

# Rigidez Dieléctrica del Aceite de Transformador: Un Enfoque de Prueba de Bajo Costo Utilizando Arduino UNO

Calva Solís Cynthia Brithney  
*Departamento de Ingeniería Eléctrica y  
Electrónica*  
*Tecnológico Nacional de México,  
Campus Pachuca,  
Pachuca Hidalgo*  
[119200689@pachuca.tecnm.mx](mailto:119200689@pachuca.tecnm.mx)

Espejel Rivera María Angélica  
*Departamento de Ingeniería Eléctrica y  
Electrónica*  
*Tecnológico Nacional De México,  
Campus Pachuca,  
Pachuca, Hidalgo*  
[electricayelectronica@pachuca.tecnm.  
mx](mailto:electricayelectronica@pachuca.tecnm.mx)

Ordaz Oliver Mario Oscar  
*Departamento de Ingeniería Eléctrica y  
Electrónica*  
*Tecnológico Nacional De México,  
Campus Pachuca,  
Pachuca Hidalgo*  
[mario.oo@pachuca.tecnm.mx](mailto:mario.oo@pachuca.tecnm.mx)

Montiel Hernández Justo Fabián  
*Escuela Superior Ciudad Sahagún  
Universidad Autónoma del Estado de  
Hidalgo*  
Cd. Sahagún, México  
[justo\\_montiel@uaeh.edu.mx](mailto:justo_montiel@uaeh.edu.mx)

Gutiérrez Moreno Evelin  
*Ingeniería Mecatrónica*  
*Universidad Politécnica de Pachuca,  
Pachuca Hidalgo*  
[evgutierrez@upp.edu.mx](mailto:evgutierrez@upp.edu.mx)

Ordaz Oliver Jesús Patricio  
*Centro de Investigación en tecnologías  
de la información y Sistemas,  
Universidad Autónoma del Estado de  
Hidalgo, Pachuca Hidalgo*  
[jesus\\_ordaz@uaeh.edu.mx](mailto:jesus_ordaz@uaeh.edu.mx)

**Resumen**— Este proyecto presenta la construcción de un sistema de pruebas de bajo costo, aplicado en el aceite dieléctrico de transformadores. El sistema consiste en un circuito que eleva la tensión de forma controlada y medible para alcanzar el valor de ruptura en la rigidez dieléctrica del aceite. Dicha prueba es importante, dado que la condición de ruptura puede ocasionar fallos en el funcionamiento del transformador, como descomposición, calentamiento e incluso riesgo de explosión.

**Palabras clave**— *circuito elevador, divisor de voltaje, voltaje de ruptura, propiedades eléctricas, falla, arco eléctrico, medición.*

## I. INTRODUCCIÓN

La rigidez dieléctrica es la máxima tensión eléctrica que un material aislante puede soportar sin sufrir una ruptura dieléctrica. En el contexto del aceite de transformadores, la prueba de rigidez dieléctrica determina el voltaje al cual el aceite deja de ser un aislante y permite el paso de una corriente eléctrica a través de él, indicando la presencia de impurezas, contaminantes como agua, partículas en suspensión o productos de descomposición. Por esta razón, dicha prueba es crucial para evaluar la calidad y el estado del aceite utilizado en los transformadores, ya que el aceite dieléctrico tiene la función de actuar como un aislante y refrigerante. La prueba de rigidez dieléctrica mide la capacidad del aceite para resistir una ruptura eléctrica bajo condiciones controladas.

El procedimiento general para la prueba de rigidez dieléctrica del aceite de transformadores se describe a continuación [1]:

1. Preparación de la muestra: se toma una muestra del aceite del transformador, asegurándose de evitar la contaminación durante la recolección.
2. Acondicionamiento de la muestra: la muestra se lleva a una temperatura específica si es necesario y se agita para

asegurar que cualquier contaminante esté uniformemente distribuido [1].

3. Equipos de prueba: se utiliza un equipo específico para medir la rigidez dieléctrica, que consta de una copa con electrodos en su interior donde se coloca la muestra de aceite.
4. Aplicación de voltaje: se aplica un voltaje creciente entre los electrodos a una velocidad constante hasta que se produce la ruptura dieléctrica.
5. Registro del voltaje de ruptura: se realiza el registro del voltaje en el momento de la ruptura y se considera así la rigidez dieléctrica del aceite evaluado.

Existen varias normas internacionales que regulan el procedimiento de la prueba de rigidez dieléctrica del aceite de transformadores, como las normas IEC 60156 y ASTM D1816 y D877.

