

Simulación de bobina rogowski con una fuente pulsada en Itspice Simulation of rogowski coil with a pulsed source in Itspice

A. K. Angeles-Alpirez ^a, O. Gallardo-García ^a, A. Traslosheros-Michel ^a, M. Torres-Rivera ^a, G. Ramirez-Villa ^a

^aUniversidad Aeronáutica en Querétaro, 22154, Colón, Querétaro, México.

Resumen

Este trabajo se centra en la simulación electrónica del diseño de un sensor de corriente de alta precisión basado en la bobina Rogowski, para la medición de corriente alterna en productos de conversión de energía. A diferencia de los sensores de corriente basados en transformador de núcleo de ferrita, la bobina Rogowski reduce considerablemente el peso y las dimensiones sin reducir las capacidades de medición de corriente, lo que la vuelve atractiva para su uso en sectores en donde son relevantes dichas características. La simulación se realiza con el software LTspice, teniendo en cuenta la propuesta de simulación de algunos componentes que no se encuentran por default en el software, tales como la bobina Rogowski y el IGBT APT80GA60LD40; y se realiza una comparación con transformadores de corriente regulares al seleccionar una propuesta de tres configuraciones de un circuito integrador para obtener una señal de salida proporcional a la corriente medida.

Palabras Clave: Bobina, pulsos, Itspice, rogowski.

Abstract

This work focuses on the electronic simulation of the design of a high-precision current sensor based on the Rogowski coil, for the measurement of alternating current in energy conversion products. Unlike ferrite core transformer based current sensors, the Rogowski coil significantly reduces weight and dimensions without reducing current measurement capabilities, making it attractive for use in industries where such features are relevant. The simulation is carried out with the LTspice software, taking into account the simulation proposal of some components that are not found by default in the software, such as the Rogowski coil and the IGBT APT80GA60LD40; and a comparison with regular current transformers is made by selecting a proposal from three configurations of an integrator circuit to obtain an output signal proportional to the measured current.

Keywords: Coil, pulses, Itspice, rogowski.

1. Introducción

Actualmente, el incremento en las exigencias de calidad y confiabilidad de los sistemas de energía eléctrica han impulsado el desarrollo de dispositivos y sensores para el monitoreo de tensiones o corrientes. Además, la mayoría de los sistemas eléctricos que poseen transformadores de corriente alterna llegan a ser invasivos y se ha empezado a evaluar bobinas Rogowski para una medición de corriente más precisa, sin embargo, no existe documentación de aplicaciones con fuentes pulsadas en LTspice haciendo uso de ellas.

Una bobina Rogowski está conformada por un material no magnético y tiene una sección transversal que suele ser rectangular o circular, ver Figura 1; además la principal diferencia que

tiene con las bobinas comunes es que posee un retorno que pasa a través de todo el embobinado de la misma. A medida que cambia el flujo magnético de la bobina, se inducirá una señal de voltaje que representa la corriente de prueba.

La tensión de salida de la bobina Rogowski es proporcional a la tasa de cambio de la corriente del conductor primario y no se ve afectada por la corriente continua; además la bobina está diseñada para detectar cambios en el campo magnético generado por la corriente que se está midiendo, entonces, cuando la corriente fluye a través de un conductor, se genera un campo magnético alrededor del mismo y la Rogowski detecta dicho campo para convertirlo en una señal eléctrica que posteriormente se puede integrar para adquirir el voltaje (Mingotti *et al.*, 2020).

*Autor para correspondencia: 6348@soyunaq.mx

Correo electrónico: 6348@soyunaq.mx (Alma Karenina Angeles Alpirez), omar.gallardo@ge.com (Omar Gallardo García), alberto.traslosheros@unaq.mx (Albeto Traslosheros Michel), moises.torres@unaq.mx (Moisés Torres Rivera) y goretti.ramirez@unaq.mx (Goretti Ramirez Villa).

Historial del manuscrito: recibido el 30/06/2023, última versión-revisada recibida el 19/09/2023, aceptado el 09/09/2023, publicado el 30/11/2023. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v11iEspecial4.11388>



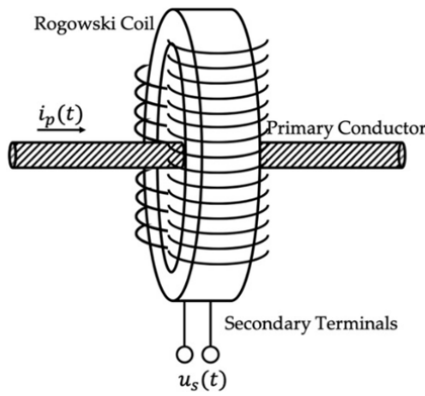


Figura 1: Estructura de la bobina Rogowski (Mingotti et al., 2020)

Por otra parte, las principales ventajas (Liu et al., 2019) que presentan las Rogowski con los transformadores de corriente son:

- Medición de corriente en una amplia gama sin saturación.
- Soporte de grandes sobrecargas sin daños.
- Inmunidad a la saturación del núcleo con fuertes corrientes de falla.
- Volumen y peso menor a un transformador.
- Bajo costo.
- Alta linealidad.
- Sistema de medición no intrusivo.
- Bajo coeficiente térmico.
- Fácil instalación.

