

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE SENSOR QUE IDENTIFICA LA PRESENCIA DE OTRAS SUSTANCIAS EN EL PETRÓLEO



Jesús Rodrigo Navia Rodríguez

Universidad del Cauca
Facultad de Ciencias Exactas, Naturales y de la Educación
Ingeniería física
Popayán, Mayo de 2017

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE
SENSOR QUE IDENTIFICA LA PRESENCIA DE OTRAS
SUSTANCIAS EN EL PETRÓLEO**

Trabajo de grado para obtener el título de
Ingeniero Físico

Jesús Rodrigo Navia Rodríguez

Tutor
Dr. Gilberto Bolaños Pantoja

Universidad del Cauca
Facultad de Ciencias Exactas, Naturales y de la Educación
Ingeniería física
Popayán, Mayo de 2017

Nota de aceptación

Director _____
GILBERTO BOLAÑOS PANTOJA Dr

Jurado _____
JORGE WASHINGTON CORONEL GARCIA M.Sc

Jurado _____
CESAR AUGUSTO QUINAYAS BURGOS Dr

Fecha de sustentación: Popayán, 15 de Mayo de 2.017

CONTENIDO

pagina

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción.....	1
CAPITULO 2. MARCO TEORICO.....	4
2.1 Fundamentos de electrostática.....	4
2.1.1 Modelo de aproximación del capacitor.....	4
2.1.2 Cargas y campos.....	6
2.1.3 Corriente de conducción y de desplazamiento.....	8
2.1.4 La ley de Gauss.....	9
2.1.5 Ecuación de Poisson y Laplace.....	10
2.1.6 Capacitancia.....	11
2.2 Propiedades dieléctricas.....	12
2.2.1 Polarización y permitividad compleja.....	12
2.2.2 Efecto de la frecuencia en las propiedades dieléctricas.....	15
2.3 Sensores capacitivos.....	17
2.3.1 Tipos de sensores capacitivos.....	17
2.3.2 Medición de sensores capacitivos.....	18
2.3.3 Guardas y capacitancias parasitas.....	22
2.4 Crudo pesado.....	25
2.4.1 Definición de petróleo crudo.....	25
2.4.2 Clasificación de petróleo crudo.....	25
2.4.2.1 Según su gravedad API.....	26
2.4.2.2 Según su composición.....	26

2.4.3 Propiedades físicas y químicas del petróleo.....	28
2.4.3.1 Viscosidad.....	28
2.4.3.2 Gravedad específica / Gravedad API.....	28
2.4.3.3 Asfaltenos.....	29
2.4.3.4 Resinas.....	29
2.4.3.5 Aromáticos.....	30
2.5 Técnicas de medida de propiedades dieléctricas.....	30
2.5.1 Placas paralelas.....	30
2.5.2 Líneas de transmisión.....	31
2.5.3 Sonda Coaxial.....	32
2.5.4 Cavidades resonantes.....	34
2.5.5 Técnica de espacio libre.....	35
2.6 Arquitectura hardware para el desarrollo del proyecto.....	36
2.7 Características de los equipos de instrumentación para realizar las mediciones....	37
CAPITULO3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	39
3.1 Diseño del capacitor.....	40
3.2 Sistema de medición capacitivo.....	56
CAPITULO4. RESULTADOS Y ANALISIS.....	62
CAPITULO 5. CONCLUSIONES.....	67
Referencias.....	69
Anexos.....	70

Capítulo 1.

Introducción

1.1. Introducción

Con el paso del tiempo se ha dejado de lado el petróleo pesado como recurso energético convirtiéndose, así como la última opción energética debido a sus altos costos asociados con su producción. Sin embargo, la existencia de millones de barriles de petróleo en la categoría de hidrocarburos pesados y extra pesados es mayor que la reserva de petróleo del mundo; esto ha provocado una declinación en gran parte que la industria petrolera se desplacen a la explotación de crudo pesado de los yacimientos petroleros convencionales por consecuencia de la gran demanda energética del mundo y alto precio del petróleo liviano.

Los hidrocarburos pesados tienen diversas densidades y viscosidades. Donde cabe señalar que la viscosidad a la temperatura del yacimiento es el factor más importante para el productor de hidrocarburos; porque este parámetro determina que tan fácil será la extracción de petróleo desde el yacimiento. Se puede destacar que la densidad en el petróleo varía poco con la temperatura como en otras sustancias, caso contrario para la viscosidad que puede variar a gran medida, convirtiéndose este referente como estándar para el campo petrolero comúnmente utilizado para asignarle una categoría a los petróleos crudos y por ende la investigación se basa en el estudio de la permitividad dieléctrica del petróleo [3].

Los materiales dieléctricos se diferencian de los conductores en que el mecanismo de conducción no está medido por transporte de electrones, en lugar de ello toda la carga esta confinada por la fuerza de coulomb. La aplicación de un campo eléctrico tiene el efecto de desplazar las cargas ligeramente para generar la formación de dipolos eléctricos. A medida en

que esto ocurre se mide por medio de la permitividad eléctrica o constante dieléctrica. La polarización del medio modifica el campo eléctrico, cuya magnitud y dirección pueden variar de valores que tendría en dieléctricos diferentes. Los siguientes tipos de dipolos eléctricos se presentan en la mayoría de los materiales.

1. Dipolos eléctricos pertenecientes a moléculas con momentos dipolares permanentes que se reorientan por efecto del campo eléctrico, por ejemplo las moléculas de agua.
2. Dipolos eléctricos que provienen de la contribución de dipolos iónicos debidos a la presencia de sales, por ejemplo Na^+Cl^- de sus entornos de solvatación.
3. Dipolos eléctricos debidos a la polarización de las nubes electrónicas de átomos por efecto del campo eléctrico [8].

Los materiales dieléctricos son de gran importancia para el desarrollo tecnológico como: películas delgadas protectoras en metales, aceites minerales refinados como aislantes eléctricos para transformadores. Materiales de alta permitividad eléctrica son muy importantes para aumentar la capacitancia de elementos capacitivos y por consecuencia aumentar la retención de carga eléctrica. Con esto se disminuye el consumo de corriente eléctrica en el circuito, el calentamiento de los componentes electrónicos y se consigue alargar la vida de las fuentes de alimentación, usualmente baterías.

La caracterización de dieléctricos es necesaria en la investigación industrial en la que se aplican técnicas no destructivas. Existen entre ellas, técnicas como: la de líneas de transmisión, sonda Coaxial, cavidades resonantes, placas paralelas y técnica de espacio libre [4].

En el presente trabajo de investigación se propone un prototipo de sensor capacitivo de bajo costo que cumple con identificar los diversos crudos provenientes de yacimientos ubicados en el departamento de putumayo empleando técnicas de caracterización eléctrica para determinar la permitividad eléctrica a un rango frecuencias determinadas. Los materiales pueden ser clasificados de acuerdo a su permitividad eléctrica, tomando las muestras de petróleo como materiales dieléctricos que pueden almacenar y devolver energía eléctrica como un condensador ideal.

Este estudio se constituye en una gran contribución para el sector petrolero de la región. Dado que los nuevos y ya existentes pozos petroleros necesitan una clasificación de este, se hace necesaria la aplicación de esta tecnología dando como resultado la producción satisfactoria en este sector de acuerdo a la técnica de extracción a utilizar.

Conocer el comportamiento de las propiedades eléctricas del petróleo por medio de la aplicación de campos eléctricos variables, es un gran aporte ya que la gran mayoría de los estudios realizados está centrada en las propiedades químicas como: asfáltenos, resinas, parafinas, agua libre, agua emulsionada y viscosidad.

Mediante la caracterización eléctrica de las muestras de petróleo a través de la permitividad eléctrica, se pueda determinar su escala de gravedad específica desarrollada por el instituto estadounidense del petróleo (American Petroleum Institute, API) y posteriormente, estimar la viscosidad de la misma para que se puedan tomar estos factores como: determinantes en la elección de la técnica de extracción más conveniente que facilite el proceso y reduzca el costo.

En el ámbito académico el conocimiento eléctrico del petróleo se ampliaría para este tipo de muestras y la aplicación de los circuitos eléctricos de medida capacitivos de bajo costo. Mediante la metodología de este trabajo de investigación permitirá realizar posteriores trabajos con el instrumento de medida a diversos tipos de petróleo o de forma adaptativa para medir la permitividad dieléctrica de otros materiales que se pretenda investigar en el laboratorio de física de bajas temperaturas FISBATEM.

Capítulo 2.

Marco Teórico

2.1 Fundamentos de electrostática

La electrostática es el estudio de las cargas eléctricas, campos eléctricos y corrientes independientes del tiempo, los dieléctricos y las fuentes de potencial en DC. Un condensador eléctrico consiste en dos conductores separados por un dieléctrico (sólido, líquido o gaseoso), o el vacío. La relación entre la carga Q , y la diferencia de potencial, V , entre ellos viene descrita por la capacitancia, $C = Q/V$. Por ejemplo, para un condensador formado por n placas planas paralelas iguales, con área A , distancia d entre cada par, y un material entre ellas con constante dieléctrica relativa ϵ_r , la capacitancia aproximada es [4].

$$C \approx \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} (n - 1) \quad (2.1)$$

Donde $\epsilon_0 = 8.8541878 \text{ pF/m}$ es la constante dieléctrica del vacío y $\forall n \in \mathbb{Z}; n \geq 2$.

Algunas aplicaciones para sensores capacitivos pueden utilizar electrodos con geometría no plana; estos pueden necesitar un análisis más extenso del campo electrostático. Existen algunas herramientas de análisis como métodos numéricos de elemento finito para realizar simulaciones de estos campos.

2.1.1 Modelo de aproximación del capacitor

El diseño de los sensores capacitivos en el mundo real involucra cargas en movimiento, superficies parcialmente conductoras y fuentes de potencial en AC. Para un análisis preciso de los campos y las corrientes que se forman en el capacitor, se deberían utilizar las ecuaciones

de Maxwell que relacionan los campos eléctricos y magnéticos, la densidad de carga, y la densidad de corriente. Pero una aproximación simplificada, la cual ignora los campos magnéticos, es casi siempre posible con pérdidas de precisión insignificantes. Los sistemas en los cuales esta aproximación es razonable están definidos como cuasi-electrostáticos.

Las ecuaciones de Maxwell describen el fenómeno más confuso de una onda electromagnética. Por supuesto, el análisis es difícil y no siempre necesario. El fenómeno de la onda ocurre en escalas de tiempo cortas o a altas frecuencias que a menudo no son de interés práctico. Si este es el caso, los campos se pueden describir por versiones truncadas de las ecuaciones de Maxwell, aplicadas a escalas de tiempo relativamente largas y a bajas frecuencias.

Encontraremos que un sistema compuesto de conductores perfectos y espacio libre es cuasi-electrostático si una onda electromagnética tiene una longitud de onda mucho menor que las dimensiones en el problema de interés.

Las mediciones del sensor capacitivo que se propone en este trabajo son casi todas pequeñas y lentas en sus aplicaciones, además todos los electrodos son conductivos por lo que su constante de tiempo es mucho menor que los tiempos de respuesta del circuito electrónico utilizado, de esta forma podemos utilizar versiones simplificadas de las ecuaciones de Maxwell [4]:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial}{\partial t} \mu_0 H \approx 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times H = \frac{\partial}{\partial t} \epsilon_0 \epsilon_r E + J \approx 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \epsilon_0 E = \rho \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \mu_0 H = 0 \quad (2.5)$$

Una distribución de densidad de carga ρ dada produce la intensidad de campo eléctrico \mathbf{E} ; la intensidad de campo magnético \mathbf{H} es aproximadamente cero.

La permeabilidad magnética del vacío, μ_0 , es una constante física fundamental, definida en el SI de unidades como $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$. La permitividad eléctrica del vacío ϵ_0 , se define por μ_0 y c , la velocidad de la luz en el vacío, como $\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$. Como c se define aproximadamente como 299,792,458 m/s, entonces $\epsilon_0 = 8.8541878 \times 10^{-12} \text{ F/m}$. Cualquier material dieléctrico tiene una permitividad dieléctrica mayor que la del vacío y se conoce como la constante dieléctrica relativa ϵ_r [4].

2.1.2 Cargas y campos

Con las ecuaciones de Maxwell simplificadas, el análisis electrostático se reduce a obtener el campo eléctrico producido por varias distribuciones de carga en sistemas de materiales con varias constantes dieléctricas. Dos pequeños conductores cargados en un dieléctrico con cargas de Q_1 y Q_2 coulomb, separados por r metros, ejercen una fuerza entre estas en newton

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (2.6)$$

La fuerza es a lo largo de la línea que conecta a las cargas y tratará de atraer las cargas si el signo de su carga es opuesto. El coulomb es la carga transportada por una corriente de un Amperio en un segundo. Como un electrón tiene una carga de $1.60206 \times 10^{-19} \text{ C}$, un coulomb es alrededor de 6×10^{18} electrones. La fuerza entre dos cargas de 1 C espaciadas a 1 mm es $9 \times 10^{15} \text{ N}$, aproximadamente 30 veces el peso de la tierra. Pero las fuerzas electrostáticas a menudo se pueden despreciar en sistemas prácticos, esto es porque la carga es usualmente mucho menor a un coulomb. Al aplicarse un voltaje V al capacitor de placas paralelas con área de placa de A metros cuadrados y espaciadas d metros, la energía almacenada en el capacitor es [4].

$$E = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \cdot V^2 \quad (2.7)$$

y la fuerza en newton es entonces la derivada parcial de la energía con respecto al espaciado de la placa

$$F = \frac{\partial E}{\partial d} = \frac{1}{2} \frac{C}{d} V^2 = \frac{-\epsilon_0 \epsilon_r A}{2d^2} \cdot V^2 = -4.427 \cdot 10^{-12} \epsilon_r \frac{AV^2}{d^2} \quad (2.8)$$

Las fuerzas transversales son pequeñas para las geometrías de una sola placa, y se pueden hacer insignificantes con placas sobrepuestas; para algunas estructuras interpuestas estas fuerzas pueden ser significativas y se pueden calcular utilizando la derivada parcial de la energía con movimiento transversal.

Esta fuerza puede ser molesta en algunas aplicaciones sensitivas porque al presentarse una deformación de las placas esto causaría una variación en la distancia de separación de las placas provocando una variación de la capacitancia. La operación de AC no ofrece una solución a las fuerzas electrostáticas no deseadas porque ambos medios ciclos positivos y negativos son de atracción, pero la fuerza pequeña no afecta la mayoría de los diseños de sensores capacitivos, y se pueden balancear a cero por medio del uso preferido de la geometría de tres electrodos del sensor capacitivo [4].

Dos placas conductoras cargadas ilustran el concepto de campo eléctrico, como se muestra en la figura 2.1.

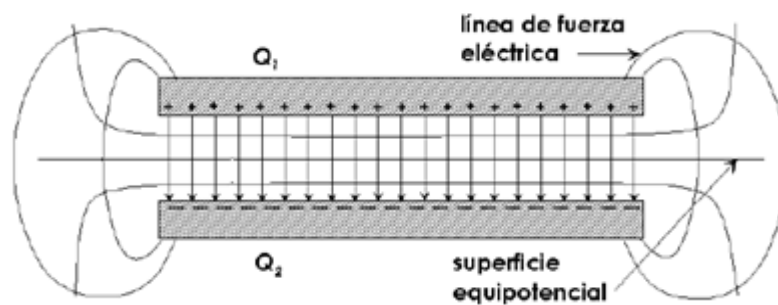


Figura 2.1. Campo eléctrico para placas paralelas [4].

Si a las placas se les asigna arbitrariamente un voltaje. Las superficies equipotenciales son las superficies en donde el voltaje es el mismo. El campo eléctrico E es un vector de cantidad. Es el gradiente del voltaje V y se define como

$$E = -\frac{dv}{dn} = -grad V = -\nabla V \quad V/m \quad (2.9)$$

en donde n es un elemento diferencial perpendicular a la superficie equipotencial en ese punto. En la figura 2.1 se muestran el capacitor con los campos de las placas paralelas. Las superficies de V constante son superficies equipotenciales y las líneas en la dirección del campo eléctrico máximo son las líneas de fuerza. El voltaje a lo largo de cualquier camino entre dos puntos a y b se puede calcular como

$$V_{ab} = \int_a^b -E \cdot dn \quad (2.10)$$

En la región lineal cerca del centro de las placas paralelas, figura 2.2, el campo eléctrico es constante y perpendicular a las placas; la ecuación 2.10 produce un voltaje $V_{12} = Ed$ en donde d es la distancia entre las placas [4].

2.1.3 Corriente de conducción y de desplazamiento

Cuando se produce un campo eléctrico en cualquier material, una corriente fluye. Esta corriente es la suma de una densidad de corriente de conducción J_c y una densidad de corriente de desplazamiento J_d . Estos términos especifican la densidad de corriente en (ampere/metro²).

Para un conductor metálico, la corriente de conducción se produce por el movimiento de los electrones; para los electrolitos la corriente se debe a la migración de los iones. La densidad de corriente para la corriente de conducción es

$$J_c = \sigma E \quad A/m^2 \quad (2.11)$$

en donde σ es la conductividad en [ohm/metro].

Para un buen dieléctrico de alta resistencia, la corriente de conducción es cercana a cero y la carga transferida por una reorientación de moléculas polares causa la corriente de desplazamiento. Las moléculas altamente polares como las del agua pueden transferir más carga que las sustancias menos polares o el vacío, y tendrán una constante dieléctrica ϵ_r más

grande. Además, la corriente de desplazamiento se produce por el acumulamiento de cargas cerca de los electrodos bajo la influencia de un voltaje aplicado hasta cuando la fuerza repulsiva de cargas iguales balancea el voltaje aplicado. La definición de la corriente de desplazamiento es

$$J_d = \frac{\partial D}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}(\epsilon_0 \epsilon_r E) \quad A/m^2 \quad (2.12)$$

con una dirección elegida igual a la dirección del vector \mathbf{E} . La corriente de desplazamiento es transitoria en el caso en donde se aplica un voltaje de DC o un campo estático, y es alterna para campos de AC. Si un voltaje de DC se impone en un sistema de conductores y dieléctricos, la corriente de desplazamiento fluye brevemente para distribuir las cargas hasta que se satisface la ecuación de Laplace (2.17). Con un campo de AC, el desplazamiento de corriente alterno continúa fluyendo con una magnitud proporcional al cambio de la tasa de tiempo del campo eléctrico [4].

2.1.4 La ley de gauss

El flujo total de la carga debido al desplazamiento de corriente a través de una superficie se encuentra por medio de la integración de \mathbf{D} sobre esta superficie

$$\psi = \int_{sup} D_n ds \quad C, \quad (2.13)$$

con ds como un área elemental y \mathbf{D} el flujo de densidad normal a ds . La ley de Gauss establece que el desplazamiento total o flujo eléctrico a través de cualquier superficie cerrada, la cual encierra carga, es igual a la cantidad de carga encerrada.

El desplazamiento de carga ψ es el total de las cargas en los electrodos y el desplazamiento de carga en las moléculas polares de un dieléctrico en el campo eléctrico. Moléculas altamente polares como las del agua, con una constante dieléctrica de 80, actúan como si una carga positiva se concentrara a un extremo de cada molécula y una carga negativa en el otro.

Cuando se impone un campo eléctrico, las moléculas se alinean ellas mismas con el campo, y la suma de la carga desplazada durante este alineamiento es el desplazamiento de carga

dieléctrica. Note que en un sistema de cargas finitas la conducción de la densidad de corriente J_c puede ser cero para un aislante perfecto, pero el valor mínimo del desplazamiento de densidad de corriente J_d no debe ser cero debido al valor de la constante dieléctrica del vacío diferente de cero. Si la excitación del voltaje es senoidal y ϵ_r y ϵ_0 son constantes, D tendrá una forma de onda cosenoidal y el desplazamiento de corriente se puede encontrar por medio de [4]

$$i = \frac{d\psi}{dt} \quad A \quad (2.14)$$

2.1.5 La ecuación de Poisson y Laplace

La relación entre la densidad de carga ρ y el desplazamiento de corriente D está representada por la ecuación de Poisson

$$\text{div } D = \rho \quad C/m^3 \quad (2.15)$$

$\text{div } D$, la divergencia de D , el flujo de salida neto de D por unidad de volumen, es igual a la carga encerrada por el volumen. En un medio homogéneo e isotrópico con ϵ_r constante, escalar y sin cargas libres, la ecuación de Poisson se puede describir como [4]

$$\text{div } \epsilon_0 E = \epsilon_0 \text{div } E = \rho = 0 \quad (2.16)$$

Esta versión de la ecuación de Poisson para regiones de carga libre es la ecuación de Laplace, que es importante en la teoría del campo electromagnético. En coordenadas rectangulares, la ecuación de Laplace es

$$\nabla^2 V = \frac{\partial}{\partial x^2} V + \frac{\partial}{\partial y^2} V + \frac{\partial}{\partial z^2} V = 0 \quad (2.17)$$

La mayoría de los problemas en electrostática se ocupan en encontrar soluciones a esta ecuación, o sus equivalentes en coordenadas polares o cilíndricas.

La solución de los problemas en la electrostática es encontrar una distribución potencial que satisfaga la ecuación de Laplace con una geometría de electrodo dada y sus voltajes. Generalmente, la distribución de potencial en el espacio del interelectrodo y la distribución de carga en los electrodos no se conocen. Las cargas en los electrodos se distribuirán ellas mismas hasta que los conductores lleguen a ser superficies equipotenciales y de esta forma se satisface la ecuación de Laplace en el espacio del interelectrodo [4].

Una solución de la ecuación de Laplace (o de Poisson) produce un campo de líneas de tres dimensiones, en el caso de un capacitor de placas paralelas figura 2.1. Desafortunadamente, la solución analítica de la ecuación de Laplace solamente es posible para algunos casos sencillos. Las soluciones existen para algunos problemas en dos dimensiones o para problemas de tres dimensiones que se pueden simplificar a dos dimensiones.

