

Construcción y modelado de bobina Rogowski para implementar en relevadores de protección

Cristian A. Meraz, José de J. Durón, Jeziel O. Juárez, Alberto Castillo

Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Cd. Madero, Tamps., México

RESUMEN

En este trabajo se construye un modelo de la bobina Rogowski que se valida mediante la prueba de un prototipo fabricado para ese propósito. El modelo se desarrolló en Matlab®Simulink y con el software ATPDraw® mientras que el prototipo se implementó en un relevador estático diferencial de barra para poder observar su comportamiento y respuesta a las fallas.

PALABRAS CLAVE

Bobina Rogowski, relevador estático diferencial, modelado.

ABSTRACT

In this work, a model of a Rogowski coil was built and validated by testing a prototype fabricated for this purpose. The model was developed in Matlab®Simulink and ATPDraw® software, while the prototype was implemented in an static differential rod releveator for observing its behavior and response to failure.

KEYWORDS

Rogowski coil, static differential rod developer, modeling.

INTRODUCCIÓN

Las bobinas Rogowski son dispositivos sencillos, confiables y versátiles para hacer mediciones de corriente en una amplia gama de aplicaciones. Se construyó una bobina Rogowski y el circuito de acondicionamiento de la señal para poder hacer mediciones de corriente, sin interferir en el circuito. ¹

La bobina de Rogowski consiste en un círculo uniforme de alambre enrollado sobre un núcleo sólido de determinado material flexible, aislante y no magnético.² (figura 1). En este trabajo se construyó este dispositivo que mostró desempeño satisfactorio al momento de ser probado (figura 2).

DESARROLLO DEL MODELO DE LA BOBINA DE ROGOWSKI

La bobina de Rogowski es una bobina de núcleo de aire que mide la corriente alterna basándose en las leyes de Ampere y Faraday. Algunas principales ventajas son las siguientes:³ 1) Soporta grandes sobrecargas sin daños; 2) Medición de corriente en una amplia gama sin saturación; 3) Fácil de usar debido a la

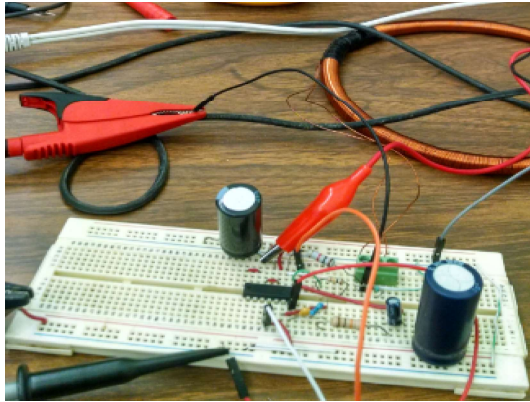


Fig. 1. Bobina de Rogowski con circuito de acondicionamiento de la señal.

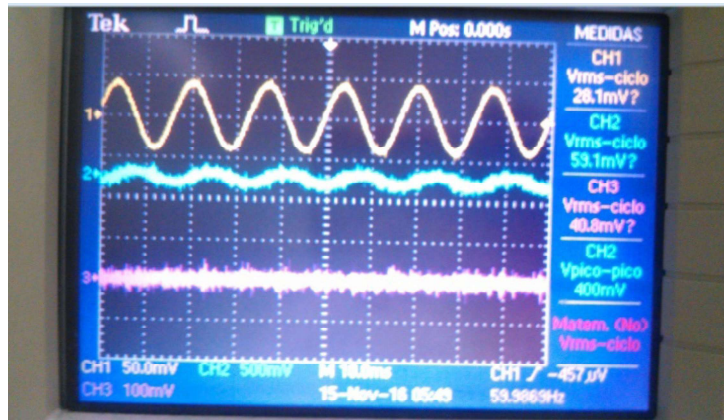


Fig. 2. Respuesta de la bobina Rogowski instalada a una carga resistiva de 900 W, 6.8 A.

flexibilidad y peso ligero; 4) Bajo costo; 5) Naturaleza no intrusiva (prácticamente no extrae energía del circuito); 6) Amplio ancho de banda, en un rango de 0.1 Hz a 1 GHz; 7) Excelente respuesta transitoria; y 8) Segura (aislada del circuito principal eléctricamente).

Para evaluar los resultados experimentales, es indispensable tener un modelo matemático que proporcione información de la respuesta de la bobina Rogowski. La figura 3 muestra la estructura de la bobina en cuanto a la relación entre la corriente de entrada ($i(t)$) y el voltaje de salida ($V_{rc}(t)$) que está dada por:

$$V_{rc}(t) = M \frac{di(t)}{dt}, \quad (1)$$

Donde M es la inductancia mutua:

$$M = \frac{\mu_0 N h}{2\pi} \log\left(\frac{b}{a}\right), \quad (2)$$

donde μ_0 es la permeabilidad del aire ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m), N es el número de espiras de la bobina construida, h es la altura de la bobina, a es el diámetro interior de la bobina construida, y b es el diámetro exterior de la bobina construida.

