

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Industrial

**SENSOR DE ALERTA PARA IDENTIFICAR
IMPUREZAS EN ACEITE DE MOTORES DIESEL**



TESIS

Que para obtener el título de:
INGENIERO EN MECATRONICA

PRESENTA:

Hiram Ulises Luna López

HERMOSILLO, SONORA.

OCTUBRE 2018

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Resumen

La presente tesis realiza el desarrollo y análisis del desempeño de un sensor para detectar impurezas en el aceite lubricante de motores diésel, mediante la aplicación de la teoría de la electrónica y cálculo de la capacitancia. Así mismo hace énfasis en la necesidad de contar con una técnica tribológica para dar seguimiento a la calidad del lubricante y mejorar el mantenimiento preventivo en la industria. Se exhiben los fundamentos de un motor de diésel, los efectos de las impurezas en el sistema de lubricación y como se efectúan las mediciones para cuantificar el desgaste, planificar ciclos de vida y reducir costos. Posteriormente, se presenta la metodología para el desarrollo de un sensor capacitivo que genere una alarma ante la presencia de un contaminante como el agua, refrigerante y hollín. Se discute el diseño del sensor tanto como el sistema de medición y captura de datos. También, se presentan los resultados obtenidos con base a la caracterización del sensor y su integración usando instrumentación virtual para el desarrollo de una estación de pruebas. Finalmente, se describen las conclusiones obtenidas a través del análisis.

Agradecimientos

Agradezco a la Dra. Anaya por su guía en el proyecto, su apoyo y por la paciencia que siempre me brindo.

Al Dr. Ramos por creer en mí, por recibirme en sus clases y posteriormente como un tesista en su laboratorio.

Agradezco al laboratorio nanoFAB de la Universidad de Sonora por el apoyo económico y el uso de sus instalaciones en el desarrollo de la tesis.

A los compañeros del laboratorio: Hiram, Antonio, Omar, Frank y Dainet por la amistad brindada y sus buenos consejos.

A la Universidad de Sonora y al departamento de ingeniería industrial por brindarme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente.

Contenido

	Pag.
Carta con votos aprobatorios.....	ii
Resumen	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	v
Lista de tablas	vii
Lista de figuras	vii
Capítulo 1. Introducción.....	10
1.1 Antecedentes	10
1.2 Planteamiento del problema	11
1.3 Objetivo general.....	12
1.4 Objetivos específicos	12
1.5 Hipótesis	13
1.6 Alcances y limitaciones	13
1.7 Justificación	14
Capítulo 2. Marco teórico.....	16
2.1 Fundamentos de los motores diésel y el sistema de lubricación	16
2.2 Aceite Lubricante	19
2.3 Principales impurezas en el aceite lubricante	21
2.4 Métodos para efectuar el diagnostico de motores diésel	22
Capítulo 3. Metodología.....	24
3.1 Pre-estudio.....	25
3.2 Diseño del sensor	25
3.3 Desarrollo del sistema e integración	26
3.4 Implementación del sistema.....	27
3.5 Establecimiento e implementación de estación de pruebas.....	27
Capítulo 4. Resultados	29
4.1 Pre-estudio del aceite lubricante.....	29
4.2 Diseño del sensor capacitivo en CAD	31
4.3 Desarrollo del sistema de medición e integración	32
4.3.1 Fabricación del prototipo	32
4.3.2 Desarrollo del sistema de medición.....	33
4.3.3 Desarrollo de software para cálculo y captura de datos	35

4.4 Implementación del sistema.....	36
4.5 Establecimiento e implementación de estación de pruebas.....	40
4.5.1 Diseño de la estación	40
4.5.2 Fabricación del prototipo de la estación	42
4.5.3 Sistema de control.....	43
4.5.4 Obtención de datos con la estación.....	45
Capítulo 5. Conclusiones.....	51
Bibliografía.....	53
Apéndice.....	55

Lista de tablas

Descripción:	Pag.
Tabla 2.1 Técnicas efectuadas para el análisis de diversos acontecimientos en sistemas que utilizan un aceite lubricante	23
Tabla 4.1 Datos para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad del prototipo de la Estación de Pruebas	45
Tabla 4.2 Resultados del estudio R&R del prototipo de la Estación de Pruebas.....	46

Lista de figuras

Descripción:	Pag.
Figura 2.1 Diagrama esquemático de las secciones del cigüeñal y su unión con los pistones de un motor	17
Figura 2.2 Diagrama esquemático del proceso de sincronización entre el cigüeñal y árbol de levas en un motor	17
Figura 2.3 Diagrama esquemático del ciclo de cuatro tiempos de un motor	18
Figura 2.4 Diagrama esquemático del sistema de lubricación de un motor en condiciones activas	18
Figura 2.5 Diagrama esquemático de la interacción entre superficies por medio de una película de aceite lubricante	19
Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología para el desarrollo y evaluación del sensor.....	25
Figura 4.1 Diagrama esquemático de los electrodos usados para formar un capacitor	29
Figura 4.2 Diagramas esquemáticos de un a) capacitor experimentando una constante dieléctrica ϵ_a y un b) capacitor experimentando cambios en la constante dieléctrica y obteniendo una nueva ϵ_c , diferente a ϵ_a	30
Figura 4.3 Diagrama esquemático de los electrodos de placas paralelas usados para medir capacitancia.....	31
Figura 4.4 Diagrama esquemático de las dimensiones de los electrodos en una escala milimétrica	32

Figura 4.5 Imágenes del ensamble del prototipo del sensor capacitivo, a) vista del electrodo, b) vista frontal del ensamble del sensor, c) vista lateral del ensamble del sensor, y d) vista del sensor sujetado sobre una placa térmica de laboratorio	33
Figura 4.6. Diagrama esquemático del circuito divisor de voltaje capacitivo	34
Figura 4.7 Imágenes del código de Arduino en funcionamiento y el panel de control en LabVIEW	36
Figura 4.8 Diagrama de flujo del arreglo experimental y sus principales partes	36
Figura 4.9 Imágenes del arreglo experimental utilizado para inducir una temperatura y una agitación determinada al aceite	37
Figura 4.10 Gráfica de la captura de capacitancias a lo largo de 100 mediciones a una temperatura de 80 °C (ensayo de repetitividad)	38
Figura 4.11 Gráfica de la capacitancia del sensor bajo condiciones de contaminación de agua (80 °C)	39
Figura 4.12 Gráfica de la capacitancia del sensor bajo condiciones de contaminación de glicol, (80 °C)	39
Figura 4.13 Imágenes de la estación de pruebas diseñada mediante CAD; a) Vista isométrica; b) vista lateral; c) vista de la plataforma móvil; d) vista superior	41
Figura 4.14 Imágenes del prototipo de la estación de pruebas; a) vista isométrica; b) vista frontal; c) vista superior; d) vista del interior	42
Figura 4.15 Diagrama esquemático del sistema de control y medición basado en Arduino	44
Figura 4.16 Diagrama de bloques en LabVIEW	44
Figura 4.17 Gráfica de la capacitancia del sensor sumergido en aceite libre de impurezas	47
Figura 4.18 Gráfica de la capacitancia obtenida a diferentes temperaturas	47
Figura 4.19 Gráfica de la capacitancia del sensor bajo condiciones de contaminación de agua (80 °C)	48
Figura 4.20 Gráfica de la capacitancia del sensor bajo condiciones de contaminación de glicol (80 °C)	49
Figura 4.21 Gráfica de la capacitancia del sensor bajo condiciones de contaminación de hollín (80 °C)	49

Figura 4.22 Gráfica de la capacitancia del sensor bajo condiciones de contaminación de una muestra con contaminación desconocida (80 °C)50

Figura 5.1 Gráfica de resultados sobrepuestos de capacitancias del aceite sujetos a distintos contaminantes (80 °C).....51

Capítulo 1.Introducción

1.1 Antecedentes

Desde el descubrimiento de la fuerza de fricción y su asociación con el desgaste, el ser humano ha buscado su eliminación mediante el empleo de sustancias lubricantes. Con el transcurso de los años, estos materiales han pasado por una evolución que es impulsada por la revolución en la ideología del mantenimiento, su gestión, y la ventaja competitiva que conlleva. Hoy en día los lubricantes son utilizados por una gran variedad de maquinaria y herramientas, y su función va más allá de lubricar. Estos se fabrican con otros usos específicos, como el de trasladar calor de una zona a otra, arrastrar impurezas, proteger de la corrosión, aislar eléctrica o térmicamente y apoyar en procesos de manufactura [1]. Estos también están condicionados a factores ambientales como la temperatura de operación y la cantidad de partículas de polvo en el área de trabajo [2].

La fricción y desgaste determinan el ciclo de vida de una máquina así como su consumo de energía. Por lo tanto son muy importantes a considerarse durante las etapas de diseño y mantenimiento. Una ciencia que se ha dedicado al estudio sobre el frotamiento de superficies en movimiento relativo, llamada tribología [3][4], ha recopilado los datos de análisis que dan una perspectiva del comportamiento mecánico y composición química de los lubricantes. Aplicando los conocimientos básicos de tribología a los procesos de lubricación, se puede alcanzar un ahorro de un 0.4% en costos de energía [5].

Existe una amplia gama de lubricantes, los cuales se pueden encontrar en estado líquido como aceites, semilíquido como grasas, o en estado sólido como el teflón. Por otro lado, los lubricantes también son categorizados por el método de refinado o la base con la que fue hecha y sus aditivos, los cuales alargan la vida del aceite y le proporcionan propiedades anticorrosivas. Sin embargo, cada mecanismo o cualquier máquina debe ser lubricada con el tipo de lubricante en específico para el que fue diseñada.

En particular, los aceites para motores diésel o maquinaria industrial, se consideran unos de los lubricantes más importantes en el mundo contemporáneo. Su impacto sobre la economía es considerable por ser uno de los más utilizados en el planeta. La demanda mundial de este material asciende alrededor de 40 toneladas métricas anuales [6][7]. Este mercado se encuentra con un valor estimado de \$144 miles de millones de dólares (mmdd) y se pronostica que alcanzará \$166 mmdd en el 2021 [8]. Más del 60% de los aceites lubricantes son utilizados en el sector de transporte e industria [5][9]. De acuerdo al análisis del mercado, el desarrollo tecnológico en la automatización, mecanización, minado y construcción de infraestructura generará más demanda para el aceite sintético, ya que este es fácil de obtener y da la mejor protección a los vehículos [10].

1.2 Planteamiento del problema

Los fabricantes de aceites para motores especifican que este debe ser reemplazado según un horario que ellos determinan para el tipo de aceite y su aplicación. Sin embargo, a menudo pueden ocurrir incidentes que causan daños al aceite, tales como cambios repentinos en la limpieza, velocidad, carga o temperatura del motor y provienen del modo en que se opera la maquinaria y las condiciones a las que es expuesta [11]. Estos periodos de desgaste se acumulan con el tiempo y pueden resultar en la falla repentina de la máquina. En caso de intentar compensar este error, realizando el cambio del aceite previo a su fecha establecida, se corre el riesgo de desechar aceite aun en buenas condiciones. En una planta, el 80% de los costos en mantenimiento es dedicado a 20% de la maquinaria total y más del 50% de las fallas son a causa de la mala lubricación o contaminación del aceite. Esto representa una gran pérdida para aquellas empresas que utilizan lubricantes en grandes cantidades para un gran número de máquinas [12][13].

Se calcula que alrededor del 50% de los lubricantes terminan derramados, contaminando el medio ambiente debido a accidentes espontáneos. Los aceites minerales y sintéticos son los más tóxicos y peligrosos para la salud humana. Por lo tanto, se busca cada vez más el reciclaje del aceite o la reducción de

elementos como el cloro, fosforo, azufre y metales que puedan estar presentes [14]. El costo de dicho reciclado aumenta con la demanda pero los beneficios yacen en los costos bajos alcanzados de mantenimiento de la maquinaria.

Debido a lo anterior, se ha considerado la utilización de sensores para monitorear las propiedades de los aceites lubricantes y tomar decisiones de mantenimiento más rápidas. De esta manera, el cambio de aceite lo indica el mismo sensor o transductor. A su vez, el aceite enviado a reciclar por las empresas sería más limpio y se reducirían los costos en el reciclado, ya que el proceso de refinado emplearía menos energía.

Durante años, las empresas han invertido en prevenir las fallas prematuras estudiando la calidad del aceite en forma periódica a lo largo de su uso continuo. Las propiedades eléctricas y de viscosidad del aceite son las más utilizadas para realizar un análisis cualitativo. Existen dos opciones, el análisis de muestras a través de un laboratorio especializado o sensores integrados en el sistema de lubricación [15]. Estas dos técnicas suelen ser muy costosas y poco accesibles para muchas empresas, mientras que la tecnología requerida para hacer mediciones y obtener resultados aceptables es bastante baja.

1.3 Objetivo general

En este proyecto de investigación, el objetivo general es desarrollar un sensor capacitivo para caracterizar la calidad del aceite lubricante utilizado en motores diésel. Para determinar de forma cualitativa la presencia de contaminantes y producir una señal de alerta para el mantenimiento.

