

“Diseño y construcción de bobina Rogowski para la medición de corriente en descargadores de sobretensión”

"Design construction of a Rogowski coil for measure surge arresters discharge current"

N. Rivera¹, J. P. Rueda², E. Perez³

¹Dpto. Ingeniería Eléctrica y automática, Univ. Nacional de Colombia, Colombia. Email: niriverabu@unal.edu.co

²Dpto. Ingeniería Eléctrica y automática, Univ. Nacional de Colombia, Colombia. Email: jpruedat@unal.edu.co

³Dpto. Ingeniería Eléctrica y automática, Univ. Nacional de Colombia, Colombia. Email: eperezg@unal.edu.co

RECIBIDO: abril 21, 2017. ACEPTADO: junio 02, 2017. VERSIÓN FINAL: noviembre 01, 2017

RESUMEN

Este trabajo se ocupa de la construcción y pruebas de una bobina de Rogowski para medir los impulsos de corriente de alta frecuencia. La aplicación de estos tipos de bobinas tiene lugar cuando se desea medir corriente de gran magnitud. Se describe los pasos necesarios para diseñar y construir las bobinas, además de los insumos desarrollados con el fin de realizar ensayos y verificar el funcionamiento teórico de las mismas.

PALABRAS CLAVE: Bobina Rogowski, amplificadores operacionales.

ABSTRACT

This work deals with the construction and testing of a Rogowski coil to measure high frequency current pulses. The application of these types of coils takes place to the measurement of current of high scale. It describes the steps necessary to design and build the coils, in addition to the inputs that were developed to make the necessary tests to verify the theoretical operation of the same.

KEYWORDS: Rogowski coil, Maxwell equations, Operational amplifiers.

1. INTRODUCCIÓN

Las tensiones inducidas por descargas eléctricas tienen un impacto en las líneas aéreas de los sistemas de distribución. Para mejorar el desempeño de estas redes ante las descargas eléctricas, los descargadores de sobretensión (DPS) son usados para limitar los efectos negativos. Uno de los retos, en el diseño de estos equipos, es predecir cuándo se deterioran y ante que magnitudes de corriente serán sometidos durante su vida útil. Para medir este deterioro es posible medir la corriente que los DPS soportan, además del número de descargas despejadas. En este artículo se describe el diseño, construcción y pruebas que se realizaron a una bobina Rogowski, diseñada para medir corrientes de impulso en el rango de kHz hasta cientos de kHz. Adicionalmente se describe la construcción de una fuente de corriente capaz de generar hasta 600 A con un frente de onda de 5 μ s.

2. ANÁLISIS TEÓRICO DE LA BOBINA ROGOWSKI

Una bobina Rogowski (BR) es un arrollamiento de alambre en un toroide (núcleo no ferromagnético) a través del cual pasa flujo magnético producido por una

corriente. Este flujo inducirá una F.E.M de acuerdo a la ley de inducción de Faraday, tensión que tendrá la forma de onda de la derivada de la corriente a medir.

Este voltaje será integrado con un amplificador operacional de alto rendimiento (gran valor de *Slew Rate*), así, al final se tendrá una forma de onda similar a la corriente, en la figura 3 se evidencia todo el sistema circuital. El material no ferromagnético permite que ante estímulos de alta frecuencia se obtengan unos resultados lineales en todo momento.

Este sistema se coloca alrededor del alambre por donde pasará la corriente que se desea medir.

2.1. Análisis de la Geometría del Problema

Para comprender el funcionamiento teórico de esta bobina debemos partir de las ecuaciones de la teoría electromagnética, estas son, la ley de Ampere-Maxwell:

$$\begin{aligned} \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} &= I + \frac{d}{dt} \varphi_e \approx I_{(t)} \\ H * 2\pi r &= I_{(t)} \\ H &= \frac{I_{(t)}}{2\pi x} \quad (1) \\ B &= \frac{\mu I_{(t)}}{2\pi x} \end{aligned}$$

En donde el flujo eléctrico es despreciable pues este dispositivo es pequeño comparado con la longitud de onda asociada a estas frecuencias. El campo magnético será totalmente radial ya que el cable por donde pasa la descarga es lo suficientemente largo para permitir esta aproximación. Además, la B.R. está bobinada sobre un toroide de forma circular que se evidencia en la figura 1 [1]. Para obtener los diferentes parámetros circuitales se debe hallar el flujo que enlaza la corriente a medir, sobre la B.R. Para entender esto se traza un sistema de coordenadas y se hace un corte transversal sobre una de las espiras, en la figura 1.