2.1.6 Capacitancia

Para la geometría de placas paralelas, un voltaje V se puede aplicar a las placas para producir un flujo ψ total. Entonces, la cantidad del flujo en coulombs que se produce por V volts es

$$\psi = Q = CV \quad (2.18)$$

El símbolo C es la capacitancia de las placas en *coulombs/volt*. La capacitancia se calcula evaluando

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \psi}{\int D \cdot dl} = \frac{\psi}{\int E \cdot dl} \quad (2.19)$$

con dl una longitud elemental a lo largo de la línea de flujo, y se debe de repetir para todas las líneas de flujo que emanan desde una de las placas y terminando en la otra placa.

Para sistemas de dos electrodos, todas las líneas de flujo las cuales emanan desde una placa terminarán en la otra, pero con múltiples electrodos generalmente esto no se cumple [4].

Como un ejemplo del cálculo de la capacitancia, la ley de Gauss se puede aplicar a una superficie envolviendo una de las placas paralelas. Si la superficie es elegida correctamente y

las líneas de flujo en los bordes de las placas se ignoran, la carga total Q dentro de la superficie es igual al flujo de desplazamiento total D veces el área de la superficie A , resultando en

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} = 8.8542 \times 10^{-12} \times \frac{\epsilon_r A}{d} \quad (2.20)$$

en donde

C = capacitancia, faradios

$\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12}$, faradios / metro

A = área, metros cuadrados

d = espaciamiento entre placas, metros

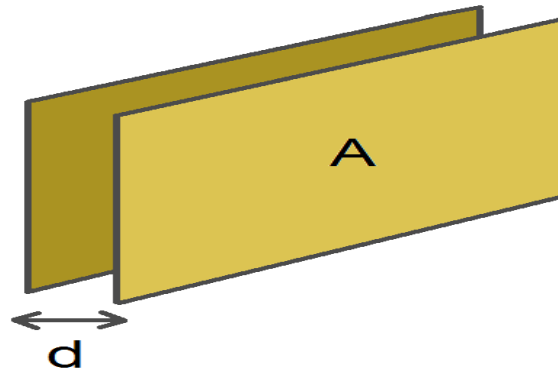


Figura 2.2. Capacitor de placas paralelas

2.2 Propiedades dieléctricas

Conocer las propiedades dieléctricas de los materiales que van a ser procesados a frecuencias de microondas es fundamental, para el diseño adecuado de dispositivos que funcionen a dichas frecuencias; con el fin de ser usados en aplicaciones industriales bien sea para calentamiento o control. En los siguientes puntos se describe el mecanismo de polarización de la materia y se define la permitividad que es la medida de la capacidad de polarización del material bajo la acción de un campo externo, así como también la profundidad de penetración del campo dentro del material y la dependencia de las propiedades dieléctricas con la frecuencia.

2.2.1 Polarización y permitividad compleja

Los materiales se componen normalmente de partículas con carga eléctrica dispuestas de tal modo que cualquier región macroscópica del material es eléctricamente neutra. Cuando se aplica un campo eléctrico externo sobre el material, dicho campo actúa ejerciendo una fuerza sobre cada carga individual, y la desplaza ligeramente de su posición de equilibrio anterior, haciendo que el material adquiera una determinada polarización por alineamiento dipolar que es la que ocurre a frecuencias elevadas (HF y microondas). La polarización adquirida compensa en parte el campo eléctrico del exterior, haciendo que aparezca un campo eléctrico en el interior del material. Las propiedades dieléctricas determinan, de forma macroscópica, la interacción de la energía electromagnética con los materiales. La propiedad dieléctrica más utilizada es la permitividad del material, que describe como se propagan las ondas electromagnéticas a través de él, la reflexión de las ondas desde la superficie del material y la atenuación de la energía al atravesarlo.

Su símbolo es ϵ y tiene unidades de F/m. Generalmente se utiliza su valor absoluto dividido por el de la permitividad del vacío, que es $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, convirtiéndose en una cantidad adimensional, que se denomina permitividad compleja (ó relativa) y se expresa como ϵ_r [4]. La permitividad compleja ϵ_r es una medida de la capacidad de polarización del material bajo la acción de un campo externo, es decir, si el material es fácilmente polarizado o no. La polarización que se acaba de describir, es la provocada por el alineamiento de los dipolos del material, que es el fenómeno que predomina en la banda de microondas. La permitividad relativa es una variable compleja, que se puede escribir como:

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon'(1 - j \tan \delta) \quad (2.21)$$

Donde $\tan \delta = (\epsilon''/\epsilon')$ se denomina tangente de pérdidas, y representa la relación entre la parte imaginaria y la real de la permitividad compleja. La parte imaginaria de la permitividad ϵ'' , es una medida de lo disipativo que es el medio, es decir, da una idea de la atenuación que sufrirá la onda que se propague por él.

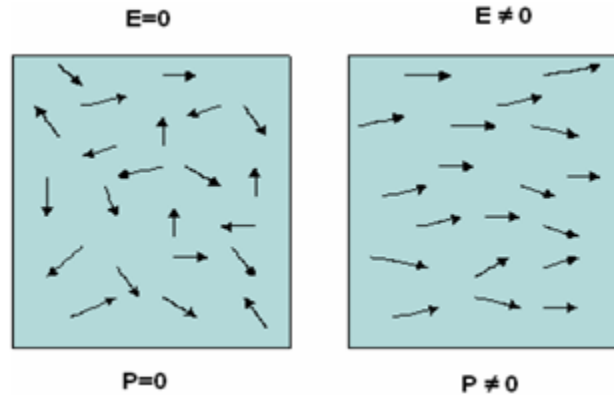


Figura 2.3. Momento dipolar (P) adquirido por el alineamiento de los dipolos en un material ante la presencia de un campo eléctrico externo [4].

Representa, por lo tanto, las pérdidas o la absorción de la potencia que tiene el material. La pérdida de potencia de la señal se produce porque, a medida que el campo se va propagando por el material, la fricción producida por las cargas internas que se desplazan al ser polarizadas hace que la energía electromagnética se vaya convirtiendo gradualmente en calor. El mínimo valor de ε'' es 0, que corresponde a un medio sin pérdidas. Las pérdidas del material incluyen dos efectos: el efecto de pérdidas debidas a la rotación dipolar y el efecto de pérdidas provocado por el movimiento de los iones libres (conductividad iónica). Ambos términos se agrupan en ε'' de la siguiente manera:

$$\varepsilon'' = \varepsilon_d'' + \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (2.22)$$

donde ε_d'' representa las pérdidas dipolares y σ las pérdidas por conductividad iónica del material en S/m , ω es la frecuencia angular en rad/s , y ε_0 la permitividad en el vacío ($8.854187 \times 10^{-12} F/m$). Generalmente a frecuencias de calentamiento alrededor de 2.45 GHz la proporción de energía transformada en calor debido al movimiento de los iones libres es muy pequeña comparada con la contribución de las pérdidas dipolares. Sin embargo, las pérdidas iónicas pueden ser mayores en electrolitos, soluciones salinas, cristales y cerámicas a altas temperaturas [4].

La parte real de la permitividad o constante dieléctrica ε' , es la parte reactiva de la permitividad, es decir, representa una medida relativa de la densidad de energía de microondas en el interior del material. El mínimo valor de ε' es 1, que corresponde al vacío; el aire posee

una permitividad de 1.0006 aproximadamente [4], y el resto de sólidos y líquidos posee una permitividad mayor que 1. Su valor depende de muchos factores diferentes: la densidad, la humedad, la temperatura, composición, microestructura, etc. Además, también es fuertemente dependiente de la frecuencia a la que se producen las variaciones del campo eléctrico al que esté sometido el material.

La permitividad afecta a la relación existente entre el campo eléctrico y el campo magnético de la onda que se propaga, es decir, provoca un cambio en la impedancia de la onda. Cuando una onda llega a la superficie de separación entre dos materiales de distintas permitividades, el cambio de impedancia provoca que parte de la onda se refleje en dicha superficie y que parte de la onda atraviese la superficie de separación y se propague a través del segundo medio.

Pero la permitividad del material no sólo afecta en el hecho de que parte de la energía se refleje, sino que la onda que continúa su propagación por el material, sufre también otros cambios. En primer lugar, una mayor ϵ' provoca que la velocidad de la onda disminuya, como se puede comprobar en la expresión de la velocidad de propagación (suponiendo que los medios son no magnéticos) [4]:

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon_0}} \quad (2.23)$$

Donde c_0 es la velocidad de la onda electromagnética en el vacío.

Y debido a esto, una menor velocidad supone que la longitud de onda en el material es menor cuanto mayor sea su permitividad (suponiendo que los medios son no magnéticos):

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_0}} \quad (2.24)$$

Donde λ_0 es la longitud de onda de la onda electromagnética en el vacío.

2.2.2 Efecto de la frecuencia en las propiedades dieléctricas

Como ya se ha visto, hay distintos mecanismos dieléctricos o efectos de la polarización que contribuyen a la permitividad total del material. Esto es debido a que los materiales contienen diferentes tipos de portadores de carga que pueden ser desplazados por la acción de un campo eléctrico. Los electrones pueden ser desplazados respecto al núcleo de los átomos, los átomos se desplazan en las moléculas, las moléculas se desplazan o giran adquiriendo un momento dipolar, y los iones libres se desplazan por el material provocando pérdidas y fricciones.

Los efectos de los distintos mecanismos se traducen en que las propiedades dieléctricas de los materiales presentan variaciones con la frecuencia del campo eléctrico externo que se les aplique. Según el rango de frecuencias, será un mecanismo u otro el que contribuya al almacenamiento de energía en el material. En la figura siguiente se muestra una serie de resonancias en la respuesta dieléctrica del material. Estas tienen que ver con el fenómeno de relajación dieléctrica. Este mecanismo se pone en marcha cuando se retira el campo eléctrico que inducía un fenómeno de polarización en un material dieléctrico.

Dicho material tarda un cierto tiempo en recuperar su desorden molecular inicial y por ello la polarización va decayendo exponencialmente con una constante de tiempo τ denominada tiempo de relajación. Se puede decir que τ es una medida de la movilidad que tienen las moléculas en el material [4].

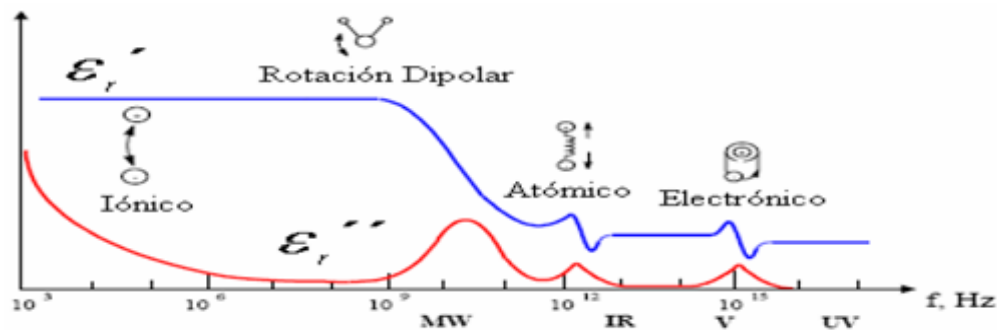


Figura 2.4. Representación cuantitativa de la parte real e imaginaria de la Permitividad en función de la frecuencia, en la que se muestran los efectos de los distintos mecanismos de polarización [4]

La frecuencia de relajación es la inversa del tiempo de relajación. Cuando la frecuencia a la que varía el campo eléctrico es menor a la frecuencia de relajación, los dipolos tienen tiempo

suficiente para seguir las variaciones del campo eléctrico, y por eso la constante dieléctrica adquiere su máximo valor. Esto significa que toda la energía de la fuente externa se está almacenando en el material.

A medida que la frecuencia se va incrementando, los dipolos empiezan a ser incapaces de seguir el ritmo de las variaciones del campo eléctrico, y el momento dipolar se retarda respecto al campo eléctrico. Si la frecuencia sigue aumentando, llega a un punto en el que la variación del campo es tan rápida que los dipolos son incapaces de reorientarse según el campo, y dicha polarización deja de contribuir al almacenamiento de energía en el material. Ello supone una disminución de la permitividad del material, así como un incremento en las pérdidas.

2.3 Sensores capacitivos

De acuerdo a la investigación de la permitividad dieléctricas del petróleo se hizo necesario implementar un sensor capacitivo, que varié su valor de capacitancia de acuerdo al material dieléctrico que se encuentre entre sus electrodos. A continuación se describe los tipos de sensores capacitivos que hay para medir diferentes variables físicas y como realizan esas medidas.

2.3.1 Tipos de sensores capacitivos

Los sensores capacitivos se usan ampliamente en la industria y en laboratorios para medir diferentes variables físicas tales como la posición, velocidad y aceleración de objetos en movimiento, fuerza, presión, flujo, nivel de líquidos y propiedades dieléctricas de materiales, por nombrar algunos ejemplos. Algunos sensores y su aplicación se ilustran en la figura 2.5.

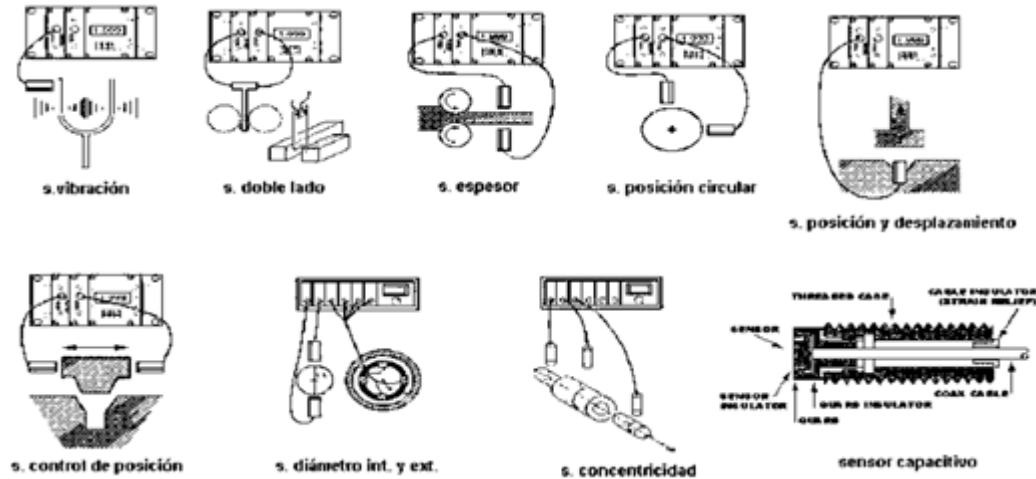


Figura 2.5. Tipos de sensores capacitivos para medir diferentes variables físicas [4].

Hay dos configuraciones de estructura para sensores capacitivos que son utilizadas frecuentemente, la de placas paralelas y el capacitor coaxial. Con estas, en principio, se pueden detectar cambios de capacitancia ΔC provocados por estímulos físicos, químicos o biológicos que causan cambios en las dimensiones del material dieléctrico o de su constante dieléctrica ϵ_r . Los cambios básicos medibles por los sensores capacitivos son la permitividad y las dimensiones físicas o desplazamientos en las direcciones $x, y, o z$.

La permitividad efectiva depende del material (elemento sencillo o mezcla de varios elementos) y de la temperatura. El desplazamiento, semejante a movimientos lineales o rotacionales, vibraciones y expansiones debidos a cualquier causa química o física, se puede determinar directamente por medio de la medición de cambios de capacitancia ΔC . Si la estructura del material es elástica, entonces el desplazamiento es proporcional a la fuerza aplicada f ($\Delta x = kf$, donde k es la constante elástica) o la presión, la cual es fuerza normal por unidad de área. Por lo tanto, las fuerzas axiales o cortantes y las presiones estáticas o dinámicas se pueden medir con sensores capacitivos. La aceleración se puede calcular de las mediciones de las fuerzas inerciales que actúan en una masa sujeta a la aceleración.

El flujo de fluidos se puede estimar de la caída de presión medida a través de un flujo resistivo, lineal o no lineal. Por otra parte, la estructura del sensor capacitivo puede ser grande o pequeña, y se puede fabricar con varios tipos de conductores y materiales dieléctricos

utilizando varias técnicas de fabricación dependiendo de los requerimientos de cada aplicación [4].

Una desventaja importante de los sensores capacitivos es su sensibilidad a la contaminación y a la condensación, lo que puede causar serios problemas de confiabilidad. En muchos de esos casos, el cambio en porcentaje de capacitancia es alto, sin embargo, el valor absoluto de la capacitancia del sensor es pequeño.

Usualmente, este tipo de cambio se puede medir con un medidor LCR de precisión. Pero, en el caso de un cambio en porcentaje muy pequeño, por ejemplo 100 ppm o aún menor, es difícil usar un medidor LCR ordinario, de esta forma se tiene que emplear un medidor de altísima estabilidad para monitorearlo. Estos medidores de alta resolución se pueden utilizar en experimentos de laboratorio, pero en el uso industrial tenemos que utilizar en su lugar circuitos de interface de alta sensibilidad [4].

2.3.2 Medición de sensores capacitivos

Como se mencionó anteriormente, para un capacitor formado por n placas planas paralelas iguales, con área A , distancia d entre cada par, y un material entre ellas con constante dieléctrica relativa ϵ_r , la capacidad aproximada es

$$C \approx \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} (n - 1) \quad (2.25)$$

donde $\epsilon_0 = 8.8542 \text{ [pF/m]}$ es la constante dieléctrica del vacío.

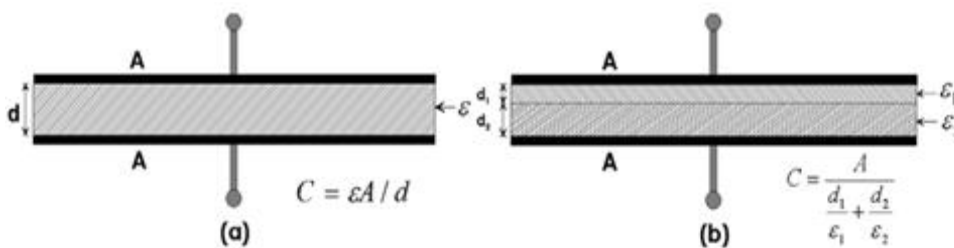


Figura 2.6. Expresiones de la capacitancia aproximada para el caso de placas paralelas. a) Con un dieléctrico y b) Con dos dieléctricos diferentes [4].

Así pues, cualquier fenómeno o magnitud que produzca una variación en ϵ_r , A o d , provocará un cambio en la capacitancia C y, en principio, puede ser detectado mediante el dispositivo

anterior. En general cualquier cambio en el dieléctrico o en la geometría puede ser considerado para la detección del fenómeno que lo provoca.

En la figura 2.6 se muestra la capacitancia para el caso de placas paralelas. En [9] pueden encontrarse las expresiones exactas para alguna de estas configuraciones y sus variantes. Si, por ejemplo, se considera la permitividad relativa, ϵ_r , para el aire que es prácticamente 1, mientras que para el agua varía entre 88 a 0°C y 55.33 a 1000°C.

La sustitución de aire por agua como dieléctrico producirá un cambio apreciable, que se puede aplicar, por ejemplo, a la medida de nivel de agua en un depósito, o a la medida de humedad si se dispone de un dieléctrico que absorba y desabsorba agua sin histéresis. En los materiales ferroeléctricos, por encima de la temperatura de Curie, la constante dieléctrica es proporcional al recíproco de la temperatura según [4]

$$\epsilon = \frac{k}{T - T_c} \quad (2.26)$$

donde T es la temperatura actual, T_c es la temperatura de Curie y k una constante. En este caso, es la variación de la temperatura produce un cambio importante en la capacidad de un condensador que incorpore un material de este tipo.

Los sensores capacitivos pueden o no ser lineales. Su linealidad depende del parámetro que varía y de si se mide la impedancia o admitancia del condensador. En un condensador plano, por ejemplo, con ϵ_r o A variable, la salida es lineal si se mide la admitancia (proporcional a C), pero es no lineal si varía la separación entre placas, de la forma $C = \epsilon A/x$ o $C = \epsilon A/(d + x)$. En este segundo caso, se tiene

$$C = \epsilon \frac{A}{d(1 + \alpha)} \quad (2.27)$$

donde $\alpha = x/d$. Si se deriva 2.2.9 para encontrar la sensibilidad, se obtiene

$$\frac{dC}{dx} = \frac{-\varepsilon A}{d^2(1+\alpha)^2} = \frac{-C_0}{(1+\alpha)^2 d} \approx -\frac{C_0}{d} (1 - 2\alpha + 3\alpha^2 - 4\alpha^3 + \dots) \quad (2.28)$$

donde se ve que el sensor no es lineal pues la sensibilidad varía con x y es tanto mayor cuanto menores sean d y x . Esta última consideración podría sugerir el empleo de condensadores con d muy pequeña, pero hay que tener en cuenta el límite impuesto por la tensión de ruptura dieléctrica, que para el aire es de 30 kV/cm [4]. Para un sensor del tipo $C = \varepsilon A/x$, la sensibilidad es

$$\frac{dC}{dx} = -\frac{\varepsilon A}{x^2} \quad (2.29)$$

donde su dependencia x y, por tanto, su no linealidad, queda manifiesta. Si en este condensador se añade un dieléctrico entre placas, de la forma indicada en la figura 2.7,

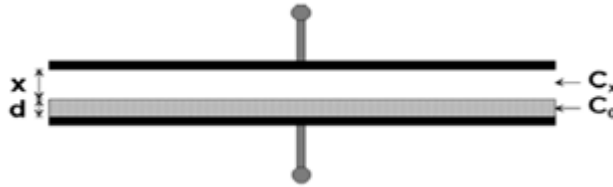


Figura 2.7. Disminución de la no linealidad de un sensor capacitivo de placas planas paralelas mediante un dieléctrico adicional [4].

la capacitancia respectiva de cada una de las partes es

$$C_0 = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2.30)$$

$$C_x = \varepsilon_0 \frac{A}{x} \quad (2.31)$$

La capacitancia total será la combinación en serie de la capacitancia de cada parte, de la forma

$$C = \frac{C_0 C_x}{C_0 + C_x}$$

$$C = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d} \varepsilon_0 \frac{A}{x}}{\varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d} + \varepsilon_0 \frac{A}{x}} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d + \varepsilon_r x} \quad (2.32)$$

Derivando 2.32 para tener la nueva sensibilidad, se obtiene

$$\frac{dC}{dx} = -\varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A \varepsilon_r}{(d + \varepsilon_r x)^2} = -\frac{\varepsilon_r^2 \varepsilon_0 A}{d^2} \frac{1}{\left(1 + \frac{\varepsilon_r x}{d}\right)^2}$$

$$\frac{dC}{dx} \approx -\frac{C_0}{d} \varepsilon_r \left[1 - \frac{2\varepsilon_r x}{d} + 3\left(\frac{\varepsilon_r x}{d}\right)^2 - 4\left(\frac{\varepsilon_r x}{d}\right)^3 + \dots\right] \quad (2.33)$$

Comparando esta ecuación con 2.35, se observa que el sistema es ahora lineal si $d \ll 1$. Una alternativa para tener una salida lineal en un sensor capacitivo plano basado en una variación de la distancia entre placas es medir, en vez de su admitancia, su impedancia, [4]

$$Z = \frac{1}{j\omega C} \quad (2.34)$$

Una última consideración relativa a las limitaciones de los condensadores eléctricos es su alta impedancia de salida. Si bien la impedancia decrece cuanto mayor sea la frecuencia de alimentación, la impedancia de las capacitancias parásitas también decrece al aumentar la frecuencia. Una solución es poner cerca la electrónica de acondicionamiento de la señal. Otra es emplear un transformador de impedancias. También se puede medir la corriente a través del condensador en vez de la tensión en los bornes de éste, con lo que la exigencia de una impedancia de entrada alta desaparece. Frente a las limitaciones anteriores, los sensores capacitivos presentan una serie de ventajas que los hacen atractivos en muchas aplicaciones [4].

