

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

Hiram U. Luna López

Universidad de Sonora

luna.0444@gmail.com

Antonio Ramos Carrazco

Universidad de Sonora

antonio.ramos@unison.mx

María Elena Anaya Pérez

Universidad de Sonora

elena.anaya@unison.mx

Dainet Berman Mendoza

Universidad de Sonora

daiber@cifus.uson.mx

Resumen

El aceite lubricante, componente vital en máquinas rotatorias, al bajar su calidad se ve afectado el ciclo de vida del motor de sobremanera, y al no lubricarse, ese ciclo de vida es nulo. El presente proyecto pretende controlar un problema frecuente en la industria de transporte; la persistente contaminación del aceite. Para el adecuado mantenimiento, ahorro de energía y capital, se deben conocer las impurezas ligadas al aceite. Adicionalmente, el conocimiento del estado del lubricante y su futuro repuesto es importante para la prevención de fallas. Este trabajo exhibe los resultados del desarrollo de un sensor capacitivo para identificar las impurezas en aceite lubricante usado en motores diésel, presentando el comportamiento eléctrico del sensor expuesto al aceite y de los agentes externos tales como agua y glicol. Los experimentos consideran la temperatura y el volumen de impurezas en un aceite en estado puro y bajo contaminantes.

Palabras Claves: Capacitivo, lubricante, sensor.

Abstract

A vital component of rotary machines is the lubricating oil which quality significantly impacts on their life cycle. The present project aims to control a frequent problem in the transport industry; the persistent contamination of the oil and the lack of impurities detection on the motor lubricants. For proper maintenance, energy and capital savings, the impurities linked to the oil must be known. In addition, the status of the lubricant and its future replacement is important for failure prevention. This work presents the results of the development of a capacitive sensor to identify impurities in lubricating oil used in diesel engines, presenting the electric behavior of the sensor exposed to oil and external agents such as water and glycol. The experiments consider the temperature and the volume of impurities on both pure and contaminated oils.

Keywords: *Capacitive, lubricant, sensor.*

1. Introducción

Desde el descubrimiento de la fuerza de fricción y su asociación con el desgaste, las distintas ramas de la ingeniería han buscado su eliminación mediante el empleo de sustancias lubricantes. Con el transcurso de los años, los lubricantes 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 estos materiales son utilizados por una gran variedad de maquinaria y herramientas, y su función va más allá de lubricar. Estos se fabrican con usos específicos en mente, como el de trasladar calor de una zona a otra, arrastrar impurezas, proteger de la corrosión, aislar eléctricamente o térmicamente, y hasta ayudar en procesos de manufactura, [CalRecycle, 2012]. Estos también están condicionados a factores ambientales como la temperatura de operación y la cantidad de partículas de polvo en el área de trabajo, [THK Co.Catalog No. 240E, 2005]. La fricción y el desgaste determinan el ciclo de vida de una máquina, así como su consumo de energía, por lo tanto, son muy importantes a considerarse durante la etapa de diseño. La tribología es una rama de la ciencia que se ha dedicado al estudio sobre el frotamiento de superficies en movimiento relativo,

[Mang, 2007], [Marketsandmarkets.com, 2016]. Los datos compilados de los análisis tribológicos dan una perspectiva del comportamiento mecánico y de composición química de los lubricantes, los cuales se pueden utilizar para su continua mejoría. Con solo aplicar los conocimientos de tribología a los procesos de lubricación, se ahorra un 0.4% en costos de energía, [Mang, 2007]. Esta área de estudio es relativamente nueva, que sería beneficiada por herramientas de medición que entreguen datos en tiempo real, es decir, mientras se llevan a cabo experimentos dinámicos sobre componentes.

Existe una gran gama de lubricantes, los cuales se pueden encontrar en estado líquido como aceites, semilíquido como lo son las grasas, o en estado sólido como el teflón. Cualquier mecanismo o maquina debe ser lubricada con el lubricante para el que fue diseñada. La variedad en lubricantes también es categorizada 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.