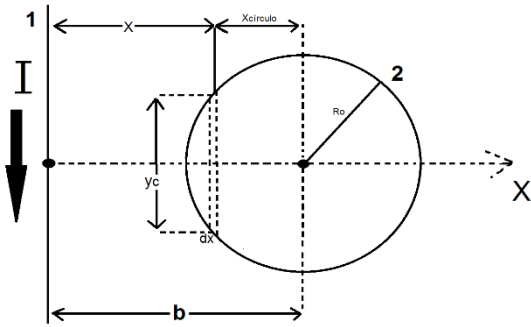


Figura 1. Corte transversal de la bobina Rogowski teniendo como referencia la corriente a ser medida. **Fuente.** Elaboración propia.

Teniendo en cuenta el anterior sistema, en coordenadas cartesianas, se llega a las siguientes ecuaciones que describen el flujo y la mutuo-inductancia del sistema planteado.

$$\Phi = \frac{\mu I(x)}{\pi} \int_{b-r_0}^{b+r_0} \frac{\sqrt{r_0^2 - (b-x)^2}}{x} dx ; \varphi = N\Phi \quad (2)$$

$$M = \frac{\varphi_{21}}{I_1} = \frac{N\mu}{\pi} \int_{b-r_0}^{b+r_0} \frac{\sqrt{r_0^2 - (b-x)^2}}{x} dx$$

Considerando la siguiente configuración geométrica de las bobinas:

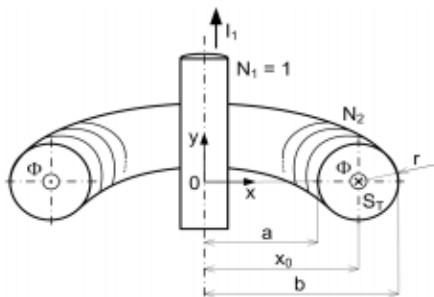


Figura 2. Configuración de las bobinas Rogowski. **Fuente:** [2]

La inductancia propia de la bobina se puede expresar con la ecuación 3:

$$L_2 = \frac{\mu_0 N_2^2}{2} (a + b - 2\sqrt{ab}) \quad (3)$$

La mutuo-inductancia de la bobina se puede expresar con la ecuación 4:

$$M_{21} = \frac{\mu_0 N_2}{2} (a + b - 2\sqrt{ab}) \quad (4)$$

El sistema anterior y las dos expresiones planteadas fueron tomados de [2].

3. ANÁLISIS TEÓRICO DEL INTEGRADOR.

La etapa de integración permitirá que la onda de tensión sea similar a la de corriente o igual, esto dependerá del slew rate del amplificador operacional que se emplee. En la teoría, el análisis es el de un integrador compensado (ver figura 3):

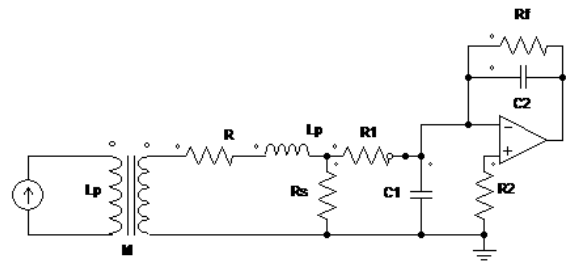


Figura 3. Configuración de las bobinas Rogowski. **Fuente:** Elaboración propia. De la Ley de Voltajes de Kirchhoff

$$-M \frac{di}{dt} = L \frac{di}{dt} + (R + R_s) i \quad (5)$$

Resolviendo la ecuación diferencial la ecuación deducida es la siguiente:

$$I = -\frac{L}{MR_s} V_s - \frac{(R + R_s)}{MR_s} \int V_s dt \quad (6)$$

En el dominio de Laplace tenemos:

$$H(s) = -\frac{R_f}{R_1} \frac{1}{1 + sR_f C} = \frac{V_{out}}{V_s}$$

$$V_s = -V_{out} \frac{R_1}{R_f} (1 + sR_f C) \quad (7)$$

$$I(s) = \frac{R + R_s}{MR_s} \frac{R_1}{R_f} \frac{1 + sR_f C}{s} V_{out} = \left(\frac{k}{s} + kR_f C \right) V_{out}$$

