

Revista Electrónica Nova Scientia

**Diseño y construcción de bobinas de Rogowski
modificadas de bajo costo y alto desempeño**
**Design and construction of modified Rogowski
coil of low cost and high performance**

Diego Seuret Jiménez¹ y Samuel Oseguera²

¹ Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, CIICAp, Universidad
Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos

² IMT, ITESM. CSN, Hermosillo, Sonora

México

Diego Seuret Jiménez. E-mail: dseuret@uaem.mx

Resumen

Las bobinas Rogowski son dispositivos sencillos, confiables y versátiles para hacer mediciones de corriente en una amplia gama de aplicaciones que van, desde dispositivos microelectrónicos hasta sistemas de alta potencia en instalaciones industriales. Se construyó una bobina de Rogowski y el circuito de acondicionamiento de la señal para poder hacer mediciones de su respuesta ante estímulos eléctricos y llevar a cabo un análisis cualitativo. Adicionalmente, a partir del modelo matemático de la bobina, se hizo una modificación en la estructura interna de la misma para obtener voltajes de mayor magnitud y facilitar la lectura en instrumentos de medición eléctrica. Estos resultados se compararon con una bobina comercial estándar y las mediciones del voltaje de salida de la bobina Rogowski modificada muestran una señal con menos ruido y de mayor magnitud. Al haber aumentado la relación señal ruido en el sistema, el circuito de integración y amplificación arrojan resultados esperados.