También se puede calcular los valores de R_1 , L_1 y C_1 , respectivamente, con las siguiente fórmulas:

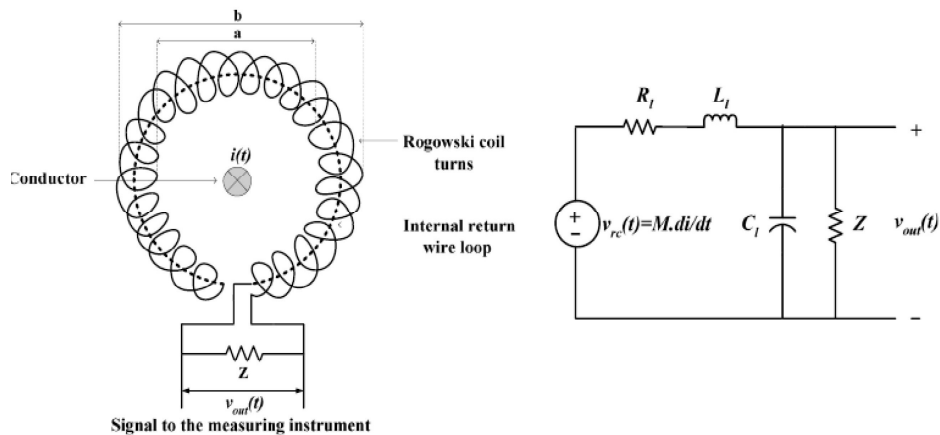


Fig. 3. Estructura y modelo de la bobina Rogowski.

$$R_1 = \frac{\rho_w l_w}{\pi r^2}, \quad (3)$$

$$L_1 = \frac{\mu_0 N^2 h}{2\pi} \log\left(\frac{b}{a}\right), \quad (4)$$

$$L_1 = NM, \quad (5)$$

$$C_1 = \frac{\pi^2 \epsilon_0 (b+a)}{\log\left(\frac{b+a}{b-a}\right)}, \quad (6)$$

donde ρ_w es la resistividad del alambre devanado ($1/58 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$), l_w es la longitud del cable devanado, r es el radio del cable devanado, y ϵ_0 es la constante dieléctrica del vacío ($10^{-9}/(36\pi) \text{ F/m}$). Por último, Z se modela como una impedancia externa en las terminales de la bobina, que incluye la resistencia de amortiguamiento. Esta resistencia es muy importante porque sin ella se produce un sobrepaso cerca de la frecuencia de resonancia:⁴

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (7)$$

Esta condición no causa ningún problema para las mediciones de frecuencia de potencia. Sin embargo, si la corriente primaria contiene componentes de frecuencia cerca de la de resonancia de la bobina, el rebasamiento puede afectar el funcionamiento del sistema. Por ejemplo, en las funciones de protección, los componentes de alta frecuencia de la corriente, pueden causar sobrepaso, lo que resulta en la mala operación del relevador. Este fenómeno es notable en la protección de los instrumentos electrónicos de potencia, debido a los transitorios de alta frecuencia durante tiempos de conmutación. En consecuencia, en la mayoría de los casos es necesario una resistencia de amortiguamiento.⁵

Cálculo del modelo en Matlab

Con todas estas fórmulas se procede a hacer los cálculos para encontrar cada uno de los valores de la bobina para poder hacer la simulación de su comportamiento (figura 4).

```

1 - |clc
2 - |clear all
3 - |close all
4
5 - %Bobina Rogowski modelado
6
7 - %Declaracion de parametros:
8 - a=15.2338;%cm %Diametro interior de la bobina
9 - b=16.2338;%cm %diametro exterior de la bobina
10 - h=0.01;%m %altura de la bobina
11 - %N=918; %vueltas %Numero de espiras
12 - N=1030;
13 - r=0.2755; %mm %radio del cable devanado
14 - lw=(z*((b-a)/z)+(n*100)*N)/100; %m %longitud del cable devanado
15 - drc=0.01; %m %diametro de cada espira en la bobina
16 - rc=0.076169; %m %distancia del cable primario y el punto central de la espira de la bobina
17 - u0=4*pi*1e-7; %H/m %permeabilidad del aire
18 - pw=1/58; % (Ohm*mm^2)/m %Resistividad de alambre en devanado
19 - E0=(10e-9)/(36*pi); % F/m %Constante dielectrica del vacio.
20 - %*****
21 - M=((u0*N*h)/(2*pi))* (log(b/a))
22 - R0=pw*lw/(pi*(z^2))
23 - L0=N*M
24 - L1=((u0*(N*N)*h)/(2*pi))* (log(b/a))
25 - C0=((pi^2)*R0*(b-a)/100)/(log((b-a)/(4*r/1000)))
26 - im=6.8*sqrt(2); %corriente de entrada a la bobina
27 - %*****
28 - rb=0.5/100; %m %radio de la bobina
29 - A=pi*(rb^2); %m^2 % seccion transversal de la bobina
30 - Sm=0.51; %m %longitud media de a bobina
    
```

Fig. 4. Cálculo de los valores de la bobina construida.

Circuito de acondicionamiento de la señal

El circuito de procesamiento está compuesto por un amplificador y un integrador, como se muestra en la figura 5.

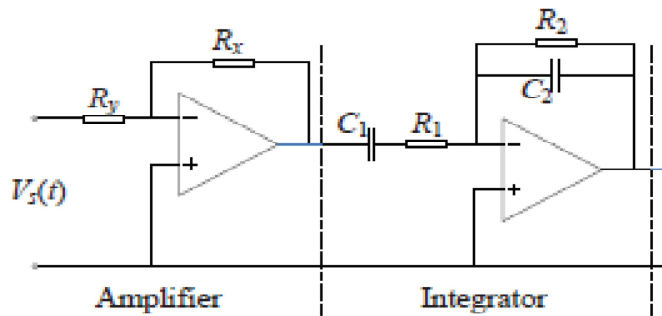


Fig. 5. Circuito de amplificación e integración.

En este caso se utilizaron amplificadores, operaciones para tener la señal final de la bobina y los valores de resistencia y capacitores son los mostrados en la tabla I.

Para poder hacer el modelado, primeramente, se realizaron pruebas en laboratorio para obtener la respuesta de la bobina de Rogowski. En dicha pruebas se utilizó el Omicron CPC-100 que generó corrientes de 100, 400 y 600 A para poder realizar lo experimental (figura 6).