Y gracias a estas características la Rogowski no solo ha sido implementada en aplicaciones convencionales (energía, electricidad, electrónica, etc) sino también en áreas de protección y monitoreo, interruptores automáticos, laboratorios de alta potencia, entre otros (Shafiq et al., 2022). Entonces, los resultados obtenidos en este artículo contribuyen a la búsqueda de procesos más eficientes para la medición de corriente eléctrica en sistemas de energía eléctrica con una fuente pulsada, debido a que este tipo de circuito está enfocado para un rango de altas frecuencias que no ha sido elaborado en otras disciplinas, tales como, la aeronáutica y la industria médica. Por otro lado, en el área de simulación computacional se utilizó el software LTspice para analizar a detalle los diferentes resultados de cada etapa del circuito y comprender la funcionalidad del diseño preliminar del mismo, obteniendo así una adaptabilidad para diferentes aplicaciones en las industrias mencionadas con anterioridad.

2. Estado del arte

Como se menciona en (Alfaro et al., 2022), las bobinas Rogowski se utilizan ampliamente en condiciones de medición de corriente de alta frecuencia debido a su estructura simple, por

lo tanto, se plantea el diseño de un prototipo de bobina en una simulación en el software de LTspice, ver Figura 2.

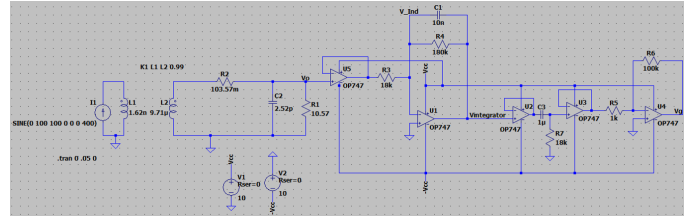


Figura 2: Circuito de bobina Rogowski para corrientes sinusoidales (Alfaro et al., 2022)

Para la medición de corriente en aplicaciones con corrientes sinusoidales en el rango de frecuencias de 100Hz a 1KHz.

También como se menciona en (Shepard y Yauch, 2019), la bobina Rogowski es una tecnología versátil para el desarrollo de configuraciones y técnicas para la medición de corriente, debido a que la teoría de la Rogowski se basa en la Ley de Faraday que establece “la fuerza electromotriz total inducida en un circuito cerrado es proporcional a la tasa de cambio en el tiempo del flujo magnético total que une el circuito”. Además, se puede inducir un voltaje en un bucle de alambre moviendo el conductor a través de un campo magnético variable en el tiempo. El voltaje inducido estará definido por la siguiente ecuación general (derivado de la ley de Faraday y la ecuación de Maxwell) que se muestra a continuación:

$$V = \dot{O}(u \cdot B) \cdot dl - \dot{O} \frac{B}{t} \cdot ds, \quad (1)$$

donde:

- u = Velocidad del segmento conductor, dl,
- B = Densidad del flujo,
- dl = Pequeño segmento del conductor,
- t = Tiempo,
- ds = Pequeño elemento de superficie,

De igual forma como se menciona en (Rivera et al., 2017), la Universidad Nacional de Colombia desarrolla una bobina Rogowski diseñada para medir corrientes de impulso en el rango de KHz hasta cientos de KHz, ver Figura 3.



Figura 3: Bobinas físicas elaboradas por la Universidad de Colombia (Rivera et al., 2017)

Con la finalidad de mejorar el desempeño de las redes de distribución eléctrica, las cuales utilizan descargadores de sobretensión (DPS) ante descargas de alto impacto.

Y por otra parte como se menciona en (Qinghua et al., 2022), un grupo de investigadores chinos desarrollaron un diseño de PCB de una bobina Rogowski para altas frecuencias (34Hz - 3.5MHz). Este artículo propone una bobina Rogowski de estructura abierta basada en un nuevo método de embobinado, de modo que las dos bobinas PCB de extremos abiertos se distribuyan uniformemente cuando estén cerradas, al tiempo que se mejora la inmunidad de la bobina a los campos magnéticos externos según el método de bobinado de iguales (área de descableado y bucle).

3. Esquema del circuito

En este caso, se implementó el diseño y una simulación electrónica de un sensor basado en la bobina Rogowski con la finalidad de analizar el comportamiento de este sensor de corriente en aplicaciones de corrientes pulsadas de 13KHz. El diseño del circuito se comenzó en el software de LTspice donde se pueden crear o simular modelos electrónicos para observar el comportamiento de los mismos en condiciones de operación realistas.