Los aceites para motores diésel o maquinaria industrial, son los lubricantes más importantes en el mundo contemporáneo. Su impacto sobre la economía es considerable por ser de los más utilizados en el planeta. Tienen una demanda mundial de 40 toneladas métricas anuales, [Noah, 2012], [Turner, 2003]. Este mercado se encuentra con un valor estimado de \$144.45 miles de millones de dólares (mmdd) y se pronostica que alcanzará \$166.59 mmdd en el 2021, [Marketsandmarkets.com, 2016]. En el sector de transporte e industrial, más del 60% de los aceites lubricantes son utilizados, [Kline, 2014], [Yimin, 2015]. De acuerdo al análisis de mercado, el desarrollo tecnológico en la automatización, mecanización, minado y construcción de infraestructura, se genera más demanda para el aceite sintético, ya que éste es fácil de obtener y da la mejor protección a los vehículos, [Noah, 2012].

Los fabricantes de aceites lubricantes para motores especifican que éste debe ser reemplazado según un periodo de tiempo que ellos determinan para el tipo de aceite y aplicación. Sin embargo, no existe una consideración en el modo de operación en el motor que puede dañar al aceite, como cambios repentinos en la velocidad o en la temperatura del motor, [Turner, 2003]. Los periodos de desgaste

se acumulan con el tiempo y pueden resultar en la falla repentina de la máquina. El intento de compensación de este error al anticipar el periodo de cambio del aceite incrementa el riesgo de desecharlo en condiciones aun operables. Lo que representa una gran pérdida económica para las empresas que lo utilizan en grandes cantidades.

Alrededor del 50% de los lubricantes terminan derramados, contaminando el medio ambiente debido a accidentes no controlados. Los aceites minerales y sintéticos son los más tóxicos y peligrosos para el medio ambiente. Por lo tanto, se busca cada vez más el proceso de reciclaje del aceite o también, la reducción de los elementos contaminantes de cloro, fósforo, azufre y metales que puedan estar presentes en este, [Madanhire, 2016]. El costo de dicho reciclado aumenta con la demanda, pero los beneficios yacen en la reducción de los costos de mantenimiento de la maquinaria.

El aceite lubricante no solo impacta el desempeño del motor, sino también su consumo de combustible. Las fricciones que ocurren en el mecanismo afectan directamente a la conservación de la energía utilizada. Existen estudios que demuestran que un aumento de 1% en el modificador de fricción y mejoramiento en el índice de viscosidad del aceite resultan en un mejoramiento de 2.33% en la economía del combustible, [Yimin, 2015]. En otro estudio, se encontró que una mejora en el sistema de filtración y en la reducción de contaminantes en un 98%, se obtiene un 5% de reducción en el consumo de combustible, [Barris, 1995]. 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. Algunos métodos utilizados para identificar las impurezas del aceite, [Arellano, 2009] son:

- Análisis químicos (ASTM)
- Ferrografía directa
- Analizador Espectrográfico
- Análisis FTIR (Espectroscopía Infrarroja por Transformadas de Fourier)
- Método de Ramsbottom
- Prueba de oxidación

Los métodos antes mencionados se deben realizar bajo un determinado procedimiento que lleva su tiempo e incluye algunas mediciones para un análisis adecuado.

Debido a lo antes mencionado, una alternativa a considerarse ha sido el uso de sensores para monitorear las propiedades de los aceites lubricantes, en la búsqueda de la mejora de la toma de decisiones en el mantenimiento. Estos dispositivos aprovechan sus características para indicar electrónicamente el estado de un material, en particular el aceite lubricante [Schwartz, 1987]. En los últimos años, la industria ha invertido en prevenir las fallas prematuras monitoreando el aceite de forma periódica a lo largo de su uso continuo. Por lo tanto, el uso de estos transductores mejorará el proceso de reciclaje para las empresas, reduciendo los costos en el reciclado debido al control de impurezas en el aceite, ya que el proceso de re-refinado consumirá menos energía.