Para poder obtener resultados de las señales se utilizó un medidor de energía de la marca SEL-735 que da como resultado las señales en tiempo real de lo experimental (figura 7).

Tabla I. Valores de resistencia y capacitores para los AO.

Referencia	Valor
R_y	1 K Ω
R_x	100 K Ω
R_1	10 K Ω
R_2	1 M Ω
C_1	10 μ F
C_2	0.5 μ F

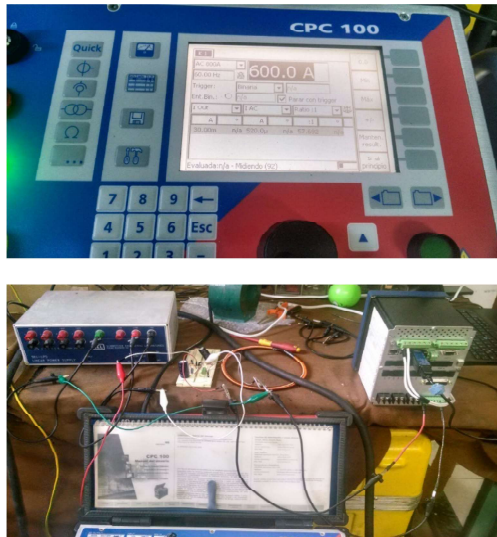


Fig. 6. Circuito de amplificación y de integración.

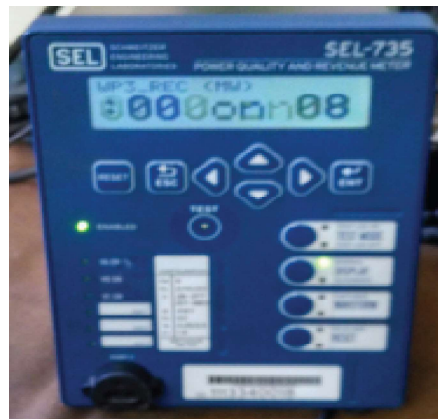
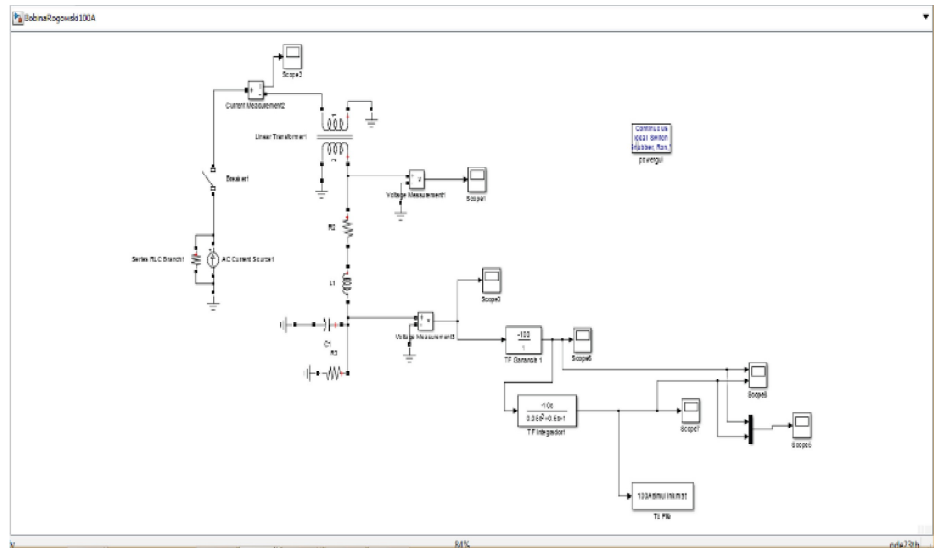


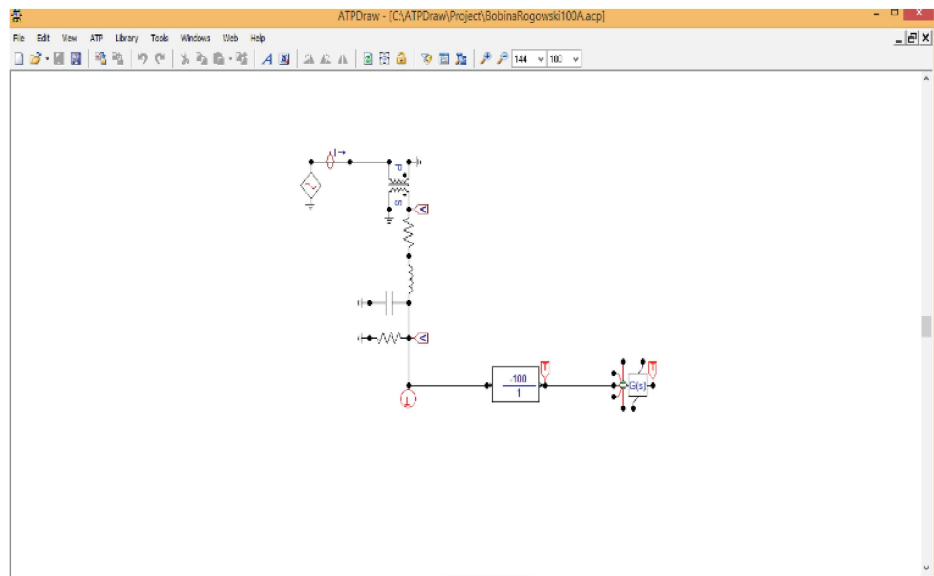
Fig. 7. Medidor de energía SEL-735.