En el dominio del tiempo la ecuación de corriente será:

$$I(t) = kV_{out}u(t) + kR_f C_2 \delta(t) \quad (8)$$

Donde:

$$k = \frac{R + R_g R_1}{MR_g R_f} \quad (9)$$

Para este caso real se optó por usar el amplificador operacional AD712JN, este dispositivo es de alto rendimiento, sin embargo, dentro de la gama alta se pueden conseguir amplificadores con características mucho mejores, pero éstos se salen del presupuesto y del objetivo principal que es la construcción de un sensor de bajo costo.

4. ELEMENTOS USADOS PARA LA PRUEBA.

Con el fin de validar el modelo teórico se construyeron los dos elementos necesarios para la prueba: La bobina Rogowsky, el integrador, la fuente para generar los pulsos de corriente y el transformador de 1 kA.

4.1 BOBINAS ROWOSKY.

Para hacer las bobinas se imprimió el núcleo de la bobina, usando una impresora 3D provista por el servicio Maker Space de la Universidad Nacional. Se hicieron los siguientes planos.

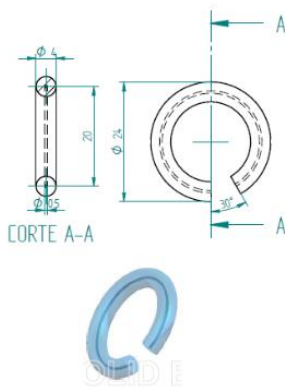


Figura 4. Modelo 3D de la bobina Rogowski. **Fuente:** Elaboración propia.

Después de tener el núcleo físico en plástico se procedió a bobinarlas usando alambre magneto calibre 26 y ponerles una salida coaxial para minimizar el ruido. El resultado fueron dos bobinas de radios diferentes y número de vueltas distintos:

Tabla 1. Medidas físicas de las bobinas.

Bobina	Radio interno	Radio externo	Nro de vueltas.
B	33.65mm	43.05mm	800
A	17.15mm	32.25mm	1450

Fuente: Elaboración Propia.

Las bobinas terminadas son las siguientes:



Figura 5. Bobinas desarrolladas. **Fuente:** Elaboración propia.

4.2 CIRCUITO INTEGRADOR.

El circuito integrador tiene los siguientes parámetros:

- Voltaje de alimentación: 9 V simétricos.
- $R_1 = 1.2 \Omega$
- $C_2 = 0.1 \mu F$
- $R_f = 1.5 M \Omega$

Los parámetros fueron diseñados a partir del funcionamiento del circuito con un generador de señales y un potenciómetro para encontrar el valor más óptimo de R_1 . Con el fin de tener ganancia apreciables (V) a niveles de frecuencia en el orden de los MHz.

4.3 FUENTE DE IMPULSOS DE CORRIENTE.

Para hacer la prueba del funcionamiento de las bobinas fue necesario una onda de corriente tipo pulso, para lograr eso se diseñó y construyó una fuente elevadora de tensión para cargar unos condensadores a 450 V. Con el fin de descargar los condensadores y generar una señal con la forma deseada. El circuito es el siguiente:

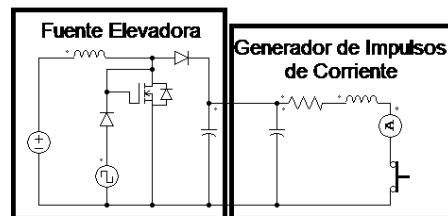


Figura 6. Circuito generador de pulsos simplificado.

Fuente: Elaboración propia.

El circuito en PCB es el siguiente:

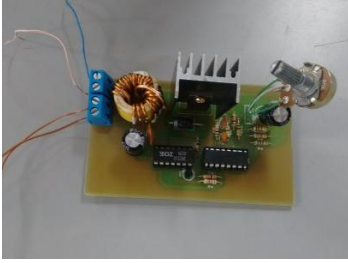


Figura 7. Fuente elevadora **Fuente:** Elaboración propia.