Para poder analizar a un lubricante es necesario conocer sus propiedades eléctricas y físicas, por medio de las cuales se pueda determinar su calidad de forma cualitativa. Según la literatura, existen dos opciones para el estudio de estos materiales primero, el análisis de muestras a través de un laboratorio especializado [Barraclough, 2006]. Segundo caso, la aplicación de sensores integrados en el sistema de lubricación y el mecanismo que lo contenga [Simon, 2003]. La primera técnica suele ser muy costosa y poco accesible para muchas empresas, mientras que la tecnología requerida para hacer mediciones y obtener resultados aceptables, es de inversión bastante baja. Lo anterior ha motivado al presente proyecto en el diseño e implementación de un sensor capacitivo, para producir una señal de alerta al detectar las impurezas en el aceite de motores diésel usando los parámetros de capacitancia y análisis de partículas contenidas como un coloide, aplicando un método de investigación experimental.

2. Métodos

La figura 1 presenta el diagrama esquemático de un sensor de placas paralelas, diseñado con el software SolidWorks, y construido en el laboratorio utilizando cobre como material para las placas así como una imagen del prototipo físico

construido para el desarrollo de este trabajo. El sensor mide 3.8 cm con placas de 1.5 cm², pesa 10 gramos y tiene un rango de operación de 1 a 4 pF. Esta estructura es usada para poder realizar lecturas de capacitancia en el lubricante a través del sistema ARDUINO.

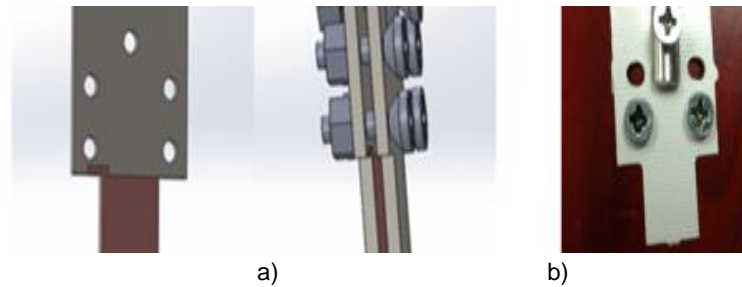


Figura 1 Sensor de placas paralelas capacitivo: a) Esquemás y b) Imagen real.

Para el desarrollo del sensor capacitivo, el modelo del capacitor de placas paralelas utiliza como dieléctrico el aceite en estudio. Según la teoría, el tamaño de las placas paralelas de un capacitor, la distancia entre ellas, y el dieléctrico son las variables más importantes, tal como se expresa en la ecuación 1.

$$C = \epsilon_0 \epsilon_a \frac{A}{L} = \epsilon_p \frac{A}{L} \quad (1)$$

Donde C es la capacitancia del capacitor, ϵ_0 es la constante dieléctrica en el vacío ($\epsilon_0 \approx 8.854 \times 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$), ϵ_a es la constante dieléctrica del medio o de la sustancia entre las placas (para nuestro caso el aceite), ϵ_p es el producto de ϵ_0 y ϵ_a , L es la distancia entre las placas y A es el área de la superficie de ellas mismas, [Giancoli, 2005]. De la relación anterior dependerá la capacitancia mínima que se podrá medir por lo que debe ser seleccionada adecuadamente.

El aceite (15w40 Raloy) utilizado en este experimento posee una constante dieléctrica relativa (ϵ_a), de 2.1 a 2.5 en un estado puro y es usualmente aplicado para la lubricación de motores diésel, [Carey, 1998], [Torrents, 2003]. Para caracterizar el sensor capacitivo, se usaron agua y glicol como contaminantes, los cuales cuentan con una constante dieléctrica relativa con niveles alrededor de 80 y 37, respectivamente, [List of dielectric constants, 2017]. Con el fin de simular las condiciones termodinámicas del ambiente del aceite, se utilizó un calefactor

térmico con agitación constante durante la caracterización del sensor. Una temperatura de 80 grados Celsius fue aplicada a un vaso precipitado que contenía al aceite en cuestión, tal y como se exhibe en la figura 2.