Modelado de la bobina de Rogowski en Matlab Simulink y ATPDraw

Ya teniendo los parámetros de la bobina de Rogowski se procede a hacer la simulación tanto en Matlab Simulink (figura 8 a), como en ATPDraw (figura 8 b), utilizando modelos de fuente de corrientes de 100, 400 y 600 A, respectivamente, para obtener las señales correspondientes.



(a)



(b)

Fig. 8. Simulación (con una fuente de 100 A): (a) en Matlab Simulink y (b) en ATPDraw.

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SIMULADOS

Por la parte de las señales, tanto para lo experimental como lo simulado, se extrae toda la información de las señales en archivos

.mat para poder graficarse y comparar los resultados.

Se crea un código en Matlab (figura 9) para poder hacer las gráficas de la figura 10.

```

1 -   |clc
2 -   |clear all
3 -   |close all
4
5 -   |load HR_10058.MAT
6 -   |VA=vVa*sqrt(2);
7 -   |T=t/1000000;
8 -   |figure(1)
9 -   |plot(T,VA)
10 -  |title('Bobina Rogowski aplicando 100 Amperes')
11 -  |xlabel('Tiempo')
12 -  |ylabel('Voltaje')
13 -  |grid
14 -  |hold on
15 -  |load 100Asimulink.mat
16 -  |plot(Vo(1,:),Vo(2,:))
17 -  |hold on
18
19 -  |load 100Aatpdraw.MAT
20 -  |plot(t,tXx0006)
21 -  |legend('Esperimental','simulink','atpdraw')

```

Fig. 9. Código en MATLAB para obtener las gráficas (con una fuente de 100 A).

Implementación de la bobina Rogowski en un relevador estático diferencial de barras

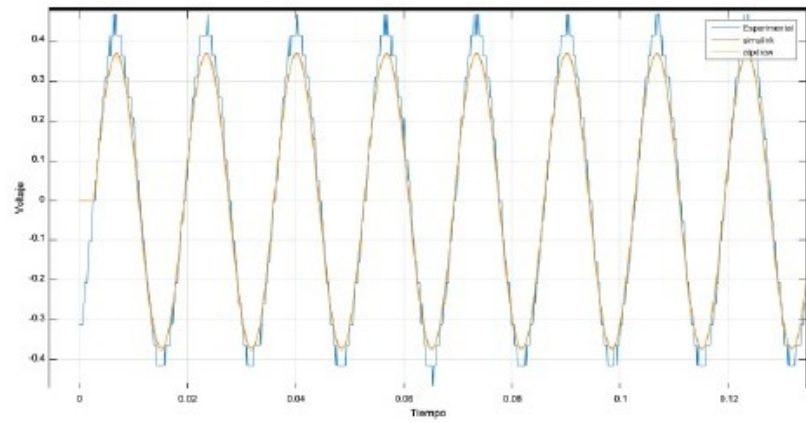
La simulación se realiza en Matlab Simulink, donde se utiliza el modelo de un sistema eléctrico de potencia implementando 3 generadores trifásicos y una carga trifásica. Cuya protección es un relevador estático diferencial de barras acoplado al sistema con bobinas Rogowski que serán las encargadas de obtener mediciones y así opere o no el relevador. Cabe mencionar que para estas simulaciones se ocuparon dos escenarios, uno cuando la falla está dentro de la barra y el segundo cuando está fuera de ella. Por tal motivo, deberá operar el relevador cuando la falla este dentro de la barra, en caso contrario no detectará falla (figura 11).

En la figura 11 se observan los sistemas en amarillo que son las bobinas de Rogowski, tres por cada módulo con un total de doce bobinas implementadas en el sistema eléctrico de potencia (figura 12).

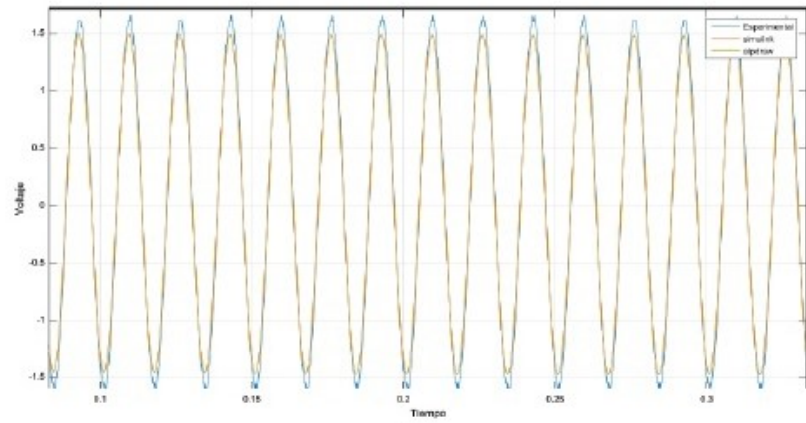
Uno de los puntos importantes es el relevador, que para este tipo de estudios es importante que su lógica esté diseñada para operar para fallas dentro de la barra a proteger. En la figura 13 se muestra la lógica de tal relevador.

Los resultados finales de los casos muestran que todo el sistema de protección tiene un comportamiento bueno ante fallas internas como se muestra en las figuras 14 a 16.

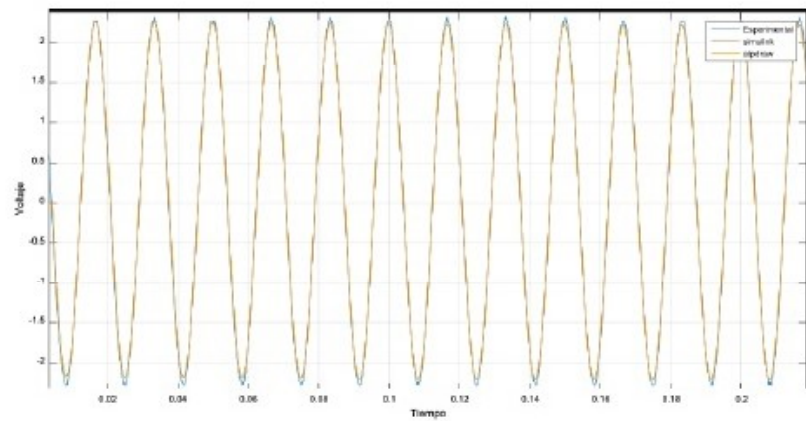
En el caso contrario donde la falla del sistema se encuentra fuera de las barras, se puede observar en las figuras 17 a 20, que el relevador de protección no opera ya que la falla se encuentra en una zona externa de las barras.