La interpretación de los resultados de esta prueba al aceite del transformador puede indicar dos posibles condiciones [2]:

- Alta rigidez dieléctrica: esta condición indica que el aceite está en buenas condiciones, sin contaminantes significativos y adecuado para seguir siendo utilizado en un transformador [3].
- Baja rigidez dieléctrica: esta condición sugiere la presencia de contaminantes como agua, partículas, lodos o productos de descomposición, que reducen la capacidad aislante del aceite. En este caso, se deben considerar la filtración, regeneración o reemplazo del aceite.

El presente proyecto tiene como objetivo evaluar la rigidez dieléctrica del aceite mediante un procedimiento de bajo costo, pues esta es una propiedad crucial que define el buen funcionamiento de transformadores eléctricos y otros equipos como interruptores de potencia. Para lograr este objetivo, se

construye un conjunto de circuitos electrónicos, entre los que destacan dos. El primero que permite un incremento controlado de tensión. Y el segundo, que permite su medición y que está formado por una serie de resistencias, encargadas de reducir el voltaje de entrada (de alta tensión) a un nivel adecuado para ser leído por medio de un divisor de voltaje. Finalmente, se implementa un programa en Arduino UNO que facilita la lectura y visualización precisa del voltaje de ruptura a través de un Display LCD, mismo que contribuye al monitoreo efectivo y seguro de sistemas de pruebas.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se describen los componentes utilizados para desarrollar el sistema de medición de la rigidez dieléctrica, así como el procedimiento para la adquisición de datos.

### Material

1. Contenedor de aceite (copa dieléctrica)
2. Fuente de voltaje de corriente alterna (CA) variable (circuito elevador)
3. Bobina de encendido automotriz tipo DIS (Direct Ignition System).
4. Calibrador Vernier para medir la distancia de las puntas
5. 2 electrodos con cabeza planas de latón
6. 2 electrodos con cabeza semiesférica de latón
7. Arduino UNO (tarjeta de desarrollo programable)
8. Resistencias de 100 mΩ y 50 kΩ de ¼ W
9. Display LCD de 16×2
10. Protoboard y cables de conexión de calibre AWG26.
11. Fuente de alimentación de voltaje variable a 30 A.
12. Multímetro

### Métodos

La prueba de rigidez dieléctrica del aceite mencionada anteriormente tiene como objetivo determinar la capacidad del aceite dieléctrico (utilizado en transformadores u otros equipos eléctricos, como interruptores de potencia) para resistir la ruptura dieléctrica bajo condiciones de un elevado campo eléctrico intenso.

La prueba en cuestión se realiza suspendiendo dos electrodos en una muestra de aceite, los cuales están separados por una distancia entre sus cabezas. Posteriormente se aplica una tensión creciente a través de los electrodos hasta que se produce un arco eléctrico, lo que equivale a una ruptura en el aceite. Esta prueba se realiza para garantizar que el aceite dieléctrico cumpla con los estándares de calidad y seguridad eléctrica. La rigidez dieléctrica es crucial para prevenir fallas catastróficas debido a descargas eléctricas en el aceite [4].

Distintas normas indican cómo y cuándo realizar la prueba de rigidez dieléctrica. Estas normas pueden variar según el país y el tipo de equipo. Sin embargo, en México, la norma aplicable para la prueba de rigidez dieléctrica del aceite en equipos eléctricos se basa en normas nacionales e internacionales adoptadas como normas mexicanas, las normas ASTM (American Society for Testing and Materials) aunque no son normas mexicanas específicas, a menudo se adoptan internacionalmente para pruebas y estándares. Particularmente en este caso de estudio se consideran las

normas ASTM D877 y ASTM D1816. La norma ASTM D877 se refiere a los procedimientos para realizar pruebas de resistencia dieléctrica de aceites aislantes utilizados en equipos eléctricos. La norma ASTM D1816 proporciona métodos de prueba para determinar diversas propiedades físicas y químicas de los aceites dieléctricos. La aplicación de estas normas ha permitido identificar objetivamente que la rigidez dieléctrica del aceite de un transformador recién fabricado y sin contaminantes suele estar en el rango de 30 a 50 kV cuando se mide con un espacio entre electrodos de 2.5 a 4.0 mm.

Los factores que intervienen en la determinación cuantitativa de la rigidez dieléctrica incluyen: la temperatura del aceite, que puede afectar significativamente los resultados de la prueba; la contaminación, que puede reducir su rigidez dieléctrica; el historial de mantenimiento, que puede influir en su capacidad dieléctrica; el tipo de equipo, mismo que puede tener requisitos específicos de rigidez dieléctrica del aceite [5].