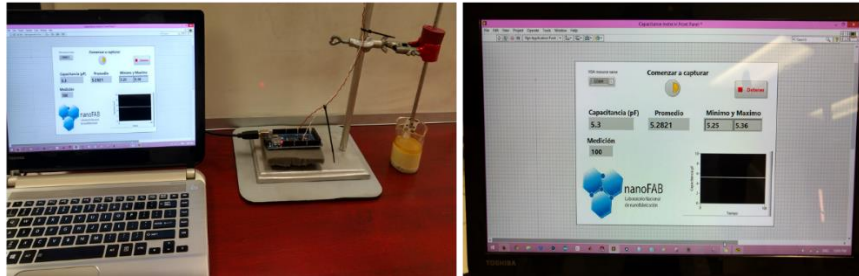


Figura 2 Arreglo experimental para inducir temperatura y agitación al aceite y sensor.

La figura 3 exhibe el diagrama esquemático del sensor capacitivo bajo condiciones de un lubricante puro y con presencia de contaminantes (ϵ_c).

La figura 4 presenta el diagrama esquemático del circuito de medición utilizando los capacitores C_A y C_P . El primer capacitor corresponde a la capacitancia producida por el sensor sumergido en el aceite, mientras que el elemento C_p es una capacitancia parásita producida en el sistema y que no es despreciable cuando C_A llega a alcanzar valores en el orden de picofaradios.

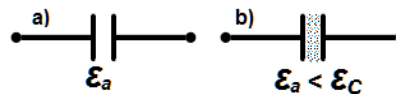


Figura 3 Capacitor experimentando una constante dieléctrica ϵ_a .

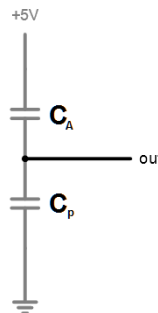


Figura 4 Circuito divisor de voltaje capacitivo.

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. 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, con bastante precisión. Considerando que la caída de voltaje generada por C_A está dada por la ecuación 2 y la suma de las caídas de voltaje generadas por los dos capacitores es igual a cero (ecuación 3), se puede obtener una expresión dinámica de estos voltajes en función de las capacitancias obtenidas, [Chaniotakis, 2006].

$$V_{out} = \frac{1}{C_A} \int_0^t i dt \quad (2)$$

$$V_{in} = \left(\frac{1}{C_A} + \frac{1}{C_p} \right) \int_0^t i dt \quad (3)$$

Relacionando las ecuaciones 2 y 3, se puede obtener una expresión para el voltaje de salida dependiente del voltaje de entrada, tal como se expresa en la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Con la apropiada calibración, la capacitancia parasita C_p del circuito puede ser despejada para cualquier valor conocido de referencia de C_A (ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Además, con el valor obtenido de C_p se puede despejar un valor desconocido de C_A (ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Por lo tanto, para un circuito divisor de voltaje capacitivo, las ecuaciones 4, 5 y 6 son las más importantes para la programación y calibración del sensor.

$$V_{out} = \frac{V_{in} C_A}{C_p + C_A} \quad (4)$$

$$C_p = \frac{C_A (V_{in} - V_{out})}{V_{out}} \quad (5)$$

$$C_A = \frac{V_{out} C_p}{V_{in} - V_{out}} \quad (6)$$

3. Resultados

Los resultados del presente trabajo se dan de acuerdo a la caracterización de un sensor capacitivo. Para lo anterior, las lecturas se realizaron en mediciones de capacitancia y en condiciones de un lubricante puro y contaminado en forma controlada por impurezas. El método de medición utilizado fue basado en comunicación con ARDUINO. Es importante mencionar que la programación usada compensa la capacitancia parasita y caída de voltaje del sistema para calcular la capacitancia del objetivo.

