



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
(MAESTRIA EN INGENIERIA) – (FUENTES RENOVABLES)

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE
ACEITES

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ING. ALMA DELIA MUÑOS AVILES

TUTOR:
M.C. JOSÉ CAMPOS ÁLVAREZ
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES - UNAM

TEMIXCO, MORELOS

MAYO DEL 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Pathiyamattom Joseph Sebastian

Secretario: Dr. Sánchez Juárez Aarón

Vocal: M.C. Campos Álvarez José

1 er- Suplente: Dr. Ixtlilco Cortés Luis

2 do- Suplente: M.C. Casarrubias Segura Gildardo

Lugar donde se realizó la tesis:
Instituto de Energías Renovables-UNAM, Temixco Morelos.

TUTOR DE TESIS:

M.C. JOSÉ CAMPOS ÁLVAREZ

FIRMA

Contenido

Dedicatoria.....	VI
Agradecimientos	VII
Resumen.....	VIII
Introducción	1
Objetivo General	2
Objetivos particulares	2
Capítulo 1. Aceite, fluido dieléctrico para transformador	3
1.1 Antecedentes históricos.....	3
1.2 Aceite dieléctrico.....	4
1.2.1 Calidad del aceite	4
1.3 Tipos de aceites	5
1.3.1 Aceite mineral	5
1.3.2 Aceite de silicona.....	6
1.3.3 Aceite sintético.....	6
1.3.4 Aceite vegetal.....	6
1.4 Desarrollo e investigación de aceites vegetales.....	6
1.5 Propiedades eléctricas de aceites	7
1.5.1 Ruptura dieléctrica	7
1.5.2 Frecuencia de la prueba de ruptura dieléctrica	9
1.6 Normas para la prueba de ruptura dieléctrica de aceites.	9
1.6 Normas ASTM (EUA).....	10
1.6.1 ASTM-D 877.....	10
1.6.2 ASTM-D 1816.....	11
1.7 Normas IEC (internacionales)	12
1.7.1 IEC 60156.....	12
1.8 Como realizar la prueba	13
1.8.1 Ajuste y cuidado de los electrodos y vaso de prueba	13
1.8.2 Temperatura de prueba	14
1.8.3 Efecto de humedad	14
1.8.3 Velocidad de elevación de voltaje.....	15
1.8.4 Procedimiento	15

CAPITULO 2. Instrumentación.....	16
2.1 Sistema de medida	16
2.2 Acondicionamiento de señal.....	17
2.2.1 Amplificadores	18
2.2.2 Amplificador restador	18
2.3 Convertidor Digital a Analógico (DAC)	19
2.4 Microcontrolador	19
2.5 Software libre	21
2.5.1 Arduino DUE.....	22
2.6 Campo eléctrico	23
2.6.1 Diferencial de potencial	23
2.7 Sensores	24
2.7.1 Voltaje	24
2.7.2 Sensor de Inducción	26
2.7.3 Sensor de sonido	27
2.7.4 Temperatura y Humedad	28
2.8 Calibración.....	29
CAPITULO 3. Desarrollo experimental	30
3.1 Diseño del circuito.....	31
3.1.1 Voltaje del DAC.....	31
3.1.2 Acondicionamiento de voltaje	33
3.2 Fuente de alto voltaje	37
3.3 Sensor de sonido	37
3.4 Sensor de inducción	38
3.5 Ajuste de rampa de voltaje	39
3.6 Diseño de cámara de medición.....	41
3.6.1 Diseño de vaso de medición.....	42
3.6.2 Diseño de electrodos.....	43
3.7 Campo eléctrico	44
3.8 Diseño del gabinete o carcasa en 3D.	44
3.9 Desarrollo de código	45
CAPITULO 4. Pruebas y resultados.....	52
4.1 Detector de rompimiento dieléctrico voltaje inducido.....	53

4.2 Ruptura dieléctrica	58
4.2.1 Ruptura dieléctrica del aire	58
4.2.2 Ruptura dieléctrica de aceite	59
Conclusiones	61
Referencias.....	62

Índice de Tablas

Tabla 1. Comparación de ruptura dieléctrica en aceites dieléctricos.....	7
Tabla 2. Normas establecidas para la ruptura dieléctrica.....	10
Tabla 3. Relación de cuentas y voltaje.....	32
Tabla 4. Relación de voltaje del DAC- voltaje de entrada de la fuente de alto voltaje.....	34
Tabla 5. Incremento de voltaje.....	40
Tabla 6. Valores máximos de la primera onda en las mediciones.....	56
Tabla 7. Valores máximos de salida del amplificador operacional durante un rompimiento dieléctrico de la primera onda en las mediciones.....	57
Tabla 8. Resultados de ruptura del aire.....	58
Tabla 9. Voltaje de Ruptura dieléctrica.....	60

Índice de Figuras

Figura 1. Electrodo planos.....	14
Figura 2. Diagrama del sistema.....	17
Figura 3. Amplificador restador.....	18
Figura 4. Proceso de conversión Digital-Análogo.....	19
Figura 5. Arduino DUE.....	22
Figura 6. Divisor de voltaje.....	25
Figura 7. Sensor de inducción.....	27
Figura 8. Sensor de sonido.....	28
Figura 9. Sensor DHT22, Temperatura y Humedad.....	28
Figura 10. Diagrama de conexión del sistema de control.....	31
Figura 11. Circuito general del sistema de control.....	31
Figura 12. Relación lineal cuentas del microcontrolador y voltaje de salida del DAC.....	33
Figura 13. Relación lineal voltaje del DAC- voltaje acondicionado.....	34
Figura 14. Circuito acondicionador de voltaje.....	34
Figura 15. Diagrama de fuente de alimentación 12 V.....	35
Figura 16. Prueba del circuito fuente de alimentación 12V.....	36
Figura 17. Placa impresa y soldada fuente de 12 V.....	36
Figura 18. Voltaje de salida de la fuente de 12V.....	36
Figura 19. Fuente de alto voltaje (Modelo 152A CORONATROL).....	37

Figura 20. Diagrama acondicionador de voltaje del sensor de sonido.	38
Figura 21. Diagrama seguidor de voltaje.	38
Figura 22. Circuito sensor de inducción.	39
Figura 23. Calibración de la rampa de voltaje, Regresión lineal.	40
Figura 24. Diseño de cámara de medición software AutoCAD.	41
Figura 25. Cámara de medición.....	42
Figura 26. Diseño del Vaso de medición AutoCAD.....	42
Figura 27. Vaso de medición.	43
Figura 28. Electrodo Norma ASTM-D887	43
Figura 29. Copa de medición con electrodos.....	44
Figura 30. Gabinete del circuito de control.....	45
Figura 31. Sistema de medición completo. A) PC. B) Fuente de 12 V. C) Circuito de control. D) Fuente de alto voltaje. E) cámara de medición.....	52
Figura 32. Configuración prueba de sensor de inducción.....	55
Figura 33. Voltaje inducido en la bobina.....	55
Figura 34. Diagrama del sensor de inducción.	56
Figura 35. Medición, sensor 3 Vueltas, separación de electrodos 0.423mm, cable de interfaz soldado al sensor.....	57
Figura 36. Rompimiento dieléctrico en aire.....	59
Figura 37. Prueba del rompimiento dieléctrico del aceite de Jatropha.....	60

Dedicatoria

Mas a Dios gracias, el cual nos lleva siempre en triunfo en Cristo Jesús, y por medio de nosotros manifiesta en todo lugar el olor de su conocimiento.

2 Corintios 2:14.

Dedico esta victoria a mi familia que es la inspiración para lograr todas mis metas y sueños por ellos y para ellos. Gracias por su cariño, amor, apoyo moral, paciencia y fe en mí.

A mi padre por ser mí ejemplo, por sus consejos, por dejarme volar, soltarme y sobre todo por confiar en mí.

A mi amada madre por sus oraciones y por creer en mí, por soportarme y aceptarme tal como soy, gracias por todo tu cariño mamá.

A mi querido tutor e instructor, en este camino de la ciencia, todo lo que he logrado en esta etapa, es por su instrucción, paciencia, apoyo moral y cariño, siempre lo tendré en mi corazón donde quiera que vaya porque aparte de ser mi mentor ha sido mi amigo, maestro y como un padre en este viaje.

A mis amados, siete hermanos, Yesi, Ramis, Javi, Isai, Azu, Jesús, Paloma por su cariño, apoyo y por qué a un que no estoy con ustedes siempre están en mi mente y en mi corazón.

A mi estimada y querida amiga Mirna que es como una hermana para mí, por su cariño y motivación para concluir esta tesis.

A mí respetada M.I América, gracias por tu compañía, y confianza.

A Samuel por su constante insistencia para concluir esta etapa, gracias amigo.

A José Darío por su ayuda y amistad.

A todos los que han formado parte de mi vida durante este recorrido.

Los tiempos de Dios son perfectos.

Es un placer conocer y saber que existe gente hermosa en mi Vida.

Muy cerca de mi ocaso, yo te bendigo, vida porque nunca me diste ni esperanza fallida, ni trabajo injusto, ni pena inmerecida; porque veo al final de mi rudo camino que yo fui el arquitecto de mi propio destino.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Instituto de Energías Renovables por facilitar la atención, y los recursos necesarios para el desarrollo del proyecto de investigación.

Agradezco a mi tutor de tesis M.C José Campos por el apoyo, paciencia y tiempo invertido en la realización de este trabajo.

A los sinodales Dr. Sebastian Pathiyamattom Joseph, Dr. Aarón Sánchez Juárez, Dr. Luis Ixtlilco Cortés y M.C. Gildardo Casarrubias Segura por sus comentarios, Sugerencias y observaciones hechas en la revisión de la tesis.

Agradezco a la coordinación de docencia del IER-UNAM por su apoyo brindado en trámites administrativos.

A CONACYT por la beca de maestría otorgada.

Al apoyo CONACYT-CB236978, del cual es responsable el Dr. Sebastian Pathiyamattom en el periodo de septiembre 2015 a enero 2016.

A Héctor Cortés por la impresión de PCBs e impresión en 3D.

A mis amigos Francisco Tamayo, Osvaldo Solorio, Jorge Carnalla, Aldo Patiño, Héctor Gonzales, les agradezco por su apoyo y asesoría en el diseño del circuito y gabinete tanto en AutoCAD diseño en 3D y Eagle diseño de PCB.

Al Ing. José Jaime Villalobos jefe de taller Mecánico del IER-UNAM.

A mis apreciados Doctores Adriana, Francisco, Antonia, Dalia, Zeus, Ana Rosa, Iris, Sergio G. por su apoyo gracias a cada uno de ustedes, por motivarme para iniciar esta etapa que hoy concluye.

Resumen

La transmisión, distribución y utilización de la energía eléctrica en la actualidad, depende en gran medida de los transformadores de alto voltaje. Continuamente se realiza un cambio de potencial, para esto se necesita de un transformador de voltaje, se espera que estos dispositivos sean precisos y confiables, es decir, que se mantengan en óptimo funcionamiento por largos periodos de tiempo.

Un elemento esencial para el buen desempeño de los transformadores es el material dieléctrico que se encuentra entre los embobinados, generalmente aceite mineral o sintético que tiene como función aislar los componentes del transformador y disipar el calor. La calidad del dieléctrico y su capacidad de disipar el calor determina la potencia máxima que un transformador puede proveer, pero en los últimos años, no solo se toman en cuenta las capacidades de los dispositivos, sino que se ha evaluado el impacto ambiental de la enorme cantidad de transformadores existentes y su respectivo mantenimiento, por lo que se requiere de opciones más amigables con el medio ambiente y que por supuesto cumplan con las normativas de seguridad de las nuevas legislaciones. En los últimos 25 años se han utilizado fluidos dieléctricos a base de aceites vegetales que muestran buena eficiencia y cumplen con estos requisitos. Sin embargo, debido a la enorme cantidad de posibles materiales dieléctricos que se podrían utilizar, se requiere de un sistema que permita evaluar de manera eficiente la propiedad de ruptura dieléctrica.

En este trabajo se presenta el diseño, y construcción del sistema de control de la medición de voltaje de ruptura eléctrica. El sistema de control tiene como objetivo automatizar la medición y optimizar el tiempo de obtención de las pruebas. Para lograr este objetivo se toma en cuenta las características de las pruebas de ruptura dieléctrica. Conociendo las características se procede al diseño del sistema el cual se divide en tres subsistemas.

El primer componente es la rampa de voltaje, cuenta con entradas y salidas digitales y entradas analógicas que servirán para automatizar la medición.

El segundo componente es un circuito de acondicionamiento de voltaje. En este se utiliza un amplificador operacional configurado como restador-amplificador.

Este circuito se encarga de modificar el rango de voltajes del DAC del microcontrolador, que es de (0.5, 2.7) Volt a un rango de (0,10) Volt, que es utilizado como entrada por una fuente de alto voltaje, que es la que se usa para hacer la prueba de rompimiento dieléctrico.

El tercer componente es una fuente de alto voltaje, modelo 152A CORONATROL, la cual cuenta con una interfaz para programar la salida del voltaje y así automatizar la medición. La salida de voltaje del acondicionador es la entrada utilizada por la fuente de alto voltaje.

El cuarto componente es una cámara de medición. Debido a que no se cuenta con el equipo de medición se diseñó una cámara de medición donde se realiza la prueba de ruptura dieléctrico. Se incluyen también sensores de temperatura, humedad, sonido e inducción dentro de la cámara de medición para adecuarse a la norma y para determinar el voltaje de rompimiento dieléctrico.

Por último, se presentan los resultados obtenidos con el sistema de control. De las mediciones de ruptura eléctrica de un aceite, también se hacen pruebas con rompimiento dieléctrico del aire, con la finalidad de ver si el sistema está operando correctamente.

Introducción

A medida que la sociedad depende cada vez más de la energía eléctrica la demanda de energía eléctrica aumenta [1]. Nuestra preocupación por los daños al medio ambiente ha propiciado la búsqueda de nuevas tecnologías de generación eléctrica menos contraproducentes para nuestro ecosistema. Pero no solo se trata de la generación de energía eléctrica, sino de su eficiente transmisión y distribución. Es aquí donde el transformador es un componente fundamental del sistema eléctrico. El aislamiento y enfriamiento del transformador ha sido una parte integral de la evolución y mejora de estos equipos por muchas décadas. El fallo de un transformador implica interrupciones en términos de fiabilidad y aspectos técnicos relacionados con el sistema. El fallo de mayor relevancia es el del material dieléctrico.

Por más de 100 años el aceite mineral ha sido utilizado ampliamente por la industria en el aislamiento de los embobinados de transformadores de alto voltaje, debido a su muy alto voltaje de ruptura dieléctrica. Pero tiene serias desventajas, ya que las reservas del aceite mineral más utilizado (crudo nafténico) son limitadas y además se trata de un aceite que no es biodegradable por lo que tiene un alto impacto en la contaminación ambiental.

Los transformadores inmersos en aceite mineral requieren de tecnología alternativa para un mejor rendimiento y eficiencia. Durante las últimas décadas se ha observado la aplicación de los fluidos de aceite vegetal en transformadores de potencia, siendo fuertes candidatos para remplazar a los aceites minerales en un futuro no muy lejano.

Los aceites vegetales son obtenidos a partir de semillas, presentan excelentes propiedades como alta biodegradabilidad, baja toxicidad, alto punto de inflamación ($> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$), puntos de fuego ($<300^{\circ}\text{C}$), menor inflamabilidad, se consideran amigables con el medio ambiente [2-3]. Existen varias propiedades importantes, como la rigidez dieléctrica, punto de inflamación, viscosidad, que se deben tomar en cuenta al investigar los aceites vegetales para transformador.

Objetivo General

Desarrollar un sistema automático para la medición del rompimiento dieléctrico de aceites vegetales con aplicación para fluidos dieléctricos en transformadores de potencia con el fin de sustituir aceites minerales.

Objetivos particulares

- Diseñar el sistema de medición automático, que cumpla con la norma para la medición del rompimiento dieléctrico en aceites para transformadores eléctricos.
- Minimizar el error al generar la medición automáticamente.
- Desarrollar el sistema de medición basándose en plataformas tecnológicas abiertas.

Capítulo 1. Aceite, fluido dieléctrico para transformador.

El principio de inducción electromagnética fue la base del desarrollo de los transformadores eléctricos, desde la invención del transformador inmerso en aceite se intentó usar fluidos a base de semillas de recino y linaza como aislante y refrigerante, pero debido a su baja estabilidad, oxidación y al alto punto de fluidez, fueron remplazados por aceite mineral [4]. En el transformador como en el resto de las máquinas eléctricas, existen pérdidas que se disipan en forma de calor y contribuyen al calentamiento de la máquina. Para máquinas de mayor potencia se emplea un dieléctrico generalmente aceite como refrigerante. El sistema de aislamiento más utilizado en los transformadores de alto voltaje inmerso en aceite es una combinación de aislamiento sólido (celulosa) y aislante líquido (Aceite mineral) debido a sus excelentes propiedades térmicas y dieléctricas [5-7]. Es importante señalar que el aislamiento determina el tiempo de vida del transformador. Los transformadores se llenan con aceite por una serie de razones, siendo la más importante de ellas lograr el aislamiento. Además, el aceite se utiliza como refrigerante y evita la formación de arcos eléctricos.