Palabras Clave: Bobina de Rogowski, medición de corriente

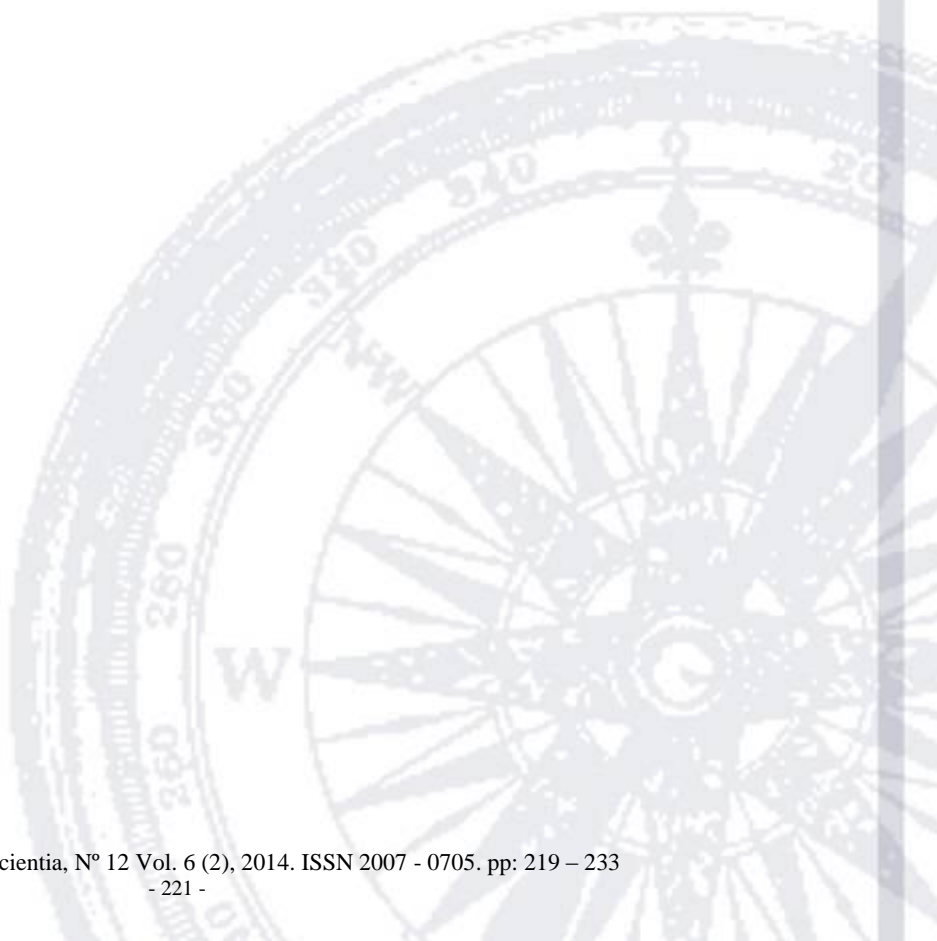
Recepción: 23-01-2013

Aceptación: 30-04-2014

Abstract

Rogowski coils are simple, reliable and adaptable devices capable of measuring current. These coils operate within a large range of applications and environments, including microelectronics and industrial power systems. Rogowski coil and signal conditioning circuit built to make measurements of its response to electrical stimuli and perform a qualitative analysis. Additionally, from the mathematical model of the coil, a change was made in the internal structure of the coil to get voltages of greater magnitude and readability in electrical measuring instruments. When compared to a standard commercial Rogowski coil, the voltage measurements from the modified Rogowski coil showed a decrease in noise, coupled with an increase in amplitude. By increasing the signal-noise ratio within the system, the integration and amplification circuit yields expected results.

Keywords: Rogowski Coil, Current Measurement



Introducción

El objetivo fundamental de este trabajo es obtener un dispositivo flexible para medir corrientes sin intervenir el circuito, con características similares a las bobinas de Rogowski y que se puedan integrar fácilmente a circuitos de medición de potencia en aplicaciones domésticas e industriales de bajo costo. Este trabajo forma parte de un proyecto de construcción de medidores inteligentes de bajo costo para uso doméstico e industrial.

Tomando como punto de partida el esquema una bobina de Rogowski, se procede a construir un dispositivo con tales características, lo que significa que se puede medir corriente en un conductor sin necesidad de interrumpirlo. Las bobinas Rogowski son dispositivos muy valiosos en la instrumentación industrial. Su uso en diversas aplicaciones ha tenido un crecimiento muy importante en los últimos tiempos. Esto es resultado de un incremento en la electrónica del estado sólido así como también del uso de la tecnología de microprocesadores (Shepard). Estas tecnologías ofrecen un futuro para las bobinas Rogowski. En cuanto a los medidores de corriente tradicionales o transformadores de corriente (TC), usa el principio de un transformador para convertir la alta corriente primaria a una corriente secundaria más pequeña gran parte de sus aplicaciones están limitadas por sus características eléctricas y diseño mecánico. Los TC carecen de flexibilidad; en su mayoría son bloques sólidos que tienen un centro hueco por donde pasa el conductor con la corriente a medir. La respuesta del TC es una corriente con ganancia menor a 1.0 y está determinada por el número de vueltas del embobinado interno. Posteriormente, esta variable se debe convertir a voltaje para que se pueda medir en un instrumento.

La bobina Rogowski consiste (Shramkov 1972, 143) en una hélice uniforme de alambre fino, enrollada sobre un núcleo sólido de determinado material flexible, aislante, usualmente no magnético. Si lo que se desea es calibrar la bobina o medir corriente eléctrica, el núcleo flexible se puede doblar para formar un circuito cerrado de forma arbitraria que contornea a la corriente que se va a medir. En sentido general se habla de bobinas toroidales. Como la presentada en la Figura 1.

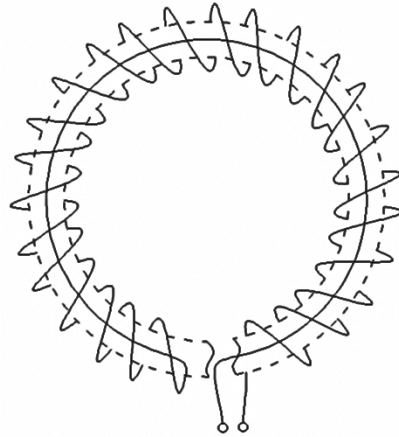


Figura 1: Estructura de la bobina Rogowski

Entre las características que definen a la bobina Rogowski están versatilidad, confiabilidad, y amplio rango de medición de corriente. Este rango está determinado por la frecuencia y la magnitud de la corriente, que pasa a través de esta. Otra característica es la linealidad de su respuesta, que oscila entre el ± 0.2 y $\pm 0.5\%$ de la escala total, en las bobinas comerciales. Estos valores están afectados directamente por la reactancia del sensor, la cual está determinada por diversos factores. Entre los más importantes están, el calibre del alambre enrollado, el número de vueltas y el área de sección transversal de la hélice. El rango de sensibilidad de las bobinas Rogowski comerciales se encuentra entre 0.01mV/A hasta 100 mV/A .

