

**MEDICIÓN DE CORRIENTE EN LA CONFIGURACIÓN COAXIAL
DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UIS**

YURLEY ANDREA GÓMEZ MARTÍNEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2020**

**MEDICIÓN DE CORRIENTE EN LA CONFIGURACIÓN COAXIAL
DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UIS**

YURLEY ANDREA GÓMEZ MARTÍNEZ

*Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniera Electricista*

Director
JULIO CÉSAR CHACÓN VELASCO
Magíster en Potencia Eléctrica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2020

A Dios, por permitirme culminar esta etapa de mi vida. Por fortalecer cada día mi fe. Porque nunca llegas tarde, nunca fallas, nunca me olvidas, siempre estás ahí a pesar de todo. Eres fiel y firme, tu mano todo lo sostiene, en ti nada perece.

A mi madre, por ser mi ejemplo de mujer luchadora. Por siempre creer en mí, demostrarme cada día su incondicional apoyo, por enseñarme que con esfuerzo, trabajo y constancia todo se puede y sobre todo mamita, por guerrear junto a mi este sueño, que con sacrificio, paciencia y amor culmina con éxito. Que mejor forma de demostrar Dios su amor por mí que dándome una SÚPER mamá.

A mi padre, por enseñarme que las dificultades y los errores son el mejor camino para crecer, por siempre creer en mí, por recordarme que con un poco más de persistencia se pueden obtener buenos resultados y apoyarme a pesar de las adversidades.

A mi Abuelita, por tenerme presente en sus oraciones.

A mi familia, por demostrarme su amor y apoyo, sobre todo en los momentos en los que sentí desfallecer.

A Mis Chicas y amigos por compartir juntos esta maravillosa etapa, agradecida de haber tenido la oportunidad de entrar en sus vidas.

A la parte administrativa de la E3T por hacerme parte de su equipo de trabajo y, sobre todo, por permitirme conocer personas increíbles de quienes me llevo los mejores consejos.

Índice general

INTRODUCCIÓN	14
1 OBJETIVOS	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	16
2 METODOLOGÍA DE MEDICIÓN	17
2.1 OBJETO DE ENSAYO	17
2.2 METODOLOGÍA DE MEDICIÓN.....	18
2.2.1 Método amplificador diferencial.	19
2.2.2 Método directo.....	21
3 VERIFICACIÓN EQUIPOS DE MEDIDA	23
3.1 MULTÍMETRO DIGITAL (mA.).....	23
3.2 AMPLIFICADOR DIFERENCIAL (A/D).	23
3.3 AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN (A/I).....	28
4 PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS	35
4.1 MÉTODO AMPLIFICADOR DIFERENCIAL	35
4.1.1 Calibración.....	36
4.1.2 Medición de corriente	38
4.2 RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN DE LOS DIVISORES DE TENSIÓN. 44	
4.2.1 Divisor resistivo.....	45
4.2.2 Divisor capacitivo amortiguado.....	45
4.2.3 Divisor construido	46
5 CONCLUSIONES	55
6 RECOMENDACIONES	56

6.1 IMPLEMENTACIÓN EN LA PRÁCTICA	56
6.2 ADQUISICIÓN DE EQUIPOS	58
6.2.1 Multímetro de precisión.	58
CITAS BIBLIOGRÁFICAS	60
BIBLIOGRAFÍA	61

Índice de figuras

Figura 2.1	Esquema de línea corta enmallada.	18
Figura 2.2	Montaje para medir la corriente corona con amplificador diferencial.....	20
Figura 2.3	Montaje para medir la corriente corona según método directo	21
Figura 2.4	Montaje para la estimación de corriente con amplificador de instrumentación.	22
Figura 3.1	Amplificador diferencial LM741.....	24
Figura 3.2	Esquema de la configuración del amplificador LM741.....	25
Figura 3.3	Esquema para medir señal entrada-salida del amplificador LM741.	25
Figura 3.4	Señal entrada-salida para frecuencia de 1 kHz.....	27
Figura 3.5	Señal entrada-salida para una frecuencia de 200 kHz.....	27
Figura 3.6	Respuesta en frecuencia para ganancia unitaria.....	28
Figura 3.7	Esquema de la configuración del amplificador INA128.....	29
Figura 3.8	Esquema para medir tensión entrada-salida del INA128.....	31
Figura 3.9	Ganancia unitaria amplificador de instrumentación.	32
Figura 3.10	Ganancia unitaria amplificador de instrumentación.	32
Figura 3.11	Respuesta en frecuencia amplificador de instrumentación.....	34
Figura 4.1	Montaje para la estimación de corriente con amplificador de instrumentación.	36
Figura 4.2	Circuito del amplificador diferencial (A/D) con sus puntos de conexión.	37
Figura 4.3	Elementos y puntos de conexiones del amplificador de instrumentación (A/I).....	39
Figura 4.4	Señal de tensión medida en la salida del A/I	42
Figura 4.5	Relación de corriente para las medidas registradas	43

Figura 4.6	Circuito adaptado para realizar la prueba de la estimación de la tensión de alimentación.	48
Figura 4.7	Relación de transformación para las medidas obtenidas.....	53
Figura 6.1	Multímetro de precisión 8846A.	59

Índice de tablas

Tabla 3.1	Relación de la ganancia en función de R_{tt}	30
Tabla 3.2	Relación de resistencias en el divisor.	31
Tabla 4.1	Puntos de conexión LM741.	37
Tabla 4.2	Resultados estimación de corriente corona.	41
Tabla 4.3	Características de las resistencias para el divisor construido. . .	47
Tabla 4.4	Datos experimentales relación de transformación.	50
Tabla 4.5	Error tensión de alimentación.	51
Tabla 4.6	Error relación óhmica.	54

Lista de anexos

(Ver anexos en el CD y puede visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)

Anexo A. Especificaciones de los equipos.

Anexo B. Banda de frecuencias amplificador diferencial.

Anexo C. Banda de frecuencias amplificador de instrumentación.

Anexo D. Medidas de la corrientes a diferentes niveles de tensión.

RESUMEN

Título: MEDICIÓN DE CORRIENTE EN LA CONFIGURACIÓN COAXIAL DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UIS¹.

Autores: Yurley Andrea Gómez Martínez.²

Palabras Clave: Laboratorio Alta Tensión, Equipos de medición, Configuración coaxial.

DESCRIPCIÓN:

El laboratorio de Alta Tensión (LAT) desde la época de los 70, ha sido el lugar para que los estudiantes fortalezcan y apropien los conceptos adquiridos, ya que permite la interacción con un entorno similar al que se enfrenta en el campo laboral. El uso de los equipos, con el tiempo, han experimentado cambios físicos y su utilidad ha disminuido.

Este trabajo de grado se encamina a utilizar aquellos equipos de medida que no han sido empleados en la práctica Efecto Corona del LAT debido a que varios de estos equipos no se encontraban disponibles o no tenían uso en otra práctica del Laboratorio; haciendo que el reintegro de los equipos complemente la temática que abarca el efecto corona.

Se implementó la metodología propuesta en el informe final del profesor Julio Rúgiles para medir corriente en la configuración coaxial del Laboratorio, por consiguiente, se verificó el funcionamiento de los equipos asociados con la práctica con el fin de tomar las medidas correspondientes. Se busca que esta práctica forme parte de la guía para los estudiantes del Laboratorio a fin de desarrollar técnicas de medición y potenciar la comprensión del fenómeno corona; permitiendo una mejor formación en el campo de Alta Tensión, consolidando los fundamentos teóricos de esta disciplina.

¹Trabajo de Grado

²Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y Telecomunicaciones. Director: Magíster en Potencia Eléctrica, Julio César Chacón Velasco.

ABSTRACT

Title: CURRENT MEASUREMENT IN THE COAXIAL CONFIGURATION OF THE HIGH-VOLTAGE LABORATORY OF THE UIS¹.

Authors: Yurley Andrea Gómez Martínez ²

Key Words: High Voltage Laboratory, Measuring Equipment, Coaxial Configuration.

DESCRIPTION:

Since the 70s, the high voltage laboratory (or LAT by its acronym in Spanish) has been the place used by students in way to strengthen their knowledge and appropriate the acquired concepts, since it allows interacting to an environment similar to a laboral one. The use of the equipment, over time, have experienced physical changes and their utility has decreased

This degree work is aimed at using those measurement equipment, who have not been employed in the corona effect practice of LAT, because several of these measurement equipment was not available or had no use in another practice; causing the reinstatement of the equipment to complement the subject matter covered by corona effect.

The methodology proposed in the teacher's final report Julio Rugeles was implemented to measure current in the coaxial configuration of the laboratory, therefore, the operation of the equipment associated with the practice was verified in order to take the corresponding measures. This practice is expected to be part of the laboratory tests for students, in order to develop measurement techniques and enhance understanding of the corona effect; allowing better training in the field of high voltage, consolidating the theoretical foundations of this discipline.

¹Bachelor Thesis

²Physic-mechanical Engineering Faculty. Electrical, Electronics and Telecommunications Engineering School. Director: Julio César Chacón Velasco, MMagister in Electric Power

INTRODUCCIÓN

En el Laboratorio de Alta Tensión (LAT) se llevan a cabo diversas pruebas experimentales que requieren de una instalación adecuada para su respectiva realización. En el LAT se debe disponer del equipamiento y accesorios necesarios para realizar dichas pruebas, las cuales, representan condiciones a las que están sometidos normalmente, durante su operación, algunos componentes del sistema eléctrico. De igual forma, permiten observar algunos de los fenómenos producidos por la generación, transformación y la distribución de la energía eléctrica en altos niveles de tensión [5].

Parte importante del LAT son los equipos que conforman los montajes propuestos en la guía del Laboratorio como lo son los equipos de medida y los equipos de generación de tensión; los cuales son conectados conforme lo indique la práctica. Además, la mayoría de estos equipos llevan en servicio el mismo tiempo de funcionamiento del Laboratorio, por ende, su condición ha venido siendo afectada por la falta de mantenimiento, poca limpieza o por distintos factores como envejecimiento de los componentes, esfuerzos mecánicos, eléctricos, térmicos o climáticos; que hacen que presenten falencias en su funcionamiento. Cuando esto sucede, las medidas tienden a ser poco confiables y se ve reflejado en la calidad de los resultados.

En este trabajo de grado, se estudió el capítulo 2 del informe final del trabajo de investigación “Diseño y construcción de una línea de transmisión enmallada para estudios de transmisión de potencia a muy altas tensiones” elaborado por el profesor Julio Rugeles Jones [4], en donde se plantea un sistema de medida de pérdida corona, para este caso de estudio, se empleará dicho procedimiento para medir la corriente en la línea enmallada (configuración coaxial) del LAT.

Se plantea la realización de este procedimiento ya que se cuenta con la disponibilidad de los equipos que lo conforman puesto que la mayoría se encuentran desde el funcionamiento del laboratorio. Además, la verificación de los equipos de medida asociados a esta práctica es de gran importancia debido a que varios de estos equipos no tenían uso en otra práctica del laboratorio o se encontraban en condiciones poco favorables para su implementación. Esta verificación se hará con la finalidad de comprobar el funcionamiento de cada uno de ellos, corroborar la función que cumplen en el montaje, asegurar que trabajen a las condiciones del Laboratorio y por ende que operen dentro de las tolerancias establecidas para su uso.

Adicionalmente, se tomarán las medidas de corriente para diferentes niveles de tensión con el propósito de analizar sus resultados y así mismo, comparar la tensión de alimentación a partir de los divisores disponibles en el laboratorio. Además, estas mediciones de corriente, podrían ser utilizadas para la estimación de las pérdidas de potencia asociada al fenómeno corona. Este tipo de medidas se realizaron con el fin de que esta sea una práctica operativa disponible en el LAT. Finalmente, se busca que este procedimiento forme parte de la guía para los estudiantes del Laboratorio a fin de ampliar y consolidar los fundamentos teóricos del fenómeno corona. La formación del estudiante en este Laboratorio juega un papel importante pues le permite desarrollar sus propias competencias y tener un aprendizaje más significativo de los conceptos asociados con la temática mediante la parte experimental.

Capítulo 1

OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Medir corrientes en la configuración coaxial del Laboratorio de Alta Tensión de la UIS.

1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ❖ Verificar el funcionamiento de los equipos de medición de tensión y corriente asociados a la configuración coaxial del Laboratorio de Alta Tensión.
- ❖ Tomar medidas de corriente en la configuración coaxial a diferentes niveles de tensión.
- ❖ Contrastar la tensión de alimentación aplicada a la configuración coaxial a partir de diferentes divisores de tensión.

Capítulo 2

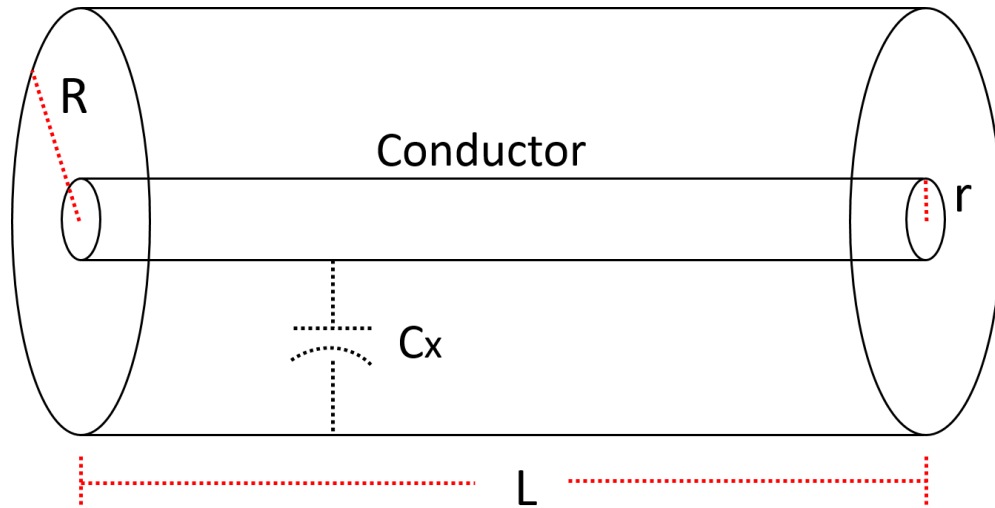
METODOLOGÍA DE MEDICIÓN

Actualmente el LAT dispone entre el Manual de prácticas de laboratorio [5] una práctica que tiene como objeto de prueba la configuración coaxial (línea enmallada), la cual permite al estudiante observar y comprender los efectos asociados a la presencia del fenómeno corona en los conductores. Para este caso de estudio, se implementa una metodología para la medición de corriente en la línea enmallada a diferentes niveles de tensión.