(a)



(b)



(c)

Fig. 10. Resultados de experimental y modelado con (a) una fuente de 100 A, (b) una fuente de 400 A, y (c) una fuente de 600 A.

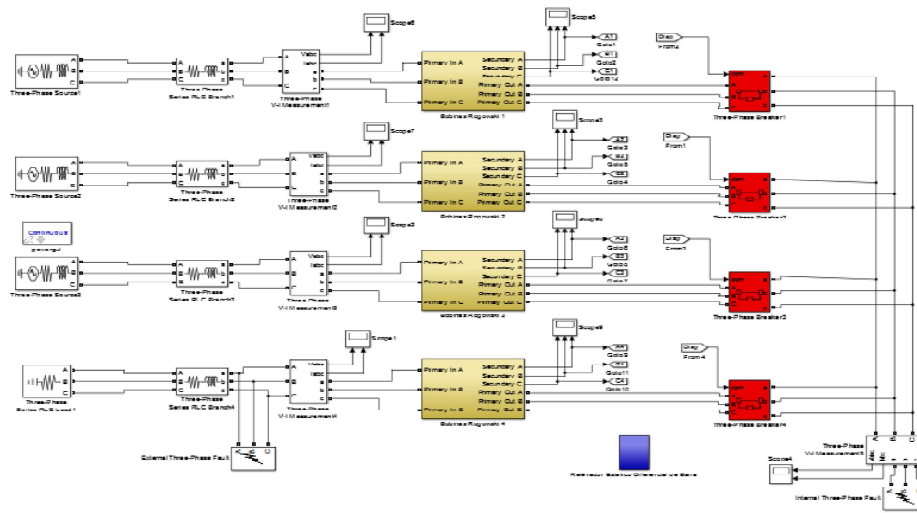


Fig. 11. Sistema eléctrico con 3 generadores y una carga trifásica.

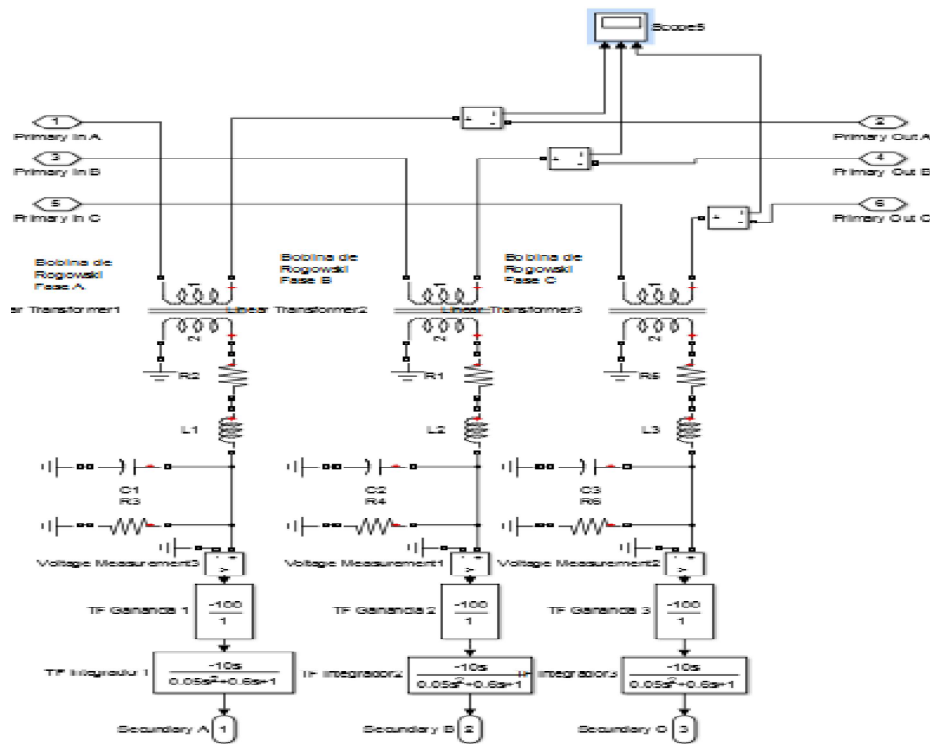


Fig. 12. Bobinas de Rogowski por cada subsistema, una por cada fase.