Dadas las características de la prueba, los parámetros establecidos por cada norma y las condiciones experimentales de la misma, el procedimiento para la construcción de un banco de pruebas para la rigidez dieléctrica del aceite de transformador puede ser organizado en tres etapas fundamentales, mismas que se describen a continuación:

1. Diseño y montaje del circuito elevador (booster) para transformar el voltaje de CD a voltaje de CD en el orden de kilo volts.
2. Diseño y construcción de los electrodos (planos y semiesféricos) y la copa contenedora. Así como la medición y ajuste de la distancia de separación entre electrodos para apreciar el comportamiento de la tensión en el aceite e identificar el valor al cual se rompe la rigidez dieléctrica.
3. Implementación del circuito divisor de voltaje para medir el voltaje de alta tensión y mostrarlo en un Arduino con un Display LCD.

El diseño del circuito elevador (booster) utilizado para transformar el voltaje de CD a voltaje de CD en el orden de kilo volts brinda la posibilidad de crear un arco eléctrico o tensión de ruptura, mismo que es indispensable para la ejecución de la prueba y que se muestra en la Figura (1).

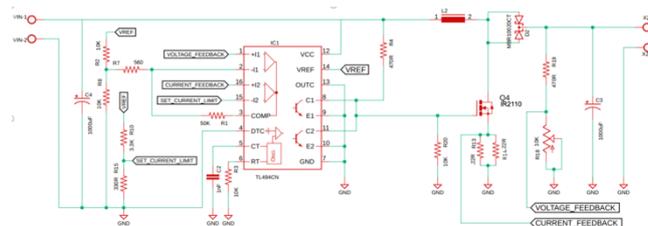


Fig. 1. Aproximación del diagrama de conexión del circuito elevador de tensión [6].

Para validar el funcionamiento del circuito booster, se monta sobre una placa de prototipado y se adapta para trabajar

correctamente en conjunto con la bobina de encendido automotriz y el doble divisor de voltaje. El circuito físico resultante de este proceso se aprecia en la Figura (2).

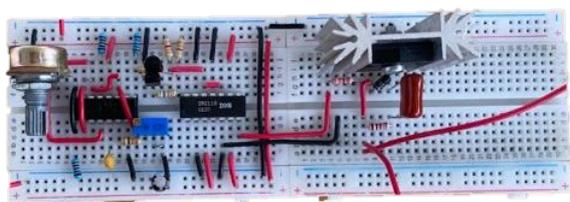


Fig. 2. Circuito elevador de tensión.

Este circuito incluye el uso de dos circuitos integrados: el TL494 y el IR2110 que se muestran en la Figura (3). El TL494 es un circuito integrado diseñado para la modulación por ancho de pulso en fuentes conmutadas. Contiene todos los elementos necesarios para un control completo de una fuente, incluyendo la frecuencia, el ciclo de trabajo y el consumo. Adicionalmente, incorpora fuentes de referencia, amplificadores operacionales y transistores de salida con acceso a su colector y emisor, lo que facilita su uso en el diseño de circuitos, permitiendo diversas configuraciones con los transistores internos. Por otro lado, el circuito de disparo IR2110 ofrece una solución compacta para activar simultáneamente un transistor MOSFET referenciado a tierra y otro referenciado a un nivel de alta tensión, capaz de oscilar entre +500V y -5V con respecto a la terminal de tierra.

Es importante mencionar que el control y manipulación de la tensión de salida del circuito elevador se realiza manualmente mediante un potenciómetro, mismo que se considera lineal en una región de operación y que permite su incremento a velocidad cuasi constante, como se indica en normas ASTM.



Fig. 3. Circuitos integrados TL494CN y IR2110.

El circuito elevador se conecta a una bobina de encendido automotriz tipo DIS (Direct Ignition System), que se muestra en la Figura (4), esta bobina imita la función de un transformador, aunque no funciona exactamente como los transformadores utilizados en aplicaciones de corriente alterna (AC), que operan mediante inducción electromagnética a frecuencias específicas, la bobina de encendido automotriz comparte ciertos principios de funcionamiento con los transformadores.

La relación de transformación de la bobina de encendido automotriz suele ser aproximadamente 100:1. Esto significa que la bobina toma los 12 voltios de la fuente de alimentación y los transforma en una alta tensión de aproximadamente 12000 voltios (12 kV) o más, dependiendo del voltaje de la fuente, del diseño y las especificaciones del fabricante. Este tipo de bobina se usa en vehículos que no cuentan con un

distribuidor mecánico, lo que significa que la bobina se encarga directamente de generar la alta tensión que va a las bujías.



Fig. 4. Bobina de encendido Automotriz tipo DIS (Direct Ignition System).