2.3.3 Guardas y capacitancias parasitas

El empleo de un condensador variable como sensor está sujeto a la interferencia de capacitancias parásitas. En primer lugar, en la expresión de la capacidad se suelen despreciar los efectos de los bordes, y ello puede que no sea aceptable como se ve en la figura 2.8.

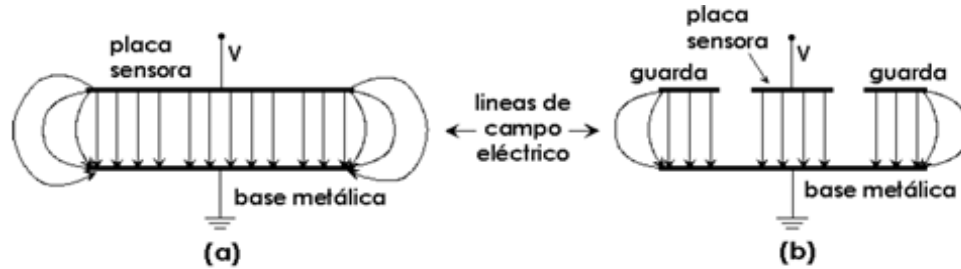


Figura 2.8. Efectos de borde en un sensor capacitivo visto de lado. a) Sin guarda y b) con guarda [4]

En un condensador plano con placas paralelas, los efectos de los bordes son despreciables si la separación entre placas es mucho menor que la dimensión lineal de éstas. En caso contrario la ecuación 2.27 debe sustituirse por una aproximación mejor. Si se trata de dos placas rectangulares finitas, con anchura a , longitud l y separación d , una fórmula más correcta es [10]

$$C \approx \epsilon_0 \epsilon_r \frac{la}{d} \left\{ 1 + \frac{1}{\pi} \left[\ln \left(\frac{a\pi}{d} + 1 \right) + 1 + \ln 2 \right] \right\} \quad (2.35)$$

donde se ve que el error relativo decrece efectivamente al aumentar la relación a/d . Un método para reducir el efecto de los bordes sin alterar las relaciones geométricas consiste en emplear guardas, tal como se indica en la figura 2.9.

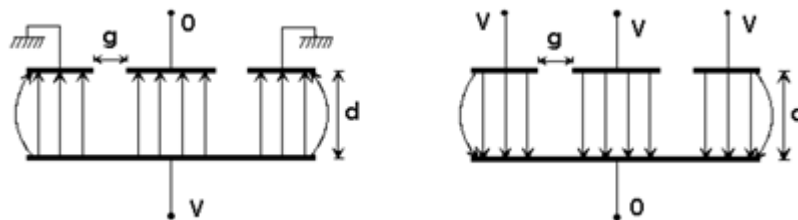


Figura 2.9. Empleo de guardas en sensores capacitivos para reducir los efectos de borde [4]. Consiste en rodear uno de los dos electrodos del condensador con un anillo puesto al mismo potencial que dicho electrodo [4], como se ve en la figura 2.10.



Figura 2.10. Configuración básica de un sensor capacitivo con anillo de guarda [4].

Si el otro electrodo del condensador se mantiene a un potencial conocido, las líneas de campo eléctrico en el centro quedan delimitadas a una zona bien definida como se muestra en la figura 2.10.

El efecto de la separación g entre la guarda y el electrodo, supuesta $g \ll d/5$, se puede tener en cuenta empleando como anchura (o radio) efectivo del electrodo el real más $g/2$.

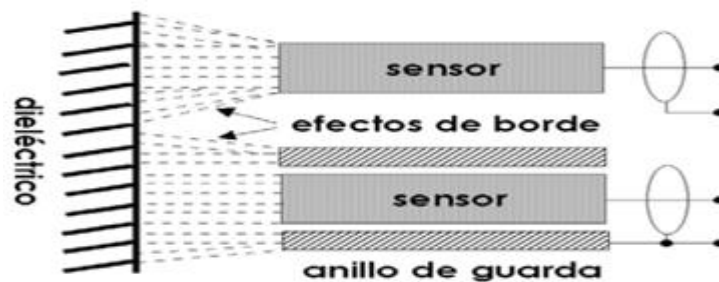


Figura 2.11. Efectos de borde en un sensor capacitivo actuando sobre una superficie dieléctrica con y sin anillo de guarda [4].

Otra consideración es el aislamiento entre placas, que debe ser alto y constante. Si, por ejemplo, en caso de humedad variable aparecieran resistencias parásitas en paralelo con C por variar el aislamiento ofrecido por el dieléctrico, se tendrían variaciones en la impedancia del condensador no atribuibles a un cambio de capacidad. Si la medida es sensible sólo al módulo de la impedancia, pero no a su fase, los errores pueden ser importantes.

La conductividad es un problema a considerar en dieléctricos polares (que tienen momentos dipolares permanentes), pues suelen tenerla alta. Es el caso del agua, acetona y algunos alcoholes.

La presencia de una componente resistiva en la impedancia, significará que hay una disipación de potencia que puede producir interferencias térmicas. En cambio, los dieléctricos no polares,

como los aceites y los distintos derivados del petróleo, suelen tener una conductividad muy baja. Dado que sólo una de las dos superficies puede ponerse a tierra, las interferencias capacitivas son otra fuente de error a considerar [4].

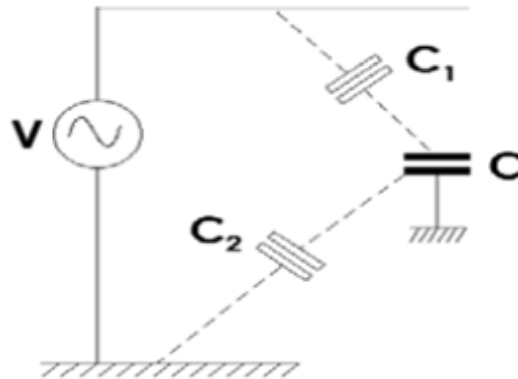


Figura 2.12. Interferencias en un sensor capacitivo debidas a campos eléctricos próximos [4].

Según en la figura 2.12, si otro conductor próximo, por ejemplo de la red de distribución eléctrica, está a un determinado potencial respecto a tierra, la placa que no esté conectada a tierra alcanzará también un potencial que según su frecuencia puede interferir en el circuito hasta impedir la medida. Puede ser necesario blindar eléctricamente esta placa y los cables conectados a ella respecto al entorno ajeno al sensor.

Los cables de conexión son otra fuente de error. Al ser blindados para evitar las interferencias capacitivas, añaden una capacidad en paralelo con el condensador, por lo que se pierde sensibilidad pues la magnitud a medir hará cambiar sólo la capacidad del sensor, que es ahora una parte de la capacidad total. Si además hay movimiento relativo entre los conductores del cable y el dieléctrico, se tiene una fuente de error adicional que puede ser muy grave si las variaciones de la geometría son importantes o si el dieléctrico del cable tiene propiedades piezoeléctricas notables [4].

2.4 Crudo pesado

Los crudos pesados han sido calificados como los hidrocarburos del futuro por expertos internacionales y nacionales. Hasta hace pocos años, el petróleo pesado era desechado como recurso energético por los inconvenientes y costos vinculados con su producción; pero hoy en

día, ante el progresivo agotamiento de los yacimientos de petróleo liviano, sus reservas han despertado el interés de petroleras y gobiernos en todo el mundo.

Las reservas estimadas de crudo pesado en el mundo calculadas por la Agencia Internacional de Energía de EEUU en 1,5 billones de barriles- equivalen al triple de las reservas combinadas de petróleo y gas convencionales existentes y Constituyen la fuente de energía más segura en el futuro inmediato de la humanidad [3].

2.4.1 Definición de petróleo crudo

El petróleo crudo es una mezcla de compuestos denominados hidrocarburos. Está constituido por átomos de carbono e hidrogeno y pequeñas proporciones de heterocompuestos con presencia de nitrógeno, azufre, oxígeno y algunos metales. Se presenta de forma natural en depósitos de roca sedimentaria y su color varía entre ámbar y negro [3].

2.4.2 Clasificación de petróleo Crudo

El petróleo crudo puede clasificarse por gravedad específica API (American Petroleum Institute) o su composición química.

2.4.2.1 Según su gravedad específica API

Los valores de gravedad específica y viscosidad a temperatura ambiente para el petróleo crudo se fundamentan según lo expuesto en la tabla 2.1 [3].

Tabla 2.1. Clasificación del crudo de acuerdo a su gravedad específica y valores de gravedad API [3].

TIPO	Densidad (g/cm ³)	Gravedad (°API)
Crudo Superligero	< 0,83	>39
Crudo ligero	0,83 - 0,87	31,1 - 39

Crudo Mediano	0,87 - 0,92	22,3 – 31,1
Crudo pesado	0,92 - 1,00	10,0 – 22,3
Crudo Extrapesado	> 1,00	≤10

2.4.2.2 Según su composición

La composición de los crudos es muy variable dependiendo del lugar en el que se han formado. El petróleo crudo se fundamenta en varios tipos moleculares; cicloalcanos, alcanos, resinas, asfáltenos y sumas de aromáticos. También toma en cuenta el contenido de azufre como se muestra en la siguiente tabla 2.2.

Tabla 2.2. Clasificación de crudos de acuerdo a su composición (Tissot y Welte, 1984) [3].

Crterios	Tipos	Características
Hidrocarburos Saturados > 50% p/p, Aromáticos < 50% p/p, Azufre < 1% p/p	Parafínicos	$\delta > 0,85$ g/cc; parafinas > 40% p/p > naftenos; (resinas + asfaltenos) < 10% p/p
	Parafínicos- Nafténicos	(parafinas \approx naftenos) \leq 40% p/p; 5% < (resinas + asfaltenos) < 15% p/p; 25% < aromáticos < 40%; azufre < 1%
	Nafténicos	Saturados < 50%;

		Naftenos > 40 % > parafinas
Saturados ≤ 50% p/p; Aromáticos ≥ 50% p/p;	Aromáticos Intermedios	Parafinas > 10%; Azufre > 1% p/p; 10% < (resinas+asfaltenos) < 30% y mas 40% < aromáticos < 70% benzo y dibenzotiofenos → (25 - 30% de los aromáticos)
	Aromáticos Asfálticos	Parafina < 10% Naftenos ≤ 25% 30% < (resinas + asfaltenos) < 60% 1% < azufre ≤ 9% p/p
	Aromáticos Nafténicos	Parafinas < 10% Naftenos ≥ 25% Azufre < 1% Resinas ≤ 25%

2.4.3 Propiedades físicas y químicas del petróleo

En la producción de petróleo crudo se trae consigo agua libre, agua emulsionada, sedimentos y petróleo; por eso es de gran importancia tener claro los dichos conceptos y propiedades para el entendimiento de este trabajo de investigación.

2.4.3.1 Viscosidad

Es una propiedad de importancia en el crudo para determinar su resistencia interna a fluir. La viscosidad en el crudo disminuye conforme aumenta su temperatura y la rapidez de esta disminución varía según el tipo de petróleo crudo.

Se denomina viscosidad cinemática (U) cuando se expresa en centistokes, y viscosidad absoluta o dinámica (μ) cuando se expresa en centipoises. Ambas viscosidades se relacionan entre sí de acuerdo a la ecuación (2.36) [3]:

$$U (\text{viscosidad cinemática}) = \frac{\mu(\text{viscosidad dinámica})}{\text{Gravedad específica}} \quad (2.36)$$

2.4.3.2 Gravedad específica / gravedad °API

La gravedad específica se define como la relación del peso de un volumen (peso específico) dado de un material a 60 °F con el peso de un volumen equivalente de agua destilada (peso específico) a la misma temperatura ambos pesos corregidos según el factor de flotabilidad del aire. Por ejemplo: un galón de agua pesa 6,84 lb/gal a 60 °F y la de un líquido pesa 8,33 lb/gal a 60 °F; entonces la gravedad específica del líquido en cuestión sería de 0,820.

Sin embargo, en la industria del petróleo se acostumbra utilizar la gravedad API (American Petroleum Institute). Esta es una función especial de la densidad relativa (*Gravedad Específica*), calibrada en grados, que nos proporciona una idea de la calidad del crudo. La gravedad API es representada por la relación matemática de la ecuación (2.37) [3]:

$$\text{Gravedad API} = \frac{141.5}{\text{Gravedad específica}} - 131.5 \quad (2.37)$$

Con la relación anterior se puede observar que a mayor gravedad específica del material, menor será su gravedad API. De esta manera la industria petrolera pueden hacer su clasificación de petróleo crudo liviano, pesado, extra pesado, etc., según su valor de gravedad API.

2.4.3.3 Asfaltenos

Los asfaltenos están constituidos principalmente por anillos aromáticos ligados con cadenas alquílicas y cicloalcanos además presentan hierro, níquel y vanadio, unidos a compuestos heterocíclicos (nitrógeno, azufre y oxígeno) generando un color marrón a negro. Cuando estos compuestos están en solución se encuentran en suspensión coloidal, formando pequeñas partículas estabilizadas por las moléculas de resinas en el petróleo.

Cabe destacar que existe una diversidad de criterios que se adoptan al definir los asfaltenos, pues se dice que es la fracción de crudo soluble en tolueno (ó benceno) e insoluble en un

exceso de n-alcano (pentano ó heptano), que existen en un estado de agregación en suspensión, y están rodeados y estabilizados por resinas, se sabe que tienen carga eléctrica, y se piensa que están polidispersos como se puede ver en la siguiente figura 2.13 [3].

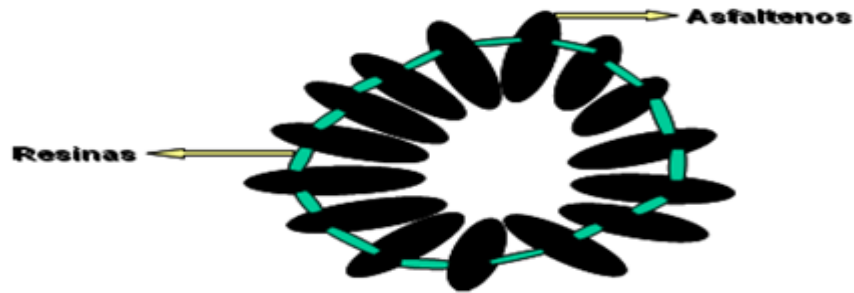


Figura 2.13. Asfáltenos [3].

2.4.3.4 Resinas

Son moléculas largas, principalmente compuestas por hidrógeno y carbono, con uno a tres átomos de azufre, oxígeno o nitrógeno por molécula. La estructura básica está compuesta por anillos, principalmente aromáticos que van desde tres hasta diez anillos por cada molécula. Las resinas comprenden aquella fracción que se solubiliza cuando el petróleo ó bitumen se disuelve en un n-alcano, pero se adsorbe en un material activo superficialmente. Las resinas son oscuras, semisólidas, muy adhesivas y peso molecular alto [3].

2.4.3.5 Aromáticos

Son polímeros cíclicos conjugados que tienen un total de $4n + 2$ electrones pi en el anillo. Están incluidos casi en la mitad de todos los compuestos orgánicos, como: los compuestos puramente aromáticos, moléculas de cicloalcanos aromáticos (nafteno-aromáticos) y los derivados del benzotiofeno (contienen heterociclos con azufre), por ejemplo: benceno, tolueno y xileno.

El petróleo en cada yacimiento contiene hidrocarburos aromáticos en cantidades variables, en algunos yacimientos este contenido es bastante considerable. Los principales compuestos

aromáticos que se obtienen del petróleo son el benceno, tolueno y xileno, en menor medida se tienen el naftaleno y antraceno [3].

2.5 Técnicas de medida de propiedades dieléctricas

Las medidas de propiedades dieléctricas han ganado importancia desde hace unos años porque pueden ser utilizadas para la supervisión no destructiva de las características específicas de materiales que experimenten cambios físicos o químicos en procesos de diferentes campos: Petroquímica, Medicina, agricultura, vulcanizados de caucho, medidas de porcentajes de humedad, alimentos etc. Según la bibliografía hay varias técnicas para medir las propiedades dieléctricas de diferentes materiales, se pueden dividir en grupos según los principios en que se basan. Los principales grupos en los que se dividen son los siguientes: Placas paralelas, líneas de transmisión, sondas coaxiales, cavidades resonantes y técnicas de espacio libre.

A continuación, se realiza un resumen de las principales características de cada uno de ellos.

2.5.1 Placas paralelas

El método de placas paralelas consiste en intercalar una lámina delgada de material líquido o sólido entre dos electrodos construyendo un condensador, como se ve en la Figura 2.14. Se suele utilizar un medidor LCR o un analizador de impedancia. La constante dieléctrica ϵ_r' se determina a partir de la medida de la capacitancia (C) y el factor de pérdidas ϵ_r'' a partir de la medida del factor de disipación (D).

Aunque el método permite el cálculo automático de ϵ_r a partir de la capacitancia y del factor de disipación, y además es bastante preciso; su uso no se ha extendido mucho dado que tiene como inconveniente su limitado margen de frecuencia de trabajo y la necesidad que las muestras a medir sean láminas planas y lisas.

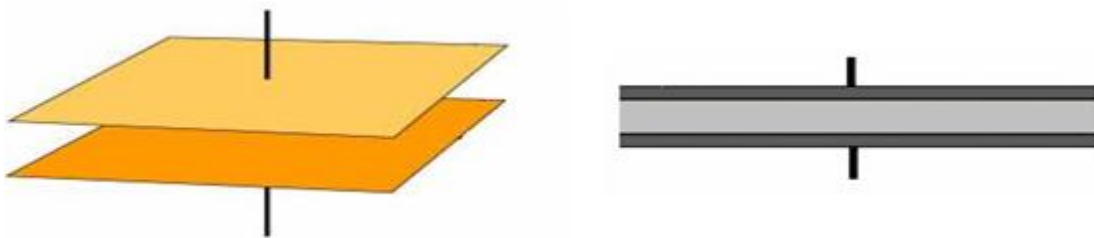


Figura 2.14. Técnica de medida de placas paralelas

2.5.2 Líneas de transmisión

Otra forma de medir la permitividad de un material, es utilizarlo como parte de una línea de transmisión, y estudiar el comportamiento de los campos que se propagan por dicha línea. Generalmente tres tipos de línea de transmisión son usados: Guías rectangulares, líneas coaxiales ó líneas microstrip como se ven en la Figura 2.15.

Con estos métodos se puede determinar tanto la permitividad ϵ_r como la permeabilidad μ_r que se calculan a partir de las medidas de la señal reflejada (S11 y S22) ó transmitida, y refleja simultáneamente (S21 y S12) obtenidas generalmente con un Analizador de Redes.

A partir de estas medidas, la solución electromagnética nos lleva a ecuaciones trascendentales con múltiples soluciones, de las cuales solo una proporciona el valor correcto de permitividad buscado. Debido a esto, se requiere una estimación inicial o conocimiento previo de las propiedades dieléctricas de las muestras a medir. Este problema ha sido resuelto por Travelsi y Nelson mediante el uso de medidas a diferentes frecuencias.

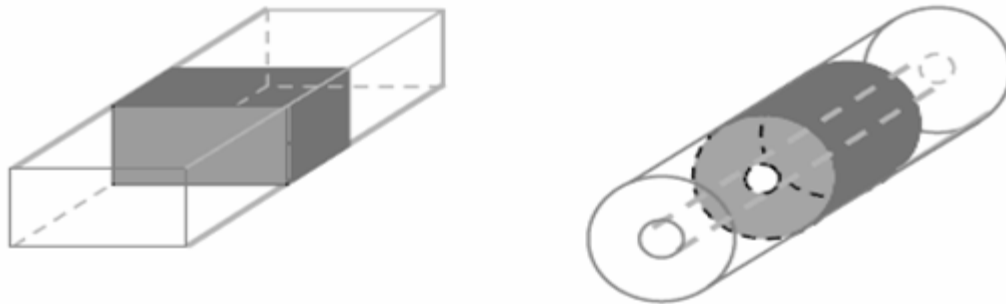


Figura 2.15. Técnica de medida de líneas de transmisión

En general, el método de línea de transmisión es más apropiado para materiales sólidos que permiten ser mecanizados de forma precisa para adaptarse en el interior de una guía o un coaxial con aire. Aunque es un método más preciso que la técnica de sonda coaxial, su resolución para materiales con pocas pérdidas es muy limitada debido a la incertidumbre en fase del Analizador de Redes.