1.1 Antecedentes históricos

Durante más de 100 años se ha utilizado los aceites minerales como aislante y refrigerante en la industria de los transformadores [8-9]. A pesar de su larga trayectoria el aceite mineral tiene algunos inconvenientes tales como bajos puntos de inflamación y combustión, voltaje de ruptura dieléctrica bajo. La más grave desventaja es que no cumple con las leyes de salud y leyes ambientales vigentes ya que este tipo de aceite no es biodegradable. Además que las reservas de petróleo crudo nafténico de las cuales se obtiene aceite mineral son limitadas [10-12]. Estos inconvenientes llevan a la búsqueda de nuevas alternativas. A principios de la década de 1930, aceite aislante a base de bifenilos policlorados (PCB) se introdujeron debido a su baja inflamabilidad y buenas propiedades dieléctricas, después se confirmó que los productos de PCB en ciertas condiciones eran tóxicos. En los años 80 la industria se vio obligada a buscar nuevas opciones [13-16] El aceite aislante debe de cumplir con una serie de requisitos de operación tal como son buenas propiedades eléctricas, baja viscosidad, punto de fluidez, temperatura

de funcionamiento, estabilidad química y térmica, baja inflamabilidad, compatibilidad con los componentes del transformador, miscibilidad con otros líquidos, aceptabilidad ambiental y bajo costo [8,17]. Esteres orgánicos y sintéticos poseen propiedades eléctricas similares en comparación con el aceite mineral [12,18] . La silicona tiene excelentes propiedades de aislamiento eléctrico, mayor punto de inflamación que los aceites minerales buena estabilidad térmica. Pero su alto punto de inflamación lleva a buscar otra opción. Hoy en día muchos investigadores e industrias están realizando investigación sobre aceites vegetales, se considera el candidato más probable en el uso de dieléctrico en transformador. Debido al cambio climático se ha mostrado un interés por nuevas alternativas menos contaminantes y biodegradables para evitar los efectos de los hidrocarburos[19].

1.2 Aceite dieléctrico.

El aceite aislante o aceite dieléctrico para transformadores, es un aceite que se utiliza en equipos eléctricos y que exhibe propiedades dieléctricas adecuadas que cumpla las características esenciales para oponerse al paso de la corriente eléctrica. Este se encuentra contenido en la mayoría de los transformadores y es un subproducto de la destilación de del petróleopetróleo.

1.2.1 Calidad del aceite

La calidad del aislamiento desempeña un papel muy importante en la realización de esta función. Ha mejorado, enormemente la calidad de los aceites gracias a los adelantos en las técnicas de refinado y debido a que ahora se conocen mejor los requisitos necesarios en las aplicaciones de los transformadores. La decisión de utilizar aceites de mejor calidad para transformadores también se justifica por la influencia de los costes y la fiabilidad en caso de avería del transformador, independientemente de si la misma se debe a un aislamiento deficiente por la formación de sedimentos en papel deteriorándolo. Se estima que la vida útil de un transformador puede alcanzar hasta los 40 años, para un aceite de alta calidad se rigen las mismas expectativas. Dado que la vida de servicio del papel depende de la estabilidad del aceite (cuando el aceite se deteriora, se acelera la degradación de las fibras de celulosa), es evidentemente preferible utilizar desde el principio un

aceite de buena calidad en lugar de esperar a que el papel se deteriore y cause un daño que es irreversible [20].

1.3 Tipos de aceites

En la actualidad los transformadores son llenados con aceite conocido como fluido dieléctrico. A pesar de todos los inconvenientes que presenta el aceite mineral se sigue usando hoy en día, en la actualidad hay cuatro diferentes tipos de fluidos dieléctricos en uso generalizado. Estos son:

- Aceite mineral
- Aceite de silicona
- Aceites sintéticos
- Aceite vegetal

Los cuatro fluidos difieren de manera significativa en la forma en que se comportan en la presencia de humedad. El aceite mineral es el menos satisfactorio, y bastan pequeñas cantidades de agua para reducir de manera significativa los voltajes de ruptura. El fluido siliconado también se ve afectado rápidamente por una pequeña cantidad de humedad, en tanto que los fluidos de esteres se comportan muy bien en la presencia de humedad, y pueden en forma típica mantener un voltaje de ruptura de más de 30 kV con un contenido de agua de más de 400 ppm. Esta es una de las razones por la que los esteres duran mucho más tiempo en servicio [21].

1.3.1 Aceite mineral

El aceite mineral se hace del combustible fósil (petróleo crudo), y consiste en compuestos de hidrocarburos de diversos enlaces [22]. Se obtiene mediante la refinación de una fracción de los hidrocarburos obtenidos de la destilación de una reserva de petróleo crudo. Dependiendo el intervalo de ebullición de la fracción recogida y el tipo de grado de refinado, se selecciona de forma que el aceite resultante alcance los requisitos especificados para el uso de transformador [23]. Hay diferentes aceites (parafínicos, nafténicos, aromáticos), estos contienen diferentes proporciones de componentes.

1.3.2 Aceite de silicona

El aceite de silicona es el nombre genérico de una serie de soluciones inertes y térmicamente estables [16]. Tienen una estructura molecular en la que los grupos identificados como grupos metilo pueden representar cualquier grupo orgánico. Los grupos orgánicos pueden ser iguales o diferentes. Estos grupos definen el peso molecular del fluido de silicona y a su vez determina su viscosidad.

1.3.3 Aceite sintético

La aplicación de aceites sintéticos como aislantes eléctricos ha sido muy limitada. Recientemente se han empleado fluidos sintéticos a base de silicona y aceites de ftalato en aplicaciones especiales donde un alto grado de seguridad y muy amplio tiempo de servicio es requerido [24]. Tienen propiedades dieléctricas adecuadas y son significativamente más biodegradables que los aceites minerales. Excelente estabilidad térmica y buen comportamiento a bajas temperaturas.

1.3.4 Aceite vegetal

Los aceites vegetales son obtenidos a partir de semillas oleaginosas u otras partes de las plantas, de las cual se puede extraer aceite en algunos casos comestibles y en otros casos de uso industrial. Estos aceites aparecen como ácidos grasos saturados, simples, dobles e insaturados triples [25]. Los ácidos grasos saturados son químicamente estables, pero de alta viscosidad. Los ácidos grasos insaturados triples tienen una viscosidad baja, pero son muy inestables en la oxidación. Aceites con un alto porcentaje de ácidos grasos insaturados simples han demostrado ser útiles [26]. Estos aceites a base de semillas se derivan de glicerol y se conocen como triglicéridos. Los aceites probados para la aplicación en transformadores de potencia son a base de triglicéridos de ésteres de ácidos grasos [27].

1.4 Desarrollo e investigación de aceites vegetales

Los aceites comerciales a base de aceite vegetal son resultado de un enorme esfuerzo de investigación que inicio en 1990 con el fin de desarrollar un fluido aislante totalmente biodegradable. El aceite vegetal se considera el candidato más posible en sustitución de los aceites minerales. Se considera como un buen aislante, es biodegradable, no tóxico. El primer producto comercial fue BIOTEMP®, patentado en septiembre de 1999 por ABB en los USA [28]. El aceite contiene 80%

oleico. Se han utilizado técnicas de manipulación de genes [26]. BIOTEMP® está en uso en transformadores de distribución en algunas zonas. En septiembre de 1999 USA sacó otra patente, para aceite de transformador obtenido a partir de soja, este aceite es de bajo oleico. En marzo del 2000 las industrias Cooper, Inc. in Milwaukee, WI registro la marca Envirottemp FR3® [29]. Este aceite es usado en transformadores de distribución comercial, a base de aceite oleico. El aceite Envirottemp FR3® es un refrigerante dieléctrico resistente al fuego, basado en éster natural, específicamente formulado para uso en transformadores de distribución y potencia donde sus exclusivas propiedades ambientales, químicas, eléctricas y de seguridad contra incendio constituyen una ventaja. El aceite Envirottemp FR3 posee un punto de combustión excepcionalmente elevado de 360°C y un punto de inflamación de 330°C. Posee la más alta resistencia a la inflamación de los fluidos resistentes al fuego actualmente disponibles [30].

1.5 Propiedades eléctricas de aceites

Todos los aceites de transformador están obligados a cumplir normas estandarizadas de voltaje AC. Antes de ser utilizados el aceite se hacen una serie de pruebas, la prueba más importante es la ruptura dieléctrica de AC, que se define como el máximo voltaje que soporta el aceite antes de generarse un corto circuito. Existe una variedad de métodos de ensayos estandarizados para determinar este parámetro. En la Tabla 1 se muestra la comparación de la ruptura dieléctrica de los aceites ya mencionados.

Tabla 1. Comparación de ruptura dieléctrica en aceites dieléctricos.

Aceite dieléctrico	Ruptura dieléctrica (kV)
Aceite vegetal	50-70
Aceite sintético	>70
Aceite de silicona	>50
Aceite mineral	60

Fuente: Transformador en baño de éster vegetal [31].

1.5.1 Ruptura dieléctrica

El voltaje de ruptura dieléctrica cobra importancia como medida de la capacidad de un aceite para resistir el estrés eléctrico [20]. El voltaje de ruptura depende del contenido de agua y partículas del aceite. Es especialmente importante controlarlo

antes de poner en marcha un transformador nuevo, así como cuando el aceite del transformador y el aislamiento de papel comienzan a deteriorarse, ya que el proceso de deterioro genera agua y partículas. Una prueba de voltaje de ruptura dieléctrica es una medición de la sollicitación eléctrica que un aceite de aislamiento puede resistir sin romperse. La prueba se realiza usando un vaso de pruebas que tiene dos electrodos montados en su interior, con una separación entre ellos. Una muestra del aceite bajo prueba se introduce en el vaso y se aplica un voltaje de CA a los electrodos. Este voltaje se incrementa hasta que el aceite se rompe, es decir, hasta que una chispa pasa entre los electrodos. El voltaje de prueba se desactiva de inmediato. El voltaje al que se produjo la ruptura es el resultado de la prueba, y se evalúa en forma típica comparándolo con las directivas establecidas en varias normas, o en las especificaciones del fabricante del aceite.

La prueba de voltaje de ruptura dieléctrica es una manera relativamente rápida y simple de determinar la cantidad de contaminación en un aceite aislante. Usualmente el contaminante es agua, pero también pueden ser partículas conductoras, suciedad, residuos, partículas aislantes y los subproductos de la oxidación y el envejecimiento del aceite. Para equipos en servicio, la prueba de voltaje de ruptura dieléctrica ofrece una manera útil y conveniente de detectar humedad y otra contaminación en el aceite antes de que produzcan una falla catastrófica. La información obtenida de esta prueba también se puede usar como ayuda para:

- Predecir la vida remanente de un transformador
- Mejorar la seguridad operacional
- Prevenir incendios en los equipos
- Mantener la confiabilidad

La prueba de voltaje de ruptura dieléctrica también se realiza con aceites nuevos antes de llenar un equipo, y es parte de las pruebas de aceptación para entregas de aceite nuevo y reprocesado.

1.5.2 Frecuencia de la prueba de ruptura dieléctrica

La prueba de voltaje de ruptura dieléctrica es un elemento importante del programa de mantenimiento de cualquier equipo eléctrico aislado por aceite. Sin embargo, para obtener el máximo beneficio de este tipo de pruebas, se recomienda que el aceite se pruebe al menos una vez por año, de ser posible, dos veces por año. Los resultados se deben registrar, ya que las tendencias de los datos harán más fácil la identificación de cambios repentinos o inesperados. Si se encuentra un cambio repentino en los resultados, se puede investigar el transformador buscando pérdidas, verificar el nivel de aceite y evaluar el contenido de agua en el aceite. Si se confirma la contaminación, con frecuencia será posible secar y filtrar el aceite para reacondicionarlo, en lugar de tener que reemplazarlo con costoso aceite nuevo.




1.6 Normas para la prueba de ruptura dieléctrica de aceites.

Hay muchas normas de prueba para líquidos aislantes, pero son derivados de tres normas principales. Dos de estas son de ASTM International (EE. UU) y la otra es de IEC (Europa). Estas normas principales son:

- ASTM D877 – Método de prueba estándar del voltaje de ruptura dieléctrica de líquidos aislantes por el uso de electrodos en forma de disco.
- ASTM D1816 – Método de prueba estándar del voltaje de ruptura dieléctrica de líquidos aislantes generados desde el petróleo por el uso de electrodos VDE.
- IEC 60156 Líquidos aislantes – Determinación del voltaje de ruptura a frecuencias de alimentación – Método de prueba.
- Existe también una norma japonesa que no se basa en estas normas ASTM o IEC.

La Tabla 2 muestra las principales normas ASTM e IEC para la prueba de ruptura dieléctrica.

Tabla 2. Normas establecidas para la ruptura dieléctrica

Normas			
	ASTM D816	ASTM D877	IEC 60156
Origen	EE.UU	EE. UU	EUROPEA
Forma de los electrodos			
Separación de los electrodos	2 mm o 1 mm	2.54 mm	2.5 mm
Temperatura de prueba	ambiente	20-30°C	15-25°C
Incremento de voltaje	0.5 kV/s	3 kV/s	3 kV/s
Rupturas	<100 V	<100 V	4 mA durante 5 ms

Fuente megger [21].

1.6 Normas ASTM (EUA)

Hay dos normas de métodos de prueba de ASTM International. La primera es ASTM D877-02 (última edición de 2002) – Método de prueba estándar del voltaje de ruptura dieléctrica de líquidos aislantes por el uso de electrodos en forma de disco. La segunda es ASTM D1816-04 (última edición de 2004) – Método de prueba estándar del voltaje de ruptura dieléctrica de líquidos aislantes generados desde el petróleo por el uso de electrodos VDE. Si bien esta es esencialmente una prueba de Estados Unidos, se inspira en VDE, una organización normativa alemana [21].

1.6.1 ASTM-D 877

ASTM D877 es una norma más antigua, y en general no es muy sensible a la presencia de humedad. Por ese motivo no se le usa mucho para aplicaciones en servicio. En general se recomienda ASTM 877 solo para pruebas de aceptación del aceite nuevo recibido de un proveedor, ya sea en cargas a granel o contenedores, para garantizar que el aceite se almacenó y transportó correctamente. En general se especifica un valor mínimo de ruptura de 30 kV.

La norma ASTM D877 especifica el uso de electrodos con forma de disco con 25,4 mm (1 pulg.) de diámetro y al menos 3,18 mm (0,125 pulg.) de espesor. Estos electrodos están hechos de bronce pulido y se montan de modo de tener sus caras paralelas y horizontalmente en línea en el vaso de prueba. Se especifica que los bordes deben ser agudos, con un radio de no más de 0,254 mm (0,010 pulg.). Los bordes agudos se deben inspeccionar regularmente para asegurar de que no se hayan redondeado en exceso. Los bordes redondeados en exceso tendrán el efecto de elevar falsamente el voltaje de ruptura, haciendo que se apruebe un aceite que debería haber fallado la prueba. También es importante que los electrodos se mantengan muy limpios, sin picaduras ni corrosión, que podrían ocasionar valores de ruptura falsamente bajos. Los usuarios de los instrumentos deben inspeccionar en forma regular los electrodos, limpiándolos y puliéndolos según sea necesario.

1.6.2 ASTM-D 1816

ASTM D1816 se ha tornado muy usada a lo largo del tiempo, incluso afuera de su rango de aplicación establecido para líquidos aislantes con origen de petróleo con límites de viscosidad. D1816 es más sensible que D877 a la humedad y envejecimiento y oxidación del aceite, y es más afectada por la presencia de partículas en el aceite. Cuando la IEEE reviso la C51.106 en 2002, se agregaron los límites de voltaje de ruptura para aceite nuevo y en servicio usando la D1816. ASTM D1816 especifica el uso de electrodos con forma de hongo de 36 mm de diámetro. Al igual que con D877, los electrodos están hechos de bronce y deben estar pulidos, sin rayas, picaduras. El aceite se agita durante la secuencia de prueba, y se especifica un impulsor de dos paletas accionado por motor. La norma prescribe las dimensiones y el paso del impulsor, así como la velocidad de operación, que debe estar entre 200 rpm y 300 rpm. Para evitar que el aire entre en contacto con el aceite en circulación, el vaso de prueba debe tener una cubierta o deflector.

La norma D1816, si bien es generalmente aceptada como más útil que la D877, presenta una limitación importante: cuando se prueban aceites en servicio, este método es muy sensible a los gases disueltos. Cantidades excesivas de gas en el aceite pueden bajar los resultados de la prueba, al punto de que muestras de aceite adecuadas, con poco contenido de humedad y partículas, fallen esta prueba. Es

importante tener esto en cuenta al probar aceites de transformadores pequeños aislados en atmosferas de gas y, en algunos casos, de transformadores de respiración libre.

1.7 Normas IEC (internacionales)

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) define un único método para la prueba de voltaje de ruptura dieléctrica de aceites. Esta es la IEC 60156 Líquidos aislantes – Determinación del voltaje de ruptura a frecuencias de alimentación – Método de prueba.