1.4 Objetivos específicos

- ✓ Diseñar en el software Solidwoks un sensor capacitivo usando el modelo de placas paralelas.
- ✓ Fabricar los componentes del sensor usando el sistema de maquinado CNC para el modelo de dos placas paralelas utilizando cobre.

- ✓ Caracterizar la respuesta en la capacitancia del sensor de aceite variando las condiciones del lubricante con contaminantes.
- ✓ Determinar en qué rango de capacitancia se debe cambiar el aceite.
- ✓ Discernir entre un aceite en buenas condiciones y uno contaminado mediante las lecturas del sensor
- ✓ Desarrollar una estación de pruebas para el sensor

1.5 Hipótesis

Detectar impurezas en el aceite de motores diésel a través de un sistema electrónico utilizando el principio de capacitancia.

1.6 Alcances y limitaciones

El proyecto en desarrollo tiene como alcance caracterizar los niveles de contaminación en el aceite lubricante de tipo 15w40 Raloy para motores diésel. Se desarrollará una técnica para analizar el aceite y obtener resultados en tiempo real. Dicha técnica deberá permitir observar el comportamiento de una muestra de aceite sometida a contaminaciones por agua, refrigerante, hollín, cambios de temperatura y obtener datos sobre un aceite contaminado por sustancias desconocidas.

Las presentes limitaciones restringirán la investigación:

1. Falta de instrumentos disponibles para mediciones técnicas.

Por la característica técnica de la investigación algunos aspectos como la medición de constantes dieléctricas, protección contra interferencia electromagnética, identificación de reacciones químicas, requieren de instrumentos especializados y específicos para cada rubro. Por lo tanto los datos proporcionados serán obtenidos en base a un rango aproximado.

2. Características de los contaminantes y mediciones

Debido a que se suele utilizar agua potable en los sistemas automotrices, este se utilizará como contaminante. Como es bien conocido, el agua no se mezcla con el aceite y no es posible alcanzar una homogenización adecuada. En el presente proyecto, el sensor detectará la presencia de un contaminante solo cuando este transcurra por el mismo.

El etilenglicol también conocido como glicol, es otro agente que se pretende detectar y lo contiene el refrigerante en un cierto porcentaje. Sin embargo, este también contiene un porcentaje de agua y otros químicos añadidos. La mezcla de estas sustancias tiene un valor relativo para su constante dieléctrica.

3. Fabricación del sensor y sistema de medición

El método de fabricación de los sensores puede dar lugar a imperfecciones. Además, los materiales y componentes utilizados en el sistema de medición pueden ser susceptibles a interferencia externa o interna. Esto puede ocasionar que distintos sensores den lecturas diferentes, sin embargo las diferencias en capacitancias se podrán calibrar en el sistema para compensarse en el software.

1.7 Justificación

El aceite lubricante es un elemento importante en cualquier sistema automovilístico o maquinaria pesada. La condición del aceite es primordial para mantener un equipo estable con funcionalidad de acuerdo a los parámetros establecidos. En el caso de los motores diésel, un lubricante sucio que contenga oxidantes, aditivos desgastados, baja viscosidad y partículas metálicas puede desgastar el motor con el tiempo a un paso exponencial. El ignorar este hecho puede ocasionar daños al equipo de manera considerable o irreparable. Como respuesta, se lleva a cabo un proceso llamado mantenimiento preventivo, el cual se aplica de manera periódica posterior al análisis de una muestra o después de un tiempo determinado de forma arbitraria. El objetivo de tal revisión es evitar que se detenga el servicio prestado por la máquina y de no perder el equipo adquirido por el usuario. Sin embargo, esta acción consume tiempo y requiere de personal

Capítulo 1: Introducción

con la experiencia adecuada. Tomando esto en consideración; se puede mejorar la eficiencia del mantenimiento preventivo de un motor diésel, si se conocen las condiciones en las que se encuentra su lubricante. Por lo tanto, se puede obtener con mayor facilidad, una estimación de cuándo el aceite debe ser reemplazado. Al evitar los posibles daños y fallas que conlleva la circulación del aceite sucio a través el motor, la prevención eficaz se transforma en un gran ahorro monetario para el capitalista.

El aceite lubricante no solo impacta el desempeño del motor, sino también en su consumo de combustible. Las fricciones que ocurren en el mecanismo afectan directamente a la conservación de la energía utilizada en el sistema. Existen estudios que demuestran que un aumento de 1% de la fricción y modificaciones en el índice de viscosidad del aceite resultan en una mejora de 2.33% en la economía del combustible [16]. Por otro lado, se encontró que una mejora en el sistema de filtración y en la reducción de contaminantes en un 98%, produjo una reducción del 5% en el consumo de combustible [17]. Por lo tanto, es claro que cuando el lubricante se encuentra en buen estado se conserva más energía, y este hecho toma cada vez más importancia considerando los altos incrementos en el precio del combustible de hoy en día.

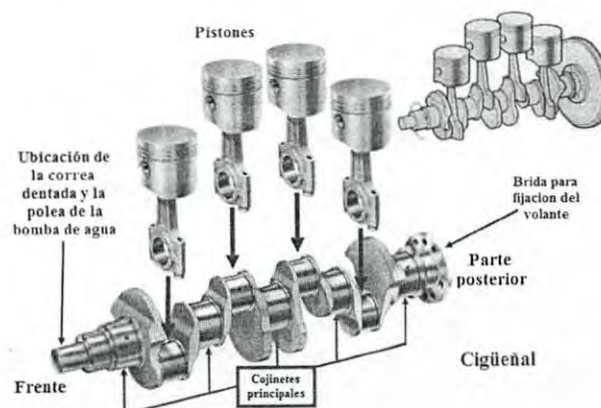
Por lo tanto, la investigación y la tecnología han dedicado un amplio estudio en la búsqueda de la determinación de los contaminantes en el aceite así como de la presencia de partículas. Lo anterior ha motivado al presente proyecto en el diseño e implementación de un sensor capacitivo, para clasificar las impurezas en el aceite de acuerdo a los parámetros de capacitancia.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Fundamentos de los motores diésel y el sistema de lubricación

El motor diésel es una máquina que convierte energía química en energía mecánica, por medio de la combustión interna de cierto combustible. A diferencia de los motores de gasolina, los cuales generan una explosión a partir del combustible con una chispa, el motor diésel aprovecha las altas presiones en sus cilindros para llevar a cabo dicha ignición. Esta fue una idea desarrollada y patentada en 1882 por el ingeniero Rudolf Diésel, cuya meta era obtener un motor con una eficiencia más alta que la obtenida en motores de gasolina. El motor diésel trabaja con compresiones más elevadas, generando una expansión térmica del aire en el cilindro. Esto resulta en un incremento de energía convertida en energía mecánica. Sin embargo, se necesita un motor más robusto y costoso para soportar las presiones internas y el calor emitido. Las bombas de inyección e inyectores de combustible deben ser construidos con tolerancias precisas, añadido al costo del motor [18].

En general, los motores de gasolina y diésel operan con mecanismos similares. Los pistones son los que están a cargo de comprimir y transmitir la energía liberada. Esta energía es convertida en movimiento rotatorio hacia el cigüeñal al que están unidos los pistones. El cigüeñal es el eslabón encargado de redirigir y transmitir la energía cinética, tal y como se muestra en la Figura 2.1.



Capítulo 2: Marco Teórico

Figura 2.1 Diagrama esquemático de las secciones del cigüeñal y su unión con los pistones de un motor

En los motores de combustión interna, los pistones comienzan siendo impulsados por la reacción del combustible. Por otro lado, en el motor diésel la combustión se genera a través de la compresión elevada del aire y el combustible, la cual genera suficiente presión y calor como para superar el punto de ignición de la mezcla. Este impulso proporciona un movimiento lineal, el cual es inmediatamente transformado en un movimiento giratorio por el cigüeñal. Posteriormente, una correa dentada, fijada al frente del cigüeñal, sincroniza las válvulas por medio del árbol de levas, como se muestra en la Figura 2.2.

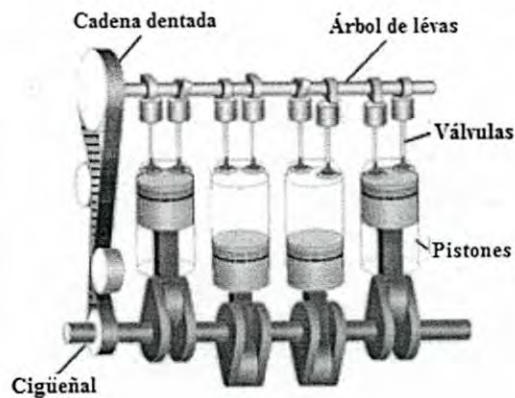


Figura 2.2 Diagrama esquemático del proceso de sincronización entre el cigüeñal y árbol de levas en un motor

Las válvulas permiten la admisión del combustible a los cilindros y el escape de los desechos después de la combustión. La temporización de estas válvulas genera un tren de impulsos dentro del cilindro que mantiene a los pistones en movimiento. Esta simbiosis entre los componentes se puede caracterizar como una oscilación de los pistones, que se divide en un número determinado de tiempos o carreras. El motor diésel de cuatro tiempos especifica dos vueltas del cigüeñal o cuatro carreras del pistón para llevar a cabo el ciclo termodinámico de combustión. Por lo tanto, el ciclo contiene los lapsos o carreras de succión,

compresión, potencia y escape. La Figura 2.3 muestra los cuatro procesos del funcionamiento realizado en los que participa el pistón.

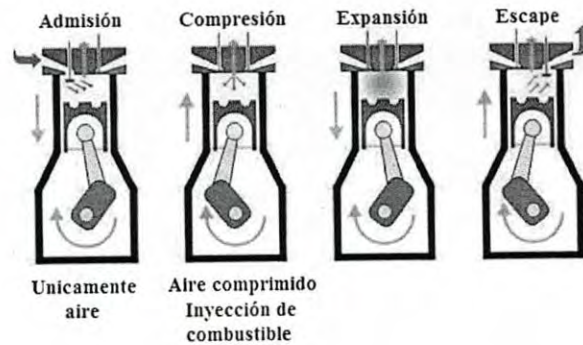


Figura 2.3 Diagrama esquemático del ciclo de cuatro tiempos de un motor

La fricción producida por todos estos eslabones y uniones en constante movimiento genera calor y desgaste que disminuyen la eficiencia del motor. Por lo tanto, se requiere de un proceso de auto lubricación para asegurar el funcionamiento correcto por periodos prolongados. Esto se logra utilizando el mismo movimiento del cigüeñal para poner en marcha una bomba, en la cual circula aceite a través de una red de distribución mostrada en la figura Figura 2.4.

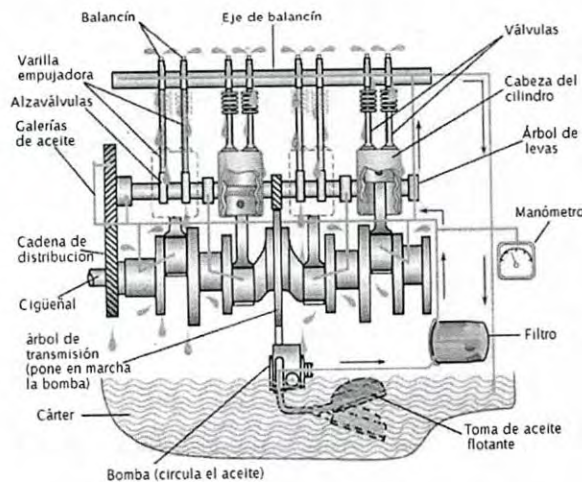


Figura 2.4 Diagrama esquemático del sistema de lubricación de un motor en condiciones activas

2.2 Aceite Lubricante

Los lubricantes son indispensables para cualquier maquina rotatoria, en la cual su operación es crítica para metas productivas y los resultados financieros en el procesado de productos petroquímicos y de transportación. En ausencia de los lubricantes, la vida útil de la maquinaria puede ser disminuida hasta un 70% debido al desgaste [19]. La lubricación adecuada de una máquina rotatoria es la clave para alcanzar una operación larga y de confianza.

El propósito principal del lubricante es separar las superficies que están en movimiento y en constante rozamiento, el cual es el principal causante del desgaste. Ninguna superficie es perfecta, la mayoría cuentan con imperfecciones en una escala micrométrica, que al rozar, contribuyen al desprendimiento de material tal como se muestra en la Figura 2.5. El material liberado a su vez hace contacto con las superficies, liberando partículas y acelerando así el proceso de desgaste. Por lo que es importante que el lubricante se extienda entre las superficies para formar una película delgada que las mantenga apartadas a una distancia constante. Para lograr esta separación entre sus partes, la propiedad crucial para el mecanismo es la viscosidad. En el caso de que el lubricante es contaminado por sustancias no viscosas o sometido a temperaturas fuera de los límites de operación, se puede perder esta propiedad y las superficies de nuevo experimentarían un rozamiento [4][20].