2.5.3 Sonda Coaxial

La sonda coaxial terminada en abierto es básicamente una sección cortada de línea de transmisión. Las propiedades dieléctricas del material se obtienen situando la sonda en contacto directo con la cara plana de un sólido o sumergiéndola en un líquido o semisólido.

Cuando los campos que emergen por el final abierto de la sonda llegan al extremo y se encuentran con el material, produciéndose una discontinuidad, por lo que parte de ella se reflejará de nuevo hacia la fuente, mientras que otra parte de la señal seguirá hacia delante, y penetrará en el material (Ver Figura 2.16). Una vez dentro del material, parte de la señal que se propaga va siendo absorbida por éste, por tanto, la constante de propagación es distinta, ya que depende del material, así como su longitud de onda, etc.

Se puede decir, entonces, que la relación entre la potencia electromagnética que transportaba la línea y aquella que retorna de nuevo hacia la fuente depende en gran medida del material en que se halla inmerso el extremo de la sonda.

A partir del análisis de la señal reflejada (S_{11}) se puede calcular la permitividad compleja (ϵ_r) [2]. Un sistema de sonda coaxial típico está formado por un analizador de redes, una sonda coaxial y un ordenador externo que cuente con los programas necesarios.

Para que un material se pueda medir con éxito con una sonda coaxial, debe cumplir dos condiciones. En primer lugar, debe rellenar por completo el espacio infinito en el cual van a emerger los campos provenientes de la sonda. En segundo lugar, debe ser un material homogéneo. En la práctica, la primera condición no se puede cumplir nunca, sin embargo, es suficiente con que las señales que se lleguen a los bordes del material y se reflejen hacia la fuente, sean absorbidas suficientemente como para que su contribución a la potencia incidente en la fuente sea despreciable.

Las principales ventajas que se tiene al usar un sensor coaxial son: el amplio margen de frecuencias a las que se puede trabajar (de 1 a 20 GHz), el rango de permitividades y pérdidas que se pueden caracterizar, que queda cubierto en su totalidad, y por último, que no se necesita prácticamente ninguna preparación de la muestra para poder realizar las medidas, lo que permite una fácil implementación del sensor en entornos de temperatura o presión

controladas, o la inserción del sensor para el control de procesos industriales sin que éste interfiera en dichos procesos.

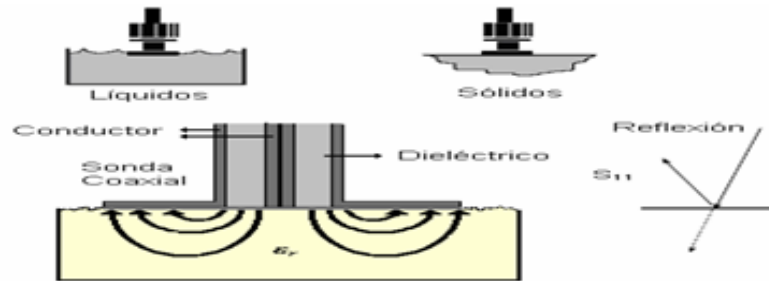


Figura 2.16. Técnica de medida de sonda coaxial

También se presentan inconvenientes en la medida debido a la aparición de huecos de aire en la transición sonda-muestra, lo que afecta la precisión en la medida. Esto ha limitado el uso de esta técnica a materiales líquidos, semilíquidos ó sólidos.

2.5.4 Cavidades Resonantes

Esta técnica se basa en la utilización de resonadores de microondas total o parcialmente rellenos con el material cuya permitividad compleja se desea medir (Ver Figura 2.17). Hay muchas estructuras posibles que actúan como resonadores (láminas, cilindros, cubos, esferas, etc.).

Cuando la muestra del material se introduce en el interior de la cavidad se produce una variación de la frecuencia de resonancia, así como también del factor de calidad Q . A partir de los cambios experimentados por estos parámetros y mediante métodos perturbacionales o expresiones directas según el tipo de resonador o la forma de la muestra se puede calcular la permitividad compleja o la permeabilidad del material estudiado, para un valor de frecuencia específico (frecuencia de resonancia).

Aunque las medidas obtenidas por este método suelen proporcionar valores precisos están limitadas por el tamaño y permitividad de las muestras, pues están sujetas a requerimientos de perturbaciones mínimas para poder estar en el ámbito de aplicación de las aproximaciones. Para expandir su uso cuando los materiales no presentan muy bajas pérdidas se han obtenido

algunos factores de corrección a partir del análisis completo de algunos modos específicos en la cavidad.

Un sistema de medida que utilice esta técnica debe constar de un analizador de redes al cual se le conectaría la cavidad resonante (rectangular o cilíndrica) y un ordenador para procesar los datos obtenidos en las medidas.

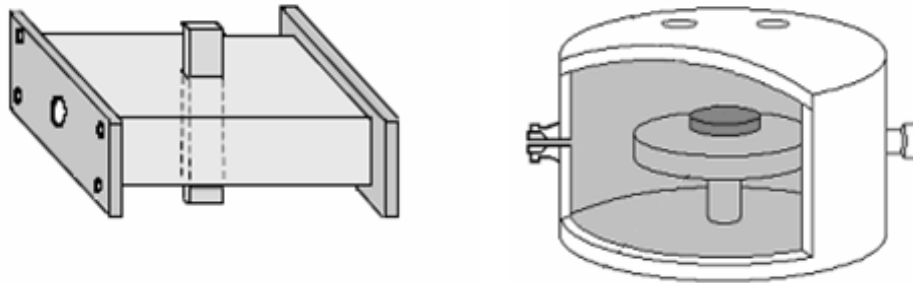


Figura 2.17. Técnica de medida de cavidades resonantes

Dentro de los inconvenientes que presenta esta técnica de medida se pueden mencionar los siguientes: Suministra datos solo para una frecuencia y requiere que las muestras tengan una forma específica.

2.5.5 Técnica de espacio libre

Las técnicas de espacio libre utilizan antenas para enfocar la energía de microondas hacia una plancha del material sin que se necesite ningún accesorio (Ver Figura 2.18). Se puede utilizar tanto en reflexión como en transmisión. Los mismos algoritmos que se utilizan para la técnica de línea de transmisión se pueden aplicar para espacio libre. Estas técnicas son más apropiadas para muestras grandes, planas y delgadas que no pueden ser fácilmente situadas o que deben ser probadas a condiciones de alta temperaturas. Es una técnica que no requiere contacto y generalmente no es destructiva. Sin embargo, en la calibración hay que tener en cuenta consideraciones especiales, pues se deben usar patrones “sin conector”.

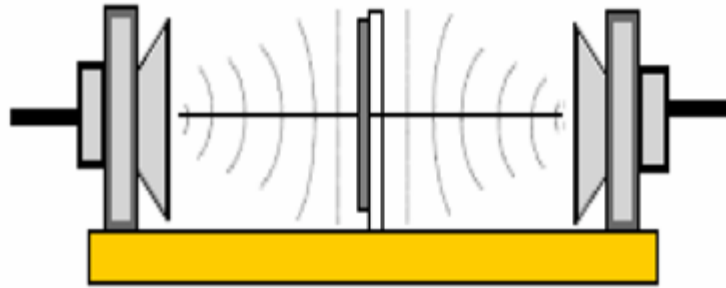


Figura 2.18. Técnicas de medida de espacio libre

Una vez descritas las distintas técnicas de medida, la selección depende de muchos factores entre los que se destacan: el margen de frecuencia de interés, el valor esperado de ϵ_r , la precisión de la medida requerida, propiedades del material (homogéneo, isotrópico etc), la forma del material, temperatura, costo etc. Dos factores muy importantes para seleccionar el método de medida adecuado son: el margen de frecuencias a las cuales se desea medir las propiedades dieléctricas y las características del tipo de material.

Respecto al primer factor mencionado, por ejemplo la técnica de placas paralelas es empleada en un margen de frecuencias bajo (40 *KHz* y 1.8 *GHz*) comparado con las técnicas de sonda coaxial y líneas de transmisión que se pueden emplear en un amplio margen de frecuencias por encima de 0.1 *GHz*. Sin embargo las técnicas que permiten las frecuencias más altas son las cavidades resonantes y las de espacio libre (hasta 100 *GHz*), pero se debe aclarar que la técnica de cavidad resonante solo suministra datos para un valor de frecuencia. Para el segundo factor mencionado, el tipo de material, se encuentra que algunas de las técnicas requieren una preparación más exigente o no de la muestra para ser medida. Por ejemplo la técnica de sonda coaxial es apropiada para líquidos o semisólidos y solo se requiere que sean de superficie lisa. La técnica de cavidades resonantes requiere formas más concretas y la técnica de placas paralelas requiere necesita una lámina plana y delgada.

2.6 Arquitectura hardware para el desarrollo del proyecto

Para el desarrollo del proyecto se hizo necesario la arquitectura Arduino que es un hardware de código abierto, basada en una sencilla placa de circuito impreso que contiene un microcontrolador de la marca “ATMEL” que cuenta con entradas y salidas, analógicas y digitales, en un entorno desarrollo que está basado en el lenguaje de programación processing. El dispositivo conecta el mundo físico con el virtual, o el mundo analógico con el digital controlando, sensores, alarmas, sistemas de luces, motores, sistemas de comunicaciones y actuadores físicos [7].

También se utiliza un circuito integrado NE555 para la captura de las señales físicas del capacitor variable y enviar estas señales eléctricas a un debido procesamiento con la placa Arduino, para después de su procesamiento ser visualizadas en un LCD 16x2. De acuerdo a esta arquitectura hardware es de fácil adquisición y bajos costos respecto a otros productos como una tarjeta Raspberry Pi3 que tiende a ser 5 veces mayor a un Arduino. A continuación, se representa la arquitectura hardware utilizada en la siguiente figura 2.19

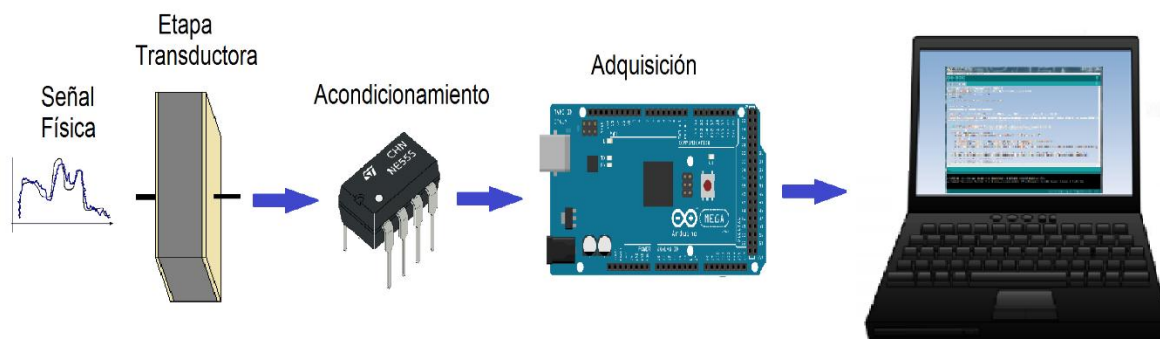


Figura 2.19. Arquitectura hardware utilizada en el proyecto.

El Arduino Mega 2560 es una placa grande y más potente, electrónicamente está basada en el microcontrolador Atmega 2560 tiene 256 KB de memoria Flash para almacenar el código de los cuales 8 KB se utiliza para el gestor de arranque, 8KB de SRAM y 4KB de EEPROM. Tiene 54 pines digitales de entrada / salida de los cuales 15 se utilizan como salidas PWM, además de 16 entradas analógicas, 4 puertas seriales, un oscilador de 16MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP, y un botón de reinicio. Para empezar a trabajar con el microcontrolador basta conectarlo a un ordenador con un cable USB o el poder

con un adaptador AC-DC o batería. A diferencia de las demás tarjetas Arduino esta puede funcionar con un suministro externos de 6 a 20 voltios.

Tabla 2.5. Características básicas de la placa Arduino Mega 2560

Voltaje de operación	7 - 12 V
Voltaje de entrada (limites)	6 – 20V
Digital pines E / S	54(de los cuales 15 proporcionan salida PWM)
Pines de entrada analógica	16
Corriente DC	40mV
Corriente CC	3.3 V 50mA
Memoria flash	256 KB
SRAM	8KB
EEPROM	4KB
Velocidad del reloj	16 MHz

2.7 Característica de los equipos de instrumentación para realizar las mediciones

Micrómetro HOPEX

Resolución: 0,01mm

Rango de medición: 0 – 25mm

Calibre HOPEX

Resolución: 0.05mm

Rango de medición: 0 – 150mm

Multímetro UT601

Especificaciones de medida del multímetro UT601 para resistencia eléctrica y capacitancia que se muestran en las siguientes tablas.

Tabla (2.6). Especificaciones para medida de resistencia eléctrica

Rango	Resolución	Exactitud	Sobrecarga de protección
20Ω	0,01Ω	±(1%+5)	250V rms
200Ω	0,1Ω	±(0,8%+3)	
2KΩ	0,001KΩ	±(0,8%+1)	
20KΩ	0,01KΩ		
200KΩ	0,1KΩ		
2MΩ	0,001MΩ	±(1%+2)	
20MΩ	0,01MΩ		
200MΩ	0,1MΩ		
2000MΩ	1MΩ	±(10%+10)	

Tabla (2.7). Especificaciones para medida de capacitancia

Rango	Resolución	Exactitud	Frecuencia de prueba
200,0pF	0,1pF	±(0,5%+10)	800Hz
2000nF	0,001nF		
20,00nF	0,01nF		
200,0nF	0,1nF		80Hz
2000μF	0,001μF		
20,00μF	0,01μF		±(2%+2)
200,0μF	0,1μF		
2000mF	0,001mF	8Hz	
20,00mF	0,01mF		

Capítulo 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

El trabajo de investigación se presenta la verificación experimental de la permitividad dieléctrica del petróleo, utilizando el método de placas paralelas debido a que las otras técnicas como: líneas de transmisión, sondas coaxiales, cavidades resonantes y técnicas de espacio libre son relativamente de alto costo por la instrumentación requerida. Para estimar su pureza según los valores de American Petroleum Institute (API).

Esta es una medida de la densidad para ver cuán liviano o pesado es el petróleo comparado con el agua a temperaturas iguales. Con el fin de verificar esta variable física se diseñó e implemento el prototipo de sensor. Para el diseño del sensor se implementó un capacitor en acrílico. Consta de porta electrodos, porta muestras y electrodos de cobre en un sustrato de baquelita, con una forma geométrica de un paralelepípedo rectangular.

Al tener el capacitor con su respectiva muestra de petróleo se estimula eléctricamente, con el circuito generador de pulsos eléctricos NE555 en modo astable. Así, la señal eléctrica de salida ante el estímulo se envía al pin analógico del hardware Arduino Mega 2560. Para obtener el resultado de la permitividad dieléctrica, mediante el procesamiento digital de esa señal con un algoritmo desarrollado. Finalmente se realizó la lectura de esa variable física, para ser visualizada en un display LM016L por cuestión de portabilidad y costo.

A continuación, se presenta de forma detallada cada procedimiento.

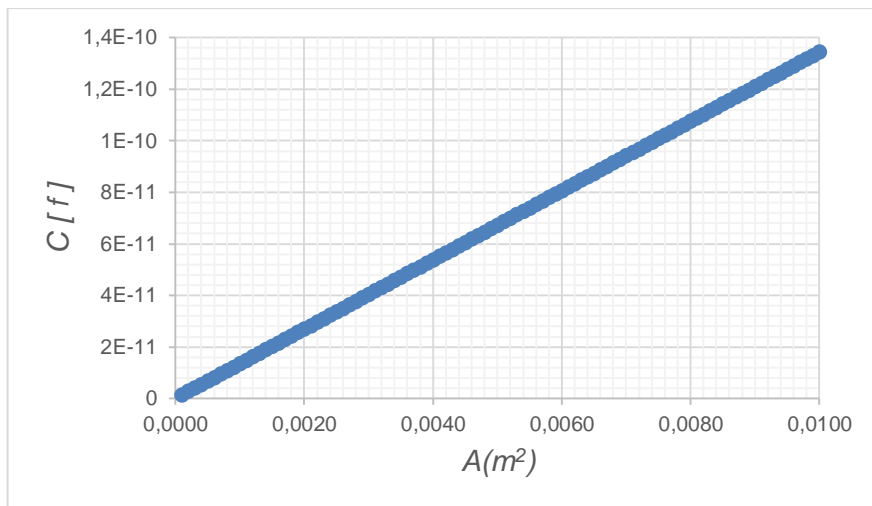
3.1 Diseño del capacitor

Teniendo en cuenta el rango de medida del instrumento patrón. Se diseñó e implementó un capacitor de acuerdo a esas características del instrumento.

El diseño se formó con dos electrodos de cobre en sustrato de baquelita, no se utilizó en otro metal y sustrato con mejores características eléctricas debido al costo. Dado que los electrodos

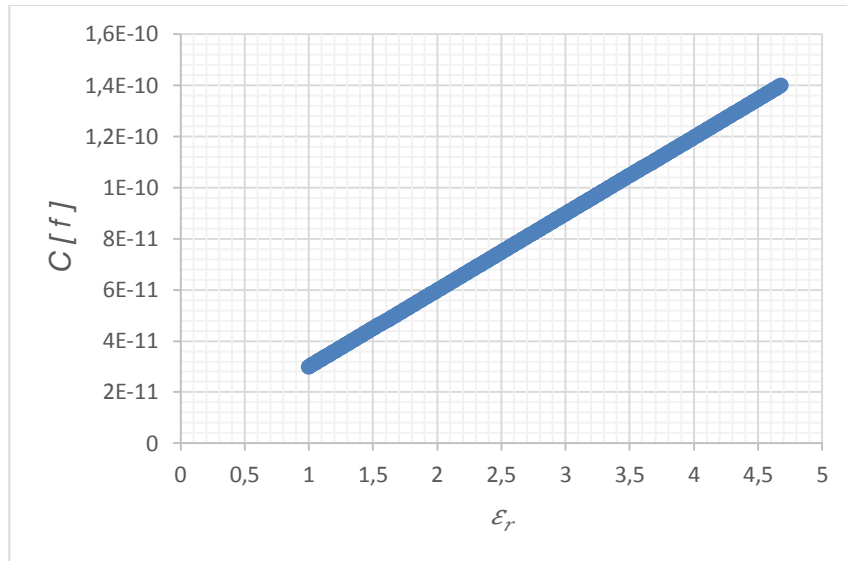
de cobre en baquelita, cumplen con las propiedades eléctricas necesarias para las medidas a realizar. Por el motivo anterior, no se utilizan voltajes de rompimiento dieléctrico de ellos y la conductividad del cobre es relativamente buena respecto a otros metales como la plata.

De acuerdo a lo anterior se modeló el primer capacitor de placas paralelas, en baquelita con cobre. Con dimensiones de 10cm x 10cm y un espesor de 1,5mm; siendo la de menor dimensión en el mercado. Se llevó a cabo el diseño de acuerdo a estos parámetros con la ecuación 2.15, como se ve la gráfica (3.1). Dado que el capacitor necesita una separación entre electrodos se utiliza una baquelita, pero sin cobre de tal forma que su espesor es de 1,45mm.



Grafica (3.1). Capacitancia total del primer diseño, con distancia de separación $d=1,45\text{mm}$ entre los electrodos y tomando la permitividad relativa del petróleo como $\epsilon_r = 2,2$.

De acuerdo al gráfico anterior se toma el valor de $0,0049\text{ m}^2$, dado que la permitividad de la muestra pueden ser mayor o menor que 2,2. Después se evaluó el mismo modelo, pero tomando como parámetros fijos la distancia de separación y el área del electrodo como se muestra en la gráfica (3.2).



Grafica (3.2). Capacitancia total en función de la permitividad con distancia de separación $d=1,45\text{mm}$ entre los electrodos y un área de $A=0,0049\text{m}^2$.

