



UNIVERSIDAD VERACRUZANA

Facultad de Ingeniería de la Construcción y el Hábitat

Región Veracruz

**Desarrollo de un Sistema de Medición para
Dispositivos Capacitivos**

Que presenta:

Ing. Minerva Estefanía Rivera López

Para obtener el grado de:

Maestra en Ingeniería Aplicada

Directora de tesis:

Dra. Andrea Guadalupe Martínez López

Codirector de tesis:

Dr. Julio César Tinoco Magaña



Universidad Veracruzana
Dirección General de Administración Escolar
Oficialía Mayor

Dr. Agustín Leobardo Herrera May
Coordinador de la Maestría en Ingeniería Aplicada U.V.
Boca del Río, Veracruz

En contestación a su oficio s/n de fecha 15 de abril del año en curso, y con fundamento en la fracción XI del Artículo 183 del Estatuto General de esta Universidad, comunico a usted que, habiendo cumplido con los requisitos legales correspondientes la C. *Ingeniera en Electrónica y Comunicaciones: Minerva Estefanía Rivera López* aspirante al grado de: **Maestra en Ingeniería Aplicada** se autoriza la celebración del Examen de Grado solicitado, que versará sobre el trabajo escrito intitulado **“Desarrollo de un sistema de medición para dispositivos capacitivos”**.

Pido a usted nos informe sobre los nombres de los sinodales que designe para integrar el Jurado del examen que se autoriza, así como el día, hora y resultado del mismo.

Atentamente
“Lis de Veracruz: Arte, Ciencia, Luz”
Abril 29 de 2021



Carlos Arturo Gómez Viguola
Oficial Mayor

DEDICATORIA

A mis padres académicos,

Gracias por todo.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco al H. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo otorgado mediante la beca nacional de posgrado con número 812013.

Agradezco a mis mentores, la Dra. Andrea Guadalupe Martínez López y el Dr. Julio César Tinoco Magaña, ya que gracias a su dirección y apoyo ha sido posible concluir este trabajo de manera satisfactoria.

Al Dr. Agustín Leobardo Herrera May, coordinador de la Maestría en Ingeniería Aplicada, por sus enseñanzas y su apoyo a lo largo de estos estudios de posgrado.

A mis sinodales, por el tiempo invertido en la revisión de este trabajo de tesis.

A la técnico de laboratorio la Ing. Yislain Ávalos Grajales por todo su apoyo durante la fabricación de las estructuras realizadas.

Y, por último, a todos mis compañeros, estudiantes y profesores que conforman el grupo de trabajo del Laboratorio de Microfabricación y Diseño de Dispositivos Avanzados, LaMDDA del Centro MICRONA de la Universidad Veracruzana.

Gracias a todos.



RESUMEN

En años recientes, se ha incrementado el interés por el uso de sensores capacitivos en diversas áreas de desarrollo, debido a las ventajas que poseen con respecto a otras tecnologías de sensado. Por lo tanto, las técnicas de lectura para este tipo de sensores han sido ampliamente estudiadas. En este trabajo se desarrolló e implementó un sistema de medición de estructuras capacitivas. Se diseñó un convertidor de capacitancia a frecuencia basado en un circuito oscilador de topología simple. Esto con la finalidad de obtener una señal digitalizada, para su posterior procesamiento en la etapa de adquisición de datos en la cual se utilizó un programa realizado en Python con una Raspberry Pi 4. Después, se fabricaron estructuras capacitivas flexibles para probar el funcionamiento del sistema de medición. Se reportan los resultados obtenidos de las mediciones realizadas a las estructuras, así como un estudio estadístico para probar la confiabilidad del sistema implementado.



ABSTRACT

In recent years, interest in the use of capacitive sensors in various development areas has increased, due to the advantages they present over other sensing technologies. Therefore, the readout techniques for this type of sensors have been widely studied. In this work, a capacitive-structures measurement system was developed and implemented. A capacitance-to-frequency converter was designed based on a simple topology oscillator circuit. This to obtain a digitized signal, for subsequent processing in the data acquisition stage in which a program made in Python with a Raspberry Pi 4 was used. Then, flexible capacitive structures were fabricated to test the operation of the system. The results obtained from the measurements made to the structures are reported, as well as a statistical study to test the reliability of this implemented system.



CONTENIDO

RESUMEN.....	IV
ABSTRACT.....	V
OBJETIVO.....	X
JUSTIFICACIÓN.....	XI
HIPÓTESIS.....	XII
FUNDAMENTOS DE LOS SENSORES CAPACITIVOS.....	I
I.1. INTRODUCCIÓN.....	2
I.2. PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE SENSORES CAPACITIVOS.....	3
I.2.1. CAPACITOR Y CAPACITANCIA.....	4
I.2.2. OPERACIÓN DEL SENSOR CAPACITIVO.....	6
I.3. SENSORES CAPACITIVOS TÁCTILES.....	7
I.3.1. ESTRUCTURAS PARA SENSORES CAPACITIVOS TÁCTILES.....	8
I.4. APLICACIONES DE SENSORES CAPACITIVOS TÁCTILES.....	10
I.4.1. PANTALLAS TÁCTILES.....	10
I.4.2. MEDICINA.....	11
I.4.3. ROBÓTICA.....	12
I.5. CONCLUSIONES.....	13
SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA SENSORES CAPACITIVOS.....	14
2.1. INTRODUCCIÓN.....	15
2.2. SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	16
2.2.1. ELEMENTOS DE SENSADO.....	17
2.2.2. ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL.....	19
2.2.3. CONVERSIÓN ANALÓGICO/DIGITAL.....	20
2.2.4. SISTEMA DIGITAL.....	20
2.3. SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE READOUT.....	22
2.3.1. CONVERTIDORES ANALÓGICOS.....	23
2.3.2. CONVERTIDORES SEMIDIGITALES.....	24
2.4. CIRCUITOS DE INTERFAZ DIRECTA.....	27
2.5. CONCLUSIONES.....	28



DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.....	29
3.1. INTRODUCCIÓN.....	30
3.2. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.....	31
3.2.1. TEORÍA DEL CIRCUITO OSCILADOR.....	31
3.2.2. IMPLEMENTACIÓN FÍSICA DEL CIRCUITO OSCILADOR	32
3.2.3. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	33
3.3. ESTRUCTURAS CAPACITIVAS.....	36
3.4. CONCLUSIONES.....	38
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	39
4.1. INTRODUCCIÓN.....	40
4.2. PRUEBAS DE DETERMINACIÓN.....	40
4.2.1. VALOR PROMEDIO.....	41
4.2.2. DESVIACIÓN ESTÁNDAR.....	41
4.2.3. TIEMPO DE CÁLCULO.....	42
4.2.4. DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD.....	43
4.3. CURVA DE CALIBRACIÓN.....	48
4.4. OFFSET DEL SISTEMA DE MEDICIÓN.....	50
4.5. PRUEBAS DE DISPERSIÓN DE DATOS.....	51
4.6. PRUEBAS DE REPETICIONES	53
4.7. MEDICIONES DE ESTRUCTURAS EXPERIMENTALES.....	54
4.8. CONCLUSIONES.....	56
CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJO A FUTURO	57
5.1. CONCLUSIONES.....	58
5.2. TRABAJO A FUTURO.....	59
ANEXO: PROGRAMA GENÉRICO (PYTHON).....	60

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 A) PANTALLA TÁCTIL CAPACITIVA DESARROLLADA POR E. A. JOHNSON (1967) [2]. B) MANO ROBÓTICA CAPACITIVA [6].	3
FIGURA 2 DIAGRAMA BÁSICO DE UN CAPACITOR DE PLACAS PARALELAS [12].	5
FIGURA 3 A) DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE ARREGLO DE SENSORES CAPACITIVOS TÁCTILES [18], B) ARREGLO DE SENSORES DESCRITO EN [19] Y C) IMAGEN DE ARREGLO DE SENSORES EN DENTRO DE UNA MEMBRANA DE SILICONA [20].	9
FIGURA 4 CAPAS UTILIZADAS PARA HABILITAR “3D TOUCH” EN IPHONE 6S, [21].	11
FIGURA 5 DA VINCI SURGICAL SYSTEM A) CONSOLA DE CIRUGÍA B) CARRO DE PACIENTE (POSEE LOS INSTRUMENTOS NECESARIOS PARA LA CIRUGÍA), C) CARRO DE VISIÓN. HABILITA LA COMUNICACIÓN ENTRE LOS ANTERIORES Y SOPORTA UN SISTEMA DE VISIÓN 3D-HD. ADAPTADO DE [22].	12
FIGURA 6 SENSORES CAPACITIVOS DE PRESIÓN TEKSCAN, SISTEMA F-SCAN CAPACES DE PROVEER INFORMACIÓN SOBRE LA FUNCIÓN DEL PIE. TOMADO DE [23].	13
FIGURA 7 A) DIAGRAMA DE BLOQUES DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE UN SENSOR, B) CIRCUITO DE INTERFAZ DIRECTA [27].	15
FIGURA 8 SEÑAL DE SALIDA DE A) SENSOR ANALÓGICO, B) SENSOR CUASI DIGITAL, C) SENSOR DIGITAL. MODIFICADO DE [24].	18
FIGURA 9 TOPOLOGÍAS DE SENSORES CAPACITIVOS: A) SIMPLE, B) SIMPLE CON PÉRDIDA, C) DIFERENCIAL Y D) TIPO PUENTE [30].	19
FIGURA 10 A) TARJETA ARDUINO UNO, B) TARJETA RASPBERRY PI. [36, 37]	22
FIGURA 11 DISEÑO BÁSICO DE UN CIRCUITO DE CONVERTIDOR CAPACITANCIA A VOLTAJE IDEAL [41].	24
FIGURA 12 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UN CIRCUITO CONVERTIDOR DE CAPACITANCIA A FRECUENCIA [39].	25
FIGURA 13 DIAGRAMA DE BLOQUE DEL CONVERTIDOR DE CAPACITANCIA A TIEMPO [45].	26
FIGURA 14 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO OSCILADOR EN MULTISIM DE NI.	31
FIGURA 15 DISEÑO FINAL DEL CIRCUITO IMPRESO EN ULTIBOARD DE NI.	32
FIGURA 16 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA IMPLEMENTADO PARA EL PRESENTE TRABAJO DE TESIS.	34
FIGURA 17 A) VISTA SUPERIOR DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE MEDICIÓN, 1) RASPBERRY PI 4, 2) CIRCUITO OSCILADOR, 3) PUNTAS DE PRUEBA, 4) ESTRUCTURA CAPACITIVA. B) VISTA FRONTAL DEL SISTEMA CON MEDICIÓN EN PANTALLA.	36
FIGURA 18 A) ESQUEMA DE LAS ESTRUCTURAS OBTENIDAS EN EL LABORATORIO LAMDDA – MICRONA, UV, B) ESTRUCTURA M ₄ TERMINADA.	37
FIGURA 19 HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA Y DISTRIBUCIÓN NORMAL DE LA SERIE DE 100 REPETICIONES.	44
FIGURA 20 HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA Y DISTRIBUCIÓN NORMAL DE LA SERIE DE 500 REPETICIONES.	45
FIGURA 21 HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA Y DISTRIBUCIÓN NORMAL DE LA SERIE DE 1000 REPETICIONES.	46
FIGURA 22 HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA Y DISTRIBUCIÓN NORMAL DE LA SERIE DE 5,000 REPETICIONES.	47
FIGURA 23 CURVA DE CALIBRACIÓN CON DATOS OBTENIDOS DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE MEDICIÓN.	49



FIGURA 24 GRÁFICO DE DISPERSIÓN DE CAPACITANCIA CON RESPECTO AL TIEMPO CON 5,000 CICLOS Y 5,000 REPETICIONES PARA M ₃ C ₁ .	52
FIGURA 25 GRÁFICO DE DISPERSIÓN DE CAPACITANCIA CON RESPECTO AL TIEMPO CON 5,000 CICLOS Y 5,000 REPETICIONES.	53
FIGURA 26 GRÁFICA OBTENIDA DE LAS MEDICIONES CON CAPACITOMETRO (GRIS), MULTÍMETRO (ROJO) Y RASPBERRY PI (VIOLETA).	54
FIGURA 27 GRÁFICA OBTENIDA DE LAS MEDICIONES CON CAPACITOMETRO (GRIS), MULTÍMETRO (ROJO) Y RASPBERRY PI (VIOLETA).	55

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 TIEMPO DE PROCESAMIENTO PARA MUESTRAS MI -M7	37
TABLA 2 CONDENSADO DE LOS VALORES PROMEDIO DE FRECUENCIA BASE (HZ) OBTENIDOS CON EL PROGRAMA DESARROLLADO.	41
TABLA 3 CONDENSADO DE LOS VALORES DE DESVIACIÓN ESTÁNDAR OBTENIDO DE LOS ANÁLISIS ESTADÍSTICOS REALIZADOS A CADA EJECUCIÓN.	42
TABLA 4 VALORES DE TIEMPO DE CÁLCULO EN SEGUNDOS, OBTENIDOS CON EL PROGRAMA IMPLEMENTADO.	42
TABLA 5 VALORES DE CAPACITORES COMERCIALES Y SU RESPECTIVA FRECUENCIA OBTENIDA CON EL SISTEMA DE MEDICIÓN.	48
TABLA 6 VALORES DE OFFSET OBTENIDOS CON EL SISTEMA DE MEDICIÓN.	51
TABLA 7 VALORES OBTENIDOS EN EL EJERCICIO DE MEDICIÓN (5,000/5,000); CON EL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE MEDICIÓN.	51
TABLA 8 PRUEBAS DE REPETICIONES CON 5,000 CICLOS.	53



OBJETIVO

Diseñar e implementar un sistema de medición de capacitancia para ser implementado en la medición de estructuras capacitivas fabricadas en el Laboratorio de Microfabricación y Diseño de Dispositivos Avanzados (LaMDDA).



JUSTIFICACIÓN

En las últimas décadas se ha incrementado el interés por el desarrollo de sensores capacitivos, debido a las ventajas que poseen sobre otras tecnologías de sensado: bajo costo y simplicidad de fabricación, respuesta rápida, habilidad de integración con otros dispositivos electrónicos, entre otras.

En ese sentido, las técnicas de lectura se han vuelto parte importante en el desarrollo de dicha tecnología. Actualmente, existen diversos métodos de lectura para sensores capacitivos comerciales, entre ellos están los convertidores de capacitancia a frecuencia, voltaje, tiempo, por mencionar algunos.

Sin embargo, se ha demostrado que la complejidad del circuito de lectura afecta de manera significativa el rendimiento del dispositivo, lo que puede provocar resultados inesperados o no favorables. Por lo tanto, es necesario contar con circuitos de lectura simples y efectivos y que satisfagan las necesidades del usuario.

Por estas razones, debido a la inminente necesidad de tener sistemas de medición completos con mejores características de rendimiento, costo y aplicabilidad; se muestra el interés por el desarrollo de los mismos en el presente trabajo de tesis.



HIPÓTESIS

Mediante el diseño e implementación de distintas etapas electrónicas de obtención y lectura de datos es posible desarrollar un sistema de medición para estructuras capacitivas.



CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LOS SENSORES CAPACITIVOS

I.1. INTRODUCCIÓN

Se sabe que el ser humano es capaz de percibir, captar y manipular una gran cantidad de objetos gracias al sentido del tacto; siendo ésta una de las maneras más importantes en las que interactuamos con nuestro entorno [1]. En este sentido, y con la creciente necesidad por imitar las características sensoriales de la piel humana, se han desarrollado diversos dispositivos de detección táctil, basados en el principio de operación de los sensores capacitivos.

El primer sensor táctil capacitivo fue desarrollado en 1965 por E. A. Johnson, el cual fue publicado bajo el título de “Touch Display – A novel input / output device for computers” [2] (como se muestra en la figura 1). Más adelante, en 1967 explicó la operación de este dispositivo en “Touch Displays: A Programmed Man – Machine Interface”. Posteriormente, durante las décadas de los 80's y 90's se comercializó esta tecnología. Los sensores eran fabricados utilizando óxido de estaño – indio (ITO), el cual aún se utiliza ampliamente para la fabricación de paneles táctiles de bajo costo.

En las últimas décadas, se ha incrementado el interés por las tecnologías flexibles, entre ellas, en los sistemas de detección táctil, basados en sensores capacitivos, debido a sus características entre las cuales se destacan: bajo costo y simplicidad de fabricación, respuesta rápida, habilidad de integración con otros dispositivos electrónicos, entre otras [3]. Dada la importancia de éstos en la industria, así como en la vida cotidiana, se han hecho grandes esfuerzos para mejorar su desarrollo.

