

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA SONDA PARA MEDIA TENSIÓN EN AC

Esteban Zapata Martínez

Juan Camilo Gutiérrez Duque

Programa Académico

Ingeniería Electromecánica

Director del trabajo de grado

Santiago Gómez Arango

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

2017

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño y construcción de una sonda de medida para media tensión hasta 12 kV, empleando un divisor de tensión capacitivo amortiguado. El prototipo servirá para realizar mediciones de tensión utilizando multímetros y osciloscopios convencionales, en medidas de tensión para señales AC e impulsos, limitando al máximo las distorsiones de las ondas. Adicionalmente, se presentan los resultados de los cálculos matemáticos y simulaciones realizadas en Simulink - Matlab. Los componentes de diseño son elementos disponibles en el mercado para prácticas en baja tensión, esto garantiza el eficaz mantenimiento y reparación de la sonda.

PALABRAS CLAVE: Sonda de medida, Divisor de tensión, Medición de tensión, Media tensión.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos primeramente a Dios por darnos la oportunidad de vivir y permitirnos avanzar en el camino del conocimiento para aportar al desarrollo de la humanidad.

A nuestros padres, gracias por apoyar y acompañar en todo momento el proceso de formación que nos llevara a alcanzar metas más altas.

Como agradecimiento especial, queremos exaltar la enseñanza, asesoría y acompañamiento del docente Santiago Gómez Arango quién nos ha impulsado y apoyado durante todo el desarrollo del trabajo, compartiendo sus conocimientos y experiencia.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

En el desarrollo de este trabajo utilizan los acrónimos descritos a continuación:

A.C. Alternating Current (Corriente Alterna).

MT Media Tensión.

D.C. Direct Current (Corriente Continua).

PVC Policloruro de vinilo.

PC Personal computer (Computador personal).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 Generalidades	7
1.2 Objetivo General	8
1.2.1 Objetivos específicos.....	8
1.3 Organización del trabajo.....	8
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1 Métodos de medida	9
2.1.1 Error de medida	10
2.2 Medida de tensión	11
2.3 Voltímetros para alta frecuencia.....	11
2.3.1 Voltímetro vectorial	11
2.3.2 Voltímetro RF	11
2.4 Métodos para disminuir tensión	11
2.4.1 Transformador reductor	11
2.4.2 Divisor de tensión.....	12
2.4.3 Divisor de tensión resistivo	12
2.4.4 Divisor de tensión capacitivo	12
2.4.5 Divisor de tensión capacitivo amortiguado	12
2.4.6 Divisor de tensión resistivo compensado	12
2.5 Capacitancia	13

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.5.1 Capacitores de placas paralelas	13
2.5.2 Capacitor esférico	13
2.5.3 Capacitor cilíndrico.....	13
2.6 Dieléctrico	13
2.7 Corriente de fuga.....	14
2.8 Utilidad de una sonda MT, en el ITM	14
3. METODOLOGÍA.....	15
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	25
5.1 Conclusiones	25
5.2 Recomendaciones	25
5.3 Trabajo futuro	26
REFERENCIAS.....	27
APÉNDICE.....	29

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades.

Los instrumentos normalizados de medida para tensiones A.C. se caracterizan por su diseño con sondas o puntas de medida para trabajar a frecuencia industrial y una tensión máxima de 1000 V, lo cual hace necesario el uso de dispositivos especiales para los casos en los que las tensiones sean mayores. Comercialmente existen varios diseños que suplen esta necesidad, sin embargo, la adquisición de estos con relación a las aplicaciones no es favorable para justificar la inversión.

Es así, como en este trabajo se presenta el diseño y construcción de una sonda capacitiva amortiguada que permite realizar mediciones de ondas tipo impulso y A.C., en media tensión, según la clasificación estipulada en (Minas y Energía de Colombia, 2013), tomando como base las propuestas estudiadas en (García Gomez, Marlés Saens, Prado, & Martínez, 2009) y como principal característica permite realizar mediciones hasta 15kV utilizando multímetros y osciloscopios convencionales.

Para medir ondas tipo impulso se han implementado divisores de tensión, como en (Arango, 2013) y (García & Rincón, 2009), donde se evidencia que la implementación del divisor permite obtener un registro preciso de la señal medida.

Por otro lado, en aplicaciones de tipo académico e investigativo se trabaja en el desarrollo de dispositivos con aplicaciones específicas, como en (Velázquez, 2015), en donde fue desarrollado un dispositivo que permite hacer mediciones de media tensión y hasta 450 kHz, haciendo uso del osciloscopio.

Del diseño propuesto surge la necesidad de obtener los valores de resistencia y capacitancia calculados en el circuito equivalente, de manera artesanal con elementos comerciales para

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

prácticas en baja tensión (elementos electrónicos), un procedimiento que se ha realizado también en (Arango, 2013), (García & Rincón, 2009) y (Velázquez, 2015), debido a la dificultad para conseguir elementos con el aislamiento necesario para el nivel de tensión requerido.

En este orden de ideas, para alcanzar la relación de tensión diseñada se hace necesario usar la configuración capacitiva amortiguada, en aras de obtener una medición confiable, debido a que como se menciona en (Kuffel, Zaengl, & Kuffel, 2000), la configuración de divisor de tensión capacitivo puro no es el apropiado para medir señales de tipo impulso por su alta sensibilidad en las tensiones de entrada con tiempo de subida corto.