2.1. OBJETO DE ENSAYO

En la Figura 2.1 se puede observar el esquemático empleado, el cual, consta de una línea corta monofásica cubierta por una sección enmallada de forma cilíndrica sobre la cual se efectúan las medidas. Así mismo, el conductor se sitúa en el centro de la jaula enmallada y se tensionan sus extremos eliminando en lo posible cualquier flecha en la sección de la malla, permitiendo que el conductor sea lo más paralelo a la superficie del suelo [2]. Se utilizó el conductor FLINT ¹ en conformación de un solo conductor. La configuración coaxial permite observar uno de los fenómenos eléctricos más comunes en las líneas de alta tensión.

Figura 2.1: Esquema de línea corta enmallada.



Donde:

- C_x . Representación de la capacitancia de la línea enmallada .
- R . Radio del cilindro enmallado.
- r . Radio del conductor.
- L . Longitud del conductor. ¹

2.2. METODOLOGÍA DE MEDICIÓN.

Para el desarrollo de este trabajo de grado, se tomó como base el informe final del trabajo de investigación “Diseño y construcción de una línea de transmisión enmallada para estudios de transmisión de potencia a muy altas tensiones” elaborado por el profesor Julio Rugeles Jones [4]. En este trabajo, se sugieren dos metodologías para implementar un sistema de medida de las pérdidas de potencia debido al efecto corona o también denominada pérdidas corona, en una línea corta enmalla de alta tensión del LAT.

Cabe mencionar que se empleará el procedimiento más adecuado para la estimación de la corriente en la configuración coaxial, pues para este caso de estudio, no se tendrá en cuenta para la medición de las pérdidas corona. Para ello, este montaje será sometido a las condiciones (tensión alterna variable) en las que se percibe el efecto corona, fenómeno que da lugar a una corriente producto de la ionización

del aire que rodea al conductor ante las variaciones de tensión. Así mismo, dicha corriente será estimada y registrada en el equipo de medida para luego ser contrarrestada con la corriente calculada a partir de las demás mediciones realizadas en el procedimiento.

Para estimar la corriente corona debido al efecto corona se plantearon las siguientes metodologías:

- Método amplificador diferencial y vatímetro.
- Método directo con vatímetro.

El montaje para las metodologías propuestas en el trabajo de investigación del profesor Julio Rugeles, es modificado, puesto que para dicho procedimiento se dispone de un vatímetro (W) para indicar el consumo de potencia que se presenta para cada lectura de tensión. Por ende, este componente es eliminado debido a que el objetivo del trabajo no es la medición de las pérdidas corona en la línea enmallada.

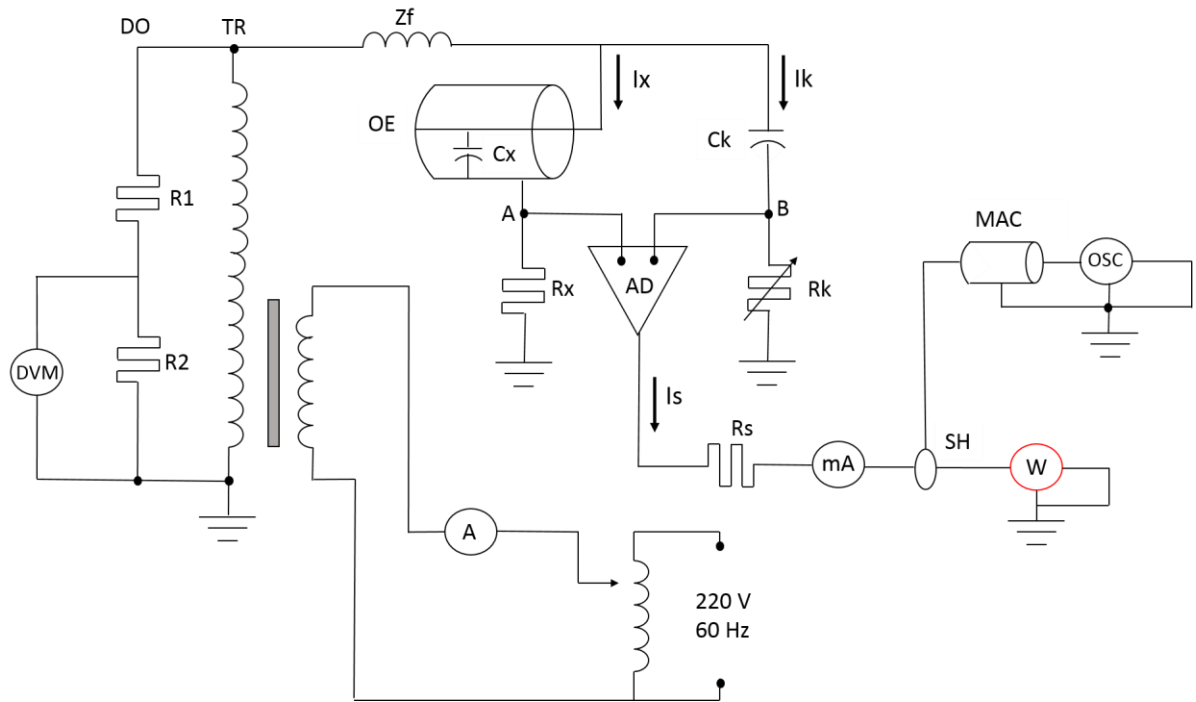
2.2.1 Método amplificador diferencial.

El montaje se observa en la figura 2.2. Al no presentarse corona, las corrientes a través de C_k (condensador de acoplamiento) y C_x (capacitancia de la sección enmallada) se compensan por medio de las resistencias de calibración R_k y R_x de modo que a la salida del amplificador diferencial no se estime medida de tensión y, por ende, de corriente. Al presentarse corona, se evidencia una componente óhmica no compensada (corriente corona) y el amplificador diferencial produce una tensión proporcional a esta descompensación. Por medio del módulo amplificador de corriente (MAC) y la Sonda hall (SH) se obtiene un registro de corriente. Los registros de corriente y tensión son almacenados en la memoria del osciloscopio para luego ser procesados [4].

La condición necesaria para la implementación de esta metodología es disponer del condensador de acoplamiento, el cual restringe la tensión de alimentación a un máximo de 130 kV (130 % sobre la tensión nominal del condensador) debido a la limitación en la corriente del transformador elevador. De igual forma, este equipo está libre de descargas parciales por lo menos hasta su tensión máxima específica [4].

¹Las especificaciones del objeto de ensayo, se encuentran en el Anexo A.

Figura 2.2: Montaje para medir la corriente corona con amplificador diferencial.



Donde:

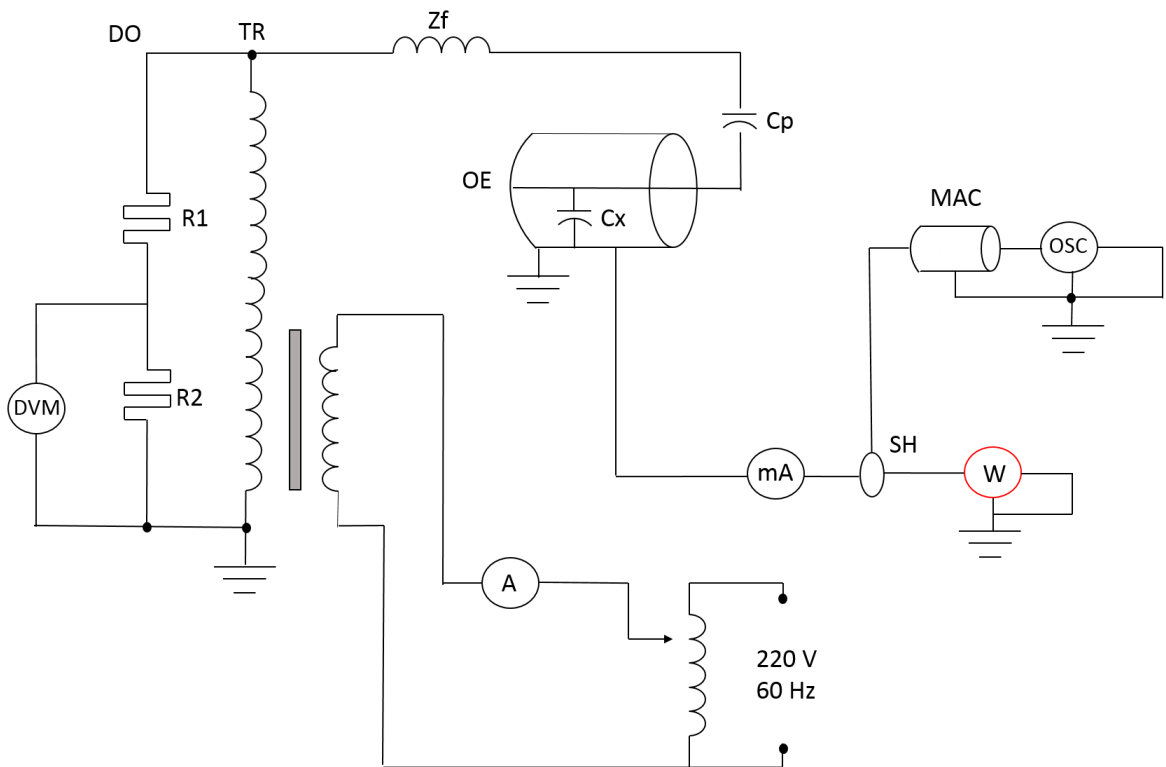
- OE.* Objeto de ensayo.
- TR.* Transformador elevador de corriente alterna.
- DO.* Divisor de tensión óhmico.
- C_x.* Capacitancia de la línea enmallada.
- Z_f.* Choque para alta frecuencia.
- R_s.* Resistencia para limitar corriente salida del amplificador.
- SH.* Sonda hall.
- MAC.* Módulo amplificador de corriente.
- mA.* Miliamperímetro digital.
- A/D.* Amplificador diferencial.
- DVM.* Multímetro digital.
- R_x, R_y.* Resistencias de calibración.²

²Las especificaciones de los equipos en general, se encuentran en el Anexo A.

2.2.2 Método directo.

El montaje se indica en la Figura 2.3. La condición para la implementación de esta metodología es tener la configuración coaxial aislada a tierra para de esta manera obtener un registro de corriente. Así mismo, se utiliza el módulo amplificador de corriente (MAC) y Sonda Hall (SH) con el propósito mencionado anteriormente. Como no se utiliza el condensador de acoplamiento, no se da el principio de compensación, por ende, la corriente medida en el miliamperímetro o registrada en el osciloscopio no es justamente la corriente corona, sino que lleva además una componente capacitiva. De igual forma, al no efectuarse la amplificación de la corriente, como se obtiene en la metodología anterior, el comportamiento de esta medida es un poco errático cuando se trabaja a bajas tensiones [2] [4].

Figura 2.3: Montaje para medir la corriente corona según método directo.



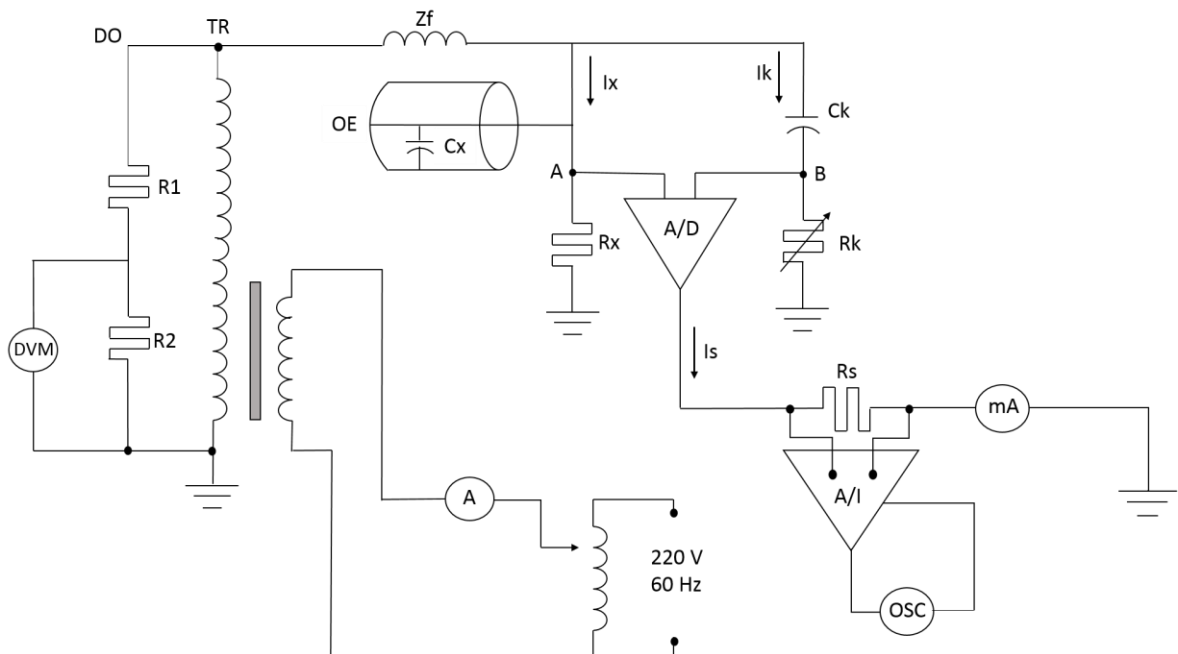
Teniendo en cuenta que la variable de la cual se quiere realizar las medidas es la corriente generada en la configuración coaxial, se consideró factible la implementación del método amplificador diferencial en comparación con el método directo.

Aunque este último es más sencillo, no efectúa la amplificación de la corriente por ende la estimación de esta medida es poco confiable en el rango de tensiones que se manejan en el LAT. De igual forma no es una medida que se pueda contrarrestar a partir de las demás mediciones realizadas en el montaje.

