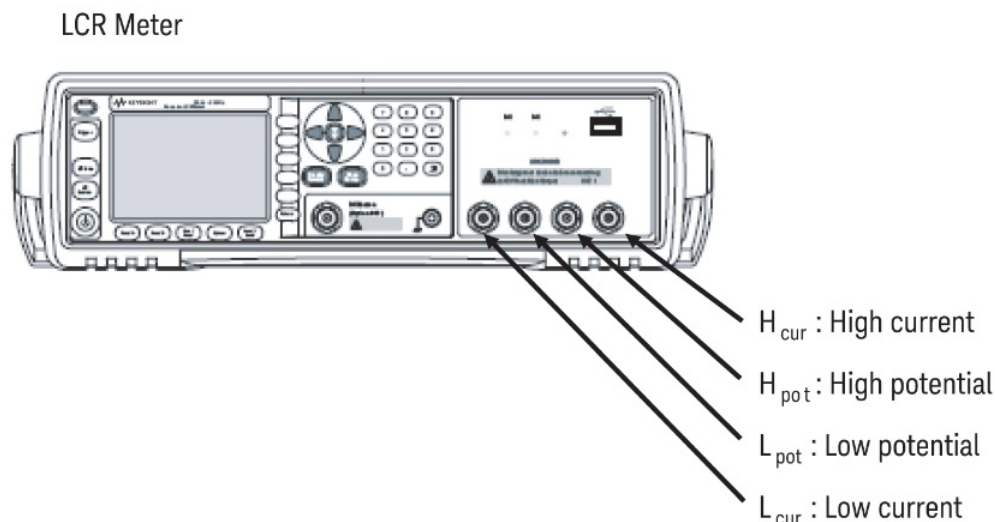


Figura 14. Panel de control principal del medidor LCR E4980AL.

Estas terminales BNC se denominan convencionalmente *UNKNOWN Terminals*. Existen diferentes configuraciones de conexión entre estas terminales para interrogar/medir una señal eléctrica, en este caso proporcionada por los sensores de campo eléctrico utilizados en el laboratorio al realizar una caracterización eléctrica de algún MBP. Dado que cada configuración depende de la aplicación, la conexión más adecuada debe seleccionarse en función de los rangos de impedancia esperados. En este caso, se realizó una caracterización previa de los sensores utilizados y de acuerdo con las aplicaciones de interés, los rangos de medición esperados oscilan: para **C** por debajo del orden de los [pF] y para **R** por encima del orden de los [MΩ].

El Medidor LCR E4980AL de la marca *Keysight Technologies* requiere de una montura de conexiones (*test fixture*) comercial de la misma marca del fabricante para realizar mediciones y probar su funcionamiento. Uno de los principales inconvenientes de adquirir el *test fixture* fue su alto costo, además de presentar incompatibilidad para conectar los sensores utilizados. Por estas razones se implementaron unas conexiones en puente improvisadas con el fin de probar el funcionamiento del equipo de medición. En la figura 15 se muestra cómo se realizaron las primeras mediciones, de forma improvisada, debido a que no se contaba con un *test fixture*.



Figura 15. Conexión realizada sin test fixture.

Utilizando la conexión anterior se obtuvieron los resultados que se muestran en la figura 16. Las gráficas resultantes representan los datos obtenidos de las mediciones del proceso de evaporación una gota de 5 [μl] de solución cloruro de sodio (NaCl) al 0.9%. Se realizaron medidas diferenciales de capacitancia (ΔC) y de resistencia (ΔR) del proceso de evaporación la muestra líquida en función del tiempo utilizando una señal senoidal de 1 V_{RMS} y 10 KHz de frecuencia. El nivel de ruido base NΔC que se obtuvo fue de $N\Delta C_{RMS} = 1.15$ [fF/√Hz] en condiciones ambientales de 24°C y 45% HR.