Por último, Se presentan los resultados de los cálculos matemáticos, las simulaciones realizadas en Simulink – Matlab y las pruebas al prototipo inicial están asociadas al trabajo desarrollado por (C. Benítez, S. Charry , S. Gómez, n.d.), arrojando como resultado una relación de medida de 1:93 lo que valida los datos presentados en la simulación.

1.2 Objetivo General.

Diseñar y construir una sonda de Media Tensión hasta 12kV, para hacer mediciones mediante un multímetro u osciloscopio convencional.

1.2.1 Objetivos específicos.

Seleccionar la configuración de divisor a utilizar y dimensionar cada uno de los componentes.

Hacer simulaciones del divisor de tensión con valores comerciales y compararlas con valores teóricos.

Realizar pruebas con el prototipo construido.

Construir una sonda de MT que permita la medición de hasta 12kV.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.3 Organización del trabajo.

Este trabajo se divide en cinco secciones en las cuales se evidencia en detalle el proceso de diseño y construcción de la sonda MT. En la primera parte se presenta la introducción, en la que se contextualiza la problemática que se interviene en este trabajo.

Continuando, en la sección dos, con el marco teórico se hace una recopilación de la teoría que sirve de apoyo a los conceptos que se plantean.

Posteriormente, en la sección tres, se desarrolla la metodología que paso a paso devela los procedimientos de diseño, simulación y pruebas que se realizaron en la construcción de la sonda.

La sección cuatro presenta claramente los resultados de simulaciones, construcción y experimentales que se consiguieron con la sonda MT.

Finalmente, la sección cinco se compone de las conclusiones y recomendaciones que se obtienen de los datos recopilados durante las pruebas, además de plantear trabajo a futuro con el cual se mejore la construcción y portabilidad del dispositivo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

Las mediciones en tensión se han estudiado por mucho tiempo y en el mercado actual existen instrumentos que facilitan la medición de alta tensión pero que son de poca accesibilidad debido a los costos elevados (Tektronix, 2017), (ValueTronics, 2017), (ValueTronics International, 2017). En los años 80s se hacía la calibración de las medidas de tensión por medio del método sphere gaps (Lucas, 2001), (Kuffel et al., 2000).

Con el avance de la tecnología a escala exponencial, es muy necesario sentar estas referencias de medición, dado que se amplían las posibilidades de mejorar cada vez más los resultados y el control que se puede ejercer sobre los sistemas eléctricos.

Para abordar la medición de tensión en corriente alterna A.C. se debe saber que existe una escala de tensiones a nivel general para cada país. En Colombia por ejemplo están clasificadas las redes de transmisión nacional, regional y distribución local de acuerdo con el Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (Minas y Energía de Colombia, 2013).

“El término medida es utilizado para describir el acto de determinar el valor o tamaño de alguna cantidad; por ejemplo, una corriente. El termino test (sinónimo de prueba o examen) es utilizado si las medidas se toman para determinar tanto si el producto cumple los estándares especificados como su calidad”, (Bolton, 1995).

La medición permite evaluar y comparar mediante experimentación física una magnitud, con un valor determinado que se tome como unidad, en (Lucas, 2001) se explican varias maneras de medir alta tensión en la actualidad, pero sigue haciendo falta un enfoque más práctico para la obtención de resultados con un mínimo error al medir tensiones que superen los 10 KV.

A continuación, se presentan los métodos y errores de medida utilizados en el trabajo (Bolton, 1995).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.1 Métodos de medida.

Medidas analógicas: La cantidad que se mide se controla continuamente en el tiempo por lo tanto el instrumento de medida arroja una respuesta de tipo análoga a la cantidad.

Medidas comparadas: La cantidad medida se compara con valores teóricos, su valor se obtiene cuando se hace la comparación de estos dos valores.

Medidas digitales: A diferencia de las medidas análogas, la cantidad medida se controla en intervalos de tiempo y el valor de dicho de control se convierte en un número, dicho de otra manera en una secuencia de dígitos.

2.1.1 Error de medida.

Todo tipo de medida tendrá errores. El error de medida se define como la diferencia entre el resultado medido y el valor verdadero de la cantidad:

$$error = valor\ medido - valor\ verdadero$$

El error se considera positivo si el valor medido es mayor al valor verdadero y se considera negativo si es menor. El porcentaje de error se considera como el error dado en términos del porcentaje del valor verdadero:

$$porcentaje\ de\ error = \frac{error}{(valor\ verdadero)} * 100\%$$

La precisión de una medida es el porcentaje de incertidumbre del valor verdadero con relación al valor medido, es decir:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$precisión = \frac{(valor\ medido - valor\ verdadero)}{valor\ verdadero} * 100\%$$

Errores sistemáticos: Errores de fabricación: los errores de fabricación son los resultantes del proceso de fabricación del instrumento, principalmente son originados por la tolerancia en las dimensiones de los componentes utilizados para la construcción del instrumento.

Errores de equipo: principalmente son producidos por una mala calibración del instrumento de medida.