La corriente a estimar es del orden de μA por ende se utiliza la sonda Hall con el módulo amplificador de corriente, con los cuales se puede obtener un registro de este parámetro a la salida del amplificador diferencial. Es importante mencionar que tanto la sonda Hall como su módulo amplificador de corriente no fueron utilizados, ya que no se encontraban disponibles en su totalidad. Debido a que la variable a estimar (corriente) es de magnitud pequeña, se actualizó por un prototipo de medición mediante un amplificador de instrumentación, el cual se usa normalmente como amplificador de señal además de que permite trabajar con señales de continua muy pequeñas.

La figura 2.4 muestra el esquema del montaje modificado, el cual se implementó para la estimación de la corriente generada en la línea enmallada, donde se puede evidenciar los equipos que forman parte de este procedimiento.

Figura 2.4: Montaje para la estimación de corriente con amplificador de instrumentación.



Capítulo 3

VERIFICACIÓN EQUIPOS DE MEDIDA

Los equipos que forman parte del LAT, como equipos de medida y equipos de generación, permiten realizar diferentes prácticas de medición de acuerdo con las variables que se deseen estudiar. Para este caso, se centra en la disponibilidad y funcionamiento de los equipos de medida asociados con la práctica con el fin de conocer la condición del equipo, la fiabilidad de la medida y asegurar su operación.

3.1. MULTÍMETRO DIGITAL (mA.)

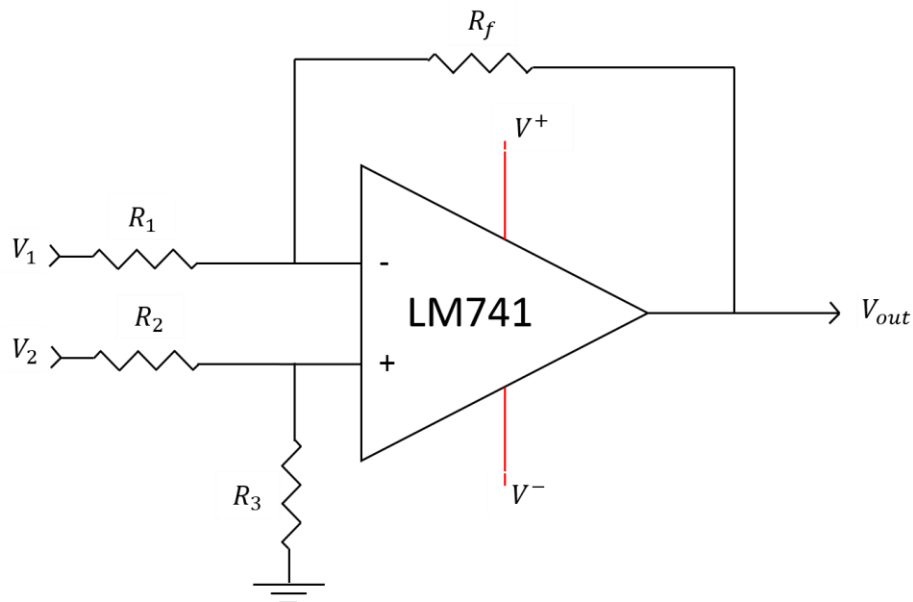
El multímetro es uno de los equipos más versátiles en un laboratorio pues se presta para medir dos o más valores eléctricos tales como tensión, corriente o resistencia. El multímetro DT-830 no se utilizaba en ninguna de las prácticas disponibles en el laboratorio. Su medición se empleará para contrarrestar la corriente que se estima de manera indirecta sobre la resistencia de salida del amplificador (R_s). Se utilizó este multímetro en lugar de los demás equipos disponibles en el laboratorio, debido a que su rango de corriente AC (0-200 μ A) era el más adecuado para estimar este parámetro en la metodología seleccionada pues al no abarcar como tal el tema de pérdidas corona, la medición de la corriente tendería a ser muy pequeña.

3.2. AMPLIFICADOR DIFERENCIAL (A/D).

El amplificador diferencial que se dispone es el LM741, cuyo esquema se muestra en la Figura 3.1. La función de este amplificador es suministrar una tensión proporcional a la descompensación de corriente que se presenta cuando al variar la tensión alterna en la configuración coaxial se genera corona. Este amplificador no

se encontraba operando en las prácticas que se realizan en el laboratorio, por ende, el estado de este equipo no era el más adecuado para ser utilizado debido a que las conexiones entre elementos y puntos de unión estaban endebles y contenían suciedad, los puntos de soldadura se encontraban agrietados y defectuosos, las bases que sostenían el esquema del amplificador presentaban envejecimiento y las pistas de cobre de la bakela estaban sueltas de la superficie.

Figura 3.1: Amplificador diferencial LM741.

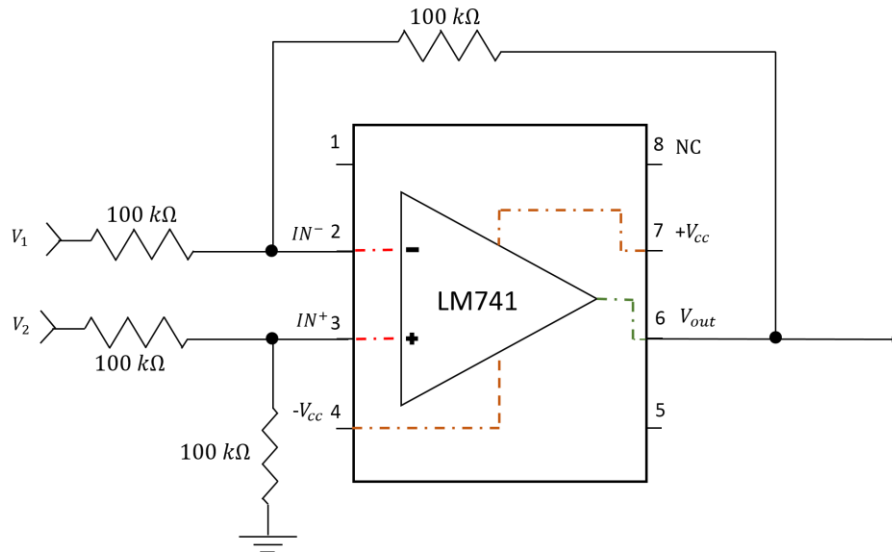


La ecuación (3.2.1) determina el valor de la tensión de salida en función de la ganancia, la cual se encuentra en la relación R_f/R_1 :

$$V_{out} = (V_2 - V_1) \cdot \left(\frac{R_f}{R_1}\right) \quad (3.2.1)$$

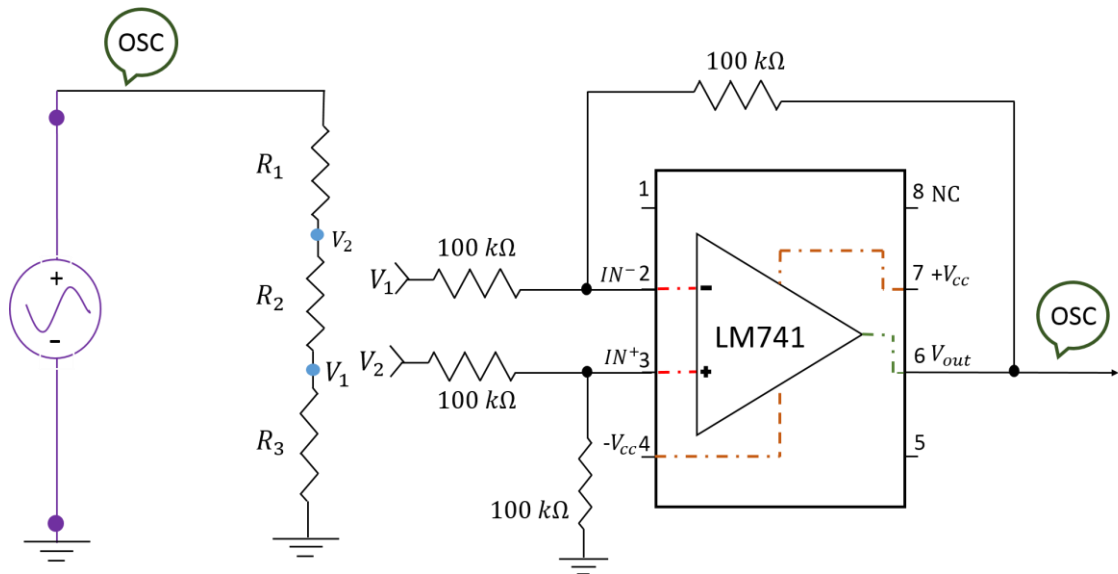
Se realizó la renovación completa de este amplificador utilizando resistencias de precisión manteniendo la misma configuración y valores estipulados en la Figura 3.2. La verificación de este amplificador se hizo a través del ancho de banda el cual permite conocer el comportamiento de la ganancia en el rango de frecuencias que el circuito deja pasar, sin atenuar la señal.

Figura 3.2: Esquema de la configuración del amplificador LM741.



El procedimiento es sencillo. Para la medición del ancho de banda del amplificador diferencial, se utilizó el circuito con ganancia unitaria (ganancia que es proporcional a la relación de resistencias implementadas en el montaje). Se inyecta una señal en la entrada y se mide su amplitud en la salida variando la frecuencia para distintos puntos del espectro con el fin de obtener el comportamiento de dicha señal.

Figura 3.3: Esquema para medir señal entrada-salida del amplificador LM741.



Por cuestiones de disponibilidad del generador de señales; se realiza un divisor de tensión que consta de 2 resistencias en serie ($R_1, R_2= 2,2 \text{ k}\Omega$). El esquema del circuito implementado se encuentra en la Figura 3.3. Según el fabricante este amplificador tiene un ancho de banda de 1,5 MHz y la tensión de entrada diferencial se polariza con $\pm 30 \text{ V}$ (alimentación dual)³. El generador de señales crea una señal senoidal aplicada en los extremos del divisor de tensión, la cual por medio del osciloscopio (OSC) se observa su comportamiento tanto en la entrada como en la salida del amplificador.

En la ecuación (3.2.2) se expresa la tensión de salida en función de la ganancia y así mismo de la relación de resistencias del divisor. Se reemplazan los respectivos valores quedando la ecuación (3.2.3).

$$V_{out} = (V_2 - V_1) \cdot \left(\frac{-R_2}{R_2 + R_1} \right) \cdot Gan \quad (3.2.2)$$

$$V_{out} = \frac{-V_{in}}{2} \quad (3.2.3)$$

Se inicia experimentando con una frecuencia de 1 kHz, con el fin de comprobar que la señal de salida sea aproximadamente la mitad de la entrada como se observa en la figura 3.4. Al trabajar con frecuencias menores, la magnitud de la señal se mantiene constante. Ahora se varía la frecuencia de la señal de entrada hasta notar un cambio con la salida.

Cuando se llega, por ejemplo, a una frecuencia de 200 kHz con la señal de entrada se puede evidenciar una diferencia en la salida. Como se puede ver en la figura 3.5, se mantiene la amplitud de la señal, y por ende la ganancia, pero la forma de onda empieza a atenuarse. Esto ocurre debido a la incapacidad del amplificador para seguir las variaciones que ocurren en la señal de entrada. Esta característica es conocida como **slew rate** y es especificada por el fabricante para cada amplificador operacional ³. (El comportamiento de los espectros de frecuencia para el amplificador se encuentran en el Anexo B.)

³INSTRUMENTS, Texas. Datasheet: LM741 Operational Amplifier. 2013.

Figura 3.4: Señal entrada-salida para frecuencia de 1 kHz.

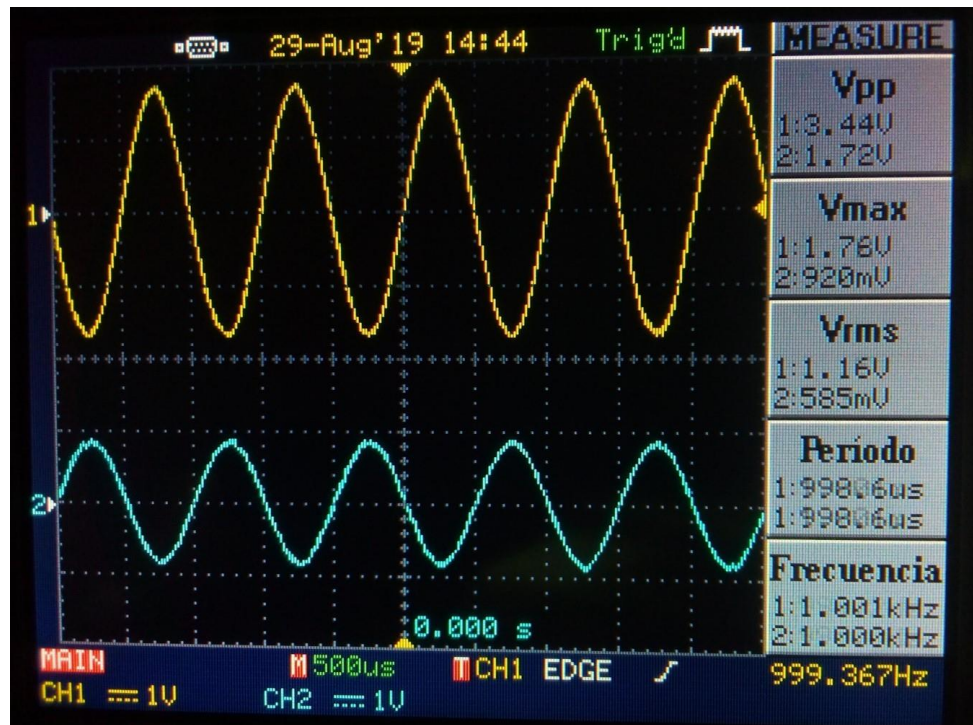
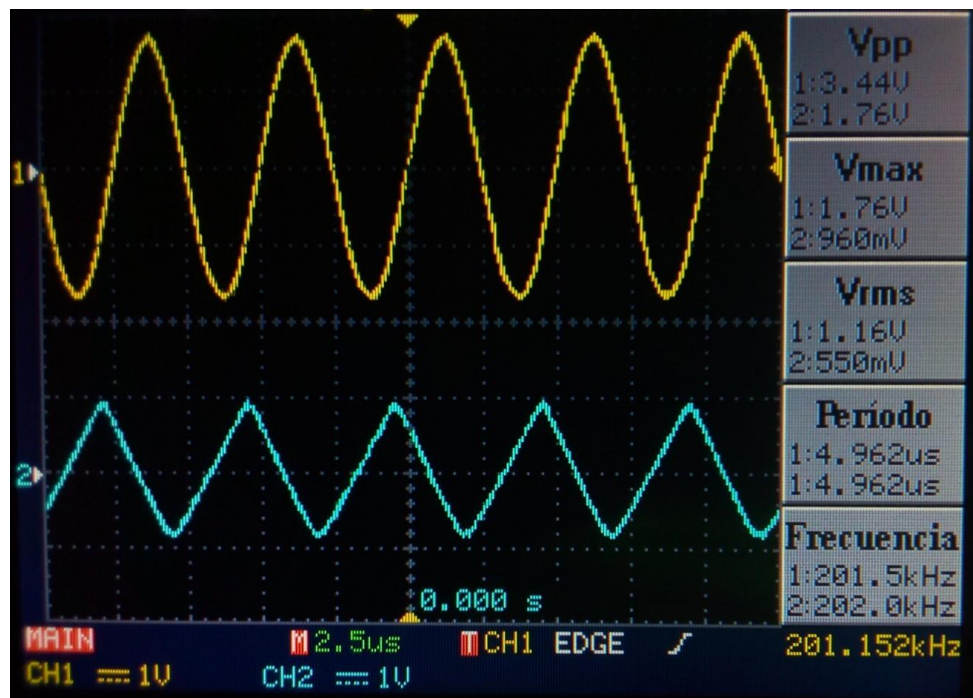