De acuerdo a los datos obtenidos se asignan los valores de distancia d y área A adecuados para medir la permitividad dieléctrica del petróleo. En el caso de la distancia d , área A y las condiciones del mercado se compran 3 baquelitas de área $A = 0,1\text{m} \times 0,1\text{m} = 0,01\text{ m}^2$ y un espesor de $1,5\text{mm}$. En primera instancia se implementó el capacitor de la siguiente figura (3.1)

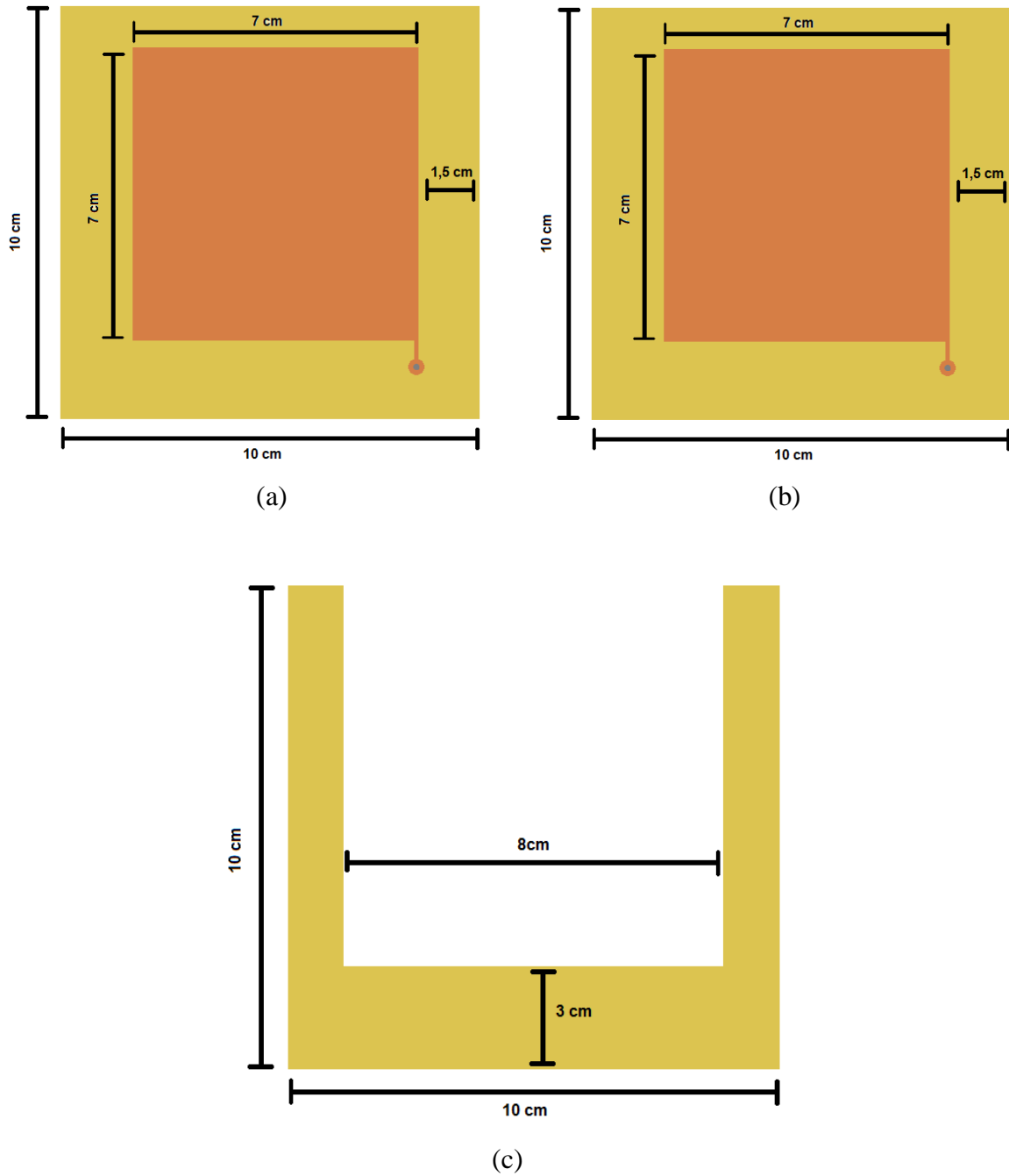


Figura (3.1). Primer prototipo del capacitor (a) y (b) electrodos en baquelita de cobre en baquelita (c) separador de electrodos

Después de tener las partes del capacitor se unen para, realizar la medida de capacitancia con las muestras de petróleo como se ve en la figura (3.2).

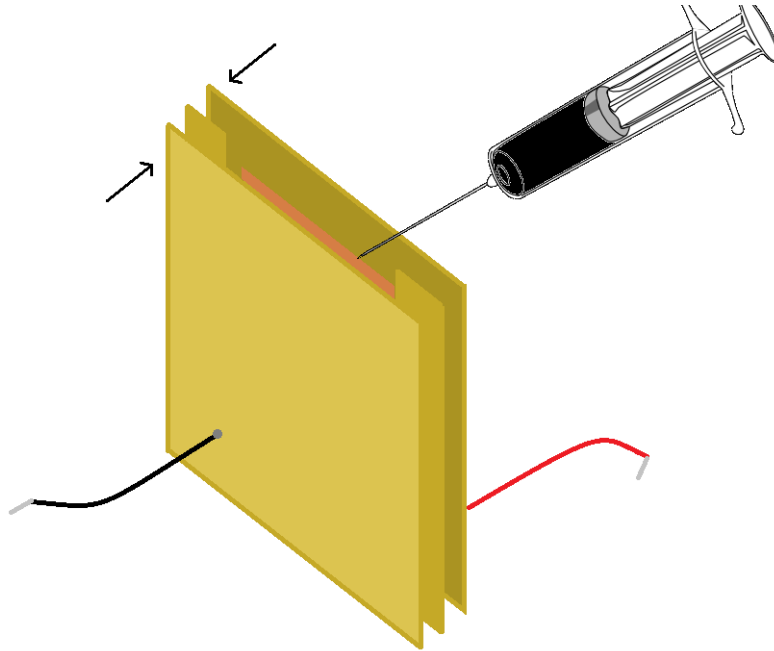


Figura (3.2). Primer prototipo completo vertiendo la muestra de petróleo

Se descarta el diseño del capacitor debido a, que las lecturas del capacitómetro patrón dieran erróneas, al verter la muestra de petróleo. Porque en primera instancia se modeló el petróleo como un dieléctrico ideal, dado que no es así, debido a la presencia de compuestos altamente conductores.

Luego de ese acontecimiento se decidió construir el segundo prototipo del mismo material, pero adicional a ello se le diseñó un porta electrodos para que estén fijos. Además, se cubrió un electrodo con un dieléctrico de baquelita del mismo material del diseño anterior. Para formar 2 capacitores en serie, donde uno de ellos está formado por la baquelita como se muestra en la siguiente figura (3.3)

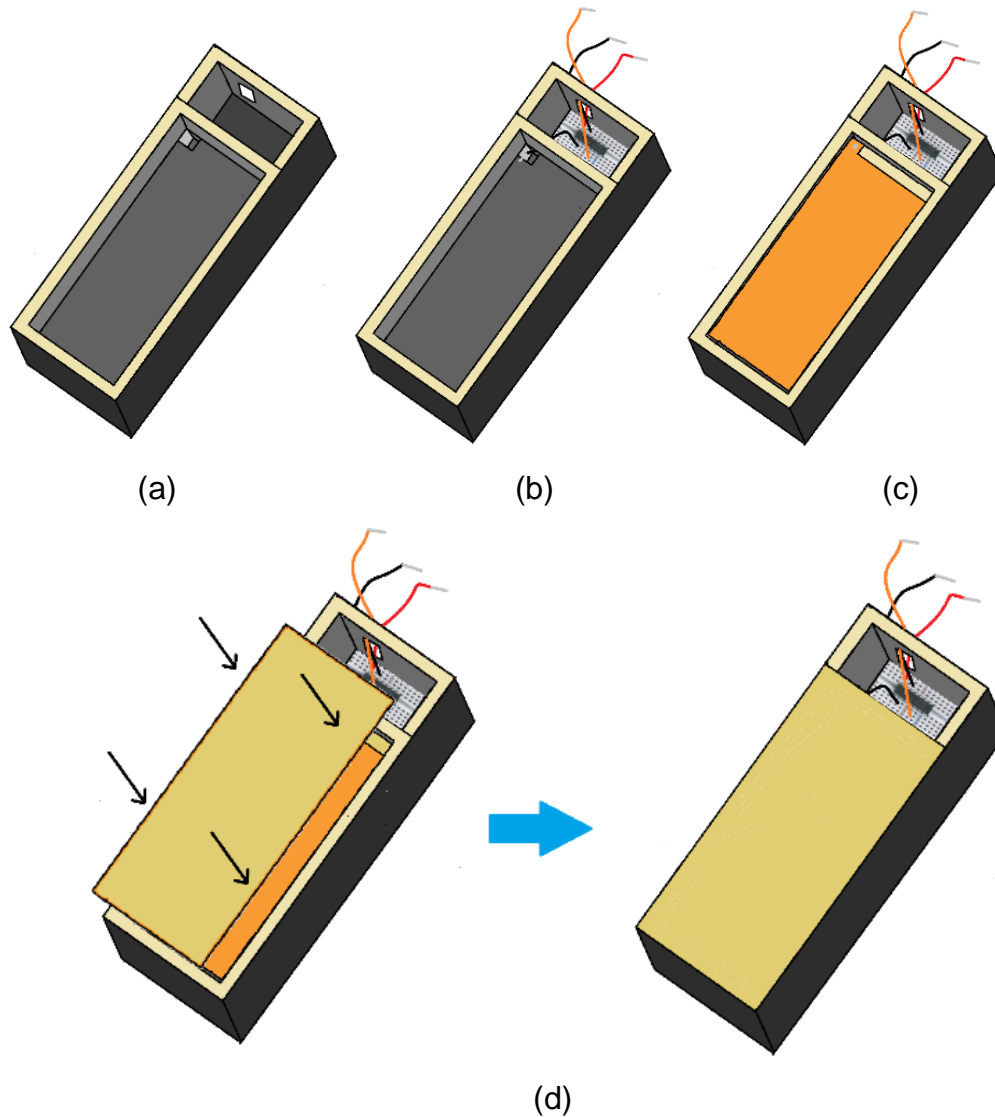
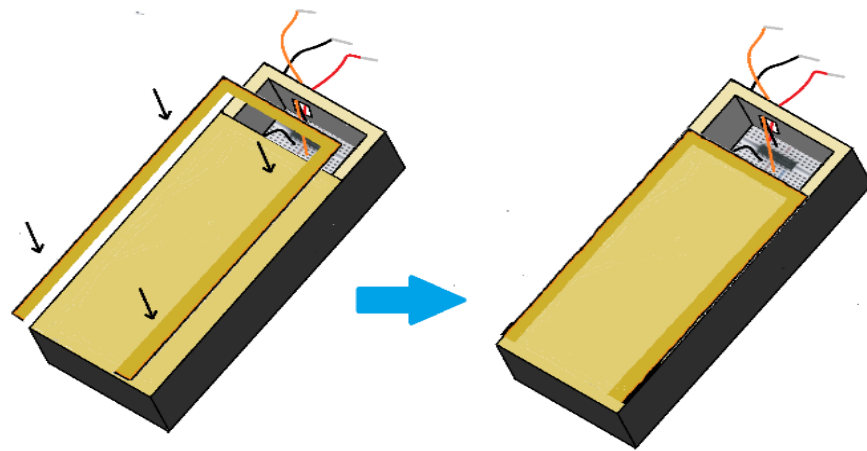
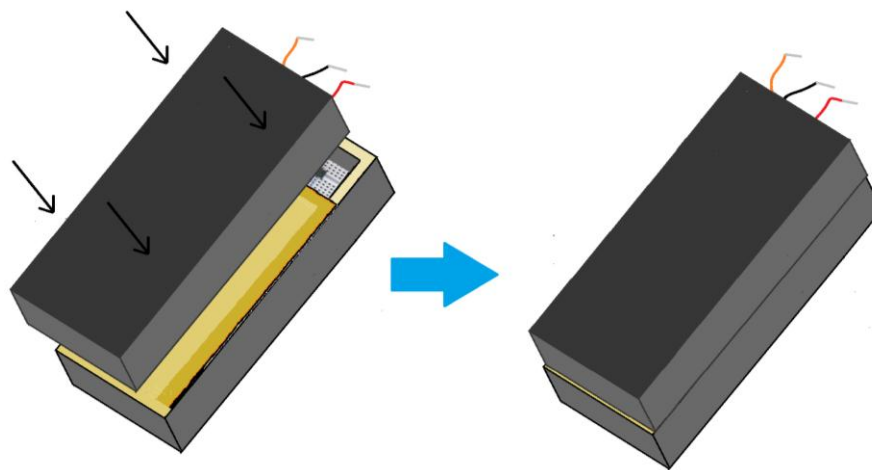


Figura (3.3). (a) porta electrodos, (b) se le adiciona la unidad electrónica (c), luego el electrodo (d) y se cubre el electrodo con baquelita.

y el otro capacitor espaciando con un marco de baquelita, para después ser unidos los porta electrodos y formar los capacitores en serie como se muestra en la figura (3.4)



(a)



(b)

figura (3.4). (a) Se le adiciona a la figura (3.3) el marco en baquelita (b) para finalmente unir el otro porta electodos y formar los capacitores en serie.

De acuerdo a lo anterior se vierte la muestra de petróleo, para medir la permitividad dieléctrica según los valores de diseño.

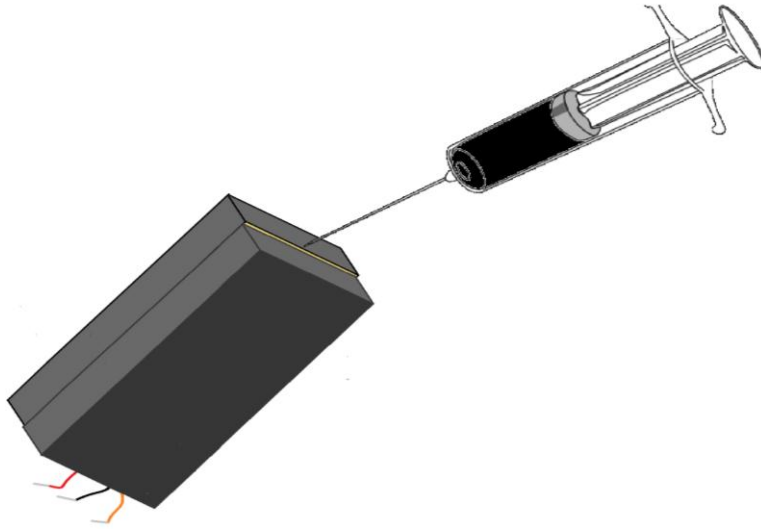


Figura (3.5). Segundo prototipo completo vertiendo la muestra de petróleo.

Para el segundo diseño se modelo el capacitor de acuerdo a la ecuación 2.32, dejando como parámetros fijos el área $A=0,00345\text{m}^2$, la distancia de separación $x=d=1,45\text{mm}$ la y permitividad del capacitor de baquelita como $\epsilon_r=4$.

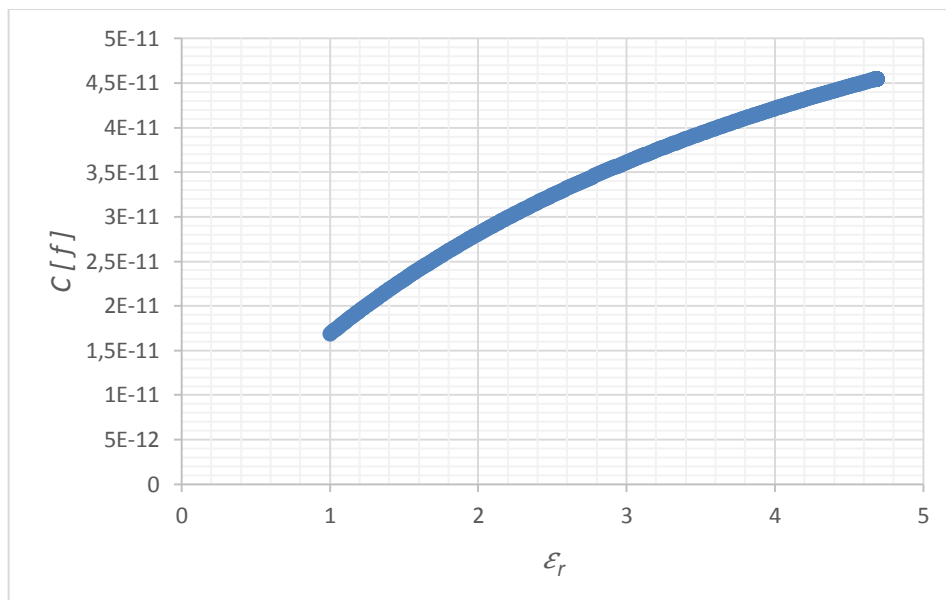


Grafico (3.3). Capacitancia total de acuerdo a los parámetros dieléctricos para el segundo diseño.

Por consiguiente, con el segundo diseño se logró obtener mediciones de capacitancia por breve tiempo, debido a inconvenientes de filtración y manipulación de la muestra en el capacitor. Dado esto genero señales erróneas en la medida de capacitancia del diseño.

Para poder solucionar el problema del segundo prototipo se diseñó un tercero, que se acondiciono con un porta muestras de 1mm de espesor y cubriendo los dos electrodos con baquelita de espesor de 1,45mm. Además, para la manipulación de la muestra es más estable. Debido a que se podía verter la muestra dejando el sistema en una superficie plana, sin estar sosteniéndolo de forma vertical para evitar que se salga la muestra como el segundo prototipo.

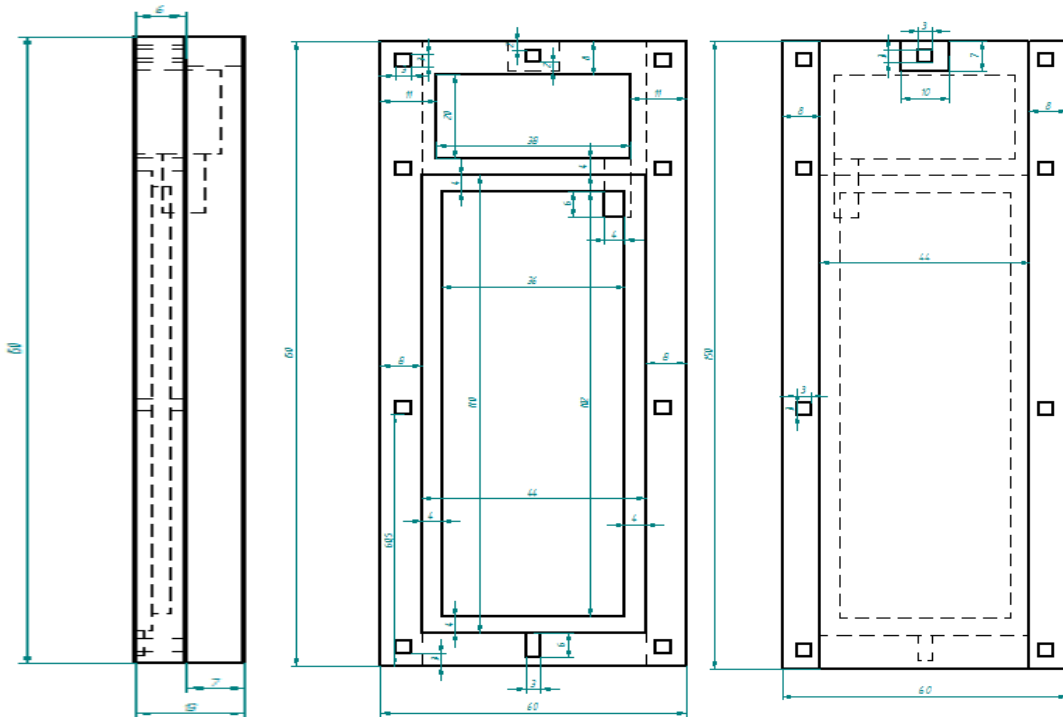


Figura (3.6). Planos del porta electrodo inferior de diversas vistas del tercer prototipo

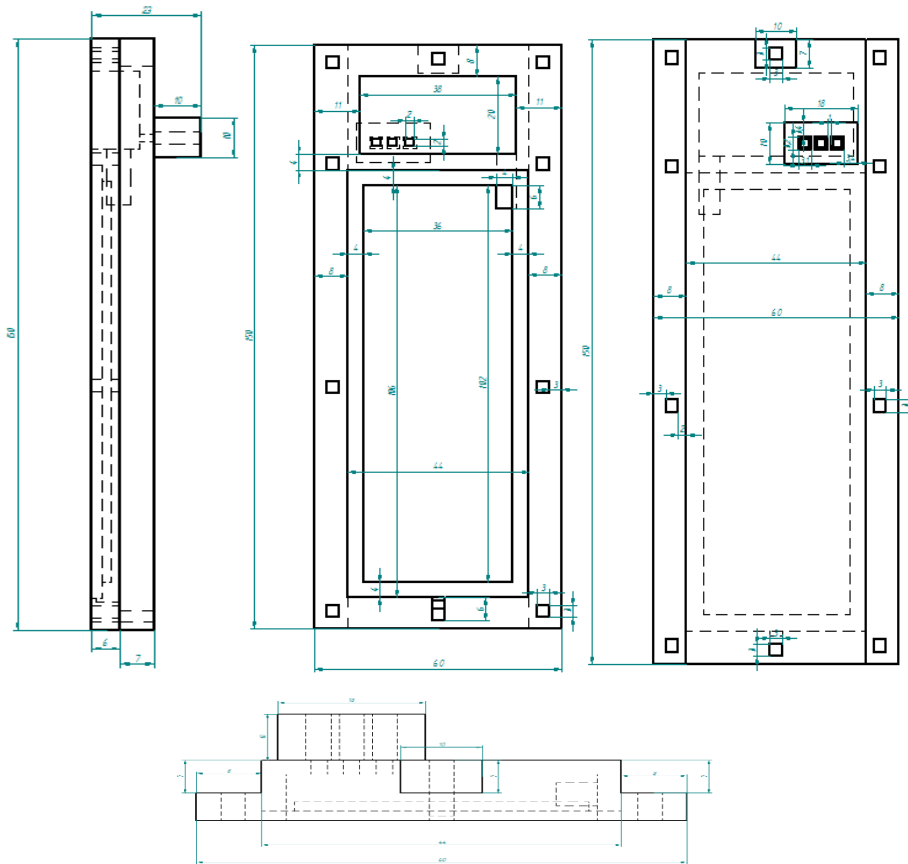


Figura (3.7). Plano de porta electrodo superior de diversas vistas del tercer prototipo

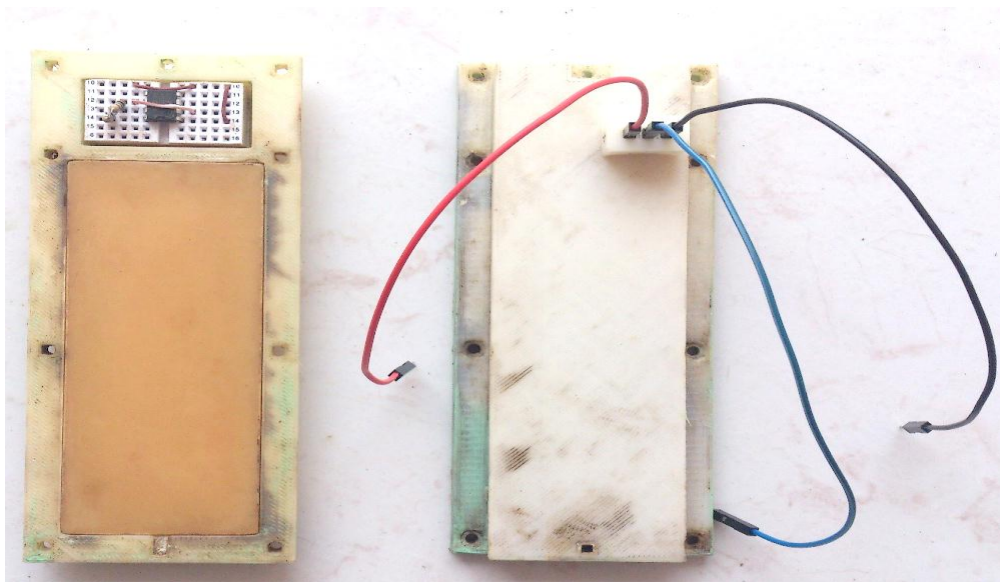


Figura (3.8). Porta electrodo superior e inferior con sus electrodos y los componentes eléctricos para su debida medida.