Errores cero: se producen por el mal posicionamiento del cero del instrumento, esto ocasiona que la lectura de la medición sea incorrecta ya que tendrá valores más altos o más bajos a la escala correcta. (Bolton, 1995).

2.2 Medida de tensión.

Para medir tensión la conexión de los instrumentos se hace en paralelo al circuito, estos cuentan con una gran impedancia lo cual evita que se perturbe la señal. Si se desea medir alta tensión es necesario hacer uso de voltímetros especiales como electroestáticos, de Abraham o Sphere gaps (Lucas, 2001).

2.3 Voltímetros para alta frecuencia.

2.3.1 Voltímetro vectorial.

Este instrumento tiene como objetivo principal obtener señales cercanas a la magnitud y a la fase de las ondas de potencia reflejadas y transmitidas, de tal manera que la comparación entre estas señales admite obtener parámetros de transmisión y de reflexión. Esto quiere decir que este instrumento mide amplitud y desfase de la onda para luego comparar dicha señal con respecto a una señal de referencia (Velázquez, 2015).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.3.2 Voltímetro de RF.

El voltímetro RF realiza la medición gracias a dos procesos, el primero es la amplificación de la señal y el segundo es la rectificación de la señal que se hace gracias a la utilización de los diodos schottky como en (Cooper & Helfrick, 1991), los cuales se caracterizan por su alta velocidad de conmutación, eliminan excesos de corriente en circuitos de alta intensidad y además permite rectificar señales de muy alta frecuencia.

Métodos para disminuir tensión.

2.4.1 Transformador reductor.

Es un método de medición que se lleva a cabo a través de la relación entre el devanado primario y secundario del transformador para estimar el voltaje, es un método muy eficaz a bajas frecuencias (Velázquez, 2015), pero tiene una condición, se necesita de un instrumento de medida adicional para obtener el valor del voltaje.

2.4.2 Divisor de tensión.

Es un circuito eléctrico formado por dos o más impedancias que están conectadas en serie, (Velázquez, 2015) dicho circuito tienen la capacidad de repartir el voltaje de la fuente que lo alimenta a las impedancias por las cuales está conformado.

Es preciso aclarar que la tensión que se lee en los terminales de baja tensión debe ser representación fiel de la tensión aplicada en los terminales de alta tensión, de acuerdo a la relación de transformación y que esta última debe ser independiente de la frecuencia, la temperatura y la polaridad; además debe ser inerte a influencias externas.

2.4.3 Divisor de tensión resistivo.

Es un circuito eléctrico compuesto por resistencias en serie, donde el voltaje que proporciona la fuente se divide equitativamente entre cada una de las resistencias.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.4.4 Divisor de tensión capacitivo.

Es un método para medir voltaje, muy similar al divisor resistivo, está integrado de dos capacitores en serie donde se puede utilizar como medidor conectando un osciloscopio o voltímetro de RF al capacitor dos.

2.4.5 Divisor de tensión capacitivo amortiguado.

Un divisor que está formado por capacitancia en serie con resistencia tanto en el lado de alta, como de baja tensión, esto entendiéndose que cada componente difiere en magnitud, según la aplicación que se requiera, así como lo muestra (Schwab & Pagel, 1972). Con esta configuración es viable hacer medición de tensiones alternas y de tipo impulso, debido a que se logra compensar la inductancia parásita que se da en el divisor y garantizar seguridad a los instrumentos convencionales de medida puesto que su diseño solo les permite operar en baja tensión.

Por otro lado, si se quisiera comparar con el divisor capacitivo puro, se debe tomar en cuenta que los capacitores se comportan idealmente como un circuito abierto (K. Feser, 1971), lo cual hace imposible realizar mediciones de señales D.C.

2.4.6 Divisor de tensión resistivo compensado.

Es el arreglo compuesto por resistencias en paralelo a capacitores, divididos en rama de alta y rama de baja tensión respectivamente (Kuffel et al., 2000). Con este divisor se pueden medir señales a altas frecuencias subsanando la capacitancia parásita y permitiendo que se logren mediciones acertadas sin importar que la frecuencia varíe de forma exponencial en la señal que puede ser A.C. o D.C.

2.4 Capacitancia.

La capacitancia es la propiedad que tiene un conductor eléctrico de almacenar carga eléctrica. Existe capacitancia entre dos conductores porque su magnitud es igual pero son

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

de signo contrario. Su unidad de medida en el sistema internacional es el faradio [F] y se expresa como:

$$1\text{farad} = \frac{1\text{coulomb}}{1\text{voltio}}$$

$$C = \frac{Q}{V}$$

La diferencia de potencia es directamente proporcional a la carga almacenada. El diseño, la geometría y el dieléctrico utilizado influye en la capacitancia del capacitor.

2.5.1 Capacitores de placas paralelas.

Principalmente está compuesto por dos placas paralelas conductoras, donde cada una tiene un área A , separadas por una distancia d y una carga $+Q$ Y $-Q$ respectivamente. Entre ellas va ubicado el dieléctrico, (Lucas, 2001).

2.5.2 Capacitor esférico.

El capacitor esférico contiene dos esferas conductoras concéntricas, la esfera exterior de radio b , tiene una carga $-Q$ y la esfera interior, de radio a , tiene una carga $+Q$, (Bolton, 1995).