La figura 5 presenta los resultados en distintas condiciones. Primero se midió la capacitancia del aceite libre de contaminantes a lo largo de distintas temperaturas (22 a 80 °C), para observar su comportamiento. Posteriormente, se realizaron lecturas para el aceite a 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. En comparación con las muestras de aceite contaminadas con agua y con el refrigerante, los niveles de capacitancia son significativamente menores, los cuales oscilan entre 2.5 y 2.8 pF. Estos resultados pueden asociarse con los diferentes niveles en sus constantes dieléctricas, la temperatura de medición y el volumen de impurezas que fluyen a través del sensor.

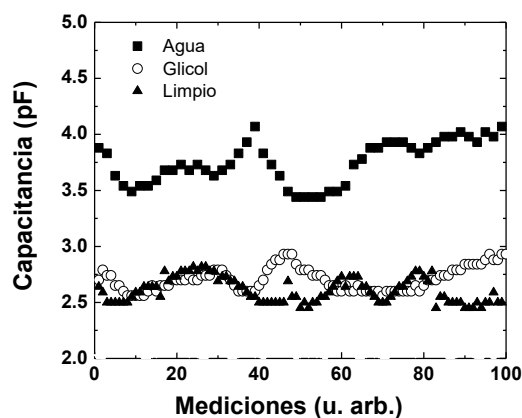


Figura 5 Captura de capacitancias, 100 mediciones a 80 °C (ensayo de repetitividad).

La figura 6 presenta los resultados para la contaminación del lubricante con agua de forma controlada. La grafica muestra el incremento de la capacitancia como

función del número de gotas introducidas en un recipiente de 65 ml de aceite. Por otro lado, la caracterización usando las mismas condiciones de medición y el contaminante de glicol, se exhibe en la figura 7. En comparación con el agua y el aceite contaminado con el refrigerante, presenta niveles de capacitancia menores, los cuales oscilan entre 2.5 y 2.8 pF. Estos resultados pueden asociarse con los diferentes niveles en sus constantes dieléctricas, la temperatura de medición y el volumen de impurezas que fluyen a través del sensor.

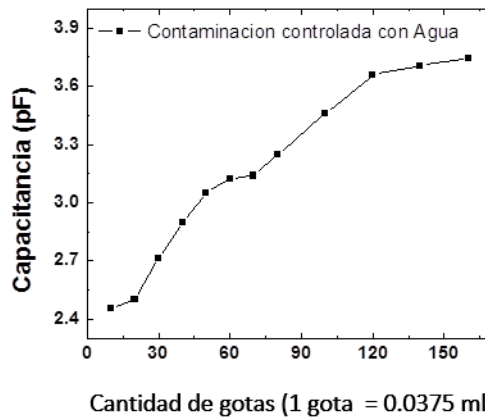


Figura 6 Capacitancia del sensor bajo contaminación de agua desionizada, (80 °C).

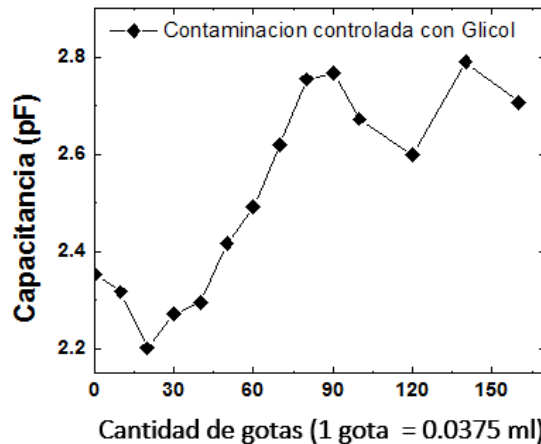


Figura 7 Capacitancia del sensor bajo condiciones de contaminación de glicol, (80 °C).