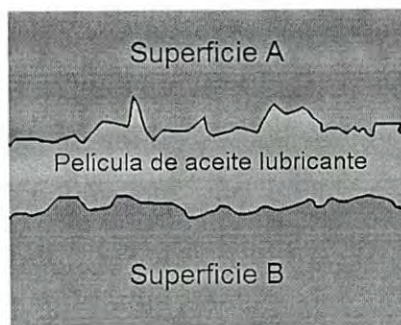


Figura 2.5 Diagrama esquemático de la interacción entre superficies por medio de una película de aceite lubricante

Capítulo 2: Marco Teórico

Además de separar y disminuir la fricción y el desgaste, el aceite lubricante también tiene otros propósitos y aplicaciones, tales como ayudar en la disipación de calor de los componentes mecánicos, dirigir las impurezas hacia un lugar más seguro de la maquinaria, proteger contra la corrosión, aislamiento eléctrico y reducción del ruido de ejecución.

Existen diversos tipos de aceites lubricantes, cada uno especial para situaciones específicas y categorizados por el método en que fueron fabricados y nivel de refinación. De estos métodos de fabricación o refinación surgen los aceites bases y el Instituto Americano de Petróleo (API por sus siglas en inglés) los clasifica en cinco grupos.

- Grupo I – Aceites base poco refinados: Se utilizan como base para aceites para engranes e hidráulica simple
- Grupo II – Aceites hidrocraqueados: Tratamiento adicional con hidrogeno reduce los componentes insaturados. Se utilizan como base para aceites para motores simples.
- Grupo III – Aceites hidrocraqueados altamente refinados: No contienen componentes químicos. Se utilizan como base para aceites para motores simples y lubricantes industriales modernos.
- Grupo IV – Hidrocarburos fabricados sintéticamente: Se utiliza como base para aceites completamente sintéticos para motores modernos y algunos lubricantes industriales
- Grupo V – Fluidos fabricados sintéticamente, ésteres o poliésteres: Se utilizan como componentes que manipulan el flujo aceite o mezcla para la producción de aditivos. No son adecuados para utilizarse como base.

Los aceites basados en sintéticos son lubricantes que consisten en componentes químicos que se fabrican artificialmente, es decir, son materiales sintetizados. Estos se fabrican usando elementos de petróleo modificados químicamente y se utilizan como substitutos de lubricantes refinados de petróleo cuando se opera en

temperaturas extremas porque proporciona propiedades mecánicas y químicas superiores a las encontradas en aceites minerales.

2.3 Principales impurezas en el aceite lubricante

El sistema de lubricación para motores diésel presenta ciertos problemas que se deben monitorear constantemente. El aceite tiende a acumular impurezas con el uso continuo de la maquinaria. Estos contaminantes se pueden presentar en forma sólida o líquida y varían en cantidad según el ambiente de trabajo. Los motores al desgastarse suelen crear partículas metálicas finas u hollín que se acumulan en el aceite, las cuales pueden contener partículas de:

- Hierro
- Cromo
- Níquel
- Molibdeno
- Aluminio
- Plomo
- Cobre
- Estaño
- Plata
- Titanio

Cabe mencionar que también puede existir una acumulación de polvo y suciedad, los cuales siempre están presentes en el entorno.

Adicionalmente, el aceite también es susceptible a la humedad y acidez, condiciones que promueven la corrosión de componentes metálicos y pérdida de viscosidad. En ambientes donde las sustancias como agua, refrigerante y combustible están presentes, éstas se pueden llegar a mezclar con el aceite y emulsionar, causando un mal desempeño [2]. Como método de protección, el aceite ha sido comercializado con aditivos que ayudan a absorber un porcentaje

de agua y crean una capa protectora anticorrosión sobre los componentes metálicos. Los principales aditivos disponibles son:

- Calcio
- Magnesio
- Fósforo
- Zinc
- Bario
- Boro

Todos estos tipos de impurezas, aditivos y niveles de viscosidad pueden ser cuantificados por instrumentos especializados de laboratorios para conocer el estado del aceite. El rápido incremento de partículas por millón (ppm) indica una aceleración pronunciada en el desgaste del motor. Por lo que la concentración de contaminantes o el deterioro de aditivos puede alertar sobre posibles reacciones químicas de desgaste.

2.4 Métodos para efectuar el diagnóstico de motores diésel

Todo sistema de mantenimiento y reparaciones debe realizarse de acuerdo a un procedimiento estándar, realizado por personal altamente capacitado y sujeto a estricta verificación. Las fallas mecánicas a repararse, se pueden prevenir con un programa de análisis del aceite que establezca el seguimiento al grado de desgaste de la máquina, así como a los contaminantes presentes y sus tendencias.

Existen protocolos, instrumentos y métodos para predecir y diagnosticar el estado del aceite y las fallas en la maquinaria. Las técnicas de Ferrografía o SEM/EDX generan análisis exhaustivos con información detallada sobre el contenido de partículas sólidas en el aceite. Como resultado, se puede dictaminar qué tanto desgaste existe y qué tan severo es el daño. Lo anterior, requiere de profesionales calificados con alta experiencia y procedimientos que suelen ser

costosos, con largos tiempos de análisis de caracterización. Además, existen muchos tipos de maquinarias diferentes y estas pueden presentar sus propios problemas de lubricación específicos al sistema y entorno. Por lo tanto, se necesitan de diversas técnicas analíticas para efectuar el monitoreo del aceite. La **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra las técnicas más requeridas efectuadas en los análisis.

Tabla 2.1 Técnicas efectuadas para el análisis de diversos acontecimientos en sistemas que utilizan un aceite lubricante

Problema 1: Desgaste de la máquina	
Análisis	Técnica
Partículas finas metálicas	Electrodo de disco giratorio (RDE), Espectroscopia
Grandes elementos metálicos de desgaste	Espectroscopia de plasma de acoplamiento inductivo (ICP)
Conteo de partículas y distribución	Espectroscopia de filtración Rotode (RFS)
Conteo de partículas y distribución	Conteo de partículas, LaserNet Fine (LNF)
Análisis de forma de partículas de desgaste	LNF, Ferrografía, Análisis de partículas de desgaste (WDA)
Problema 2: Contaminación	
Análisis	Técnica
Tierra y suciedad	Conteo de partículas, LaserNet Fines (LNF)
Dilución de combustible	Fuel Sniffer, Cromatografía de gas (GC)
Agua/humedad	Infrared (IR), Karl Fischer Titration (KF)
Glicol/refrigerante	IR
Hollín	Medidor de hollín, IR
Fluidos alienígenas	IR
Problema 2: Degradación	
Análisis	Técnica
Oxidación, Nitración, Sulfatación	IR
Viscosidad	Pruebas de viscosidad
Numero de Acidez (AN), Numero de Base (BN)	Titration, IR

Comúnmente, para dar seguimiento a la calidad del aceite lubricante, se hace uso de laboratorios especializados en tribología que disponen con los instrumentos necesarios para procesar muestras de aceite o utilizar laboratorios portables que pueden ser empleados en el lugar de trabajo [21]. También existen sensores que miden alguna propiedad del sistema mecánico o que utilizan algoritmos matemáticos para caracterizar la calidad del aceite en tiempo real. Sin embargo, esto eleva de manera significativa los costos para los usuarios y pone fuera del alcance costear el estudio.

Capítulo 3. Metodología

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para el desarrollo del sensor y una estación de pruebas para automatizar la adquisición de las mediciones. Se describen los detalles del diseño y el proceso experimental realizado. Debido a que esta investigación es de naturaleza teórica y experimental, los conceptos de electrónica analógica, diseño de dispositivos electrónicos, instrumentación virtual, y control serán empleados. Los resultados obtenidos son comparados con los parámetros pre-establecidos por la simulación. La

Figura 3.1 muestra el diagrama de flujo de la metodología utilizada con la secuencia y los lazos de retroalimentación usados.

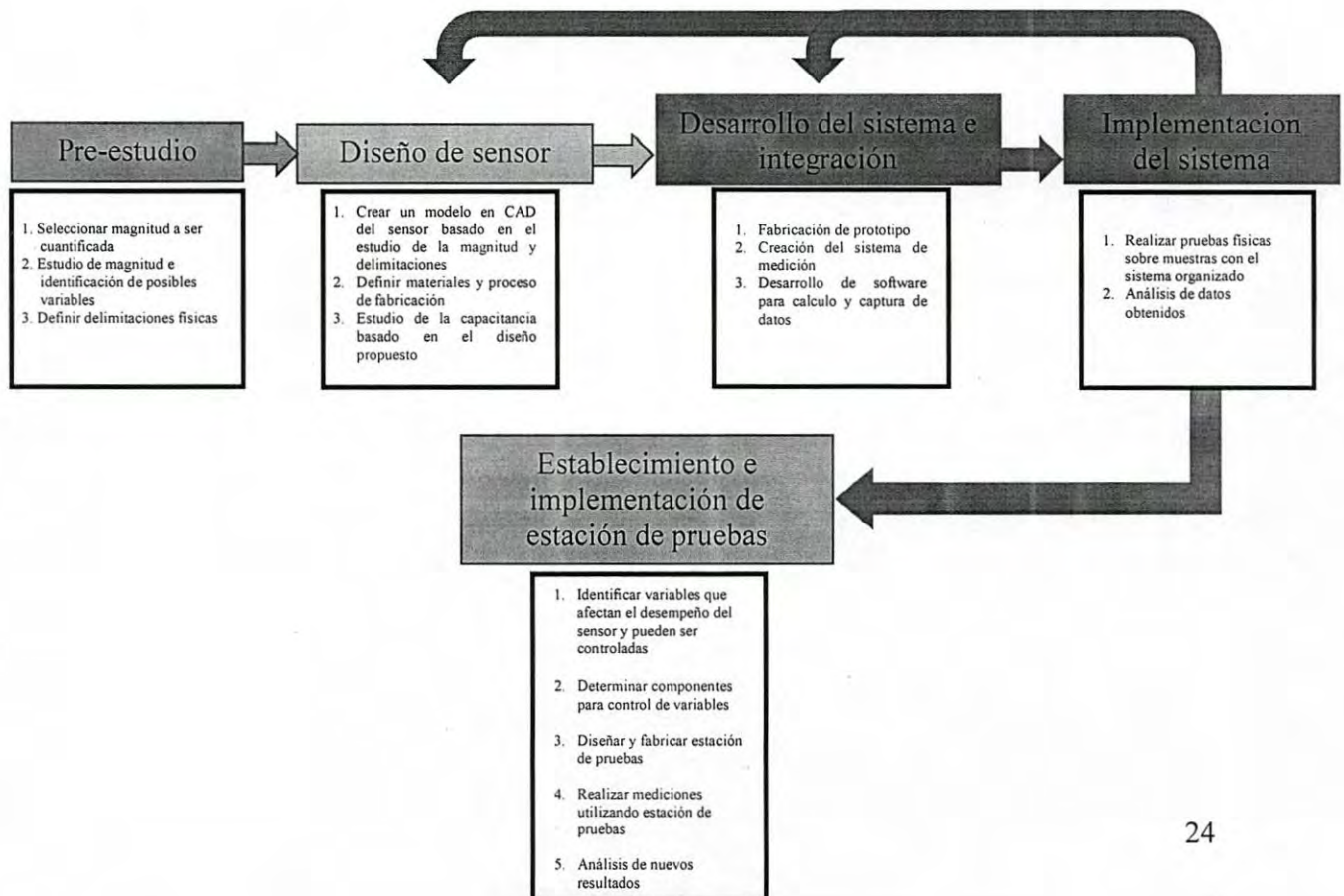


Figura 3.1 Diagrama de flujo de la metodología para el desarrollo y evaluación del sensor

En base a este régimen se pretende cuantificar el problema, fabricar un sistema que produzca datos, analizarlos y evaluar su desempeño.

3.1 Pre-estudio

Este paso consiste en investigar las propiedades físicas de la muestra a examinar y de los agentes externos que están predispuestos a interactuar con esta. Esta interacción debe crear una variación en las magnitudes asociadas la cual debe ser observable. Además, se debe definir una idea de lo que se puede hacer partiendo de los instrumentos y herramientas que ya existen para observar estas variaciones. Las tareas a realizar son las siguientes:

1. Selección de magnitud a ser cuantificada: Esta tarea consiste en seleccionar la magnitud a la que se le dará seguimiento a lo largo del proyecto. Esta se debe encontrar siempre presente dentro de lo que se pretende observar y debe producir información a través de variaciones cuantificables.
2. Estudio de magnitud e identificación de posibles variables: En esta actividad se debe estudiar el origen de la magnitud seleccionada, así como las ecuaciones que la calculan. Es importante identificar las variables que la modifican dentro de la ecuación.
3. Definir delimitaciones físicas: En esta actividad se definen parámetros, dimensiones y materia prima a utilizar para llevar a cabo los objetivos principales, basado en la magnitud seleccionada.

3.2 Diseño del sensor

Este paso consiste en modelar el sensor con el que se pretende monitorear la magnitud utilizando un software CAD. En este diseño se especificará las dimensiones deseadas, los materiales requeridos y el mecanismo de ensamblaje. La magnitud y las ecuaciones asociadas proporcionan la forma que tomará el sensor para llevar a cabo las mediciones. Las tareas a realizar para llevar a cabo el modelo en CAD son las siguientes:

1. Definir los materiales y proceso de fabricación: Las dimensiones y materiales utilizados pueden tener impacto sobre las mediciones. Se debe definir el material más apropiado. Este material debe fabricarse según las especificaciones dimensionales discutidas en el pre-estudio.
2. Estudio de la capacitancia: En esta tarea se revisan las ecuaciones de capacitancia previstas en el pre-estudio y se utilizan para simular el desempeño del sensor. El modelo puede ser simulado a través de software o realizando el cálculo de las ecuaciones substituyendo los valores de las magnitudes definidas. De esta manera se obtienen los límites de capacitancias que el modelo puede alcanzar. Estos datos sirven como parámetros que se buscan reproducir en físico.