Y los condensadores que se usaron para el circuito de carga fueron el siguiente:

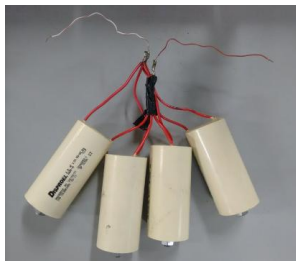


Figura 8. Banco de condensadores 5400 uF **Fuente:** Elaboración propia.

4.4 TRANSFORMADOR DE 1 kA.

Para medir la mutuo-inductancia se dispuso de un transformador con secundario de 1 V, y corriente de 1 kA máxima cuando está en corto. Se eligió una señal tipo seno. Sus parámetros son:

- Relación: 120 V-1 V
- Conductor del primario: Alambre magneto calibre 21.
- Conductor del secundario: 3 Cables de cobre calibre 8.
- Núcleo de chapas de acero al silicio.

5. PRUEBAS REALIZADAS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Para evaluar el modelo teórico se realizaron las siguientes pruebas:

- Onda seno de corriente variable, y bobina Rowosky registrando la forma onda.
- Onda tipo pulso con la bobina Rowosky registrando la forma de onda.
- Onda tipo pulso con la bobina Rowosky integrando la señal de tensión para tener la misma forma de la corriente.

La bobina de referencia siempre fue una bobina Rowosky real que se adquirió para hacer las pruebas, que tiene los parámetros 1kA-1V.

5.1 ONDA DE CORRIENTE VARIABLE.

Usando el transformador de 1kA se procedió a variar el voltaje de alimentación haciendo que la corriente de salida varié. La forma de onda fue constante durante la prueba y fue la siguiente:

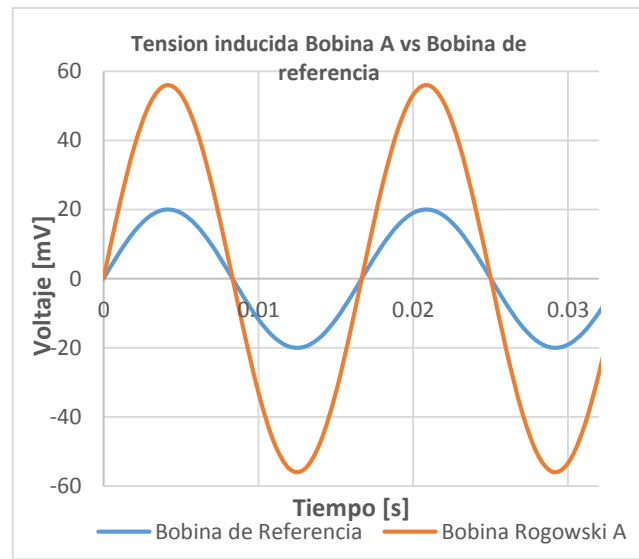


Figura 9. Forma de onda de corriente **Fuente:** Elaboración propia.

La fórmula para calcular la mutuo-inductancia es:

$$(10) \quad \vec{V}_2 = -j\omega * M_{12} * \vec{I}_1$$

Y se comparara con la que se calcula en función del número de vueltas y los radios tanto interno como externo.

Tabla 2. Comparación de las bobinas Rowosky A con ref.

Pruebas para la bobina A				
Corriente [A]	Voltaje RMS Bobina prueba [V]	Voltaje RMS Rogowski A [V]	M bobina prueba [H]	M Rogowski [H]
332.0	0.015	0.015	1.23.E-07	1.19.E-07
433.7	0.020	0.019	1.19.E-07	1.18.E-07
547.0	0.025	0.024	1.21.E-07	1.17.E-07
674.2	0.029	0.028	1.15.E-07	1.10.E-07
707.5	0.032	0.031	1.21.E-07	1.15.E-07
786.2	0.035	0.034	1.19.E-07	1.14.E-07
884.1	0.039	0.038	1.18.E-07	1.15.E-07
932.8	0.041	0.040	1.16.E-07	1.13.E-07
1039.0	0.046	0.044	1.16.E-07	1.12.E-07
PROMEDIO			1.19.E-07	1.15.E-07

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Comparación de las bobinas Rowosky B con ref.