Posteriormente se realiza la conexión de esta etapa de la prueba a la fuente de voltaje de CD de 24 V a 30 A que se presenta en la Figura (5).



Fig. 5. Fuente de voltaje CD a 30 A.

Se realiza una prueba para asegurar el correcto funcionamiento de los componentes previamente conectados, de manera que en dos de las terminales de la bobina se forma un arco eléctrico de poca magnitud, en este punto las terminales de la bobina se encuentran aisladas para evitar un arco eléctrico interno y evitar un daño a la bobina. Posteriormente, se implementa un circuito divisor de voltaje utilizando resistencias para medir la elevación de voltaje y mostrarlo en un Arduino UNO con un Display LCD como se describe a continuación:

1. Conectar 20 resistencias de 10 MΩ de ¼ W en serie para obtener un resultado de 200 MΩ.
2. Conectar 10 resistencias de 10 MΩ de ¼ W para obtener un resultado de 100 MΩ y una de 50 kΩ de ¼ W en serie. Esta configuración en serie se debe unir en paralelo con las resistencias del punto anterior.
3. Conectar el punto medio entre las resistencias en paralelo y la serie al pin A0 del Arduino UNO.
4. Conectar las puntas del divisor de voltaje a la salida de la fuente de alimentación de 30 kV y al común (GND), asegurándose de que el voltaje medido sea el que se aplicará al dispositivo generador del arco eléctrico.

Para inducir un arco eléctrico como se aprecia en la Figura (7), se conectan dos electrodos, inicialmente al aire libre y de forma posterior sumergidos en aceite dentro de la copa dieléctrica de la Figura (8). Estos electrodos permiten la transmisión de voltaje de un extremo a otro.



Fig. 6. Electrodo de prueba (planos y redondeados).

De acuerdo con la norma ASTM D1816, existen distintas configuraciones formas de conexión con electrodos específicos; plano-plano, esfera-esfera y sus variaciones. En la Figura (6) se presentan los electrodos torneados en latón para la ejecución de las pruebas sobre el aceite dieléctrico de transformadores. Dichos electrodos tienen una longitud de 10 cm, y una espesor en su cabeza de 5 mm. Es importante mencionar, que el latón es una aleación de cobre y zinc que tiene una buena conductividad eléctrica, de 0,158 a 20 MegaSiemens/cm a 20°C. Sin embargo, es menos conductor y costoso que el cobre, que tiene una conductividad nominal de 58 miliSiemens por metro (mS/m). Esto se debe a la presencia de zinc en la mayoría de las aleaciones de latón [3].

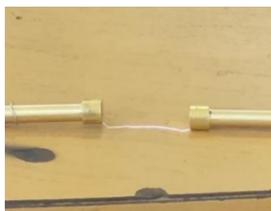


Fig. 7. Arco eléctrico inducido entre electrodos planos por el circuito elevador.

El objetivo de la prueba es determinar la distancia mínima a la cual se forma el arco, rompiendo la rigidez dieléctrica del aire.

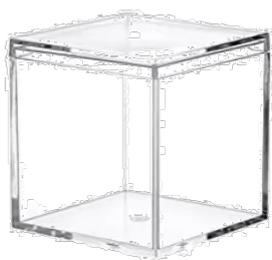


Fig. 8. Copa contendora para el aceite (cubo acrílico).

Una vez identificado el voltaje de ruptura, se coloca el calibrador entre los electrodos para medir distancias entre las cabezas y definir así, tanto la distancia máxima, como la tensión a la que se da el arco eléctrico, logrando romper la rigidez dieléctrica del aire.

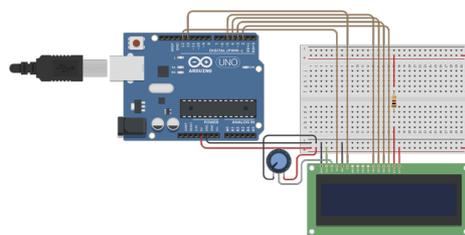


Fig. 9. Circuito para medición de voltaje de ruptura.

Posterior a una serie de mediciones, se determina que la distancia máxima previa a la presencia del arco es de 2.36 mm con 4.9148v, con estas mediciones se calcula y se conoce el voltaje en la bobina.

Para conocer la diferencia de potencial entre las cabezas de los electrodos se utiliza un divisor de voltaje doble, reduciendo dicha tensión a un valor medible, que sea posible registrar mediante un Arduino, para posteriormente mostrar dicha medición en un Display LCD.