1.7.1 IEC 60156

La IEC 60156 es una norma internacional que aparece en varias formas, ya que los comités nacionales miembros de la IEC de varios países la han adoptado. Por ejemplo, la British Standard BS EN 60156 y la norma alemana VDE 0370 parte 5. IEC 60156 especifica el uso de electrodos esféricos o con forma de hongo que son los mismos usados en la norma ASTM D1816. La norma IEC difiere en varios puntos de la D1816, pero la diferencia principal es que la norma IEC permite el uso opcional de un impulsor para agitación, el uso de un agitador magnético de bolas o sin agitación. La norma especifica que no se han encontrado diferencias estadísticamente significativas entre pruebas con o sin agitación. El uso de un agitador magnético se permite solamente cuando no hay riesgo de remover partículas magnéticas de la muestra de aceite bajo prueba. Cuando el aceite se usa como refrigerante y por lo tanto al circularlo, se agitará durante la prueba. Por ejemplo, el aceite de un transformador normalmente circula si se usa como refrigerante, de modo que una muestra de aceite tomada en este caso normalmente se agitará para asegurar la mejor probabilidad de detectar contaminación por partículas.

Los valores de ruptura dieléctrica del método IEC 60156 son usualmente más altos que los de los métodos ASTM. Posiblemente esto se debe en parte a las diferencias de velocidad de subida de rampa y separación de electrodos cuando se compara con D1816, y de forma de electrodos cuando se compara con D877. (La forma del electrodo IEC provee un campo eléctrico más uniforme). El resultado es que para transformadores bien mantenidos los voltajes de ruptura pueden ser mayores que

los 60 kV que puede alcanzar el instrumento de prueba. Esto puede no ser un problema cuando se evalúa aceite nuevo de un proveedor, o aun aceite en uso, pero con frecuencia se requiere un valor real de voltaje de ruptura. Cuando se prueba con IEC 60156, por lo tanto, es recomendable el uso de un instrumento capaz de aplicar un voltaje mayor. Tal como con D1816, el gas disuelto en la muestra de aceite puede reducir los valores de ruptura, pero el efecto es mucho menos pronunciado que con la norma IEC 60156.

1.8 Como realizar la prueba

Una prueba exitosa de voltaje de ruptura dieléctrica depende no solo de obtener una buena muestra, sino también en asegurar que el vaso de prueba este adecuadamente preparado.

1.8.1 Ajuste y cuidado de los electrodos y vaso de prueba

La preparación del vaso de prueba se puede dividir en dos elementos clave: el primero es la limpieza y el segundo es el ajuste de la separación de los electrodos. Tanto los electrodos y el vaso deben limpiarse frotando con papel seco libre de pelusa o gamuza limpia y seca. Durante la limpieza se debe evitar tocar los electrodos y el calibrador con los dedos. Después de efectuar la limpieza se debe enjuagar el vaso con aceite nuevo y efectuar las pruebas de ruptura dieléctrica. La separación de los electrodos durante la prueba debe ser de 2.54 mm (0.100 pulgadas) esto se determina con un calibrador. Esta separación debe verificarse al efectuar la primera prueba. En la Figura 1 se puede observar las especificaciones de los electrodos planos de acuerdo con la norma ASTM-D877.

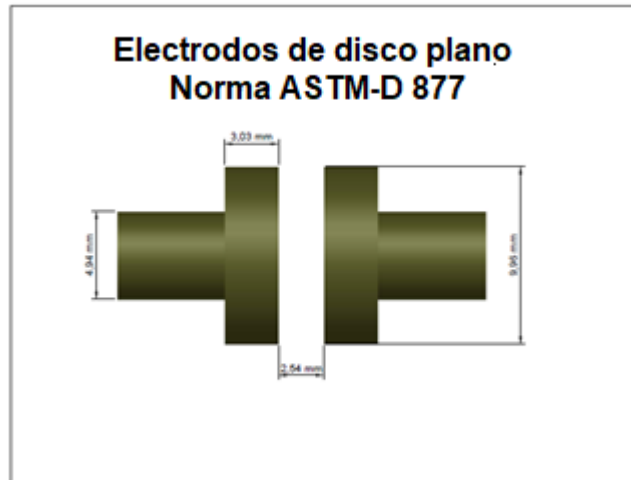


Figura 1. Electrodos planos.

1.8.2 Temperatura de prueba

El voltaje de ruptura de una muestra de aceite aumenta de manera significativa con la temperatura. Por ejemplo, una muestra de aceite vegetal con un voltaje de ruptura de alrededor de 35 kV a 30°C podría fácilmente tener un voltaje de ruptura de casi 60 kV a 70 °C. Por este motivo, todas las normas de prueba de aceites especifican que la temperatura de la muestra se debe registrar en el informe de la prueba. Se especifica que la temperatura a efectuar de la prueba debe de ser a temperatura ambiente, pero en ningún caso debe de ser menor de 20°C. Las pruebas a temperaturas menores del ambiente dan resultados variables e insatisfactorios. Se recomienda que al mismo tiempo y por separado se tome la temperatura del aceite de prueba, puesto que se sabe que la rigidez dieléctrica varía conforme a la temperatura.

1.8.3 Efecto de humedad

La mayoría de los expertos en la industria están de acuerdo en que la humedad en transformadores de potencia sumergidos en aceite mineral no es deseable. Sin embargo, el problema es el cómo determinar la cantidad de humedad que está presente en el sistema de los aislamientos y más concretamente, en que parte se encuentra dentro de la compleja estructura de los aislamientos de los transformadores de potencia. Para fines prácticos, un transformador en operación nunca está en una condición de equilibrio en lo que respecta a la distribución de la

humedad, ya que la humedad se desplaza del aceite a los aislamientos y viceversa dependiendo de la temperatura y las características de absorción de la humedad de cada material. Una gran parte de los materiales utilizados en los sistemas de aislamiento como son el aceite, el papel el cartón son higroscópicas, por lo tanto, son capaces de absorber humedad y esto ocasiona una reducción en la resistencia del aislamiento.

1.8.3 Velocidad de elevación de voltaje

El voltaje se debe aplicar partiendo de cero a una velocidad de 3 kV/s ± 20 hasta que ocurra la ruptura del aceite, lo cual queda definido por la operación del interruptor, este valor debe de registrarse y tomarse en cuenta para la determinación de la ruptura dieléctrica de la muestra. Debe de haber un intervalo por lo menos de un min entre llenado del vaso y la aplicación de voltaje de ruptura.

1.8.4 Procedimiento

Pruebas de referencia. Cuando se desea determinar la ruptura dieléctrica de un aceite nuevo o regenerado para efectos de referencia, debe efectuarse una prueba de ruptura en cada una de las cuatro copas llenas sucesivamente. Cada valor de voltaje de ruptura obtenido debe someterse a un criterio estadístico. Si los cuatro valores cumplen con ese criterio se debe promediar y este promedio se reporta como el valor de ruptura dieléctrica de la muestra.

CAPITULO 2. Instrumentación

La instrumentación electrónica es la técnica que se ocupa de la medición de cualquier tipo de magnitud física, de su conversión a magnitudes eléctricas y de su tratamiento para proporcionar información para un sistema de control o una persona. La instrumentación electrónica se aplica cuando se usa un sensor y se procesa la información proveniente de variables tanto físicas como químicas, a partir de las cuales se realiza la visualización y control de los procesos, empleando dispositivos electrónicos. En el diseño y empleo de sistemas de instrumentación suelen aparecer con frecuencia circuitos eléctricos. Los componentes básicos de los circuitos de corriente continua son fuentes de alimentación y las resistencias. En circuitos de corriente alterna aparecen otros componentes como inductivos y capacitivos. Para optimizar un sistema se necesita entender sus principios de operación y valorar su importancia para las aplicaciones deseadas.

2.1 Sistema de medida

El proceso de medición generalmente requiere el uso de un instrumento como medio físico para determinar la magnitud de una variable. Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. Un sistema no está necesariamente limitado a los sistemas físicos. El concepto de sistema se puede aplicar a fenómenos abstractos y dinámicos, como los que se encuentran en la economía. Por tanto, la palabra sistemas debe de interpretarse en sentido amplio que comprenda sistemas físicos, biológicos, económicos y similares. Un sistema de medida electrónico es aquel cuya finalidad es obtener información acerca de un proceso físico y presentar dicha información en la forma adecuada a un observador o a otro sistema de control.

En la Figura 2 se muestra una representación de las conexiones en el sistema, la relación entre equipos y la comunicación entre ellos.

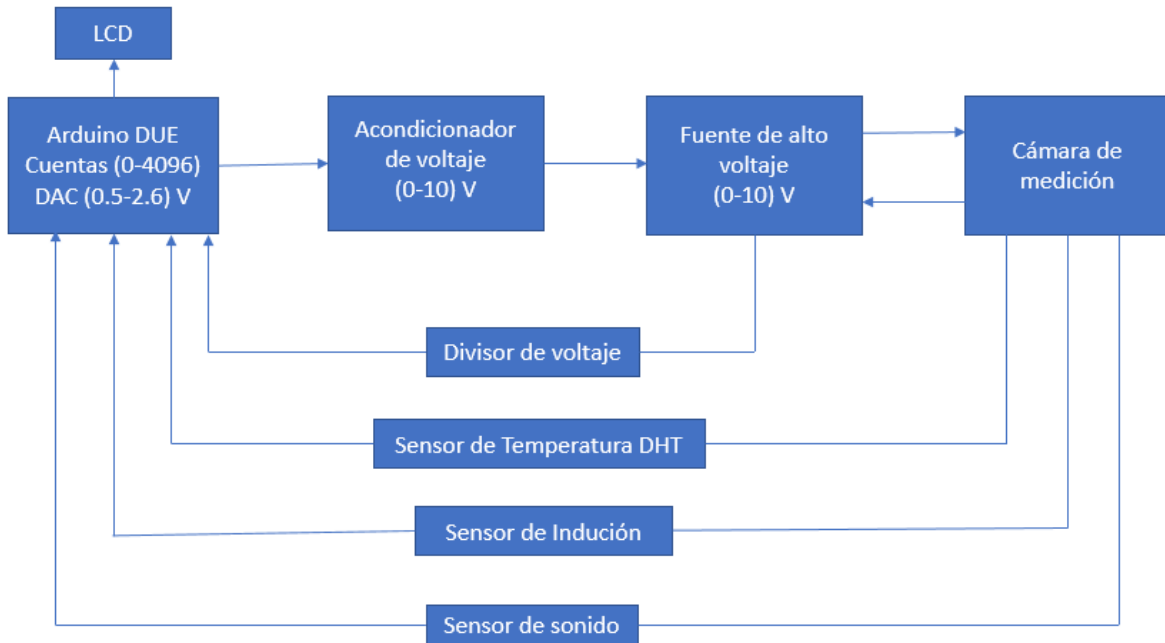


Figura 2. Diagrama del sistema.

2.2 Acondicionamiento de señal

Cuando se desea realizar una medida, es necesario un transductor que transforme la medida física en una medida eléctrica. Esa medida eléctrica a veces es necesario acondicionarla. En términos generales acondicionar una señal significa realizar las siguientes etapas: Convertir la señal, modificar el nivel de la señal linealizar la respuesta y filtrar la señal. Las señales de sensores, convertidores de analógico-digital o digital-analógico etcétera, no siempre son adecuadas a la entrada de un sistema para procesar, desplegar, grabar y transmitir datos. Cuando es este caso es necesario utilizar dispositivos para acondicionar la señal. El acondicionamiento de señal es uno de los componentes más importantes de un sistema de adquisición de datos o un sistema de medición ya que sin esa señal no se puede confiar en la exactitud de la medida. Las necesidades de acondicionamiento de las señales varían ampliamente dependiendo de la funcionalidad del sensor. La clave para lograr un exitoso sistema de acondicionamiento de señales es entender los circuitos que son necesarios para garantizar una medida precisa.

2.2.1 Amplificadores

Un amplificador operacional puede sumar señales, amplificar una señal, integrarla o diferenciarla. Su capacidad para ejecutar esas operaciones matemáticas es la razón de que se llame amplificador operacional. El amplificador operacional es un dispositivo electrónico que consta de un complejo sistema de resistores, transistores, capacitores y diodos. Los amplificadores son uno de los componentes más importantes en los sistemas de instrumentación. Por lo general se emplean en cada aplicación que requiera aumentar las pequeñas señales que proporcionan los transductores a un nivel suficientemente elevado para su registro y tratamiento en sistemas de medida de voltaje.

2.2.2 Amplificador restador

Los amplificadores restadores se utilizan en varias aplicaciones en las que es necesario aplicar la diferencia entre las señales de entrada. Un amplificador restador es un dispositivo que amplifica la diferencia entre dos entradas, pero rechaza toda señal común a las dos entradas. En la Figura 3 se muestra la configuración del circuito amplificador restador.

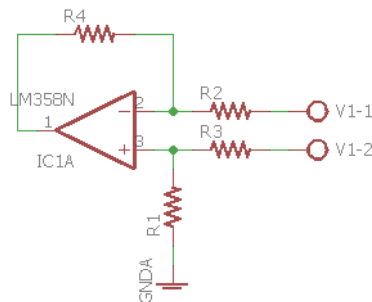


Figura 3. Amplificador restador

Ecuación del Amplificador Operacional.

$$V_{out} = (V_2 - V_1) \frac{R_3}{R_1} \quad (1)$$

2.3 Convertidor Digital a Analógico (DAC)

La función básica de los convertidores es transformar una señal analógica en su equivalente digital y viceversa. El convertidor Digital a analógico (DAC-Digital to Analogue Converter) transforma un número digital en una señal eléctrica analógica. Esta función exige que los pasos intermedios se realicen de forma óptima para no perder información. Según el tipo de componente y su aplicación existen distintos parámetros que lo caracterizan, éstos pueden ser: la velocidad de conversión, la resolución, los rangos de entrada, etc. Un transductor permite relacionar las señales del mundo real y sus análogas eléctricas. Para compatibilizar la información con un sistema digital, se requiere de convertidores de datos del tipo ADC o DAC, según corresponda. Cada conversor DAC, está determinado por una función de transferencia ideal de entrada – salida [32]. En la Figura 4 se muestra el proceso de conversión Digital a Analógico (DAC).

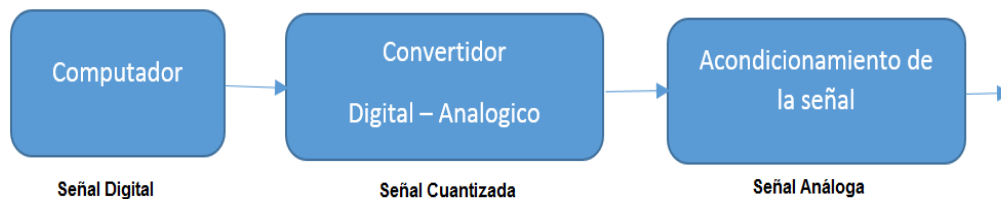


Figura 4. Proceso de conversión Digital-Análogo.

2.4 Microcontrolador

Un microcontrolador es un programable, capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria. Está compuesto de varios bloques funcionales, los cuales cumplen una tarea específica. Un microcontrolador incluye en su interior las tres principales unidades funcionales de una computadora: (CPU), memoria y periféricos de entrada y salida. Se utilizan en equipos de comunicaciones y de telefonía, en instrumentos electrónicos, en equipos médicos e industriales de todo tipo, en electrodomésticos, en juguetes etc.

Los microcontroladores están concebidos fundamentalmente para ser utilizado en aplicaciones puntuales donde el microcontrolador debe realizar un pequeño número de tareas, al menor costo posible. En estas aplicaciones, el microcontrolador ejecuta

un programa almacenado permanentemente en su memoria, el cual trabaja con algunos datos almacenados temporalmente e interactúa con el exterior través de las líneas de entrada y salida de que dispone. Los microcontroladores deben cumplir con ciertas características deseables las cuales son contar con entradas y salidas analógicas y digitales. Un microcontrolador combina los recursos fundamentales disponibles en un microcomputador, es decir, la unidad de procesamiento CPU (Central Processing Unit), la memoria y los recursos entrada y salida, en un integrado.

El microcontrolador dispone de un oscilador que genera los pulsos que sincronizan todas las operaciones internas. La velocidad de ejecución de las instrucciones del programa está en relación directa con la frecuencia del oscilador del microcontrolador.

La CPU es el cerebro del microprocesador esta unidad trae las instrucciones una a una desde la memoria donde están almacenadas, las interpreta (descodifica) y hace que se ejecuten. La CPU es un elemento capaz de realizar operaciones aritméticas y lógicas elementales con los datos binarios, además de poder auxiliar en la toma de decisiones.

La memoria del microcontrolador es el lugar donde son almacenadas las instrucciones del programa y los datos que manipula. En un microcontrolador siempre hay dos tipos de memoria: la memoria RAM (Random Access Memory), la memoria RAM es una memoria de lectura y escritura, es volátil, es decir pierde la información almacenada cuando falta la energía que alimenta la memoria y la memoria EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read only Memory) es una memoria que no es volátil, la memoria EEPROM es utilizada para el programa de control de temporizadores y contadores, Puertos serie y paralelo de entrada y salida o Convertidor de Analógico a Digital. La memoria EEPROM se usa para almacenar permanentemente el programa que debe ejecutar el microcontrolador. La entrada y salida es particularmente importante en los microcontroladores, pues a través de ella el microcontrolador interacciona con el exterior. Forman parte de la entrada y salida los puertos paralelos y serie, los temporizadores y la gestión de las

interrupciones. El microcontrolador puede incluir también entradas y salidas analógicas asociadas a convertidores ADC y DAC. En la actualidad existen un gran número de microcontroladores quizá la clasificación más importante sea entre microcontroladores de 4, 8, 16, 32 bits. Cuando escuchamos que un procesador es de 4, 8, 16, 32 bits, nos estamos refiriendo a procesadores que realizan sus operaciones con registros de datos de ese tamaño, y por supuesto, esto determina muchas de las potencialidades de estas máquinas. Mientras mayor sea el número de bits de los registros de datos del procesador mayor será la velocidad de ejecución. Algunos de ellos son fabricados por las siguientes empresas: Atmel, Freecale (antes Motorola), Holtek, Intel, National Semiconductor, Microchip, NXP Semiconductors antes Philips), STMicroelectronics, Texas instruments etc [33].