2.5.3 Capacitor cilíndrico.

El capacitor cilíndrico contiene un conductor central de radio a , rodeado de una cubierta cilíndrica de radio b y una longitud l , suponiendo que entre estas dos placas el dieléctrico sea aire a continuación se puede observar en la figura la geometría del capacitor cilíndrico, (Bolton, 1995).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.5 Dieléctrico.

Un dieléctrico es un material que tiene poca o nula capacidad de conducir corriente , se puede utilizar como aislante eléctrico , si son sometidos a un campo eléctrico puede aparecer en el dieléctrico un campo eléctrico interno, como se menciona en (Velázquez, 2015).

2.6 Corrientes de Fuga.

Cuando se aplica voltaje a las placas de un capacitor hay electrones libres entre ellas, que fluyen de una placa a la otra , esto se llama corriente de fuga , dicha corriente suele ser despreciada, (Frenzel, 2003).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

El tipo de divisor, fue seleccionado con el fin de medir corriente A.C. a frecuencias de tipo industrial, como se demostró en (C. Benítez, S. Charry , S. Gómez, n.d.) y ondas de impulsos de tensión como en (Kurt Feser, 1974), (Schwab & Pagel, 1972), (K. Feser, 1971). Luego de estudiar las características de los divisores resistivos, capacitivo puro y capacitivo amortiguado, se optó por este último en vista de que reduce la perturbación que afecta la señal de salida de acuerdo a lo expuesto en (Kurt Feser, 1974) y que en el divisor capacitivo puro al medir señales tipo impulso se presentan oscilaciones que distorsionan el proceso de medición (Schwab & Pagel, 1972), (K. Feser, 1971).

Para determinar teóricamente la relación de tensión (α) se usa la ecuación (1), la cual se usó en (García Gomez et al., 2009) y permite dimensionar la lectura de señales que puede realizar la sonda.

$$\alpha = \frac{V_i}{V_o} = \frac{C_2*(1+R_1*C_1)}{C_1} \quad (1)$$

Donde:

V_i : Tensión a la entrada del divisor

V_o : Tensión a la salida del divisor

C_1 : Capacitancia equivalente 1.

C_2 : Capacitancia equivalente 2.

R_1 : Resistencia equivalente 1.

α : Relación de tensión

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La relación ideal para el diseño propuesto es de 1:100 (15kV/150V), la cual se calcula entre las magnitudes de tensión a la entrada (V_i) y tensión a la salida (V_o) del divisor. Este dato fue comparado con la relación obtenida en las pruebas de tensión y se analizó el comportamiento de los componentes del divisor.

Al momento de determinar el número mínimo de condensadores que conforman C_1 se hace uso de la ecuación (2), un planteamiento usado en el desarrollo de (García Gomez et al., 2009).

$$n_{min} = \frac{V_{max}}{V_{nco}} \quad (2)$$

Donde:

V_{max} : Tensión máxima del divisor

V_{nco} : Tensión nominal de cada condensador

n_{min} : Número mínimo de condensadores que integran la capacitancia de alta tensión.

Para obtener el valor específico de C_1 se hace uso de la relación mostrada en (García Gomez et al., 2009) y corresponde a la ecuación (3).

$$C_1 = \frac{C_{1-i}}{n} \quad (3)$$

Donde:

C_{1-i} : Capacitancia de cada condensador de C_1

n : Número de condensadores de C_1 , (min $n \geq n$)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Por otro lado, en el cálculo de C_2 la capacitancia equivalente requerida se determinó mediante (4).

$$C_2 = \frac{C_1}{a} \quad (4)$$

Sin embargo, para lograr esto, solo se contaba con las opciones comerciales de capacitancia mostradas en la Tabla 1, y se puede destacar que en la configuración del divisor, es C_2 la capacitancia que hace posible conectar a la sonda de media tensión multímetros sin que les afecte las tensiones por encima de 1kV.

Valores comerciales	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
Capacitor equivalente 1	47 μ F	10 μ F	58 nF	96 pF
Capacitor equivalente 2	0.82 μ F	1.3 μ F	4,7 μ F	9,16 nF
Relación de medida	38.46	38.9	39.65	93.5

Tabla 1. Capacitores equivalentes diseñados con base a valores comerciales. **Fuente.**

Elaboración propia.

De los datos anteriores, la opción elegida fue la 4, debido a que claramente con estos valores la relación de medida se ajustaba al diseño inicial.

Por otro lado, con los valores seleccionados anteriormente para las capacitancias equivalentes se procede a construir el arreglo de capacitores en serie, teniendo en cuenta los datos específicos que se consignan en la Tabla 2.

Características	C ₁	C ₂	R ₁	R ₂
Magnitud por unidad	1 nF	0,22 μF	390 k Ω	39 k Ω
Tensión de trabajo por unidad	2 kV	630 V	2 kV	2 kV
Número de unidades que lo conforman	9 unds	24 unds	13 unds	3 unds
Magnitud total del arreglo	90 pF	9,16 nF	5 MΩ	130 kΩ
Tensión total del arreglo	15 kV	15 kV	15 kV	15 kV

Tabla 2. Características de capacitores y resistencias utilizados. **Fuente.** Elaboración propia

El circuito equivalente del divisor capacitivo amortiguado está constituido por dos capacitores y dos resistencias conectadas en serie como se muestra en Figura 1.