Método

Para poder hacer evaluaciones de los resultados experimentales es indispensable tener un modelo matemático que proporcione información de la respuesta de una bobina Rogowski. La descripción de la bobina de Rogowski se puede realizar mediante las aplicaciones de las leyes de Ampere y de Faraday (Fitzgerald 2003, Cap I). La primera describe cómo es el campo magnético que se crea alrededor de un conductor por que el circula una corriente. En concreto, dice que la circulación del campo magnético sobre un camino cerrado γ es igual a la corriente total que atraviesa cualquier superficie limitada por la curva. Matemáticamente se expresa de la siguiente forma (Argüeso 2005):

$$i = \oint_{\gamma} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_0^l H \cos \alpha dl \quad (1)$$

donde:

\mathbf{H} es la intensidad de campo magnético.

$d\mathbf{l}$ es un elemento de longitud infinitesimal a lo largo del camino cerrado.

α es el ángulo formado entre la dirección del campo magnético y la dirección de $d\mathbf{l}$.

Por otro lado la ley de Faraday-Lenz explica cómo este campo magnético crea una diferencia de potencial entre los extremos de la bobina debido a la variación del flujo de campo magnético. En concreto, dice que la f.e.m. inducida en un circuito estacionario cerrado es igual y de signo contrario a la variación del flujo magnético que atraviesa el circuito respecto del tiempo.

En la Figura1 se muestra una bobina helicoidal cerrada, con N vueltas por metro y una sección transversal A , diseñada para rodear un conductor por el que circula una corriente i que se pretende medir.

El flujo magnético que atraviesa la sección de un elemento infinitesimal de longitud $d\mathbf{l}$ es $d\Phi$. Este se obtiene a partir de la integral de superficie de la inducción magnética \mathbf{B} en la superficie de la sección del núcleo. La tensión inducida en $d\mathbf{l}$ se obtiene, según la ley de Faraday-Lenz, como la derivada respecto del tiempo del flujo magnético.

$$\begin{aligned} v_{\text{espira}} &= -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \left(\int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \right) = \\ &= -\frac{d}{dt} \left(\int_S \mu_0 \mathbf{H} \cdot d\mathbf{S} \right) = -\mu_0 A \frac{dH}{dt} \cos \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

Integrando a lo largo de la longitud de toda la bobina se obtiene la expresión de la tensión inducida total.

$$\begin{aligned} v_{\text{bobina}} &= \int_0^l v_{\text{espira}} N dl = \\ &= -\mu_0 AN \int_0^l \frac{dH}{dt} \cos \alpha dl = \\ &= -\mu_0 AN \frac{d}{dt} \int_0^l H \cos \alpha dl = \\ &= -\mu_0 AN \frac{di}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

Así, queda establecida la relación entre la corriente que se desea medir y la tensión inducida en la bobina. De forma general, se puede decir que el campo magnético variable en el tiempo producido por la variación de corriente que circula por el conductor induce en la bobina una f.e.m. proporcional al cambio de la corriente, di/dt , siendo la constante de proporcionalidad la inductancia mutua de la bobina, M . El resultado queda expresado en la siguiente ecuación:

$$v_{bobina} = -M \frac{di}{dt} \quad (4)$$

Donde la inductancia mutua M es:

$$M = \mu_0 AN \quad (5)$$

Los errores que aparecen por no existir las condiciones ideales para la aplicación de la ley Ampère se pueden reducir al mínimo si todas las vueltas se realizan con la misma sección transversal y se distribuyen uniformemente alrededor de una trayectoria circular.

Desarrollo Experimental.

Se toma un cilindro plástico flexible de diámetro 1.12 cm y largo 51 cm en cuyo interior se introduce un conductor de cobre 24 AWG. La prolongación de este conductor se enrolla en 459 vueltas sobre el cilindro plástico. Los extremos de dicho conductor son las salidas de voltaje de la bobina de Rogowski, como se muestra en la Figura 1. Posteriormente, se inserta el armado dentro de un forro termo-contráctil comercial para cables y se calienta; así queda ajustado al embobinado (Ray 2000). La bobina completa se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Bobina Rogowski construida en el laboratorio.

Circuito acondicionador de señales.