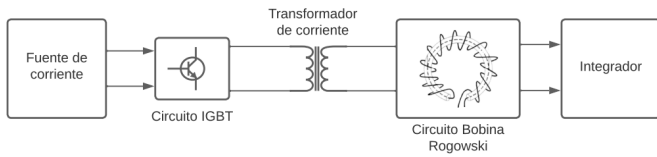


Figura 4: Esquemático del circuito (Elaboración propia, 2023).

La Figura 4 muestra un diagrama general de las partes fundamentales del circuito que se desarrolló, entonces, al momento de realizar la simulación de lo anteriormente descrito, se colocó una fuente de alimentación DC conectada a un banco de capacitores a causa del ruido de alta frecuencia que se podía obtener. Después, al momento de añadir el IGBT a la simulación no fue posible debido a que LTspice actualmente no cuenta con un elemento designado a este componente, por lo que fue necesario utilizar un “switch” con una fuente pulsada y una directiva específica para simular el comportamiento de dicho IGBT.

De hecho, LTspice incluye un gran número de excelentes modelos FET, sin embargo, en ocasiones es necesario simular un simple interruptor que se abre y cierra en momentos específicos bajo ciertas condiciones, por lo tanto, al agregar el switch desde la barra de herramientas de LTspice también se especificaron parámetros como voltajes y resistencias, ver en la Figura 5.



Figura 5: Habilitación de directiva en LTspice (Elaboración propia, 2022).

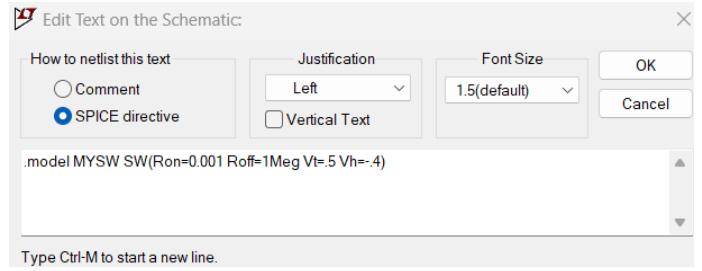


Figura 6: Configuración de parámetros de directiva (Elaboración propia, 2022).

En este caso, se utilizó un modelo MYSW junto con resistencias de encendido y apagado (R_{on} y R_{off}) al igual que tensiones de disparo e histéresis (V_t y V_h). Teniendo en cuenta que al haber colocado la directiva también se configuró el mismo modelo del switch en el propio componente. Consulte la Figura 6 y Figura 7 para observar la representación a mayor detalle.

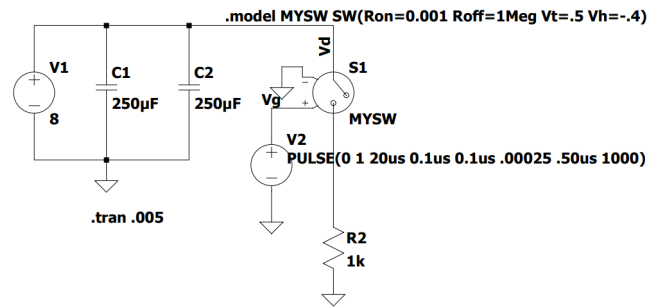


Figura 7: Simulación del IGBT con un switch (Elaboración propia, 2022).

Una vez configurado el switch, se llevó a cabo la simulación del anterior circuito y la Figura 8 muestra las señales cuadradas que se estaban obteniendo a través del switch, el cual simulaba el comportamiento del IGBT.

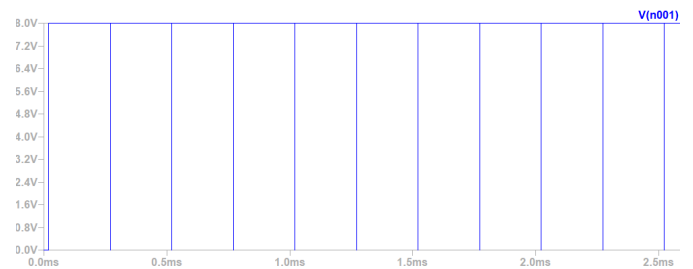


Figura 8: Señal obtenida a la salida del switch (Elaboración propia, 2022).

4. Cálculo de parámetros de la Bobina Rogowski

Antes de realizar algún cálculo fue necesario definir las dimensiones de la bobina, las cuales en este caso fueron propuestas a partir del transductor de corriente HTFS 200-800.

4.1. Diámetro interno y diámetro externo

La Tabla 1 muestra las dimensiones que actualmente se utilizan en el transductor de corriente HTFS 200-800, el cual posee aplicaciones en el ámbito industrial.

Tabla 1: Dimensiones del transductor de corriente

Diámetro interno (a)	Diámetro externo (b)	Altura (h)
0.033 m	0.022 m	0.0165 m

Entonces, al tomar en cuenta esas dimensiones anteriores, se propusieron nuevas medidas para el diseño de la bobina Rogowski, ver Tabla 2.