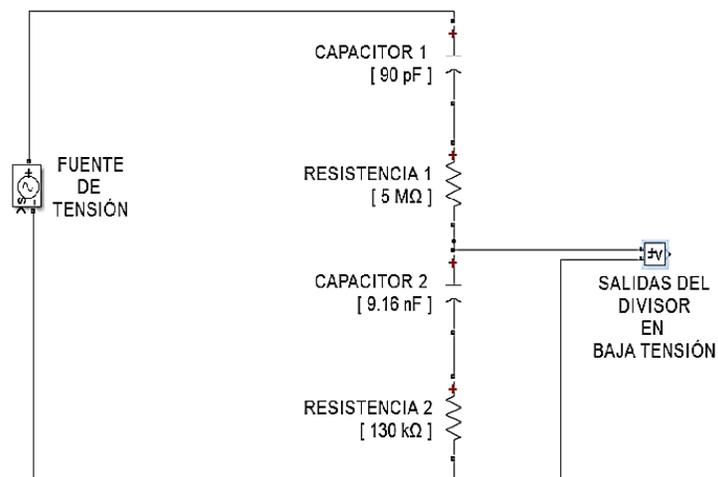


Figura 1. Circuito equivalente. **Fuente.** Elaboración propia

En el circuito anterior se establecen los valores reales de cada componente con los cuales fue construido el divisor, además se muestra los puntos de medición.

Mediante simulación, se compara el comportamiento de la señal a la salida de la sonda con los componentes de valores teóricos y valores de diseño, como se observa en la Figura 2.

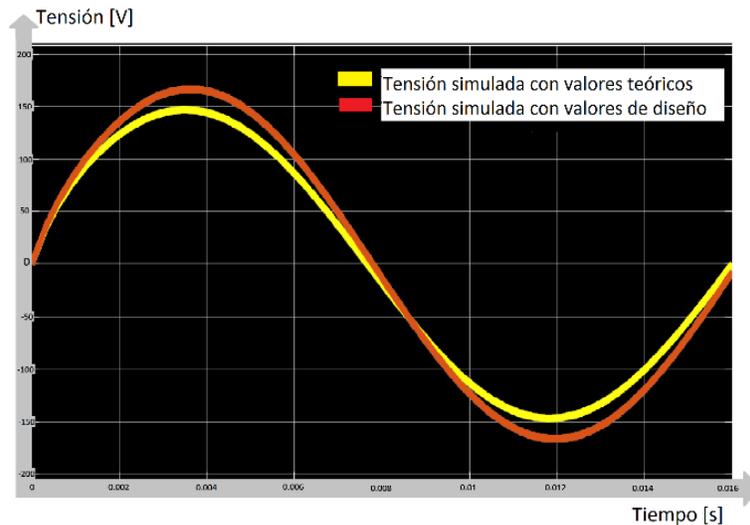


Figura 2. Simulación comparativa de señales de tensión. **Fuente.** Elaboración propia.

En la figura anterior se observa que a pesar de tener una relación planteada en el diseño 1:100 (15kV/150kV) y obtener mediante simulación una relación teórica de 1:93,5 (15kV/160.3V), se evidencia que las dos señales se encuentran dentro de la frecuencia industrial.

Los valores de las resistencias que se utilizaron en el divisor de tensión capacitivo amortiguado, se obtuvieron a partir de las simulaciones realizadas con cada una de las opciones de los capacitores comerciales, se hizo un análisis de las señales que entrego cada arreglo y se comprueba que la $R_1 = 5M\Omega$ junto con la $R_2 = 130k\Omega$ si conservan la señal en una frecuencia de tipo industrial como se observa en la opción 4 de la Figura 5.

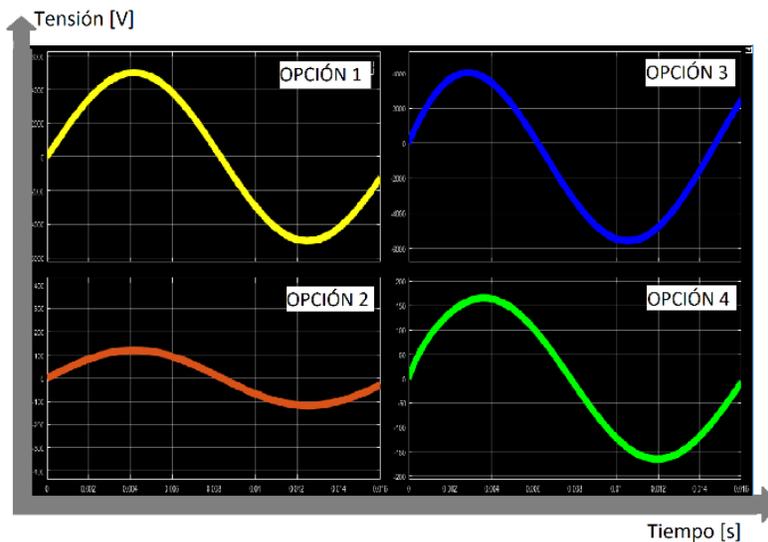


Figura 5. Collage comparativo de las señales del divisor aplicando diferentes valores resistivos y capacitivos. **Fuente.** Elaboración propia

Se observa que la capacitancia es directamente proporcional a la amplitud de la onda y la resistencia es directamente proporcional a la frecuencia (García Gomez et al., 2009).