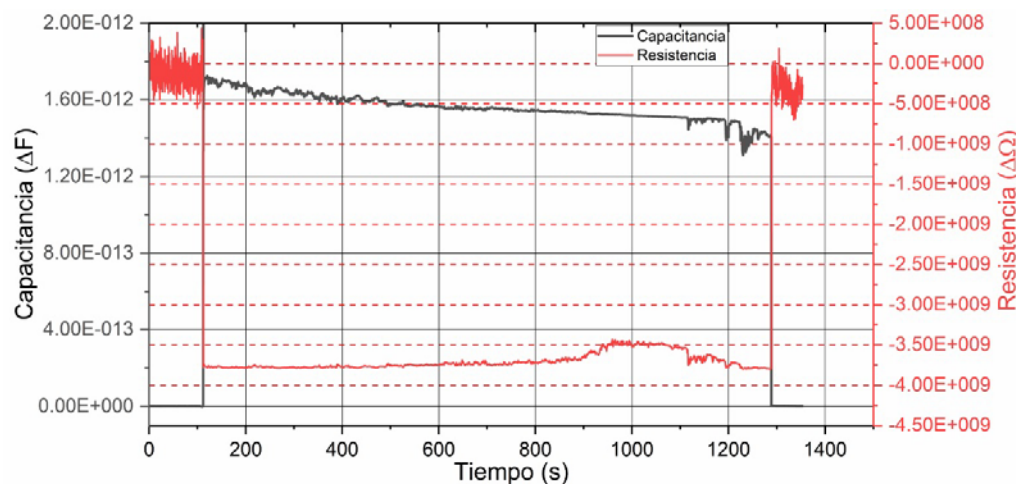


Figura 16. Mediciones realizadas sin PAC.

3.2 Placa de acondicionamiento de conexiones (PAC)

El *test fixture* (montura de conexiones) es un accesorio que se emplea para medir y acoplar componentes con un medidor con terminales BNC. Permite adoptar diferentes configuraciones de medición de acuerdo con la aplicación. Además de proporcionar una medición más precisa y estable, al reducir las fuentes de ruido.

Test Fixture	Es un accesorio utilizado para medir/acoplar componentes con el medidor LCR. Su función entre otras es minimizar las fuentes de ruido al reducir el uso de cables de conexión, Keysight (2018).
---------------------	---

En la página del fabricante *Keysight Technologies*, se puede encontrar el accesorio comercial *test fixture* que corresponde al medidor E4980AL, como se ve en la figura 17.



Figura 17. Vista web del test fixture comercial.

Debido a su elevado costo, se optó por realizar el diseño y fabricación de una *Placa de Acondicionamiento de Conexiones de bajo costo* (PAC) que sustituye al accesorio comercial.

La configuración que se implementó en el diseño y fabricación de la PAC es la que se denomina *Three-terminal configuration (3T)* (Keysight Technologies, 2016). En la figura 18 se observa el diagrama de conexión. Esta configuración permite el uso de cables coaxiales conectando el blindaje de malla de estos a la terminal de protección (chasis) para reducir los efectos de las capacitancias parásitas. Con esta configuración el rango de medición de impedancia se incrementa

para valores altos, pero no en el rango de medición de impedancias bajas. Es decir, el rango de impedancia típico para esta configuración se extenderá por encima de los 10 [kΩ].

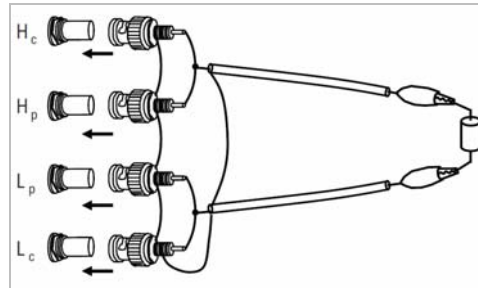


Figura 18. Diagrama de conexión Three-terminal configuration (3T).

La característica principal que se obtuvo con la fabricación de esta PAC de prueba fue la de reducir el uso de cables de conexión entre nuestros sensores y el medidor LCR, ya que estos son una fuente de ruido de magnitud comparable al orden de valores de C que obtenemos en nuestras mediciones. Además la implementación de conexiones tipo BNC nos ayudaron a reducir las interferencias electromagnéticas. Es decir, el propósito fue blindar de interferencias electromagnéticas la conexión entre nuestros sensores y el medidor.