2.5 Software libre

El software libre juega un papel muy importante, proporcionando tanto una arquitectura hardware y software de código abierto, como entornos de desarrollo que permiten la creación de aplicaciones. La plataforma Arduino, está compuesta por hardware y software, la cual está basada en un microcontrolador con entradas y salidas tanto analógicas como digitales esta plataforma tienen la característica de ser un sistema abierto, lo que significa que su diseño como su distribución es libre, es decir se puede utilizar sin haber adquirido licencia alguna. Otra ventaja del Arduino es que es compatible con Windows, Mac OS y Linux, que a diferencia del entorno de otros microcontroladores están limitados a Windows. Debido a que existen diversas librerías, Arduino puede personalizarse con nuevas funcionalidades, por lo que esta plataforma facilita el desarrollo de aplicaciones en distintas áreas de la electrónica tales como procesamiento de señal, electrónica de potencia automatización y control. Actualmente Arduino, ha comenzado a tomar relevancia a nivel mundial, no solo por ser una plataforma abierta, sino porque también está orientada a usuarios no programables, ya que utiliza lenguaje “processing” (el cual ha sido creado para la enseñanza de la programación en un contexto visual) en conjunto con “wiring” (plataforma de hardware multipropósito con un ambiente para no programadores) [34].

2.5.1 Arduino DUE

Arduino DUE es la primer placa electrónica basa en un microcontrolador de 32 bits, con la cual mejora las capacidades de las versiones antecesoras tales como el modelo UNO y el modelo Leonardo, las cuales solo trabajan a 8 bits. Gracias al microcontrolador de la compañía Atmel (ATSM3X8E), se puede disponer de entradas y salidas tanto analógicas como digitales con resolución de 12 bits; la tasa de respuesta de muestreo con la que trabaja Arduino DUE es de hasta 100ksps (kilo muestras por segundo). En comparación con el Arduino UNO que trabaja a una tasa de muestreo de 15 kbps. El Arduino DUE tiene 53 entradas o salidas digitales. Todas las entradas y salidas trabajan a 3.3V. Cada pin puede suministrar (soportar) una corriente de 3 mA- 15 mA dependiendo del pin, o recibir 6 mA-9 mA dependiendo del pin. Los pines de 2 a 13 son salidas PWM de 8 bits de resolución. Las entradas analógicas se encuentran desde A0 a A11, el Arduino DUE integra 12 entradas analógicas cada una de las cuales tienen una resolución de 12 bit (4096 valores diferentes). Cuenta con pines que proporcionan una salida analógica con una resolución de hasta 12 bit (4096 niveles) ya que con la función analogWriteResolution (bits) se puede modificar su resolución. Cuenta con dos DAC DAC0 y DAC1 (Digital to Analogue Converter), convertidor digital a analógico. Cuatro canales de comunicación RX0-TX0. Interfaz I2C (SDA, SCL). Velocidad de reloj de 84 MHz. La memoria flash de este microcontrolador para código es de 512 KB [33]. En la Figura 5 se muestra el microcontrolador Arduino DUE.

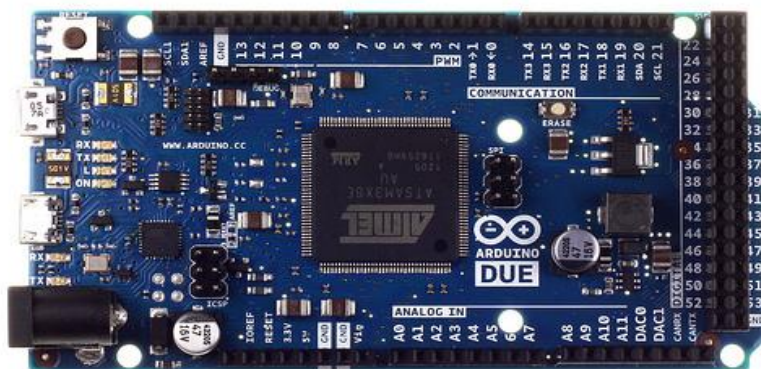


Figura 5.Arduino DUE

2.6 Campo eléctrico

El concepto de campo fue desarrollado por Michael Faraday en el contexto de las fuerzas eléctricas. En este enfoque se dice que existe un campo eléctrico en la región del espacio que rodea el objeto cargado: la carga fuente. La presencia del campo eléctrico puede usarse una carga prueba en el campo eléctrico, observando la fuerza eléctrica que actúa sobre él. Definimos campo eléctrico debido a la carga fuente en la ubicación de la carga de prueba, como la fuerza eléctrica sobre la carga de prueba *por unidad de carga*, para claridad, el vector del campo eléctrico \vec{E} en un punto en el espacio se define como la fuerza eléctrica \vec{F}_e que actúa sobre una carga de prueba positiva q_0 colocada en ese punto, dividida entre la carga prueba [35].

$$\vec{E} \equiv \frac{\vec{F}_e}{q_0} \quad (2)$$

2.6.1 Diferencial de potencial

El potencial es solo una característica del campo sin importar cualquier partícula con carga que pueda estar colocada en el campo. La diferencial de potencial $\Delta V = V_B - V_A$ entre dos puntos A y B de un campo eléctrico se define como el cambio en energía potencial en el sistema al mover una carga q entre los puntos, dividido entre la carga. Donde l es la longitud, distancia entre el punto A al B.

$$V_B - V_A = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (3)$$

El desplazamiento infinitesimal $d\vec{l}$ se interpreta como el desplazamiento entre dos puntos en el espacio, en vez del desplazamiento de una carga puntual.

$$V_B - V_A = -E \int_A^B dl \quad (3.1)$$

$$V_B - V_A = -Ed \quad (3.2)$$

Si se aplica en la ley de Gauss el campo eléctrico es constante. La ecuación con la que se calcula el campo eléctrico entre dos placas es ec (3.3). donde E es igual al campo eléctrico, V es la diferencia de potencial y l es la distancia entre el punto A al B.

$$E = \frac{V}{l} \quad (3.3)$$

2.7 Sensores

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar una determinada acción externa, de magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, estas variables son transformadas en variables eléctricas. Las variables en instrumentación pueden ser: temperatura, humedad, aceleración, presión fuerza, torsión etc [36]. Las características de los sensores son relevantes ya que de acuerdo con los parámetros a medir se puede seleccionar el sensor a usar en el sistema [37].

Entre las características más importantes destacan:

- Rango de medida: es el dominio de la magnitud de medida en el que puede aplicarse el sensor.
- Resolución: es la mínima variación de la magnitud de entrada que puede apreciarse a la salida.
- Precisión: es el error de medida máximo esperado.
- Sensibilidad: Relación entre la variación de la magnitud de salida y la variación de magnitud de entrada.

El sistema de medida de rompimiento dieléctrico tiene como función sensor las siguientes variables.

- Voltaje
- Voltaje inducido
- Temperatura
- Humedad

2.7.1 Voltaje

Para mover un electrón en un conductor en una dirección particular es necesario que se transfiera cierto trabajo o energía. Este trabajo lo lleva a cabo una fuerza electromotriz externa (fem). Esta fem se conoce como voltaje o tensión, también conocida como diferencial de potencial.

El voltaje o diferencial de potencia es la energía por unidad de carga, requerida para mover una carga unitaria a través de un elemento, medida en volts (V). El voltaje es una variable básica en un circuito eléctrico. El termino común señal se aplica a una cantidad eléctrica como voltaje.

El voltaje es la diferencia del potencial eléctrico entre dos puntos de un circuito eléctrico o electrónico, expresado en voltios. La mayoría de los dispositivos de medición pueden medir o leer voltaje. El arduino DUE solo mide voltajes positivos de 0 a 3.3 V

Para la medición de voltaje hay dos formas de amplio uso

- Los transformadores de voltaje de núcleo de hierro.
- Divisores de voltaje o también llamados divisores resistivos. Estos se usan cuando el voltaje a medir es muy grande
- Los amplificadores operacionales. Se usan cuando el voltaje es muy pequeño o cuando es negativo

Para el diseño del divisor de voltaje se debe tomar en cuenta el voltaje máximo que se requiere medir (V_e) y el voltaje máximo que puede leer el microcontrolador receptor de la señal censada (V_s). El divisor de voltaje más simple consiste en dos resistencias conectadas en serie, como se muestra en la Figura 6, los valores conocidos son V_e y V_s . Para obtener el valor adecuado de R_1 Y R_2 del divisor, primero se determina el valor de R_2 con lo que obtenemos la corriente que circula por el divisor, I , por medio de la ley de Ohm.

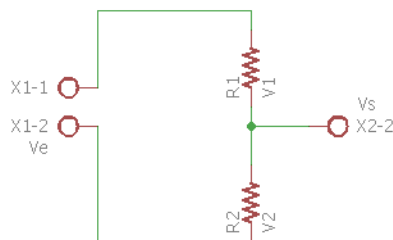


Figura 6.Divisor de voltaje

$$V = IR \quad (4)$$

$$V_e - V_s = IR_1 \quad (4.1)$$

$$V_s = IR_2 \quad (4.2)$$

$$V_e = I(R_2 + R_1) \quad (4.3)$$

Se despeja V_s en la ecuación (4.2) que dando de la siguiente manera.

$$I = \frac{V_s}{R_2} \quad (4.4)$$

Sabiendo que $I = \frac{V_s}{R_2}$ se sustituye en la ecuación (4.1), se obtiene

$$V_e - V_s = \frac{V_s}{R_2} (R_1) \quad (4.5)$$

Se despeja V_e queda la siguiente ec.

$$V_e = \frac{V_s}{R_2} (R_1 + V_s) \quad (4.6)$$

Sacando factor común queda

$$V_e = V_s \left(\frac{R_1}{R_2} + 1 \right) \quad (4.7)$$

2.7.2 Sensor de Inducción

Una fem inducida es generada por la variación del flujo magnético $BA \cos(u)$ con respecto al tiempo en un circuito de área A , donde B es el campo magnético y u el ángulo entre B y A . Durante la prueba de ruptura dieléctrica se produce una fem inducida debido a que la corriente eléctrica pasa de un valor muy bajo a uno suficientemente alto para conducir en el medio, y esto lo hace en intervalos de tiempo, muy pequeños. Al cambiar la corriente cambia el campo magnético en el circuito, provocando una fem. Para detectar ese voltaje inducido se construye un sensor de inducción el cual consta de una bobina o solenoide de un diámetro determinado y cierto número de vueltas.

Un solenoide es un alambre largo enrollado en forma circular. Con esta configuración puede producirse un campo magnético razonable uniforme en el

espacio dentro del círculo. Un inductor, es una bobina capaz de almacenar energía en forma de un campo magnético.

El sensor tiene como función detectar cuando se llega al rompimiento dieléctrico. El voltaje inducido por el incremento del voltaje con la rampa, que provoca una corriente y un campo magnético, es muy pequeño. Pero al comenzar a conducir el dieléctrico que esté en la cámara de medición, ya sea aire o aceite, se inducen voltajes suficientemente grandes como para ser detectados sin necesidad de amplificar señales. Además de detectar el voltaje de rompimiento, el microcontrolador apaga la fuente de voltaje para no dañar al mismo controlador ya que las fem a veces son lo suficientemente grandes como para dañar la tarjeta Arduino DUE. En la Figura 7 se muestra el sensor de inducción el cual consiste en un alambre enrollado.



Figura 7. Sensor de inducción.

2.7.3 Sensor de sonido

Al igual que un rayo, cuando comienza la conducción por un dieléctrico, produce sonidos que pueden ser detectados por un sensor de sonido, amplificar la señal y enviarla a un sensor digital de interrupciones para detectar que ha iniciado el rompimiento y apagar la fuente de voltaje. Un micrófono es capaz de convertir esa onda en una señal eléctrica medible, análoga al sonido que se quiere medir.

Para la detección de sonido se utiliza un módulo micrófono sensor de sonido Arduino, el módulo consta de dos salidas.

AO, salida analógica, la señal de voltaje de salida en tiempo real del micrófono.

DO, cuando la intensidad de sonido alcanza un cierto umbral. La señal de alta y baja. En la Figura 8 se muestra el módulo sensor de sonido.



Figura 8.Sensor de sonido

2.7.4 Temperatura y Humedad

La temperatura es un parámetro físico más común que se mide en un sistema de control, en diversas cuestiones la temperatura no es el parámetro de mayor interés, esta se ha de medir para incluir indirectamente su efecto en medida deseada.

En el sistema de medición que se desarrolló, se debe considerar la temperatura ya que la prueba de ruptura dieléctrica se debe realizar a temperatura ambiente, para monitorear la temperatura se usa un sensor DHT 22. En la Figura 9 se muestra el sensor de temperatura y humedad DHT 22.

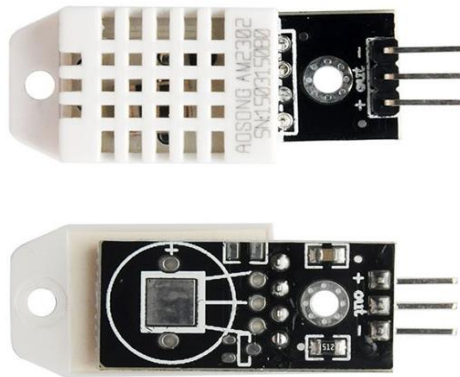


Figura 9.Sensor DHT22, Temperatura y Humedad

El DHT22 es un sensor digital de temperatura y humedad. Utiliza un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire circundante, y muestra los datos mediante una señal digital en el pin de datos (no hay pines de entrada analógica).

Características

Alimentación: $3.3\text{Vdc} \leq V_{cc} \leq 6\text{Vdc}$

Rango de medición de temperatura: -40°C a 80°C

Precisión de medición de temperatura: $<\pm 0.5^{\circ}\text{C}$

Resolución Temperatura: 0.1°C

Rango de medición de humedad: De 0 a 100% RH

Precisión de medición de humedad: 2% RH

Resolución Humedad: 0.1%RH

Tiempo de censado: 2s

El sensor está calibrado y no requiere componentes adicionales por lo que basta con conectarlo para comenzar a tomar mediciones de humedad relativa y temperatura [38].

2.8 Calibración

La calibración de los elementos del sistema es un factor muy importante en la instrumentación, se define como la relación entre la medición física de entrada y la señal de salida para un sensor específico. Un sensor se calibra al introducir una señal conocida de entrada y almacenar la señal de salida. Los datos obtenidos se grafican y se genera una curva de calibración representativa del sensor. A la curva de calibración se le efectúa una regresión, que puede ser lineal, exponencial etc.

En este caso se desea calibrar el sistema de medición ya que se requiere una pendiente de 500 V/s.

CAPITULO 3. Desarrollo experimental

En este capítulo se describe la metodología utilizada para desarrollar el sistema de caracterización eléctrica de aceites, el sistema consiste en un circuito de control el cual está diseñado para generar una rampa de voltaje. El sistema funciona automáticamente al presionar un botón de inicio. Los resultados obtenidos de la prueba de ruptura dieléctrica se analizan con la finalidad de ver si cumplen con ciertas características que deben cumplir los aceites dieléctricos. La rigidez dieléctrica es el voltaje al cual se presenta la ruptura dieléctrica entre dos electrodos bajo determinadas condiciones. Para el diseño del circuito se toma en cuenta el método que establece la norma ASTM D-877 dicha norma establece el tamaño de los electrodos, en forma de disco con 25,4 mm(1pulg) de diámetro, espesor 3.18 mm (0,125 pulg). Estos electrodos están hechos de bronce y se montan de modo de tener caras paralelas y horizontales en línea en el vaso de prueba. También se establece el incremento de voltaje el cual es de 500V/s. En la literatura el valor de rigidez en un aceite nuevo es de 50-70kV. El valor de la ruptura dieléctrica de un aceite es de gran relevancia ya que se toma como medida de su habilidad para soportar esfuerzos eléctricos sin fallar. Otra de sus funciones es indicar la presencia de agentes contaminantes tales como agua, suciedad por mencionar algunas. Dicho método cumple dos variantes para determinar el valor de rigidez dieléctrica, una para aceite nuevo y la otra para aceite regenerado al iniciar o reiniciar el servicio.

El sistema está dividido en cuatro fases, la primera es el sistema de control en este caso se usa un microcontrolador comercial, Arduino DUE se encarga de ejecutar las ordenes programables en un código, el microcontrolador cuenta con un convertidor Digital a Analógico la función del DAC es sacar un voltaje que va de (0.54-2.6)V, la segunda se desarrolla un circuito acondicionador de voltaje, la tercera fase se cuenta con una fuente de alto voltaje que va desde 0 – 10000 V que es comprada para las pruebas. La cuarta fase consiste en crear la cámara de pruebas donde se realizarán las mediciones. En la Figura 10 se muestra el diagrama de conexión del sistema de control.