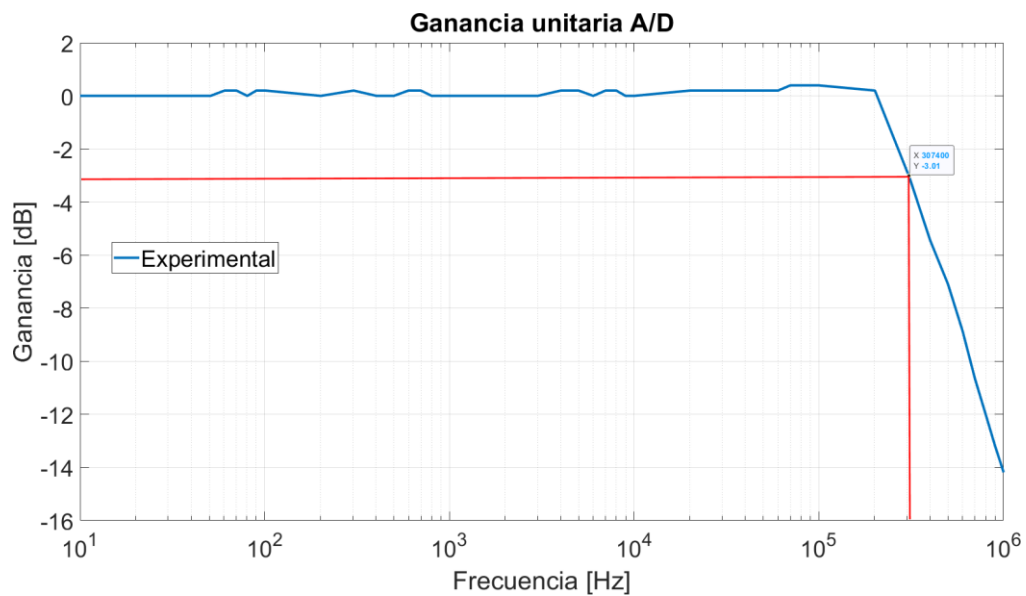
Figura 3.5: Señal entrada-salida para una frecuencia de 200 kHz.



Generalmente, el análisis de respuesta en frecuencia se muestra mediante la representación de la ganancia de tensión frente a una escala de frecuencias sobre la cual se espera que opere el circuito. La recopilación de los datos obtenidos, permite caracterizar el comportamiento y estabilidad del circuito ante las variaciones de la frecuencia mediante la representación semi-logarítmica de la curva de respuesta de frecuencia.

En la figura 3.6 se muestra la caracterización de la respuesta en frecuencia ante el cambio de la relación logarítmica de tensión. Por tratarse de un amplificador operacional, tiene un comportamiento constante hasta una frecuencia de corte superior (f_{cs}). Para encontrar la frecuencia de corte superior, se necesita encontrar el momento en que la tensión de entrada decae a 3 dB, es decir, cuando la salida se reduce aproximadamente 70 % respecto de la señal de entrada. En este caso se busca la f_{cs} en 1,216 V; para la cual resultó ubicarse en 307,36 kHz, por debajo de 1,5 MHz según lo especificado en la hoja de datos del amplificador.

Figura 3.6: Respuesta en frecuencia para ganancia unitaria.

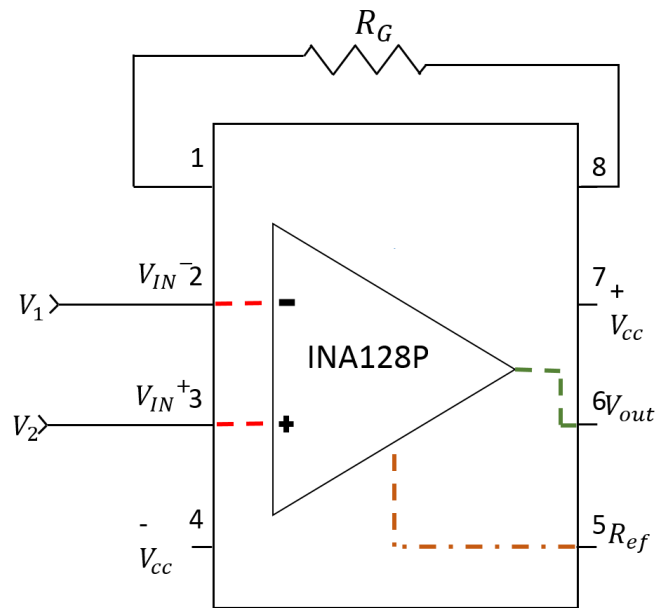


3.3. AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN (A/I).

El amplificador de instrumentación tiene características del amplificador diferencial, pues es creado a partir de amplificadores operacionales. La diferencia radica en que

este circuito tiene la facilidad de ajustar la ganancia con un solo componente, R_{tt} , evitando el ajuste de resistencias simultáneas. El amplificador de instrumentación utilizado fue el INA128, cuyo circuito esquemático se muestra en la Figura 3.7. En esta caso, como la señal de salida (corriente corona) que procesa el amplificador diferencial es de bajo nivel, este amplificador permite capturar y amplificar esta medición para poder observar su comportamiento durante la variación de la tensión de alimentación.

Figura 3.7: Esquema de la configuración del amplificador INA128.



La ganancia se establece mediante la configuración de una o varias resistencias, es decir, puede ser modificada y constante sobre una amplia banda de frecuencias. Este tipo de amplificador, tiene una ganancia diferencial estable, en el rango de 1 a 1000, según lo establecido por el fabricante ⁴.

$$G_R = 1 + \frac{50k\Omega}{R_G} \quad (3.3.1)$$

Se realizó la construcción de un prototipo de medición de tensión con base en este amplificador utilizando diferentes resistencias las cuales permitieran mediante la ecuación (3.3.1) obtener las ganancias establecidas. De igual forma, la verificación de este componente se hizo a través del ancho de banda. Para su verificación, se utilizó el circuito con ganancia unitaria.

En la tabla 3.1, se encuentran los valores que se implementaron para la resistencia externa R_{tt} , con el fin de obtener ganancias aproximadas a las que brinda este amplificador. De igual forma, contiene el intervalo de frecuencias a las que trabaja en cada una de las ganancias.

Tabla 3.1: Relación de la ganancia en función de R_{tt} .

Ganancia	R_{tt} [Ω]	Ganancia aprox.	Bandwidth [Hz]
1	∞	1	1300000
10	5100	10,804	700000
100	560	90,285	200000
1000	51	981,392	20000

La verificación de este componente se realizó igual que el circuito anterior. La figura 3.8 muestra el esquema implementado, el divisor de tensión está conformado por resistencias en serie utilizadas dependiendo de la ganancia a revisar. La tensión de entrada diferencial se polariza con ± 30 V (alimentación dual), según especificaciones del fabricante ⁴. Así mismo, el generador de señales crea una señal senoidal aplicada en los extremos del divisor de tensión, la cual por medio del osciloscopio (OSC) se observa su comportamiento tanto en la entrada como en la salida del amplificador.

En la ecuación (3.3.2) la tensión de salida se ve afectada por la relación de resistencias del divisor y la ganancia, que para este caso, depende de la variación de la resistencia.

$$V_{out} = (V_2 - V_1) \cdot \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \right) \cdot G_R \quad (3.3.2)$$

En la tabla 3.2 se encuentran los valores de resistencia utilizados en el divisor de tensión de acuerdo con la ganancia seleccionada.

⁴INSTRUMENTS, Texas. Datasheet INA128,[En línea].

Figura 3.8: Esquema para medir tensión entrada-salida del INA128.

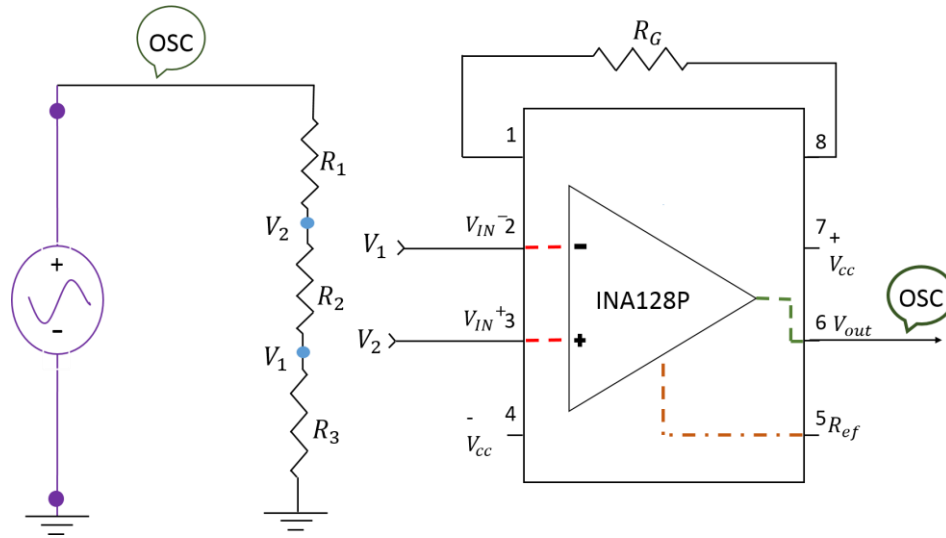


Tabla 3.2: Relación de resistencias en el divisor.

Ganancia	R₁ [kΩ]	R₂ [kΩ]	R₃ [kΩ]
1	100	100	-
10	100	100	-
100	100	0,1	100
1000	100	0,1	100

Para una ganancia unitaria, se inicia experimentando con una frecuencia de 1 kHz y se comprueba que la señal de salida es aproximadamente la mitad de la entrada como se observa en la figura 3.9. Al trabajar con frecuencias menores, la magnitud de la señal se mantiene constante. Ahora se varía la frecuencia de la señal de entrada hasta notar un cambio en la salida.

Al llegar, por ejemplo, a una frecuencia de 100 kHz con la señal de entrada se puede evidenciar que la onda de salida no se atenúa, es decir, tiene la capacidad de comportarse ante las variaciones de frecuencia, rechazar las señales de ruido-interferencia y amplificar únicamente la diferencia entre las entradas. Como se puede ver en la figura 3.10, la amplitud de la señal empieza a disminuir, y por ende la ganancia.

Figura 3.9: Ganancia unitaria amplificador de instrumentación.

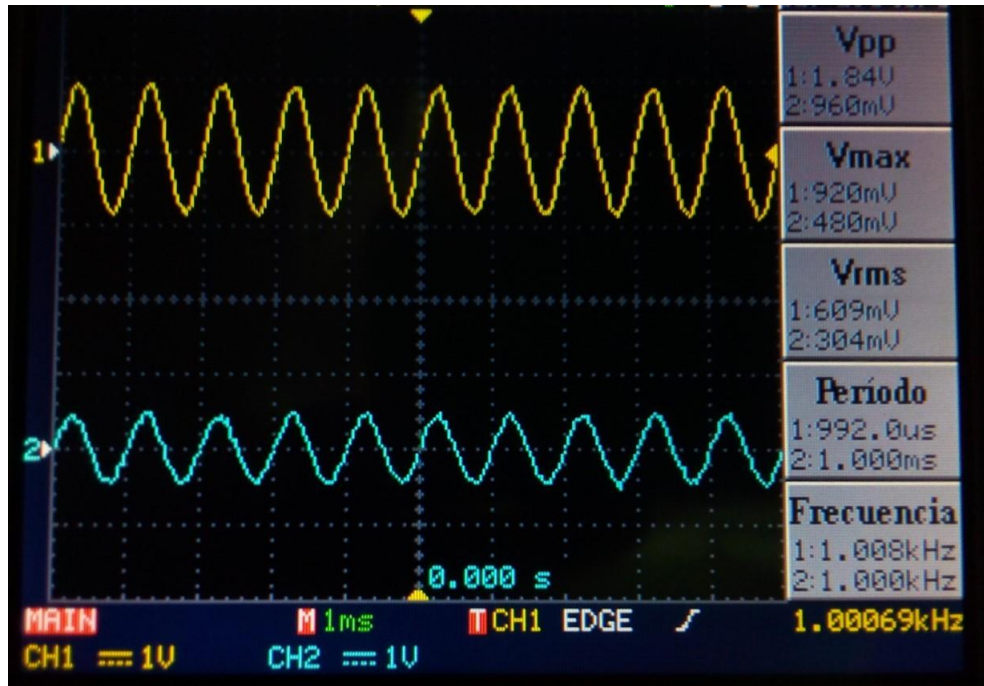
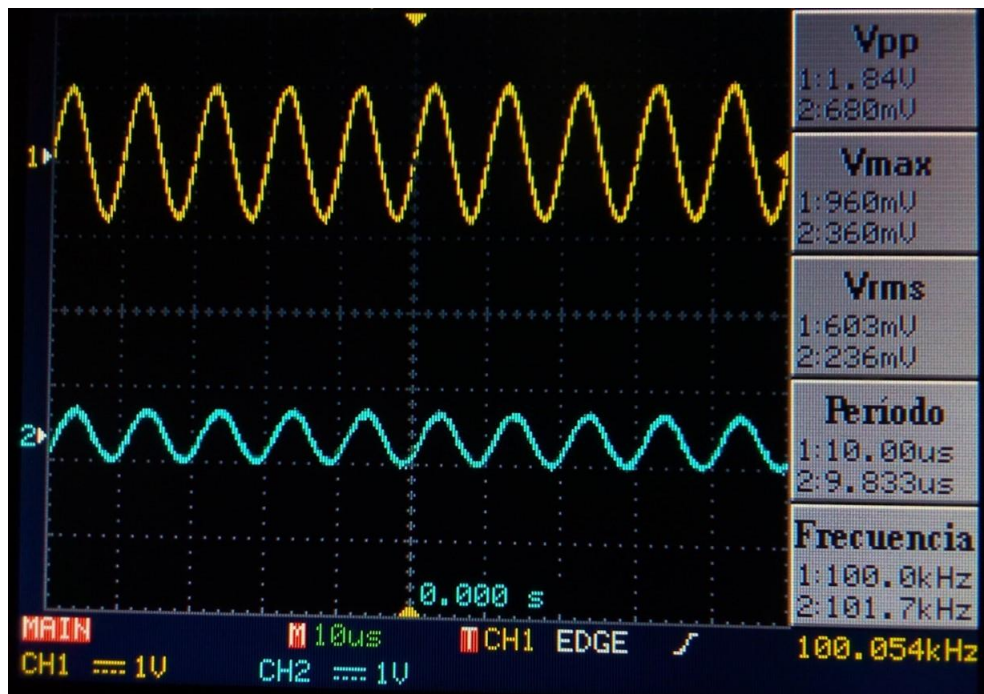