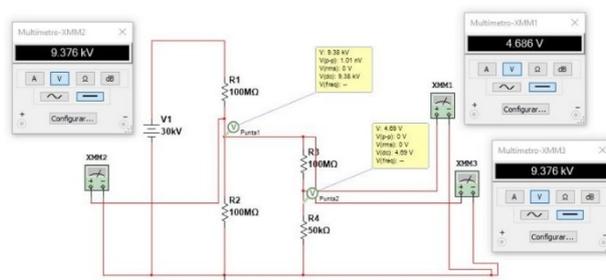


Fig. 10. Simulación y validación del divisor de voltaje.

En el experimento se utilizó un Display LCD de 16x2, implementando un programa en el entorno de desarrollo integral de Arduino (IDE) para detectar el voltaje del divisor de voltaje a través de la entrada analógica A0. Posteriormente el voltaje real se calcula mediante las expresiones del divisor de voltaje. Finalmente, dicho valor se visualiza en el Display. El código de Arduino utilizado para realizar esta tarea es el siguiente:

```
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(7, 8, 9, 10, 11, 12);
int pin_lectura = A0;
float voltaje_entrada;
float voltaje_final;
float resistenciaB = 50000; // Resistencia de 50k
float resistenciaA = 10000000; // Resistencia de 100M
float resistencial = 100000000; // Resistencia de 100M
float resistencia2 = 50010000; // Resistencia de 50M

void setup() {
    pinMode(pin_lectura, INPUT);
    lcd.begin(16, 2);
}

void loop() {
    // Lee el voltaje de entrada
    voltaje_entrada = (analogRead(A0) * 5.0) / 1024;
    // Ecuación 1: E = (100M + 50.01M / 50.01M) * voltaje_entrada
    float E = ((resistenciaA + resistenciaB) / resistenciaB) * voltaje_entrada;
    // Ecuación 2: ECC = (E * (R1 + R2)) / R2
```

```
float ECC = (E * (resistencial + resistencia2)) /
resistencia2;
// Muestra los resultados en el LCD
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("E1:");
lcd.print(E1, 6); // Mostrar con 6 decimales

lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("ECC:");
lcd.print(ECC, 6); // Mostrar con 6 decimales
delay(2000);
}
```

Para establecer la conexión del Display LCD con el Arduino UNO que se observa en la Figura (9), se sigue un esquema genérico y convencional de conexión (utilizando los pines de datos y control correspondientes), tal como se muestra en la Figura (11).

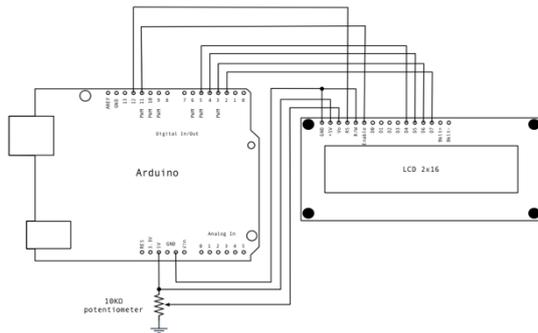


Fig.11. Diagrama de conexiones Arduino UNO - Display LCD [6].

Es indispensable verificar que el Display esté correctamente alimentado y configurado. Para calcular el voltaje de ruptura se utilizan las siguientes ecuaciones, que se derivan de la aplicación de divisores de voltaje que se muestra en la Figura (10). Es importante mencionar que el circuito elevador de voltaje y el circuito de medición que incluye la tarjeta de desarrollo programable Arduino UNO con el Display LCD se encuentran separados, compartiendo únicamente la conexión a tierra.

Inicialmente se considera un divisor de voltaje secundario definido como:

$$V_B = \frac{R_B}{R_A + R_B} * E$$

En donde  $R_A=100M\Omega$  y  $R_B=50k\Omega$ ,

$$V_B = \frac{50k\Omega}{100M\Omega + 50k\Omega} * E$$

Si se resuelve para el voltaje total  $E$  dado un voltaje  $V_B$  medido de 4.9148V.

$$E = \frac{100M\Omega + 50k\Omega}{50k\Omega} * 4.9148V$$

Que resulta en una tensión para el divisor secundario de:

$$E = 9.8346kV$$

Ahora si se resuelve para el divisor principal, se tiene que:

$$9.8346kV = \frac{R_1}{R_1 + R_2} * Ecc$$

Esta ecuación calcula el voltaje total ( $Ecc$ ) en términos de los valores de las resistencias y el voltaje 1.4 MV.

$$Ecc = \frac{9.8346kV (R_1 + R_2)}{R_2}$$

$R_1$  se sustituye por  $100M\Omega$  y  $R_2$  por  $50.01 M\Omega$ . Esta ecuación calcula el valor de  $Ecc$ .

$$Ecc = (9.8346kV (100M\Omega + 50.01M\Omega)) / 50.01M\Omega$$

$$Ecc = 29.5kV$$

Si este voltaje es dividido entre 2.36 mm da lugar a una tensión de 12.5 kV por cada milímetro, equivalente a 50.01689kV por cada 4 mm como se indica en la prueba, que es un voltaje suficientemente alto para romper la rigidez dieléctrica del aire y producir un arco eléctrico, tal como se observa en la Figura (7).