Estas mediciones se realizaron en constante agitación hasta alcanzar una cantidad de 160 gotas (6 ml) de agua. Es importante mencionar que esta caracterización se realizó usando las mismas condiciones de medición presentadas en la figura 5.

4. Discusión

Los resultados obtenidos en el presente trabajo se relacionarán con los efectos de capacitancia del sistema. En el sensor capacitivo, los resultados son consistentes de acuerdo con el modelo de placas paralelas y los reportes de la capacitancia del aceite en pruebas estandarizadas para empresas, [Torrents, 2003]. De acuerdo a la literatura, con señales de voltaje a frecuencias por debajo de los 100 Hz, se observa como la capacitancia incrementa con la temperatura, e incrementa aún más con el uso continuo, lo cual es comparable con los experimentos aquí presentados.

La figura 5 resume el comportamiento del sensor capacitivo para las condiciones de un lubricante puro y contaminado por agua y refrigerante. Los niveles superiores de picofaradios obtenidos en el H₂O pueden asociarse al cambio de la constante dieléctrica que experimenta el dispositivo durante la medición. La agitación del lubricante y la adición de este agente impurificante puede verse reflejado de manera directa en la constante dieléctrica del medio (ϵ_a). En el caso del refrigerante, los niveles de capacitancia obtenidos son discernibles a partir de los 2 ml de glicol.

Para obtener un rango de detección, se realizó una serie de caracterizaciones variando la cantidad del contaminante de forma controlada. Como se observó en la figura 5 la linealidad de la respuesta al agua se presenta a partir de los 2.4 pF hasta 3.8 pF, tal como se presenta en la figura 6. En comparación con la figura 5, los niveles de capacitancia son producto de 100 mediciones con 6 ml de agua introducida al aceite a una temperatura de 80 °C. En las lecturas usando glicol, los valores de capacitancia se aproximan a los niveles obtenidos usando las condiciones de cantidad de gotas, temperatura y cantidad de mediciones de la figura 5. En un experimento más controlado, se obtuvo una respuesta lineal del dispositivo en un rango de 30 a 100 gotas del contaminante refrigerante, tal y como se observó en la figura 7. Cabe mencionar, que algunas oscilaciones fueron registradas fuera de este rango con cambios mínimos de capacitancia.

Además, es posible obtener lecturas de conductividad con el mismo sensor, considerando la relación entre la capacitancia y la propiedad de conductividad

eléctrica de un dieléctrico. La conductividad indica la habilidad para conducir una corriente eléctrica, [Knight, 1993]. Cuando se aplica un potencial eléctrico a las placas paralelas del sensor, se producirá una corriente a través del dieléctrico que equivale a una pérdida en la carga del capacitor. La corriente total que fluye a través de un capacitor es igual a la suma de la corriente que atraviesa el dieléctrico más la corriente inducida por la misma carga del capacitor, [Capacitance and conductance, 2017]. Entonces, si la conductividad del dieléctrico es muy grande, se le considera un conductor y el sensor no podrá mantener una carga. Por lo tanto, un capacitor puede ser modelado como una resistencia y un capacitor en paralelo, [Bhat, 2005], donde la resistencia es un limitante de la corriente que variará con los cambios en la conductividad del dieléctrico. Añadiendo una resistencia en serie, el sistema corresponde a un divisor de voltaje resistivo y se pueden utilizar las variaciones en resistencia del dieléctrico para determinar su conductividad a distintos grados de contaminación. Esto permitiría obtener un multisensor que mida distintas propiedades para corroborar los datos. Considerando una modificación en las dimensiones de las placas, se esperaría que al incrementarlas, esto tenga un efecto de incremento en la sensibilidad del arreglo experimental, pero esto se podrá comprobar hasta llevar a cabo un experimento bajo esas condiciones, por lo que es una actividad a considerar como trabajo futuro.