Tabla 2: Dimensiones propuestas para la Rogowski

Diámetro interno (a)	Diámetro externo (b)	Altura (h)
0.015 m	0.025 m	0.0016 m

4.2. Ancho del cable

Para este diseño de la Rogowski se consideró utilizar un cable calibre 26 (AWG 26), donde el diámetro del cable es de 0,4050 mm, sin embargo, todas las medidas se estaban considerando en metros, por lo tanto:

$$w = 0,000405m. \quad (2)$$

4.3. Número de vueltas

El número de vueltas fue el factor más práctico de obtener porque solamente se necesitó conocer el diámetro interno, el diámetro externo y el calibre del cable, los cuales fueron definidos anteriormente.

$$N = \frac{(b - a)\pi}{w}, \quad (3)$$

donde:

- a : Diámetro interno,
- b : Diámetro externo,
- w : Ancho del cable,

$$N = \frac{(0,025 - 0,015)\pi}{0,000405} = 77. \quad (4)$$

4.4. Longitud del cable

Al haber obtenido la variable del número de vueltas, se sustituyó directamente en el cálculo de la longitud del cable, tal como se muestra a continuación:

$$l_w = (b - a)(N). \quad (5)$$

Donde:

- N : Número de vueltas ,

$$l_w = (0,025 - 0,015)(77) = 0,77m. \quad (6)$$

4.5. Capacitancia

La permitividad eléctrica del vacío fue un nuevo parámetro introducido en el cálculo de la capacitancia de dicha bobina además de las variables ya conocidas.

$$C_c = \frac{\pi^2 \epsilon_0 (b + a)}{\ln \frac{b+a}{b-a}}. \quad (7)$$

Donde:

- ϵ_0 : Permitividad eléctrica del vacío.

$$C_c = \frac{\pi^2 \cdot 8,854 \times 10^{-12} (0,025 + 0,015)}{\ln \frac{0,025+0,015}{0,025-0,015}} = 2,52pF. \quad (8)$$

4.6. Resistencia

El cálculo de la resistencia dependió principalmente de la longitud del conductor, su sección transversal y el material conductor utilizado. Por lo tanto, se obtuvo de la siguiente manera:

$$R_c = \frac{\rho_w l_w}{\pi r^2}. \quad (9)$$

Donde:

- r : Radio del cable,
- ρ_w : Resistividad del cobre,

$$R_c = \frac{(1,72 \times 10^{-8})(0,7757)}{\pi \left(\frac{0,000405}{2}\right)^2} = 103,57m\Omega. \quad (10)$$

4.7. Inductancia

Por último, se obtuvo la inductancia mediante la permeabilidad eléctrica del vacío y otros factores anteriormente calculados.

$$L_c = \frac{N^2 \mu_0 h}{2\pi} \ln \frac{b}{a}. \quad (11)$$

Donde:

- μ_0 : Permeabilidad eléctrica del vacío,
- h : Altura,

$$L_c = \left(\frac{(77)^2 (4\pi \times 10^{-7})(0,0016)}{2\pi} \right) \left(\ln \frac{0,025}{0,015} \right) = 0,971\mu H. \quad (12)$$

5. Simulación

5.1. Bobina Rogowski

Una vez realizados los cálculos, se procedió a simular la bobina Rogowski en LTspice, sin embargo, en la librería de componentes que posee este software no existe un elemento específico que simule el comportamiento de la Rogowski, por lo tanto, se utilizó el esquema eléctrico de dicha bobina el cual está compuesto por un inductor, una resistencia y un capacitor, ver en la Figura 9.

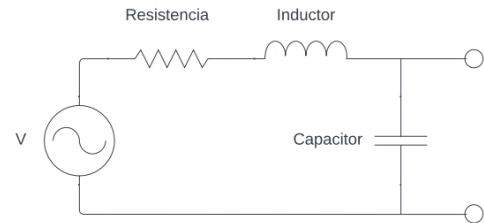


Figura 9: Esquema eléctrico de bobina Rogowski (Elaboración propia, 2023).

El modelo del circuito equivalente de la bobina Rogowski se basa en una hipótesis, la cual dice que existe una distribución

homogénea entre su resistencia, su inductancia y su capacitancia a lo largo de la bobina, recordando que los cálculos obtenidos fueron:

Tabla 3: Parámetros obtenidos de la bobina Rogowski

N	l_w	Capacitancia	Resistencia	Inductancia
77	0.77m	2.52pF	103.57mΩ	0.971μF

La Figura 10 muestra que se seleccionaron los últimos tres parámetros de la Tabla 3 y se sustituyeron en el esquemático de la Rogowski en LTspice.