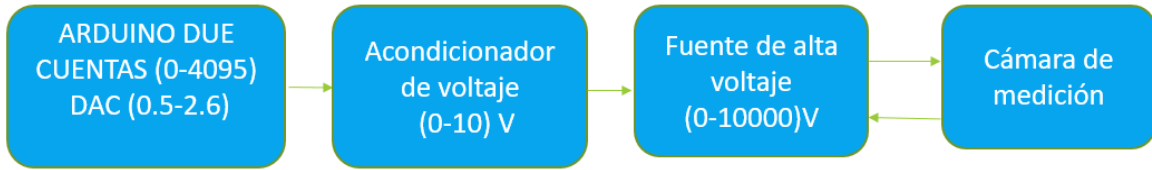


Figura 10. Diagrama de conexión del sistema de control.

3.1 Diseño del circuito.

El sistema de control consta dos etapas, lo compone un microcontrolador Arduino DUE, el cual se encarga de alimentar algunos subsistemas que utilizan 5 Volts. Además, realiza ciertas funciones ya programadas. Se debe tomar en cuenta las características del sistema ya que cada parte del circuito cumple diferentes funciones. Dentro del sistema se agregan sensores de sonido, inducción, temperatura y humedad, así también un sistema de adquisición de datos. En la Figura 11 se muestra el circuito general del sistema.

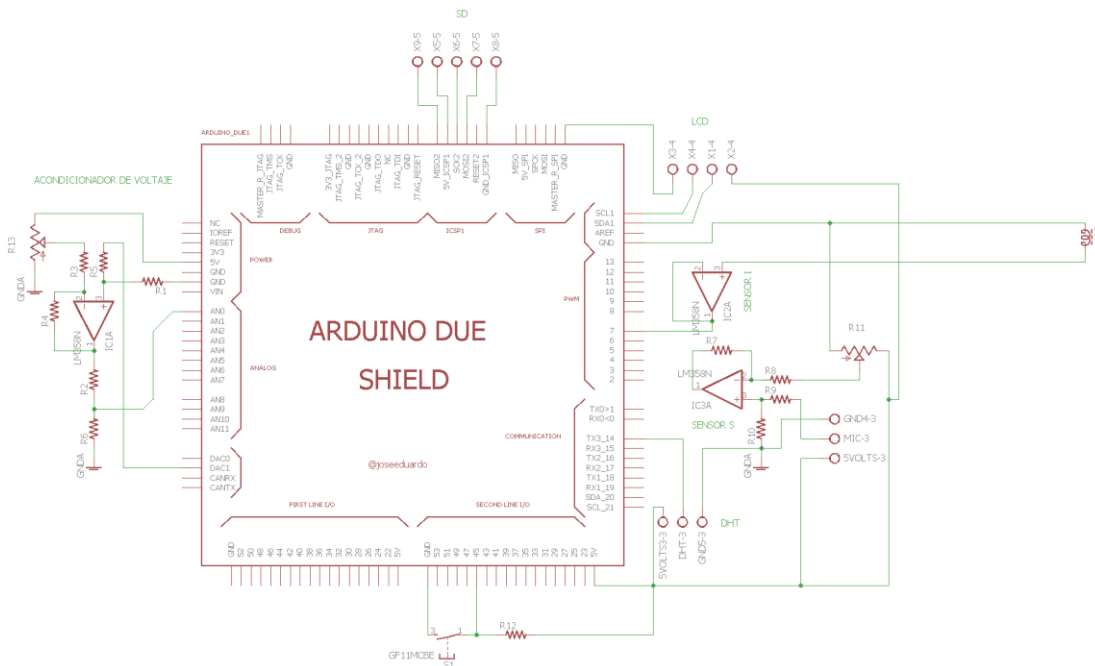


Figura 11. Circuito general del sistema de control.

3.1.1 Voltaje del DAC

La primera etapa es generar una rampa de voltaje con un convertidor Digital a Analógico (DAC), este convertidor ya se encuentra integrado en el microcontrolador Arduino DUE que es la primera placa que cuenta con un núcleo ARM de 32 bits.

Para obtener el voltaje del DAC, en primer lugar, su resolución, que depende del número de bits de entrada del convertidor. El Arduino DUE dispone de entradas y salidas tanto analógicas como digitales con resolución de 12 bits. Esto quiere decir que cuenta con una resolución de $2^{12} - 1 = 4095$ cuentas o combinaciones, el voltaje de salida puede tener 4095 valores además del 0. En la Tabla 3. se muestra la relación entre la entrada digital y la salida analógica. La salida analógica correspondiente a cada una de las 4096 combinaciones dependerá del voltaje de referencia estemos usando, que a su vez dependerá del voltaje máximo que es posible tener a la salida analógica. En este caso se usa un voltaje de referencia de 0.5 V y el voltaje máximo es de 2.6V. El voltaje que entrega el DAC es de 0.5-2.6V. Se calcula la relación lineal en el software OriginPro9. Como se puede observar en la Figura 12. Se toman los valores mayores de la relación digital a analógica de (0-4095) cuentas y (0.5- 2.6) V voltaje del DAC. Se hace el cálculo teórico usando la ecuación de la pendiente.

$$V_{DAC} = 5.21 \times 10^{-4} C + 0.5 \quad (5)$$

Tabla 3. Relación de cuentas y voltaje

Entradas digitales	Salidas analógicas
DAC1	Voltios
0	0.5
4095	2.6

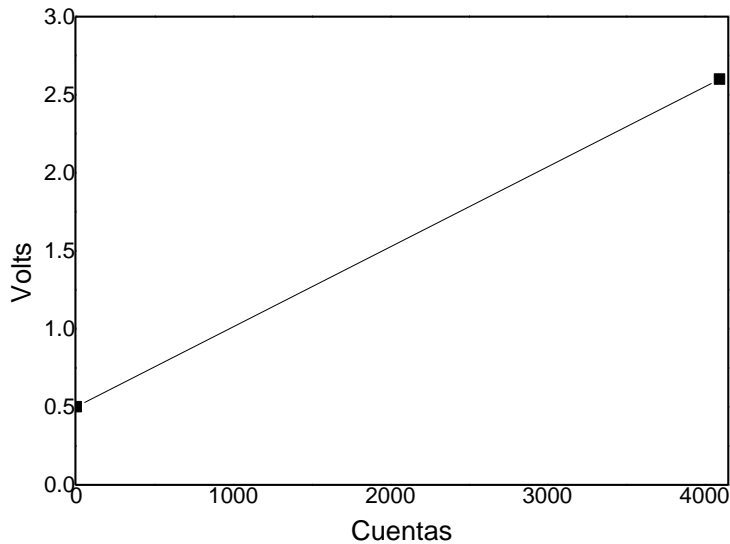


Figura 12. Relación lineal cuentas del microcontrolador y voltaje de salida del DAC.

3.1.2 Acondicionamiento de voltaje

La segunda etapa consta de un acondicionador de voltaje, el cual se encarga de ajustar un voltaje de cierto nivel a otro nivel, en este caso de un nivel de voltaje menor a uno mayor, esto se logra con un acondicionador de voltaje restador. El cual dispone de dos entradas, cada una cuenta con una resistencia, una conectada a la entrada inversora, la otra a la no inversora, el voltaje en la salida cuando actúan dos fuentes en este caso dos fuentes de voltaje independientes en su entrada, el valor de la salida es proporcional a la diferencia entre los dos voltajes. Amplificando la diferencia de los dos voltajes. Se acondiciona un voltaje del DAC que es de (0.5-2.6) V, a un voltaje de (0-10) V. En la Figura 13 se muestra la relación lineal voltaje del DAC y voltaje acondicionado. También se muestra en la Figura 14 el diagrama del circuito acondicionador de voltaje. Para saber el cálculo teórico se usa la ecuación (6) que es la ecuación de la recta o pendiente.

$$V_A = 4.7(V_{DAC} - 0.5) \quad (6)$$

Tabla 4.Relación de voltaje del DAC- voltaje de entrada de la fuente de alto voltaje.

Voltaje del DAC	Voltaje entrada FA
Voltios	Voltios
0.5	0
2.6	10

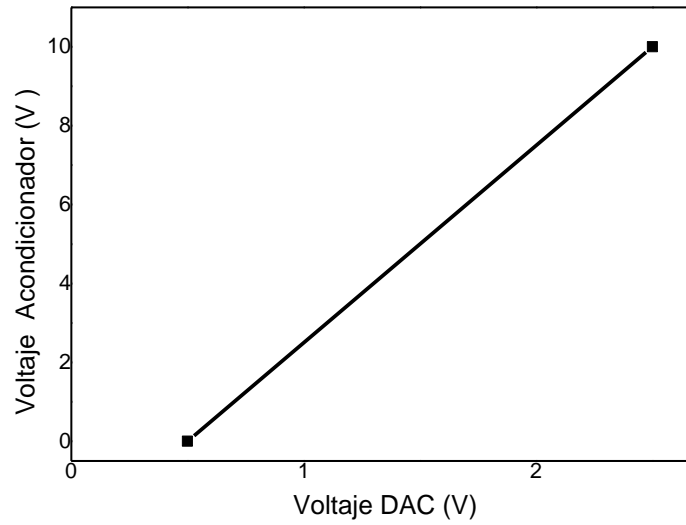


Figura 13.Relación lineal voltaje del DAC- voltaje acondicionado.

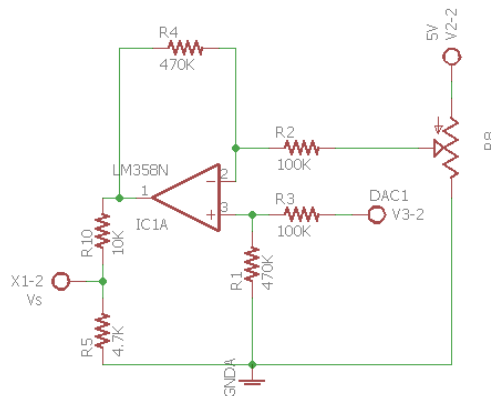


Figura 14.Circuito acondicionador de voltaje.

3.1.2.1 Fuente de alimentación 12 V.

El amplificador de voltaje, que se usa en el acondicionamiento de voltaje, es un integrado LM358, cuenta con dos amplificadores independientes, de ganancia alta, diseñados para operar con un solo suministro de energía. Sus características principales son: amplio rango de voltaje de alimentación de 3 a 32 V, suministro dual ± 1.5 V a ± 16 V, drenaje de corriente ($500 \mu\text{A}$) muy bajo, independiente del voltaje de alimentación. Voltaje de compensación de entrada bajo de 2 mV. Se crea la fuente de alimentación para este integrado. En la Figura 15 se muestra el diagrama de la fuente de voltaje. Se diseño para un voltaje constante de 12 V. Antes de proceder con la impresión del PCB se realizaron pruebas en el protoboard como se muestra en la Figura 16. Esto con la finalidad de no cometer errores y evitar fallas en el circuito. Una vez que el circuito funciona en el protoboard se procede a la impresión, teniendo el circuito impreso se sueldan los componentes que integran el circuito, como se muestra en la Figura 17. Una vez soldado se mide el voltaje a la salida DC, de la fuente para comprobar que el circuito está en las condiciones requeridas para operar. En la Figura 18 se muestra que el voltaje de salida de la fuente es de 12 V. Para medir el voltaje se utilizó un multímetro digital Fluke.

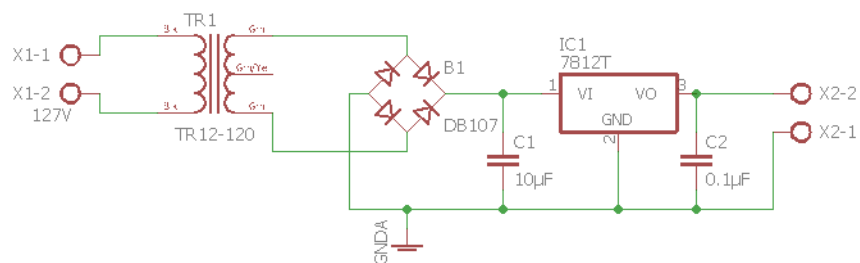


Figura 15. Diagrama de fuente de alimentación 12 V.

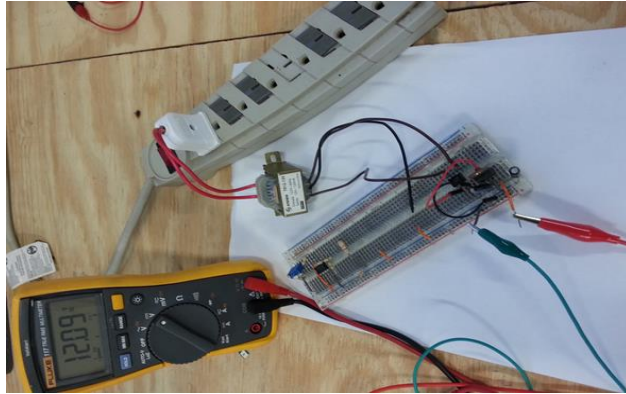
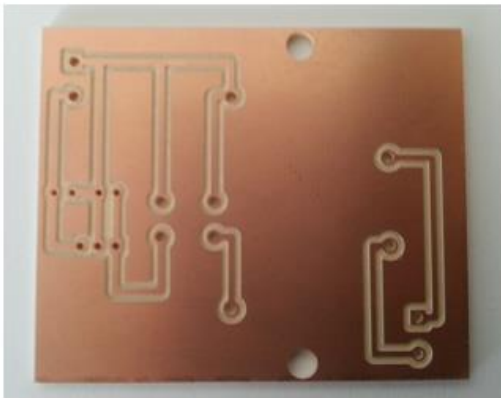


Figura 16. Prueba del circuito fuente de alimentación 12V.



a) Circuito impreso



b) Circuito soldado

Figura 17. Placa impresa y soldada fuente de 12 V.

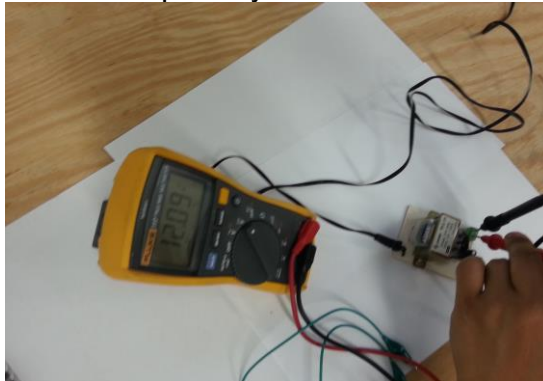


Figura 18. Voltaje de salida de la fuente de 12V.

3.2 Fuente de alto voltaje

Para la tercera etapa se cuenta con una fuente de voltaje (Modelo 152A CORONATROL). Es una fuente analógica. El rango de voltaje que maneja es de ± 500 a $\pm 10,000$ Voltios D.C. Rango de corriente 0 a $\pm 1000 \mu\text{A}$. Para su operación cuenta con un panel o control frontal, para su automatización cuenta con una interfaz. La fuente trae incluido un amplificador de voltaje, cuenta con una entrada inversora y no inversora. El voltaje de entrada es de (0-10) V como máximo. A la salida del amplificador entrega un voltaje constante a una ganancia fija 1000. En la Figura 19 se puede observar la fuente de alto voltaje. Esta fuente funciona de dos formas se puede aplicar voltaje manualmente, o automatizar la medición ya que cuenta con una interfaz que permite automatizar la medición.



Figura 19. Fuente de alto voltaje (Modelo 152A CORONATROL)

3.3 Sensor de sonido

Para el sensor de sonido, se diseña un circuito acondicionador de voltaje, utilizando un amplificador restador, el sensor consta de un micrófono, el cual es capaz de convertir ondas sonoras en señales eléctricas. Este micrófono se conecta al microcontrolador Arduino DUE, para detectar el sonido que se produce cuando se genera un arco eléctrico en la prueba de rigidez. La salida producida por el micrófono es una señal eléctrica analógica que representa el sonido recibido. Sin embargo, esta señal es demasiado baja para ser medida y tiene que ser amplificada. En este caso lo que obtenemos en la salida del micrófono es una señal digital un 0 que es el valor más bajo o 1 que es el valor más alto. Debido a que solo queremos

detectar el sonido y no medirlo. En la Figura 20 se muestra el diagrama del acondicionador de voltaje para el sensor de sonido.

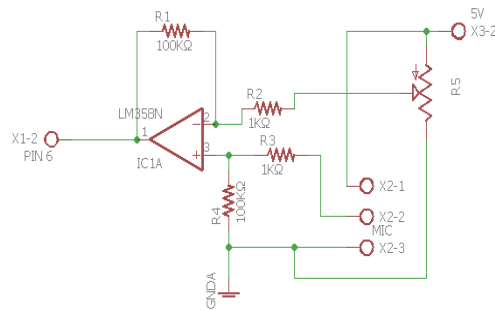


Figura 20. Diagrama acondicionador de voltaje del sensor de sonido.