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 entre un aceite limpio y uno contaminado (agua y glicol, máximo 6 ml). Con los datos emanados se puede programar un gradiente de calidad para ser utilizado en campo. Esto beneficiaría a las empresas de transporte, reduciendo los costos de mantenimiento provocados por fallas repentinas.

Las principales ventajas de este sensor son su tamaño, detección de impurezas en tiempo real y costo mínimo por su construcción con materiales de reutilización.

Experimentos a futuro incluirán la caracterización de capacitancia para otras sustancias corrosivas. Adicionalmente se está trabajando en mediciones de conductividad usando la misma estructura del sensor capacitivo. Y por último realizar cambios en las dimensiones de las placas con la finalidad de verificar el efecto sensitivo del arreglo.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Arellano O., G. A. Implantación de Análisis de Aceite en Motores de Combustión Interna de Ciclo Diesel, Tesis de Grado. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2009.
- [2] Barraclough T., Lukas M. and Anderson D. P. Comparison of wear and contaminant particle analysis techniques in an engine test cell run to failure, pp. 1-11, 2006.
- [3] Barris, M. A. Total Filtration TM: The Influence of Filter Selection on Engine Wear, Emissions, and Performance. SAE International , 1995.
- [4] Bhat, S. Salinity (conductivity) sensor based on parallel plate capacitors. p. 95, 2005.
- [5] CalRecycle and Klidge&Company. Lubricant Consumption and Used Oil Generation in California: A Segment Market Analysis. No. September, pp. 2000-2020, 2012.
- [6] Capacitance and conductance. Lecture 10. [Online]. Available: <http://jsa.ece.illinois.edu/ece329/notes/>. 26/05/2017.
- [7] Carey, A. A. The dielectric constant of lubrication oils. Comput. Syst. Inc., 1998.
- [8] Chaniotakis, M. and Cory, D. G. Capacitors and Inductors. Spring, pp. 1–19, 2006.
- [9] Giancoli, D. C. Physics: Principles with Applications. 6th ed., Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2005.
- [10] Kline & Company. Overview of the European Lubricant Demand. 2014 Alicabte, Spain, 2014.
- [11] Knight, R. D. Physics for Scientists and Engineers a Modern Approach, 4th

- ed. San Luis Obispo. Pearson, 1993.
- [12] List of dielectric constants. https://www.vega.com/home_ss/-/media/PDF-files/List_of_dielectric_constants_EN.ashx 25/05/2017.
- [13] Madanhire, I. and Mbohwa, Ch. Lubricant Additive Impacts on Human Health and the Environment. Chapter 2, Book Mitigating Environmental Impact of Petroleum Lubricants, pp. 17–34. Springer, 2016.
- [14] Mang, T. Lubricants and their Market. Pp. 1-6, 2007.
- [15] 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.
- [16] Noah, V. and Paolo, S. The Dynamics of the Global Lubricants Industry, 2012 to 2020. V International Symposium on Lubricants, Additives and Fluids. Sao Paulo, Brazil, 2012.
- [17] Schwartz, S. E. and Smolenski, D. J. Development of an automatic engine oil-change indicator system SAE Technical Paper 870403, doi:10.4271/870403, 1987.
- [18] Simon S. Wang Yingjie Lin, A new technique for detecting antifreeze in engine oil during early stage of leakage, Sensors and Actuators B: chemical, Vol. 96 157-164, 2003.
- [19] THK Co., LTD., LM Guide- Separate Type, Tpkyo, Japan, Catalog No. 240E, 2005.
- [20] Torrents Dolz, J. M. and Pallàs-Areny, R. Sensing oil condition through temperature coefficient of dielectric constant. XVII IMEKO World Congr., pp. 917–919, 2003.
- [21] Turner, J.D. and Austin, L. Electrical techniques for monitoring the condition of lubrication oil. Measurement Science and Technology, Vol. 14, No. 10, 2003.
- [22] Yimin, M. Experimental Research on the Impact of Lubricating Oils on Engine Friction and Vehicle Fuel Economy. No. IC3ME, pp. 1607–1612, 2015.