Los sensores capacitivos que conocemos actualmente tienen aplicaciones en diversas áreas como la industrial, biomédica, robótica, etc.; dentro de éstas se encuentran [4,5]: sensores de flujo, presión, nivel de líquidos, proximidad, posición o desplazamiento, humedad, aceleración, sensores táctiles, piel electrónica, etc.

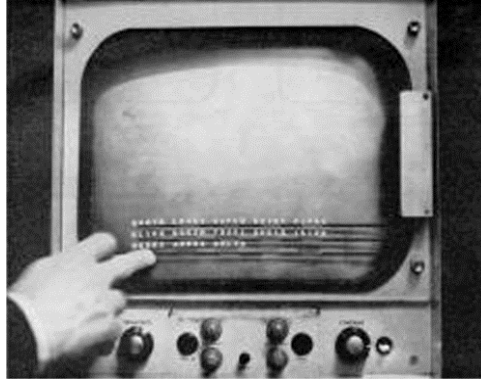


Figura 1 a) Pantalla táctil capacitiva desarrollada por E. A. Johnson (1967) [2].

Además, la mayoría de los teléfonos celulares y las tabletas utilizan pantallas táctiles de detección capacitiva como dispositivos de entrada [5].

Por estas razones y debido a la necesidad de obtener dispositivos con mejores características de rendimiento, costo, aplicabilidad, entre otras; se muestra el interés por su desarrollo. Por otro lado, es necesaria la posibilidad de obtener los datos en tiempo real y tener la capacidad de visualizarlos en cualquier dispositivo móvil.

I.2. PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE SENSORES CAPACITIVOS

Un sensor se puede definir como un dispositivo capaz de detectar un cambio específico en su entorno y, a su vez, convertirlo en una señal útil, legible por un observador o un instrumento de medición. De manera general, un sensor está compuesto por 3 etapas: (1) elemento de sensado, (2) encapsulado y conexiones externas y (3) hardware de procesamiento de la señal o transductor [7].

Los sensores se pueden clasificar en tres tipos de acuerdo con el tipo de variable a detectar. Estas pueden ser físicas, químicas o biológicas. Los sensores biológicos o biosensores son dispositivos capaces de detectar la presencia y/o concentración de un analito biológico, como una biomolécula, una estructura biológica o un microorganismo [8,9].

Los sensores químicos son aquellos dispositivos en los cuales se produce una reacción química entre el material de sensado y el analito, produciendo un cambio en una característica específica del sensor. Finalmente, los sensores físicos son aquellos capaces de detectar cambios de alguna variable física. Éstos últimos son utilizados ampliamente en diferentes áreas, como la industrial, militar, aeroespacial, agricultura, salud, entre otras [10]. Cabe mencionar que ciertos materiales como los semiconductores y polímeros se han utilizado como elementos activos para mejorar el desempeño de dichos sensores.

Entre los sensores físicos que conocemos actualmente se encuentran los siguientes:

- electromagnéticos
- capacitivos
- inductivos
- resistivos
- de presión
- de desplazamiento
- termoeléctricos
- de flujo

A continuación, se aborda el fundamento, así como el principio de operación de los sensores capacitivos.

1.2.1. Capacitor y Capacitancia

Los condensadores o capacitores son parte esencial en el mundo de la electrónica. Para conocer el principio de operación de los sensores capacitivos es necesario entender el principio de operación de estos dispositivos.

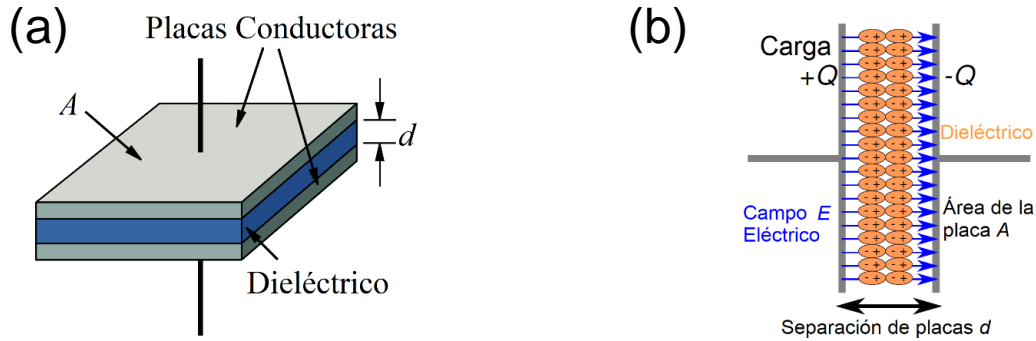


Figura 2 Diagrama básico de un capacitor de placas paralelas [12].

El modelo más simple del capacitor es el de placas paralelas, como se muestra en la figura 2, el cual es un dispositivo que consiste en dos electrodos separados por un material dieléctrico [11].

En general, el valor de la capacitancia es determinado por el material dieléctrico, la distancia entre los conductores, y el área de estos. La capacitancia se expresa de la siguiente manera:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (1.1)$$

Donde C es la capacitancia, $\varepsilon = \kappa \cdot \varepsilon_0$, ε es la permitividad del material, ε_0 es la permitividad del vacío y κ es la constante dieléctrica, A es el área de las placas y d es la separación entre ambas placas.

En este modelo se considera que las placas tienen un área uniforme A y, una densidad de carga $\rho = Q/A$ que existe en la superficie de estas. Asumiendo que el ancho de las placas es mucho mayor que la separación d , el campo eléctrico será $E = \rho/\varepsilon$. El voltaje aplicado se define como la integral de línea del campo eléctrico entre las placas:

$$V = \int_0^d E \, dz = \int_0^d \frac{\rho}{\varepsilon} \, dz = \frac{\rho d}{\varepsilon} = \frac{Qd}{\varepsilon A} \quad (1.2)$$

En general, la capacitancia se define como:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (1.3)$$

Comparando las ecuaciones (1.2) y (1.3), se obtiene la ecuación general de la capacitancia para un capacitor de placas paralelas:

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (1.4)$$

Por lo tanto, la capacitancia es mayor en dispositivos fabricados con materiales de alta permitividad, mayor área de las placas y, menor distancia entre ellas [12].

1.2.2. Operación del Sensor Capacitivo

Un sensor capacitivo, está basado en la variación de alguno de los tres parámetros de un capacitor [11]: distancia (d), área de las placas (A) y, constante dieléctrica (ϵ_r), con una variable de entrada. Así:

$$C = f(d, A, \epsilon_r) \quad (1.5)$$

De esta forma, los sensores capacitivos son dispositivos fabricados de tal forma que una variable de entrada ya sea biológica, física o química producirá algún tipo de cambio, ya sea en la constante dieléctrica o bien en la geometría del dispositivo (a través de cambios en el área de las placas o la distancia entre ellas) Algunos ejemplos son:

En el caso de los **sensores de nivel de líquidos**, dependiendo si el líquido es conductor se colocan los electrodos afuera del tanque, o adentro del mismo si es un líquido no conductor. En el caso de los líquidos no conductores la capacitancia total es la suma de la capacitancia que tiene el electrodo en aire más la capacitancia variable, esta es el porcentaje del electrodo que se encuentra sumergido por la constante dieléctrica del líquido.

Por otra parte, para los líquidos conductores es necesario que los electrodos se encuentren aislados o afuera del tanque. Al igual que en los anteriores, la

capacitancia total será la suma de la capacitancia en aire más dos capacitancias variables C_d que es la capacitancia entre el líquido y el electrodo de excitación y C_s que es la capacitancia entre el líquido y el electrodo de sensado [13].

Por otra parte, en los **sensores de presión**, usualmente uno de los electrodos es sensible a la presión y el otro se encuentra sobre un sustrato rígido. Cuando se aplica presión al sensor, la cavidad que existe entre las placas se reduce en volumen, por lo que la distancia entre las placas se ve disminuida, entonces esto resulta en un cambio detectable de capacitancia entre los electrodos [14].

Los **sensores de humedad** poseen un material dieléctrico higroscópico, con una constante dieléctrica (κ) típica que varía de 2 a 15. A temperatura ambiente, la constante dieléctrica del vapor de agua tiene un valor aproximado de 80, por lo tanto, la absorción de humedad por parte del sensor da como resultado un aumento en la capacitancia del sensor. Por otro lado, en condiciones de equilibrio, la cantidad de humedad presente en el material higroscópico depende tanto de la temperatura ambiente como de la presión del vapor de agua ambiental [15].

Por último, los **sensores biológicos** se pueden utilizar para detectar o medir biomoléculas específicas. En algunos casos, estos pueden detectar dichas moléculas a través de los antígenos o anticuerpos. Algunos ejemplos de los tipos de biosensores pueden ser los siguientes: fragmentos de DNA, marcadores tumorales, sensores de bacterias, proteínas, etc. [16].

1.3. SENSORES CAPACITIVOS TÁCTILES

Los sensores capacitivos táctiles se han posicionado como uno de los dispositivos de mayor utilidad en la vida cotidiana, debido a la versatilidad que poseen para integrarse a los sistemas electrónicos, por lo que es posible su aplicación en diversas áreas.



Aunque requieren sistemas de adquisición más sofisticados que los sensores piezoresistivos, los sensores capacitivos se caracterizan por tener buena frecuencia de respuesta y un amplio rango dinámico. Además, los procesos de microfabricación permiten su integración en superficies sensibles al tacto, con alta resolución espacial.

Los sensores capacitivos táctiles convencionales son fabricados con tecnologías de micromaquinado, estos procesos requieren grandes cantidades de energía, unidades de vacío a gran escala, condiciones controladas de operación, entre otras; lo cual incrementa los costos de fabricación de dichos dispositivos. Esta fue particularmente la motivación para incursionar en el desarrollo de tecnologías de obtención simplificada y de bajo costo.

1.3.1. Estructuras para Sensores Capacitivos Táctiles

Los sensores táctiles se pueden clasificar dentro de dos grupos: los de sensado estático y sensado dinámico [17]. El primero corresponde al reconocimiento de presión localizada o esfuerzo cortante, mientras que el segundo se relaciona con todos los eventos de contacto, p.e. reconocimiento, exploración, etc. Anteriormente, se han mencionado algunas de las ventajas de los sensores capacitivos sobre otras tecnologías de sensado, como son simplicidad de fabricación, tiempos cortos de respuesta, bajo consumo de potencia, entre otras.

Actualmente, existen diversas estructuras que se utilizan para la fabricación de sensores capacitivos táctiles, las cuales a su vez tienen aplicaciones en distintas áreas de conocimiento. Recientemente, se han presentado diferentes propuestas de sensores táctiles capacitivos como las que se mencionan a continuación.

En principio, en [18] se fabrica un arreglo de 4 capacitores de placas paralelas con los 4 electrodos superiores intencionalmente desplazados $100\ \mu\text{m}$ hacia el centro del sensor como se muestra en la figura 3a, y cada estructura individual tiene la misma capacitancia inicial ($C_1=C_2=C_3=C_4$). Se demuestran detecciones de fuerza

normal y esfuerzo cortante. Por último, se reporta que este tipo de sensores se pueden utilizar en aplicaciones de piel electrónica para robots, y como una unidad de control en teléfonos inteligentes.

Posteriormente, en [19] se describe un sensor táctil capacitivo como se observa en la figura 3b, los electrodos superiores se alienan perpendicularmente con los inferiores, por lo tanto, se forman 4 capacitores en la unidad de sensado. El sensor está conformado por un sustrato de tereftalato de polietileno (PET), electrodos de cobre (Cu) depositados por sputtering, y dieléctrico de PDMS. Los resultados mostrados en la literatura demuestran que esta estructura puede ser utilizada para posibles aplicaciones de prótesis robóticas.

Por último, en [20] se reporta un arreglo de sensores táctiles capacitivos utilizando dos grupos de microcanales de silicona, a los cuales se les agrega una aleación eutéctica de galio e indio (eGaln) y se encuentran posicionados perpendicularmente en planos separados del mismo sustrato de silicona, actuando como los electrodos superior e inferior del dispositivo. Dentro de los resultados que se reportan, se observa potencial para la aplicación de este tipo de arreglos en el área médica.

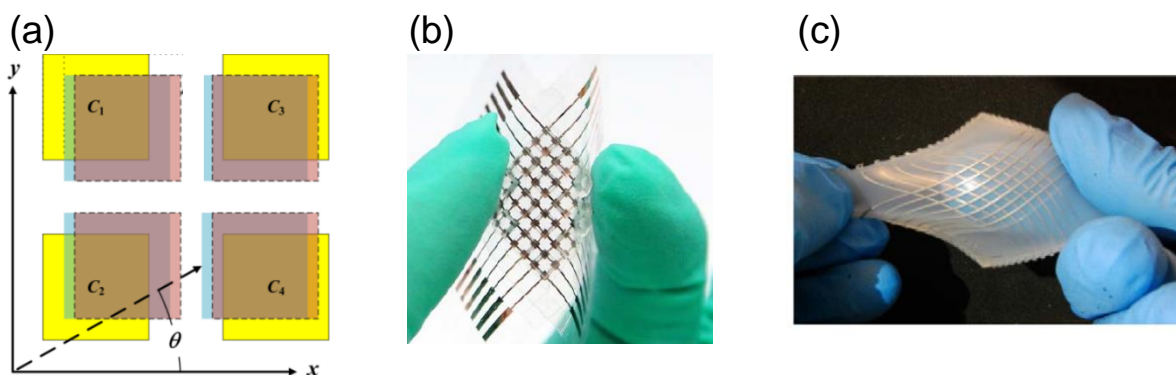


Figura 3 a) Diagrama esquemático de arreglo de sensores capacitivos táctiles [18], b) Arreglo de sensores descrito en [19] y c) Imagen de arreglo de sensores en dentro de una membrana de silicona [20].

I.4. APLICACIONES DE SENSORES CAPACITIVOS TÁCTILES

Como se ha mencionado anteriormente, los sensores táctiles capacitivos han obtenido especial atención debido a las aplicaciones para las cuales actualmente se utilizan, siendo algunas de ellas:

- a) Pantallas táctiles – Interfaces máquina – humano, en diversos tipos de dispositivos,
- b) Medicina – Específicamente, para cirugías mínimamente invasiva o remotas,
- c) Robótica / humanoide – Independencia robótica, manipuladores robóticos (Manos / dedos).

I.4.1. Pantallas Táctiles

Una pantalla táctil es un dispositivo que detecta la presencia y localización de un toque en un área determinada. Actualmente, debido a que se tienen interfaces de usuario bastante intuitivas, las pantallas táctiles son ampliamente utilizadas, no solo en sistemas computacionales en la industria, sino también en dispositivos de mano, como teléfonos móviles, relojes inteligentes, sistemas de navegación terrestre, entre otras.

Algunos ejemplos de las pantallas táctiles que integran sensores capacitivos son los teléfonos móviles inteligentes, los cuales poseen una capa de sensores que, combinados con el software necesario, logran obtener una respuesta más intuitiva en el dispositivo. En el caso de la marca Apple, le denominan a esta tecnología 3D Touch como se observa en la figura 4.



Figura 4 Capas utilizadas para habilitar “3D Touch” en iPhone 6S [21].

1.4.2. Medicina

En el área médica también son ampliamente utilizados los sensores capacitivos, como se menciona anteriormente, para cirugías de invasión mínima, cirugía remota, etc. Actualmente, se utilizan arreglos de sensores para la detección de cáncer de mama, como una alternativa a la mamografía u otros complejos sistemas.

Asimismo, se utilizan sistemas completos de cirugía de invasión mínima como el que se observa en la figura 5, los cuales también poseen arreglos de sensores capacitivos táctiles, que se encuentran en el carro del paciente, estos son en su mayoría instrumentos de sutura, fórceps, irrigadores de succión, entre otros [22].

También se utilizan estos sensores en la rama de la ortopedia, específicamente en el análisis de Gait o análisis de la marcha. La asimetría en la función del pie durante la marcha puede generar torsión y componentes de estrés no deseados que, con el tiempo, pueden desgastar algunos tejidos corporales, causando molestias y dolores.



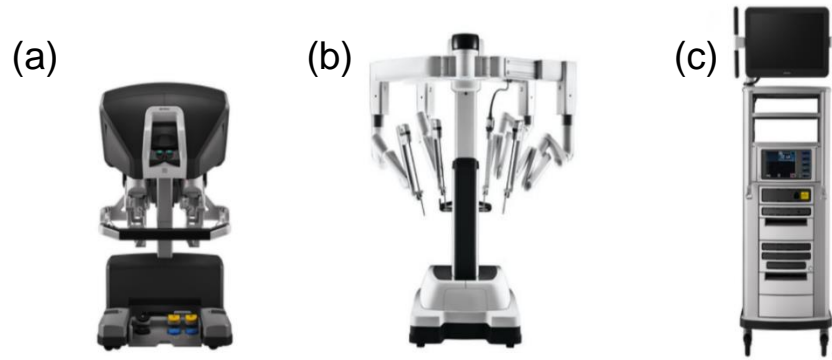


Figura 5 Da Vinci Surgical System a) Consola de cirugía b) Carro de paciente (posee los instrumentos necesarios para la cirugía), c) Carro de visión. Habilita la comunicación entre los anteriores y soporta un sistema de visión 3D-HD [22].