Por otro lado, con el fin de garantizar un buen aislamiento del circuito, impidiendo disrupciones producidas por arco eléctrico, se hizo una prueba de la consistencia de la espuma de poliuretano en el interior de un tubo PVC, como se ve en la Figura 3.

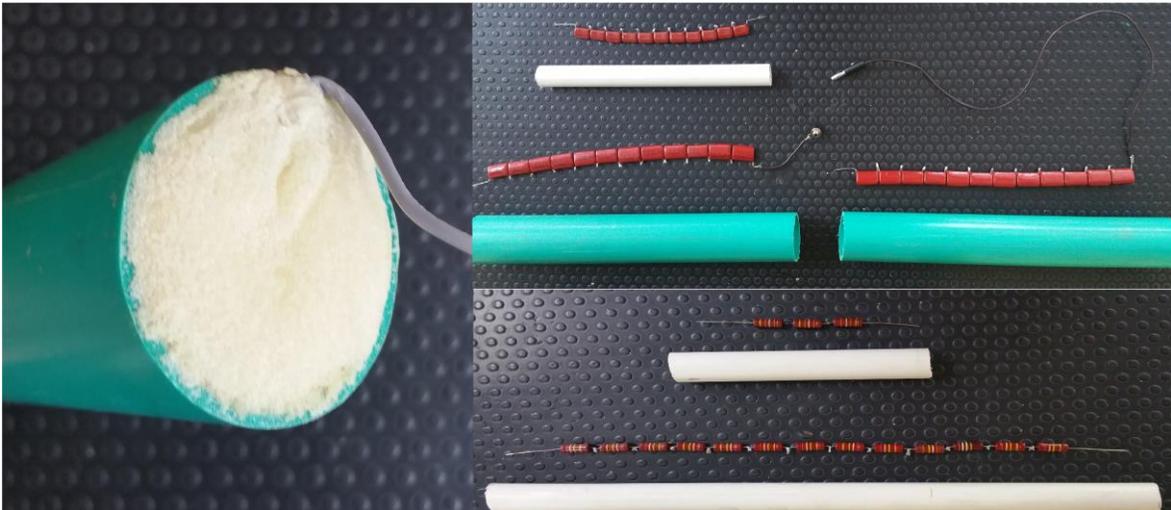


Figura 3. Componentes de la sonda y aislamiento en poliuretano. **Fuente.** Elaboración propia

En la búsqueda de obtener un material aislante que soporte las tensiones del circuito, la espuma poliuretano fue la opción más acertada y asequible. Para garantizar que cada componente de la sonda estuviera completamente cubierto con la espuma se procedió a introducir la resistencia 1 y 2 en tubos de $\frac{1}{2}$ " , el capacitor 1 en un tubo de $\frac{1}{2}$ " y el capacitor 2 se dividió en dos secciones de tubo de $1 \frac{1}{2}$ " las cuales se conectan en serie por medio de un cable.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el prototipo construido, se realizan 3 pruebas de las cuales se obtienen datos que permiten hacer un análisis comparativo con el diseño y simulación del dispositivo.

Con el fin de efectuar las validaciones se procede a realizar conexiones de cada componente en el circuito, con lo que se plantea la conexión y disposición para las pruebas. Como se observa en la Figura 4, el multímetro A se conecta directamente al lado de alta del transformador (tensión de entrada) y mediante la sonda de media tensión, el multímetro B se conecta entre la resistencia 1 y el capacitor 2.

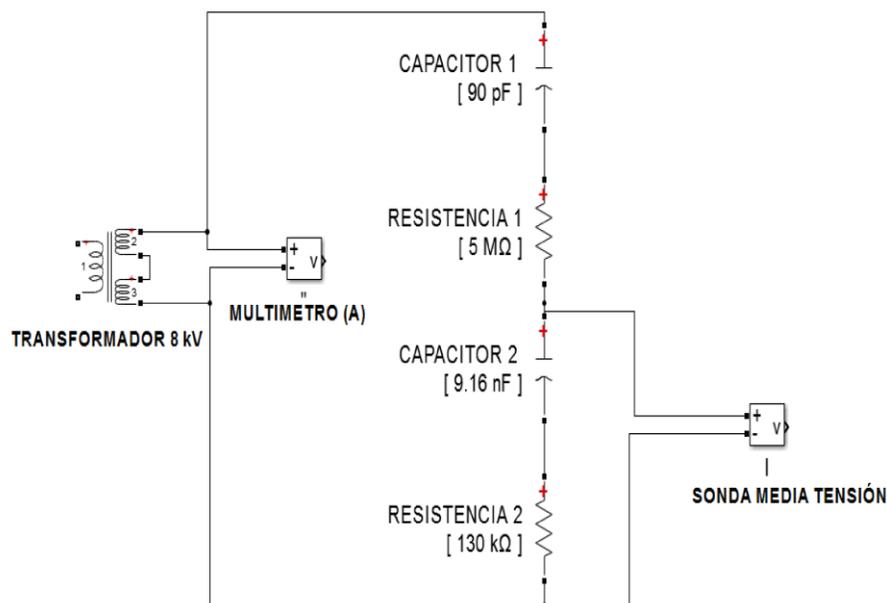


Figura 4. Circuito equivalente con elementos de medición. **Fuente.** Elaboración propia

En la prueba inicial se conecta la sonda a un transformador en vacío, aumentando gradualmente la tensión como se aprecia en Tabla 3.