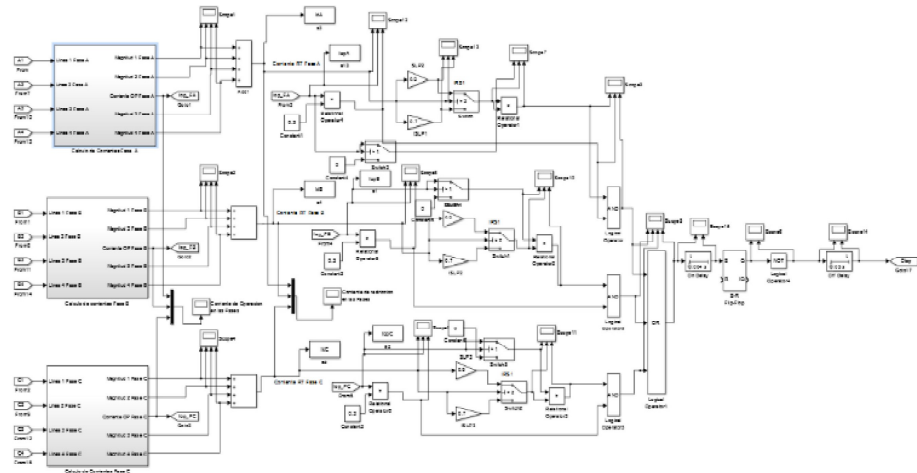
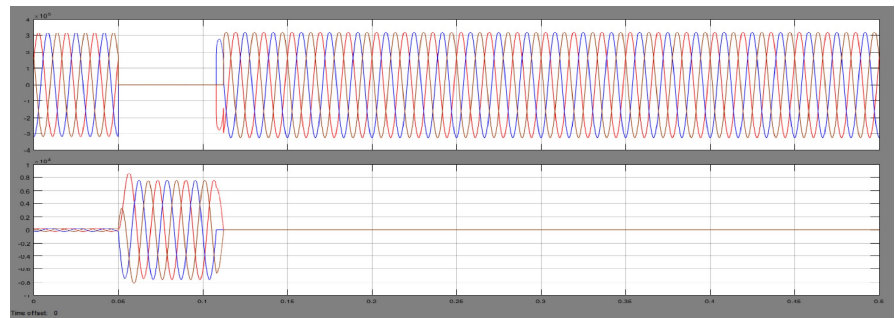
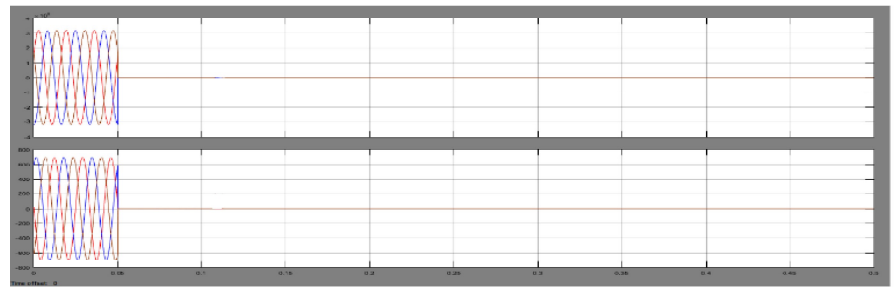


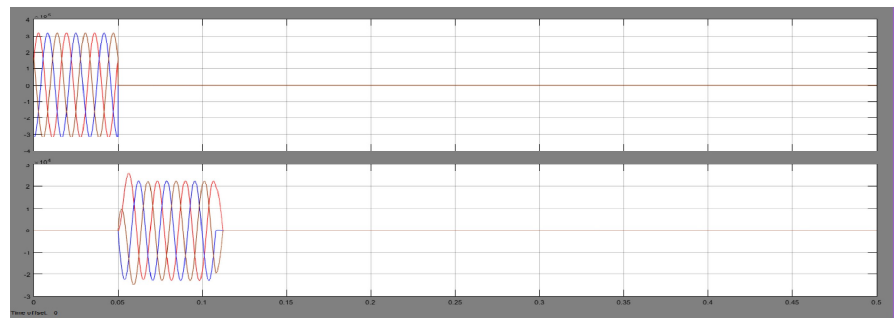
Fig. 13. Lógica del relevador estático diferencial de barra.



(a)



(b)



(c)

Fig. 14. Gráficas de voltaje y corriente (a) en generadores, (b) en carga trifásica, y (c) en las barras, para falla dentro de las barras.

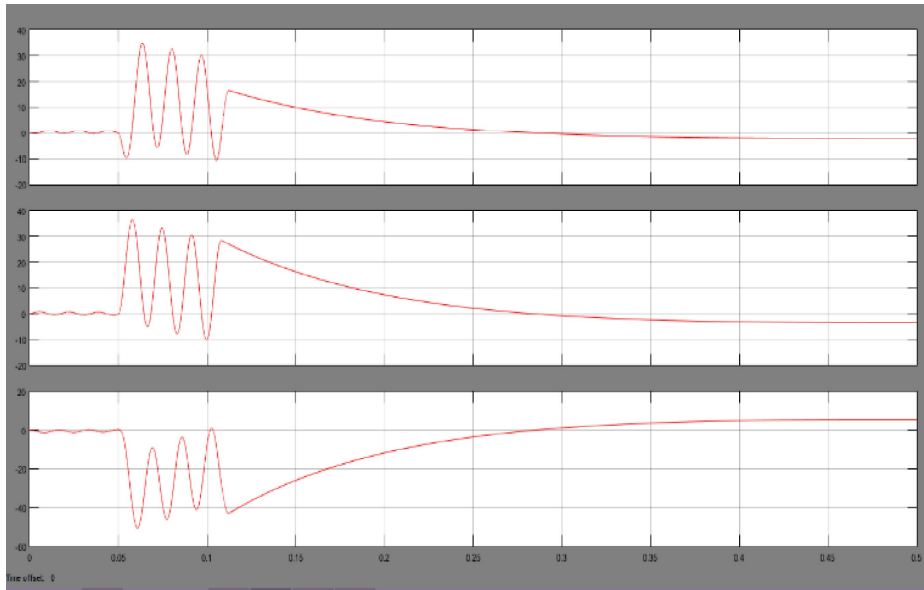


Fig. 15. Comportamiento de las bobinas de Rogowski de un generador con falla dentro de las barras.