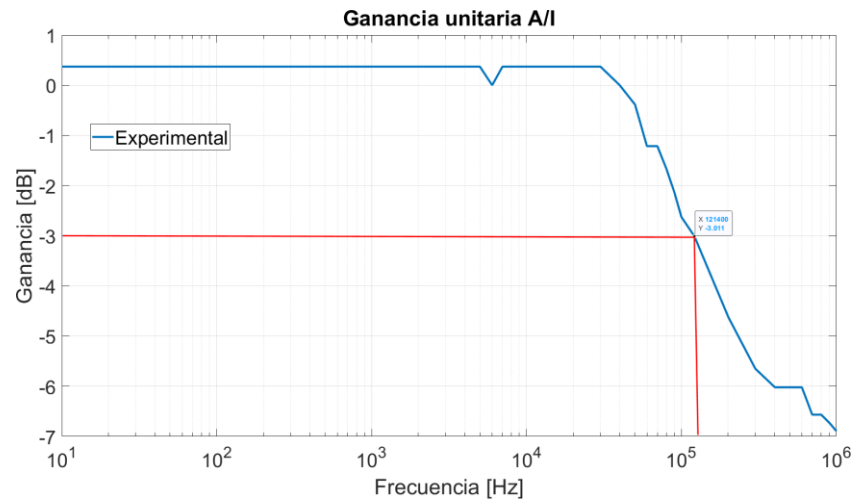
Figura 3.10: Ganancia unitaria amplificador de instrumentación.



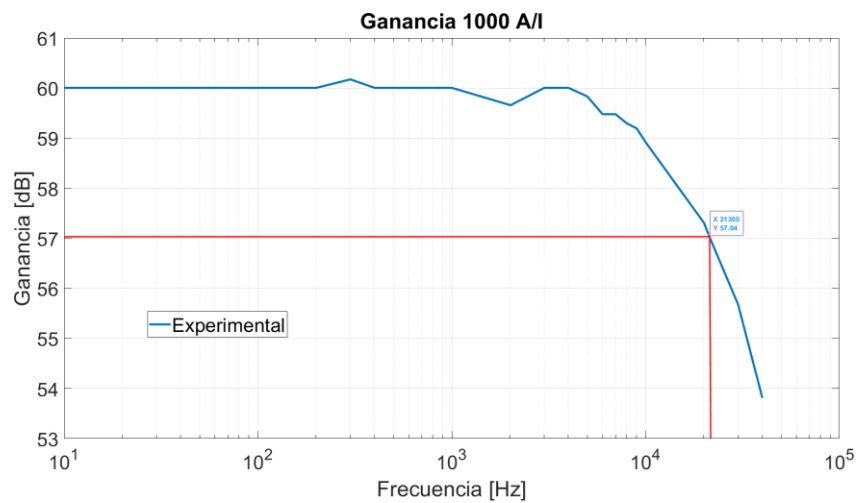
En la figura 3.11 se muestra la caracterización de la respuesta en frecuencia ante el cambio de la relación logarítmica de tensión. De igual forma al tratarse de un amplificador operacional, su comportamiento es constante hasta una frecuencia de corte superior.

Así mismo, para encontrar la f_{cs} , se encuentra el momento en que la tensión de salida se reduce aproximadamente 70 % respecto de la señal de entrada. En este caso, para ganancia unitaria, sección (a), se busca una f_c ubicada aproximadamente en 0,65 V; para la cual resultó ubicarse en 121,44 kHz, por debajo de 1,3 MHz según lo especificado en la hoja de datos del amplificador. De igual forma, se verificó con las demás ganancias establecidas en el amplificador puesto que la corriente a medir es de magnitud pequeña y es probable que requiera de la implementación de una ganancia mas alta. Se sitúa el ejemplo para una ganancia de 1000, sección (b), se busca una f_c ubicada aproximadamente en 2,9 mV para la cual resultó ubicarse en 21,95 kHz, por encima de 20 kHz según lo especificado en la hoja de datos del amplificador. Se puede evidenciar que el comportamiento del amplificador es el que se esperaba pues tiene una ganancia diferencial constante en un rango amplio de frecuencias. (El comportamiento de los espectros de frecuencia para cada ganancia se encuentran en el Anexo C).

Figura 3.11: Respuesta en frecuencia amplificador de instrumentación.



(a). Ganancia unitaria amplificador de instrumentación.



(b). Ganancia 1000 amplificador de instrumentación.

Capítulo 4

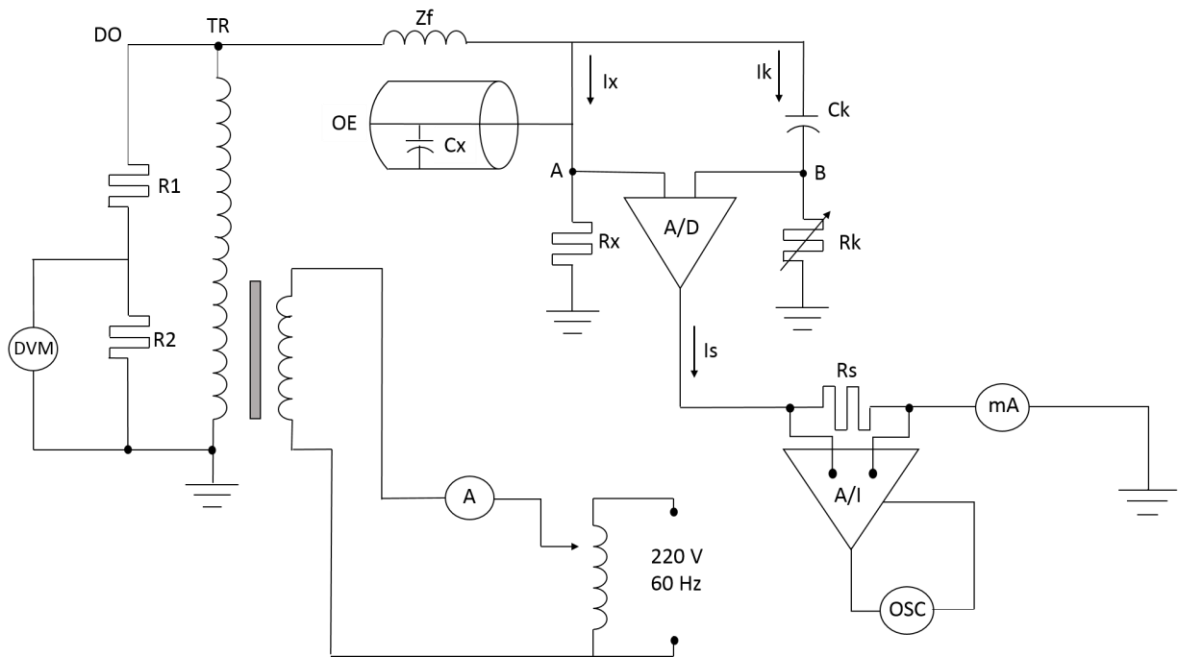
PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS

Realizada la verificación y disponibilidad de los equipos, se implementa la metodología del amplificador diferencial, la cual resultó ser la más adecuada respecto a las condiciones de trabajo del LAT. Para la realización de esta metodología, se cuenta con un procedimiento el cual permite conocer la implementación de los equipos, los puntos de conexión de los equipos de medida y bajo que criterios funciona para la obtención de medición de la corriente. De igual forma, se presenta la toma de los resultados de las mediciones y el tratamiento de los mismos con el fin de obtener los resultados preliminares.

4.1. MÉTODO AMPLIFICADOR DIFERENCIAL.

Esta metodología es adaptada de la metodología para estimar la corriente corona en la configuración coaxial disponible en el LAT, la cual se basa en el principio de compensación de las corrientes capacitivas que circulan tanto en la malla como por el condensador de acoplamiento, de tal manera que cualquier descompensación que se presente se debe a la presencia de la corriente corona. En la figura 4.1 se presenta el montaje para la estimación de corriente en la configuración coaxial del LAT utilizando el mA y el A/I .

Figura 4.1: Montaje para la estimación de corriente con amplificador de instrumentación.



4.1.1 Calibración. Se realizó el montaje de la figura 4.2, donde se dispone de las resistencias R_x y R_k , las cuales son cajas de resistencias que permiten balancear el circuito antes de la presencia de corona. Una vez el sistema se encuentre energizado, se aplicó una tensión de 30 kV (valor de tensión al cual no se presenta corona que proporcione una medición razonable o representativa) para calibrar el sistema y por consiguiente:

$$V_{AT} = V_{BT} \quad (4.1.1)$$

$$I_x \cdot R_x = I_k \cdot R_k \quad (4.1.2)$$

Donde:

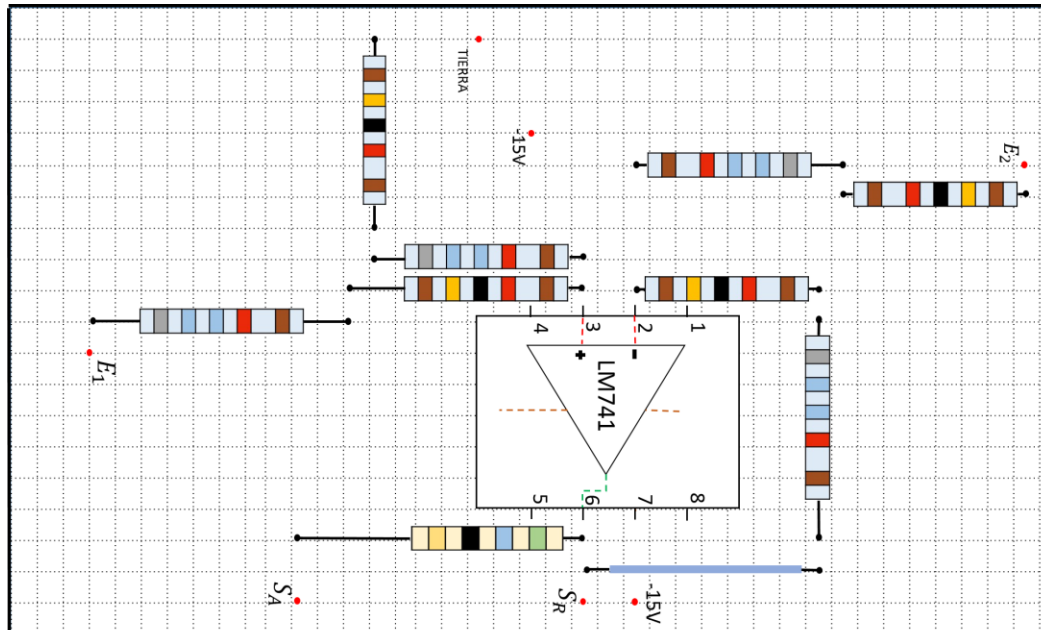
I_x = Corriente circulada por la malla.

I_k = Corriente circulada por el condensador de acoplamiento.

En el montaje, se fija R_x en 1000 Ω y se ajusta R_k de tal manera que a la entrada del amplificador diferencial se estimen 0 voltios ($V_{AB}=0$). Se midieron $V_{AB}= 0,025$ V para una $R_k = 72,6$ Ω .

En la figura 4.2 se encuentra el circuito del amplificador diferencial utilizado con sus respectivos puntos de conexión. Como se mencionó anteriormente, se utilizaron resistencias de precisión con valores de $100\text{ k}\Omega$, las cuales se formaron con resistencias en serie de $R_1 = 13,6\text{ k}\Omega$ y $R_2 = 86,6\text{ k}\Omega$. De igual forma, la resistencia de salida del amplificador, R_s , se fija en $56\ \Omega$.

Figura 4.2: Circuito del amplificador diferencial (A/D) con sus puntos de conexión.



En la tabla 4.1 se dispone de las conexiones que se presentan entre los respectivos puntos de conexión que se encuentran en el amplificador diferencial (A/D) y los equipos que conforman el sistema de montaje.

Tabla 4.1: Puntos de conexión LM741.

Punto de conexión	Montaje Sistema
E_1	C_x
E_2	C_k
S_R	V_{IN+} de INA128
S_A	V_{IN-} de INA128

En la figura 4.3 se encuentra el circuito del amplificador de instrumentación (A/I) con sus componentes y las respectivas conexiones que permiten, dependiendo de la ganancia, amplificar la señal de salida proveniente del amplificador diferencial. En la tabla 3.1 se encuentran los valores de las resistencias implementadas. De igual forma, se dispone de un trimmer (resistencia ajustable) de 2 k Ω .

4.1.2 Medición de corriente. Después de realizar la calibración para determinar el valor de R_k , se dispuso conectar al sistema estos amplificadores con su respectiva fuente de alimentación, donde el LM741 se alimentó con 29,68 V y el INA128 se alimentó con 18,14 V.