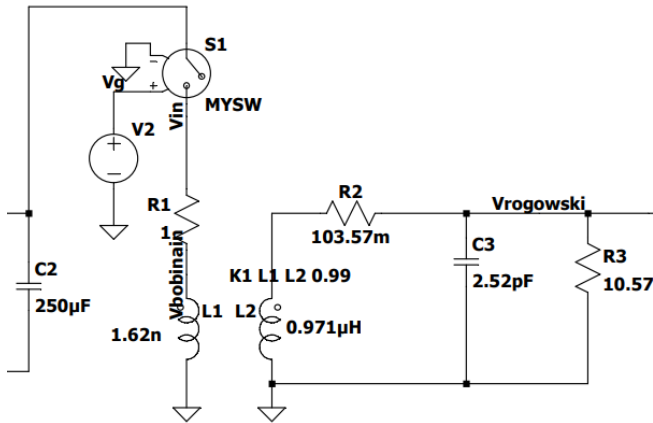


Figura 10: Circuito de la bobina Rogowski LTspice (Elaboración propia, 2023).

Donde:

- $L2$ es la autoinductancia.
- $R2$ es la resistencia de la bobina.
- $R3$ es la resistencia de carga.
- $C3$ es la capacitancia global de la bobina.

El componente “R3” es la resistencia de carga o también conocida como resistencia de derivación, la cual es una parte complementaria al circuito de la bobina, debido a la “frecuencia de resonancia”. Este concepto se produce en cualquier circuito que posea al menos un inductor y un capacitor, los cuales provocan oscilaciones de la energía almacenada de alguna forma, entonces, en caso de no colocar dicha resistencia se provocaría un sobreimpulso cerca de la frecuencia de resonancia y es algo que no se quiere obtener debido a que el ancho de banda del circuito de la Figura 10 esta diseñado para trabajar con corrientes pulsadas de 13KHz.

6. Integrador

Una vez obtenidos los parámetros de la bobina y haberlos implementado en la simulación, fue necesario añadir un integrador a todo el circuito, teniendo en cuenta que si la tensión de salida es una diferencial a la corriente de entrada se tiene que colocar un circuito integrador en los bornes de la bobina, ver en la Figura 11, para obtener una salida adecuada.

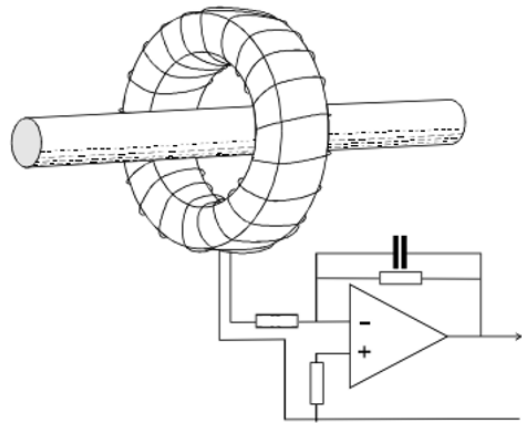


Figura 11: Método de integración (Elaboración propia, 2023)

En este caso, se analizaron tres posibles configuraciones de un circuito integrador donde se seleccionó el que otorgaba una mejor respuesta y presentaba una mayor similitud a lo que se estaba buscando. Consulte la Figura 12 para observar una descripción general de la implementación del integrador a la salida de la Rogowski.

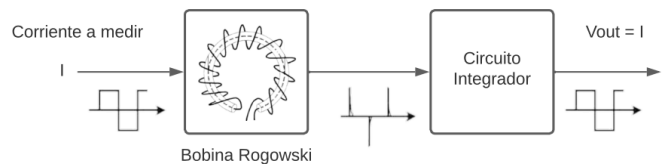


Figura 12: Esquema del método de integración (Elaboración propia, 2023).

Entonces, para el diseño del integrador se colocó una fuente de corriente antes del circuito de la bobina con la finalidad de simular la señal de pulsos de la Figura 8; además de haber agregado un amplificador inversor como último componente del circuito, ver Figura 13.

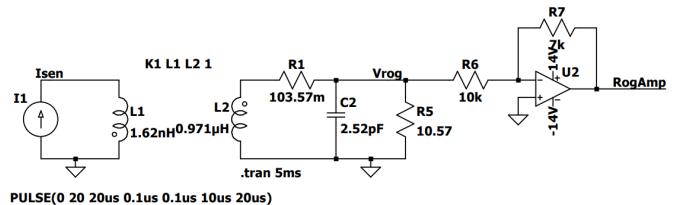


Figura 13: Circuito para prueba de integradores (Elaboración propia, 2023).

Obteniendo así pulsos de corriente que muestra la Figura 14, los cuales eran la señal de entrada que tenía que recibir el integrador.