Pruebas para la bobina B				
Corriente [A]	Voltaje RMS Bobina prueba [V]	Voltaje RMS Rogowski B [V]	M bobina prueba [H]	M Rogowski [H]
328.100	0.015	0.015	1.20.E-07	1.18.E-07
454.100	0.018	0.020	1.03.E-07	1.19.E-07
513.000	0.024	0.023	1.26.E-07	1.18.E-07
590.000	0.027	0.026	1.21.E-07	1.16.E-07
655.100	0.031	0.029	1.25.E-07	1.16.E-07
700.900	0.032	0.031	1.20.E-07	1.16.E-07
834.300	0.033	0.036	1.03.E-07	1.14.E-07
899.500	0.004	0.039	1.25.E-08	1.15.E-07
PROMEDIO			1.04.E-07	1.16.E-07

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la mutuo-inductancia calculada con la ecuación 4.

Tabla 4. Comparación Teórica de Bobina A.

Dimensiones Bobina A				
Radio externo	Radio interno	Vueltas	M medida	M teórica
1.72E-02	3.23E-02	300	1.18594E-07	4.46E-07

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Comparación Teórica de Bobina B.

Dimensiones Bobina B				
Radio externo	Radio interno	Vueltas	M medida	M teórica
3.37E-02	4.31E-02	800	4.46113E-08	2.91E-07

Fuente: Elaboración propia.

5.2 ONDA TIPO PULSO (DERIVADA)

En esta prueba se utilizó la fuente para generar una onda impulso, y se utilizó la bobina Rogowski sin la etapa de integración. De esta manera se mide la derivada de la onda impulso de corriente.

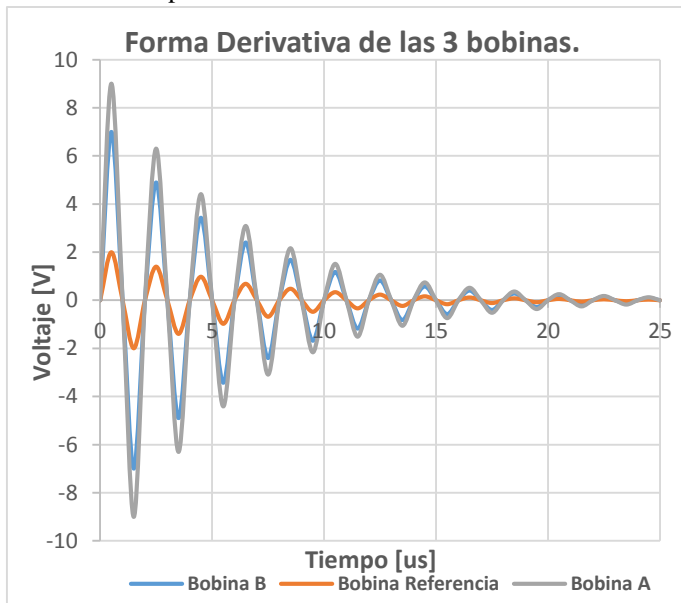


Figura 10. Forma de onda derivativa en bobina B
Fuente: Elaboración propia.

5.3 ONDA TIPO PULSO (INTEGRAL)

Se realiza la prueba de la onda de corriente tipo pulso incluyendo la etapa de integración.