Uno de los sistemas más conocidos que utiliza sensores capacitivos para ortopedia son los F-Scan Systems (Figura 6), los cuales son capaces de proveer presión dinámica, fuerza e información en tiempo real acerca de la función del pie y el análisis de la marcha. La información que se obtiene de este sistema se utiliza en el diseño y prueba de aparatos ortopédicos, evaluar calzado y técnicas en atletas de alto rendimiento [23].

1.4.3. Robótica

La independencia de un robot en un entorno determinado se logra gracias a varios procedimientos de exploración (PE). En la literatura [18], se definen ocho tipos de PE, los cuales regulan la acción de exploración del robot y que son los fundamentos para obtener una rápida identificación. El propósito de la exploración táctil es obtener información sobre el ambiente y los objetos dentro del mismo.



Figura 6 Sensores capacitivos de presión TekScan, sistema F-Scan capaces de proveer información sobre la función del pie. Tomado de [23].

1.5. CONCLUSIONES

En este capítulo se presentó una breve introducción sobre los fundamentos de los sensores capacitivos. En este sentido, se discute a detalle el principio de operación y los tipos de sensores capacitivos y, por último, se señalaron algunas de las aplicaciones de los sensores capacitivos táctiles en distintas áreas de conocimiento / desarrollo.

CAPÍTULO II

SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE ADQUISICIÓN DE
DATOS PARA SENSORES CAPACITIVOS

2.1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, se busca que los sistemas electrónicos sean capaces de detectar y procesar información, con la ayuda de sensores y dispositivos de procesamiento de señales, tales como microcontroladores (μC) o microprocesadores (μP). Esto permite el desarrollo de sistemas capaces de interactuar o reconocer diversas variables del entorno, dotándolos de capacidades y toma de decisiones de acuerdo con la información obtenida de los sensores.

Sin embargo, a fin de poder hacer uso de la información de los dispositivos de sensado, es necesario que el sistema electrónico colecte las lecturas de los sensores a través del uso de los llamados sistemas de adquisición de datos.

Como se observa en la figura 7 se tienen en principio cuatro bloques funcionales para un circuito electrónico de adquisición de datos, sin embargo, gracias a los avances en la tecnología de alto rendimiento, actualmente es posible integrar varias etapas de la figura 7a en un solo dispositivo.

Por otra parte, los bloques de la figura 7a se pueden simplificar tal como en el caso de la figura 7b, en donde el sensor está conectado directamente al sistema digital sin la necesidad de un acondicionamiento de señal o un convertidor análogo – digital.

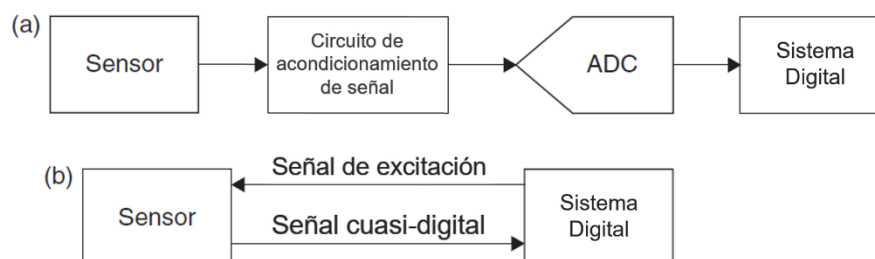


Figura 7 a) Diagrama de bloques de adquisición de datos de un sensor, b) circuito de interfaz directa [27].

En la topología de la figura 7b (circuito de interfaz directa), el sistema digital manda una señal al sensor, para que el mismo pueda obtener una señal ya digitalizada y posteriormente realizar las adecuaciones correspondientes al tipo de sensor. De esta manera, se requieren menos componentes y menor consumo energético.

Por lo tanto, algunas de las ventajas que poseen este tipo de circuitos pueden ser el disminuir costos, menor espacio físico y bajo consumo de potencia, lo cual se considera que es de mayor interés en sensores autónomos y en redes de sensores inalámbricos [26].

A continuación, se hace un breve análisis de cada los principales bloques funcionales de un sistema de interfaz, o sistema de adquisición de datos.

2.2. SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El procesamiento y la interpretación de la información que se obtiene del elemento de sensado son las tareas principales de un sistema de interfaz o de adquisición de datos, basados en microprocesadores o microcontroladores. Adquisición de datos es, de acuerdo con [28] medir y recolectar señales eléctricas del sensor y/o transductor y enviarlas a una computadora para su procesamiento; con la finalidad de presentar los resultados en una manera legible para el usuario final.

Una interfaz electrónica de sensado está dividida en cuatro bloques principales como se muestra en la figura 7a. El primer bloque contiene el elemento de sensado, la señal que se produce de dicho elemento usualmente lleva consigo una señal adjunta de ruido. Es por esta razón que se avanza al siguiente bloque, el acondicionamiento de la señal; en esta parte se procede a depurar la misma, para

obtener una nueva señal con mejores características para su posterior procesamiento.

De acuerdo con el tipo de señal que se obtenga después del acondicionamiento se puede proceder, o no, al tercer bloque funcional; el convertidor análogo/digital, en caso de requerir digitalizar la señal, para el procesamiento de los datos con algún μC o μP , éstos formando parte del último bloque funcional.

2.2.1. Elementos de Sensado

Los sensores son el primer bloque funcional del sistema de adquisición de datos; como se menciona en el capítulo 1, son los dispositivos diseñados para adquirir información de su entorno y transformarla en una señal útil. Anteriormente, éstos se clasificaron de acuerdo con el tipo de variable a sensar; sin embargo, Kirianaki et al. [29] propone clasificarlos en términos del tipo de señal eléctrica que se obtiene a la salida. De esta manera se tienen [30]:

Los **sensores analógicos**, como su nombre lo indica, entregan una señal cuya amplitud es modulada de acuerdo con la variable a sensar.

Los **sensores cuasi digitales** son aquellos que proveen una señal analógica o digital, con un parámetro relacionado con el dominio del tiempo; estos pueden ser: periodo, ciclo de trabajo, frecuencia, etc. Estos parámetros son modulados de acuerdo con la variable a sensar. Aunque la información que se obtenga esté en el dominio del tiempo, esta puede ser medida directamente por un sistema digital con la ayuda de un temporizador o contador.

Por último, los **sensores digitales** entregan una señal con una secuencia de niveles lógicos, los cuales serán modulados de acuerdo con la variable a sensar. Estas señales pueden ser el resultado de un sistema embebido.

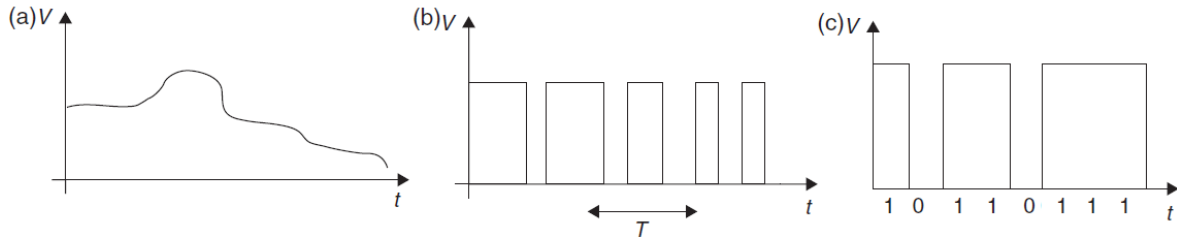


Figura 8 Señal de salida de a) sensor analógico, b) sensor cuasi digital, c) sensor digital. Modificado de [24].

2.2.1.1. Topologías de Elementos de Sensado Capacitivo

Existen diversas topologías de sensores capacitivos, dependiendo de la cantidad de elementos de sensado entre las que se encuentran las siguientes:

- Simple
- Simple con pérdida
- Diferencial
- Tipo puente

La **topología simple**, como se observa en la figura 9a, es en la cual únicamente se tiene un elemento de sensado cuya capacitancia (C_x) cambiará en función de la variable a sensar. Esta topología se puede modelar de la siguiente manera, de acuerdo con [30]:

$$C_x = C_0 + \Delta C = C_0(1 + X_C) \quad (2.1)$$

Donde C_0 es la capacitancia en un punto de referencia de la variable, ΔC es el cambio de capacitancia debido al elemento de sensado y X_C es el cambio relativo de capacitancia ($X_C = \frac{\Delta C}{C_0}$) debido al mismo elemento.

La **topología simple con pérdida** es aquella en la que se tiene una conductancia parásita G_x en paralelo con C_x . El valor de G_x usualmente no es constante y depende de la variable y factores ambientales [30].

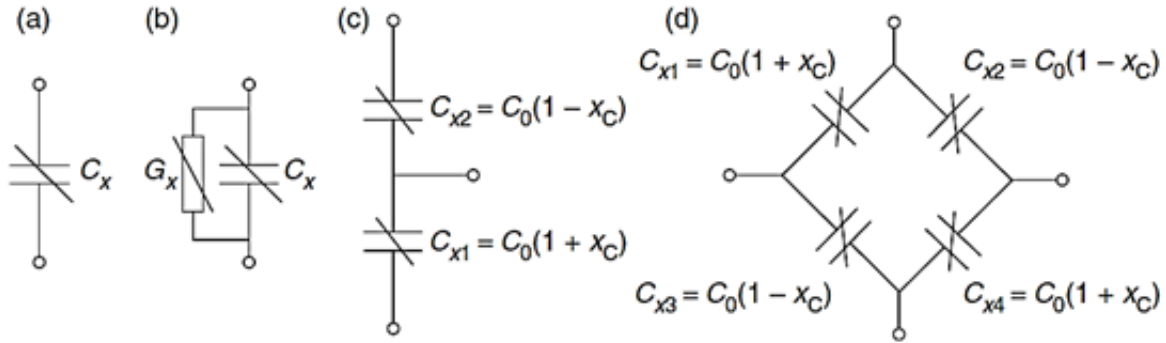


Figura 9 Topologías de sensores capacitivos: a) simple, b) simple con pérdida, c) diferencial y d) tipo puente [30].

La **topología diferencial** es aquella en la cual se tienen dos elementos de sensado (C_{x1} , C_{x2}) los cuales comparten un electrodo y experimentan cambios opuestos. Normalmente, X_C se considera igual, pero de signo contrario para C_{x1} y C_{x2} , por lo que puede modelarse con la siguiente ecuación:

$$C_{x1} = C_0(1 + X_C), C_{x2} = C_0(1 - X_C) \quad (2.2)$$

Finalmente, los elementos de sensado también pueden interconectarse mediante la **topología tipo puente**, como se observa en la figura 9d. En este caso, se tienen cuatro elementos de sensado que experimentan el mismo cambio relativo en capacitancia (X_C), pero con signos contrarios, es decir:

$$C_{x1} = C_{x4} = C_0(1 + X_C), C_{x2} = C_{x3} = C_0(1 - X_C) \quad (2.3)$$

2.2.2. Acondicionamiento de Señal

Dependiendo del tipo de señal que se obtiene a la salida del sensor se podría, o no, necesitar acondicionar la señal, es decir, la optimización de esta, para la medición precisa y eficaz en la última etapa. Además, los acondicionadores de señal ubicados más cerca de la fuente o del transductor, tienden a mejorar la relación señal a ruido (S/N), antes que la señal se vea afectada por el ruido ambiental.

Existen diversos métodos de acondicionamiento de señales, sin embargo, los principales son [31]:

La etapa de **amplificación**, la cual se utiliza para incrementar la amplitud de la señal, para lograr una mejor adaptación al rango del convertidor análogo/digital (ADC), a manera de poder incrementar la sensibilidad y resolución de esta.

A menudo se utiliza una etapa de **filtrado** con la finalidad de bloquear el ruido proveniente de la red eléctrica (entre 50/60 Hz). Otro uso común es evitar la superposición de las señales de alta frecuencia, de tal manera que se vuelvan indistinguibles en la etapa de digitalización.

La etapa de **linealización** es necesaria cuando los sensores producen señales que no están linealmente relacionadas con las medidas físicas. Este proceso consiste en la interpretación de la señal proveniente del sensor, puede implementarse físicamente o por software.

2.2.3. Conversión Analógico/Digital

Como su nombre lo indica, es la etapa que se encarga de digitalizar las señales analógicas que se obtienen de la sección de acondicionamiento de la señal. Estos sistemas son de suma importancia cuando se busca lograr una comunicación entre un sistema digital y una señal continua.

2.2.4. Sistema Digital

El sistema digital es el último paso para el procesamiento de la señal obtenida, en este punto se pueden utilizar diversos tipos de procesadores, los más utilizados son los microcontroladores. Estos dispositivos son los encargados de adquirir la señal digitalizada y procesarla de acuerdo con las necesidades del usuario, mediante el uso de la programación de alto o bajo nivel.

En general, los microcontroladores están compuestos por 3 bloques, dentro del mismo circuito integrado, IC, estos son [26]:

La **unidad de procesamiento central**, CPU, la cual es el cerebro del μC , y es la encargada de ejecutar las instrucciones para realizar una tarea específica. La **memoria interna**, la cual tiene como función guardar las instrucciones a ejecutar, y los datos para procesamiento. Por último, los **periféricos**, que son los recursos de hardware que permiten la interacción del CI con el mundo exterior. Algunos de los más comunes en dispositivos comerciales son:

- Puertos de entrada/salida
- Temporizadores/contadores
- Puertos de comunicación serial, p.e.: I2C, SPI
- Convertidor analógico/digital

Actualmente, existen diversos dispositivos comerciales, además de los microcontroladores que ya conocemos, que nos permiten realizar tareas específicas, entre ellos se encuentran dos de las tarjetas de mayor popularidad en la actualidad:

- Tarjeta Arduino
- Raspberry Pi

Arduino es una conocida plataforma de creación de prototipos de electrónica de código abierto, que es una unidad de control central de muchas aplicaciones de control integradas [32]. Este dispositivo posee las mismas características ya mencionadas, y es posible conectarlo a una computadora vía USB, con la ayuda de Arduino IDE, la cual es su plataforma de programación.

Mientras que la **Raspberry Pi** es una computadora del tamaño de una tarjeta de crédito con todas las funciones que es capaz de ejecutar una computadora estándar. La memoria interna puede ser de hasta 8GB, dependiendo del modelo, asimismo, tiene la capacidad de hasta 32 GB de memoria externa.

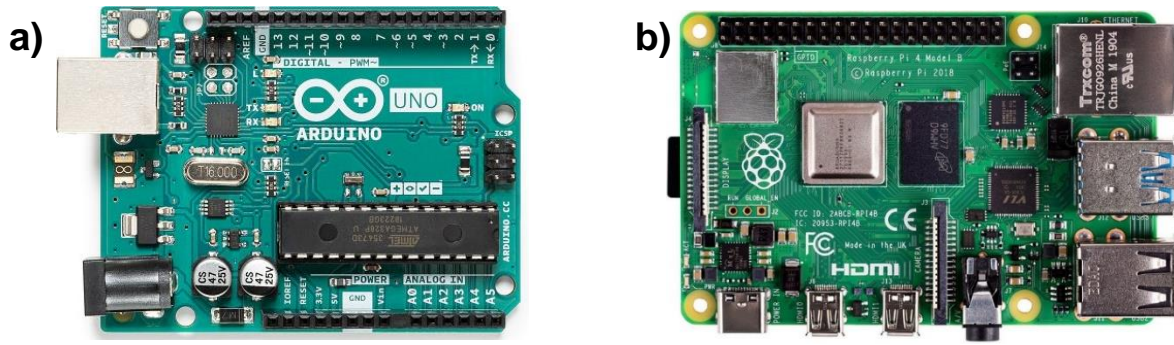


Figura 10 a) Tarjeta Arduino UNO, b) Tarjeta Raspberry Pi. [36, 37]

Aunque inicialmente se desarrolló para aumentar el interés en la programación y la ingeniería de software, pronto se aceptó como una unidad de control programable universal para muchas máquinas y aplicaciones M2M. Se han adaptado varios sistemas operativos a Raspberry Pi, una versión optimizada de Debian Linux conocida como Raspbian es probablemente la más popular [32].

A diferencia de la tarjeta Arduino, la Raspberry Pi, puede programarse en diferentes lenguajes de alto nivel, como C, C++ o Python, este último siendo el más popular. Otra diferencia significativa es la falta de entradas analógicas en la Raspberry Pi, en comparación con Arduino.