3.4 Sensor de inducción

El objetivo principal del sensor de inducción es detectar una corriente y evitar que esa corriente entre al sistema. Se crea un sensor con un alambre delgado como se muestra en la Figura 7. Se hace una serie de pruebas para encontrar el diámetro y las vueltas del inductor. Como protección adicional, la salida del sensor de voltaje inducido se le coloca un amplificador operacional como seguidor de voltaje (ganancia unitaria) y sobre todo como limitador de voltaje, ya que la salida del operacional estará limitada a voltajes positivos y menores a su alimentación, que es de 5V. En la Figura 22 se muestra el circuito de inducción.

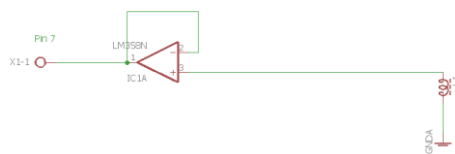


Figura 21. Diagrama seguidor de voltaje.

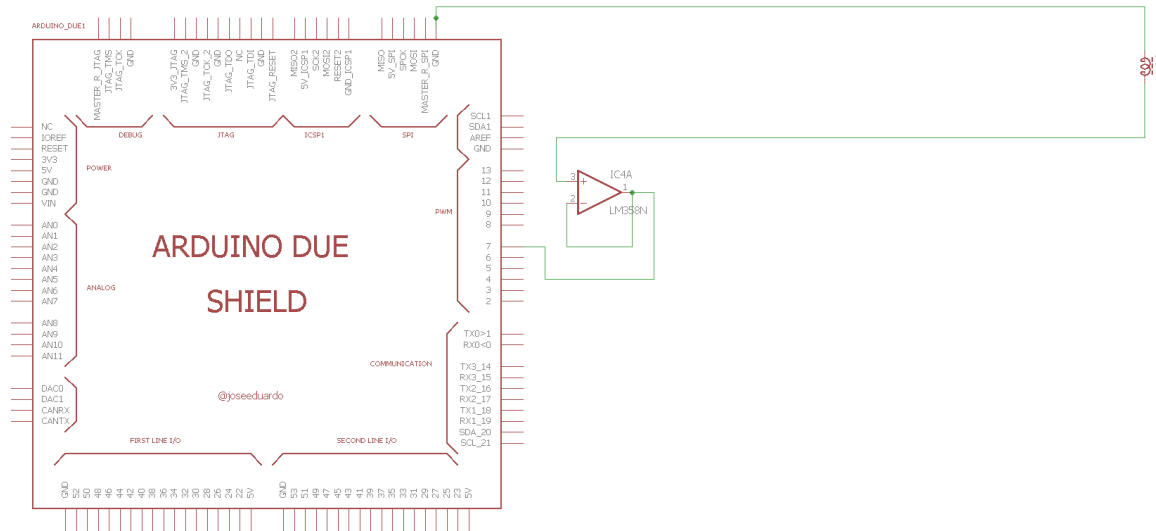


Figura 22. Circuito sensor de inducción.

3.5 Ajuste de rampa de voltaje

El ajuste de la rampa de voltaje se realizó considerando al incremento que establece la norma ASTM D877, se cambiaron los parámetros establecidos, debido a que se cuenta con una fuente de alto voltaje de (0-10000) V, se ajustó de tal manera que se cumpla la misma relación con la Norma, el incremento establecido es de 500 V/s. Para el acoplamiento de la rampa se usó el programa originPro 9. Para hacer el cálculo de la pendiente. Primero se realizan las mediciones con el código que ejecutar la medición. En el programa se declara una variable de nombre retardo la cual se encarga del incremento del voltaje. Esto se realiza solo con el voltaje del acondicionador que va de (0-10) V. En la Tabla 5 se muestra la relación lineal del tiempo y voltaje.

Tiempo (s)	Voltaje (mV)
0.05	315
1.44	1007
3.43	2016

Tabla 5. Incremento de

5.43	3007
7.43	4006
9.43	5004
11.42	6006
13.42	7001
15.42	8002
17.41	9001
18.99	9693

voltaje

En la Figura 23 se presenta la gráfica de la regresión lineal realizada con el software OriginPro9. Donde se observa que la pendiente es de 500 V/s. La fuente de voltaje cuenta con un amplificador capaz de amplifica 1000 veces el voltaje de entrada.

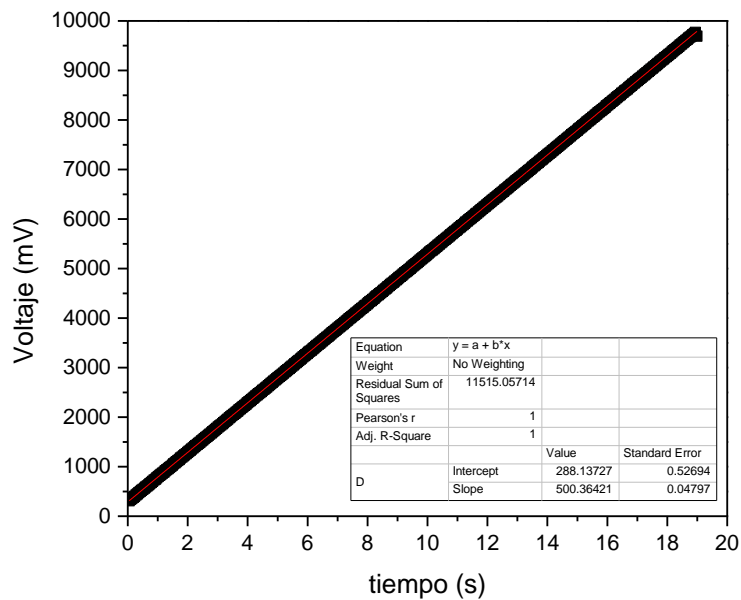


Figura 23. Calibración de la rampa de voltaje, Regresión lineal.

3.6 Diseño de cámara de medición

Debido a que en el instituto de energías renovables no se realizan este tipo de pruebas de caracterización eléctrica, se crea la cámara de medición, esta se diseñó en el software AutoCAD, una vez teniendo el diseño es elaborada en el taller del instituto. El material con que se construye es de acrílico, en Figura 25 se puede observar la cámara de medición ya terminada. Tiene una altura de 20 cm, ancho 16cm, largo 16cm, se hace de acrílico para poder observar al momento de generar la ruptura dieléctrica del aceite, en las caras laterales cuenta con 2 orificios de 0.5 cm, los orificios se hicieron para poder introducir el cable de alto voltaje que va de la fuente de alto voltaje hacia la cámara de medición.

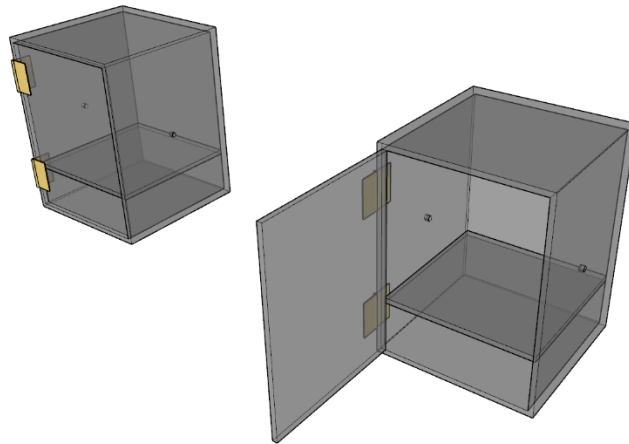


Figura 24. Diseño de cámara de medición software AutoCAD.



Figura 25. Cámara de medición.

3.6.1 Diseño de vaso de medición

El vaso o copa de medición donde se deposita la muestra de aceite a analizar, se diseñó con el software AutoCAD, el cual está hecho de tubo redondo de acrílico de diámetro de 2 pulgadas (50.8 mm), pared de 3mm, largo 8.5cm. Se considera el tamaño de los electrodos que van en el interior del vaso, una vez tomando las características se diseña y se manda a taller a cortar y pegar. Quedando como se muestra en la Figura 27.

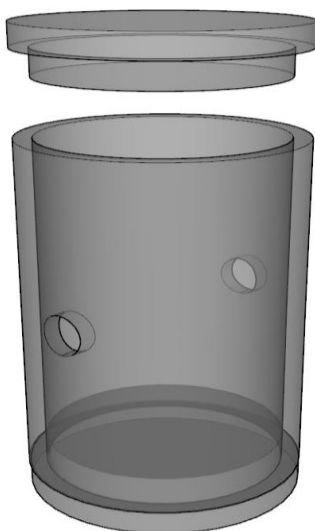


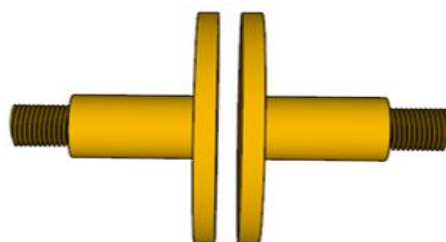
Figura 26. Diseño del Vaso de medición AutoCAD



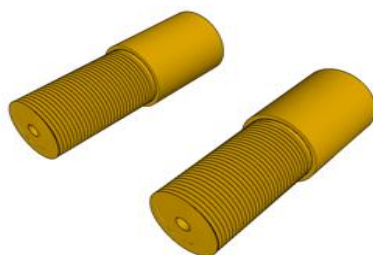
Figura 27.Vaso de medición.

3.6.2 Diseño de electrodos

El diseño de los electrodos se hizo de acuerdo con las medidas establecidas por la norma ASTM D887, que establece que sean de bronce, planos, diámetro de 1 pulgada, espesor de 3.18mm. están conformado por dos piezas. En la Figura 25 se muestra los electrodos y sus conectores. La Figura 29 se muestra el vaso de medición completo.



a) Electrodos planos



b) Contactos de los electrodos

Figura 28.Electrodos Norma ASTM-D887

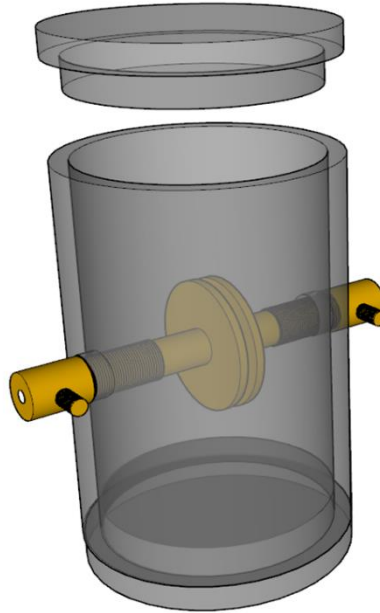


Figura 29.Copa de medición con electrodos.

3.7 Campo eléctrico

El campo eléctrico entre los electrodos es uniforme, para el cálculo del campo eléctrico se considera el voltaje al que se da el rompimiento dieléctrico y la separación de los electrodos, en esta prueba se usa una separación de 0.42 mm entre los electrodos. La ecuación 7 es para el cálculo teórico del campo eléctrico con las condiciones ya mencionadas. Cuando se tienen un voltaje máximo de 10 kV. El campo eléctrico de la rigidez dieléctrico del aceite analizado varía dependiendo de su ruptura.

$$E_{MAX} \frac{V}{d} \quad (7)$$

$$E_{MAX} \frac{10^4}{0.42 \times 10^{-3}} = 2.36 \times 10^7 \frac{V}{m} \quad (7.1)$$

3.8 Diseño del gabinete o carcasa en 3D.

El gabinete es de suma importancia en la instrumentación del sistema, ya que protege y da soporte mecánico, al circuito eléctrico. Dependiendo de la función de la placa de circuito. Se tomo en cuenta los requisitos que satisfacen a dicho gabinete. Los cuales cubren el circuito, proteger de agua o polvo, golpes, y soporte

para los conectores. Es importante tomar en cuenta todos los componentes que están en el circuito cuidado minuciosamente cada detalle. El gabinete se diseñó en dos piezas base y tapa. El material el cual está hecho el gabinete es de PLA (ácido poliláctico). En la Figura 30, se muestra el gabinete diseñado en software AutoCAD. En él se introduce el circuito de control. En cuanto se tiene el diseño se manda imprimir. En una impresora en 3D. Esta impresora se encuentra dentro de las instalaciones del Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM).

El circuito de control se introduce en el gabinete, junto con todos los componentes que conforman el sistema de medición.

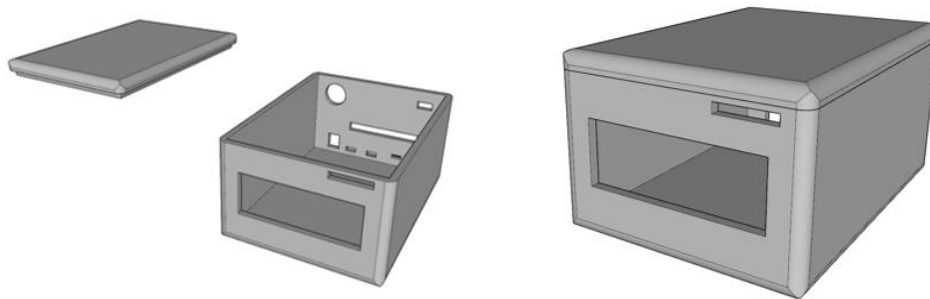


Figura 30. Gabinete del circuito de control.

3.9 Desarrollo de código

Para realizar las operaciones de conversión de datos con el convertidor Digital a Analógico, se usa Arduino como plataforma programable. El microcontrolador realiza la función de convertir la señal digital a una señal analógica. A su vez también se encarga de iniciar el sistema y realizar la medición. Otra parte fundamental del sistema de control es el procesamiento de los datos y el manejo de todas las variables a medir. Se toma en cuenta las variables a medir, de esta forma se procede para hacer el código de control. En el código se censó la temperatura y humedad dentro de la cámara de medición. También se encarga de adquirir los datos. Se programa para detectar la activación del sensor de sonido y el sensor de inducción.

```

// declarar librerías
#include <LiquidCrystal_I2C.h> //libreria de lcd I2C
#include <DHT.h> //libreria del sensor DHT2
#include <SPI.h> //LIBRERIA DEL SD
#include <SD.h> //LIBRERIA DE SD
//
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2); // set the LCD address to 0x27 for a 16 chars and 2 line display
//
// declarar constantes y variables globales
byte temperatura,humedad;
const word periodo=1;
File miArch; // variable que maneja archivo en SD
const byte sd=4; //pin de datos sd
const char nombre[30]="datRa1.dat"; //Nombre del archivo
const float Vdd=3293.0; // voltaje del arduino en mV
const float cte=Vdd/4095.0; // cuentas depende de la resolucio del arduino
const float Vd=3.12;//constante del divisor de voltaje
int s;// se usa en la función medir
word i=0; // se usa en la sd
//int c;//
boolean a; // boton arranque pin 3
//float x,v;
//word i=0;
int mVin;
int mVout;
int Vf,n;
int mVI;// mVin= voltaje que entra a la fuente, mVout=voltaje que sale de la fuente
volatile boolean corto_induccion,corto_sonido;
int induccion=7;//declara pin7 digita
int sonido=6;// declara pin6 digita
boolean corto;
unsigned long t0;
float tiempo;

```

```

void setup() {
  Serial.begin(250000);//
  analogWriteResolution(12); //resolución para escribir
  analogReadResolution(12);
  pinMode (3,INPUT);// pin 3 entrada digital para comenzar

  pinMode (induccion,INPUT);
  pinMode (sonido,INPUT);

  attachInterrupt(induccion,interruptcion1,CHANGE);
  attachInterrupt(sonido,interruptcion2,CHANGE);

  lcd.init();// iniciar lcd
  //lcd.init();
  lcd.backlight();

  if (!SD.begin(sd)){ //decta si la memoria tiene un problema
    Serial.println(" Error en la tarjeta SD !"); //imprime en el monitor que hay un error en la sD
    return;
  }

  miArch = SD.open(nombre, FILE_WRITE); // si se abre el archivo, se escribe en el
  miArch.println(nombre);
  Serial.println( );
  Serial.println( );
  Serial.println( );
}

void loop() {
  i++;
  Serial.print(i); Serial.print(" ");
  miArch.print(i); miArch.print(" ");
  corto_induccion=false;// aun no a sucedido

```

```

corto_sonido=false; // aun no a sucedido
enviar1_lcd();// se envía mensaje a lcd para que se presione boton cuando se desee arrancar
a=digitalRead(3);
do
{
    a=digitalRead(3);
}
while (a); // el programa se quedará aquí hasta que se presione el botón azul
enviar2_lcd(); // envia a lcd mensaje midiendo
medir_dht22(14);//mide temperatura y humedad
n=0; // n=numero de cuentas con el que incremento el voltaje DAC
t0=millis();
word j=0;
do {
    analogWrite(DAC1,n);//envia voltaje del DAC1, n igual a cuentas
    delayMicroseconds(2950);//retardo en microsegundos
    n++ ;

    mVin= medir(0,7); //se promedia 2 a la 7 =128 mediciones, monitorea el voltaje de entrada de la
fuente de alto voltaje

    mVout= medir(1,7); //monitorea el voltaje de salida de la fuente de alto voltaje
    tiempo=(millis()-t0)/1000.0;//tiempo de la medicion en segundos
    Vf=(mVin*Vd);
    if (n%10 == 0)
    {
        enviar_pc();
    }
    corto=corto_induccion||corto_sonido;
} while ((!corto)&&(n<4095));
analogWrite(DAC1,0);

enviar3_lcd(); // envia voltaje de rompimiento se envían resultados: Vap donde se detuvo, sensor,
prueba finalizada

enviar4_lcd();// envia temperatur y humedad a la lcd
enviar_sd();
delay (10000);