Como se ha visto, la tensión inducida en la bobina es proporcional a la derivada de la corriente que se desea medir. Por tanto, para obtener una señal proporcional a la corriente hay que integrar la tensión medida. En la bibliografía existen tres formas para calcular esta integral, ellas son: integración con dispositivos pasivos, integración con dispositivos activos como los amplificadores operaciones (AO) y por último la auto integración. Se ha decidido tomar la opción de integrar mediante un AO. Por otra parte los valores del voltaje inducido a la salida de ambas bobina Rogowski son considerablemente bajos, para la corriente de excitación del motor que nos interesa medir su valor, que está en el orden de los μV , (ver ecuación 3), por tanto, (Abdi-Jalebi 2007, 753) resulta indispensable amplificar e integrar esta señal. El amplificador e integrador se muestran en los cuadros de la derecha e izquierda, respectivamente, de la Figura 3.

Los AO utilizados están integrados en un TL082. Este AO es de entrada a JFET con bajo consumo de potencia, alta impedancia de entrada ($10^{12} \Omega$) baja corriente de polarización en la entrada (50 pA) y de bajo voltaje offset de entrada (5 mV). Los valores de los componentes del circuito se obtienen de la siguiente forma: R_2 y C están relacionados con la frecuencia de corte del integrador, como filtro pasa bajo, la cual está dada por la siguiente expresión,

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_2 C} \quad (6)$$

Se diseñó para tener una frecuencia de corte por encima de la frecuencia normal de trabajo, 60 Hz. Se tomó $f_0 = 180 \text{ Hz}$.

De:

$$f_0 = 180 \text{ Hz} = \frac{1}{2\pi R_2 C} \quad (7)$$

Si $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ se obtiene para C el valor de $1 \times 10^{-6} \text{ F}$, que cumplen con ese requerimiento. El segundo AO se diseñó con una ganancia de $|A_0| = \frac{R_4}{R_3} = 100$ por lo cual se tomó $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ y $R_4 = 100 \text{ k}\Omega$.

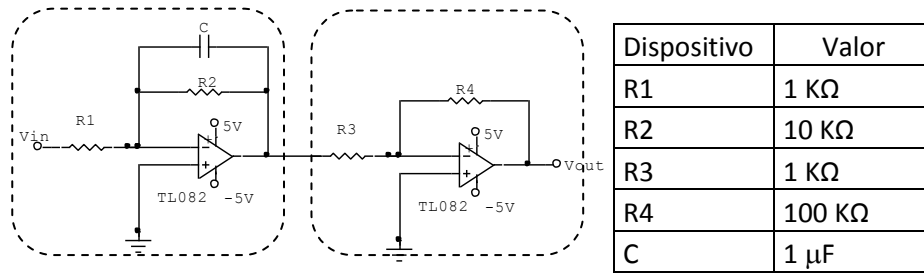


Figura 3. Circuito eléctrico del amplificador e integrador. Tabla de valores.

La función de transferencia del circuito integrador-amplificador de la Figura 3 es:

$$A_f = \frac{V_{out}}{V_{in}} = A_0 \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{sR_2C + 1} \quad (8)$$

Resultados Experimentales.

La bobina Rogowski se excitó introduciéndola en el circuito de alimentación de un motor de 0.373 KW (1/2 hp) a 127 V_{RMS} y 60 Hz. La corriente nominal de alimentación del motor es de 7.8 A_{RMS}. Esta medición se realizó con un amperímetro de gancho industrial.

Primeramente se tomó la bobina Rogowski comercial del Power Quality Analyzer Fluke 435 para poder comparar sus resultados con los de la bobina construida en el laboratorio. Por inspección se puede deducir que ésta no cuenta con un circuito integrador-amplificador. Este circuito se encuentra embebido dentro del instrumento medidor de energía. Los resultados de las mediciones con el osciloscopio se muestran en la siguiente Figura 4, sólo con el amplificador de ganancia 100 y en la Figura 5 con amplificador y filtro a la salida.

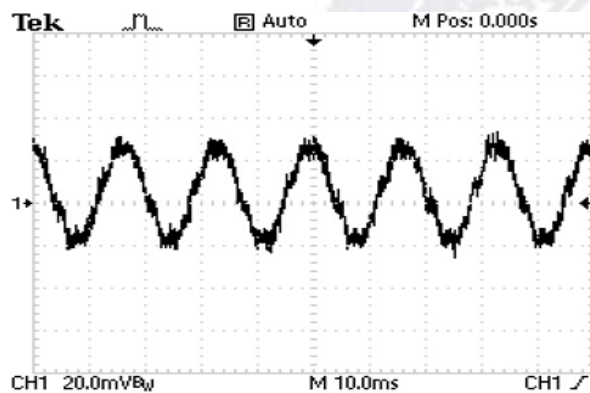


Figura 4. Respuesta de la Bobina Rogowski comercial, con amplificador G=100.