3.3 Desarrollo del sistema e integración

En esta sección se describe la fabricación de los elementos que auxiliarán en la producción de datos y su integración. El sistema resultante se lleva a cabo mediante tres procesos. El primero son las mediciones de voltaje realizadas a través del sensor. El segundo es el cálculo de la capacitancia utilizando los valores de voltaje recibidos. El tercero es la captura de datos para análisis. Las tareas a realizar para llevar a cabo la integración son las siguientes:

1. Fabricación del prototipo: consiste en la fabricación del sensor prototipo según las especificaciones de diseño y siguiendo los procesos de fabricación definidos.
2. Desarrollo del sistema de medición: se selecciona el método para realizar mediciones con el prototipo. Se deberá fabricar un sistema de medición

basado en este método y ajustable al prototipo. El componente resultante deberá poder comunicarse con una computadora o panel de control. Además, este no debe ser susceptible a interferencia externa que altere las mediciones una vez instalado.

3. Desarrollo de software para cálculo y captura de datos: En esta tarea se desarrolla un software para trabajar en conjunto con el sistema de medición y realizar los cálculos asociados. Una vez terminadas las mediciones el software deberá almacenar los datos obtenidos en una base de datos.

3.4 Implementación del sistema

En esta sección se implementa el sistema de medición con los componentes integrados. Se determinan las cantidades y proporciones de muestras que serán sujetas a observación. Las condiciones a las que las muestras estarán sometidas antes de realizar las mediciones están definidas en el estudio previo. Las tareas a realizarse con el sistema prototipo son las siguientes:

1. Pruebas físicas: consiste en la medición de la capacitancia para distintas muestras. Se comienza midiendo una muestra en un estado libre de impurezas y a temperatura ambiente para obtener datos de control o referencia. Cuando el sistema se determine viable, se realizarán mediciones para muestras sometidas a distintos agentes externos en distintas proporciones y temperaturas.
2. Análisis de datos obtenidos: consiste en realizar el análisis de los datos capturados en la base de datos. Estos se comparan con los parámetros esperados según la simulación y se determina la viabilidad del sistema. Si los datos coinciden con la simulación del sistema y son reproducibles, entonces se determina viable. De lo contrario, se repite el paso de diseño o integración para realizar los ajustes físicos o de programación necesarios.

3.5 Establecimiento e implementación de estación de pruebas

Capítulo 3: Metodología

Consiste en la implementación de una estación de pruebas para establecer un sistema de medición más eficiente, con el propósito de eliminar posibles errores humanos que introduzcan interferencia a la zona de captura de datos. La estación también debe simular de una manera más exacta el entorno real en el que está sometida la muestra. Para su desarrollo, se determinarán las variables que puedan afectar el desempeño del sensor y faciliten la realización de mediciones y su captura. Después, se buscará controlar estas variables mediante componentes periféricos pero vinculados al mismo software.

Capítulo 4. Resultados

En este capítulo se presentan los resultados de la metodología propuesta en el capítulo 3, describiendo cada uno de los pasos que se realizaron para llegar al objetivo en cuestión.

4.1 Pre-estudio del aceite lubricante

El objetivo principal de esta sección es definir las propiedades del aceite lubricante y el efecto que tienen los agentes externos sobre estas propiedades. La capacitancia se seleccionó como el parámetro de desempeño para modelar la contaminación del lubricante.

Para observar la capacitancia, se utilizó el aceite como un dieléctrico, y al aplicar un campo eléctrico por medio de dos electrodos se obtiene así un capacitor común, como el mostrado en la Figura 4.1. Esta capacitancia puede ser medida y comparada con otras mediciones a distintos grados de impurezas en el aceite.

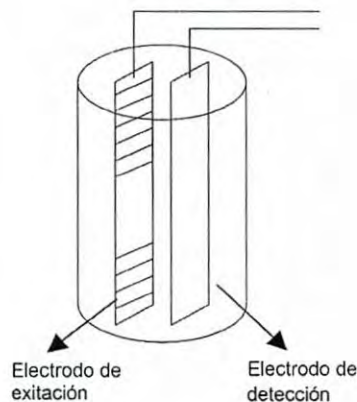


Figura 4.1 Diagrama esquemático de los electrodos usados para formar un capacitor

En el experimento se utilizó el aceite (15w40 Raloy) como muestra de control. Se encontró que es un aceite sintético del grupo IV, posee una constante dieléctrica relativa (ϵ_a) de 2.1 a 2.5 en su estado puro, y es usualmente aplicado para la lubricación de motores diésel [12,13]. Para caracterizar el sensor capacitivo, se usaron agua, glicol y hollín como contaminantes, los cuales suelen ser los

agentes que se presentan más a menudo en un motor. El glicol proviene del anticongelante o refrigerante y su constante dieléctrica relativa es de 37 [24]. En ausencia del glicol, el agua de grifo es comúnmente utilizado como refrigerante y tiene una constante dieléctrica relativa alrededor de 80. Por otro lado, el hollín es un material que está compuesto de partículas de carbono impuro procedente de la combustión incompleta en un motor y su constante dieléctrica tiende al infinito.

Puesto que los valores de las constantes dieléctricas de los contaminantes es mucho mayor a la del aceite en estado puro, se anticipó que la mezcla resultante obtendría una nueva constante dieléctrica, diferente a la muestra de control. La Figura 4.2 exhibe el diagrama esquemático del sensor capacitivo bajo condiciones de un lubricante puro y con presencia de contaminantes (ϵ_c).

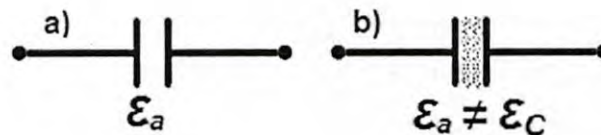


Figura 4.2 Diagramas esquemáticos de un a) capacitor experimentando una constante dieléctrica ϵ_a y un b) capacitor experimentando cambios en la constante dieléctrica y obteniendo una nueva ϵ_c , diferente a ϵ_a

Según la teoría, un cambio en la constante dieléctrica se reflejaría en un cambio en la capacitancia. Siguiendo el modelo de placas paralelas, la capacitancia esta expresada por ((4.1)), donde C es la capacitancia del capacitor, ϵ_0 es la constante dieléctrica en el vacío ($\delta_0 \approx 8.854 \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$), ϵ_a es la constante dieléctrica del medio o de la sustancia entre los electrodos la cual para este caso es la muestra de control.

$$C = \epsilon_0 \epsilon_a \frac{A}{L} = \epsilon_p \frac{A}{L} \quad (4.1)$$

ϵ_p es el producto de ϵ_0 y ϵ_a , L es la distancia entre los electrodos y A es el área de la superficie de los electrodos [25]. Por lo tanto, esta relación definirá la capacitancia mínima y máxima que se podrá medir.

4.2 Diseño del sensor capacitivo en CAD

Esta etapa tiene como objetivo diseñar el sensor en un software CAD utilizando el modelo de placas paralelas de un capacitor. Se tomó en cuenta que el sensor prototipo debe mantenerse pequeño con la finalidad de que pueda ser ajustado a una bayoneta e introducirse al cárter de un motor. Se elige el material de cobre para los electrodos, ya que ofrece la menor resistencia eléctrica.

Se comenzó modelando los diversos diseños para los electrodos, con dimensiones variadas. El agujero promedio de una bayoneta de un motor tiene un diámetro de alrededor de 1 cm, el cual fue tomado en consideración. La Figura 4.3 presenta los diagramas esquemáticos de los electrodos con diversas geometrías, diseñados con el software SolidWorks.

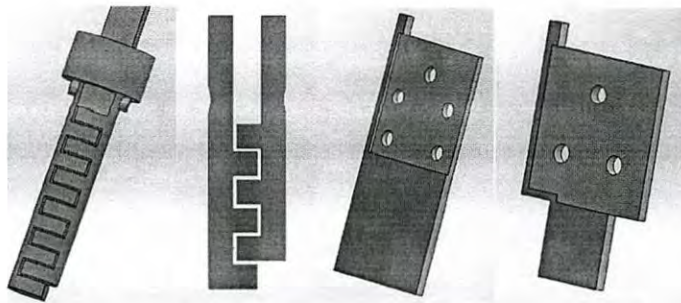


Figura 4.3 Diagrama esquemático de los electrodos de placas paralelas usados para medir capacitancia

Según la relación A/L de la ecuación (4.1), estos electrodos se comportan de manera similar y la única resultante es el rango de capacitancias percibidas. Por lo tanto, se seleccionaron los electrodos mostrados en la Figura 4.4 para el resto de los experimentos. Estos electrodos son menos costosos de fabricar, ensamblar y se mantienen relativamente pequeños con dimensiones en una escala

milimétrica. El área activa de los electrodos es de 1 cm^2 y se mantienen separados una distancia de 1 mm. Substituyendo los valores en la ecuación (4.1) y realizando los cálculos, se obtuvo que la capacitancia de la muestra de control debe obtenerse a partir de 1.80 pF a 20° C .

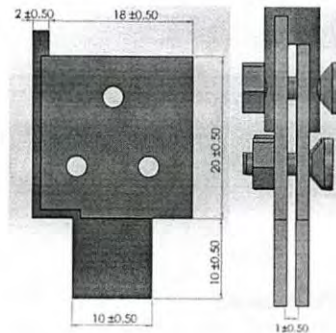


Figura 4.4 Diagrama esquemático de las dimensiones de los electrodos en una escala milimétrica

4.3 Desarrollo del sistema de medición e integración

El objetivo de esta fase es el desarrollo de los distintos elementos que darán paso a la medición y captura de datos de capacitancia. Las tareas realizadas fueron las siguientes

- Fabricación del prototipo
- Desarrollo del sistema de medición
- Desarrollo del software para cálculo y captura de datos

A continuación se describe la dinámica de cada una de éstas.

4.3.1 Fabricación del prototipo

Los sensores fueron fabricados según las especificaciones del modelo seleccionado. Se utilizó un centro de maquinado CNC para darle las formas de los electrodos en una placa fenólica. Se hicieron barrenos que permiten la sujeción mediante tornillos a una bayoneta de acero y mantienen los electrodos

separados a una distancia específica. Cada electrodo lleva una línea de cobre, donde se soldan los cables que llevarán la corriente eléctrica hasta el área activa. El ensamble de todas las piezas se muestra en la Figura 4.5.

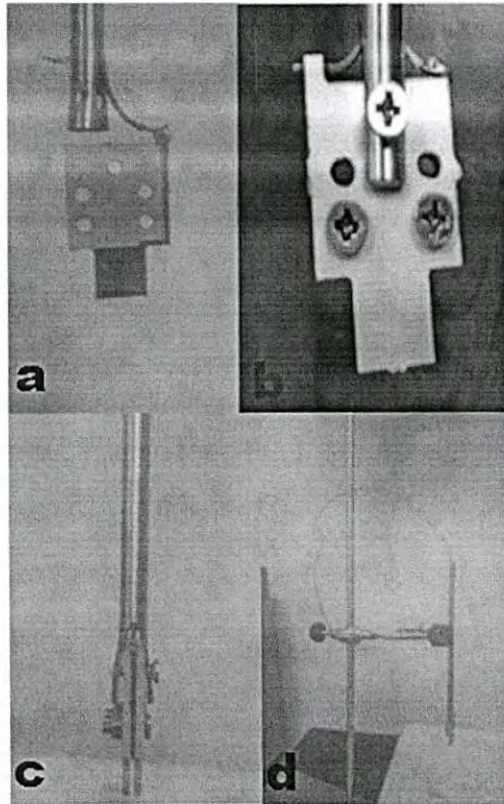


Figura 4.5 Imágenes del ensamble del prototipo del sensor capacitivo, a) vista del electrodo, b) vista frontal del ensamble del sensor, c) vista lateral del ensamble del sensor, y d) vista del sensor sujetado sobre una placa térmica de laboratorio

4.3.2 Desarrollo del sistema de medición

Para poder medir la capacitancia utilizando el sensor prototipo, se investigó la forma de calcularla a partir de los cambios de voltaje. Estos cambios pueden ser medidos por diversos dispositivos. Para los experimentos se eligió un Arduino Mega como una tarjeta de adquisición de datos, por ser una alternativa económica en comparación a tarjetas DAQ especializadas.

La Figura 4.6 presenta el diagrama esquemático del circuito resultante cuando el sensor es polarizado. Este se conoce como un circuito divisor de voltaje

capacitivo. El capacitor 1 tiene una capacitancia C_A , la cual corresponde a la capacitancia producida por el sensor sumergido en la muestra de control, mientras que el capacitor 2 tiene una capacitancia parásita C_p producida en el sistema. Cabe mencionar que no es despreciable cuando C_A llega alcanzar valores en el orden de picofaradios.