El tercer prototipo se modelo de acuerdo a la siguiente figura (3.9)

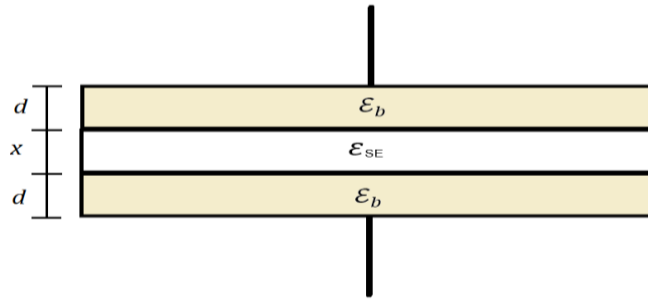
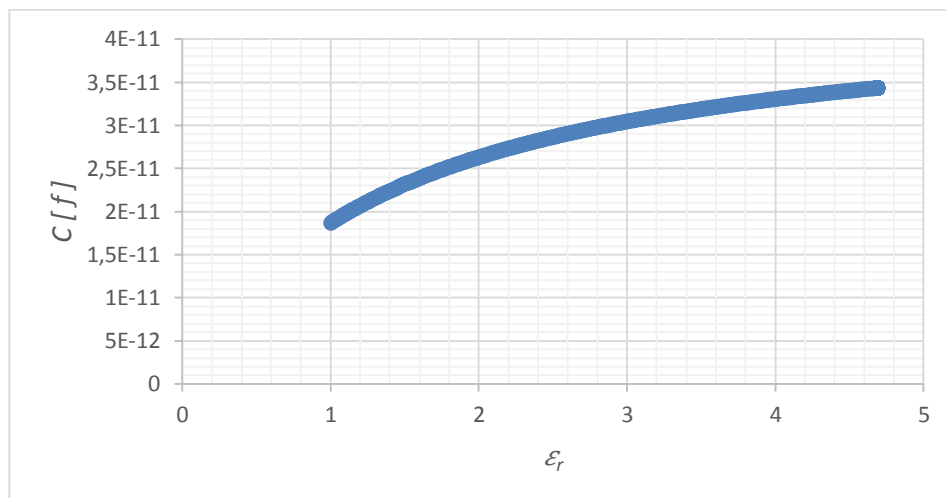


Figura (3.9) Capacitor con tres dieléctricos.

En este caso el modelo de capacitancia queda de la siguiente forma:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_b \epsilon_{SE} \frac{A}{\epsilon_b x + 2\epsilon_{SE} d} \quad (3.1)$$

Teniendo en cuenta que $\epsilon_b = 4$ es la permitividad eléctrica de la baquelita, $d = 1,45mm$ el espesor de la baquelita, $x = 1,00mm$ el espacio de la muestra y un área A de $0,003636m^2$ del electrodo. De esta forma el comportamiento de capacitancia esperado es de acuerdo a la ecuación (3.1) como se observa en la siguiente grafica (3.4)



Grafica (3.4). Capacitancia en función de la permitividad para el tercer prototipo.

Se descarta este prototipo por problemas de viscosidad de las muestras, al tener un espacio muy reducido donde se vierte el petróleo y por consiguiente no fluía. Por esta razón se es

necesario ampliar ese orificio y su espaciamento de la muestra como se indica para el ultimo prototipo.

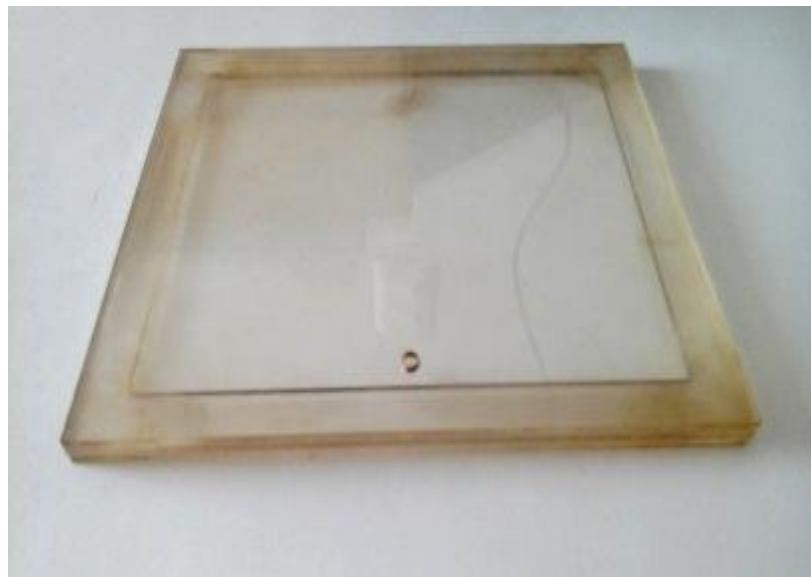
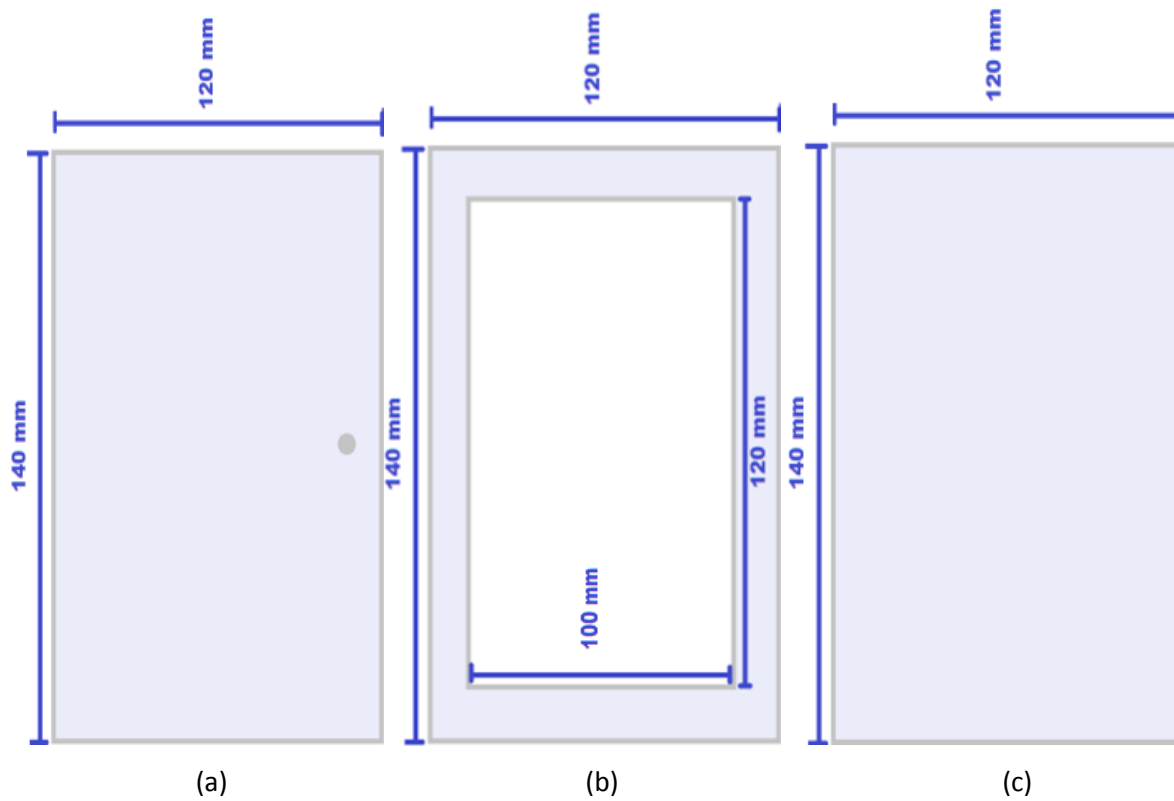
Para el condensador plano de placas paralelas, los efectos de los bordes son despreciables debido a que la separación entre placas es mucho menor que la dimensión lineal de éstas. Por esa razón se tomó el modelo de la ecuación 3.1.

En caso contrario la ecuación 3.1 debe sustituirse por una aproximación mejor. Si se trata de dos placas rectangulares finitas, con anchura a , longitud l y separación d , una fórmula más correcta es la ecuación 2.35.

Teniendo en cuenta las características de los prototipos anteriores, se realizó un diseño final para la implementación del prototipo de capacitor con placas paralelas. A este prototipo se hizo necesario un porta muestras en acrílico con forma de paralelepípedo rectangular, para evitar que las muestras tuvieran contacto con todo el sistema y así tener mejores lecturas del capacitor formado. Dado que el acrílico es utilizado para gran parte del diseño por su buen costo, rigidez, permitividad dieléctrica, y maleabilidad para esta aplicación, donde medida de su espesor es 2,40mm.

Los cortes del material se hicieron en una máquina de control numérico computarizado (CNC), de la empresa DEMOSS PROTOTIPADO SAS. El diseño de este porta muestras tiene tres piezas, una superior con las siguientes medidas 140mm x 120mm y un orificio para verter el petróleo como se muestra en la figura (3.10a), la pieza intermedia se le realizo dos cortes uno externo de medidas 140mm x 120mm y otro en el interior con mediciones de 120mm x 100mm expuesta de la figura (3.10b), por último, la pieza inferior tiene cortes de 140mm x 120mm como se observa en la figura (3.10c).

Al tener cortadas las piezas se realiza la unión de ellas para formar el porta muestras como se ve en la figura (3.10d). A continuación se observan los diseños y el ensamble total.



(d)

Figura (3.10). Diseño y ensamble del porta muestra. Pieza superior (3.10c), Pieza intermedia (3.10b), Pieza inferior (3.10a) porta muestras ensamblado.

Después de tener el porta muestras se diseñan los electrodos de cobre que están en un sustrato de baquelita, con una forma geométrica de paralelepípedo rectangular de medidas 120mm x

70mm. Como se observa en la figura (3.11a), cortadas en la máquina de control numérico computarizado (CNC) de la empresa DEMOSS PROTOTIPADO SAS. Al tener listo el corte del electrodo se dispone a retirar parte del cobre de la baquelita con cloruro férrico disuelto en agua al ponerlo en contacto con el electrodo. La parte de cobre retirado es la superior izquierda con medidas de 65mm x 5mm y así tener el resultado que se observa en la figura (3.11b).

En este se deja un área de 25mm^2 de cobre en el que se le realizo un orificio, para soldar el cable jumper con estaño del respectivo electrodo que se ve en la figura (3.11c).

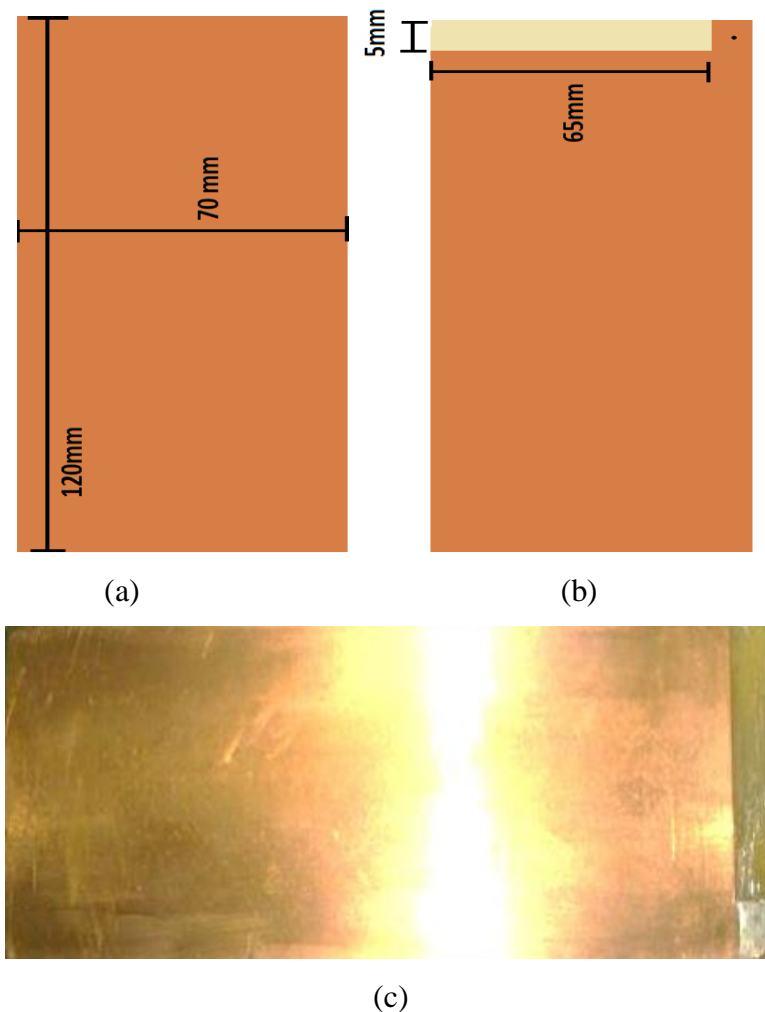
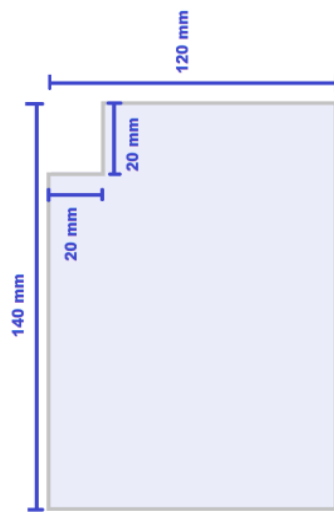


Figura (3.11). Diseño de los electrodos de cobre en baquelita. Corte del electrodo (3.11a), circuito impreso con un respectivo orificio para soldar un cable.

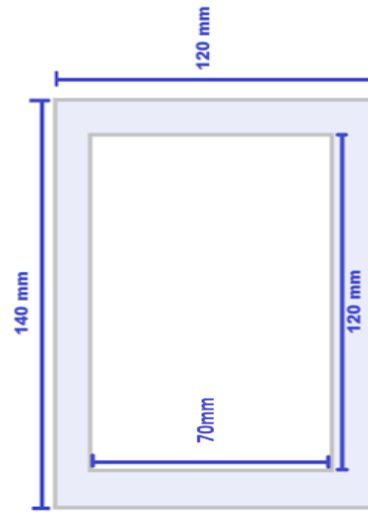
Por consiguiente, se diseñan los porta electrodos para tenerlos fijos. Estos deberán ajustarlo evitando algún tipo de corrimiento, ya que de lo contrario causaría errores en la señal.

Este diseño está dividido en dos partes: uno como soporte del electrodo, en el que está cortado con una máquina de control numérico computarizado (CNC) con medidas de 140mm x 120mm y en su esquina superior izquierda de 20mm x 20mm como se mira en la figura (3.12a). La segunda parte hace como marco fijador del electrodo con dimensiones del corte externo de 140mm x 120mm y otro interno de 120mm x 70mm como se ve en la figura (3.12b).

De esta forma de unen para formar el porta electrodos con su respectivo electrodo como se observa en la figura (3.12c) por ambas caras



(a)



(b)

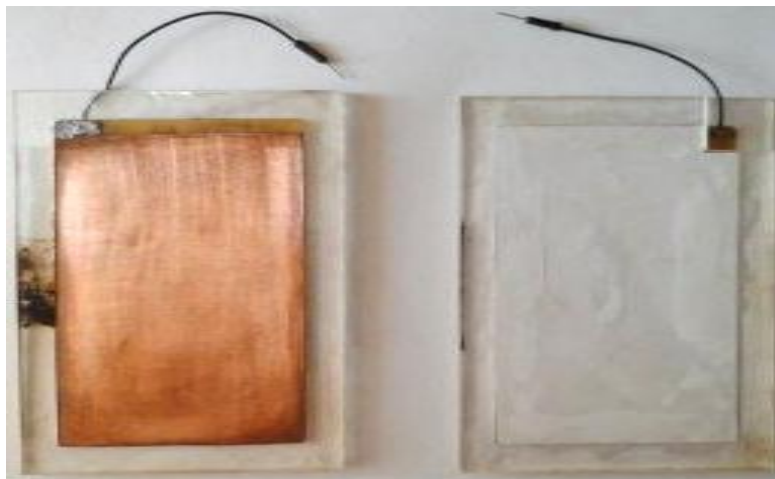
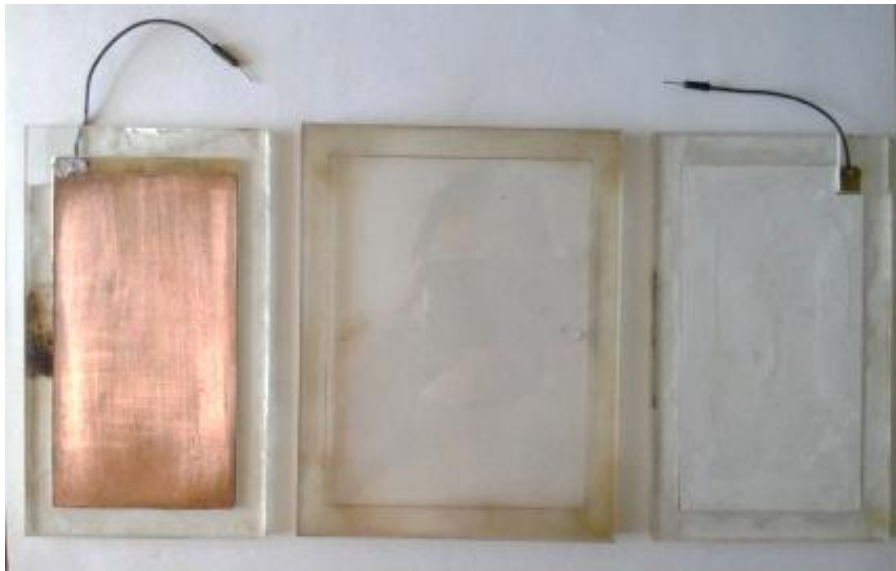
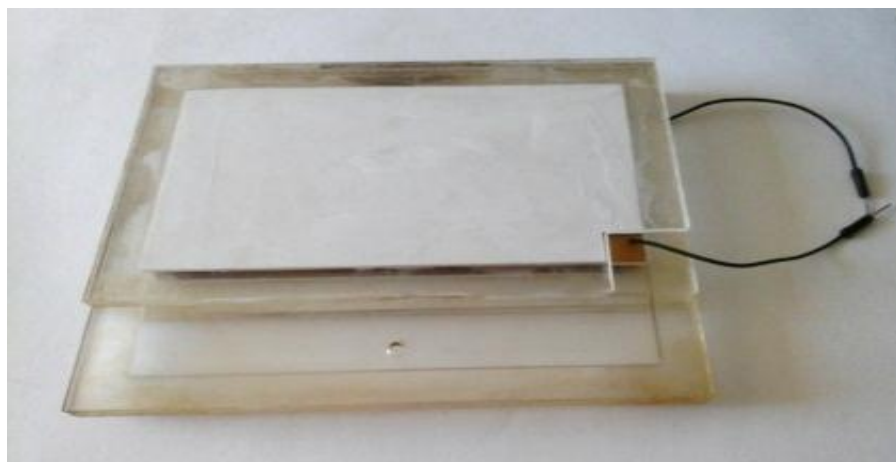


Figura (3.12). Diseño de las piezas del porta electrodo en acrílico. Diseño del soporte de electrodo (3.12a), Diseño del marco fijador del electrodo (3.12b) y (3.12c) ambas caras del porta electrodos con el electrodo.

Al disponer de todas las piezas del capacitor se procese a ensamblarlo como se representa en la figura (3.13). Posteriormente se realizar su debida caracterización capacitiva, con el sistema de medición capacitivo y el instrumento de medida patrón UNIT-UT601



(a)



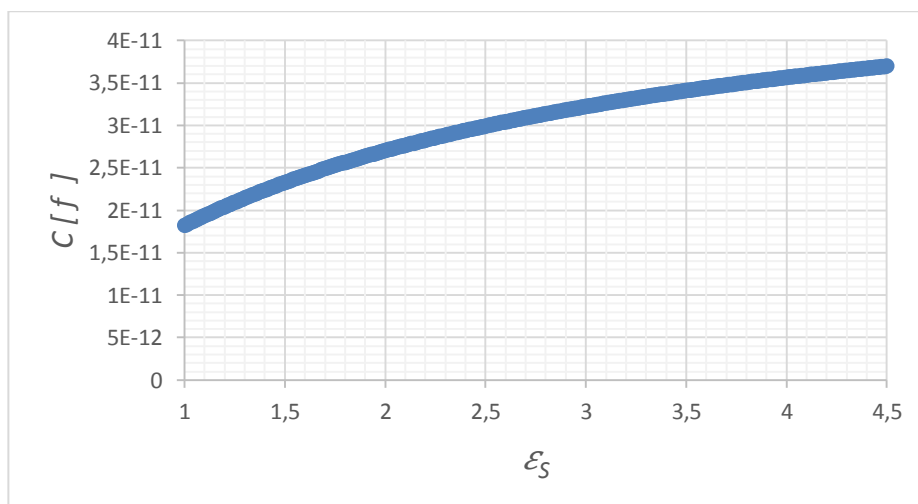
(b)

Figura (3.13). Ensamble de todas las piezas del capacitor de placas paralelas. Piezas del capacitor (3.13a), capacitor de placas paralelas ensamblado (3.13b).