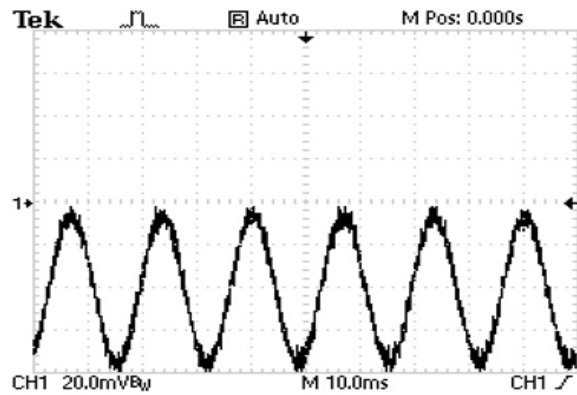


Figura 5. Respuesta de la bobina de Rogowski comercial con amplificador y filtro.

Como se puede apreciar, existe un nivel de DC provocado por el integrador, para bloquearlo, se colocó un capacitor de desacoplamiento entre las dos partes que componen los AO (ver Figura 6).

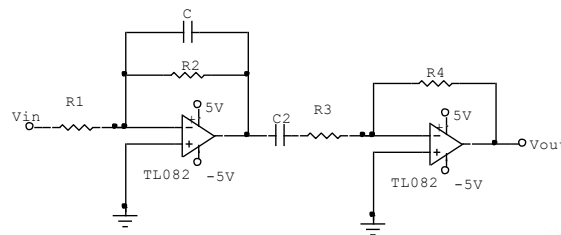


Figura 6. Circuito acoplado con capacitor electrolítico C_2 .

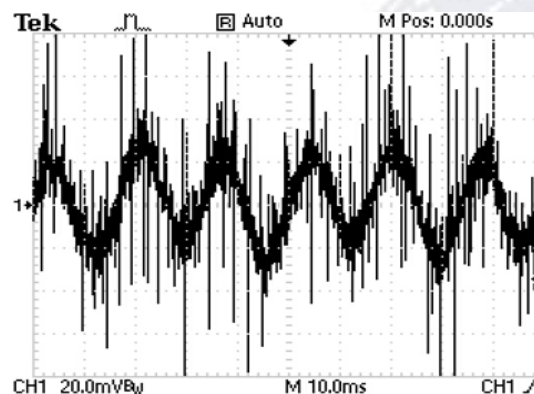


Figura 7. Respuesta de la bobina Rogowski no-comercial, sólo con amplificador $G=100$, sin filtro.

En este caso se optó por dar a C_2 el valor de $50 \mu\text{F}$. Después se procedió a hacer las mismas

mediciones con la bobina Rogowski fabricada por los autores. Los resultados, de la salida de la bobina amplificada por 100, se muestran en la Figura 7. Se puede apreciar que la salida contiene ruido de alta frecuencia.

Al realizar la medición con el amplificador y el filtro pasa bajo de frecuencia de corte 180 Hz, se obtiene la señal mostrada en la Figura 8.

Para incrementar la amplitud de la f.e.m inducida existen dos procedimientos, en uno es necesario incrementar ya sea N , A o reducir l (ver expresión 3). En este caso, no se alcanza a aumentar el valor del voltaje inducido considerablemente. La alternativa remanente era cambiar la constante de permeabilidad μ_0 insertando un elemento ferromagnético en el núcleo de la bobina. Este cambio puede multiplicar por 10 el valor del voltaje inducido a la salida.

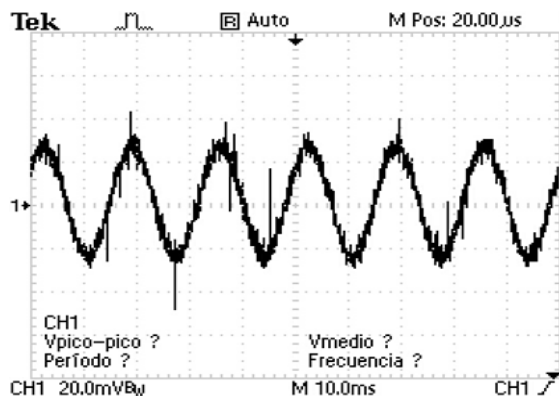


Figura 8. Respuesta de bobina Rogowski no-comercial con amplificador y filtro.