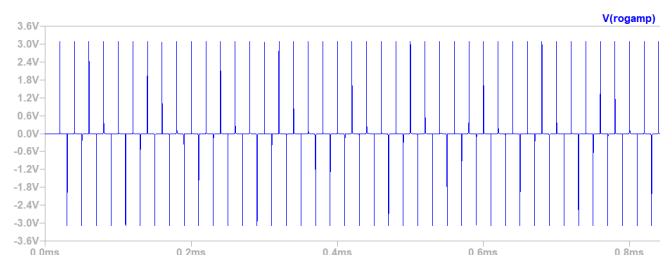


Figura 14: Señal de salida RogAmp (Elaboración propia, 2023)

6.1. Propuesta integrador 1

La primera configuración del integrador estaba conformada por un capacitor y una resistencia, es decir, una configuración muy común en este tipo de aplicaciones, ver Figura 15. Donde dicha resistencia que estaba conectada en paralelo al condensador limitará la ganancia en DC del integrador, ya que en caso de no agregarla y tener una señal de entrada de DC o una componente de DC, el amplificador se saturará y en consecuencia ya no cumplirá la función de integración.

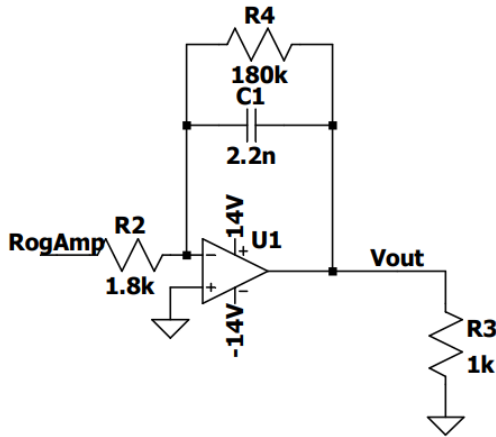


Figura 15: Circuito del integrador 1 (Elaboración propia, 2023).

Por lo tanto, en la Figura 16 se pueden observar las formas de onda que se obtuvieron a la salida del integrador, donde se capturó que la señal llegó a estabilizarse en un rango de $[-0.60\text{mV}, 0.80\text{mV}]$. Sin embargo, con esta configuración en específico al mantener una carga en el capacitor se generaba una condición inicial para el siguiente pulso, lo cual provocaba un aumento en la salida de voltaje en la señal “ V_{out} ”.

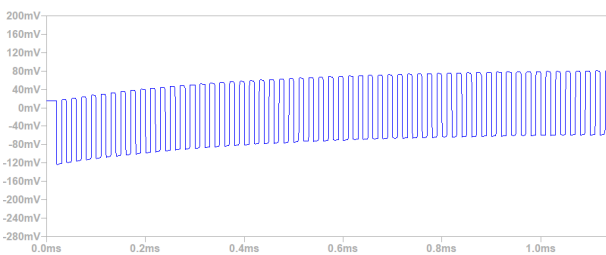


Figura 16: Señal V_{out} , salida del integrador 1 (Elaboración propia, 2023).

6.2. Propuesta integrador 2

En esta segunda propuesta se consideró añadir un “reset” para no tener ese efecto de aumento en la salida del integrador y para ello se agregó un switch junto con la fuente de corriente (I_{sen}) como alimentación del mismo, ver en la Figura 17.

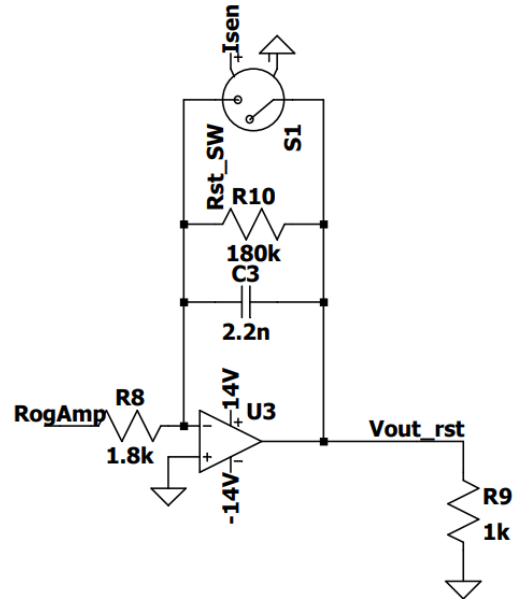


Figura 17: Circuito del integrador 2 (Elaboración propia, 2023).

Además, la Figura 18 muestra como se configuró el switch con una directiva SPICE utilizando un modelo “SW” y otros parámetros adicionales.

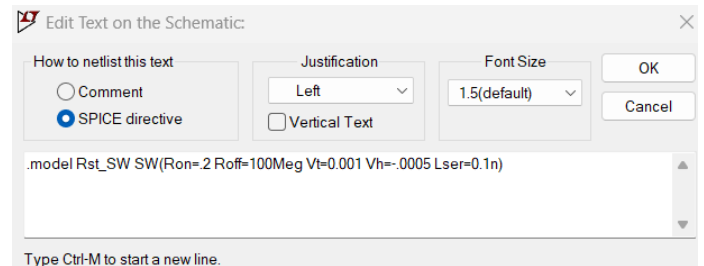


Figura 18: Directiva del reset (Elaboración propia, 2023).