Tensión lado de baja del transformador (multímetro A) [V]	Tensión medida a la salida del transformador (sonda MT) [V]	Tensión lado de alta del transformador según Relación de la sonda MT [1:93,5] [V]	Relación del Transformador
10	6,62	619,0	61,9
20	13,91	1300,6	65,0
30,35	20,64	1929,8	63,6
40,27	27,38	2560,0	63,6
50,04	33,95	3174,3	63,4
60,12	41,09	3841,9	63,9
70,3	47,9	4478,7	63,7
80	54,2	5067,7	63,3
90,1	60,7	5675,5	63,0
100	67,2	6283,2	62,8
110,6	73,3	6853,6	62,0
120	78,7	7358,5	61,3

Tabla 3. Datos de medición de tensión A.C. a un transformador en vacío. **Fuente.**

Elaboración propia

De la tabla anterior se puede comprobar que el funcionamiento de la sonda de media tensión era correcto ya que estaba midiendo tensiones superiores a los mil voltios.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la segunda prueba se comparan los valores medidos en el lado de alta de la fuente elaborada en (C. Benítez, S. Charry, S. Gómez, n.d.), con un multímetro calibrado y la sonda de media tensión como se muestra en la Tabla 4.

Tensión lado de baja de fuente [V]	Tensión a la salida de la fuente medida con sonda MT [V]	Tensión a la salida de la fuente según relación de sonda MT [93,5] [V]	Tensión medida con multímetro calibrado directo a la salida de la fuente [V]
1,024	0,609	58,18	56,8
2,02	1,26	120,38	116,7
3,06	1,956	186,88	181,8
4,09	2,621	250,41	244,3
5,09	3,298	315,09	307,7
6,05	3,58	342,03	369,5
7,05	4,68	447,13	432
8,04	5,36	512,09	495
9,03	6,05	578,02	559
10,03	6,74	643,94	625
11,07	7,45	711,77	690
12,06	8,15	778,65	756
13,02	8,82	842,66	817
14,06	9,58	915,27	889
15,02	10,21	975,46	949

Tabla 4. Comparación con equipo calibrado de medición de tensión. **Fuente.** Elaboración propia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para la última prueba se toman datos cada 5 voltios a la entrada del transformador, obteniendo en el multímetro B una tensión máxima de medida de 84V, estos datos proporcionan la información que determina la funcionalidad de la sonda MT, como se observa en la tabla 5.

Tensión lado de baja de fuente [V]	Tensión a la salida de la fuente medida con sonda MT [V]	Tensión a la salida de la fuente según relación de sonda MT [93,5] [V]
20,36	13,78	1288,43
25,12	17,05	1594,175
30,02	20,4	1907,4
35,02	23,83	2228,105
40,01	27,22	2545,07
45,18	30,71	2871,385
50,1	34,02	3180,87
55,08	37,31	3488,485
60,25	41,1	3842,85
65,3	44,1	4123,35
70,1	47,6	4450,6
75	50,8	4749,8
80	54	5049
85,3	57,6	5385,6
90,1	60,7	5675,45
95,1	63,7	5955,95
100	66,8	6245,8
105,1	70	6545
110	73	6825,5
115	75,8	7087,3
120	78,7	7358,45
130,3	84	7854

Tabla 5. Tensión medida con la sonda y relación a la salida de la fuente de MT Fuente.

Elaboración propia

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

De acuerdo con los datos que se muestran en la tabla anterior, la sonda de media tensión permite medir las tensiones superiores a 1kV y conserva la relación de diseño.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 Conclusiones.

- Este trabajo presenta una alternativa de construcción artesanal de un divisor capacitivo amortiguado, que permite medir ondas tipo impulso y A.C., en media tensión hasta 12kV.
- El diseño del dispositivo permite accesibilidad de conexión en las borneras y puntos de medición, proporcionando seguridad a los usuarios ante las tensiones que se puedan producir en los componentes gracias a su forma alargada.
- El uso de componentes comerciales para baja tensión en esta sonda, permite hacer mediciones hasta 12kV con una notoria reducción de costos en la construcción.
- En este divisor de tensión capacitivo amortiguado, la capacitancia se encarga de proporcionar la diferencia de potencial con referencia a la tierra de la señal de impulso (amplitud de la onda) y la resistencia es la responsable de disminuir las oscilaciones de la frecuencia, que son producidas por las capacitancias e inductancias del divisor.
- Para obtener resultados de construcción ajustados a los datos de diseño, se propone hacer uso de componentes específicos que no sean artesanales, que permitan lograr la tensión de trabajo y la relación diseñada.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5.2 Recomendaciones.