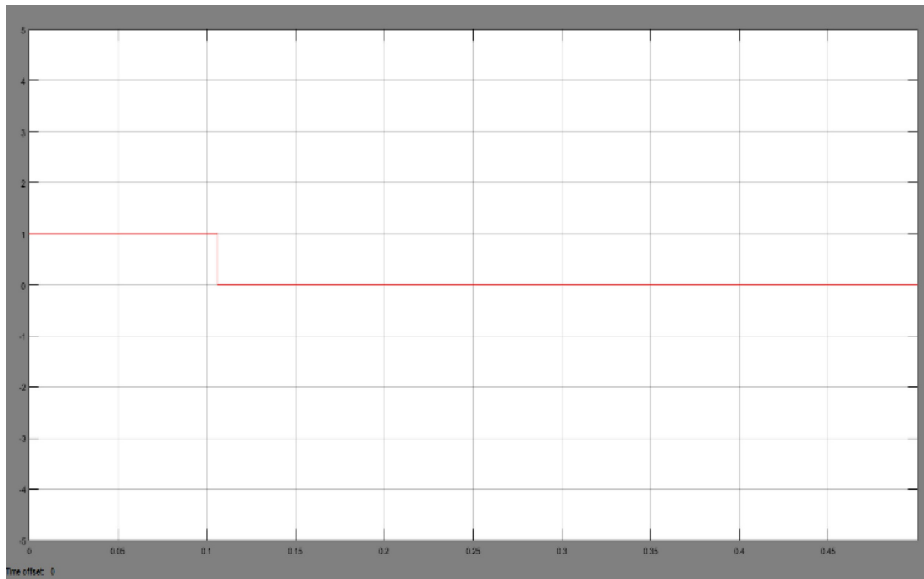
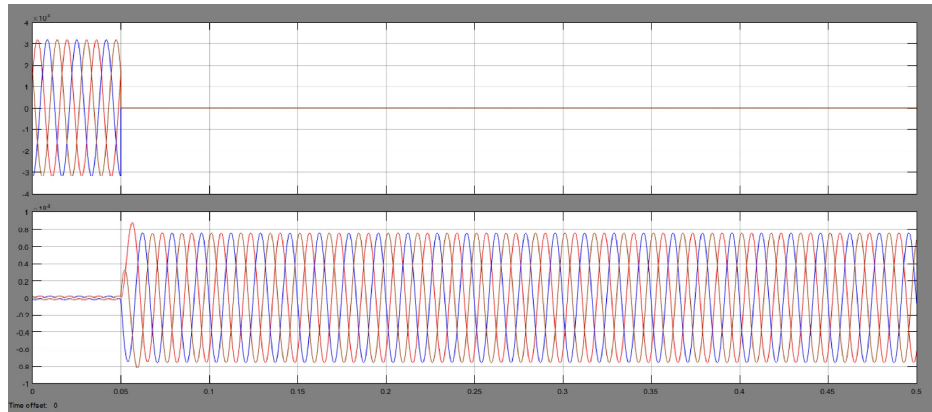
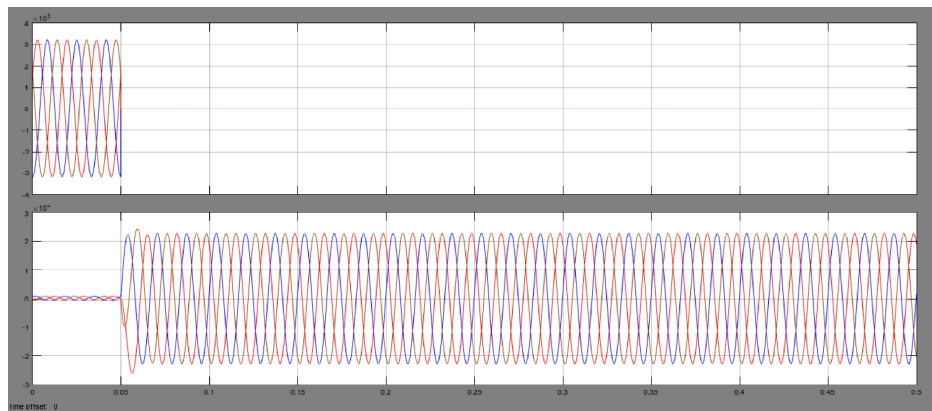


Fig. 16. Gráfica cuando la señal cambia y operan los interruptores en falla dentro de las barras.



(a)



(b)

Fig. 17. Voltaje y corriente en (a) generadores, y (b) en carga trifásica, para falla externa.

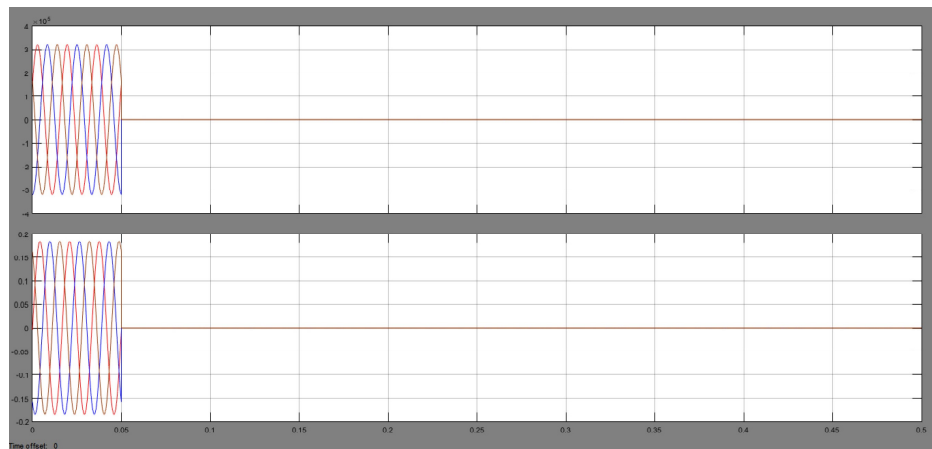


Fig. 18. Comportamiento de las bobinas de Rogowski de un generador con falla externa.