2.3. SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE READOUT

Debido a que los sensores capacitivos se han vuelto populares en las últimas décadas, también se ha incrementado el interés en los circuitos de lectura o readout para dichos sensores. En la literatura se encuentran numerosas técnicas para la implementación de estos circuitos [38]. Estos circuitos se pueden clasificar en análogos y semidigitales de acuerdo con la señal que se obtiene de los mismos a la salida [39]. Entre ellos se encuentran los siguientes: convertidores capacitancia a

voltaje, convertidores capacitancia a frecuencia, convertidores capacitancia a ciclo de trabajo, convertidores capacitancia a tiempo, etc.

2.3.1. Convertidores Analógicos

Los circuitos de readout de alto rendimiento para sensores capacitivos más recientes se basan en el uso de convertidores análogo/digital con modulación $\Sigma\Delta$. Sin embargo, la principal desventaja de este tipo de implementaciones es que se trata de una técnica de sobremuestreo, en la cual el ancho de banda se encuentra por debajo de los 100 Hz.

Entonces, al incrementar la velocidad del reloj y el orden del filtro en el modulador $\Sigma\Delta$, se puede obtener un ancho de banda más amplio para la medición; sin embargo, esto produce mayor consumo de potencia y complejidad en el circuito. Por lo tanto, una de las estrategias para reducir lo anterior consiste en implementar un convertidor de capacitancia a voltaje, seguido de un convertidor análogo digital [40].

2.3.1.1. Convertidores Capacitancia a Voltaje

Los convertidores de capacitancia a voltaje (CVC, por sus siglas en inglés) constan de un circuito simétrico, por lo que se rechazan las interferencias no deseadas [41]. El CVC está diseñado para funcionar con sensores capacitivos diferenciales y se componen de tres bloques funcionales generales [42]:

- 1) Amplificador de transferencia de carga con un modulador de amplitud: Este consiste en un circuito que procesa la diferencia de carga entre los dispositivos de sensado. Este bloque traduce el cambio de capacitancia en un cambio de voltaje al transferir la carga de los capacitores de detección al capacitor integrador, con este se genera una señal de salida modulada en amplitud, donde la amplitud es proporcional a la diferencia de capacitancia.

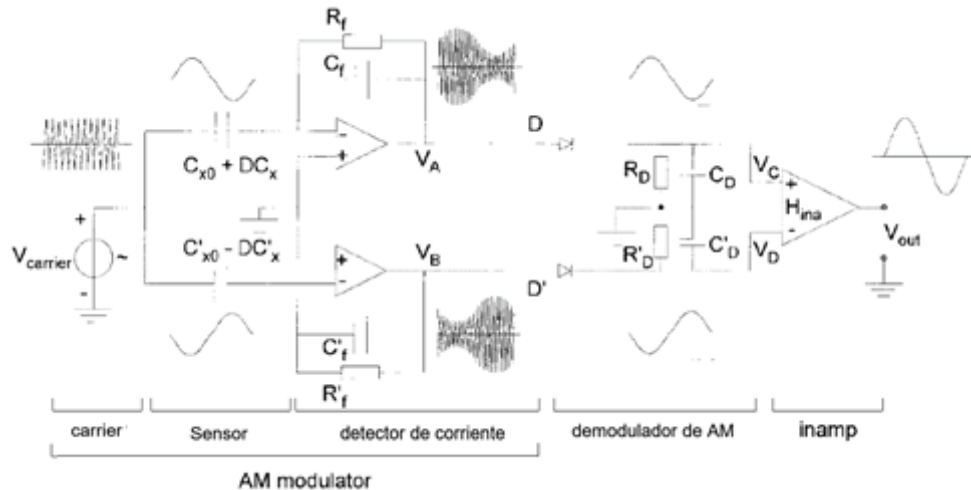


Figura 11 Diseño básico de un circuito de convertidor Capacitancia a Voltaje ideal [41].

- 2) Etapa de ganancia compensada por desfase: Debido a que las variaciones en los capacitores de detección son muy pequeñas, las cargas que se transfieren al capacitor integrador también lo son. Por lo tanto, con la finalidad de incrementar la sensibilidad del circuito de readout es necesario amplificar la señal de entrada con una etapa de ganancia.
- 3) Circuito de muestreo y retención con demodulador de amplitud: Por último, en este bloque funcional se utilizan dos circuitos de muestreo y retención para demodular la señal obtenida del bloque anterior y se produzcan dos señales senoidales desfasadas 180° . Cabe mencionar que en este tipo de convertidores el uso de amplificadores operacionales es esencial en todas las etapas.

2.3.2. Convertidores Semidigitales

Este tipo de circuitos de lectura representan valores analógicos utilizando señales digitales. Esto se logra codificando la información en el dominio del tiempo

o frecuencia, a diferencia de los convertidores analógicos que se utilizan en el dominio de la corriente o voltaje.

Gracias a este tipo de implementaciones es posible eliminar el convertidor análogo / digital y con ello se reduce el consumo de potencia durante la operación del circuito, significativamente. En contraste con los circuitos de lectura analógicos, el rango dinámico en las lecturas semidigitales no está limitado por el voltaje o la corriente de alimentación. Además, la salida que se obtiene es menos susceptible frente al ruido ambiental debido a su naturaleza digital de dos niveles [42].

Los circuitos de lectura semidigitales se pueden clasificar de acuerdo con el dominio que utilicen para la conversión de la señal analógica, es decir, modulación de frecuencia o modulación de tiempo [43].

2.3.2.1. Convertidores Capacitancia a Frecuencia

Los convertidores de capacitancia a frecuencia (CFC) ofrecen una ventaja sobre el tipo anterior debido a que estos producen una señal digital directamente, y no es necesario agregar una etapa extra de conversión análogo/digital, esto implica entonces, la disminución en el costo del hardware [44].

Las operaciones necesarias para este tipo de circuitos se pueden realizar con componentes puntuales, debido a que este solo convierte la diferencia entre dos

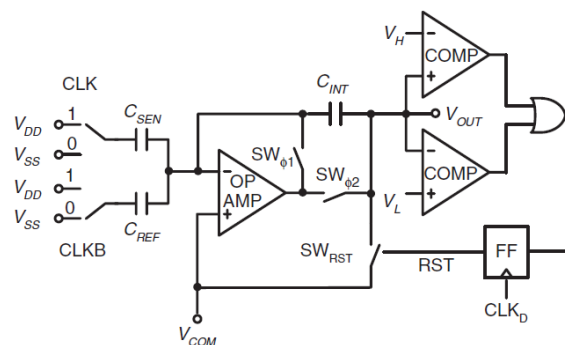


Figura 12 Diagrama esquemático de un circuito convertidor de Capacitancia a Frecuencia [39].

capacitancias en frecuencia, sin medir sus valores completos. Este tipo de circuitos también son capaces de detectar cambios pequeños en la capacitancia diferencial.

Por otro lado, también existen las soluciones basadas en la modulación de ancho de pulso, (PWM) estos son circuitos síncronos que necesitan una señal de reloj para sincronizar la operación de interfaz, mientras que su tiempo de medición y respuesta son típicamente independientes de la capacitancia del sensor.

Este tipo de soluciones de interfaz suelen mostrar arquitecturas sencillas con una alta tolerancia al ruido y/o perturbaciones ambientales y a los componentes parásitos, así como para suministrar variaciones de voltaje; permiten cubrir amplios rangos de variación capacitiva y también se pueden combinar con un sistema digital para poder medir fácilmente los intervalos de tiempo. [42].

2.3.2.2. Convertidores Capacitancia a Tiempo

Por último, se encuentran los convertidores de capacitancia a tiempo, este tipo de circuitos se basan en la comparación del periodo de pulso de dos osciladores de relajación, uno de ellos para utilizarse en conjunto con el sensor capacitivo. El sensor capacitivo se utiliza para proveer una constante de tiempo al mismo oscilador.

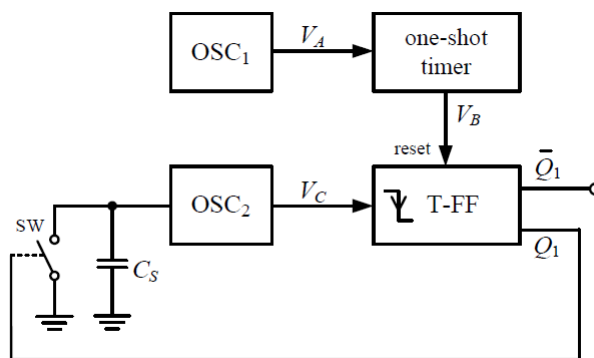


Figura 13 Diagrama de bloque del convertidor de Capacitancia a Tiempo [45].

Entonces, el periodo del pulso de salida será proporcional a la variación de la capacitancia del sensor. Otro oscilador de relajación se asigna al pulso de referencia. Como resultado, la capacitancia medida es la relación que existe entre pulso de referencia y el pulso de detección. Si la capacitancia es fija y es asignada para igualar a la capacitancia del oscilador de referencia, entonces, el ancho de pulso será dependiente de la resistencia en el oscilador [45].

2.4. CIRCUITOS DE INTERFAZ DIRECTA

Ya se han analizado los cuatro bloques principales de un sistema de adquisición de datos. Ahora, se presentan los circuitos de interfaz directa, como se observa en la figura 9b.

En principio, existen dos métodos de medición con este tipo de circuitos:

Interfaz directa basada en un circuito RC [27,33], en el cual el sistema digital mide el intervalo de tiempo de carga o descarga de una capacitancia C_x a través de una resistencia R . **Interfaz directa basada en el cambio de transferencia de carga** [34,35], con este método el sistema digital hace un conteo de los ciclos necesarios para cargar completamente un capacitor de referencia C_r a un voltaje determinado, a través de un sensor capacitivo.

El enfoque del presente trabajo está en un **sistema de medición** que comprende un **sistema de adquisición de datos** basado en un **circuito RC de topología simple** con una **interfaz de lectura**, un **circuito oscilador**. Esto con la finalidad de obtener una **señal cuasi digital** y poder transferirla al sistema de procesamiento, en este caso, la **Raspberry Pi**.

Para un circuito con las características que se mencionan, es posible conectar directamente la salida del oscilador, a los pines de I/O de la Raspberry Pi.

Ya se han mencionado algunas de las ventajas que tienen este tipo de circuitos, entre ellas se encuentran: la simplicidad del circuito, menor consumo de potencia, mayor sensibilidad dependiendo del tipo de sistema que se utiliza, entre otras. Es por ello, que se opta por trabajar con este tipo de circuitos.

Para terminar, no es necesario realizar mayores adecuaciones al diseño del sistema, entonces el procesamiento de los datos obtenidos se realiza con un programa realizado específicamente para esta aplicación.

2.5. CONCLUSIONES

En este capítulo se revisaron los distintos sistemas de adquisición de datos. Se abordaron los bloques funcionales de cada uno de ellos. Se describen los distintos tipos de señales que se pueden procesar, así como las topologías de los elementos de sensado. También se mencionan algunas técnicas de acondicionamiento de señales, los sistemas digitales más utilizados actualmente para este tipo de sistemas. Posteriormente, revisan y analizan algunas de las técnicas actuales de lectura de datos para sensores capacitivos. Y, por último, se revisan los circuitos de interfaz directa, los cuales son de mayor interés para este trabajo debido a que son sistemas que no necesitan mayores bloques funcionales para su correcto funcionamiento.

CAPÍTULO III

DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE
MEDICIÓN

3.1. INTRODUCCIÓN

En el *capítulo I*, se abordaron los fundamentos de los sensores, en especial, los sensores capacitivos, así como su principio de funcionamiento, sus modos de operación, las diferentes topologías, y algunas aplicaciones prácticas.

Posteriormente, en el *capítulo II*, se estudiaron las etapas principales en un sistema de adquisición de datos, se habló sobre los circuitos de interfaz que existen en la actualidad para la detección y adquisición de los datos obtenidos de sensores capacitivos, principalmente; y para concluir con los circuitos de interfaz directa, es decir, aquellos que no requieren bloques extra para su funcionamiento.

En el presente capítulo se abordará el desarrollo e implementación del sistema de medición con las características que se mencionan en el capítulo anterior. Se describen las diferentes etapas de dicho sistema, así como la fabricación de dispositivos capacitivos a fin de verificar la implementación del sistema de medición.

3.2. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

3.2.1. Teoría del circuito oscilador

La base del sistema de medición desarrollado es la implementación de un circuito oscilador astable con un TLC555. El oscilador fue diseñado con frecuencia base de 6.66 KHz, y se conectó el dispositivo a medir (DUT: Device-Under-Test), en paralelo con el capacitor de referencia, C_{REF} , cuyo valor nominal se ajustó a 100 pF. El diagrama del circuito se muestra en la figura 14.

El diodo D_1 , se conecta en paralelo con la resistencia R_B , a fin de permitir que, durante el ciclo de carga, T_1 , el capacitor C_{REF} se cargue directamente de R_A , removiendo a R_B del ciclo.

Posteriormente, durante el ciclo de descarga, T_2 , D_1 se polariza inversamente, de forma que C_{REF} será descargado a través de R_B . De esta forma, si se considera que $R_A = R_B$, el circuito tendrá un ciclo útil cercano a 50%.

Por lo tanto, los tiempos de carga y descarga de C_{REF} quedan definidos por:

$$T_1 = (R_A C) 0.8 V_{DD} \quad (3.1)$$

$$T_2 = (R_B C) 0.7 V_{DD} \quad (3.2)$$

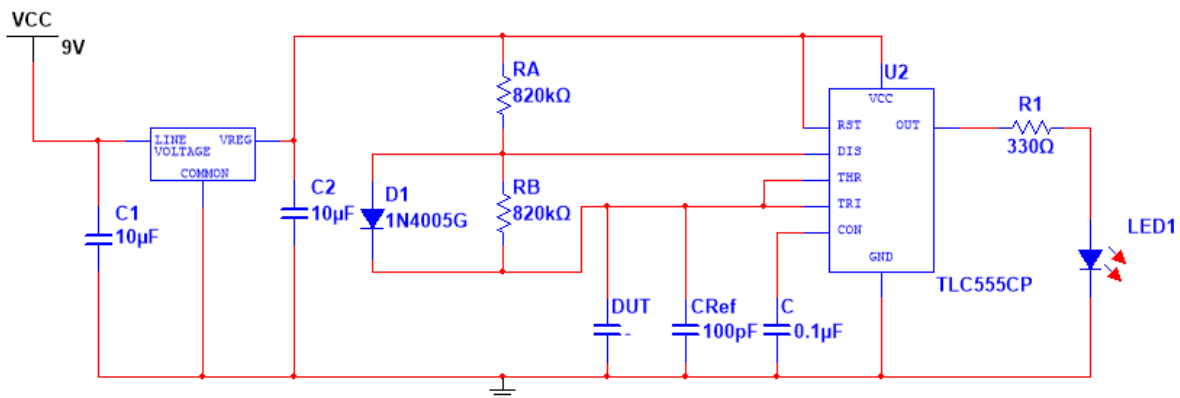


Figura 14 Diagrama esquemático del circuito oscilador en Multisim de NI.

A continuación, se describe brevemente la implementación física del circuito utilizado para este proyecto de tesis.

3.2.2. Implementación física del circuito oscilador

Se realizó la implementación de un circuito oscilador con los siguientes componentes, como se observa en la figura 14:

- TLC555CP
- Resistencias: 2 × 820 K Ω , 330 Ω
- Diodos: 1N4005, LED
- Capacitores: 2 × 10 μ F, 0.1 μ F, 100 pF
- Regulador de voltaje a 3.3 V
- Fuente de alimentación de 9 V

La implementación del circuito se realizó en una baquelita con cobre de 5 × 4 cm aproximadamente, como se observa en la figura 15. El diseño del PCB fue el siguiente:

- Ancho de pista de 0.8 mm
- Diámetro de círculos 1 mm
- Espesor de cobre 0.35 mm

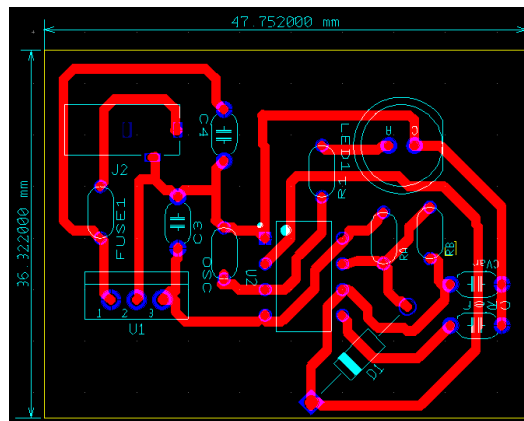


Figura 15 Diseño final del circuito impreso en Ultiboard de NI.