- Se recomienda hacer pruebas a la sonda conectada a la fuente, funcionando durante prolongados periodos de tiempo, que permitan determinar la durabilidad de la sonda con respecto al tiempo de uso y saber en cuanto tiempo la sonda pierde exactitud de medida.
- Se propone que para un análisis completo de las señales que se desean medir, se realice la comparación de simulaciones de diseño, pruebas con una sonda artesanal y pruebas con sonda comercial.

5.3 Trabajo futuro.

- Se propone implementar un software de control que permita monitorear en tiempo real, la variación de la onda con respecto al tiempo y las variables de medición por medio de un PC.
- Diseñar una sonda, utilizando materiales que permitan reducir el tamaño y plantear un diseño ergonómico que brinde maniobrabilidad en las medidas.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

- Arango, S. G. (2013). Diseño y Construcción de un Generador de Impulsos de Alta Tensión , Portátil y Didáctico .
- Bolton, W. (1995). *Mediciones y pruebas eléctricas y electronicas*. (B. EDITORES, Ed.) (p. 10). España: marcombo.
- C. Benítez, S. Charry , S. Gómez, J. V. (n.d.). Diseño Y Construcción De Una Fuente De Media Tensión., 6.
- Cooper, W., & Helfrick, A. (1991). *INSTRUMENTACIÓN ELECTRONICA MODERNA Y TÉCNICAS DE MEDICIÓN* (Primera ed). Pearson.
- Feser, K. (1971). A new type of voltage divider for the measurement of high impulse and a.c. voltages. *Haefely Test AG*. Retrieved from <http://www.haefely.com/30-downloads/index.php>
- Feser, K. (1974). Transient Behaviour of Damped Capacitive Voltage Dividers of Some Million Volts. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-93*, 116–121. <http://doi.org/10.1109/TPAS.1974.293922>
- Frenzel, L. E. (2003). *SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE COMUNICACIONES*. (G. EDITOR/ALFAOMEGA, Ed.) (Primera ed). ALFAOMEGA.
- García, D. F., & Rincón, D. F. (2009). Diseño y construcción de un generador de impulso de voltaje de 10 KV. *Tecnura, 12*, 4–13. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/2570/257020606002.pdf>
- García Gomez, D. F., Marlés Saens, E., Prado, T. A., & Martínez, M. (2009). Methodology for lightning impulse voltage divisors design. *IEEE Latin America Transactions, 7*(1), 71–77. <http://doi.org/10.1109/TLA.2009.5173467>
- Kuffel, E., Zaengl, W. ., & Kuffel, J. (2000). *HIGH VOLTAGE ENGINEERING FUNDAMENTALS*. (Newnes, Ed.) (SECOND, p. 539). Great Britain: Butterworth - Heinemann.
- Lucas, J. R. (2001). *High Voltage Engineering* (pp. 91–92). Sri Lanka: Department of Electrical Engineering University of Moratuwa, Sri Lanka. Retrieved from <papers3://publication/uuid/DB191770-40A9-484B-9000-D1A790F2073F>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Minas y Energía de Colombia, M. REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS (RETIE), RESOLUCION 90708 127 (2013). COLOMBIA.

Schwab, a. J., & Pagel, J. H. W. (1972). Precision Capacitive Voltage Divider for Impulse Voltage Measurements. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-91*, 2376–2382. <http://doi.org/10.1109/TPAS.1972.293394>

Tektronix. (2017). High Voltage Probe. Retrieved from <http://www.tek.com/high-voltage-probe-single-ended>

ValueTronics. (2017). HIGH VOLTAGE PROBES. Retrieved from <https://www.valuetronics.com/detail/New-bk-precision-hv-44a.cfm>

ValueTronics International, I. (2017). BK Precision HV 44A. Retrieved from <https://www.valuetronics.com/detail/New-bk-precision-hv-44a.cfm>

Velázquez, A. (2015). *Sonda de medición para alto voltaje y alta frecuencia*. Instituto Politécnico Nacional.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

APÉNDICE

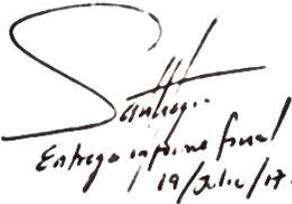
En la actualidad el Instituto Tecnológico Metropolitano cuenta con instalaciones y laboratorios muy bien dotados, que permiten a los estudiantes del plantel consolidar los conocimientos adquiridos en las aulas de clase, llevándolos a un entorno práctico experimental, haciendo que sea mejor asimilado el contenido de una asignatura en particular.

Aún con estos esfuerzos, es notable que para los estudiantes de electromecánica, los conocimientos de la energía eléctrica con la cual se mueve el mundo, no son interiorizados de una forma integral en su formación y esto en gran parte se da por la carencia de un acercamiento práctico que sea más llamativo a los ojos de un estudiante que en la mayoría de ocasiones, solo puede recurrir a la imaginación cuando se trata el tema de energía eléctrica a gran escala, hablando de media y alta tensión para Colombia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES Esteban Zapata M.

Juan Camilo Gutierrez Roque


Entrego informe final 19/21/17.

FIRMA ASESOR _____

FECHA ENTREGA: 19/07/2017

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO__ ACEPTADO__ ACEPTADO CON MODIFICACIONES__

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____