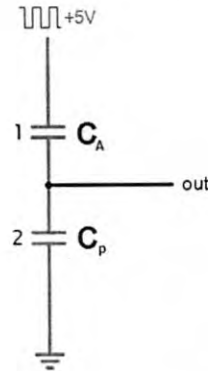


Figura 4.6. Diagrama esquemático del circuito divisor de voltaje capacitivo

Considerando que el valor mínimo de C_A está determinado por la relación A/L , se elige una relación apropiada para el divisor de voltaje entre C_A y C_p , que beneficie con una resolución satisfactoria y que pueda ser medida. En este experimento se usó una relación de $A/L = 10$ cm, la cual brinda valores de capacitancia dentro un rango de 1 pF a 100 pF y puede ser medida por el Arduino.

Debido a que la caída de voltaje generada por C_A está dada por la ecuación (4.2 y la suma de las caídas de voltaje producidas por los dos capacitores es igual a cero ((4.3), se puede obtener una expresión dinámica de estos voltajes en función de las capacitancias obtenidas [26].

$$V_{out} = \frac{1}{C_A} \int_0^t i dt \quad (4.2)$$

$$V_{in} = \left(\frac{1}{C_A} + \frac{1}{C_p} \right) \int_0^t i dt \quad (4.3)$$

Relacionando las expresiones (4.2 y (4.3), se puede obtener una expresión para el voltaje de salida dependiente del voltaje de entrada, tal como se expresa en la ecuación (4.4). Con la apropiada calibración, la capacitancia parásita C_p del circuito puede ser despejada para cualquier valor conocido de referencia de C_A ((4.5). Además, con el valor obtenido de C_p se puede obtener un valor desconocido de C_A (4.6). Por lo tanto, para un circuito divisor de voltaje capacitivo, las expresiones (4.4), (4.5) y (4.6) son las más importantes para la programación y calibración del sensor.

$$V_{out} = \frac{V_{in}C_A}{C_p + C_A} \quad (4.4)$$

$$C_p = \frac{C_A(V_{in} - V_{out})}{V_{out}} \quad (4.5)$$

$$C_A = \frac{V_{out}C_p}{V_{in} - V_{out}} \quad (4.6)$$

La ecuación (4.6) puede ser calculada por el mismo Arduino para desplegarse en tiempo real según la capacitancia de la muestra de control.

4.3.3 Desarrollo de software para cálculo y captura de datos

Una vez definido el sistema de medición, se desarrolló el software que realiza todos los cálculos asociados con el sistema y la captura de los datos. Se eligió dividir el software en dos partes: un programa instalado en el Arduino para realizar mediciones y hacer cálculos. El segundo programa utiliza instrumentación virtual en LabVIEW para recibir datos del Arduino en tiempo real y capturarlos. La

Figura 4.7 muestra los códigos elaborados y el panel de control a partir de instrumentación virtual.

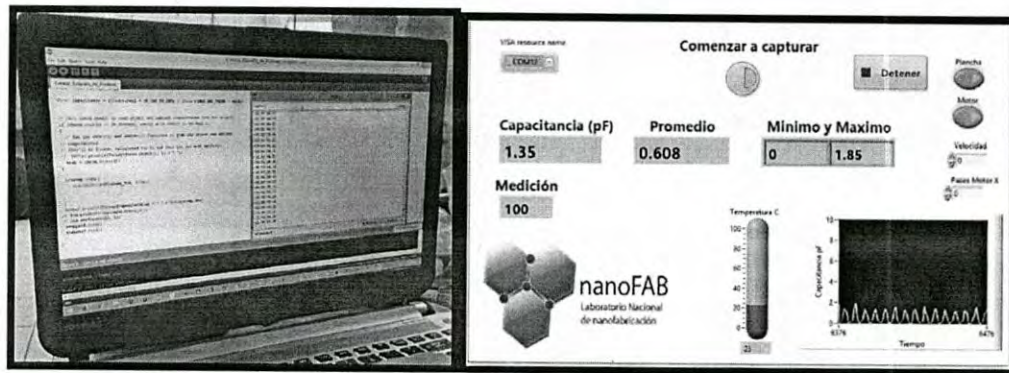


Figura 4.7 Imágenes del código de Arduino en funcionamiento y el panel de control en LabVIEW

4.4 Implementación del sistema

Las Figura 4.8 y Figura 4.9 muestran el diagrama de flujo y el arreglo experimental del sistema, respectivamente. En este arreglo, el sensor genera las caídas de voltaje que se envían al Arduino. Posteriormente, se realizan los cálculos de capacitancia en el microprocesador. Después, los datos son enviados a una computadora donde el software LabVIEW los recolecta.

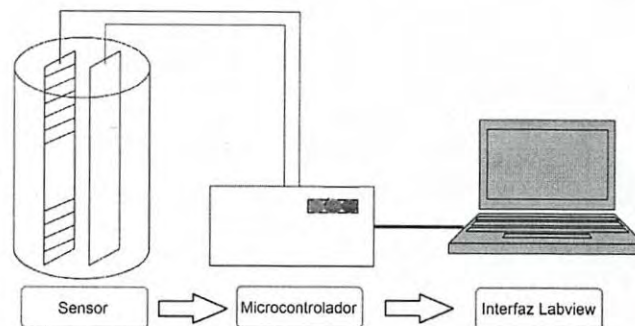


Figura 4.8 Diagrama de flujo del arreglo experimental y sus principales partes

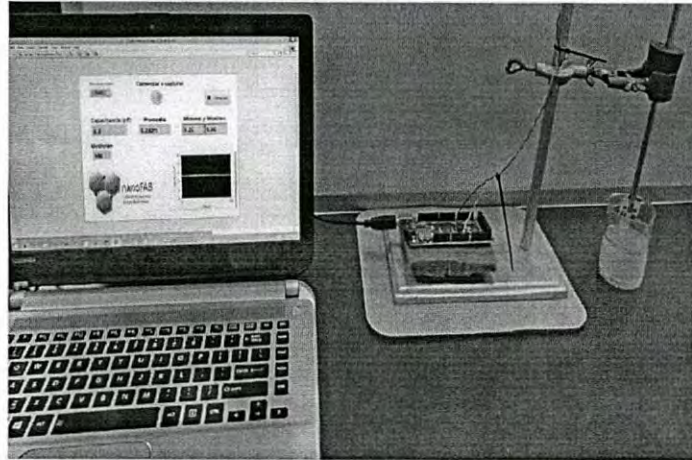


Figura 4.9 Imágenes del arreglo experimental utilizado para inducir una temperatura y una agitación determinada al aceite

Las lecturas realizadas expresan una capacitancia y éstas se midieron en condiciones de un lubricante puro y uno contaminado en forma controlada. La Figura 4.10 presenta los resultados en distintas condiciones. Primero se realizaron mediciones de la capacitancia del aceite libre de contaminantes a 80 °C, para observar su comportamiento. Posteriormente, se realizaron lecturas para el aceite a una temperatura de 80 °C, contaminado con 6 ml de agua y glicol (aproximadamente 9.7% del volumen total). Todas las mediciones del aceite contaminado produjeron niveles capacitivos por encima de los 2.5 pF. Las muestras de aceite contaminadas con agua produjeron hasta 4 pF. En comparación, los niveles de capacitancia del refrigerante son significativamente menores, los cuales oscilan entre 2.5 y 2.8 pF. Estos resultados pueden asociarse con la interacción de los diferentes materiales, los cuales cuentan con sus constantes dieléctricas específicas. Adicionalmente, la temperatura de medición y el volumen de impurezas que fluyen a través del sensor pueden producir variaciones.

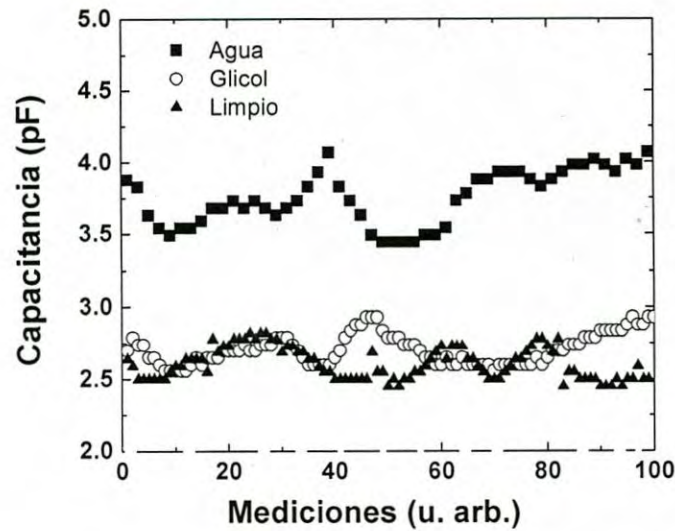
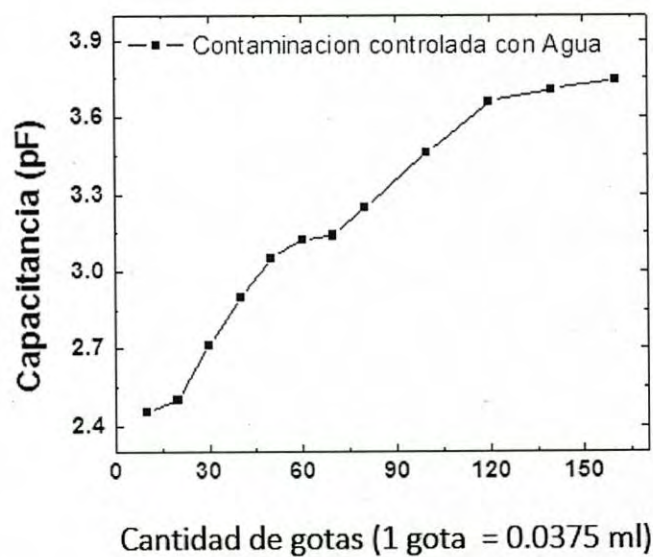


Figura 4.10 Gráfica de la captura de capacitancias a lo largo de 100 mediciones a una temperatura de 80 °C (ensayo de repetitividad)

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta los resultados de la contaminación del lubricante con agua de forma controlada. La gráfica muestra el incremento de la capacitancia como función del número de gotas introducidas en un recipiente de 65 ml de aceite. Cada punto en la gráfica representa el promedio de 100 mediciones realizadas.



Capítulo 4: Resultados

Figura 4.11 Gráfica de la capacitancia del sensor bajo condiciones de contaminación de agua (80 °C)

Por otro lado, la caracterización usando las mismas condiciones de medición y el contaminante de glicol, se exhibe en la Figura 4.12. Es importante reiterar que el refrigerante es el que contiene el glicol, pero también contiene un gran índice de agua y varios químicos añadidos. La capacitancia de esta mezcla muestra una tendencia hacia arriba cuando fluye entre los electrodos del sensor. El aumento en la presencia de cada contaminante en el aceite permite que más de este sea percibido por el sensor, lo que a su vez genera un cambio mayor en la capacitancia.

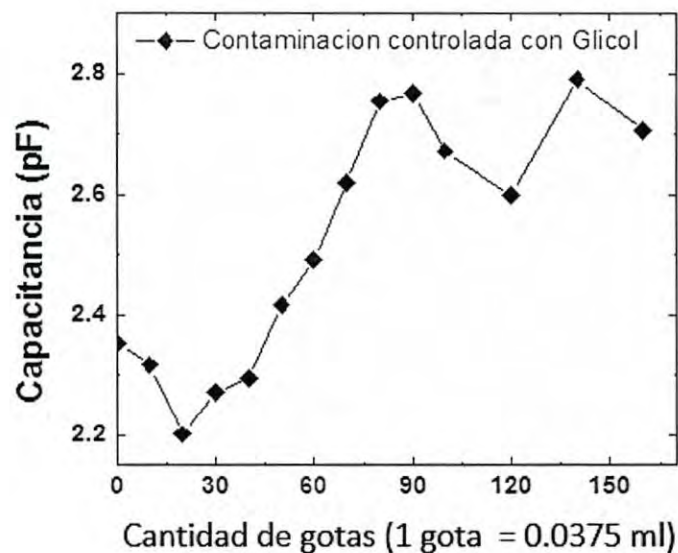


Figura 4.12 Gráfica de la capacitancia del sensor bajo condiciones de contaminación de glicol, (80 °C)

Todas las mediciones se realizaron en constante agitación hasta alcanzar una cantidad de 160 gotas (6 ml) de contaminante. A este volumen el aceite pierde su consistencia viscosa. Además, tanto el agua como el refrigerante en estas cantidades suelen conducir corriente eléctrica entre los dos electrodos y cerrar el circuito. En estos casos el Arduino calcula un valor infinito ya que $V_{in} - V_{out}$ en la ecuación (4.6) es igual a cero.

4.5 Establecimiento e implementación de estación de pruebas

En esta sección se presenta el desarrollo de una estación de pruebas que realiza mediciones de una manera más efectiva. Se busca minimizar el error humano mediante la automatización. La estación de pruebas también tiene como propósito simular el ambiente real al que el sensor estaría expuesto y disminuir la interferencia electromagnética externa sobre las mediciones. Después del diseño y su fabricación, se realizan nuevas mediciones siguiendo los mismos procedimientos con la técnica discutida anteriormente.