Para realizar la medición, se alimentó la configuración coaxial a diferentes niveles de tensión, controlada a través de la consola de mando del transformador, la cual está compuesta por un auto-transformador que permite realizar estas variaciones de tensión de forma gradual mediante un tap de transformación (volante). La lectura de los niveles de tensión establecidos, se hizo mediante el osciloscopio digital por el lado de baja tensión del divisor de tensión resistivo, R_2 , el cual permite medir de forma indirecta la tensión en el lado de alta del transformador elevador.

Al aumentar la tensión, la corriente de la línea monofásica presenta dos componentes: una óhmica (correspondiente a las pérdidas corona) y otra capacitiva (debida a la capacitancia de la malla). Volviendo a la figura 4.2, la corriente de la línea se expresa:

$$I_x = I_{x_{ohmica}} + I_{x_{capacitiva}} \quad (4.1.3)$$

Por consiguiente el amplificador diferencial lee:

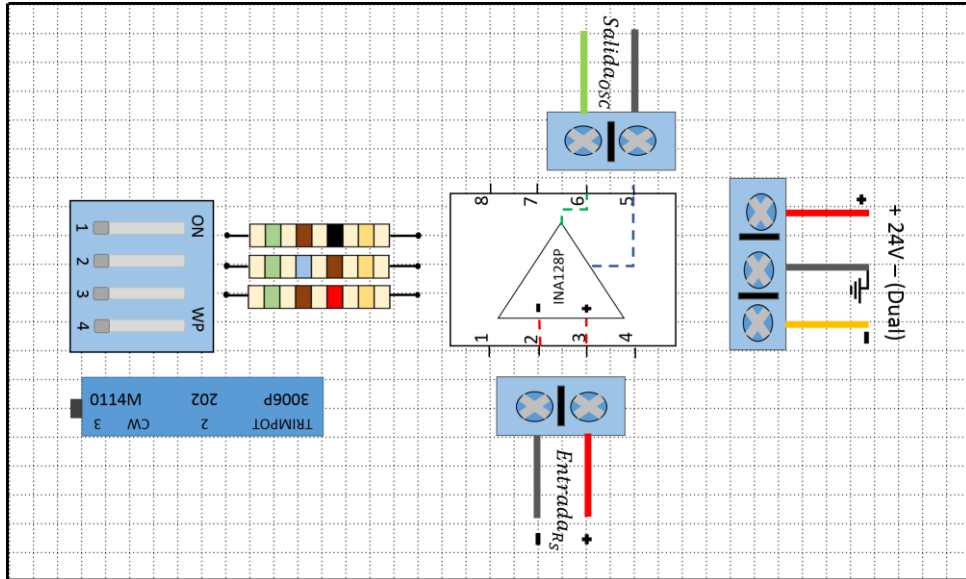
$$V_{AB} = I_s \cdot R_s \quad (4.1.4)$$

$$V_{AB} = I_x \cdot R_x - I_k \cdot R_k \quad (4.1.5)$$

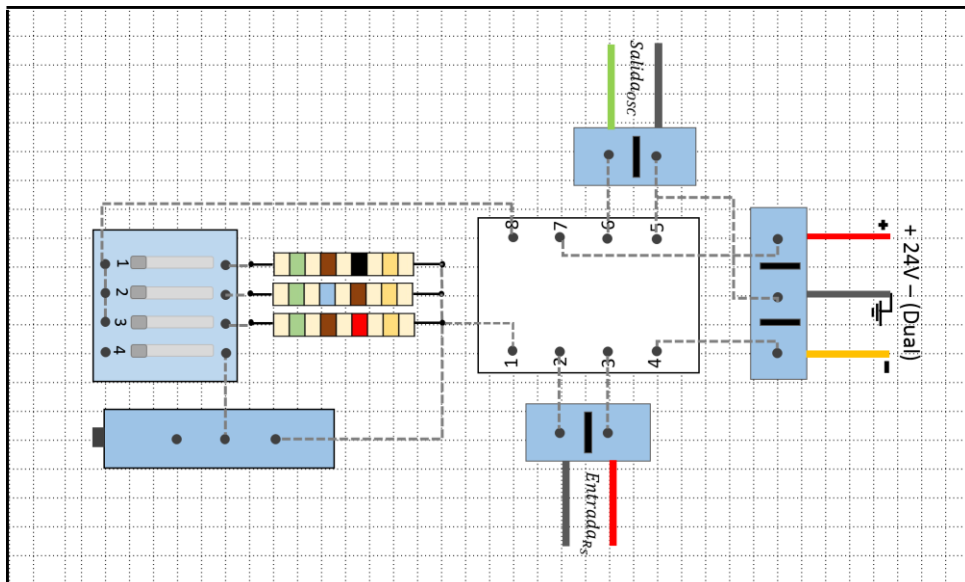
Donde:

$$V_{AB} = [I_{x_{ohmica}} + I_{x_{capacitiva}}] \cdot R_x - I_k \cdot R_k \quad (4.1.6)$$

Figura 4.3: Elementos y puntos de conexiones del amplificador de instrumentación (A/I).



(a). Elementos de conexión.



(b).Puntos de conexión.

$$V_{AB} = I_{X_{ohmica}} \cdot R_x + I_{X_{capacitiva}} \cdot R_x - I_k \cdot R_k \quad (4.1.7)$$

Pero en la ecuación (4.1.2) se tiene que $I_k \cdot R_k = I_{X_{capacitiva}} \cdot R_x$, debido a que en la parte de calibración solo existe componente capacitiva. Al reemplazar (4.1.2) en (4.1.7) se tiene :

$$V_{AB} = I_{X_{ohmica}} \cdot R_x \quad (4.1.8)$$

De esta forma se puede medir la señal de salida del amplificador diferencial, es decir, la corriente.

$$I_{ohmica} = \frac{V_{AB}}{R_x} \quad (4.1.9)$$

Igualando las ecuaciones (4.1.4) y (4.1.8) se obtiene:

$$I_{ohmica} = I_s \cdot \left(\frac{R_s}{R_x} \right) \quad (4.1.10)$$

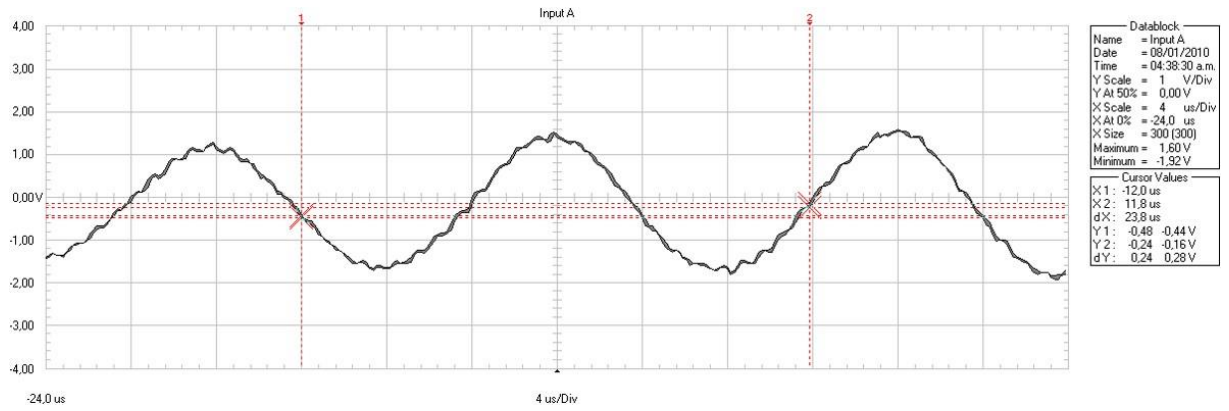
Los resultados obtenidos según el procedimiento implementado se encuentran en la tabla 4.2, la cual contiene la información extraída de cada nivel de tensión. Como se puede observar, en ella se tiene la lectura contrarrestada por el lado de baja del divisor de tensión, *Tension de baja*, la cual se obtiene a partir de la división de la tensión de alimentación con la relación de transformación del divisor resistivo (1055), el registro de corriente I_s lectura directa en el multímetro digital (*mA*) y la lectura de tensión $Tension_{OSC}$ almacenada en la memoria del osciloscopio proveniente del amplificador de instrumentación (*A/I*) como se observa en la figura 4.4. (Las señales de tensión para cada nivel de tensión, se encuentran en el Anexo D).

Por medio de la información suministrada de la señal del osciloscopio, se estimó la tensión derivada en la entrada del amplificador de instrumentación $Tension R_s$, la cual se calculó a partir de la división de dicha tensión con la ganancia aproximada del amplificador de instrumentación (981,4). Mediante la tensión obtenida se realizó un cálculo teórico de la corriente que circula por la resistencia de salida del amplificador diferencial I_{rs} , con el fin de obtener de una manera aproximada el valor de corriente y así contrarrestar estos resultados con las lecturas de corriente obtenidas.

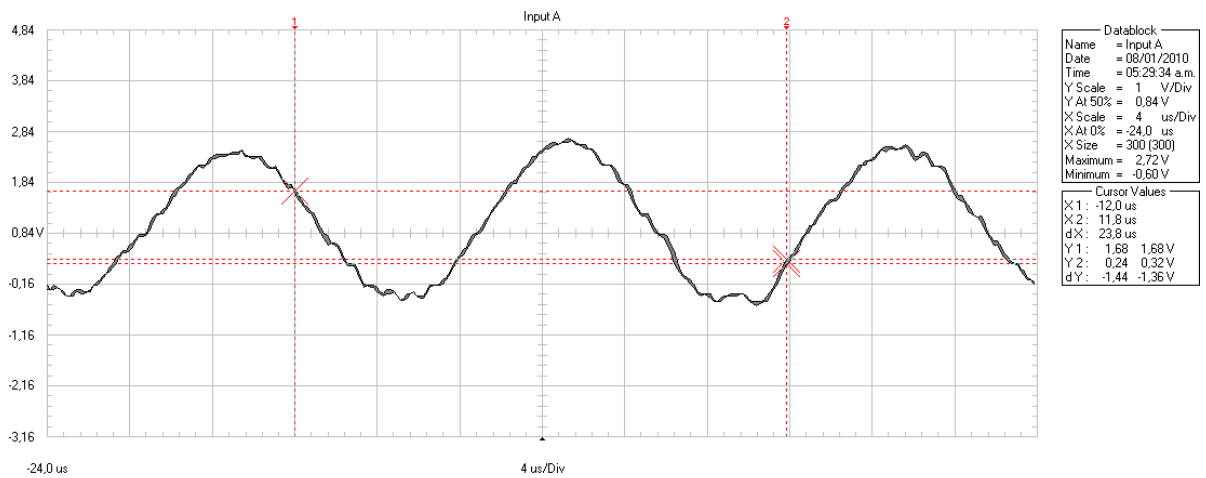
Tabla 4.2: Resultados estimación de corriente corona.

Tensión de Alta [kV]	Tensión de Baja [V]	I_s [μ A]	Tensión OSC [V]	Tensión R_s [mV]	I_{rs} [μ A]	Frecuencia [kHz]
10	9,44	4,8	1,36	1,39	24,75	62,5
20	18,4	7,9	1,60	1,63	29,11	62,5
30	28,17	11,2	2,44	2,49	44,39	59,5
40	37,88	14,4	2,52	2,57	45,85	60,24
50	47,35	17,6	2,40	2,45	43,67	73,5
60	56,64	20,8	2,72	2,77	49,49	73,5
70	66,6	24,2	2,96	3,02	53,86	62,5

Figura 4.4: Señal de tensión medida en la salida del AI.



(a). Señal de tensión salida OSC para una alimentación de 20 kV.

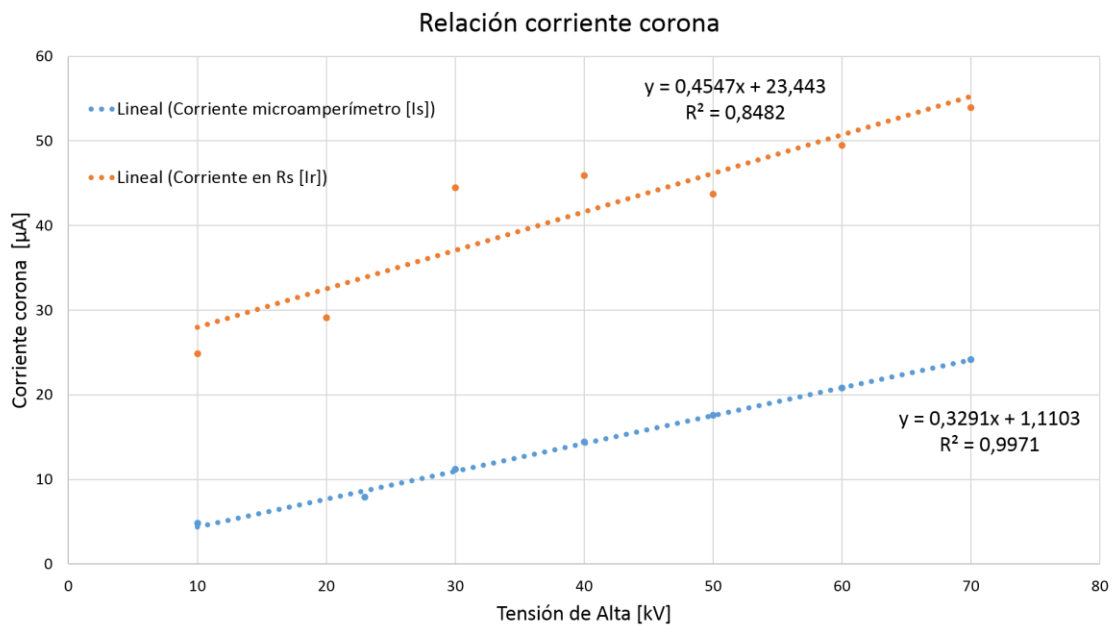


(b). Señal de tensión salida OSC para una alimentación de 60 kV.

Frecuentemente es necesario hacer ajustes de modelos lineales a los resultados de mediciones, cuando una de las variables medidas depende de otra de ellas. En estas situaciones, la información que debe obtenerse son los parámetros que caracterizan a la función que debe relacionar ambas variables. El caso más simple es una relación lineal, en la que deben determinarse como parámetros la pendiente y la ordenada al origen de una recta ⁵.