Tenido en cuenta las características del diseño la ecuación resultante es la siguiente.

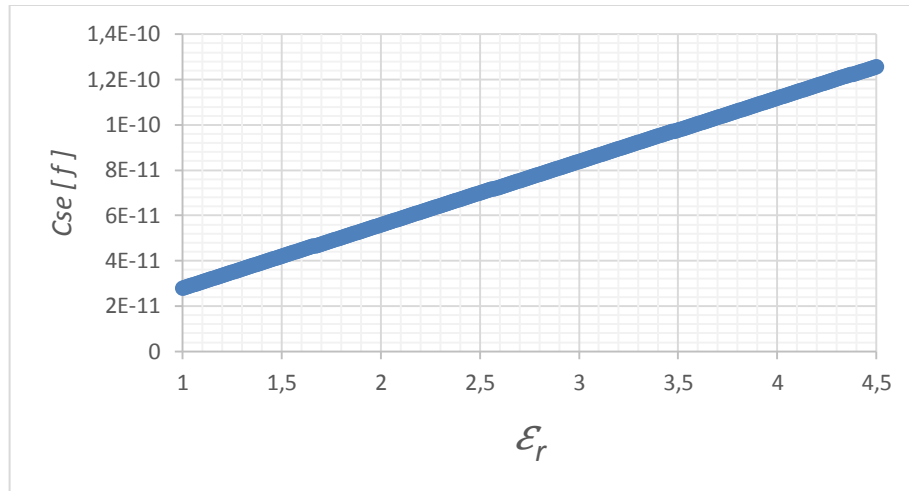
$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_A \varepsilon_S \frac{A}{\varepsilon_A x + 2\varepsilon_S d} \quad (3.2)$$

De acuerdo a la ecuación (3.2), el comportamiento de la capacitancia total en función de la permitividad ε_S es el siguiente.



Grafica (3.5). Comportamiento esperado de la capacitancia de acuerdo a la permitividad de la muestra.

Y para la capacitancia formada por la muestra tendría el siguiente comportamiento.



Grafica (3.6). Capacitancia del sensor en función de la permitividad dieléctrica de la muestra.

3.2 Sistema de medición capacitivo

En la investigación, el sistema de medición capacitivo que se optó fue un multivibrador que no tiene ningún estado estable, lo que significa que posee dos estados "cuasi-estables" entre los que conmuta, permaneciendo en cada uno de ellos un tiempo determinado. En este caso específico se utiliza el circuito integrado NE555 por su bajo costo y error de medida sin acondicionamiento técnico riguroso, como en el caso de un puente de Wien. El circuito integrado se acondiciona en modo astable en el que la frecuencia de oscilación es de la forma

$$f = \frac{1,44}{C(R2 + 2R1)} \quad (3.3)$$

Donde se implementó valores de resistencias, para R1 y R2 de $10M\Omega$, un voltaje de polarización de cinco voltios 5v y C es la capacitancia variable del diseño como se muestra en la siguiente figura (3.14)

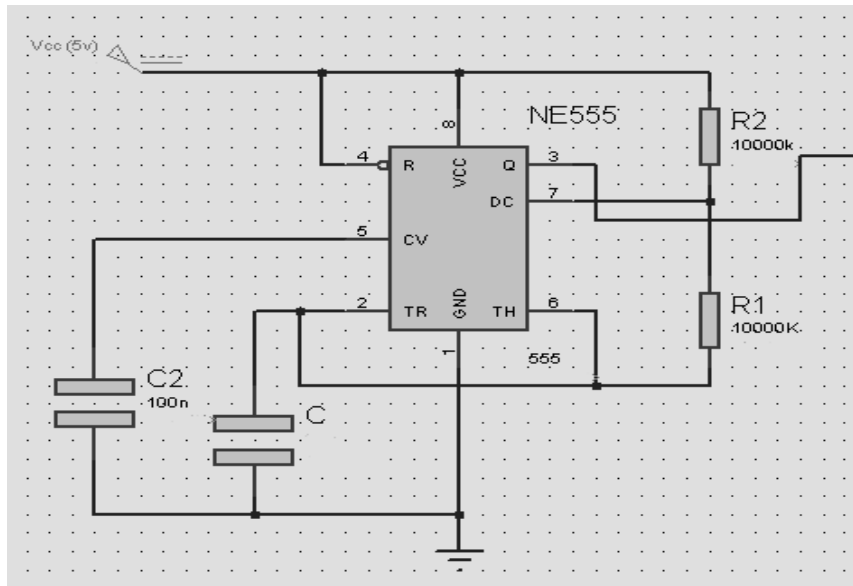
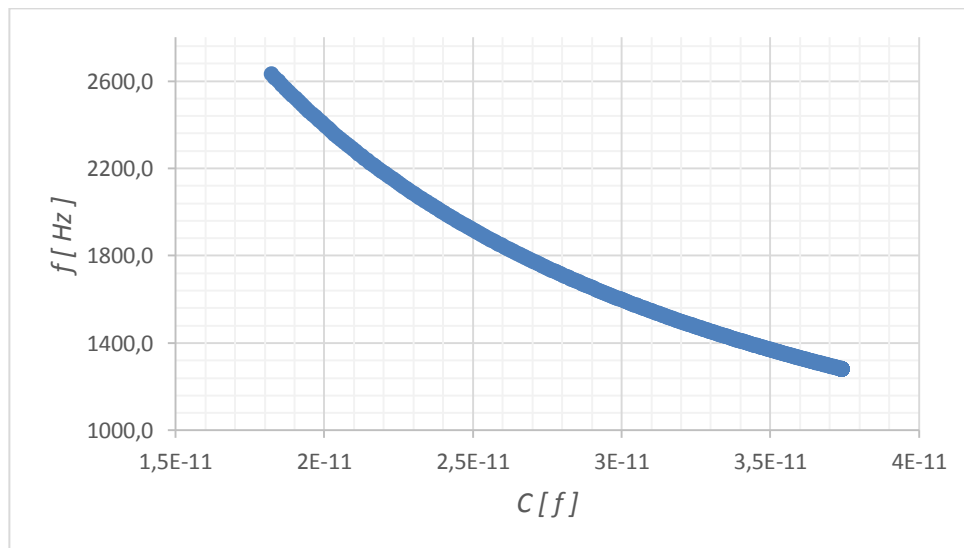


Figura (3.14). Diseño del multivibrador NE555 en modo astable.

Con este diseño se espera que tenga que la frecuencia tenga el siguiente comportamiento de acuerdo al capacitor diseñado a medida que aumenta el valor de la permitividad dieléctrica de la muestra.



Grafica (3.7). Frecuencia esperada por los cambios de permitividad de la muestra del capacitor.

La implementación eléctrica del sistema oscilador se hizo en una protoboard y no en un circuito impreso. Debido a que la soldadura en este generaba capacitancias parasitas. Por esta

razón la señal esperada no sería la más óptima posible de acuerdo al modelo. De esta forma se solucionó el problema porque las conexiones en ella están aisladas por material dieléctrico y no había puntos tan cercanos de soldadura.

Al tener acondicionado el generador de señales dependiente del valor de la capacitancia, se hace necesario utilizar esa señal de salida del pin 3 para conectarse al hardware Arduino mega 2560, que posteriormente es el que realizara el tratamiento digital de la señal capturada por su pin analógico A0 mediante un algoritmo desarrollado en la plataforma de Arduino.

En la siguiente figura (3.15) se ve la respectiva conexión eléctrica anteriormente mencionada.

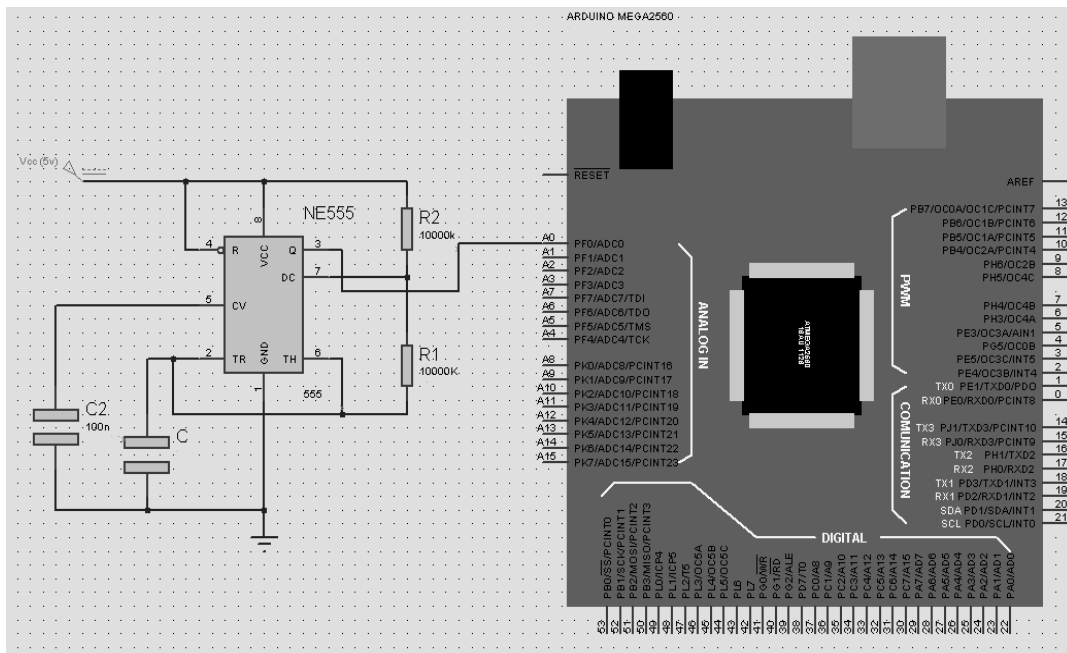


Figura (3.15). Conexión eléctrica del hardware Arduino Mega 2560 con el diseño del generador de señales NE555 en modo astable.

Después de tener la implementación del hardware anterior, se dispuso a realizar el tratamiento digital de la señal por el hardware Arduino mega 2560, mediante el desarrollo de un algoritmo que permitió estimar el valor de la permitividad dieléctrica del petróleo según las variables geométricas del capacitor diseñado y las del generador de señales. Para realizar esta fase se utilizó el software de programación Arduino que se encuentra en la página web <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>, para el sistema operativo de Windows. Este

software se instaló en una computadora (ACER ASPIRE S3) en el que tiene una interfaz gráfica como la siguiente figura (3.16).

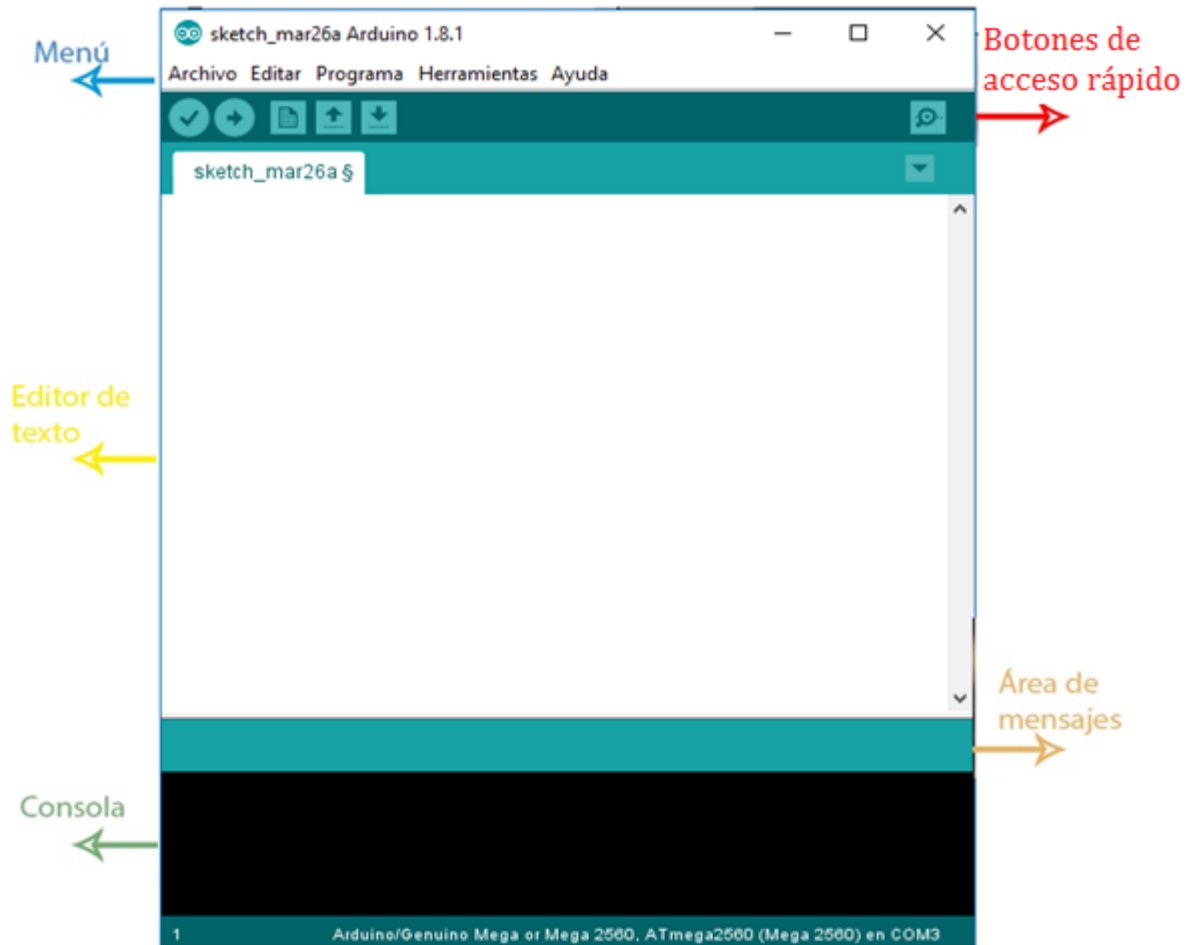


Figura (3.16). Descripción de partes de la Interfaz gráfica del software de programación Arduino.

En primera instancia se desarrolla un algoritmo para estimar los valores de capacitancia, de acuerdo a la frecuencia de oscilación, mirar en anexo A. Para la implementación se tienen en cuenta las diferentes señales enviadas por los capacitores cerámicos, en el sistema multivibrador NE555 en modo astable. Después de obtener los valores mediante el algoritmo e imprimirlo en la interfaz gráfica de Arduino, se realiza la caracterización capacitiva con ayuda de un instrumento patrón UNIT-UT 601. A continuación, se muestra los valores de capacitancia del sensor y del instrumento patrón en la tabla (3.1).

Tabla (3.1). Valores de medida del capacitmetro UT-601 y el prototipo de sensor.

Capacímtero UT-601 (C_{UT}) (pF)	Prototipo de Sensor (C_{SE}) (pF)
20.27	20.07
22.23	22.01
26.47	26.44
30.30	30.15
39.40	39.22
48.67	48.58
58.20	58.26
74.40	74.42
84.70	84.83
97.17	97.52
149.60	150.97
221.00	221.24
277.00	280.47
328.66	330.53
468.66	470.66
558.00	560.43
681.00	690.74

Posteriormente, se diseñó un nuevo algoritmo para medir la permitividad dieléctrica del petróleo, mirar anexo B. Tenido en cuenta el valor de la capacitancia del sensor, la permitividad dieléctrica del aire, área de los electros y su respectiva distancia de separación como lo muestra la ecuación (3.4)

$$\epsilon_r = \frac{C_{SE}d}{\epsilon_0 A} \quad (3.4)$$

ϵ_r = Permitividad dielectrica del petroleo

ϵ_0 = 8.8542×10^{-12} faradios/metro

C_s = Capacitancia del sensor

$A = 0.00805m^2$; $d = 0.00240m$

El cálculo de la permitividad eléctrica se visualiza a través de un display LM016L, lo cual permite eficiencia energética y portabilidad del sensor (figura 3.18). Para realizar la conexión

entre el display y el hardware Arduino mega se conectan los pines como se muestra en la figura (3.17) y se diseña un algoritmo en Arduino para realizar la interfaz entre los dos hardware, como se muestra a continuación.

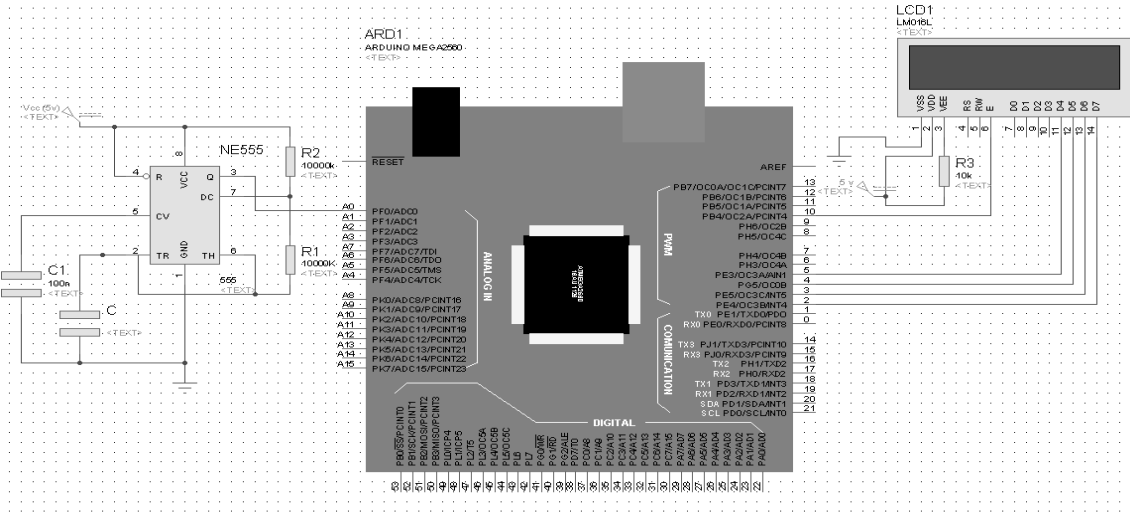


Figura (3.17). Diseño eléctrico completo del prototipo de sensor.

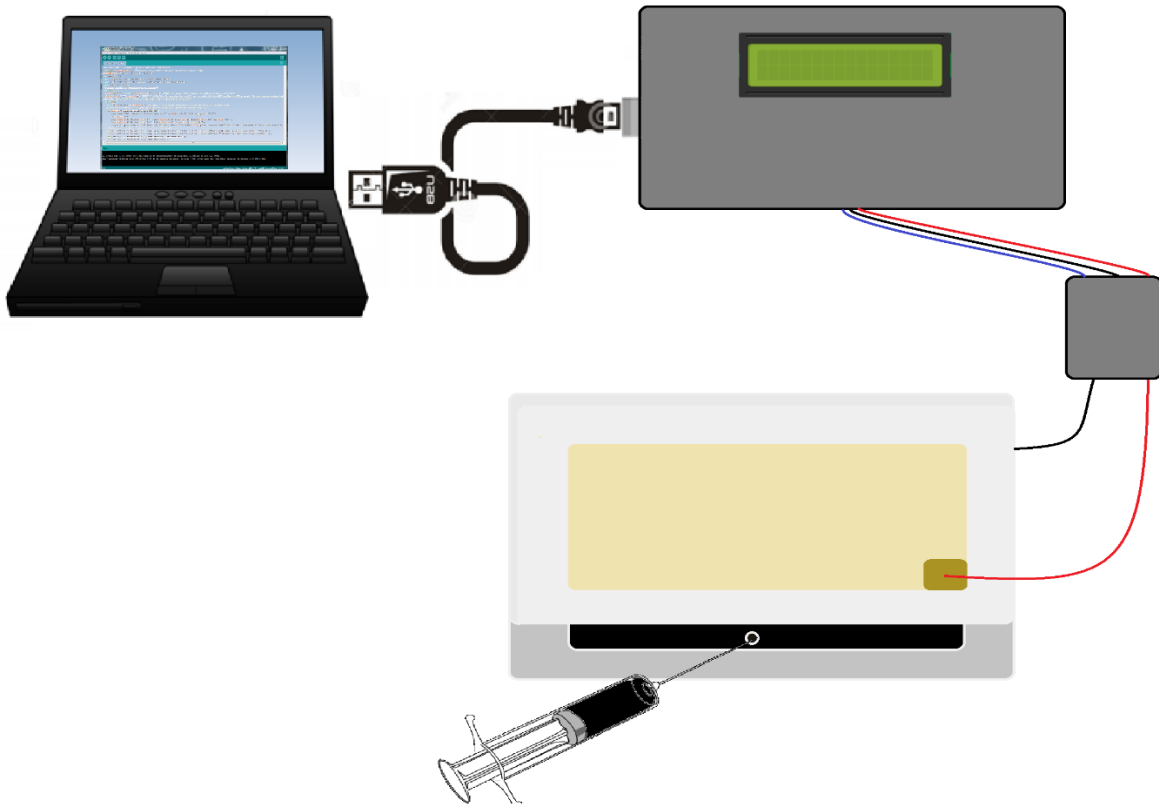


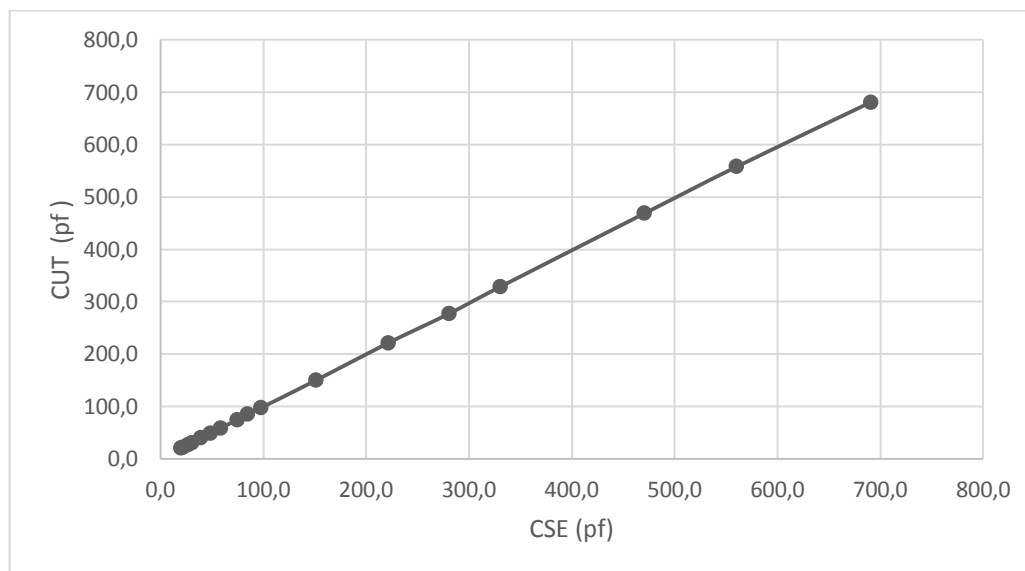
Figura (3.17) Interfaz de todos los elementos implicados en el prototipo de sensor

Capítulo 4

RESULTADOS Y ANALISIS

De acuerdo, a los resultados obtenidos de capacitancia en condiciones del primer algoritmo, donde se midió uno por uno de los capacitores cerámicos en un intervalo [20.27, 681.00] con el C_{UT} y C_{SE} para la calibración del sensor como se muestra en la tabla (3.1). Donde C_{UT} es capacitancia del instrumento patrón UT-601 y C_{SE} la capacitancia del prototipo de sensor.