Posteriormente, se realizaron las pruebas pertinentes para asegurar el correcto funcionamiento del circuito.

3.2.3. Sistema de adquisición de datos

La implementación del sistema de medición fue realizada en conjunto con un minicomputador Raspberry Pi 4 Modelo B, con la finalidad de tener un sistema completo de bajo consumo y portable. El programa para la adquisición y manipulación de los datos se realizó en lenguaje Python, debido a que es el más compatible con la Raspberry Pi.

En este programa se definen dos tipos de contadores: **ciclos** (bucle interno), los cuales están definidos por cada cambio de flanco a positivo, es decir un periodo de onda completo. Y las **repeticiones** (bucle externo), estas son la cantidad de veces que se realiza cada ciclo. Cabe mencionar que la cantidad de ciclos y repeticiones es variable de acuerdo con las necesidades del usuario.

El programa se desarrolla de la siguiente manera:

(1) Se inicializa el programa y las variables necesarias (ver figura 16), (2) se crean los archivos de frecuencia y tiempo, y (3) se procede al contador de repeticiones. (4) Se espera por un cambio de flanco a positivo y se toma el tiempo de inicio. (5) Se encuentra el contador de ciclos, se espera por un cambio de flanco a positivo y retorna al mismo siempre y cuando la cantidad de ciclos sea menor a la definida por el usuario; de lo contrario (6) sale del bucle, a continuar con el externo.

(7) Se toma nuevamente el tiempo y la diferencia que existe entre el tiempo final y el de inicio se toma como el tiempo transcurrido de 1 bucle interno. (8) Se calcula la frecuencia con la cantidad de ciclos entre el tiempo de 1 bucle interno. (9) Se reinicia el conteo de ciclos. (10) Se suman a SF (suma de frecuencias) y ST (suma de tiempos) los valores respectivos de frecuencia y tiempo obtenidos. (11) Se anexan los valores de frecuencia y tiempo que se obtuvieron y se repite todo el

proceso nuevamente, siempre y cuando el valor de repeticiones sea menor al de aquel definido por el usuario. De lo contrario, (12) Se termina el bucle externo. (13) Se calculan los valores promedio de frecuencia y tiempo con SF y ST entre el número de repeticiones, respectivamente. (14) Se muestran en pantalla los valores promedio de frecuencia y tiempo. (15) Se cierran los archivos de frecuencia y tiempo. (16) finaliza el programa.

Una de las razones para realizar el programa de esta manera fue la necesidad de tener el mayor control posible sobre el periodo de la señal de entrada, para tener un margen de error mínimo.

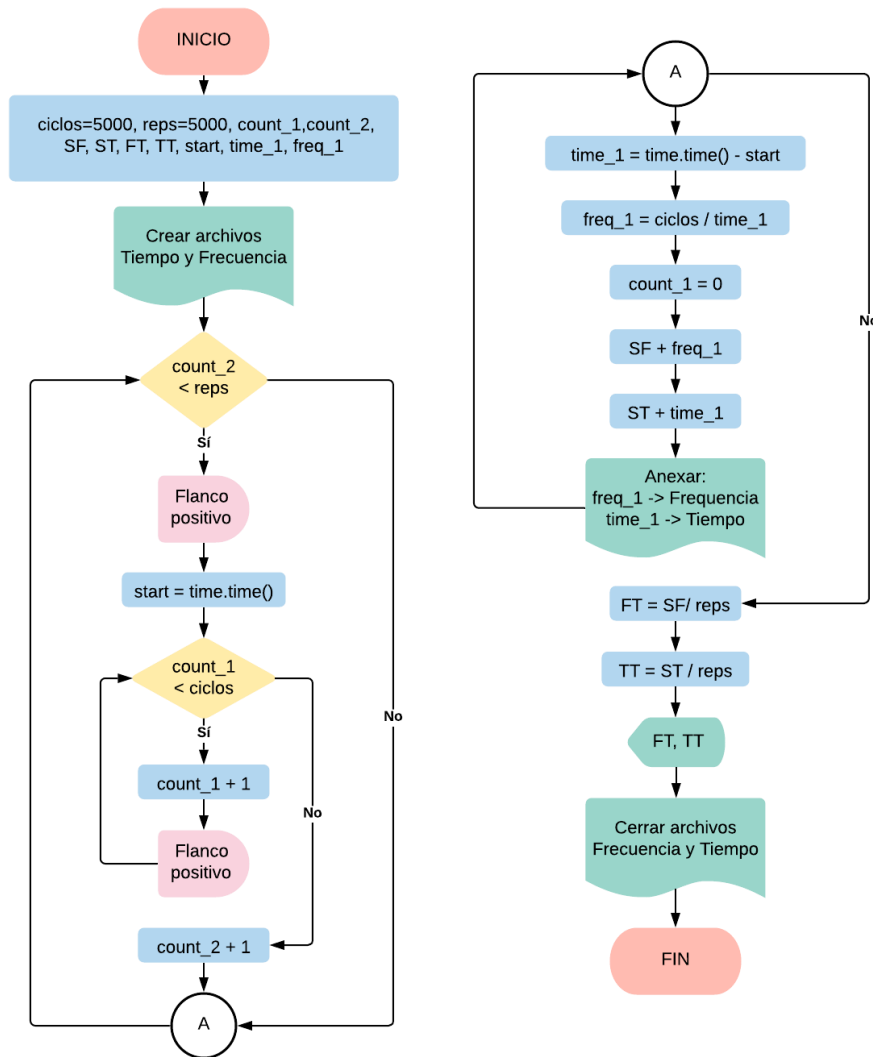


Figura 16 Diagrama de bloques del programa implementado para el presente trabajo de tesis.

A continuación, se presenta el código del programa realizado.

```

import RPi.GPIO as GPIO
import os
import time

GPIO.setmode(GPIO.BCM) #Modo BCM de enumeración de los pines
GPIO.setup(17, GPIO.IN) #Se toma como pin de entrada el pin 17 en BCM

count_1 = 0 #Contador de pulsos interno
count_2 = 0 #Contador de pulsos externo
ciclos = *variable* #Numero de ciclos internos a contar
reps = *variable* #Numero de repeticiones a contar
SF = 0 #Suma frecuencia
ST = 0 #Suma tiempo
FT = 0 #Frecuencia promedio
TT = 0 #Tiempo promedio

frecuencia = open("Ubicación_y_Nombre_del_Archivo_F.txt","w") #Crea
Archivo de frecuencia
tiempo = open("Ubicación_y_Nombre_del_Archivo_T.txt","w") #Crea Archivo
de tiempo

while count_2 < reps:
    GPIO.wait_for_edge(17, GPIO.RISING) #Espera por cambio de flanco
positivo
    start = time.time() #toma tiempo de inicio
    while count_1 < ciclos:
        count_1 = count_1 + 1 #
        GPIO.wait_for_edge(17, GPIO.RISING) #
        count_2 = count_2 + 1
        time_1 = time.time() - start #Tiempo transcurrido del ciclo en
Segundos
        freq_1 = ciclos / time_1 #Frecuencia del ciclo en Hertz
        count_1 = 0 #Se reinicia el conteo
        SF = SF + freq_1 #Se suman los valores de frecuencia
        ST = ST + time_1 #Se suman los valores de tiempo
        time_1 = str(round(time_1,2)) #Redondea el valor a 2 decimales
        freq_1 = str(round(freq_1,2)) #Redondea el valor a 2 decimales
        frecuencia.write(freq_1 + os.linesep) #Anexa freq_1 en archivo
        tiempo.write(time_1 + os.linesep) #Anexa time_1 en archivo
    FT = SF / reps #Calculo de frecuencia promedio
    TT = ST / reps #Calculo de tiempo promedio
    print("F. Promedio={:.2f} , T. Promedio={:.6f}".format(FT,TT))
    frecuencia.close()
    tiempo.close()

```

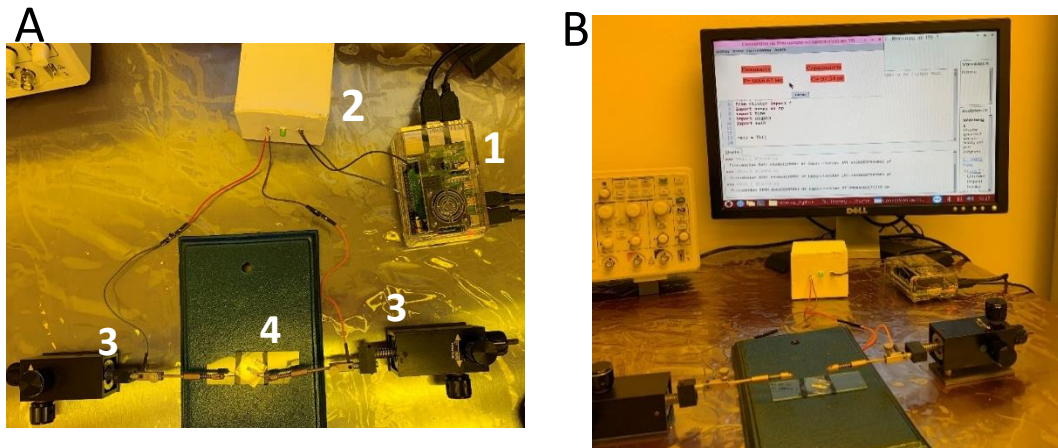



Figura 17 A) Vista superior del sistema de adquisición de medición, 1) Raspberry Pi 4, 2) Circuito oscilador, 3) Puntas de Prueba, 4) Estructura capacitiva. B) Vista frontal del sistema con medición en pantalla.

En la figura 17 se observa el sistema de medición que se implementó para este trabajo, se observan los elementos principales: La estructura capacitiva, las puntas de prueba, el circuito oscilador, y la unidad de adquisición de datos.

3.3. ESTRUCTURAS CAPACITIVAS

El sistema de medición fue validado mediante la calibración y medición utilizando capacitores discretos comerciales. Posteriormente, se utilizaron capacitores flexibles desarrollados en el Laboratorio de Microfabricación y Diseño de Dispositivos Avanzados (LaMDDA) del Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología. Se fabricaron 6 estructuras capacitivas como se muestra en las figuras 18a y 18b.

El dieléctrico utilizado fue una capa de polidimetil siloxano (PDMS) depositado por el método de centrifugado (spin coating) con los parámetros que se muestran en la tabla 1. Durante el proceso de centrifugado la muestra M₅ se

desprendió de la base del equipo, por lo que se descarta dicha muestra, quedando únicamente M₁, M₂, M₃, M₄, M₆ y M₇.

Tabla 1 Tiempo de procesamiento para muestras M1-M7

Muestra	Velocidad (RPM)	Aceleración (RPM / s)	Tiempo de depósito (s)	Temperatura Recocido (°C)	Tiempo Recocido (min)
M ₁	5000	800	10	70	120
M ₂	5000	800	20	70	120
M ₃	5000	800	30	70	120
M ₄	5000	800	40	70	120
M₅	5000	800	50	70	120
M ₆	5000	800	60	70	120
M ₇	5000	800	70	70	120

Debido a los tiempos de depósito del dieléctrico cada una de las muestras tiene un espesor distinto, lo cual resulta en un cambio en su capacitancia. Finalmente, el electrodo superior se depositó para le técnica de estampado seguido de un paso de calentamiento en parrilla a 120°C, durante 2 horas. La figura 18 muestra una estructura fabricada.

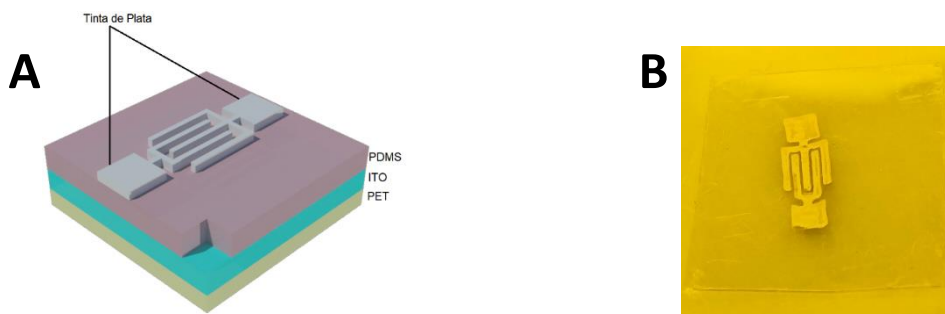


Figura 18 a) Esquema de las estructuras obtenidas en el laboratorio LaMDDA – Microna, UV, b) estructura M₄ terminada.

3.4. CONCLUSIONES

El desarrollo experimental presentado en este proyecto de tesis tuvo la finalidad de realizar el diseño e implementación física de un sistema de medición de capacitancia. Posteriormente, se fabricaron estructuras capacitivas flexibles para la evaluación del sistema. Cabe mencionar que todos los procesos de fabricación se realizaron en el Laboratorio LaMDDA del Centro MICRONA de la Universidad Veracruzana, siendo estos métodos de bajo costo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos de diferentes pruebas realizadas a fin de verificar la función del sistema de medición desarrollado.

Se realizaron mediciones sucesivas considerando 100; 500; 1,000 y 5,000 repeticiones. El sistema de medición se ajustó a una lectura, utilizando el promedio de 1,000; 5,000; 50,000 y 100,000 ciclos, a fin de determinar la frecuencia de oscilación.

Posteriormente, se realizó una etapa de calibración del sistema mediante la medición de capacitores discretos comerciales. Finalmente, se verificó la operación del sistema de medición desarrollado mediante el uso de los dispositivos experimentales fabricados y se comparó con la medición utilizando métodos convencionales.

4.2. PRUEBAS DE DETERMINACIÓN

Se propuso realizar un conjunto de pruebas de repetibilidad para determinar la confiabilidad del circuito, considerando la frecuencia de oscilación del sistema sin DUT, por lo que se tiene una frecuencia de 6,660Hz.

Se realizó el análisis estadístico del conjunto de mediciones, por lo que se tomaron en cuenta los siguientes cuatro parámetros:

1. Valor promedio
2. Desviación estándar
3. Tiempo de cálculo
4. Distribución de probabilidad

4.2.1. Valor Promedio

A continuación, se muestran los valores promedio medidos, considerando las diferentes condiciones de medición.

Tabla 2 Condensado de los valores promedio de frecuencia base (Hz) obtenidos con el programa desarrollado.

Ciclos Repeticiones	1000	5000	50000	100000
100	6,610	6,727	6,607	6,554
500	6,646	6,725	6,550	6,555
1000	6,634	6,719	6,598	6,572
5000	6,693	6,626	6,548	6,618

En la tabla 2 se observan resultados óptimos en la columna “1,000”, así mismo, se tienen resultados favorables con las combinaciones 5,000/5,000 y 5,000/100,000. Sin embargo, en este punto se pueden descartar los valores cuyo valor es aproximadamente ± 100 Hz sobre el promedio, con la finalidad de tener los valores más cercanos a la frecuencia base. Posteriormente, se realizó el análisis estadístico correspondiente a cada uno de los paquetes de datos obtenidos a manera de obtener un panorama más amplio acerca de las pruebas realizadas.

4.2.2. Desviación Estándar

A continuación, se muestran los valores de desviación estándar que se obtuvieron del análisis estadístico realizado. Como puede observarse, cuando el sistema de medición utiliza el promedio de 1000 ciclos para determinar la frecuencia de oscilación, la desviación estándar se incrementa de manera significativa. Esto es

indicación de que el uso de un número relativamente pequeño de ciclos produce un error más significativo en la medición de la frecuencia. En este punto se descartan aquellos valores de desviación estándar que tengan valores mayores a 1%.

Tabla 3 Condensado de los valores de desviación estándar obtenido de los análisis estadísticos realizados a cada ejecución.

Ciclos Repeticiones	1000	5000	50000	100000
100	1.43%	0.52%	0.55%	0.32%
500	1.14%	0.63%	0.46%	0.46%
1000	0.95%	0.69%	0.70%	0.73%
5000	1.08%	0.93%	1.12%	1.28%

4.2.3. Tiempo de Cálculo

En este apartado se toma el tiempo de cálculo como el tiempo total que le tomó al programa realizar todas las operaciones en una condición determinada, para lo cual se tiene nuevamente un condensado de los datos obtenidos.

Tabla 4 Valores de tiempo de cálculo en segundos, obtenidos con el programa implementado.

Ciclos Repeticiones	1000	5000	50000	100000
100	15.04	74.29	756.84	1,525.77
500	75.1	371.75	3,816.47	7,627.43
1000	150.09	743.97	7,577.71	15,215.64
5000	750.6	3,774.08	38,181.18	75,557.82

De la tabla 4 se puede observar que a medida que se incrementan los ciclos, en cada repetición, se tiene un aumento exponencial en los tiempos de cálculo. Este factor es importante, ya que para que el sistema sea práctico y poder tener la posibilidad de medir sin dañar estructuras experimentales, sería necesario que el tiempo de muestreo no fuera muy alto.