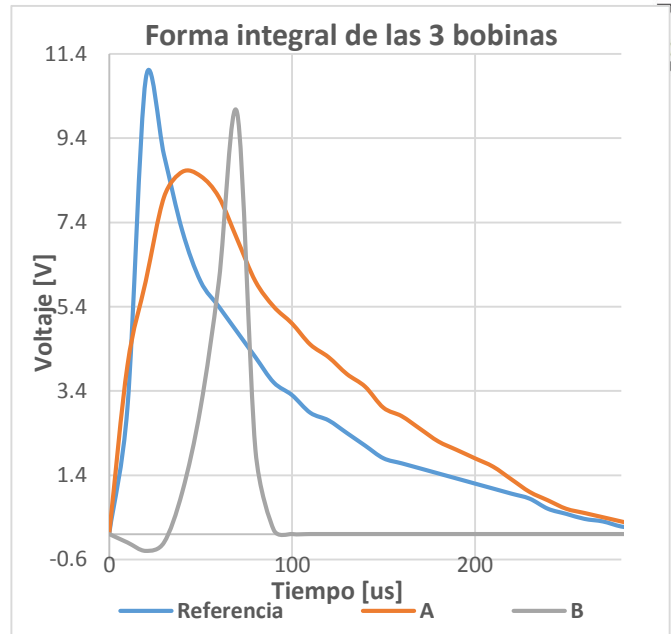


Figura 11. Forma de onda integrada de las tres bobinas (la bobina de referencia tiene un factor x60 para visualizarse mejor)
Fuente: Elaboración propia.

6. CONCLUSIONES

Dentro de lo que se aprendió en el trabajo se pueden extraer las siguientes conclusiones.

- Tenemos que en los capacitores se forma un circuito RLC donde se genera una descarga oscilatoria del circuito. Es notable que para ambas formas de onda de las bobinas tanto de la comercial como en la construida presentan la misma forma, la diferencia radica en la amplitud de la onda. Para la bobina de menor radio se tiene la mayor amplitud.
- Se observó que la inductancia asociada para frecuencia de 60 Hz es similar para la bobina A y la bobina de referencia las cuales tienen un radio similar. Mientras que esta es mayor que la bobina B que tiene un radio aproximadamente 2 veces mayor. Lo que implica que a bajas frecuencias un factor decisivo es el radio más que el número de vueltas de la bobina.
- A la hora de comparar la inductancia teórica con la experimental se puede asociar las diferencias debido a las aproximaciones tomadas como son:

Un corte transversal perfectamente circular, circulación de la corriente perfectamente vertical y centrada, forma como esta devanado el núcleo, entre otros.

- Al tener ondas tipo impulso tenemos que el factor fundamental es el número de vueltas, aspecto que eleva el voltaje hasta magnitudes cercanas a los 10 voltios, mientras que en la bobina de referencia se tenían magnitudes de mV.

7. AGRADECIMIENTOS

Para poder llevar a cabo este proyecto, conté con el apoyo de estas personas, tanto en el desarrollo teórico como experimental:

- Laboratorio de máquinas eléctricas.
- Jahdiel Joannes Pabón Zapata, estudiante de ingeniería eléctrica.
- Walter Andrés Montero, estudiante de ingeniería eléctrica.
- Aldemar Lugo, laboratorista del laboratorio de electrónica.
- Fredy Bolaños, profesor titular de la Universidad Nacional.
- Santiago Rojas, estudiante de ingeniería física.

Especial agradecimiento al docente Ernesto Pérez González, por ser nuestro tutor del proyecto y el cual estuvo a cargo de la investigación.

8. REFERENCIAS

- [1] S. Renata, D. Karel, Design and calibration of Rogowski Coils, Noordwijk, Holanda. Marzo de 2011.
- [2] Styblíková, Renata. Draxler, K. (2011). DESIGN AND CALIBRATION OF ROGOWSKI COILS. *European Metrology Research Programme*, 1.
- [3] Yang, Jun. Guiting, Li. Huping, Liu. Guohua, Yang. Gong, L. (2016). Design of a Flexible Rogowski Coil with Active Intefrator Applied in Lightning Current Collection.
- [4] Pang, F. (2016). Effects of geometrical parmeters on the performance of Rogowski coil for current measuring.
- [5] Mario Chiampi, Gabriella Crotti, A. M. (2011). Evaluation of Flexible Rogowski Coil Performances in Power Frequency Applications.
- [6] M. N. K. H. Rohani, C. C. Yii, M. ISA, S.I.S. Hassan, Azharudin Mukhtaruddin, N. A. Yusof, B. I. (2016). Evaluation of Rogowski Coil Sensor Performance Using EMTP-ATP Software.
- [7] Branislav V. Djokic. (2016). Improvements in the Performance of a
a Calibration system for Rogowski Coils at High Pulsed Currents.

[8] Edison Andrés Soto Ríos. (2014). Lightning induced voltages study on overhead distribution networks placed over non-flat terrains. Manizales: Departamento de ingeniería eléctrica, electrónica y computación.