4.5.1 Diseño de la estación

El diseño comienza identificando las variables en el método de medición que pueden dar pie a lecturas erróneas o irreproducibles. Estas pueden ser de naturaleza física, o toman efecto durante la manipulación del sensor por el operador. Para el diseño se toma en consideración los siguientes aspectos:

- La longitud de los cables del sensor deben permanecer constantes: esto disminuye la variación en las caídas de voltaje y capacitancias parásitas.
- El cableado debe ser a prueba de interferencia electromagnética: el ruido electromagnético puede generar lecturas erráticas.
- El sensor debe realizar mediciones en la misma posición dentro de las muestras: el sensor debe estar ubicado siempre en el centro del contenedor de la muestra de aceite para evitar posible interacción con el contenedor mismo.
- El lugar de medición debe simular las condiciones a las que estaría expuesto el aceite dentro de un motor: se requiere que se pueda controlar la temperatura y proveer agitación mecánica para la muestra.
- La separación entre los electrodos debe ser constante: se busca tener control sobre la separación.

Capítulo 4: Resultados

- La unión entre los electrodos y el sensor debe ser mecánica: esto evitará posibles capacitancias parásitas debidas a la soldadura

La figura 4.13 muestra el diseño realizado en CAD siguiendo estas especificaciones. En este modelo, el sensor se coloca sobre una plataforma que puede desplazarse verticalmente por rieles mediante un motor a pasos y un tornillo sin fin. De esta forma el sensor puede ser colocado siempre en la misma posición dentro de una muestra. La plataforma contiene un motor DC el cual tiene la tarea de agitar la muestra con un batidor, un motor a pasos pequeño que se encarga de mantener los electrodos separados a una distancia constante determinada, y un lugar para colocar un sensor de temperatura IR.

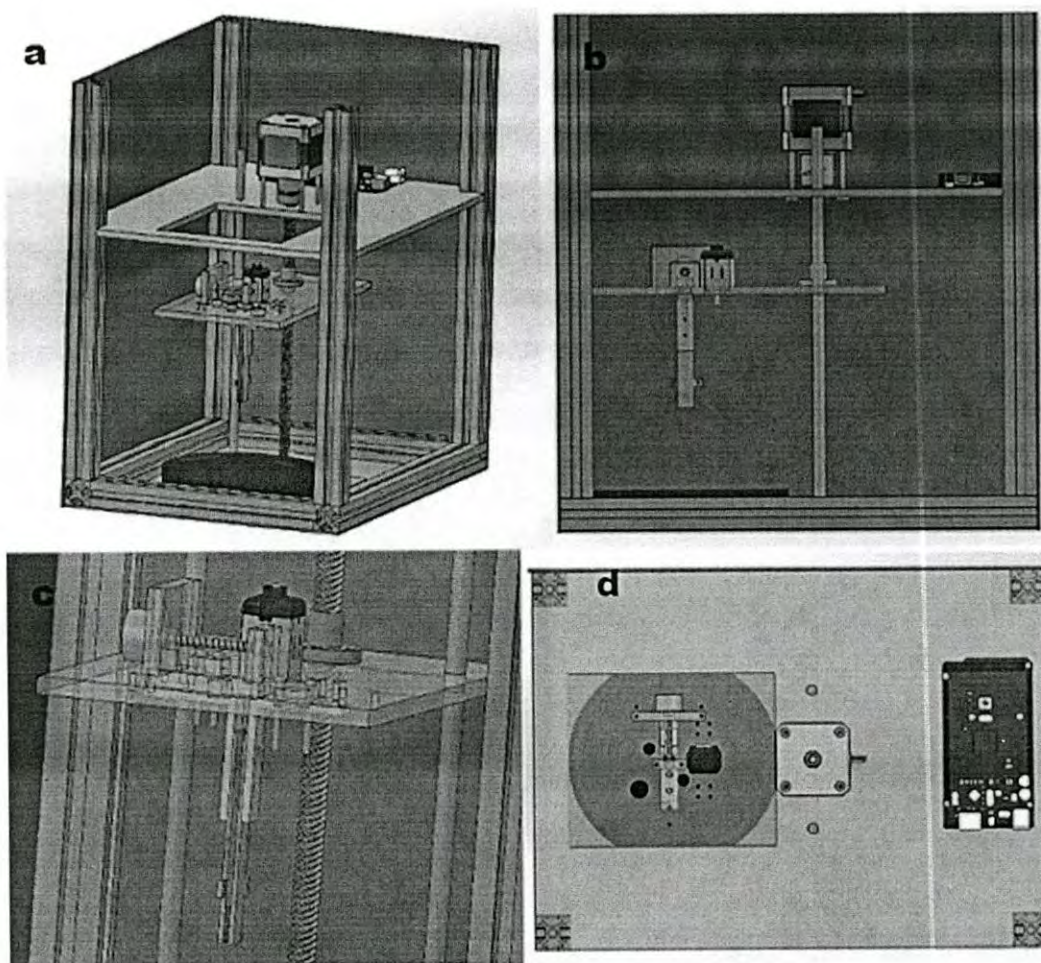


Figura 4.13 Imágenes de la estación de pruebas diseñada mediante CAD; a) Vista isométrica; b) vista lateral; c) vista de la plataforma móvil; d) vista superior

Con este diseño se pueden fabricar diversos sensores y ajustarse a la plataforma en el mismo lugar mediante tornillos. Además, la longitud del cableado siempre será constante y pasará por el mismo lugar desde el Arduino hasta los conectores del sensor.

4.5.2 Fabricación del prototipo de la estación

La estructura de la estación de pruebas fue fabricada a base de perfil de aluminio y lámina de acero. Las bases que sostienen los diversos componentes fueron maquinados en acrílico, y los sujetadores del sensor se imprimieron en una impresora 3D. Los cables que conectan al Arduino con el sensor son coaxiales, lo que les da una mayor resistencia al ruido electromagnético. El contenedor de las muestras es de aluminio y va colocado sobre una plancha debajo del sensor. La Figura 4.14 muestra las imágenes del prototipo ensamblado.

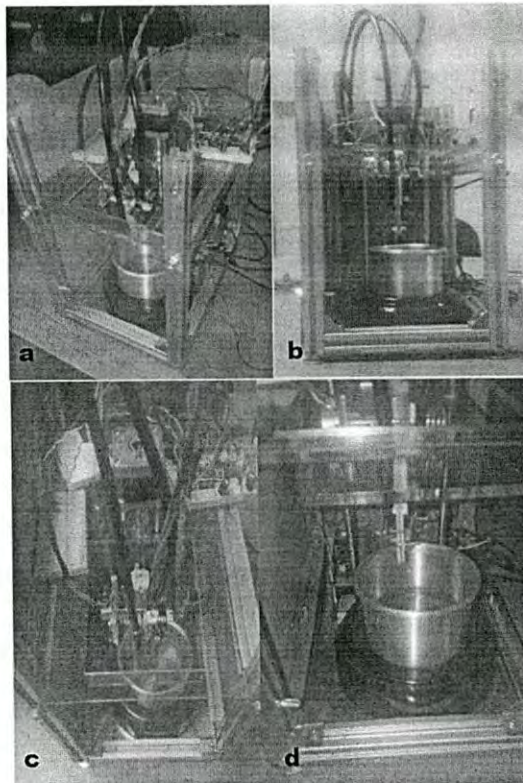


Figura 4.14 Imágenes del prototipo de la estación de pruebas; a) vista isométrica; b) vista frontal; c) vista superior; d) vista del interior

La plancha se acciona mediante un relevador y un sensor infrarrojo permite al Arduino medir la temperatura de la muestra a través de una comunicación serial con el protocolo Wire. Se utilizaron los drivers A4988 para accionar los dos motores a pasos. Se realizó un circuito adicional para implementar modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) y poder regular la velocidad del motor DC. El circuito de medición es alimentado con 12 V, y la placa térmica con 120 V. Por último, un módulo bluetooth HC-05 mantiene una comunicación entre el Arduino y una computadora de forma remota.

4.5.3 Sistema de control

La automatización de la estación de pruebas se lleva a cabo a través de un Arduino Mega, el cual responde a comandos enviados por LabVIEW a través del protocolo UART, para el control de una placa térmica y tres motores de la estación. Cuando el botón de inicio es presionado en el panel de control de LabVIEW, el Arduino acciona un motor a pasos Nema 17HS4417. Este motor desplaza el sensor por un tornillo sin fin en dirección descendiente y lo sumerge dentro de la muestra. Después, un motor DC es activado para homogenizar la muestra, agitándola con un batidor. Si se requiere, el Arduino puede controlar la temperatura de la plancha y la muestra. Cuando las condiciones son las adecuadas para su estudio se comienza con el proceso de medición.

La Figura 4.15 muestra el diagrama esquemático del sistema de control. El microprocesador basado en Arduino actúa como una tarjeta de adquisición de datos y realiza las mediciones de voltaje por medio de su puerto analógico. De acuerdo a la teoría en electrónica, se utilizan estas mediciones de voltaje para calcular la capacitancia de la muestra en el mismo programa. Cada valor de temperatura y capacitancia calculada es transferido a la plataforma hecha en LabVIEW para ser capturados y procesados. Desde el panel de control es posible controlar el motor a pasos PL15S-020 el cual se encarga de ajustar y calibrar la distancia entre electrodos.

Capítulo 4: Resultados

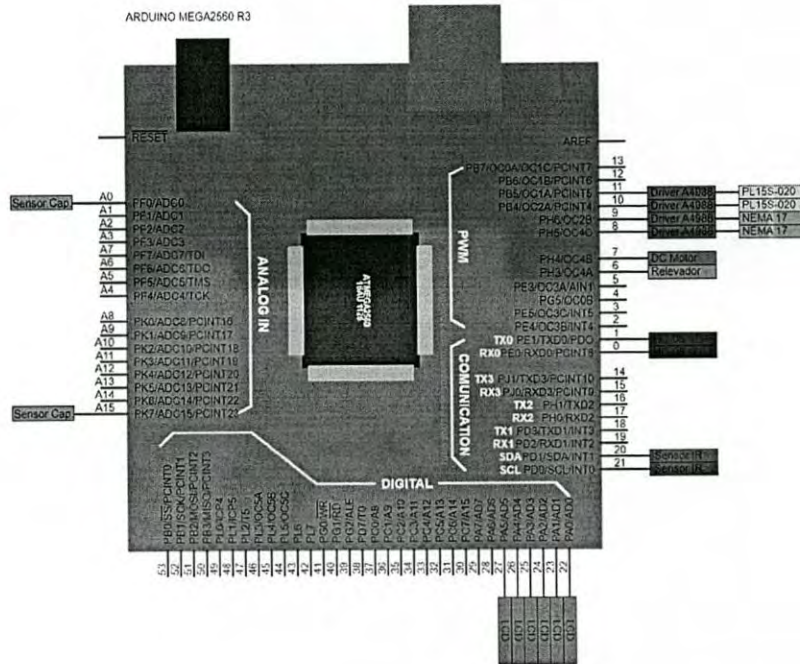


Figura 4.15 Diagrama esquemático del sistema de control y medición basado en Arduino

En la Figura 4.16 se presentan las imágenes de las configuraciones en LabVIEW.

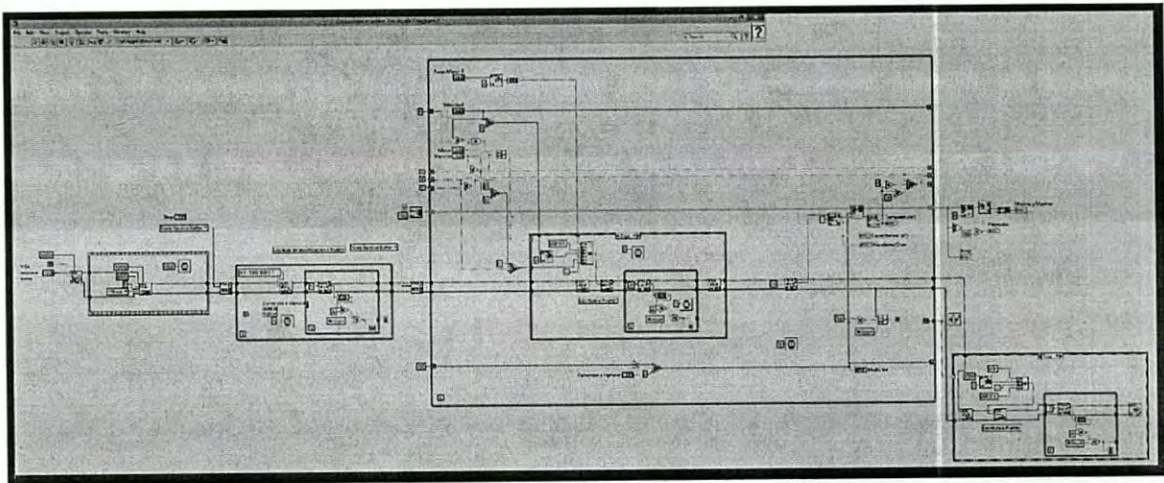


Figura 4.16 Diagrama de bloques en LabVIEW

Las mediciones terminan cuando llegan a un número previamente determinado, el cual tiene como propósito proporcionar la reproducibilidad del sistema de medición. Al finalizar, el motor Nema 17HS4417 eleva el sensor y lo regresa a su posición inicial. Posteriormente, LabVIEW calcula el promedio y obtiene los

Capítulo 4: Resultados

mínimos y máximos de todos los valores de capacitancia. Estos datos son posteriormente desplegados en el panel de control y enviados a una base de datos para su futuro análisis.