El núcleo ferromagnético utilizado fue un cilindro hueco de ferrita blanda normalmente usado para cables y embobinados; con dimensiones de diámetro interno = 3.22 mm, diámetro externo = 7.30 mm y longitud (o altura) de 4.30 mm e impedancia de 123 Ω a la frecuencia de trabajo.

Se colocaron ferritas hasta llenar el toroide en su totalidad como se muestra en la Figura 9. Al medir con el osciloscopio la bobina Rogowski modificada que estaba excitada con la misma corriente de 7.8 A_{RMS} se obtienen los valores mostrados en la Figura 10. Nótese que ahora la señal resulta con menos ruido y mayor amplitud resultando en un valor V_{PP} de 300 mV aproximadamente.

Cuando se mide la salida del circuito acondicionador de señales se obtienen los resultados mostrados en la Figura 11.

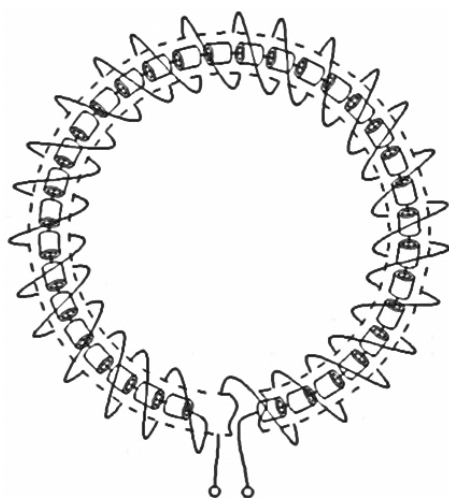


Figura 9. Estructura de Bobina Rogowski Modificada.

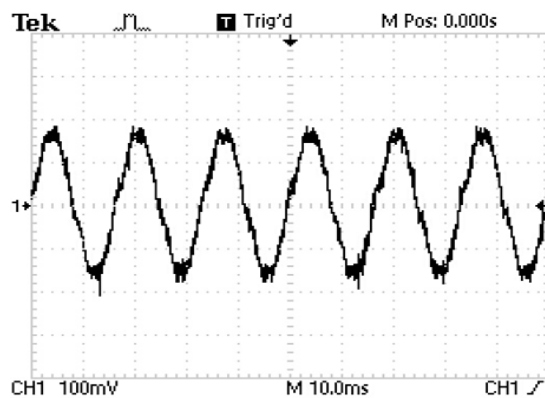


Figura 10. Respuesta de la bobina Rogowski modificada con amplificador $G=100$.

Conclusiones

Se cumple el objetivo preliminar de obtener un dispositivo flexible para medir corrientes sin intervenir el circuito, con características similares a las bobinas de Rogowski y que se puedan integrar fácilmente a circuitos de medición de potencia en aplicaciones domesticas e industriales de bajo costo.

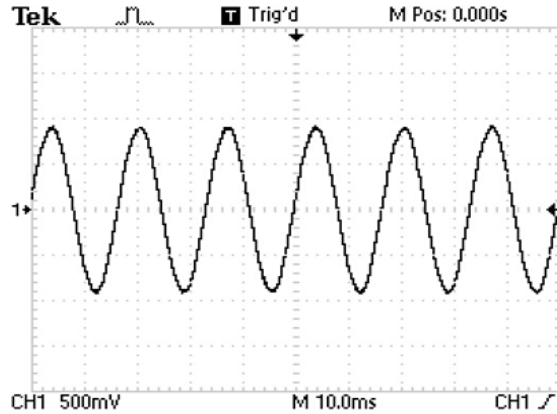


Figura 11. Respuesta de la bobina Rogowski modificada con núcleo de ferrita.