Utilizando el programa *AltiumDesigner*, se realizó el diseño de la mascarilla que nos permitió fabricar el PCB (placa de circuito impreso) de acuerdo con las dimensiones del equipo y del manual de usuario. Las medidas se obtuvieron del manual verificándolas físicamente con el medidor. El diseño de la mascarilla se puede observar en la figura 19.

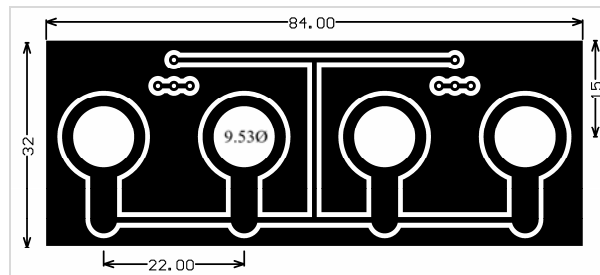


Figura 19. Diseño de mascarilla. Medidas en mm.

3.3 Fabricación de la PAC

Para este primer prototipo se implementaron conexiones tipo *headers female*, debido a que los sensores utilizados son compatibles con este tipo de conexión. Estas conexiones nos proporcionaron la facilidad de conectar el plano de tierra de chasis del medidor LCR con la malla de los cables coaxiales con el fin de minimizar los efectos magnéticos generados por la corriente que circula a través de estos. De igual manera se puede realizar la conexión del plano de tierra de los sensores con el fin de confinar/atrapar las líneas de campo eléctrico entre sus electrodos, lo cual ha mostrado mayor estabilidad en nuestras mediciones. En la figura 20 se observa la *PAC de bajo costo* fabricada.

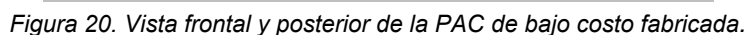
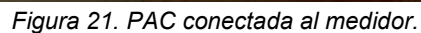


Tabla 4. Principales piezas

Una vez fabricada la PAC, se ensambla y se acopla al medidor. Se procedió a realizar las debidas pruebas de continuidad. En la figura 21, se observa la PAC conectada al medidor.



Se efectuaron una serie de pruebas de medición con la PAC, esto con el fin de asegurarnos que presentara un buen funcionamiento. En la figura 22 y 23 se observan las pruebas realizadas con el sensor capacitivo de placas paralelas y con el sensor SCDS.



Figura 22. Mediciones realizadas con el sensor capacitivo de placas paralelas.

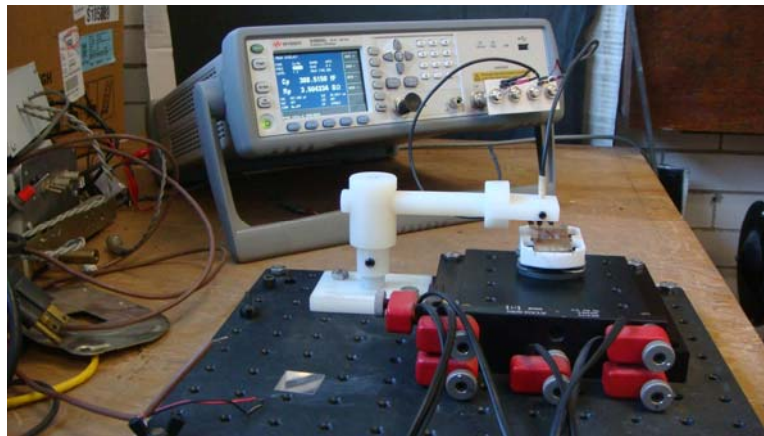


Figura 23. Mediciones realizadas con el sensor SCDS.

4 Mediciones experimentales

En este apartado se describe el procedimiento básico de medición que se emplea en el laboratorio para caracterizar un MBP utilizando este SMVC. Seguidamente se presentan los resultados de la medición de una muestra líquida como MBP utilizando el sensor SCDS.

4.1 Metodología de medición

En el diagrama de la figura 24, se observa el procedimiento básico que se emplea para medir la impedancia de una suspensión líquida de cloruro de sodio al 0.9%.