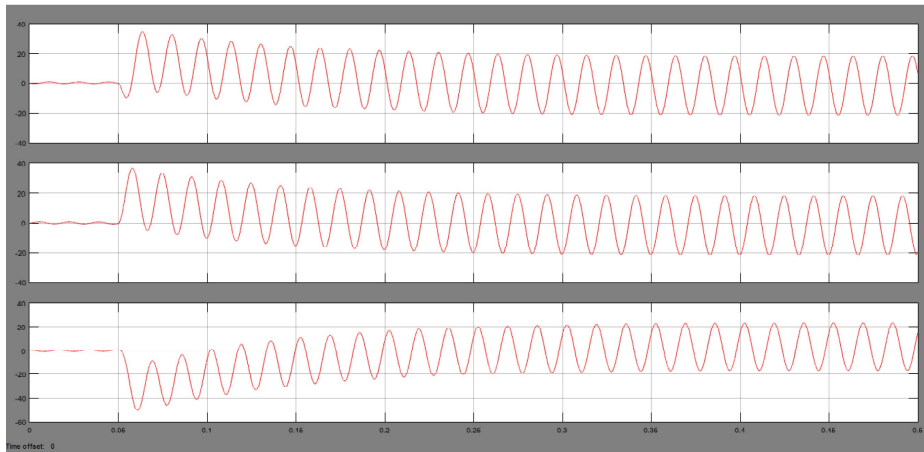


Fig. 19. Comportamiento de las bobinas de Rogowski de un generador con falla externa.

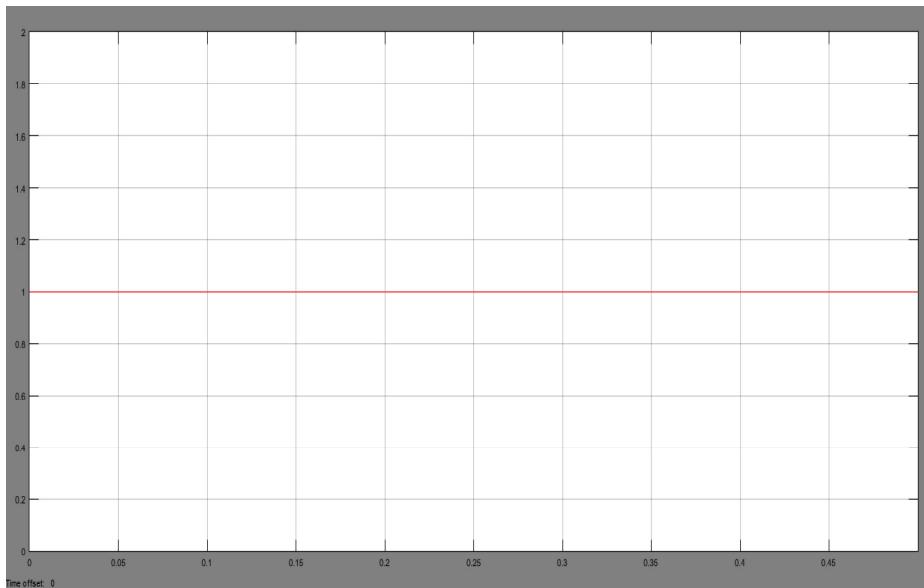


Fig. 20. Gráfica cuando la señal se mantiene y no opera los interruptores en falla externa.

CONCLUSIÓN

Con los resultados de este trabajo se confirma que se pueden utilizar bobinas de Rogowski para sistemas de protección ya que para grandes corrientes de falla no se tiene problemas de saturación como los tienen los transformadores de corriente y da como punto seguridad en los esquemas de protección. En otro punto, la bobina de Rogowski se puede utilizar para esquemas de medición de energía eléctrica.

REFERENCIAS

1. G. Robles, M. Argueso, J. Sanz, R. Giannetti, and B. Tellini, Identification of parameters in a Rogowski coil used for the measurement of partial discharges, in 2007 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference IMTC 2007. IEEE, may 2007, pp. 1–4. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4258157/>
2. E. Hemmati and S. M. Shahrtash, Digital Compensation of Rogowski Coil's Output Voltage, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 62, no. 1, pp. 71–82, jan 2013. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6327365/> figura 20. Gráfica cuando la señal se mantiene y no opera los interruptores en falla externa XIII Simposio Iberoamericano Sobre Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia (2017) 1–7 7.
3. M. Shafiq, M. Lethonen, L. Kutt, G. A. Hussain, and G. M. Hashmi, Effect of Terminating Resistance on High Frequency Behaviour of Rogowski Coil for Transient Measurements, Electronics and Electrical Engineering, vol. 19, no. 7, sep 2013. [Online]. Available: <http://www.ejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/view/2070>
4. G. M. Hashmi and M. Lehtonen, Effects of Rogowski coil and covered conductor parameters on the performance of PD measurements in overhead distribution networks, in Proceedings of the 16th Power Systems Computation Conference, Glasgow, Scotland, 2008, p. 7.
5. M. H. Samimi, A. Mahari, M. A. Farahnakian, and H. Mohseni, The Rogowski Coil Principles and Applications: A Review, IEEE Sensors Journal, vol. 15, no. 2, pp. 651–658, feb 2015. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6922615/>
6. T. Ma, S. Dai, J. Zhang, and L. Zhao, Rogowski Coil for Current Measurement in a Cryogenic Environment, Measurement Science Review, vol. 15, no. 2, jan 2015. [Online]. Available: <http://www.degruyter.com/>