La función principal del reset básicamente fue poner la salida del integrador a 0 y así se descargó la condición previa del capacitor. Es decir, cuando la señal iba aumentando de amplitud se activaba el switch, lo cual hacía el reseteo de la señal cuando estaba pasando corriente a través de la Rogowski, provocando la deformación de la señal de corriente o incluso la pérdida de la misma. Por lo que la señal de la Figura 19 no era la adecuada.

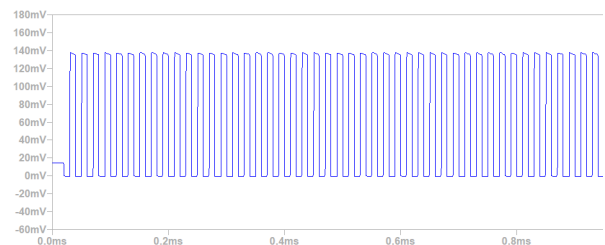


Figura 19: Señal $V_{out\,rst}$, salida del integrador 2 (Elaboración propia, 2023).

6.3. Propuesta integrador 3

Para la última configuración del integrador también se tomó en cuenta un reset, sin embargo, la diferencia en este caso fue

una fuente pulsada (V3) como alimentación del switch. Consulte la Figura 20 para observar a mayor detalle la propuesta.

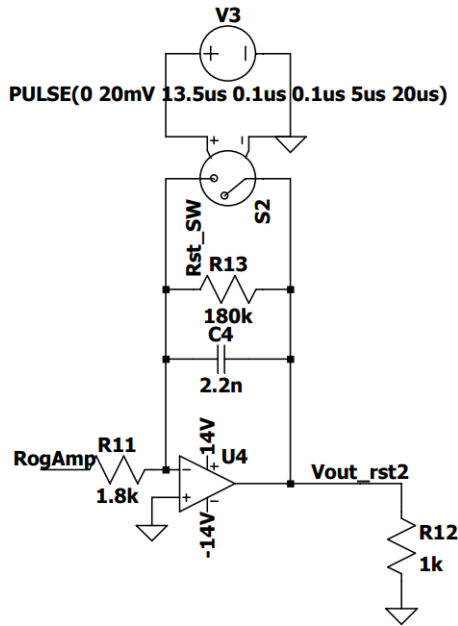


Figura 20: Circuito del integrador 3 (Elaboración propia, 2023).

Con el nuevo cambio, la Figura 21 muestra como el reset actuaba antes de que se obtuviera un pulso de la señal, para que al pasar corriente por la Rogowski se realizara una medición correcta o en el momento adecuado y esta fue la principal razón para seleccionar esta configuración.

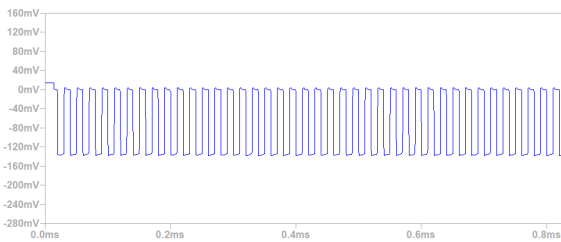


Figura 21: Señal V_{out_rst2} , salida del integrador 3 (Elaboración propia, 2023).

7. Resultados

Una vez analizadas cada una de las configuraciones del integrador con sus respectivos comportamientos, se decidió seleccionar y añadir la propuesta integrador 3, ver Figura 22, debido a que se tomaron en cuenta todas las características que el circuito de la bobina Rogowski necesitaba.

Obteniendo como resultado a la salida del integrador una señal que presentaba una amplitud en el rango de milivoltios, ver en la Figura 23.

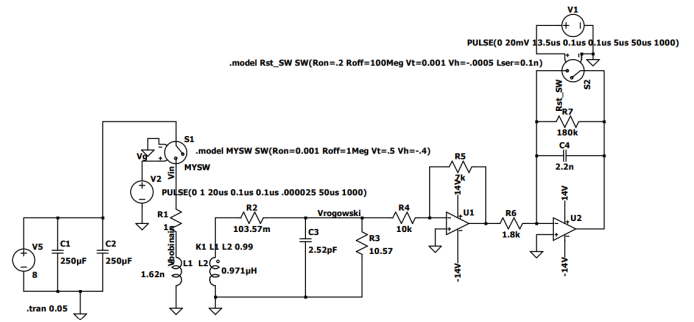


Figura 22: Circuito fuente pulsada con integrador (Elaboración propia, 2023).



Figura 23: Señal de salida del integrador (Elaboración propia, 2023).