Por lo tanto, las combinaciones con tiempos mayores a 4,000 segundos (aprox. 1:07 h) serían descartadas. Con esta información es posible, comenzar a tener un panorama un poco más claro, para poder continuar al último parámetro de determinación, la distribución de probabilidad.

4.2.4. Distribución de Probabilidad

Con este último parámetro es posible determinar cuáles combinaciones son las más viables, de acuerdo con las curvas de distribución que se presentan a continuación. A continuación, se presentan todas las series de gráficas agrupadas de acuerdo con el número de repeticiones (100; 500; 1,000; 5,000); de esta manera será posible tener un panorama completo de la confiabilidad del sistema de medición.

4.2.4.1. Serie 100 repeticiones

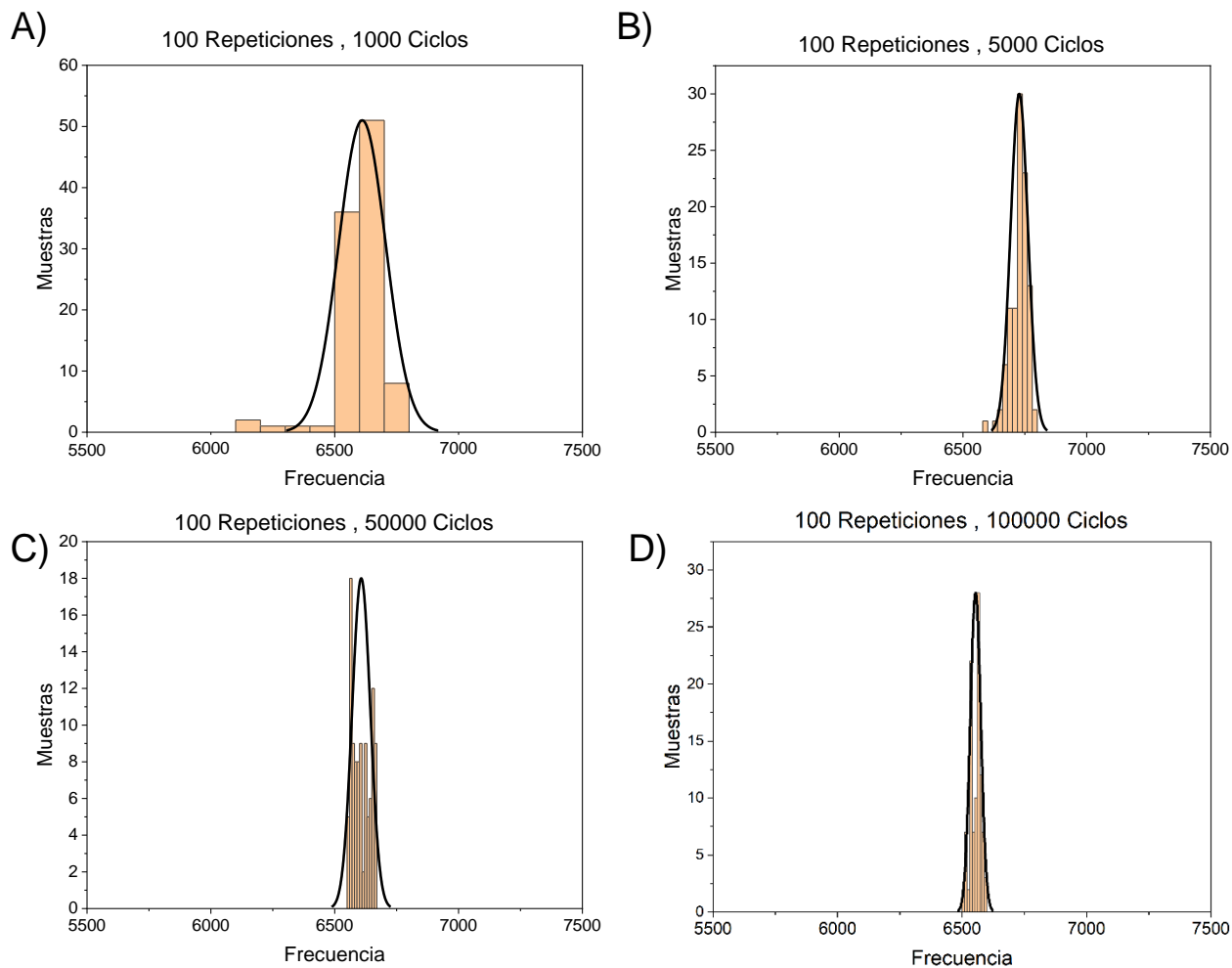


Figura 19 Histogramas de frecuencia y distribución normal de la serie de 100 Repeticiones.

En la figura 19 se muestran los histogramas de frecuencia con su respectiva distribución normal, con la combinación de 100 repeticiones y los diferentes ciclos considerados. Se observa por simple inspección que a medida que aumentan los ciclos el histograma se va acotando entre 6,500 y 6,750 Hz.

Sin embargo, la probabilidad de ocurrencia se inclina hacia los extremos de la curva en las figuras 19c y 19d; aunado a esto, con los anteriores parámetros de tiempo de cálculo, desviaciones estándar y frecuencia promedio es posible descartar estas cuatro combinaciones pues no se muestran como opciones viables.

4.2.4.2. Serie 500 repeticiones

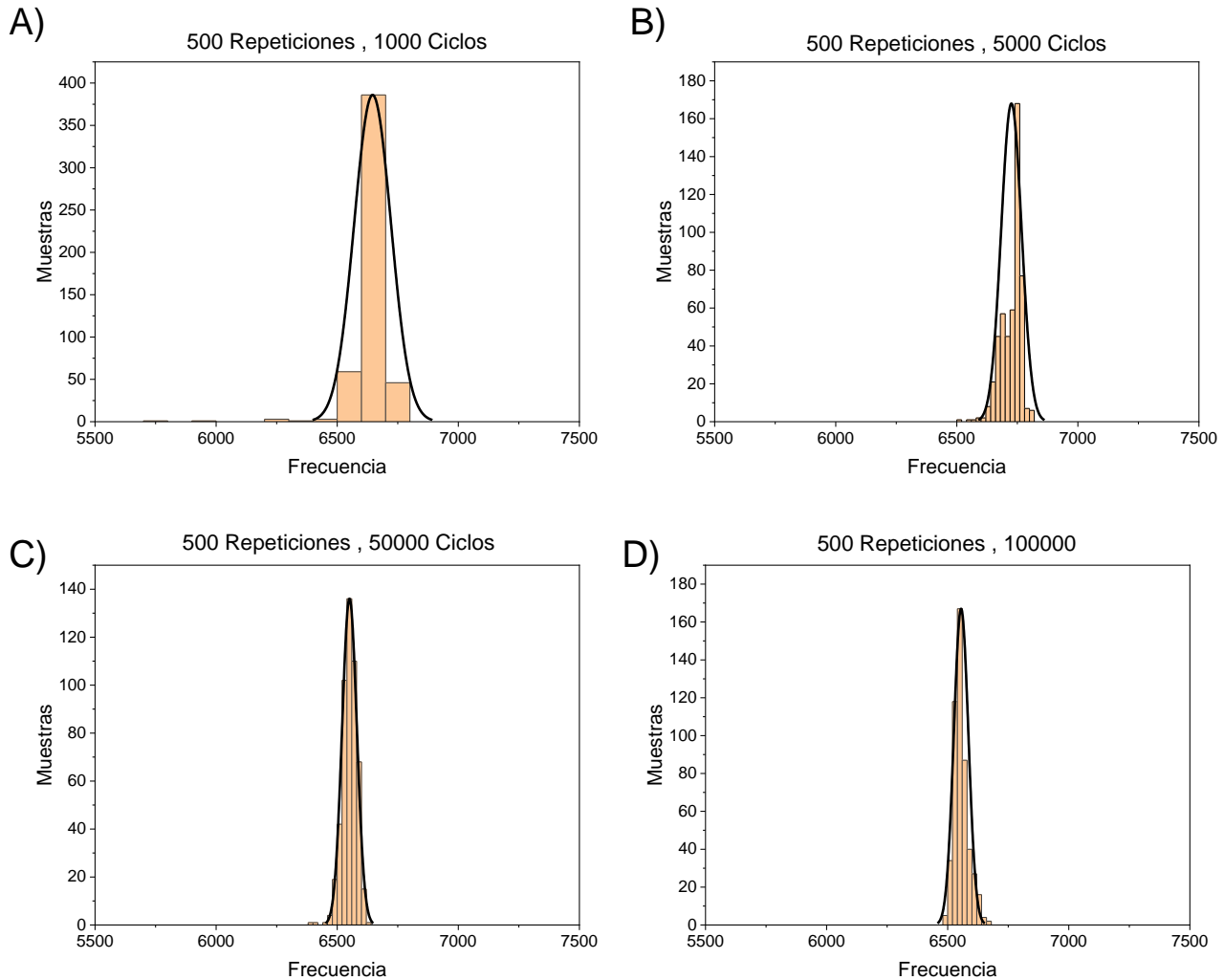


Figura 20 Histogramas de frecuencia y distribución normal de la serie de 500 Repeticiones.

En la figura 20 se despliega la serie de 500 repeticiones. El histograma de frecuencia de la figura 20a se ajusta a la curva de distribución normal, sin embargo, la desviación estándar en la figura 22a es de aproximadamente 1.14%. También el histograma de la figura 20c se ajusta, pero la frecuencia promedio está por debajo de la frecuencia base medida (6,550 Hz).

Las figuras 20b y 20d tienen una tendencia hacia los extremos de sus respectivas curvas. Y sus frecuencias promedio también tienen variaciones aproximadas del 1% con la frecuencia medida, por lo que esta serie también se descarta.

4.2.4.3. Serie 1,000 repeticiones

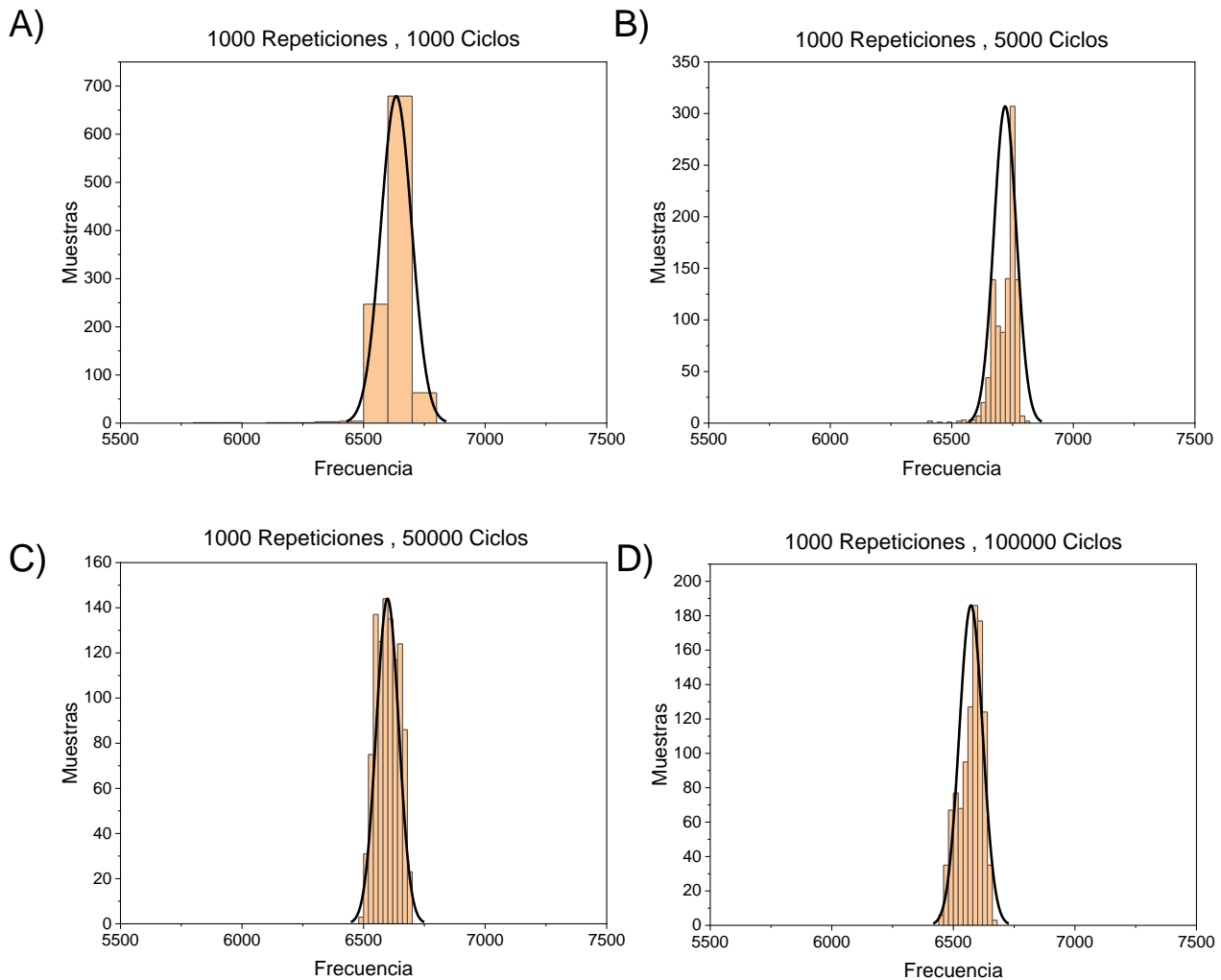


Figura 21 Histogramas de frecuencia y distribución normal de la serie de 1000 Repeticiones.

En la figura 21 se tiene la serie de 1,000 repeticiones. Como se mencionó anteriormente, el uso de 50,000 y 100,000 ciclos produce un tiempo muy grande de ejecución del sistema de medición por lo que no serán considerados durante la implementación.

En la figura 21a se observa poco acotamiento con respecto a los demás ciclos de la misma serie. Por otro lado, en la figura 21b se observa una tendencia del histograma por arriba de los 6,750 Hz, eso provoca que la frecuencia promedio sea un poco mayor a la frecuencia medida (6,719 Hz). Por lo tanto, se descarta dicha serie.

4.2.4.4. Serie 5,000 repeticiones

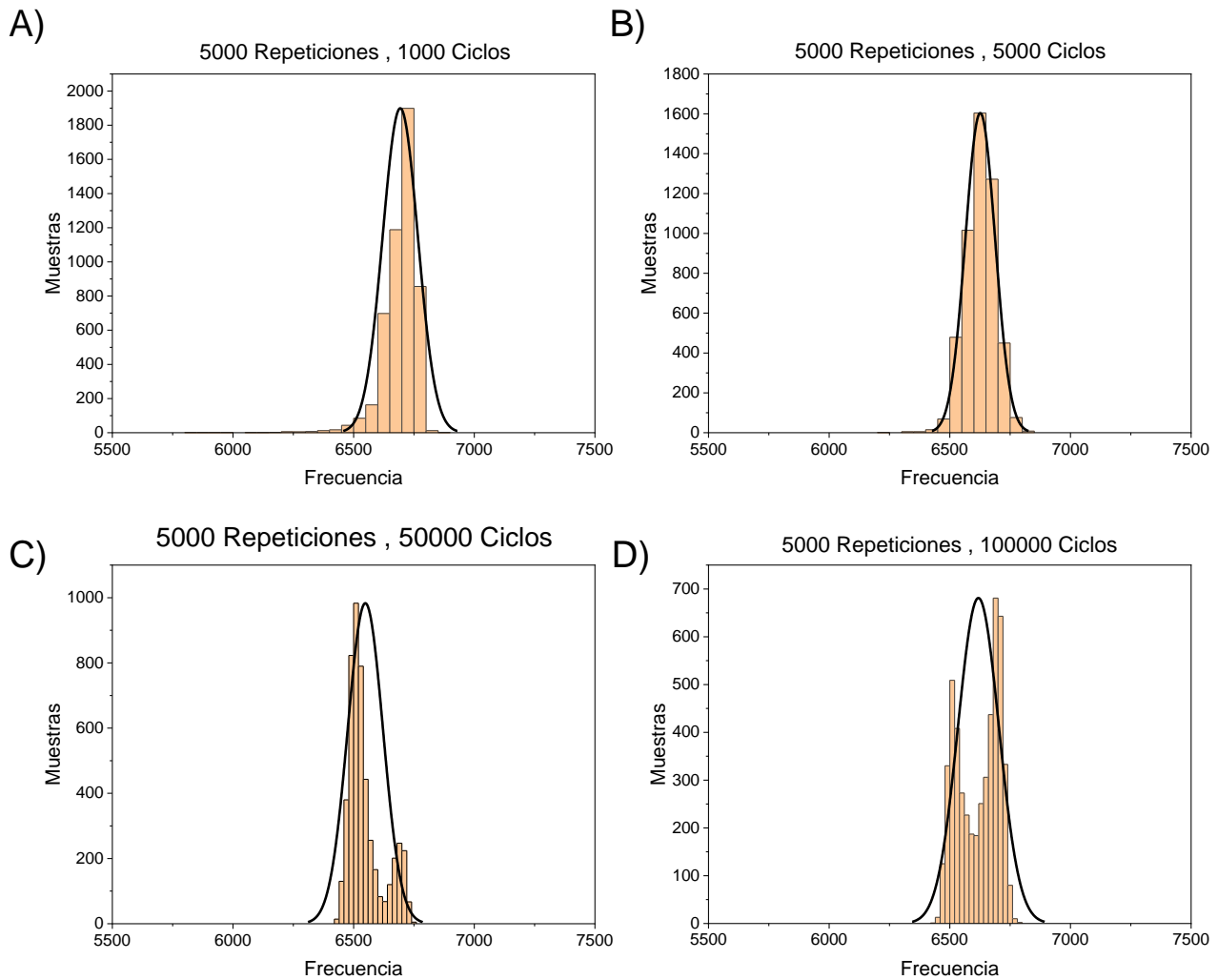


Figura 22 Histogramas de frecuencia y distribución normal de la serie de 5,000 Repeticiones.