```

```

}
void enviar1_lcd() // se envia mensaje para precionar boton de inicio
{
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0); // a la izq y abajo
  lcd.print(" presiona boton");
  lcd.setCursor(0,1); // a la izq y abajo
  lcd.print(" para comenzar");
}
void enviar2_lcd()
{
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(2,1);
  lcd.print(" Midiendo ");
  delay (3500);
}
void enviar3_lcd()
{
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0); // coloca cursor arriba a izq
  lcd.print(" V Rompimiento ");
  lcd.setCursor(0, 1); // a la izq y abajo
  lcd.print( Vf );
  lcd.print(" V ");//en V
  delay (10000);
}
void enviar4_lcd()
{
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0); // coloca cursor arriba a izq
  lcd.print(" T(C) y H% ");
  lcd.setCursor(0,1); // a la izq y abajo
  lcd.print(temperatura);
}

```

```

lcd.setCursor(12,1); // en medio y abajo el curso
lcd.print(humedad);
}

void enviar_pc() // se envia n cuentas, voltajes a la PC.
{
  Serial.print(n); Serial.print(" ");
  Serial.print(tiempo); Serial.print(" ");
  Serial.print(mVin); Serial.print(" ");
  Serial.print(mVout); Serial.print(" ");
  Serial.println(Vf); // Serial.print(" ");
  //Serial.print(humedad); Serial.println(" ");
  //Serial.println(temperatura);
  //Serial.print(" "); Serial.println(mVI); // imprime n cuentas, imprime mVin, mVout.
}

void enviar_sd()
{
  miArch.print("tiempo (s)"); miArch.print(" ");
  miArch.print(tiempo); miArch.print(" "); // guarda en sd la informacion para este canal
  miArch.print("mVout (V)"); miArch.print(" ");
  miArch.print(mVout); miArch.print(" ");
  miArch.print("Vf (V)"); miArch.print(" ");
  miArch.print(Vf); miArch.print(" ");
  miArch.print("temperatura (°C)"); miArch.print(" ");
  miArch.print(temperatura); miArch.print(" ");
  miArch.print("humedad (%)"); miArch.print(" ");
  miArch.print(humedad); miArch.print(" ");
  miArch.close();
  miArch = SD.open(nombre, FILE_WRITE);
}

void interrupcion1()
{
  corto_induccion = true;
}

```

```

void interrupcion2()
{
    corto_sonido= true;
}

void medir_dht22( byte p)
{
    DHT dht(p, DHT22);
    dht.begin();
    humedad = dht.readHumidity();
    temperatura = dht.readTemperature();
    if (isnan(humedad) || isnan(temperatura) ) {
        humedad=199; temperatura=199;
        return;
    }
}

word medir(word canal, word orden) // mide 2 a la orden veces y promedia
{
    // calcula el voltaje en mV de canal
    word n= 1 << orden; // n es el numero
    unsigned long s=0;
    word k;
    for (k=0;k<n;k++)
        s=s+analogRead(canal);
    s=s >> orden;
    s=s*cte+0.5;
    return s;
}

```


CAPITULO 4. Pruebas y resultados

En este capítulo se presentan los resultados y pruebas realizadas al sistema de medición, se realizan también pruebas de ruptura del aire y con una muestra de aceite vegetal. Se mide también temperatura y humedad dentro de la cámara de medición. Esta prueba se realiza en el Instituto de Energías Renovables- UNAM (IER-UNAM) campus Temixco Mor. Se muestran dos pruebas una de la ruptura dieléctrica del aire y una prueba con aceite vegetal de *Jatropha Curca* blanqueado con arcilla.

En la Figura 31 se muestra el sistema de medición desarrollado, donde se puede ver el sistema de control donde se encuentra el microcontrolador y el acondicionador de voltaje, la fuente de alto voltaje, y la cámara de medición.

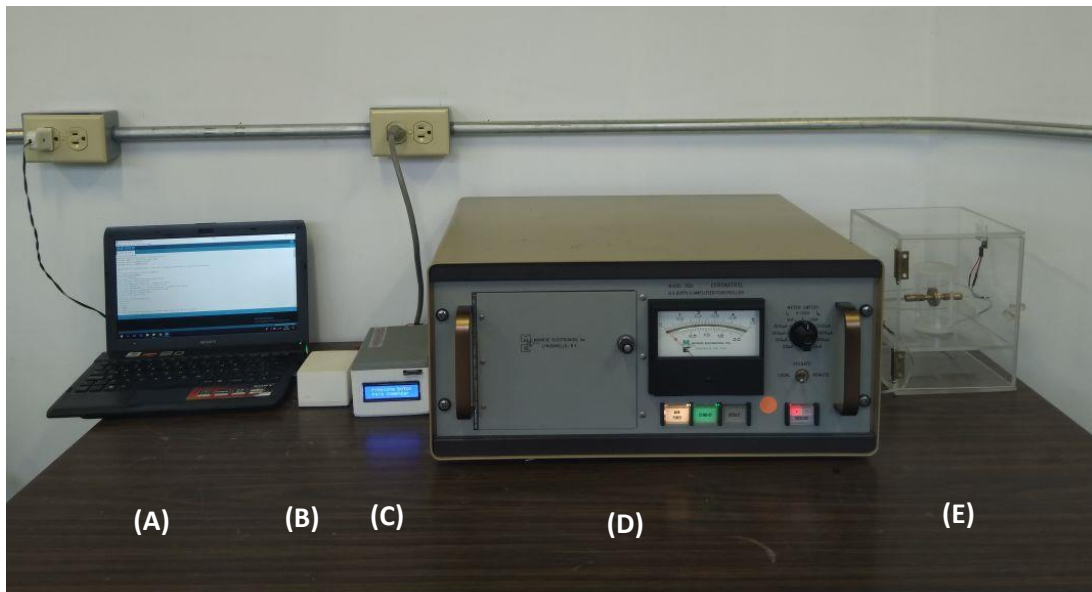


Figura 31. Sistema de medición completo. A) PC. B) Fuente de 12 V. C) Circuito de control. D) Fuente de alto voltaje. E) cámara de medición.

4.1 Detector de rompimiento dieléctrico voltaje inducido

Los experimentos de Michael Faraday en Inglaterra en 1831 y los efectuados de forma independiente por Joseph Henry en Estados Unidos ese mismo año, mostraron que es posible inducir una fem en un circuito utilizando un campo magnético variable. Una fem (y, por tanto, también una corriente) puede ser inducida en diferentes procesos que involucran un cambio de flujo magnético en el tiempo.

Durante las pruebas de rompimiento dieléctrico, al iniciar éste, la corriente pasa de un valor muy bajo (micro o nano amper) a miliampers en intervalos de tiempo muy cortos. Este proceso produce un cambio muy alto en el flujo magnético, lo cual producirá voltajes inducidos en otros circuitos que estén cerca del circuito de alto voltaje. Estos voltajes pueden ser suficientemente grandes como para dañar la tarjeta Arduino DUE, si ésta se coloca cerca del circuito de alto voltaje. Sin embargo, estos voltajes también ayudan a detectar el instante en que sucede el rompimiento dieléctrico y así, determinar el voltaje asociado. Para esto, se utilizó una bobina de 5 cm. de diámetro y 3 vueltas de alambre de cobre. Se buscó una posición en la que el voltaje inducido sea de alrededor de 3.3V, que es el máximo voltaje que puede leer el Arduino DUE sin que se dañe.

La Figura 33 muestra el voltaje inducido en la bobina al iniciar un rompimiento dieléctrico. Como puede verse, el nivel de voltaje si es adecuado, pero la señal es alterna y podría dañar la tarjeta Arduino DUE. Para corregir esto, se utilizó un amplificador operacional como seguidor de voltaje, de esta manera, los voltajes no podrán ser mayores a los voltajes de alimentación del propio amplificador operacional, que son 0 y 3.3 Volt. La Figura 34 muestra la salida del amplificador operacional cuando sucede un rompimiento dieléctrico. Puede verse que aún da una señal negativa, sin embargo, es de poca magnitud y por poco tiempo, lo cual no daña a la tarjeta Arduino DUE. Esta señal, digital, es detectada por una rutina de interrupciones en el Arduino UNO, deteniendo la rampa de voltaje, y estableciendo es último voltaje, como el voltaje de rompimiento dieléctricos. La Tabla 6 muestra los voltajes máximos de 5 mediciones. Todos cumplen como señal de detección, ya que un 0 lógico es un voltaje de 0 a 0.8 V, y un 1 lógico es un voltaje de 1.8 a 3.3 V.

Durante la generación de un arco eléctrico en el aire se produce un voltaje inducido el cual al monitorearlo con un microcontrolador llega a quemarlo, el microcontrolador que se usa es el Arduino DUE, este microcontrolador trabaja con voltajes entre (0,3.3) V, el voltaje inducido al generar el arco eléctrico es mayor a un rango de ± 20 V esto se pudo observar al usar un osciloscopio , para poder reducir el voltaje inducido mientras se produce un arco eléctrico entre dos placas paralelas a las cuales se le aplica un diferencial de voltaje. Se caracteriza un sensor en este caso se usa un alambre conductor. A este alambre se le da forma de solenoide o bobina.

Un Osciloscopio es un instrumento de visualización electrónico para la representación gráfica de señales eléctricas que pueden variar en el tiempo. Presenta los valores de las señales eléctricas en forma de coordenadas en una pantalla, en la que normalmente el eje de las X (horizontal) representa tiempo y el eje de Y (vertical) representa tensiones.

Equipo utilizado para caracterizar una bobina

- 1- PC Osciloscope, picoScope 2202.
- 2- PC.
- 3- Fuente de alto voltaje (Model I52A).
- 4- Cámara de medición.
- 5- Electrodo planos.
- 6- Sensor (alambre conductor).
- 7- Alambre conductor de 1hilos.



Figura 32. Configuración prueba de sensor de inducción

Prueba en el vacío, Sensor 3 Vueltas un hilo, Diámetro 6.3 cm, separación de los electrodos 0.423mm, se cuenta con una fuente de alto voltaje de (0-10) kV. La separación de los electrodos es de 0.423mm. Valores utilizados en el osciloscopio rango a medir ± 5 V, tiempo $2\mu s$, disparo individual. El sensor se coloca al lateral izquierdo de la cámara de medición justo abajo del cable de alta tensión.

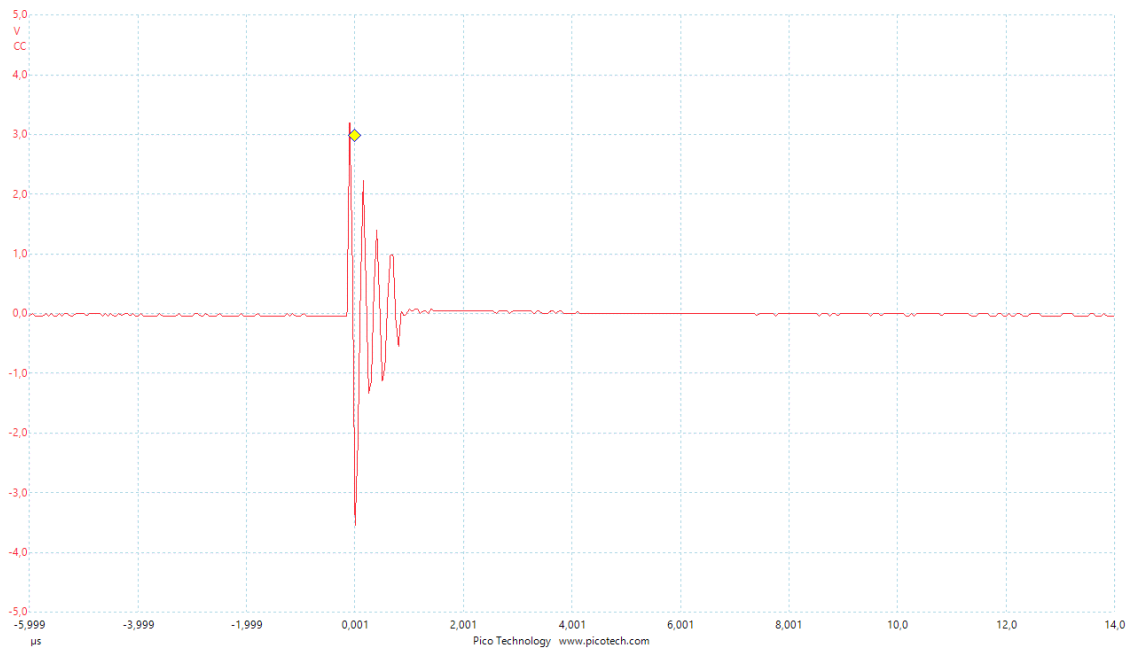


Figura 33. Voltaje inducido en la bobina.

Tabla 6. Valores máximos de la primera onda en las mediciones.

Mediciones	Voltaje máximo inducido Sensor 3 Vueltas	Voltaje inducido Sensor 3 Vueltas, repetitividad
1	4.448 V	4.920 V
2	4.723 V	4.765 V
3	4.073 V	4.296 V
4	3.912 V	4.453 V
5	3.671 V	5.468 V

Los valores son constantes el promedio del voltaje es 4.16 V. Al repetir la medición el voltaje aumenta, el promedio de los voltajes es 4.7 V.

Como se muestra en los resultados, se genera ruido en la medición, para reducir o desaparecer el ruido se crea un circuito seguidor de voltaje.

Seguidor de voltaje

Es aquel circuito que proporciona a la salida la misma tensión que a la entrada. Presenta la ventaja de que la impedancia de entrada es elevada, la de salida prácticamente nula, y es útil como un , para eliminar o para adaptar impedancias (conectar un dispositivo con gran impedancia a otro con baja impedancia y viceversa) y realizar mediciones de tensión de un sensor con una intensidad muy pequeña que no afecte sensiblemente a la medición.

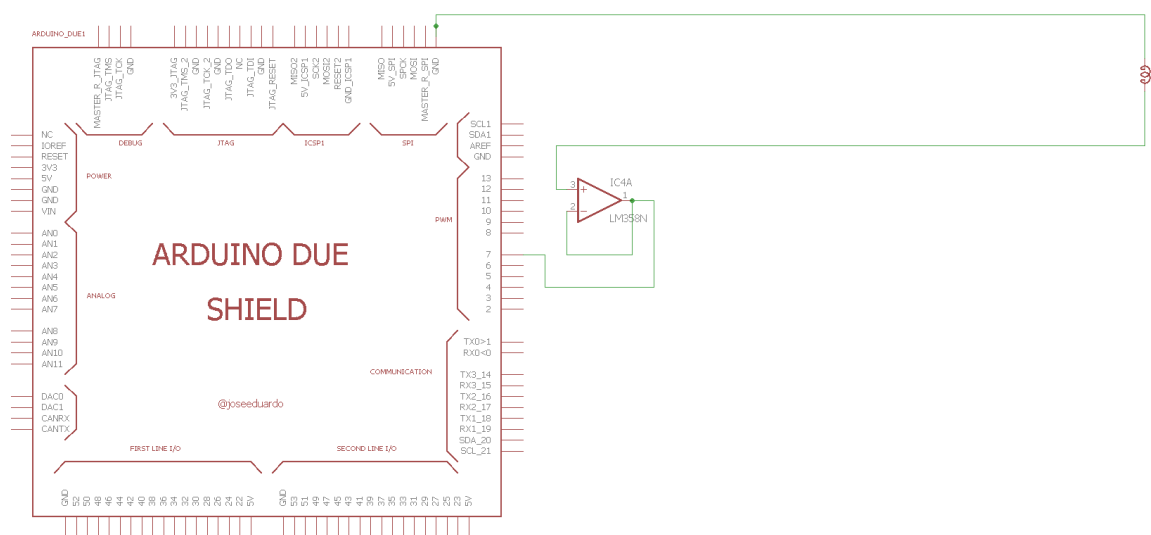


Figura 34. Diagrama del sensor de inducción.

Al tener calibrado el sensor, se envía la interfaz a un seguidor de tensión, para eliminar el ruido generado.

Para la prueba con el seguidor de voltaje, se soldó un cable plano, para la interfaz hacia el seguidor de voltaje, el diámetro es de 6.3 cm, la separación de los electrodos es 0.42 mm, se cuenta con una fuente de alto voltaje de (0-10) kV. Valores utilizados en el osciloscopio rango a medir ± 5 V, tiempo $2\mu s$, disparo individual.

Los resultados obtenidos de la prueba de seguidor se presentan a continuación como se puede observar en las Figuras siguientes.