Tenido en cuenta los datos obtenidos anteriormente se realiza la gráfica (4.1).



Grafica (4.1). Curva experimental obtenida de los valores de la tabla (3.1).

Observando la gráfica claramente se puede ver, que el algoritmo realizó un buen tratamiento digital de la señal, porque la pendiente tiende a uno. También se puede decir que para el

cálculo de la permitividad dieléctrica que dependen de la capacitancia va a ser óptima, por la precisión del medidor capacitivo.

Una vez calibrado el sensor, se procedió a medir la capacitancia y permitividad dieléctrica de la muestra de petróleo con respecto a su gravedad API de 25, 26.5, 27 y 27.7 bajo las condiciones de algoritmo del anexo B y ser visualizadas en el display. Las muestras al ser medidas con distancias de separación entre los electrodos de 2.55mm y 2.65mm. Los resultados obtenidos son los siguientes, que se muestran en las tablas 4.1 y 4.2.

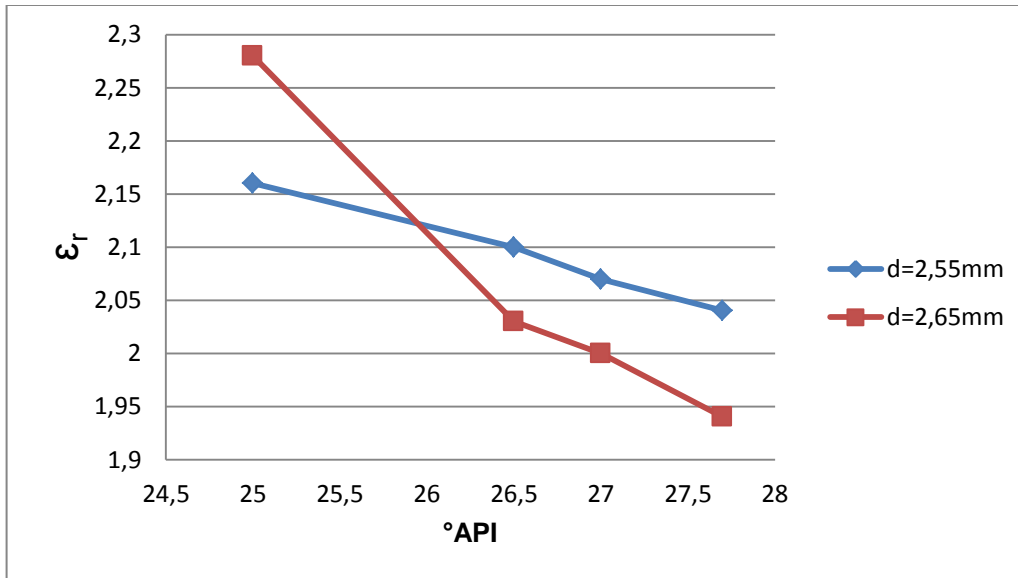
Tabla (4.1). Capacitancia y permitividad dieléctrica de las muestras de petróleo a una distancia de separación $d = 2.65mm$

Muestras de petróleo en ($^{\circ}$ API)	C_{SE} (pF)	ϵ_{SE}
25	61.2	2.28
26.5	54.5	2.03
27	53.7	2.00
27.7	51.9	1,94

Tabla (4.2). Capacitancia y permitividad dieléctrica de muestras de petróleo a distancia de separación $d = 2.55m$

Muestras de petróleo en ($^{\circ}$ API)	C_{SE} (pF)	ϵ_{SE}
25	58.2	2.16
26.5	56.5	2.10
27	55.7	2.07
27.7	54.9	2.04

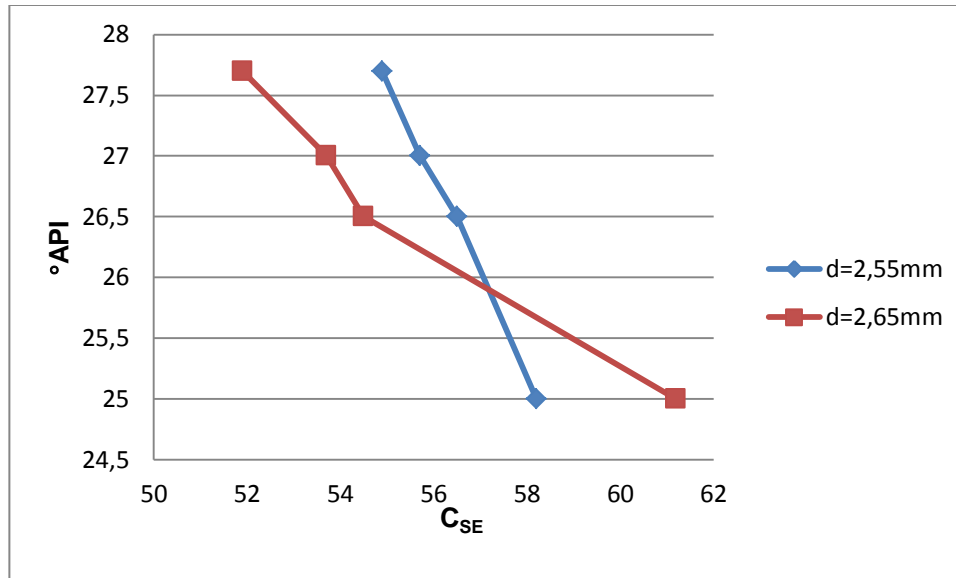
De acuerdo con los resultados obtenidos se realizó la gráfica de ϵ_r en función de la gravedad $^{\circ}$ API como se observa en la figura 4.2 con su respectiva distancia de separación entre los electrodos.



Grafica (4.2). Curva experimental de la permitividad dieléctrica en función de la gravedad °API obtenida de los valores de la tabla (4.2) y (4.3)

Se observa que la permitividad dieléctrica en función de la gravedad API son inversamente proporcionales, donde se puede decir que al tener un petróleo que tiende en aumento su permitividad dieléctrica, aumentan las impurezas del petróleo por tratarse de un crudo en tendencia a pesado que se encuentra con medidas menores o iguales 22.3 °API.

De acuerdo con los resultados obtenidos también se realizó la gráfica de gravedad °API en función de la capacitancia del sensor, como se observa en la figura 4.3 con su respectiva distancia de separación entre los electrodos.

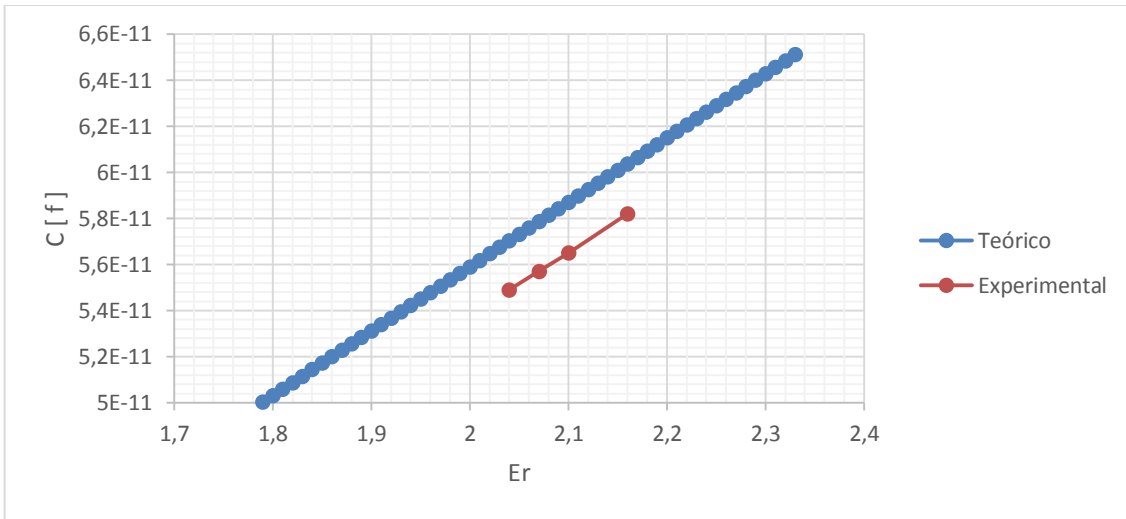


Grafica (4.3). Curva experimental de la permitividad dieléctrica en función de la gravedad API obtenida de los valores de la tabla (4.2) y (4.3).

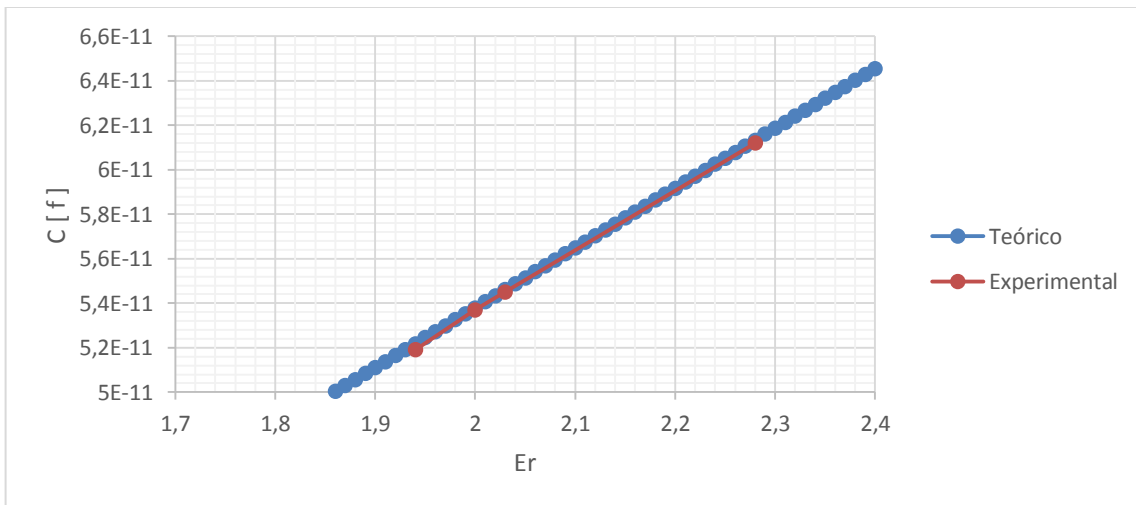
Se puede observar, que la medida de gravedad $^{\circ}$ API en función de la capacitancia son inversamente proporcionales, donde se puede decir que al tener un petróleo con tendencia en aumento de la capacitancia se podría realizar una clasificación de crudos, que va de un petróleo extrapesado con medida menor o igual a 10 de $^{\circ}$ API y mayores o iguales a 39 de $^{\circ}$ API.

En última instancia, se realizó el grafico de la capacitancia en función de la permitividad dieléctricas de las muestras. Para ser comparadas con el modelo teórico y así ver que tan bien se ajustan los datos suministrados por el sensor con respecto al modelo.

A continuación, se encuentran dos graficas que representan dicho comportamiento. Cada una con su distancia de separación entre los electrodos y sus debidas muestras.



Grafica (4.4). Capacitancia del sensor en función la permitividad eléctrica de las muestras, teórico y experimental a una distancia de separación entre electrodos de 2,55mm.



Grafica (4.4). Capacitancia del sensor en función la permitividad eléctrica de las muestras, teórico y experimental a una distancia de separación entre electrodos de 2,65mm.

Tenido en cuenta las gráficas (4.3) y (4.4), se puede analizar que la de mejor ajuste al modelo, es la que tiene una distancia de separación entre electrodos de 2,65mm. Debido a que sus valores respecto al teórico no supera el pico faradio, por un mejor ajuste a la hora de tomar las medidas. Pero el cambio no es demasiado respecto a la otra distancia, porque no supera los 4 pico faradios y a la hora de medir la permitividad dieléctrica no altera demasiado. Lo que se

podría arreglar con una próxima investigación al buscar un método para ajustar mejor las medidas.

Capítulo 5

Conclusiones

- El algoritmo desarrollado para calcular la constante dieléctrica 2,2 del petróleo fue óptimo, de acuerdo los resultados obtenidos que oscilan entre 1,94 a 2,28 según el tipo de petróleo medido por el sensor.
- Los valores de constante dieléctrica comprendidos entre 1,94 a 2,28 indican que es un crudo mediano con presencia de impurezas, además se observó que a mayor permitividad dieléctrica las impurezas aumentan es decir, tendería a ser un crudo pesado o extra pesado.
- El diseño del capacitor de placas paralelas fue óptimo porque permito realizar la medida de la permitividad dieléctrica a un bajo costo y error de fabricación.
- La interfaz adecuada para poder visualizar los resultados obtenidos por el sensor fue el display LM016L, ya permitió alcanzar este objetivo y tener un bajo consumo energético.
- La medición capacitiva del sensor con respecto al instrumento patrón fue la mejor. Ya que el sensor logro medir valores de capacitancia de unidades de los pico faradios con un error menor al 2%.
- El contenido de metales y agua en el petróleo hace que no tenga la propiedad de un material totalmente dieléctrico y presentar conductividad eléctrica.
- Mediante la investigación se logró el diseño y la implementación del prototipo de sensor que puede evaluar la presencia de otras sustancias en el petróleo. De acuerdo a la clasificación de la gravedad API del petróleo, que varía inversamente proporcional a la permitividad dieléctrica calculada.

- Los valores de frecuencia menores a 2500 Hz del sensor no influyen en el calentamiento de la muestra por lo que la viscosidad de la misma permanece constante y no va influir en la medida de capacitancia lo que sería caso contrario a una frecuencia de microondas.
- El diseño del sistema es totalmente portable y de bajo costo por sus dimensiones. La fuente alimentación puede ser desde una pila de 9V o una conexión por USB a un computador portátil lo que da una posibilidad para hacer pruebas de campo. Lo que sería caso contrario el sistema de cavidades resonantes sin contar los altos costos de los instrumentos de medida.
- Las mediciones capacitivas son sensibles a pequeños errores de alineamientos por lo que se hace un poco difícil la reproducibilidad de estas con un bajo margen de error.
- Para futuras investigaciones quedaría medir la relación de conductividad eléctrica del petróleo de acuerdo a la gravedad API, desde un petróleo extra pesado a un ultra ligero.

Referencias

1. Modelación de un reactor de HDT de crudo pesado y su aplicación en integración energética, Tesis doctoral Miguel Rodríguez, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Mexicano del petróleo y Facultad de Ingeniería, México D.F 2007.
2. Aplicación de microondas en el tratamiento de emulsiones del tipo de agua en aceite (w/o) y aceite en agua (o/w), tesis doctoral Roció Pérez, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de comunicaciones Valencia 2009.
3. Caracterización electromagnética de crudos pesados, tesis de maestría Mileidy Reyes, Universidad del Zulia, Facultad de Ingeniería, Maracaibo febrero de 2011.
4. Determinación simultanea de espesor y constante dieléctrica de recubrimientos utilizando sensores capacitivos, tesis de maestría Asur Santana, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México D.F Noviembre 2005
5. Sistemas electrónicos y automáticos prácticas de microcontroladores PIC, Modulo LCD, <http://isa.umh.es/asignaturas/sea/practicas2C/P7/practica7.pdf>
6. Desarrollo de aplicaciones electrónicas para implementarse en una casa habitación, tesis de pregrado Luis Aguilar, Instituto Politécnico Nacional México, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México D.F Marzo de 2014.
7. Evaluación de la plataforma Arduino e implementación de un sistema de control de posición horizontal, tesis pregrado Carlos Tapia – Héctor Manzano, Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil, Facultad de Ingenierías, Guayaquil Octubre 2013.
8. Medición de la constante dieléctrica, Trabajos de Física - Máximo E. Ramia, Carlos A. Martín y Miguel A. Chesta , Facultad de Matemáticas, Astronomía y física, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba 2012.

9. E. H. Higham. Pneumatic instrumentation. En: B. E. Noltingk (ed.), Instrument technology, vol. 4: Instrumentation systems. Londres: Butterworth and Co., 1987.
10. R. Bornet. Design of a high performance digital tachometer with a microcontroller. IEEE Trans. Instrum. Meas. vol. 38, núm.6, diciembre 1989, págs. 1104-1108.

ANEXOS

Anexo A. Algoritmo para estimar valores de capacitancia con Arduino

```
#include<LiquidCrystal.h>

LiquidCrystal lcd (12,11,10,5,4,3,2);

int luzlcd = 13;

float rango=2,ciclo=0,cambiodeciclo=0,valledetension=1023;

float ultimamedicion,picodetension,contadorvisualizacion,contadorciclo;

float capacitor,ct,frecuencia;

void setup() {

  pinMode(luzlcd,OUTPUT),analogWrite(luzlcd,180);

  Serial.begin(9600),pinMode(A0, INPUT);}

void loop()

{  long sensorValue = analogRead(A0);

  if (micros(>)>contadorvisualizacion+1000000)

  {

    capacitor=47511/(contadorciclo),ct=capacitor-16;

    lcd.setCursor(0,0),lcd.print("C="),lcd.setCursor(2,0), lcd.print(ct),lcd.setCursor(9,0),lcd.print("pF");

    rango=(2+((picodetension-valledetension)/5)),contadorvisualizacion=micros();

    picodetension=sensorValue, valledetension=sensorValue,contadorciclo=0;

  }

  if (sensorValue>=(ultimamedicion+rango)){ ultimamedicion = sensorValue,ciclo=1;

  if (sensorValue>picodetension){ picodetension=sensorValue;} }
```

```

if (sensorValue <= ( ultimamedicion-rango)){ ultimamedicion = sensorValue, ciclo=0;

if (sensorValue<valledetension){ valledetension=sensorValue;}}

if (ciclo==1 && cambiodeciclo==0){cambiodeciclo=1,contadorciclo++;}

if (ciclo==0 && cambiodeciclo==1){cambiodeciclo=0;}

}

```

Anexo B. Algoritmo para estimar la permitividad dieléctrica para muestras de petróleo

```

#include<LiquidCrystal.h>

LiquidCrystal lcd (12,11,10,5,4,3,2);

int luzlcd = 13;

float rango=2,ciclo=0,cambiodeciclo=0,valledetension=1023;

float ultimamedicion,picodetension,contadorvisualizacion,contadorciclo;

float capacitor,ct,frecuencia,d=0.00265,M=14.03,Er,CapMaterial=90.1,CapSensor;

void setup(){

  pinMode(luzlcd,OUTPUT),analogWrite(luzlcd,180);

  Serial.begin(9600),pinMode(A0, INPUT);}

void loop()

{  long sensorValue = analogRead(A0);

  if (micros(>)>contadorvisualizacion+1000000)

  {

    capacitor=47611/(contadorciclo),ct=capacitor-17;

    frecuencia=47611/ct;

    CapSensor=abs((ct*90.1)/(90.1-ct));

    Er=CapSensor*d*M;

    lcd.begin(16,2);

    lcd.setCursor(0,0),lcd.print("C="),lcd.setCursor(2,0),

lcd.print(CapSensor),lcd.setCursor(7,0),lcd.print("pF");

    lcd.setCursor(10,0),lcd.print("E="),lcd.setCursor(12,0), lcd.print(Er);

```

```
    lcd.setCursor(0,1),lcd.print("F="),lcd.setCursor(2,1),  
lcd.print(frecuencia),lcd.setCursor(9,1),lcd.print("Hz");  
  
    rango=(2+((picodetension-valledetension)/5)),contadorvisualizacion=micros();  
    picodetension=sensorValue, valledetension=sensorValue,contadorciclo=0;  
    }  
  
    if (sensorValue>=(ultimamedicion+rango)){ ultimamedicion = sensorValue,ciclo=1;  
    if (sensorValue>picodetension){picodetension=sensorValue;} }  
  
    if (sensorValue <= ( ultimamedicion-rango)){ ultimamedicion = sensorValue, ciclo=0;  
    if (sensorValue<valledetension){ valledetension=sensorValue; } }  
  
    if (ciclo==1 && cambiodeciclo==0){cambiodeciclo=1,contadorciclo++;}  
    if (ciclo==0 && cambiodeciclo==1){cambiodeciclo=0; }  
    }
```