4.5.4 Obtención de datos con la estación

En esta sección se presentan los resultados obtenidos implementando la estación de pruebas y utilizando el mismo modelo del sensor. Primero se realizaron mediciones sobre muestras de 70 mL de aceite a temperatura de 25 °C, a una frecuencia de 50 Hertz. A esta temperatura las lecturas de capacitancia deben partir de aproximadamente 1.85 pF. El programa fue ajustado para compensar la nueva capacitancia parásita producida en el sistema. Después, se obtuvo un análisis metrológico de repetibilidad y reproducibilidad (R&R) por el método largo, para conocer la estabilidad de la estación. La Tabla 4.1 muestra los datos obtenidos utilizando tres sensores idénticos y realizando diez mediciones para cada uno de tres intentos. Para el experimento se espera que la tolerancia en la fluctuación de las medidas sea de 1 pF, ya que las perturbaciones sobre el sistema pueden producir valores mayores a este.

Tabla 4.1 Datos para evaluar Repetibilidad y Reproducibilidad del prototipo de la Estación de Pruebas

ESTUDIO DE REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD (R & R) METODO LARGO																	
Aseguramiento de Calidad																	
No. de Parte y Nombre: Sensores de estación de pruebas										Fecha: 2/10/2018							
Tolerancia Especificada: 1.0000										Elaborado por: Hiram Luna							
No. y Nombre de GAGE:										Característica: Capacitancia (pF) - Aceite Limpio							
RECOLECCIÓN DE DATOS																	
OPERADOR	A.- Sensor 1				Promedio X	B.- Sensor 2				Promedio X	C.- Sensor 3				Promedio X	Prom. Parte %	
	columna 1	columna 2	columna 3	columna 4		columna 5	columna 6	columna 7	columna 8		columna 9	columna 10	columna 11	columna 12			
Muestra	1er intento	2do intento	3er intento	Rango	1er intento	2do intento	3er intento	Rango	1er intento	2do intento	3er intento	Rango	X	X _o			
1	1.863	1.863	1.862	0.0210	1.8760	1.863	1.863	1.863	-	1.8630	1.863	1.863	1.863	-	1.8630	1.86067	
2	1.863	1.863	1.863	-	1.8630	1.863	1.863	1.863	0.0210	1.8760	1.862	1.863	1.863	0.0210	1.8760	1.87333	
3	1.863	1.862	1.863	0.0210	1.8760	1.863	1.863	1.863	-	1.8630	1.863	1.863	1.863	-	1.8630	1.86067	
4	1.863	1.863	1.863	0.0200	1.8667	1.863	1.863	1.863	-	1.8630	1.863	1.862	1.863	0.0210	1.8760	1.86286	
5	1.903	1.863	1.863	0.0200	1.8667	1.863	1.863	1.863	-	1.8630	1.863	1.863	1.863	-	1.8630	1.86222	
6	1.863	1.863	1.863	-	1.8630	1.863	1.903	1.862	0.0410	1.8627	1.863	1.863	1.903	0.0200	1.8667	1.86511	
7	1.863	1.863	1.863	-	1.8630	1.863	1.863	1.842	0.0410	1.8623	1.903	1.863	1.863	0.0200	1.8667	1.86067	
8	1.863	1.863	1.863	-	1.8630	1.863	1.863	1.863	-	1.8630	1.863	1.863	1.863	0.0200	1.8667	1.86522	
9	1.863	1.863	1.863	-	1.8630	1.903	1.863	1.863	0.0200	1.8627	1.863	1.863	1.863	-	1.8630	1.86522	
10	1.863	1.863	1.863	-	1.8630	1.863	1.863	1.863	-	1.8630	1.863	1.863	1.863	-	1.8630	1.86333	
Totales	18.622	18.620	18.606	0.0620	18.6290	18.650	18.600	18.7470	0.1230	18.6157	18.620	18.606	18.6700	0.1020	18.6360	R _o *= 1.862700	
Suma	56.480			R _o		Suma	56.4470		R _o		Suma	56.5080		R _o		R _o *= 0.006989	
X _o	1.862933333					X _o	1.861566667					X _o	1.8636				
R _o	0.0062				# Intentos	D _o	X Máx:				LSC _o = X + A ₂ R				A ₂ = 1.023		
R _g	0.0123				3	2.58	X mín:				LSC _o *= 1.8631607						
R _o	0.0102				LSC _o *=	R x CL	X Df				LSC _o = X - A ₂ R						
SUM	0.0207				LSC _o *=	0.029402	0.000033333				LSC _o *= 1.8722						
R	0.016233333																

Nota : Las constantes y las formulas estan establecidas para 3 intentos y 3 operadores

Capítulo 4: Resultados

La **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** muestra el cálculo de la variación del sistema. El estudio demuestra que el porcentaje de la relación entre la repetibilidad y reproducibilidad vs la tolerancia es de 3%, la cual indica que el sistema de medición es aceptable. El valor de repetibilidad se presenta mayor al valor de reproducibilidad, esto quiere decir que existe una variabilidad en el sistema de medición, pero los datos son reproducibles entre sensores. [27]

Tabla 4.2 Resultados del estudio R&R del prototipo de la Estación de Pruebas

ESTUDIO DE REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD (R & R) MÉTODO LARGO Aseguramiento de Calidad																							
No. de Parte y Nombre: <u>Sensores de estacion de pruebas</u>		Fecha: <u>2/10/2018</u>																					
Tolerancia Especificada: <u>1.0000</u>		Elaborado por: <u>Hiram Luna</u>																					
No. y Nombre de GAGE: <u>0</u>		Característica: <u>Capacitancia (pF) - Aceite Li</u>																					
RESULTADOS DE LA HOJA DE DATOS AC-008																							
R = <u>0.01023333</u>		X Diff = <u>0.002033333</u>																					
		Rp = <u>0.00888889</u>																					
Análisis Unitario de Medición		% Total de Variación (TV)																					
Repetibilidad - Variación del Equipo (EV) $EV = R \times K_1 =$ $EV = 0.03121167$		$\% EV = 100 [EV/TV]$ $\% EV = 94.16\%$ $\% EV \text{ vs Tol.} = 3.12\%$																					
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>INTENTOS</th> <th>K₁</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>4.56</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>3.05</td> </tr> </tbody> </table>	INTENTOS	K ₁	2	4.56	3	3.05																
INTENTOS	K ₁																						
2	4.56																						
3	3.05																						
Reproducibilidad - Variación del Operador (AV) $AV = [(XDiff \times K_2)^2 - (EV^2/nr)]^{1/2}$ $AV = 0.00549$ $AV = 3.014E-05$ $AV = 3.2472E-05$ $AV = -2.3322E-06$ $AV = 0$		$\% AV = 100 [AV/TV]$ $\% AV = 0.00\%$ $\% AV \text{ vs Tol.} = 0.00\%$ n = 10 r = 3 n = Numero de Partes r = Numero de Intentos																					
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>OPERADOR</th> <th>2</th> <th>3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>K₂</td> <td>3.65</td> <td>2.7</td> </tr> </tbody> </table>	OPERADOR	2	3	K ₂	3.65	2.7																
OPERADOR	2	3																					
K ₂	3.65	2.7																					
Repetibilidad y Reproducibilidad (R & R) $R \& R = (EV^2 + AV^2)^{1/2}$ $R \& R = 0.00097417$ $R \& R = 0.03121167$		$\% \text{ de R \& R} = 100 [R \& R / TV]$ $\% \text{ de R \& R} = 94.1618\%$ $\% \text{ de R \& R vs Tol.} = 3.12\%$																					
Variación de la Parte (PV) $PV = R_p \times K_3$ $PV = 0.01118$		$\% PV = 100 [PV/TV]$ $\% PV = 33.6684\%$																					
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>PARTES</th> <th>K₃</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>3.65</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>2.7</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>2.3</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>2.08</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>1.93</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>1.82</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>1.74</td> </tr> <tr> <td>9</td> <td>1.67</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>1.62</td> </tr> </tbody> </table>	PARTES	K ₃	2	3.65	3	2.7	4	2.3	5	2.08	6	1.93	7	1.82	8	1.74	9	1.67	10	1.62		
PARTES	K ₃																						
2	3.65																						
3	2.7																						
4	2.3																						
5	2.08																						
6	1.93																						
7	1.82																						
8	1.74																						
9	1.67																						
10	1.62																						
VARIACIÓN TOTAL (TV) $TV = (R \& R^2 + PV^2)^{1/2}$ $TV = 0.00109871$ $TV = 0.03314685$		Categoría de Datos $d_2 = 1.693$ $PV / R\&R \times d_2 = 0.6$																					

La

Figura 4.17 presenta las capacitancias obtenidas en una escala de picofaradios (pF) a 25 °C para el aceite libre de impurezas. Cada punto en la gráfica representa el promedio de capacitancias resultante de 100 mediciones capturadas por LabVIEW. En la Figura 4.18 se muestra la respuesta a incrementos graduales de temperatura, partiendo de una temperatura ambiente

Capítulo 4: Resultados

hasta llegar a 80 °C, la temperatura a la que podría estar sujeto el aceite dentro de un motor.

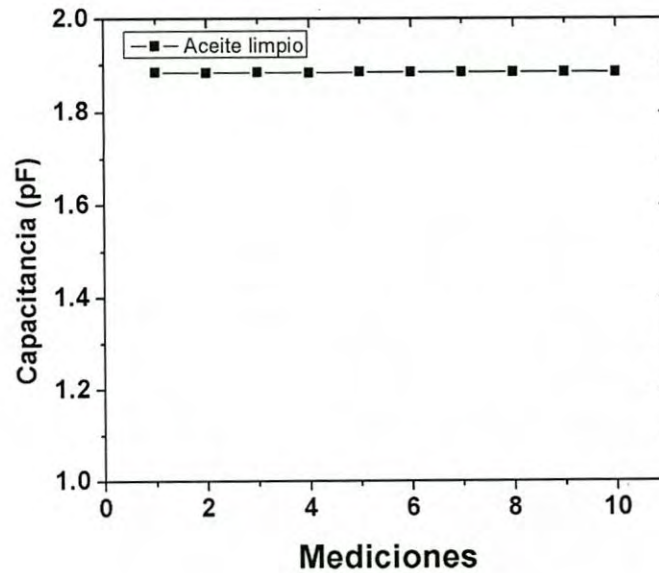


Figura 4.17 Gráfica de la capacitancia del sensor sumergido en aceite libre de impurezas

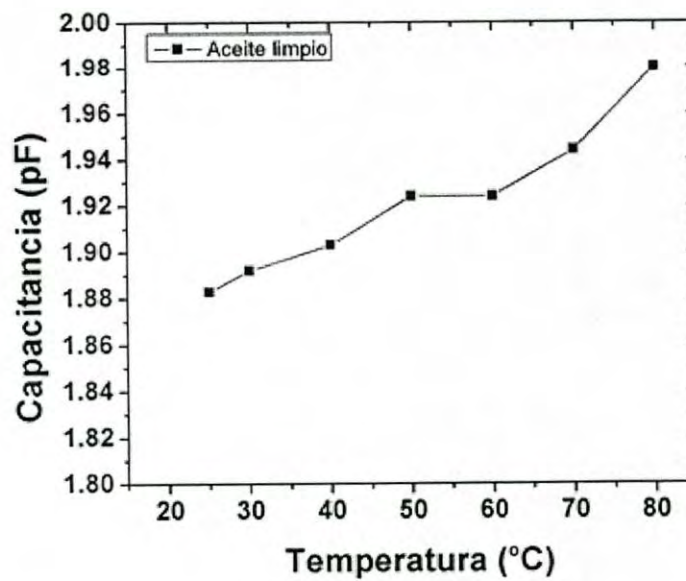


Figura 4.18 Gráfica de la capacitancia obtenida a diferentes temperaturas

Capítulo 4: Resultados

Posteriormente, se efectuaron mediciones sobre 60mL de lubricante contaminado con agua, refrigerante y hollín de manera controlada a 80 °C. Por cada incremento de contaminante añadido, la muestra fue agitada por 20 minutos, utilizando el batidor de la estación. Las Figura 4.19, Figura 4.20 y Figura 4.21 muestran la respuesta del sensor, donde cada punto en las gráficas representa el promedio de capacitancias resultante de 100 mediciones por cada incremento de 10 gotas (0.375 mL) de agua, refrigerante y 0.4g de grafito molido. Cada contaminante muestra una tendencia hacia arriba en el nivel de capacitancia. En comparación la respuesta al refrigerante es más lenta que al de agua, por lo tanto se agregan más gotas por medición. En el caso del hollín esta respuesta es de manera acelerada, y a grandes cantidades cierra el circuito en el sistema y descarga el sensor. Debido a esto las pruebas fueron concluidas a partir de 1.6 g.