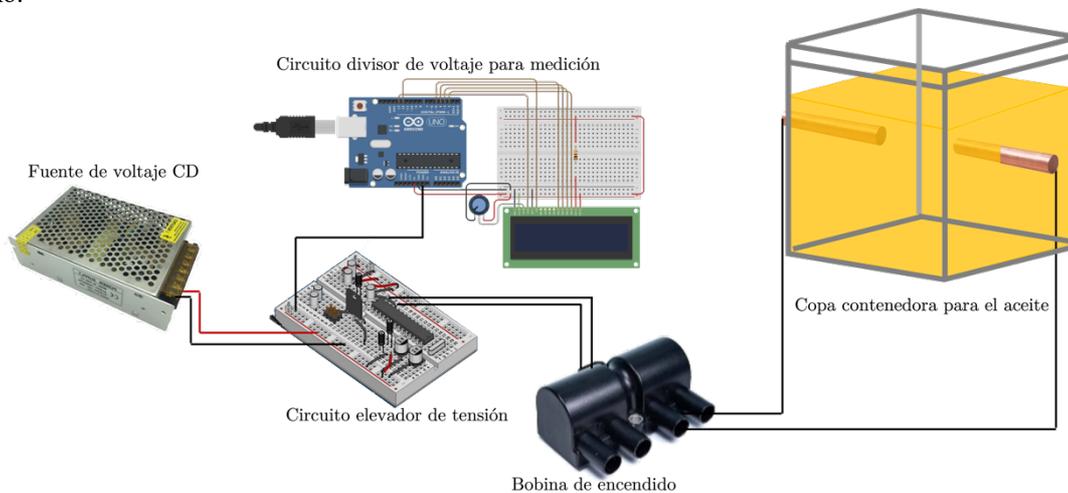


Fig.12. Representación gráfica de las conexiones del banco para la prueba de rigidez dieléctrica del aceite de transformadores.

En complemento con el circuito divisor de voltaje y la lectura de este mediante el Display LCD, es realizada una serie de pasos que permite brindar certeza en las mediciones y evitar errores. Entre estos pasos, resalta la importancia de verificar que el Display (LCD) refleje con precisión el voltaje. Pues al ajustar la fuente de alimentación es indispensable observar cómo varia la lectura del voltaje antes de aplicarlo a los electrodos, para la generación del arco eléctrico. Debido a la sensibilidad, interferencias y ruido, se debe manejar con cuidado la configuración del divisor de voltaje utilizando resistencias de alto valor (en el orden de 100 MΩ). Tomando las medidas precautorias adecuadas se puede llevar a cabo de manera correcta un conjunto de mediciones asociadas con la prueba, para asegurar el correcto funcionamiento de todos los componentes que integran el banco de pruebas, tal como se muestra en la Figura (12).

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este estudio experimental se realizó la evaluación de la rigidez dieléctrica de un aceite usado en transformadores, mediante el método de la prueba de copa dieléctrica, constituida de elementos de bajo costo, y accesibles. Los costos aproximados de los componentes se muestran en la Tabla (I).

TABLA I  
LISTA DE PRECIOS POR COMPONENTE

Componente	Mínimo (MXN)	Máximo (MXN)
Contenedor de aceite (copa dieléctrica)	\$170	\$510
Circuito elevador de voltaje booster	\$85	\$255
Bobina de encendido automotriz	\$340	\$850
Calibrador para medir la distancia de las puntas	\$85	\$340
2 electrodos con cabeza plana de latón	\$170	\$340
2 electrodos con cabeza semiesférica de latón	\$170	\$340
Arduino UNO (tarjeta de desarrollo programable)	\$340	\$510
Resistencias de 100mΩ y 50kΩ de ¼ W	\$17	\$85
Display LCD de 16×2	\$85	\$170
Protoboard y cables de conexión de calibre AWG26	\$170	\$340
Multímetro	\$170	\$510
Fuente de voltaje de CD a 30 A.	\$170	\$510
<b>Total</b>	<b>\$1,972</b>	<b>\$4,760</b>

La evaluación experimental de la rigidez dieléctrica del aceite en transformadores es fundamental para garantizar la operación segura y eficiente de los transformadores eléctricos. Los resultados obtenidos de un conjunto de mediciones realizadas a 10 muestras del mismo aceite dieléctrico, con distinta separación aleatoria entre 0.5 y 2.5 mm arroja los datos que se muestran en la Tabla (II), en donde se aprecian los voltajes medidos en el divisor, con sus correspondientes voltajes de ruptura (indicados por el Display LCD) y distancias medidas.