En la figura 22 se muestra la serie de 5,000 repeticiones. Al igual que en la serie anterior, se descartan las series de 50,000 y 100,000 ciclos debido a que los tiempos de cálculo son muy prolongados, además que los histogramas de frecuencia muestran severas irregularidades en las mediciones.

En la figura 22a se observa un acotamiento adecuado del histograma con la curva de distribución; sin embargo, la ocurrencia mayor está muy cercana a los 6,750 Hz. Por lo tanto, es descartada. Únicamente se tiene la serie 5,000 con 5,000 ciclos. En primera instancia se puede ver que el histograma de frecuencia concuerda con la curva de distribución y tiene límites bien definidos en los extremos

de la curva. Analizando los parámetros anteriores se tienen $F_{prom} = 6,626$ Hz, $SD = 61.67$ Hz y $T_C = 3,774.08$ s.

La variación entre la frecuencia medida y la frecuencia promedio de la serie es de aproximadamente 40 Hz, la desviación estándar es menor al 1% y el tiempo de cálculo se encuentra dentro del tiempo máximo establecido. Por lo tanto, esta combinación (5,000; 5,000), se toma como la alternativa para el desarrollo de la etapa de calibración.

4.3. CURVA DE CALIBRACIÓN

Teniendo la frecuencia base promedio a 6,626 Hz, se realizó una curva de calibración de capacitancia vs. frecuencia con la combinación de 5,000 repeticiones y 5,000 ciclos. Para la calibración se conectaron capacitores discretos comerciales y se midió la frecuencia de oscilación, de esta forma se puede analizar la curva capacitancia-frecuencia (C-F) a fin de determinar los valores medidos por parte del sistema. En la tabla 5 se resumen los datos nominales de los capacitores, el valor medido utilizando un capacitómetro (Excelvan M6013) y la frecuencia medida en el sistema desarrollado.

Tabla 5 Valores de capacitores comerciales y su respectiva frecuencia obtenida con el sistema de medición.

Valor comercial (pF)	Valor medido (pF)	Frecuencia obtenida (Hz)
100	100.0	6,626.08
106	106.4	6,355.40
110	110.4	5,961.99
115	115.3	5,780.93

122	121.8	5,594.17
125	126.15	5,425.77
130	130.95	5,256.26
137	137.32	4,979.23
145	146.83	4,752.46
147	148.9	4,680.75

De la tabla anterior se tomaron las columnas de valor medido y frecuencia obtenida, para determinar la curva de capacitancia vs. frecuencia. Posteriormente, se realizó el ajuste exponencial para los valores obtenidos, como se observa en la figura 23.

La ecuación característica de la gráfica es la siguiente:

$$y = A_1 \exp\left(-x/t_1\right) + y_0 \dots (4.1)$$

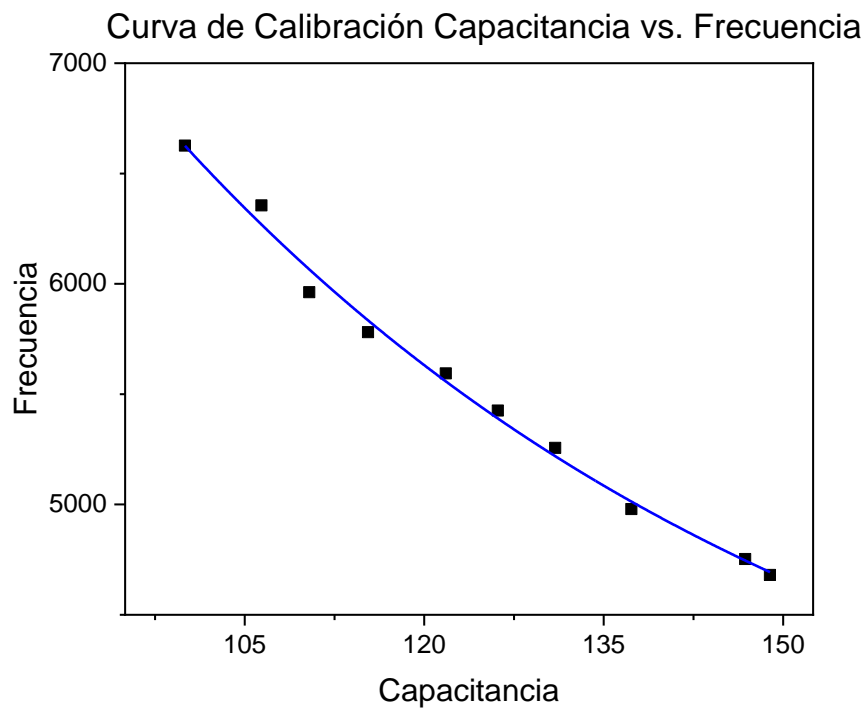


Figura 23 Curva de calibración con datos obtenidos del sistema de adquisición de medición.

Donde:

- $A_1 = 19,563.37$
- $t_1 = 56.56$
- $y_0 = 3,286.95$

Con estos datos, ahora es posible determinar el valor de capacitancia de las estructuras experimentales que se fabricaron en el Laboratorio LaMDDA del Centro MICRONA – UV, mediante la siguiente fórmula:

$$C_{DUT} = -t_1 \log\left(\frac{y - y_0}{A_1}\right) \quad (4.2)$$

4.4. OFFSET DEL SISTEMA DE MEDICIÓN

Es importante mencionar que, en la mayoría de los sistemas de medición existe una diferencia entre el sistema en conjunto con los aditamentos de medición y el sistema por sí solo. Es por esta razón que se hicieron las siguientes consideraciones con el sistema desarrollado.

En este caso, se define el *offset* como la diferencia o el valor de capacitancia que existe debido a las conexiones del sistema, el circuito oscilador y las puntas de prueba, entre otros elementos.

De esta manera, también se realizó un ejercicio con todas las conexiones pertinentes, en la misma condición de 5,000 repeticiones y 5,000 ciclos, con lo que se obtuvieron los datos presentados en la tabla 6. Es decir, todas las mediciones realizadas con este sistema en las mismas condiciones tendrán un valor de capacitancia parásita de 108.89 pF.

Tabla 6 Valores de offset obtenidos con el sistema de medición.

	Valor de Offset
Frecuencia (Hz)	6,110.09
Capacitancia (pF)	108.89

4.5. PRUEBAS DE DISPERSIÓN DE DATOS

Se realizó la prueba de medición con 5,000 repeticiones y 5,000 ciclos de las estructuras C₁ y C₂ de la muestra M₃, de las cuales se obtuvieron los siguientes datos.

Tabla 7 Valores obtenidos en el ejercicio de medición (5,000/5,000); con el sistema de adquisición de medición.

	C ₁	C ₂
Frecuencia Promedio (Hz)	5,786.90	5,818.36
Desviación estándar (Hz)	0.58%	0.75%
Tiempo Promedio (s)	4,320.26	4,297.64
Capacitancia calculada (pF)	116.39	115.63
Desviación estándar (pF)	0.70%	0.73%
[Capacitancia – Offset] (pF)	7.50	6.74

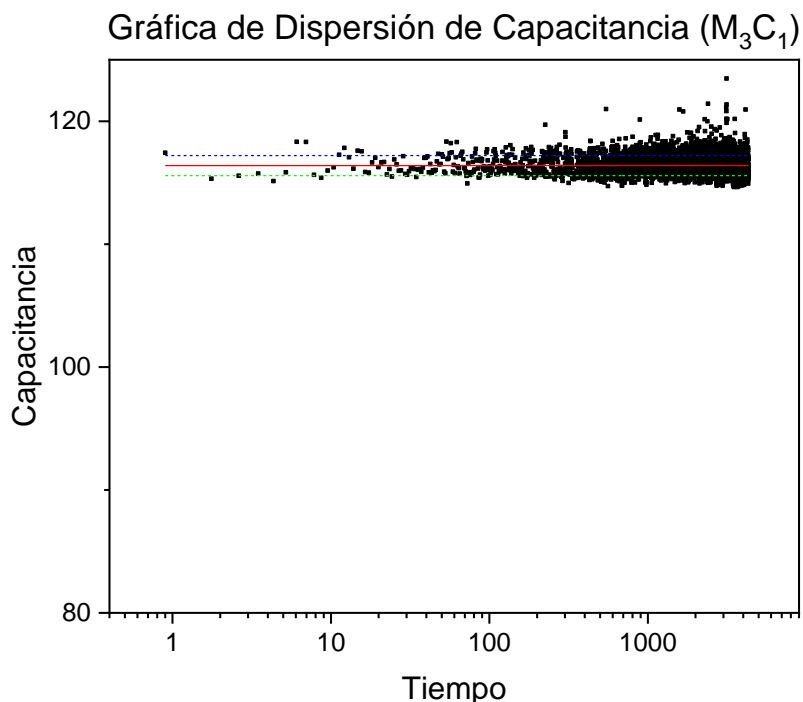


Figura 24 Gráfico de dispersión de capacitancia con respecto al tiempo con 5,000 ciclos y 5,000 repeticiones para M_3C_1 .

En conjunto con los valores anteriores se obtuvieron las gráficas de las figuras 24 y 25, en las cuales se muestran la dispersión de cada medición durante el tiempo de cálculo de las muestras para 5,000 ciclos y 5,000 repeticiones.

En la figura 24 se muestra la gráfica de dispersión de la capacitancia con respecto al tiempo. Se observa que línea continua es el valor de la capacitancia calculada para C_1 de 116.39 pF y las dos líneas punteadas son las primeras desviaciones estándar positiva y negativa, respectivamente.

Por otra parte, se puede observar en la figura 25 el gráfico de dispersión de M_3C_2 donde, de igual manera, la línea roja continua es la media y las líneas punteadas son las primeras desviaciones estándar, tanto positiva como negativa.

Se puede observar que tanto en C_1 como en C_2 , las dispersiones se encuentran ligeramente cargadas hacia σ positiva, sin embargo, se obtuvieron resultados favorables en ambos casos.

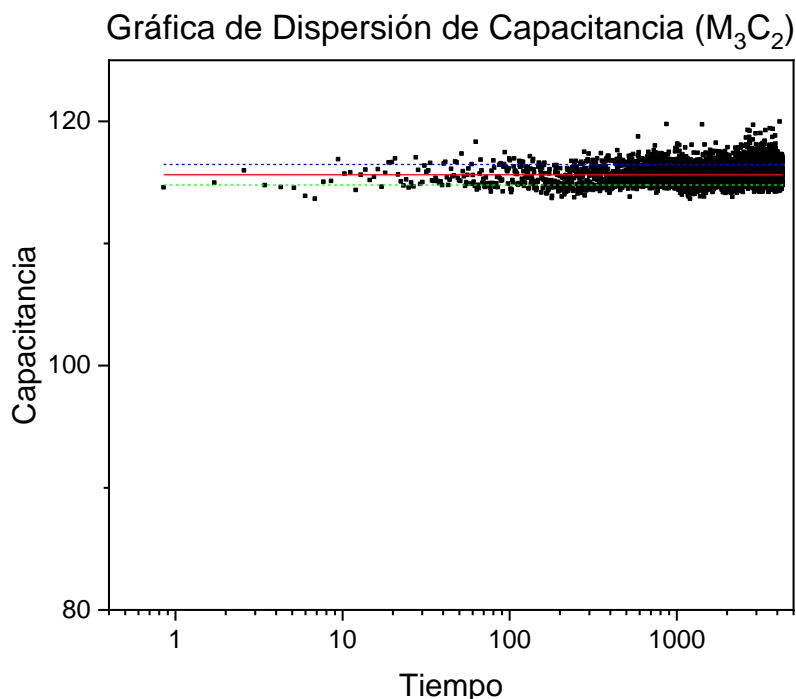


Figura 25 Gráfico de dispersión de capacitancia con respecto al tiempo con 5,000 ciclos y 5,000 repeticiones.

4.6. PRUEBAS DE REPETICIONES

A continuación, se muestra una nueva tabla en la cual se presentan las pruebas realizadas con 1, 5 y 10 repeticiones para C_1 y C_2 de la muestra M_3 . De acuerdo con la tabla 8, los valores de C_1 y C_2 se encuentran dentro de la primera desviación estándar con respecto a la frecuencia promedio respectiva.

Tabla 8 Pruebas de repeticiones con 5,000 ciclos.

Repeticio nes	C_1 (Hz)	C_1 (pF)	C_1 Norm. (pF)	C_2 (Hz)	C_2 (pF)	C_2 Norm. (pF)
1	5,818.65	115.62	6.73	5,807.54	115.89	7.00

5	5,800.28	116.07	7.18	5,794.38	116.21	7.32
10	5,814.78	115.72	6.83	5,791.52	116.28	7.39

C.Norm.: Capacitancia normalizada

4.7. MEDICIONES DE ESTRUCTURAS EXPERIMENTALES

En este apartado se realizaron mediciones con dispositivos de medición de capacitancias convencionales, es decir, se utilizaron multímetro (Steren PC-Link) y capacitometro (Excelvan M6013), así como con la Raspberry Pi con un programa genérico, para realizar las mediciones pertinentes a las 6 estructuras capacitivas obtenidas anteriormente; con la finalidad de corroborar los datos obtenidos con el sistema de medición. Por lo que se obtuvieron los siguientes datos de las gráficas que se muestran a continuación.

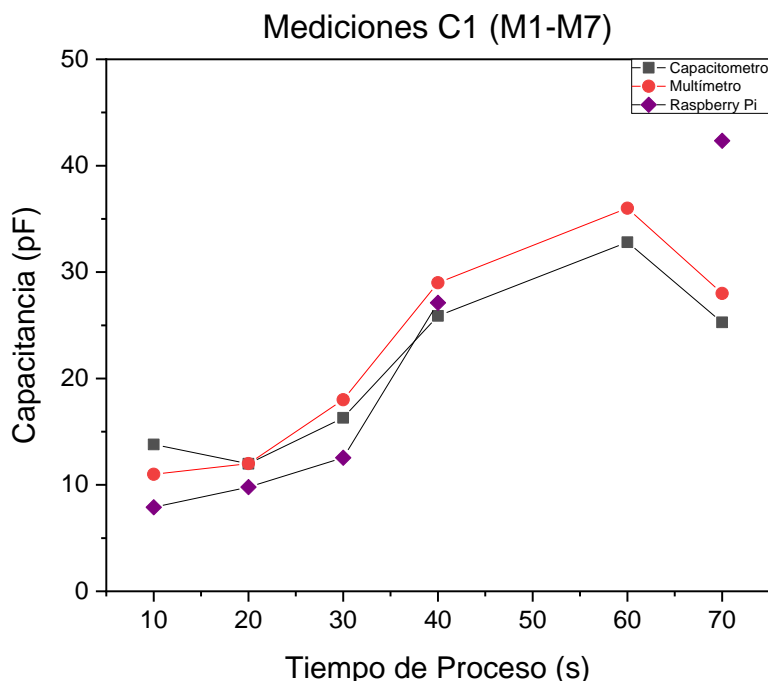


Figura 26 Gráfica obtenida de las mediciones con Capacitometro (gris), multímetro (rojo) y Raspberry Pi (violeta).

En la figura 26 se muestran las mediciones de la estructura C_1 de M_1 a M_7 , se puede observar una clara tendencia de incremento en la capacitancia hasta M_6 , y cae nuevamente en M_7 , debido a que esta estructura sufrió dificultades durante el proceso de estampado del electrodo superior, por lo que no tiene la misma área que las demás muestras.