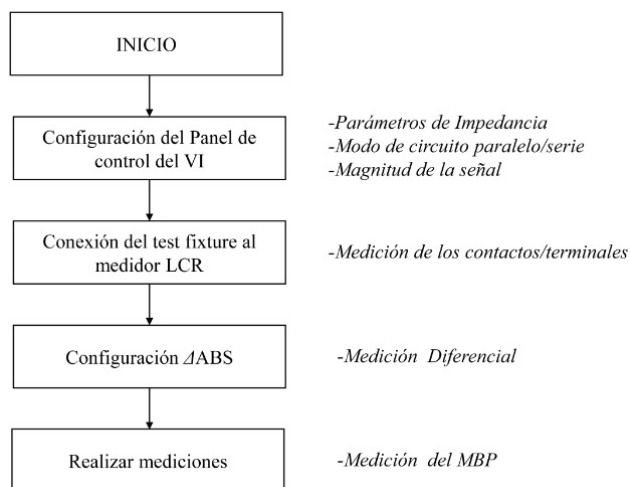


Figura 24. Procedimiento básico de medición empleando el SMIIV.

Para configurar los parámetros de lectura de impedancia L , C o R , hay dos modos: circuito equivalente paralelo (p) y serie (s). Es decir, se puede seleccionar el modo: C_p , C_s , L_p , L_s , R_p o R_s .

Para mayor información se puede consultar IET LABS, INC. (2012).

4.2 Configuración panel de control del VI

En la tabla 5 se muestra los valores de los parámetros ingresados al panel de control del SMIIV, antes de efectuar la medición de un MBP.

Tabla 5. Valores de los parámetros ingresados

Selección de Instrumento	
Selección de parámetro.	Cp-Rp
Tipo de Señal (Aplicada)	Voltaje
Amplitud Señal (RMS)	1
Frecuencia Señal	10 [kHz]
Tiempo de Medida	Medium
Promedio de Mediciones	1

La figura 25 muestra cómo queda el panel de control del SMIIV una vez ingresado los parámetros de la tabla 5.

CONFIGURACIÓN E4980AL	
Selección Instrumento	Selec. Parametro
10	Cp-D 0
Impedancia de Entrada	Tipo de Señal
100 3	Voltage 0
Amplitud Señal	Frecuencia Señal
1	1000
Tiempo de Medida	Promedio de Mediciones
Medium 1	1

Figura 25. Configuración del panel de control SMIIV.

Activando la opción Δ ABS podemos realizar mediciones diferenciales que serán característicos de la muestra bajo estudio. Para esto, se selecciona la opción *>Absolute* en las pestañas *Modo de Desviación*. Seguidamente se realizó una primera medición sin la muestra bajo estudio, y se procedió a ingresar el valor obtenido de *Cp-Rp* en las pestañas *Valor de Referencia* del panel de control respectivamente, como se observa en la figura 26. Esto nos producirá un nivel de señal base cercana a cero, antes de depositar alguna muestra bajo estudio en el sensor.

MEDICION DIFERENCIAL (Δ ABS)	
Modo de Desviación A	Modo de Desviación B
Absolute 1	Absolute 1
Valor de Referencia Primario	Valor de Referencia Secundario
4.20248E-12	2.98707E+11

Figura 26. Configuración de medición diferencial.

Una vez configurado la opción Δ ABS, se realizó la medición de la cinética de evaporación de una gota de cloruro de sodio (*NaCl*). En la figura 27 podemos observar una vista conceptual de la medición de una gota de *NaCl* depositada entre los electrodos punta-plano del sensor SCDS.

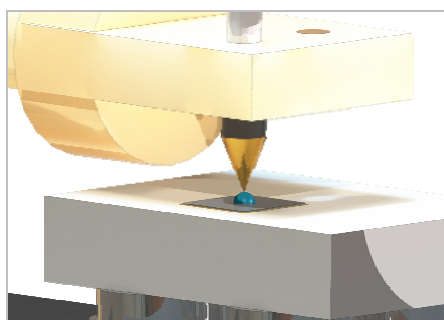


Figura 27. Vista conceptual de proceso de monitorización de una gota de *NaCl*.