TABLA II  
TENSIÓN EN DIVISOR, DE RUPTURA Y SEPARACIÓN DE ELECTRODOS

Voltaje en el divisor (V)	Voltaje de Ruptura (kV)	Separación de electrodos (mm)
2.0327	12.2434	0.9370
2.4471	14.7183	1.1758
2.6738	16.2793	1.3863
2.6817	15.7914	1.7637
2.9657	17.7473	1.4721
3.6582	21.2779	1.7492
4.2542	25.8553	2.2668
4.9148	29.5000	2.3600
4.9287	29.5863	2.3765
4.9625	29.8147	2.3843

Los resultados registrados en la Tabla (II) subrayan la importancia crítica de mantener la rigidez dieléctrica del aceite dentro de límites adecuados. Esto ayuda a prevenir posibles fallos catastróficos como descomposición del aceite, calentamiento excesivo y riesgo de explosión, que podrían comprometer la integridad del transformador y otros componentes eléctricos.

Los datos derivados del conjunto de mediciones que son presentados en la Tabla (II) se grafican para tener una interpretación objetiva de los mismos, de este modo, se obtiene la gráfica que se muestra en la Figura (12). De la cual es importante identificar la tendencia lineal en las mediciones de voltaje de ruptura, con una desviación importante del voltaje de ruptura en la separación de los electrodos que corresponde a los 1.7637 mm, misma que puede ser provocada por distintos factores, como un error en la medición de la distancia, un error en la lectura del voltaje de ruptura o la no linealidad del potenciómetro de ajuste.

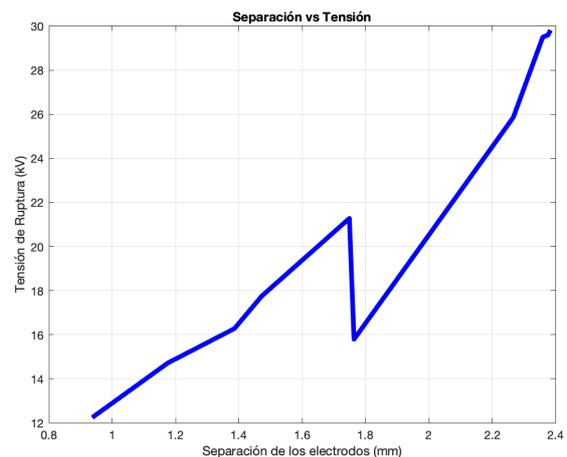


Fig.12. Gráfica de distancia de separación de los electrodos contra tensión de ruptura medida.

Este proyecto destaca la importancia de implementar programas regulares de monitoreo y mantenimiento preventivo. Estos programas incluyen tanto pruebas técnicas como visuales del aceite dieléctrico. Estas prácticas no solo mejoran la eficiencia operativa de los transformadores, sino

que también prolongan su vida útil al detectar y abordar tempranamente condiciones adversas del aceite.

La rigidez dieléctrica del aceite es crucial, ya que indica su capacidad para resistir altos voltajes sin volverse conductor, lo cual es fundamental para la operación segura y eficiente de los transformadores. Estos resultados subrayan la necesidad crítica de mantener la rigidez dieléctrica del aceite dentro de límites aceptables mediante programas regulares de monitoreo y mantenimiento preventivo. La combinación de pruebas técnicas y visuales proporcionan un enfoque integral para asegurar la confiabilidad y seguridad de los sistemas eléctricos que dependen del aceite dieléctrico.

Los resultados obtenidos durante la práctica han sido consistentes con los objetivos establecidos, lo que demuestra la capacidad precisa y confiable del sistema de prueba para medir la rigidez dieléctrica del aceite de transformador. Las principales limitaciones identificadas en esta primer aproximación del banco de pruebas incluyen la precisión de las mediciones debido a la calidad de los componentes utilizados y la estabilidad del voltaje inducido por el circuito booster.