Como se observa en la figura 4.5, cada par de datos tiene su respectiva ecuación de regresión lineal donde se puede evidenciar que la razón de cambio y la correlación entre ellas difieren dentro de un rango aceptable. Por ello, se establece que la diferencia de estas medidas están asociadas a los equipos.

Figura 4.5: Relación de corriente para las medidas registradas.



Al comparar las corrientes obtenidas se puede observar que su comportamiento es proporcional al aumento o cambio de tensión, es decir, la corriente va aumentando a medida que la tensión va creciendo debido a la relación que se establece en la ley de Ohm, para este caso, la resistencia se representa por medio de la impedancia o reactancia capacitiva de la línea enmallada la cual se mantiene constante, pues se utilizó un único conductor ($V = I_{corona} \cdot Z = I_{corona} \cdot X_C$). Es importante destacar que la frecuencia para los niveles de tensión trabajados se mantuvieron en el rango de

60-70 kHz . A pesar de que los valores obtenidos no tienen similitud en cuanto a su magnitud; si presentan el mismo comportamiento, es decir, la misma tendencia.

Al conocer los resultados de la estimación de corriente, es posible dar una indicación cuantitativa de la calidad del resultado para tener una idea de la confiabilidad de la medida mediante la evaluación de la incertidumbre. En esta ocasión, este parámetro no es factible debido a que el microamperímetro, como se mencionó anteriormente, es un equipo que no tenía implementación en el LAT, es viejo y además hay que agregar que no se le conoce certificado de calibración, por ende, no se le puede hacer una trazabilidad de sus medidas. De igual forma, no dispone de un patrón de operación con el cual se pueda revisar de manera rutinaria tanto el equipo como las medidas. Cabe resaltar, que el microamperímetro se implementó ya que dentro de los equipos utilizados en el LAT, es el único disponible que tiene el rango de medición requerido para este procedimiento, el orden de μA . El otro es un prototipo, el cual es una medida que depende de manera indirecta de la medición de tensión realizada en el OSC, por ende el aseguramiento y la trazabilidad de la medición no se puede establecer.

4.2. RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN DE LOS DIVISORES DE TENSIÓN.

La medición de tensión en las diferentes prácticas en el LAT, se realizan de forma indirecta por medio de un divisor, el cual permite calcular la tensión en el lado de alta tensión del transformador elevador. Actualmente, se cuenta con 2 tipos de divisores, uno resistivo y otro capacitivo, donde cada uno de ellos tiene una relación proporcionada por el fabricante o obtenidas de una calibración previa. Cabe resaltar que debido al tiempo que llevan en funcionamiento y su continuo uso, han ocasionado que dicha relación pueda no conservar su valor original.

$$R_{\text{capacitivo}}: 720,5 : 1. \text{ }^6$$
$$R_{\text{resistivo}}: 1055 : 1. \text{ }^7$$

⁵DEL CAMPO, Javier Miranda Martín. Evaluación de la incertidumbre en datos experimentales.

⁶Relación suministrada por el fabricante.

⁷Relación estimada en el LAT.

4.2.1 Divisor resistivo. Su diseño varía de acuerdo con el tipo de tensión que se quiere implementar, en este caso, las mediciones se realizan en corriente alterna. Su función es permitir medir y observar de manera reducida, la onda de tensión a la cual se somete el objeto de prueba [1]. En la figura 4.6, se encuentra el divisor puramente resistivo DO , que consiste de un lado de alta tensión R_1 , la cual consta de cuatro resistencias nominales de $75 \pm 10 \% M \Omega$ sumergidas en el aceite aislante y un lado de baja R_2 en donde se conecta el cable coaxial que transmite la señal a medir, para que sea leída por el DVM_R .

$$R_1 : 300 \pm 10 \% [M \Omega]$$

$$R_2 : 350 \pm 2 \% [k\Omega]$$

Los valores nominales de las resistencias R_1 y R_2 conducen a una relación del divisor de 858/1. Debido a que el divisor resistivo presenta una fuga de aceite desde su interior y a su envejecimiento, sus características han cambiado por lo que se ha tenido que establecer una nueva relación para el divisor, con el fin de estimar la tensión en el lado de alta del transformador, esta relación es de 1055/1.

4.2.2 Divisor capacitivo amortiguado. El divisor capacitivo amortiguado es un instrumento versátil para la medición de tensiones normalizadas tipo impulso, del cambio de corrientes de impulso y para este caso, tensiones de corriente alterna. En la figura 4.6, se encuentra el divisor capacitivo amortiguado DC , que consta de un lado de alta tensión C_1 , el cual está conformado por condensadores individuales unidos con otros mediante resistencias individuales que evitan la oscilación en el divisor y un lado de baja tensión formado por un condensador C_2 [1]. Los valores nominales de estas capacitancias son:

$$C_1 : 652, 3 [pF]$$

$$C_2 : 468 [nF]$$

Para obtener una estimación de los valores de las capacitancias del divisor; en el trabajo de grado "Laboratorio de alta tensión de la UIS: estado actual de los sistemas de medición", se realizó una serie de montajes tanto para el lado de baja y alta tensión respectivamente. Los resultados de las mediciones se recopilaron por medio del software del equipo de medida, el cual generó los correspondientes valores de cada mensurando [1] con el fin de compararlos con los estipulados anteriormente.

Realizados los cálculos se obtuvieron los siguientes valores de capacitancia:

$$C_1 : 657,75 \pm 10 \% [pF]$$

$$C_2 : 0,4765 [\mu F]$$

El cálculo de la relación del divisor capacitivo se realizó según el el modelo sugerido por el fabricante ⁸, el cual requiere de parámetros propios del equipo de medida.

$$n = \left(\frac{C_2 + l \cdot C_k}{C_1} \right) + 1 \quad (4.2.1)$$

Donde:

C_1 . Capacitancia del lado de alta tensión.

C_2 . Capacitancia del lado de baja tensión.

l . Longitud del cable de medida (20 cm).

C_k . Capacitancia del cable (67 pF).

$$n = \left(\frac{0,4765 \cdot 10^{-6} + 20 \cdot 67 \cdot 10^{-12}}{657,75 \cdot 10^{-12}} \right) + 1 \quad (4.2.2)$$

$$n = 727,48 \quad (4.2.3)$$

En los resultados obtenidos según las especificaciones del fabricante (720,5/1) y el realizado por [1], se evidenció que tanto los valores nominales del divisor capacitivo como la relación de transformación son similares, por lo cual optó por continuar utilizando la relación original ya que la diferencia es manejable.

4.2.3 Divisor construido. Como ya se mencionó anteriormente, debido a la antigüedad y al desgaste del divisor resistivo, se construyó un prototipo teniendo en cuenta las características nominales utilizando resistencias de precisión. Se eligió una resistencia de alto voltaje R_a de 300 [MΩ], la cual consta de 30 resistencias tipo HVR37 de los *Componentes Vishay BC* y una resistencia de baja tensión R_b de 350 [kΩ] que consta de 4 resistencias tipo 100 de la serie *Riedon* [3]. La tabla 4.3 muestra las características de estas resistencias, donde R_1 representa la resistencia de alta tensión y la asociación de R_2 y R_3 representan la resistencia de baja tensión, donde se implementan 3 y 1 resistencias respectivamente.

⁸HAEFELY. "Impulse voltage test system. Serie 5". Manual de usuario. 1990.

Tabla 4.3: Características de las resistencias para el divisor construido.

	R_1	R_2	R_3
Valor [MΩ]	10	0,1	0,05
Tolerancia %	1	0,01	0,01
Tensión máx. Dc [V]	3500	250	250
Potencia [W]	0,5	0,25	0,25

El cálculo de la relación del divisor construido se realizó a partir de la medición aproximada del valor de sus resistencias, teniendo en cuenta que la toma de tensión se realiza por el lado de baja tensión.

$$n = \frac{349,5k\Omega}{349,5k\Omega + 300M\Omega} \quad (4.2.4)$$

$$n = 859 \quad (4.2.5)$$

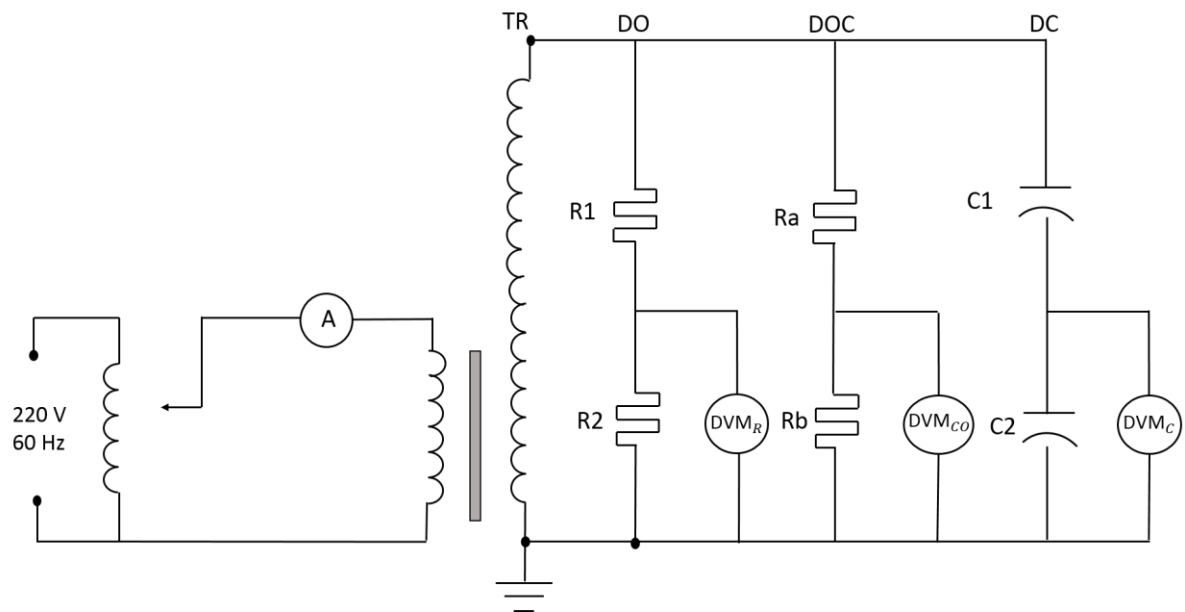
Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente para los divisores de tensión utilizados en el LAT, se puede deducir que los valores estimados de las capacitancias C_1 y C_2 tienden a tener un comportamiento cercano a los valores nominales. Por ende, se tomó como referencia el divisor capacitivo para estimar las tensiones del lado de baja de los demás equipos de prueba.

En la figura 4.6 se observa el montaje realizado para la estimación de la tensión de alimentación por medio de la relación de transformación de los equipos de prueba (divisor resistivo, divisor capacitivo amortiguado y divisor prototipo construido) y las lecturas de tensión en la resistencia o capacitancia del lado de baja tensión de los equipos de medida utilizados. Cabe mencionar que estos equipos de medida son de igual referencia, es decir, se implementó 3 multímetros digitales Fluke-117 con el fin de asegurar la estimación en el mismo rango de medición, resolución y precisión. De igual forma, se trabajó hasta el nivel de tensión de 70 kV debido a que la restricción de tensión lo pone el divisor construido (*DOC*) debido a que los límites tolerables de las resistencias sugieren no subir de dicha tensión.

Para realizar la medición, se alimenta el sistema a diferentes niveles de tensión por medio de la consola de mando AC que permite controlar el lado primario del transformador de alta tensión y de esta manera tener la respectiva lectura de los equipos

de medida. Como se mencionó anteriormente, debido al desgaste y envejecimiento del divisor resistivo, se prefirió medir la tensión en el lado de baja a partir de la relación de transformación del divisor capacitivo amortiguado (720,5:1). Partiendo de este hecho, se mide la tensión en el lado de baja y haciendo uso de la relación de transformación del divisor capacitivo amortiguado y prototipo construido se calcula el valor de alta tensión, valor que se espera tenga similitud con el utiliza para alimentar el auto-transformador.

Figura 4.6: Circuito adaptado para realizar la prueba de la estimación de la tensión de alimentación.



Donde:

- DO.* Divisor óhmico.
- DOC.* Divisor construido.
- DC.* Divisor capacitivo.
- DMV_R.* Voltímetro para medir baja tensión del divisor óhmico.
- DMV_{OC}.* Voltímetro para medir baja tensión del divisor construido.
- DMV_C.* Voltímetro para medir baja tensión del divisor capacitivo.

En la tabla 4.4 se encuentran los resultados obtenidos del procedimiento, la cual contiene las lecturas de las mediciones realizadas en el lado de baja tensión de cada uno de los divisores utilizados *DMV_R*, *DMV_{OC}* y *DMV_C*. Así mismo, contiene el

cálculo aproximado de la tensión de alimentación de cada uno de ellos a partir de la relación de transformación respectivamente. De igual forma, presenta el valor de las ecuaciones (4.2.12) y (4.2.13) respectivamente para cada nivel de tensión.

Tabla 4.4: Datos experimentales relación de transformación.

V_{AT_C} [kV]	$V_{AT_{OC}}$ [kV]	V_{AT_R} [kV]	DMV_C [V]	DMV_{OC} [V]	DMV_R [V]	X_C	Y_{CO}
10,4	10	8,5	14,4	11,63	8,09	1282,5	1234,9
19,7	19,3	16,8	27,3	22,5	15,92	1235,5	1214
30	30	26,1	41,67	34,95	24,78	1211,6	1211,5
40,9	42,8	35,8	56,7	49,92	33,92	1204,4	1264,2
50,1	55,1	44,4	69,5	64,21	42,11	1189,1	1309,8
59,6	68,5	53,1	82,7	79,8	50,32	1184,1	1362,2
70,2	76,2	62,6	97,5	88,8	59,38	1183	1284,6
						1212,9	1268,8

En el proceso de medición existen factores que alteran el resultado como son la calidad del instrumento, las aproximaciones que se usan en el cálculo o el observador quien la realiza o que en cierta forma limitan dar un resultado certero, es decir, que toda medida es aproximada pues tiene asociada un margen de error. Por ende, en la tabla 4.5 se encuentra el resultado de error de las tensiones calculadas para la tensión de alimentación, como la diferencia entre el valor medido y el valor considerado como verdadero.

$$\%E_{VAT} = \frac{VAT_{aprox.} - VAT_{divisor}}{VAT_{aprox.}} \cdot 100 \quad (4.2.6)$$

Donde:

- $VAT_{aprox.}$ Tensión de alimentación teórico del lado de alta.
 $VAT_{divisor}$ Tension lado de alta para cada divisor de tensión.