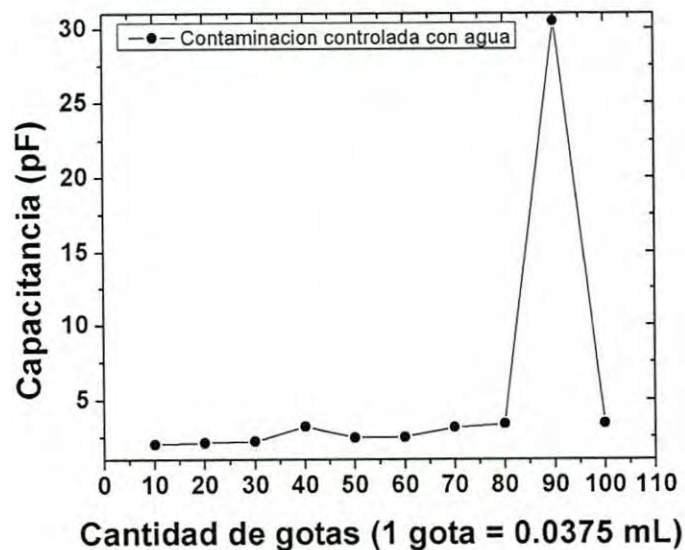


Figura 4.19 Gráfica de la capacitancia del sensor bajo condiciones de contaminación de agua (80 °C)

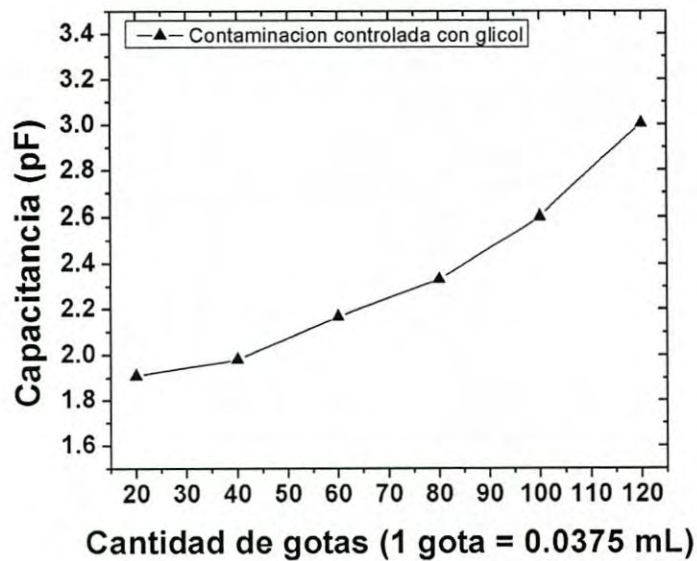


Figura 4.20 Gráfica de la capacitancia del sensor bajo condiciones de contaminación de glicol (80 °C)

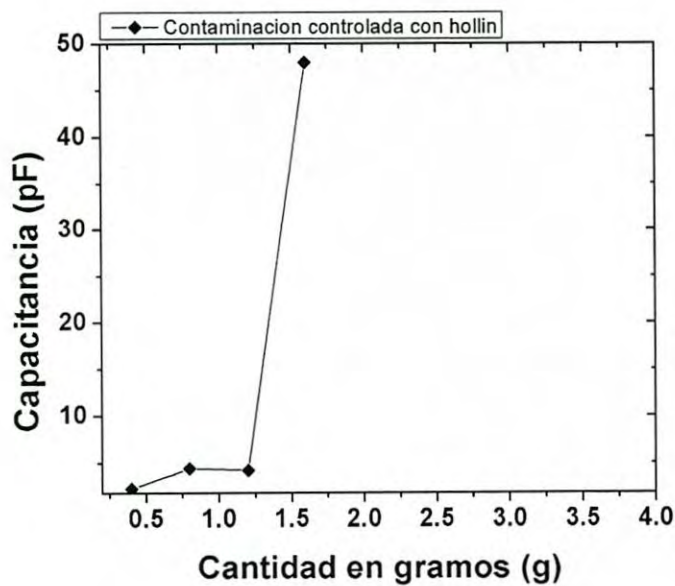


Figura 4.21 Gráfica de la capacitancia del sensor bajo condiciones de contaminación de hollín (80 °C)

Capítulo 4: Resultados

Por último, el sensor fue vertido dentro de una muestra de aceite contaminado en campo por sustancias desconocidas. La Figura 4.22 muestra los promedios de 100 mediciones de capacitancia. La respuesta en estas condiciones es de niveles en la capacitancia más bajos que los del aceite limpio.

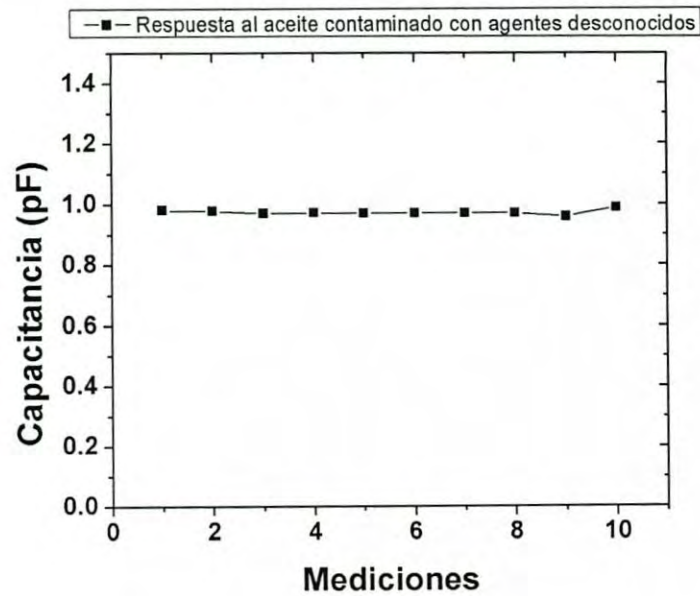


Figura 4.22 Gráfica de la capacitancia del sensor bajo condiciones de contaminación de una muestra con contaminación desconocida (80 °C)

Capítulo 5. Conclusiones

En el presente trabajo se exhiben los resultados obtenidos en un sensor capacitivo para la detección de impurezas en aceite lubricante de motores de diésel. El dispositivo diseñado prueba ser apto para discernir cambios en el aceite y producir una alarma cuando éste es contaminado con agua o glicol (para más de 0.75 mL) u hollín, (a partir de 0.4 g). Cuando el aceite es contaminado por sustancias desconocidas o en la etapa en que debe ser reemplazado, el cambio producido en la capacitancia es igualmente significativo. Además, la decadencia de aceite, que representaría una baja en su nivel dentro de una máquina, presenta a su vez una baja en su capacitancia. La Figura 5.1 muestra los datos obtenidos a 80 °C y sobrepuestos sobre una misma gráfica. Cada punto representa el promedio de 100 mediciones.

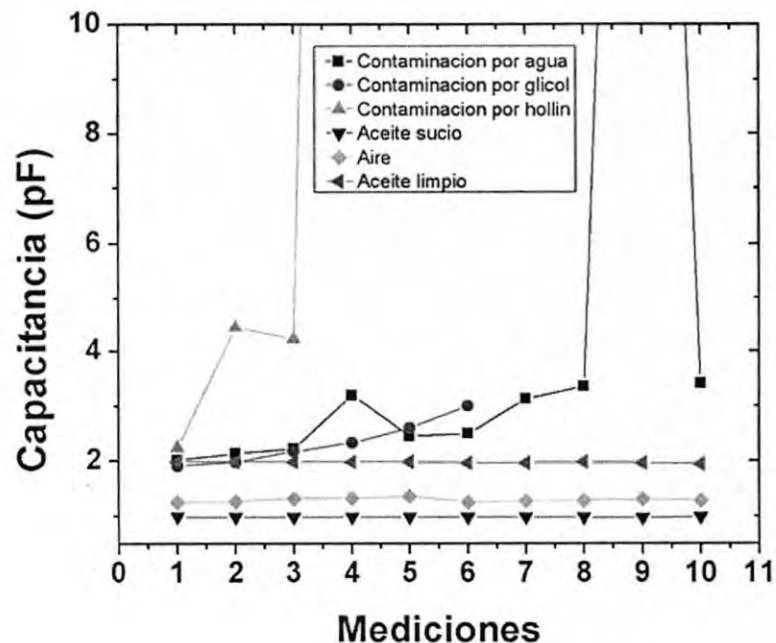


Figura 5.1 Gráfica de resultados sobrepuestos de capacitancias del aceite sujetos a distintos contaminantes (80 °C)

Se cree que con esto se puede programar un gradiente de calidad para ser utilizado en campo, o un sensor que genere una alarma cuando se detecte una

Capítulo 5: Conclusiones

impureza. Esto beneficiaría a las empresas de transporte, reduciendo los costos en mantenimiento debido a fallas repentinas. Además, el análisis metrológico muestra que la repetibilidad del sistema de medición puede ser mejorada y dar pie a datos más precisos. La sensibilidad del sensor también puede ser ajustada según la necesidad, puesto que se encuentra sujeta al área de los electrodos, la separación entre estos y el tiempo entre cada medición.

Bibliografía

- [1] CalRecycle and Klide&Company, "Lubricant Consumption and Used Oil Generation in California: A Segmented Market Analysis," no. September, pp. 2000–2020, 2012.
- [2] L. M. Guide and L. M. Guide, "Types of Lubricants," no. 6.
- [3] K. . Ludema, "Friction, wear, lubrication," First Edit., S. Norm, Ed. Ann Arbor: CRC PRes, 1996, p. 263.
- [4] L. Deters, "Mechanical Shaft Seals for Pumps - Tribology," First Edit., Grunfos, 2009, pp. 295–326.
- [5] T. Mang, "Lubricants and their Market," pp. 1–6, 2007.
- [6] R. Mandaković and B. Novina, "TRENDS , DEMANDS AND PARADOXES OF LUBRICANT MICRO MARKETS SUCH AS CROATIA AND THE SURROUNDING COUNTRIES," pp. 201–215.
- [7] A. Gosalia, "Sustainability and the Global Lubricats Industry," *Lube Eur. Lubr. Ind. Mag.*, no. 82, pp. 2007–2012, 2012.
- [8] Marketsandmarkets.com, "Lubricants Market by Type (Mineral Oil, Synthetic Lubricants, Bio-Based, and Greases), by Application (Transportation and Industrial Machinery & Equipment), and by Region (APAC, EU, NA, MEA, AND SA) - Global Forecast to 2021," 2016.
- [9] "Overview of the European Lubricant Demand Overview of Kline About Kline & Company : Corporate Overview : Our Philosophy :," 2014.
- [10] V. Noah and S. Paolo, "The Dynamics of the Global Lubricants Industry , 2012 to 2020," 2012.
- [11] G. Roussy and J. Thiebaut, "Electrical techniques for monitoring the condition of lubrication."
- [12] M. Mowry, "True Cost of Bearing Lubrication." Igus, 1992.
- [13] E. Tech, "Lubricant selection May Help Lower Operating cost." *Energy Tech*, pp. 1–3.
- [14] "Lubricant Additive Impacts on Human Health and the Environment," no. *Freedonia* 2013, pp. 17–35.
- [15] J. Zhu, J. M. Yoon, D. He, Y. Qu, and E. Bechhoefer, "Lubrication Oil Condition Monitoring and Remaining Useful Life Prediction with Particle Filtering," *Int. J. Progn. Heal. Manag.*, vol. 4, no. 2008, pp. 1–15, 2013.

Referencias

- [16] E. Engineering, "Experimental Research on the Impact of Lubricating Oils on Engine Friction and Vehicle Fuel Economy Yimin Mo," no. Ic3me, pp. 1607–1612, 2015.
- [17] M. A. Barris, "Total Filtration TM: The Influence of Filter Selection on Engine Wear, Emissions, and Performance." SAE International , 1995.
- [18] A. Norman and J. D. Corinchock, *Diesel Technology - Fundamentals, Service and Repair*, 8th ed. The Goodheart-Willcox, 2000.
- [19] M. Clinic, "The True Cost of Poor Lubrication," 2008.
- [20] D. M. P. & A. A. Wessol, *Lubrication Fundamentals*, no. 1. 2001.
- [21] A. Reading, "Oil Analysis," pp. 1–26.
- [22] A. A. Carey, "The dielectric constant of lubrication oils," *Comput. Syst. Inc.*, 1998.
- [23] J. M. Torrents Dolz and R. Pallàs-Areny, "Sensing oil condition through temperature coefficient of dielectric constant," *XVII IMEKO World Congr.*, pp. 917–919, 2003.
- [24] A. Acid, "List of dielectric constants."
- [25] D. C. Giancoli, "Physics Principles with Applications."
- [26] M. Chaniotakis and D. G. Cory, "Capacitors and Inductors," *Spring*, pp. 1–19, 2006.
- [27] Y. Portuondo Paisan and J. Portuondo Moret, "La Repetibilidad Y Reproducibilidad En El Aseguramiento De La Calidad De Los Procesos De Medición," *Tecnol. Química*, vol. 2, pp. 117–121, 2010.

Apéndice

Figura 4.16 Diagrama de bloques en LabVIEW