Derivado de las observaciones, alcances y limitaciones resultantes de este primer prototipo de banco de pruebas, se ha planteado un conjunto de trabajos a futuro, que incluye el uso de materiales y componentes de mejor calidad, como: utilizar electrodos de mayor calidad y precisión, hechos de materiales con mejor conductividad y resistencia a la corrosión; implementar un circuito booster de mayor calidad y estabilidad para asegurar un voltaje constante y preciso; construir un contenedor de aceite con materiales más robustos y resistentes a altas tensiones. De manera similar, se plantea la posibilidad de aplicar distintas mejoras en el tema de la seguridad, por ejemplo, mejorar el aislamiento de todas las conexiones y encapsular los componentes electrónicos críticos para prevenir descargas accidentales, añadir fusibles y protectores contra sobrecarga para proteger tanto al equipo, como los operadores en caso de fallos eléctricos e incluir luces indicadoras y señalización adecuada para alertar a los operadores cuando el equipo esté en uso y bajo alta tensión.

En la parte de control y automatización de la prueba, es indispensable integrar sensores adicionales para monitorear la temperatura y la humedad del entorno, ya que estos factores pueden influir en las mediciones, así como desarrollar una interfaz de usuario más avanzada para el control y monitoreo del sistema, utilizando pantallas gráficas y botones de control. Por otra parte, un punto fundamental en el banco de pruebas implica establecer un protocolo de calibración regular para asegurar que las mediciones sean precisas y consistentes, e implementar filtros electrónicos y software para reducir el ruido y las interferencias en las mediciones. Finalmente se ha observado que es imprescindible en este banco contar con un registro automático de los datos para que su almacenamiento se lleve a cabo en una memoria externa o en la nube para facilitar el análisis posterior y la trazabilidad, al igual que desarrollar o integrar software de análisis de datos para interpretar los resultados y generar reportes automáticamente.

#### IV. CONCLUSIÓN

Este proyecto documenta la implementación de una prueba de rigidez dieléctrica del aceite de transformador utilizando Arduino UNO como plataforma de bajo costo. Los resultados demuestran la viabilidad y eficiencia de integrar tecnologías emergentes como Arduino en aplicaciones específicas de la ingeniería eléctrica, ofreciendo soluciones accesibles y efectivas. Además, se resalta la versatilidad y adaptabilidad de esta plataforma en la realización de pruebas técnicas de alta precisión.

La capacidad para adaptar Arduino UNO a un banco de pruebas para medir la rigidez dieléctrica del aceite de transformadores subraya un enfoque innovador en el ámbito de la ingeniería eléctrica, alineado con las normativas internacionales ASTM e IEEE. Este enfoque facilita la preparación técnica para afrontar desafíos operativos y de seguridad en pruebas de sistemas eléctricos.

Es fundamental señalar que la operación de este banco de pruebas requiere personal capacitado en el manejo de alta tensión, junto con el estricto cumplimiento de las medidas de seguridad. El uso de equipo de protección personal adecuado (guantes aislantes, gafas de seguridad y vestimenta adecuada) y la implementación de procedimientos de emergencia claros son esenciales para garantizar la seguridad durante las pruebas.

En conclusión, el uso de Arduino UNO en la prueba de rigidez dieléctrica del aceite de transformador ha potenciado la comprensión técnica, fortaleciendo competencias clave como la resolución de problemas, la innovación y la aplicación práctica de conocimientos teóricos en contextos reales de ingeniería eléctrica.

#### V. REFERENCIAS

- [1] Mohamad, M. S., Zainuddin, H., Ghani, S. A., & Chairul, I. S. (2015, December). AC breakdown voltage of natural ester mixed with Iron Oxide for oil-immersed power transformer application. In 2015 IEEE Student Conference on Research and Development (SCOREd) (pp. 16-20). IEEE.
- [2] Atalar, F., Ersoy, A., & Rozga, P. (2022). Investigation of effects of different high voltage types on dielectric strength of insulating liquids. *Energies*, 15(21), 8116.
- [3] Arya, E. H., Maharmi, B., & Lutfi, M. (2022). Analysis of oil dielectric strength insulation on oil circuit breakers based on service life and operating frequency. *Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace-science and engineering-*, 66(2), 50-56.
- [4] Abd-Elhady, A. M., Ibrahim, M. E., Taha, T. A., & Izzularab, M. A. (2018). Effect of temperature on AC breakdown voltage of nanofilled transformer oil. *IET Science, Measurement & Technology*, 12(1), 138-144.
- [5] Slideshare. (n.d.). Prácticas con Arduino UNO. Retrieved from <https://es.slideshare.net/slideshow/22232441-310201212102/74586437>
- [6] Handson Technology. (n.d.). TL494 Boost Converter Module Specifications. Retrieved from <https://handsontec.com/dataspecs/module/TL494%20Boost.pdf>