Se presentó una forma sencilla y de muy bajo costo para modificar la bobina de Rogowski introduciendo un material ferromagnético en el cilindro que se forma al interior de la hélice como se muestra en la Figura 9. La comparación de las Figuras 4, 7, 10 demuestran como la amplitud de la f.e.m inducida aumenta considerablemente al introducir la ferrita. Si se analizan comparativamente en pares las figuras 7 y 10 así como las figuras 8 y 11, se puede apreciar un evidente aumento de la relación señal ruido al incluir las ferritas en el dispositivo. En la Tabla 1 se aprecia un cambio de 1.9 a 18 dB en el primero de los dos pares y de 11 a 31 dB en el segundo par de figuras.

Tabla 1	
Relación Señal/Ruido 60 Hz	
Figura	S/R (dB)
Fig. 7	2
Fig. 10	18
Fig. 8	10
Fig. 11	31

El cambio estructural propuesto, así como el circuito empleado para la integración, provocan una mejora apreciable de funcionamiento. La comparación con otros autores (McCormick, 306), (Abdi-Jalebi 2005, 354), (Wei 2006, 162) resulta un tanto engorrosa ya que este parámetro no sólo depende de la bobina sino también de las características de los amplificadores operacionales empleados y de la forma en se mida la relación señal ruido. En algunos casos los reportes son

sólo gráficos. No obstante se aprecian valores coincidentes en el orden de magnitud para algunas simulaciones realizadas (Abdi-Jalebi 2007, 753).

La señal acondicionada que se muestra en la Figura 11, ya se puede introducir sin dificultad en el convertidor analógico digital de cualquier circuito de procesamiento sin mayores dificultades. Las afectaciones que se producen en la linealidad y respuesta de frecuencia no serán tomadas en cuenta para las aplicaciones de interés ya que siempre se trabajara a 60 Hz y las variaciones de la intensidad de la corriente a medir serán pequeñas. Las bobinas presentadas pueden emplearse como sensores fijos en circuitos de medición de corriente en aplicaciones domesticas e industriales con un muy bajo costo y por tanto permitir la masificación de la aplicación. Lo cual facilitaría el empleo de circuitos para la administración de la demanda energética.

Este es un resultado preliminar, investigaciones posteriores se necesitarán para determinar características importantes como su respuesta de frecuencia, linealidad, saturación y extender sus aplicaciones.

Referencias

Abdi-Jalebi, E. McMahon, R. (2005). Simple and Practical Construction of High-Performance, Low-Cost Rogowski Transducers and Accompanying Circuits for Research Applications. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Ottawa, Canada May. Pp 354-358.

Abdi-Jalebi, E. y McMahon, R. (2007). High-Performance Low-Cost Rogowski transducers and Accompanying Circuitry. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 56, No.3 June, pp 753-759.

Argüeso M.M. (2005). Estudio de una bobina de Rogowski como sonda detector de pulsos de alta frecuencia. Tesis de doctorado. Universidad Carlos III de Madrid. Online: <http://electronica.uc3m.es/groble/publicaciones/TID/tinvesrog.pdf>

Fitzgerald, A.E. et.al. (2003). Máquinas Eléctricas. Cap. I. México. D.F. McGraw-Hill Interamericana.

McCormick, B. Kaita, R. Kugel, H. y Hatcher, R. (1999). 18th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering. Symposium Proceedings (Cat. No.99CH37050). DOI: [10.1109/FUSION.1999.849843](https://doi.org/10.1109/FUSION.1999.849843), pp 306-309.

Ray, W.F. y Hewson, C.R. (2000). High Performance Rogowski Current Transducers. Online: http://www.gmw.com/electric_current/PEM/pdf/ias_2000_pem.pdf

Shepard, D. E. D.W. Yauch, D. W. An Overview of Rogowski Coil Current Sensing Technology. Online:

[http://www.dynamp.com/ldadocum.nsf/c2270fbdd892ac3e86256e75000ad88a/e710af6d3e0f6255862565d7004b19db/\\$FILE/Report.pdf](http://www.dynamp.com/ldadocum.nsf/c2270fbdd892ac3e86256e75000ad88a/e710af6d3e0f6255862565d7004b19db/$FILE/Report.pdf)

Shramkov, E.G. (1972). Mediciones Eléctricas Cap. VII Conversores magnéticos, pags. 143-145, Moscú, Editorial Visshayashkola.

Wei, L. et.al. (2006). Universities Power Engineering Conference, 2006. UPEC '06. Proceedings of the 41st International. Vol. 1. 2006, pp 162-165. DOI: [10.1109/UPEC.2006.367735](https://doi.org/10.1109/UPEC.2006.367735)