Tabla 4.5: Error tensión de alimentación.

$VAT_{aprox.}$ [kV]	$EVAT_C$ [%]	$EVAT_{OC}$ [%]	$EVAT_R$ [%]
10	4	0	15
20	1,5	3,5	16
30	0	0	13
40	2,3	7,3	10,5
50	0,2	10,4	11,2
60	0,7	14,2	11,5
70	0,3	9	10,6

Los resultados expuestos en la tabla 4.5 muestran que el divisor óhmico presenta un mayor margen de error a diferencia de los divisores capacitivo amortiguado y el prototipo construido. Esto da a entender, como se mencionó anteriormente, que el divisor óhmico presenta cambios en su relación de transformación alterando así la tensión de alimentación. De igual forma, se ratifica que la relación de transformación del divisor capacitivo amortiguado podría ser la nueva relación de referencia para implementar en las practicas del LAT.

Como se observa en la conexión de la figura 4.6 se dispone los divisores de tensión en paralelo donde comparten la misma tensión de alimentación, por ende:

$$VAT_{capacitivo} = VAT_{construido} = VAT_{ohmico} \quad (4.2.7)$$

La relación de transformación del divisor capacitivo amortiguado viene dada por:

$$\frac{VAT_C}{DV M_C} = \frac{720,5}{1} \quad (4.2.8)$$

La relación de transformación del divisor prototipo construido viene dada por:

$$\frac{VAT_C}{DV M_C} = \frac{859}{1} \quad (4.2.9)$$

La relación de transformación del divisor óhmico viene dada por:

$$\frac{VAT_R}{DV M_R} = RTDO \quad (4.2.10)$$

Reemplazando las relaciones mencionadas en las ecuaciones (4.2.8), (4.2.9) y (4.2.10) en la ecuación (4.2.7), se tiene que:

$$720,5 \cdot DV M_C = 859 \cdot DV M_{CO} = RTDO \cdot DV M_R \quad (4.2.11)$$

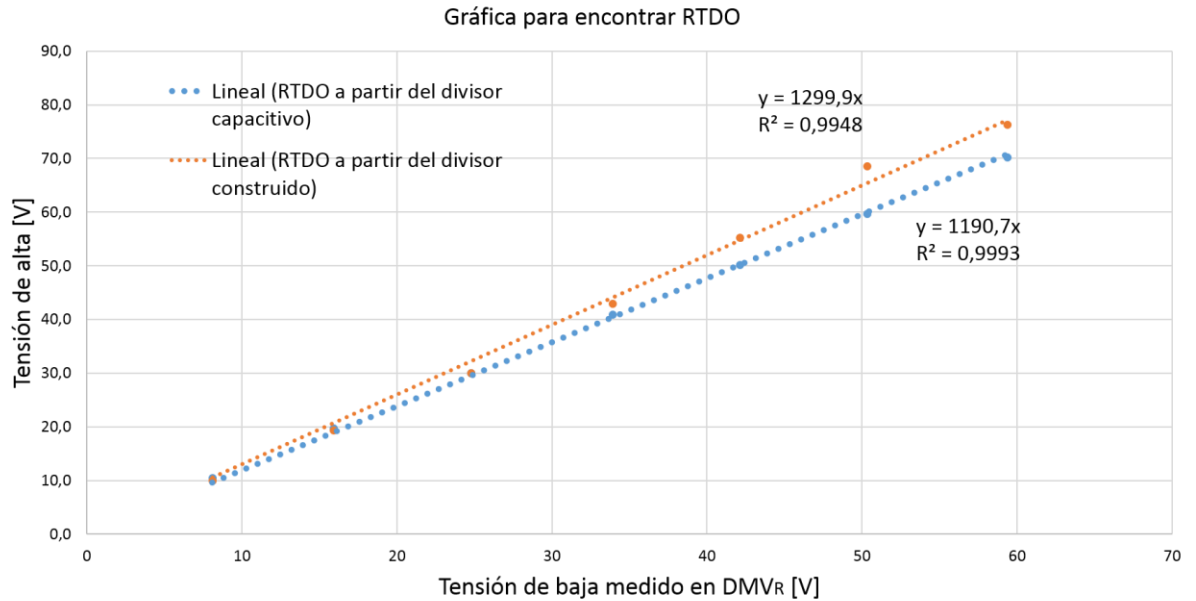
Por consiguiente:

$$RTDO = 720,5 \cdot \frac{DV M_C}{DV M_R} \quad (4.2.12)$$

$$RTDO = 859 \cdot \frac{DV M_{CO}}{DV M_R} \quad (4.2.13)$$

En la figura 4.7 se encuentra el comportamiento que tienen los divisores de tensión acorde con las medidas realizadas en la resistencia o capacitancia del lado de baja tensión respecto de la tensión de alta estimada acorde con la relación de transformación de cada uno de ellos; esto con el fin de trazar una curva que relaciona estos dos valores mediante una función lineal.

Figura 4.7: Relación de transformación para las medidas obtenidas.



Realizando la regresión de tipo lineal se obtuvieron las ecuaciones para el divisor óhmico en función del divisor capacitivo amortiguado y el prototipo construido respectivamente:

$$VAT_R = 1191 \cdot DVM_R$$

$$\tau = 0,9993$$

$$VAT_R = 1300 \cdot DVM_R$$

$$\tau = 0,9948$$

Se puede observar el comportamiento de la tensión del lado de alta del divisor óhmico a través de la pendiente (relación) que arrojan los divisores implementados afectado por los datos tomadas en el lado de baja del mismo (DVM_R). Así mismo, el valor de las correlaciones en ambos casos, es aproximadamente uno, dando a entender que las ecuaciones son acertadas con respecto a los datos hallados en el mensurando.

Tabla 4.6: Error relación óhmica.

$RTDO_{est.}$	$ERTDO_C$ [%]	$ERTDO_{CO}$ [%]
1055	12,7	23,2

En la tabla 4.6 se encuentra el margen de error obtenido de la relación estimada en el LAT del divisor óhmico respecto a las relaciones obtenidas a partir de la regresión lineal donde se evidencia que la relación de dicho divisor se encuentra fuera del rango, a pesar de que el error no es muy grande se recomienda utilizar la relación del divisor capacitivo (720,5) como referencia o usar la relación obtenida (1191) para las prácticas realizadas en el LAT.

Capítulo 5

CONCLUSIONES

Se implementó el amplificador de instrumentación (A/I) como una apuesta a crear un aparato de medición que permita estimar la tensión de forma indirecta en la resistencia de salida del amplificador diferencial (R_s), con el fin de contrarrestar la corriente obtenida en el microamperímetro digital (mA).

Las metodologías implementadas para la medición de la corriente, mediante el miliamperímetro digital (mA) y mediante el cálculo teórico de la corriente que circula por la resistencia de salida del amplificador diferencial (R_s), tuvieron como se esperaba un comportamiento creciente pero ninguna de las dos medidas se pueden tomar de referencia puesta una se basa en un equipo que se desconoce su condición y el otro es un prototipo que apenas se encuentra en desarrollo, por ende, se establece que la diferencia de estas medidas están asociadas a los equipos.

Al evaluar el estado y condición de uso, la relación de transformación y los valores nominales de los divisores de tensión utilizados en el LAT (resistivo y capacitivo amortiguado) y el divisor prototipo construido, se evidenció que la estimación de la tensión de alimentación tanto para la metodología implementada en el proyecto como para las futuras prácticas del laboratorio deberían realizarse a partir del divisor capacitivo debido a que su comportamiento permite reconocerlo como un aparato de medición más fiable a diferencia de los demás.

Capítulo 6

RECOMENDACIONES

Actualmente el LAT carece de algunos equipos de medida y los equipos existentes se encuentran desgastados debido al constante uso que se da en las diferentes prácticas contenidas en el Manual del Laboratorio, las cuales, dependen del esquema del montaje a implementar que, por lo general, están conformadas por una fuente de alimentación de tensión, los equipos de medición y el equipo bajo prueba. Por ende, se plantean algunas recomendaciones de acuerdo a ciertas observaciones que se presentaron durante la ejecución de la práctica propuesta, así como la adquisición de equipos para la mejora de su implementación.

6.1. IMPLEMENTACIÓN EN LA PRÁCTICA

- El objeto de prueba para esta experiencia fue la Jaula de Faraday y el conductor que se encuentra en su interior, elementos que hacen parte de la práctica Efecto Corona y que debido a su implementación presentan cierto desgaste en su infraestructura como lo son las bases que aterrizan la malla coaxial al sistema de puesta a tierra (SPT) y los extremos que sujetan al conductor. Por tanto, es recomendable mejorar estos componentes; las bases por pequeños aisladores para que al momento de presentarse una descarga la corriente se dirija al SPT y cambiar los extremos del conductor para que este sea lo más paralelo posible a la superficie del suelo.
- Se recomienda seguir trabajando en la mejora de la metodología realizada para la medición de corriente en la configuración coaxial, tanto en la mejora de este prototipo como en la adquisición de equipos de medida.

- El esquema tiende a ser tedioso debido a que su montaje cuenta con un número de cableado para realizar las respectivas conexiones entre los equipos que se encuentran en el LAT. Por ende, es recomendable utilizar cables de diferentes colores para que sea fácil la identificación de las conexiones que conforman el montaje y de esta forma asegurar la fiabilidad del funcionamiento. También, es importante realizar demarcación en las puntas del cableado para evitar confusión o errores de conexión y prevenir algún accidente o daño en los equipos.
- El cableado que se necesitaba para realizar las conexiones faltantes entre los equipos que se encuentran en la sala de pruebas del LAT y los equipos de medida ubicados en la sala de control se realizaron con una longitud o medida al tanteo. Por tal motivo, se recomienda que dichas conexiones sean lo más cortas posibles debido a que los cables extensos tienen una impedancia mayor y pueden captar campos electromagnéticos externos ocasionando alteración en la medida.
- La realización del montaje depende en su mayoría de las conexiones que existe entre los equipos, por ende, es recomendable que al momento de realizar las mediciones verificar que los puntos de conexión estén firmes. Una conexión floja puede provocar daños a equipos y ocasionar errores en el medición.
- Para lograr una mayor exactitud tanto en la estimación de la corriente en la configuración coaxial como en la medición de tensión en los divisores del LAT, se recomienda hacer varias repeticiones de la toma de los datos con el fin de calcular un promedio de las mismas y de esta forma garantizar la medición y minimizar el error. Cabe resaltar que la condición de los equipos de medida, la aplicación correcta del método de medición, la competencia del personal y la instalación del laboratorio permiten que las mediciones tenga un grado de confiabilidad.

6.2. ADQUISICIÓN DE EQUIPOS

6.2.1 Multímetro de precisión. Los multímetros 8845A y 8846A de Fluke tienen la versatilidad necesaria para realizar medidas rigurosas, tanto en bancos de trabajo como en campo. Además por sus altas prestaciones y gran funcionalidad, se distinguen por su facilidad de uso. Estos multímetros digitales realizan las funciones que esperarías encontrar en un multímetro digital multifuncional, entre otras, medidas de tensión, resistencia e intensidad; que lo convierten en la mejor opción para toda una serie de aplicaciones, como pruebas de fabricación, investigación y mantenimiento.

El multímetro de precisión 8846A, mostrado en la Figura 6.1, tiene las siguientes características:

- Precisión básica de VCC de hasta 0,0024 %.
- Integra las medidas de temperatura, capacidad, período y frecuencia.
- Rango de corriente de 10 A a 10 A con resolución de hasta 100 pA.
- Rango de resistencia de 10 Ω a 1 G con resolución de hasta 10 Ω .
- Los modos de visualización gráficos contribuyen aún más su funcionalidad. Así, se incluye el registrador TrendPlot™, el registro estadístico y los histogramas.
- Dispone de un singular modo de visualización doble que permite medir simultáneamente dos parámetros distintos de la misma señal con una conexión de prueba.
- Medida de resistencia 2x4 le permiten realizar medidas de 4 hilos con solo dos en lugar de cuatro.
- Clasificación de seguridad CAT I 1000 V, CAT II 600 V.
- Incorpora además un puerto USB, de esta forma podrá transferir datos cómodamente hacia y desde un PC mediante un dispositivo de almacenamiento USB portátil.

Figura 6.1: Multímetro de precisión 8846A.



Citas bibliográficas

- [1] BELTRÁN, D., PINEDA, J., AND RUEDA, P. *Laboratorio de alta tensión de la UIS: Estado actual de los sistemas de medición. Pregrado thesis. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.* Bucaramanga, 2013.
- [2] CASADO, R. *Medición de pérdidas corona y nivel de radio interferencia en líneas cortas enmalladas.* Bucaramanga, 2004.
- [3] RINCÓN, D., CHACÓN, J., AND ORDÓÑEZ, G. *Design and characterization of a high voltage resistor divider at 60 Hz.* Bucaramanga, 2017.
- [4] RUGELES, J. *Diseño y construcción de una línea de transmisión enmallada para estudios de transmisión de potencia a muy altas tensiones (II etapa).* Bucaramanga:, 1995.
- [5] RUGELES, J., AND CHACÓN, J. *Laboratorio de alta tensión. Manual de prácticas.* 2017.

Bibliografía

BELTRÁN, D., PINEDA, J., AND RUEDA, P. *Laboratorio de alta tensión de la UIS: Estado actual de los sistemas de medición. Pregrado thesis. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingeniería Físicomecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Bucaramanga, 2013.*

CASADO, R. *Medición de pérdidas corona y nivel de radio interferencia en líneas cortas enmalladas. Bucaramanga, 2004.*

DELCAMPO, J. M. *Evaluación de la incertidumbre en datos experimentales. Consulta, 2003.*

HAEFELY. *Impulse voltage test system. Manual de Usuario, 1990.*

RINCÓN, D., CHACÓN, J., AND ORDÓÑEZ, G. *Design and characterization of a high voltage resistor divider at 60 Hz. Bucaramanga, 2017.*

RUGELES, J. *Diseño y construcción de una línea de transmisión enmallada para estudios de transmisión de potencia a muy altas tensiones (II etapa). Bucaramanga, 1995.*

RUGELES, J., AND CHACÓN, J. *Laboratorio de alta tensión. Manual de prácticas. 2017.*