5 Resultados

Se registraron cambios de señal eléctrica debido a las perturbaciones del campo eléctrico originados por la cinética del proceso de evaporación de una gota de 2 μl de cloruro de sodio (NaCl) al 0.9%, depositada entre los electrodos punta-plano del sensor SCDS. De esta forma fue posible monitorizar el proceso y tiempo de evaporación de una gota y caracterizar la respuesta del sistema de medición empleando el sensor SCDS.

En la figura 28, se puede observar la gráfica con las señales diferenciales temporales de capacitancia y resistencia $\Delta C(t)$ y $\Delta R(t)$, respectivamente, obtenidas con el SMIIV propuesto con una señal senoidal de 1 $[\text{V}_{\text{RMS}}]$ y 10 $[\text{KHz}]$ de frecuencia. Por medio de estas mediciones eléctricas, se obtuvo el tiempo de evaporación de la gota.

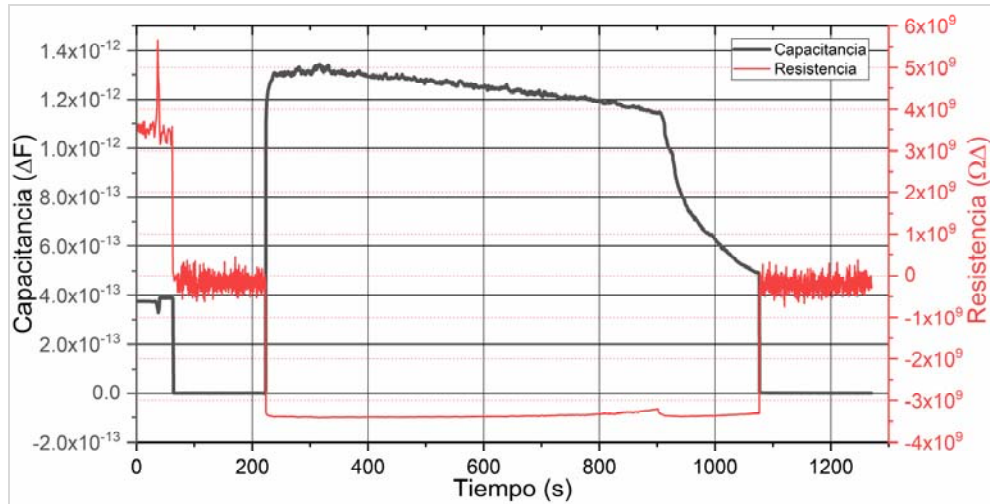


Figura 28. Registro de los cambios de capacitancia (ΔC) y de resistencia (ΔR), del proceso de evaporación de 2 μl de cloruro de sodio (NaCl) al 0.9%.

Los cambios temporales de las señales eléctricas registradas en la figura 28, debido al proceso de evaporación de la muestra líquida, se interpretan como:

1. En el rango de 0 a 70 segundos se obtiene un valor promedio de la amplitud de las señales presentes en el sistema de medición para R y C . Estos valores promedio se compensan, con el fin de obtener un valor de nivel de referencia base diferencial para $\Delta R(t)$ y $\Delta C(t)$ en el rango de 70 a 220 segundos.
2. En el tiempo de 221 segundos se deposita una gota de NaCl de 2 μl entre los electrodos punta-plano del sensor capacitivo, la cual provoca un aumento de la amplitud en ambas señales.
3. Una vez depositada la gota, esta se expande mínimamente tocando el electrodo punta. A partir de este momento empieza el proceso de evaporación de la muestra líquida representada por las señales eléctricas en el rango de 221 a 1080 segundos.
4. Cuando la gota rompe el contacto con el electrodo punta, las señales eléctricas tienden a regresar al nivel base registrado al principio, manteniéndose en este nivel hasta finalizar la medición.

EL ruido base registrado fue de $\text{N}\Delta C_{\text{RMS}} = 0.27 \text{ [fF}/\sqrt{\text{Hz}}]$. Las condiciones ambientales promedio fueron de 19 $^{\circ}\text{C}$ y 39% HR.