Todas las mediciones que se realizaron fueron en condiciones de laboratorio, sin embargo, dichas muestras no estaban completamente aisladas, por lo cual se tuvieron variaciones en los resultados, en comparación con el apartado 4.5. donde se observan diferencias en la capacitancia, debido a la manipulación de la muestra M_3 .

Por otra parte, en la figura 27 se tienen los resultados de las mediciones de la estructura C_2 de las muestras M_1 a M_7 , nuevamente, debido a la manipulación prolongada de las muestras la muestra M_2 sufrió daños irreversibles por lo que no fue posible obtener una medición de ella. Sin embargo, se observa en las demás mediciones con los tres dispositivos, una tendencia similar y diferencias mínimas entre las mediciones realizadas.

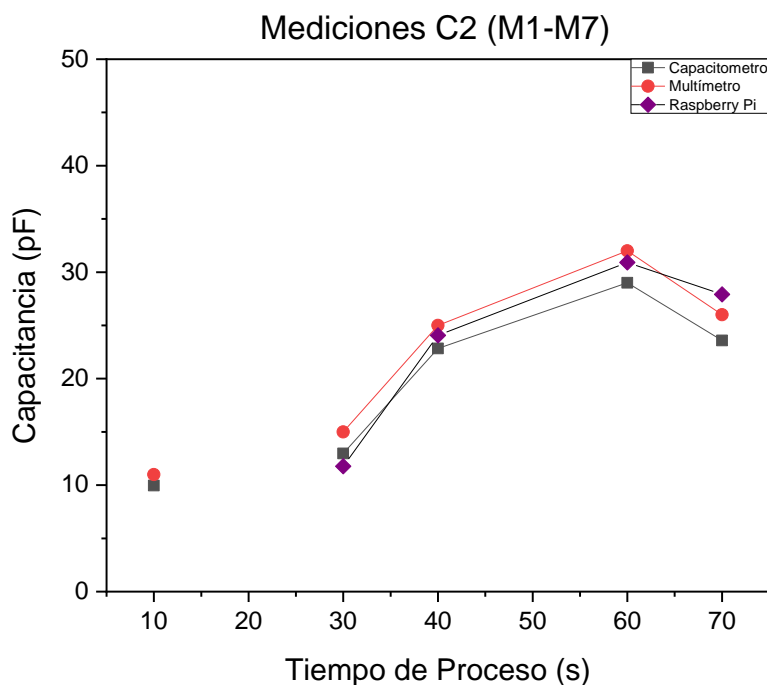


Figura 27 Gráfica obtenida de las mediciones con Capacitometro (gris), multímetro (rojo) y Raspberry Pi (violeta).

4.8. CONCLUSIONES

A manera de obtener un panorama amplio y poder determinar la combinación más adecuada para las mediciones finales se realizaron una serie de pruebas y se tomaron en cuenta cuatro parámetros: valor promedio, desviación estándar, tiempo de cálculo y distribución de probabilidad. Después, teniendo la combinación más adecuada se realizaron las mediciones para obtener la curva de calibración correspondiente. Posteriormente, se realizó una última prueba de dispersión de los datos con las dos estructuras de la muestra M_3 , obteniéndose resultados favorables. Por último, se realizaron pruebas de repeticiones con 1, 5 y 10 repeticiones para validar lo anterior. Y, finalmente, se muestran las gráficas de las mediciones obtenidas con dispositivos de medición convencionales (multímetro y capacitometro).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJO A FUTURO

5.1. CONCLUSIONES

Se implementó un sistema de medición indirecta; de bajo costo, portable y con facilidad de medición en tiempos relativamente cortos. Conformado por un circuito oscilador y un minicomputador Raspberry Pi 4 Modelo B. Posteriormente, se fabricaron 6 estructuras capacitivas flexibles con sustrato de PET/ITO mediante los procesos de centrifugado y estampado, para el dieléctrico y el electrodo superior, respectivamente.

A continuación, realizaron pruebas para determinar la confiabilidad del sistema de medición y se propusieron combinaciones con 4 ciclos y 4 repeticiones distintas. Se realizó un análisis estadístico para determinar los valores más adecuados para continuar con las pruebas de repetibilidad. Con lo anterior, se determinó que la combinación de 5,000 ciclos y 5,000 repeticiones era la más adecuada para continuar con las pruebas de concepto.

Con esta misma combinación se realizó una curva de calibración de capacitancia vs. frecuencia, de esta manera fue posible determinar los valores de capacitancia de las estructuras experimentales mediante la ecuación que se ajustara a dicha curva. Después, se realizó un ejercicio de medición a las estructuras C_1 y C_2 de la muestra M_3 , con la combinación establecida anteriormente, de las cuales se obtuvieron sus respectivos datos y se les realizó el análisis estadístico pertinente.

De ambas mediciones se obtuvieron resultados favorables con gráficas de dispersión acotadas y desviaciones estándar de 0.70% y 0.73% para C_1 y C_2 , respectivamente. De esta manera, se optó por realizar pruebas con 5,000 ciclos a 1, 5 y 10 repeticiones, esto con la finalidad de reducir los tiempos de cálculo y verificar que los valores estuvieran dentro de las desviaciones estándar mencionadas anteriormente.

Por último, se realizaron las mediciones de las estructuras experimentales con dispositivos de medición de capacitancia convencionales, se utilizaron multímetro y capacitometro. Por otro lado, se utilizó la Raspberry Pi con un programa genérico para la medición de la frecuencia de las mismas estructuras.

Con los resultados obtenidos, se puede concluir que el sistema de medición implementado en este trabajo de tesis es una opción viable para la medición de dispositivos capacitivos experimentales, con un margen de error menor al 1% y sin la necesidad de manipular los dispositivos por tiempos prolongados.

5.2. TRABAJO A FUTURO

De este proyecto se desprenden distintas áreas de oportunidad para complementar y/o mejorar los resultados obtenidos.

Debido a que únicamente se realizó un circuito oscilador cuyo rango de medición es de 0 a 45 pF, actualmente no es posible realizar mediciones de capacitores de valores mayores. Es por ello por lo que se puede proponer la implementación de más circuitos osciladores con distintos rangos de medición o en su defecto un circuito con rangos variables de medición.

Por otro lado, se propone realizar las mediciones a 5,000 ciclos y 5,000 repeticiones, así como las pruebas de repeticiones a las muestras M_1 , M_2 , M_4 , M_6 y M_7 para corroborar los resultados con aquellos obtenidos del programa genérico y los otros dispositivos de medición convencionales

Anexo: Programa Genérico (Python)

```
import time
import pigpio

class reader:

    def __init__(self, pi, gpio, weighting=0.0):

        self.pi = pi
        self.gpio = gpio

        if weighting < 0.0:
            weighting = 0.0
        elif weighting > 0.99:
            weighting = 0.99

        self._new = 1.0 - weighting
        self._old = weighting

        self._high_tick = None
        self._period = None
        self._high = None

        pi.set_mode(gpio, pigpio.INPUT)

        self._cb = pi.callback(gpio, pigpio.RISING_EDGE, self._cbf)

    def _cbf(self, gpio, level, tick):

        if level == 1:

            if self._high_tick is not None:
                t = pigpio.tickDiff(self._high_tick, tick)

                if self._period is not None:
                    self._period = (self._old * self._period) + (self._new *
t)
                else:
                    self._period = t

            self._high_tick = tick

        elif level == 0:

            if self._high_tick is not None:
                t = pigpio.tickDiff(self._high_tick, tick)
```

```
        if self._high is not None:
            self._high = (self._old * self._high) + (self._new * t)
        else:
            self._high = t

def frequency(self):
    """
    Returns the PWM frequency.
    """
    if self._period is not None:
        return 1000000.0 / self._period
    else:
        return 0.0

def pulse_width(self):
    """
    Returns the PWM pulse width in microseconds.
    """
    if self._high is not None:
        return self._high
    else:
        return 0.0

def duty_cycle(self):
    """
    Returns the PWM duty cycle percentage.
    """
    if self._high is not None:
        return 100.0 * self._high / self._period
    else:
        return 0.0

def cancel(self):
    """
    Cancels the reader and releases resources.
    """
    self._cb.cancel()

if __name__ == "__main__":

    import time
    import pigpio
    import read_PWM

    PWM_GPIO = 4
    RUN_TIME = 5.0
    SAMPLE_TIME = 1.0

    pi = pigpio.pi()
    p = read_PWM.reader(pi, PWM_GPIO)
    start = time.time()
```

```
while (time.time() - start) < RUN_TIME:

    time.sleep(SAMPLE_TIME)
    f = p.frequency()
    pw = p.pulse_width()
    print("f={:.2f} pw={} dc={:.2f}".format(f,dc))

p.cancel()
pi.stop()
```

REFERENCIAS

- [1] L. Zou, C. Ge, Z. Wang, E. Cretu, X. Li, “Novel Tactile Sensor Technology and Smart Tactile Sensing Systems: A Review,” *Sensors*, vol. 17, no. 11, p. 2653, 2017.
- [2] K. Qian, R. Kakarala, H. Akhtar, “A review of sensing technologies for small and large-scale touch panels”, 2017.
- [3] X. Hu, W. Yang, “Planar capacitive sensors – designs and applications”, *Sensor Review*, vol. 30, no. 1, pp. 24–39, 2010.
- [4] B. Osoinach, “Proximity Capacitive Sensor Technology for Touch Sensing Applications”, Freescale Semiconductor Inc., 2008.
- [5] M. Shadwani, S. Sachan, P. Sachan, “Capacitive Sensing and Its Applications”, vol. 4, no. 3, pp. 185–193, 2016.
- [6] “TactileSensing | Biomimetics And Dextrous Manipulation Lab”, 2016. [Online]. Disponible: <http://bdml.stanford.edu/Main/TactileSensing>.
- [7] G. Korotcenkov, *Handbook of Gas Sensor Materials*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [8] “Biosensors - Latest Research and News | Nature,” 01-Jan-2020. [Online]. Disponible: <https://www.nature.com/subjects/biosensors>.
- [9] P. Mehrotra, “Biosensors and their applications – A review,” *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, vol. 6, no. 2, pp. 153–159, 2016.
- [10] R. Ahmad, K. N. Salama, “Physical Sensors for Biomedical Applications”, 2018.

- E. Terzic, J. Terzic, R. Nagarajah, M. Alamgir, *A Neural Network Approach to Fluid Quantity Measurement in Dynamic Environments*, 1st ed. Springer, 2012, pp. 11–37.
- O. Oyeniran, “Synthesis and Characterization of Carbon-Based Nanostructured Material Electrodes for Designing Novel Hybrid Supercapacitors,” 2018.
- L. K. Baxter, *Capacitive Sensors*. John Wiley & Sons, 1996.
- A. E. Kubba, A. Hasson, A. I. Kubba, G. Hall, “A micro-capacitive pressure sensor design and modelling,” *J. Sens. Syst.*, vol. 5, no. 1, pp. 95–112, 2016.
- “The Capacitive Humidity Sensor,” *Rotronic Technical Note*, 2016.
- N. S. Mazlan *et al.*, “Interdigitated electrodes as impedance and capacitance biosensors: A review,” 2017.
- T.-H.-L. Le, A. Maslyczyk, J.-P. Roberge, V. Duchaine, “A highly sensitive multimodal capacitive tactile sensor,” 2017.
- Y.-C. Chung, S.-T. Chuang, T.-Y. Chen, C.-Y. Lo, and R. Chen, “Capacitive tactile sensor for angle detection and its accuracy study,” *IEEE Sensors J.*, 2016.
- G. Liang, Y. Wang, D. Mei, K. Xi, and Z. Chen, “Flexible Capacitive Tactile Sensor Array with Truncated Pyramids as Dielectric Layer for Three-Axis Force Measurement,” *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 24, no. 5, pp. 1510–1519, 2015.
- B. Li, Y. Gao, A. Fontecchio, and Y. Visell, “Soft capacitive tactile sensing arrays fabricated via direct filament casting,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 25, no. 7, p. 075009, 2016.

- J. Chamary, "3D Touch in iPhone," *Forbes*, 01-Sep-2015. [Online].
- [21] Disponible: <https://www.forbes.com/sites/jvchamary/2015/09/12/3d-touch-iphone-6s/#2ea576d24cee>.
- "About da Vinci Systems," *www.davincisurgery.com*, 01-Mar-2019. [Online].
- [22] Disponible: <https://www.davincisurgery.com/da-vinci-systems/about-da-vinci-systems#>.
- F.-S. System, "F-Scan System," *Tekscan*, 01-Jan-1970. [Online].
- [23] Disponible: <https://www.tekscan.com/products-solutions/systems/f-scan-system>.
- P. S. Girão, P. M. P. Ramos, O. Postolache, J. Miguel Dias Pereira, "Tactile sensors for robotic applications," *Measurement*, vol. 46, no. 3, pp. 1257–1271, 2013.
- J. M. Romano, K. Hsiao, G. Niemeyer, S. Chitta, K. J. Kuchenbecker,
- [25] "Human-Inspired Robotic Grasp Control with Tactile Sensing," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 27, no. 6, pp. 1067–1079, 2011.
- [26] S. Nihtianov, *Smart Sensors and MEMS*. Woodhead Publishing, 2018.
- F. Reverter, "The Art of Directly Interfacing Sensors to Microcontrollers,"
- [27] *JLPEA*, vol. 2, no. 4, pp. 265–281, 2012.
- [28] *Measurement and Automation Catalog*. National Instruments, 2007.
- N. V. Kirianaki, *Data acquisition and signal processing for smart sensors*.
- [29] New York: Wiley, 2002.
- S. Nihtianov, F. Reverter, "Interfacing sensors to microcontrollers: a direct
- [30] approach," in *Smart Sensors and MEMS*, Woodhead Publishing, 2018.

- [31] D. Ashlock, A. Warren, *Guía de Acondicionamiento de Señales para Ingenieros*, 2015.
- [32] E. Besada-Portas, J. A. Lopez-Orozco, J. Aranda, J. M. de la Cruz, “Virtual and remote practices for learning control topics with a 3DOF quadrotor,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46, no. 17, pp. 78–83, 2013.
- [33] F. Reverter, M. Gasulla, R. Pallas-Areny, “Analysis of Power Supply Interference Effects on Direct Sensor-to-Microcontroller Interfaces,” 2005.
- [34] J. E. Gaitan-Pitre, M. Gasulla, R. Pallas-Areny, “Analysis of a Direct Interface Circuit for Capacitive Sensors,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 58, no. 9, pp. 2931–2937, 2009.
- [35] P. H. Dietz, D. Leigh, W. S. Yerazunis, “Wireless liquid level sensing for restaurant applications,” 2002.
- [36] “Arduino - Home.” [Online]. Disponible: <https://arduino.cc>.
- [37] “Teach, Learn, And Make with Raspberry Pi – Raspberry Pi.” [Online]. Disponible: <https://www.raspberrypi.org>.
- [38] X. Wei, H. Zhang, Y. Ding, J. Ren, “Closed-loop capacitive readout based on mode localization effect in weakly-coupled RLC circuits,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 304, p. 111904, 2020.
- [39] X. Wei, H. Zhang, Y. Ding, J. Ren, “Closed-loop capacitive readout based on mode localization effect in weakly-coupled RLC circuits,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 304, p. 111904, 2020.
- [40] A. Ahmadpour Bijargah, A. Heidary, P. Torkzadeh, S. Nihtianov, “Design trade-offs of a capacitance-to-voltage converter with a zoom-in technique for grounded capacitive sensors,” *Int J Circ Theor Appl*, vol. 46, no. 12, pp. 2231–2247, 2018.

- [41] J. C. Lotters, W. Olthuis, P. H. Veltink, P. Bergveld, "A sensitive differential capacitance to voltage converter for sensor applications," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 48, no. 1, pp. 89–96, 1999.
- [42] J. H.-L. Lu, M. Inerowicz, S. Joo, J.-K. Kwon, B. Jung, "A Low-Power, Wide-Dynamic-Range Semi-Digital Universal Sensor Readout Circuit Using Pulsewidth Modulation," *IEEE Sensors J.*, vol. 11, no. 5, pp. 1134–1144, 2011.
- [43] A. De Marcellis, C. Reig, and M.-D. Cubells-Beltrán, "A Capacitance-to-Time Converter-Based Electronic Interface for Differential Capacitive Sensors," *Electronics*, vol. 8, no. 1, p. 80, 2019.
- [44] J. Shiah, H. Rashtian, S. Mirabbasi, "A low-noise high-sensitivity readout circuit for MEMS capacitive sensors," 2010.
- [45] W. Petchmaneelumka, T. Wutikun, A. Rerkratn, V. Riewruja, "Simple Capacitance-to-Time Converter," 2017.