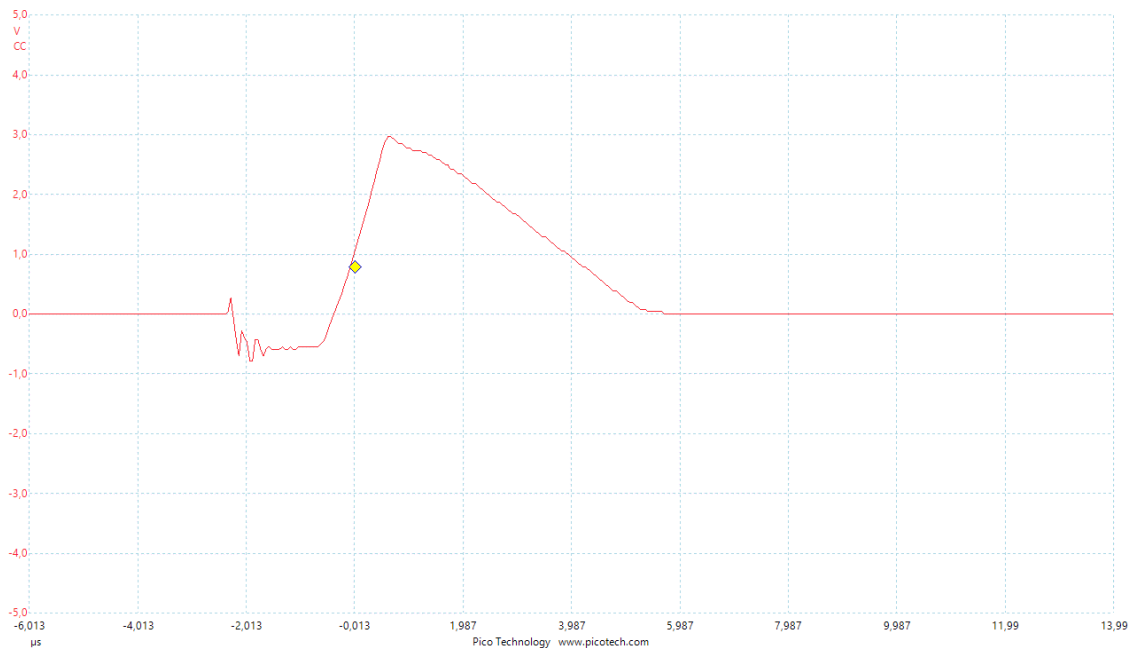


Figura 35. Medición, sensor 3 Vueltas, separación de electrodos 0.423mm, cable de interfaz soldado al sensor.

Tabla 7. Valores máximos de salida del amplificador operacional durante un rompimiento dieléctrico de la primera onda en las mediciones

Mediciones	Voltaje inducido
1	2.969 V
2	2.655 V
3	2.930 V
4	2.930 V
5	2.812 V

4.2 Ruptura dieléctrica

La ruptura dieléctrica es la propiedad más importante del aceite aislante, ya que define la capacidad del fluido para soportar el estrés eléctrico. La prueba de ruptura dieléctrica es una manera relativamente rápida y simple de determinar la cantidad de contaminantes, en un aceite aislante. Usualmente el contaminante es agua, pero también pueden ser partículas conductoras, suciedad, residuos, subproductos de la oxidación y el envejecimiento del aceite.

4.2.1 Ruptura dieléctrica del aire

La ruptura o rigidez dieléctrica del aire es el valor límite de la intensidad de campo eléctrico en el cual un material pierde su propiedad de aislante y pasa a ser conductor. También se puede definir como el voltaje máximo que puede soportar un aislante sin generarse un arco eléctrico.

Se realizaron pruebas de ruptura del aire, con el fin de comprobar que el sistema estuviera funcionando correctamente y que se genere la ruptura, una vez comprobando que se genera el arco eléctrico, se procede hacer la prueba de ruptura en una muestra de aceite vegetal. Los resultados obtenidos de la ruptura del aire son los siguientes, se genera la ruptura dieléctrica del aire como se puede ver en la Tabla 8, se puede observar que la ruptura de voltaje del aire es alrededor de 1.97 V. El rompimiento del aire es de 0.4 a 3 kV/mm dependiendo de la presión. Se realiza la prueba a temperatura ambiente 25°C a una humedad del 50%.

Tabla 8. Resultados de ruptura del aire

No. Medición	Ruptura dieléctrica (V)	Temperatura ambiente (°C)	Humedad (%)
1	2.02	25	50
2	1.96	25	50
3	1.96	25	50
4	1.96	25	50

En la Figura 36 se muestra la medición de la rampa de voltaje hasta que llega el rompimiento dieléctrico del aire.

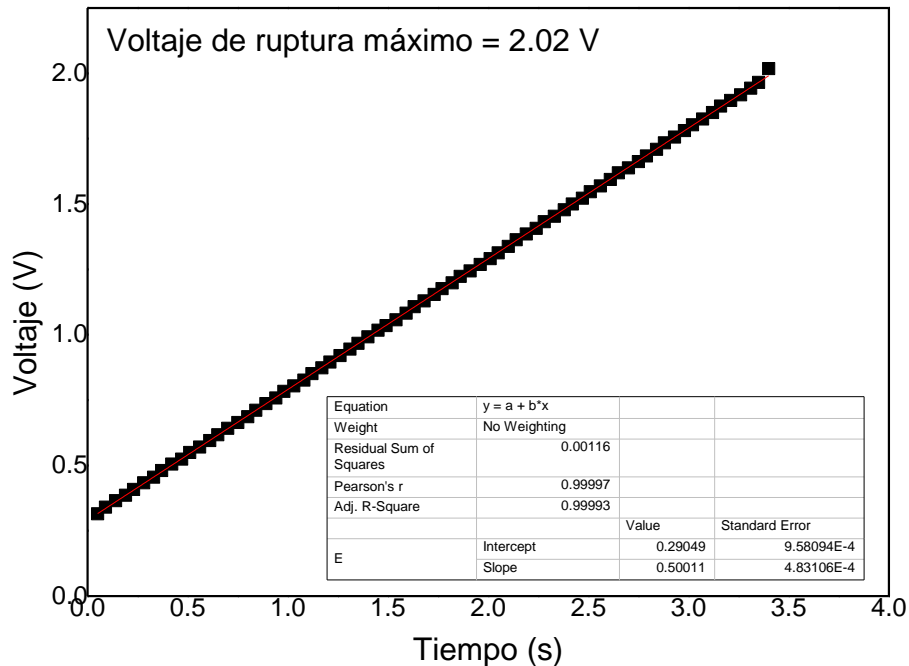


Figura 36. Rompimiento dieléctrico en aire

4.2.2 Ruptura dieléctrica de aceite

La muestra analizada es aceite de *Jatropha curca* blanqueado con arcilla, este aceite se sometió a un tratamiento de blanqueado para quitar el color, fue obtenido por el estudiante en Doctorado Fidel Alejandro Aguilar, estudiante del Instituto de Energías Renovables campus UNAM (IER-UNAM). Para la prueba se utiliza una fuente de alto voltaje modelo I52A CORONALTRO rango de voltaje 0-10 kV. Se utiliza un vaso, donde se deposita la muestra, a este vaso se le adaptaron los electrodos de disco plano, como se muestra en la Figura 29, se deposita la muestra de manera que cubra los electrodos por lo menos 20 mm sobre el electrodo superior, se conecta el alto voltaje. La medición se realiza automáticamente. La cámara de medición cuenta con un sensor de temperatura y humedad DHT22, un micrófono para detectar el sonido que se produce al generarse el corto. El suministro de CA de alto voltaje se incrementa lentamente a una velocidad de 500V/s hasta que se produce el arco. La separación de los electrodos es de 0.42 mm. Antes de depositar

el aceite se hacen pruebas de ruptura del aire solo con el vaso y los electrodos con el fin de a asegurar que si se presenta la ruptura dieléctrica. En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos del rompimiento dieléctrico del aceite de jatropha. La Figura 37, se ve a que rompimiento llego.

Tabla 9. Voltaje de Ruptura dieléctrica

No. Medición	Ruptura dieléctrica (V)	Temperatura ambiente (°C)	Humedad (%)
1	3.260	26	53
2	3.608	26	53
3	2.776	26	54
4	2.452	26	53

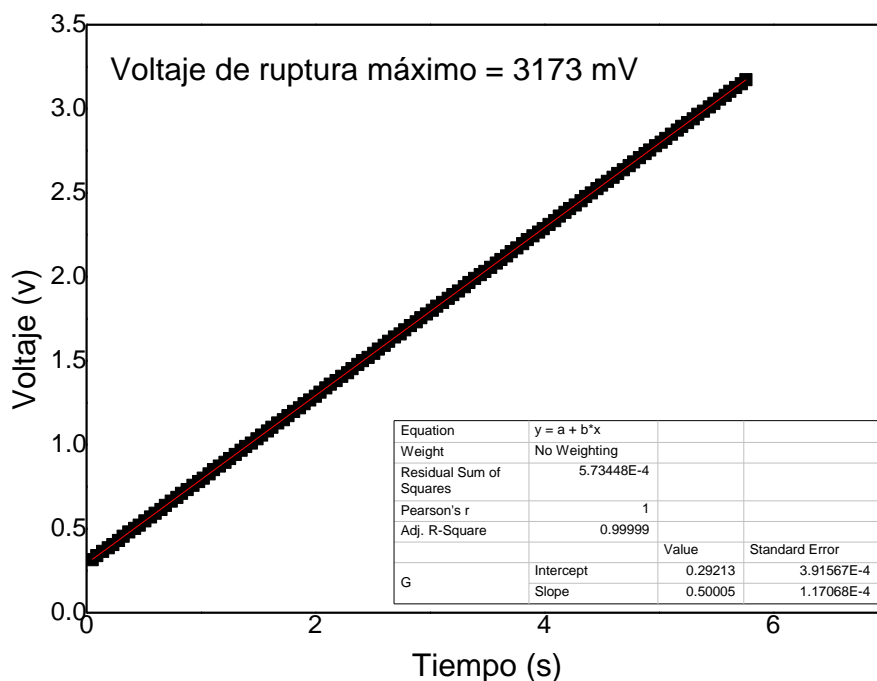


Figura 37. Prueba del rompimiento dieléctrico del aceite de Jatropha.

Conclusiones

Se diseñó, desarrolló y se caracterizó un sistema para la medición del rompimiento dieléctrico de aceites de acuerdo con la norma ASTM D-877.

Los voltajes inducidos por el circuito de alto voltaje utilizado para el rompimiento dieléctrico son dañinos y útiles. Si se coloca la tarjeta del Arduino DUE muy cerca de este circuito la puede dañar, pero si se hace una bobina y se coloca en un lugar estratégico, el voltaje inducido es el que define la finalización de la medición.

El sistema fue desarrollado empleando una plataforma tecnológica abierta, utilizando una tarjeta Arduino DUE, la cual cuenta con un convertidor analógico a digital (DAC) y suficientes entradas y salidas analógicas y digitales que hicieron que, con ésta, un circuito de acondicionamiento, sensores y una fuente de alto voltaje, se llevara a buen término la medición del rompimiento dieléctrico.

El sistema es fácilmente adaptable para ser utilizado por otras fuentes de alto voltaje o para ser utilizado con otras normas.

Referencias

- [1] I. Fofana, V. Wasserberg, H. Borsi, and E. Gockenbach, "Challenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformers. II. Investigations of mixed liquid impregnated paper insulation," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 18, no. 4, pp. 5–16, Jul. 2002.
- [2] S. Chandrasekar and G. C. Montanari, "Analysis of partial discharge characteristics of natural esters as dielectric fluid for electric power apparatus applications," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 21, no. 3, pp. 1251–1259, 2014.
- [3] M. Martins, "Vegetable oils, an alternative to mineral oil for power transformers- experimental study of paper aging in vegetable oil versus mineral oil," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 26, no. 6, pp. 7–13, 2010.
- [4] "Ingeniería de Máquinas y Sistemas Eléctricos: Breve historia de los aceites como fluidos dieléctricos." [Online]. Available: <http://imseingenieria.blogspot.mx/2016/04/breve-historia-de-los-aceites-como.html>. [Accessed: 02-May-2018].
- [5] E. Gockenbach and H. Borsi, "Natural and synthetic ester liquids as alternative to mineral oil for power transformers," *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, pp. 521–524, 2008.
- [6] H. Borsi and E. Gockenbach, "Properties of ester liquid midel 7131 as an alternative liquid to mineral oil for transformers," *IEEE Int. Conf. Dielectr. Liq. 2005. ICDL 2005.*, pp. 371–374.
- [7] S. Krawiec, "Review of recent changes to mineral insulating oil specifications," *2009 IEEE Electr. Insul. Conf. EIC 2009*, no. June, pp. 363–367, 2009.
- [8] I. Fofana, V. Wasserberg, H. Borsi, and E. Gockenbach, "Challenge of mixed insulating liquids for use in high-voltage transformers.1. Investigation of mixed liquids," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 18, no. 3, pp. 18–31, 2002.
- [9] R. Liu, C. Törnkvist, V. Chandramouli, O. Girlanda, and L. A. A. Pettersson, "Ester fluids as alternative for mineral oil: The difference in streamer velocity and LI breakdown voltage," *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, pp. 543–548, 2009.
- [10] T. V. Oommen, C. C. Claiborne, and E. J. Walsh, "Introduction of a new fully biodegradable dielectric fluid," *1998 IEEE Annu. Text. Fiber Film Ind. Tech. Conf. (Cat. No.98CH36246)*, p. 3/1-3/4, 1998.
- [11] K. Dumke, H. Borsi, and E. Gockenbach, "Fundamental investigations on the influence of temperature and water content on the electrical behavior of fluid impregnated insulating papers," *Conf. Rec. 1996 IEEE Int. Symp. Electr. Insul.*, vol. 2, pp. 542–545, 1996.
- [12] T. V. Oommen, "Vegetable oils for liquid-filled transformers," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 18, no. 1, pp. 6–11, 2002.
- [13] O. K. . Abeyundara D.C , Weerekoon C. , Lucas J.R. Gunantunga K.A.I, "Coconut Oil As an Alternative To," *ERU Symp.*, no. January 2001, 2001.
- [14] H. Borsi, "Dielectric Behavior of Silicone and Ester Fluids for Use in Distribution Transformers," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 26, no. 4, pp. 755–762, 1991.

- [15] C. P. McShane, "New safety dielectric coolants for distribution and power transformers," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 6, no. 3, pp. 24–32, 2000.
- [16] H. Kuwahara, K. Tsuruta, H. Munemura, T. Ishii, and H. Shiomi, "Partial Discharge Characteristics of Silicone Liquids," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-11, no. 3, pp. 86–91, 1976.
- [17] C. P. McShane, G. a. Gauger, and J. Luksich, "Fire resistant natural ester dielectric fluid and novel insulation system for its use," *1999 IEEE Transm. Distrib. Conf. (Cat. No. 99CH36333)*, pp. 890–894 vol.2, 1999.
- [18] J. Luksich, "Evaluating New and In-Service Vegetable Oil Dielectric Fluids," pp. 1–7.
- [19] A. Ori-Jesu and M. Ori-jesu, "Biodegradation of mineral oils – A review," *African J. Biotechnol.*, vol. 8, no. 6, pp. 915–920, 2009.
- [20] Nynas, "Manual de aceites de transformador," 2000.
- [21] Megger, "La guía de Megger sobre las pruebas de ruptura dieléctrica de aceites de aislamiento," 2011.
- [22] R. Eberhardt, H. M. Muhr, W. Lick, B. Wieser, R. Schwarz, and G. Pukel, "Partial discharge behaviour of an alternative insulating liquid compared to mineral oil," *Proc. 2010 IEEE Int. Power Modul. High Volt. Conf. IPMHVC 2010*, pp. 426–429, 2010.
- [23] T. O. Rouse, "Mineral insulating oil in transformers," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 14, no. 3, pp. 6–16, 1998.
- [24] brettis, "Aceites Para Transformadores," p. Modulo 8, 2013.
- [25] E. Insulation, D. Phenomena, R. Eberhardt, H. M. Muhr, W. Lick, and S. Transformers, "Comparison of alternative insulating," *Technology*, pp. 2008–2010, 2008.
- [26] I. Fernández, A. Ortiz, F. Delgado, C. Renedo, and S. Pérez, "Comparative evaluation of alternative fluids for power transformers," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 98, pp. 58–69, 2013.
- [27] L. T. Insu-, "These new liquids possess such properties as LOWER FIRE AND ENVIRONMENTAL RISKS while IMPROVING PAPER-INSULATION LIFE.," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 8, no. 3, pp. 34–41, 2002.
- [28] ABB Inc, "Biotemp ®," *Musselman Group, Roanoke, VA*.
- [29] Vishal, Saurabh, Vikas, and Prashant, "Transformer 's History and its Insulating Oil," in *Proceedings of the 5th national conference; INDIACom-2011*, 2011, no. Computing For Nation Development, March 10-11 2011, pp. 5–8.
- [30] N. Electric, "Boletín B900-00092S," vol. 2007, 2007.
- [31] B. Gran, "Schneider electric."
- [32] J. Ignacio, "Convertidores Análogo-Digital y Digital-Análogo : Conceptos Básicos," pp. 1–7.
- [33] I. A. Matlab, "Procesamiento Digital de Señales Procesamiento Digital de Señales," pp. 1–21, 2016.

- [34] A. T. Pulido, *Open Smart Cities: Tecnologías de fuentes para ciudades inteligentes*. 2013.
- [35] Reymond A. Serway, *Electricidad y magnetismo*, Tercera Ed. .
- [36] J. Mayné, “Sensores Acondicionadores y Procesadores de señal.”
- [37] SISCODE and SISCODE, *sensores Perú*. <http://siscode.com/>, 2015.
- [38] R. Ltda, “Sensor de Temperatura y Humedad – DHT22,” vol. 22, pp. 1–5.

Es tiempo de comenzar un nuevo camino.