Conclusiones

En este trabajo se implementó un Sistema de Medición de Impedancia con Instrumentación Virtual (SMIIV), utilizando sensores de campo eléctrico, el cual viene a complementar y a formar parte de los sistemas de medición existentes en el laboratorio de Sensores. Esto como parte del desarrollo de nuevas tecnologías de medición, más confiables y exactas. La metodología de implementación del VI en este sistema de medición permitirá utilizarlo en algunos otros equipos de medición existentes en el laboratorio.

Una de las limitantes de medidor LCR es que ofrece una memoria interna de almacenamiento de datos hasta 201 valores por cada ciclo de medición. Esto dificulta realizar mediciones de procesos temporales. Con la implementación del SMIIV se elimina esta limitante, lo que nos permite almacenar los datos del proceso temporal para su posterior análisis.

La implementación de una PAC nos permitió reducir el ruido presente en las mediciones, de un orden de magnitud, con respecto al ruido obtenido sin la PAC; de *femtoFaradios* a decimas de *femtoFaradios*. Esto representa un incremento en la relación señal a ruido indispensable en las mediciones de bajo ruido que se realizan en el laboratorio.

Es posible diseñar diferentes configuraciones de PACs de acuerdo con las conexiones requeridas por el usuario para acoplar cualquier tipo de dispositivo pasivo o sensor y realizar mediciones de parámetros eléctricos con el medidor LCR utilizado.

Referencias Bibliográficas

- Keysight Technologies. (2016). *Impedance Measurement Handbook. A guide to measurement technology and techniques*. Application Note. 6th Edition. pp. 6.
- K. Toda, Y. Komatsu, S. Oguni, S. Hashiguchi, and I. Sanemasa. (1999). *A Planar Gas Sensor Combined with Interdigitated Array Electrodes*. *Analytical Sciences*. Vol 15. No. 1. pp. 87–89.
- M. S. Mannoor, S. Zhang, A. J. Link, and M. C. McAlpine. (2010). *Electrical detection of pathogenic bacteria via immobilized antimicrobial peptides*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Vol 107. No. 45. pp. 19207–19212.
- Y. Chen, C. Zhu, M. Cao, and T. Wang. (2007). *Photoresponse of SnO₂ nanobelts grown in situ on interdigital electrodes*. *Nanotechnology*. IOP Publishing. Vol 18. No. 28. pp. 1-5.
- U. H. Veeradasan Perumal, R. Haarindra Prasad. (2013). *pH Measurement using In House Fabricated Interdigitated Capacitive Transducer*. RSM IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics. Vol 13. pp. 33–36.
- A. Guadarrama Santana, A. García Valenzuela, F. Pérez Jiménez, and L. Polo Parada. (2014). *Interdigitated capacitance sensors in the mm scale with sub-femtoFarad resolution suitable for monitoring processes in liquid films*. *Revista Mexicana de Física*. Vol 60. pp. 451–459.
- Gloria Mata-Hernández, Asur Guadarrama-Santana. (2018). *Mediciones eléctricas en líquidos con sensor capacitivo de doble sonda y desplazamientos lineales*. IV Congreso Multidisciplinario de Ciencias Aplicadas en Latinoamérica. Primera edición. pp. 202-2013.
- Jorge Uc Martin. (2017). *Diseño y caracterización de sensores capacitivos Coplanarios sobre sustratos dieléctricos para Caracterización de procesos físico-químicos y biológicos*. Tesis de Maestría. UNAM.
- Anays Acevedo Barrera. (2017). *Modelado de la respuesta eléctrica de biofluidos*. Tesis de Maestría. UNAM.
- S. Nuccio and C. Spataro. (2002). *Approaches to Evaluate the Virtual Instrumentation*. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*. Vol. 51. No. 6. pp. 1347-1352.
- National Instruments. (2019). *Red de Controladores de Instrumentos (IDNet)*. [online]. Dirección web <<http://www.ni.com/downloads/instrument-drivers/esa/>> [Noviembre 2019].
- IET Labs, Inc. (2019). *What is an LCR Meter*. [online]. Dirección web <<https://www.ietlabs.com/lcr-meter-informational-guide>> [Noviembre 2019].
- Keysight. (2018). *16047E Test Fixture*. Operation and Service Manual. 5th Edition.
- IET LABS, INC. (2012). *Precision instruments for test and measurement. LCR measurement*. 1st Edition.