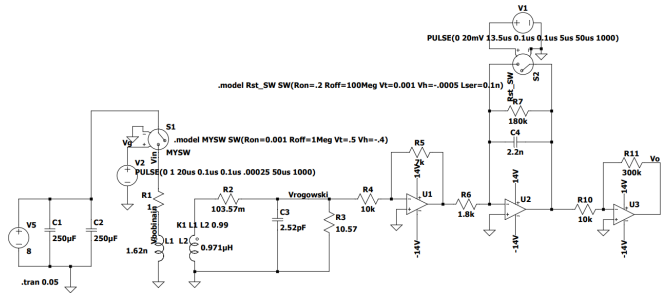


Figura 24: Circuito final de fuente pulsada (Elaboración propia, 2023).

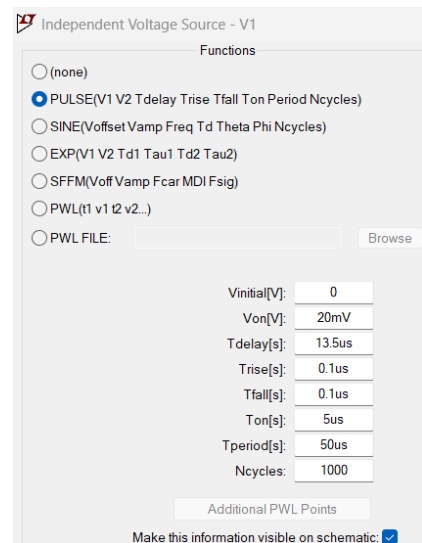


Figura 25: Configuración fuente "V1" (Elaboración propia, 2023).

Sin embargo, como la señal del integrador se encontraba en dicha escala fue necesario añadir un amplificador inversor como parte final del circuito, ver Figura 24.

Además, como el integrador debía actuar antes de que se detectara un pulso de corriente, tanto la fuente pulsada del switch como la de reset debían estar sincronizadas, es decir, se debía de tener la misma frecuencia cuando se cerraba el IGBT para que pasara toda la corriente y de igual forma cuando se estaba reseteando.

Por lo tanto, la Figura 25 y Figura 26 muestran las respectivas configuraciones donde ambas fuentes pulsadas poseían un periodo de $50\mu\text{s}$, sin embargo, las dos fuentes debían estar en distinto tiempo; obteniendo así la señal de pulsos en una escala de volts, que se aprecia en la Figura 27.

Y al realizar la comparación de la señal de corriente que se estaba obteniendo al inicio del circuito con la señal de voltaje que otorgaba todo el circuito propuesto complementado por el integrador, ver Figura 28, se obtuvo la relación de corriente-voltaje que la bobina Rogowski puede proporcionar como un sensor de corriente, tomando en cuenta la relación que se estableció los inductores del circuito.

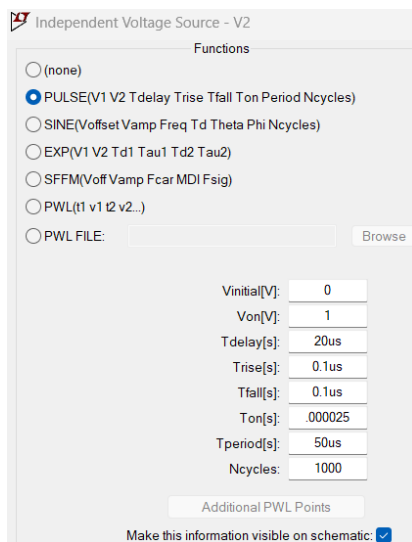


Figura 26: Configuración fuente "V2" (Elaboración propia, 2023).

8. Conclusiones

Se ejecutó exitosamente el comportamiento del IGBT APT80GA60LD40 y de la bobina Rogowski haciendo uso de circuitos equivalentes a dichos dispositivos en el software de LTspice.

Se observó que el análisis realizado en las las configuraciones de cada circuito integrador, contribuyó a la selección de la mejor propuesta. Es decir, para este caso en específico con aplicaciones de corrientes pulsadas, la tercera configuración mostró una señal con un rango de voltaje adecuado previo a la incorporación de todo el circuito desarrollado.

Se comprobó la relación de corriente de entrada tendrá la misma relación de voltaje a la salida del circuito, al comparar tanto la señal de corriente que se está proporcionando al inicio de todo el circuito con la señal de voltaje del circuito final de la bobina Rogowski.

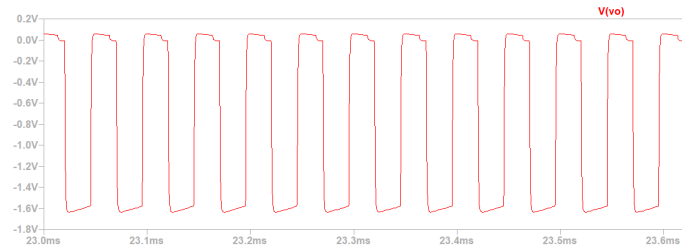


Figura 27: Voltaje del circuito final de bobina Rogowski (Elaboración propia, 2023).

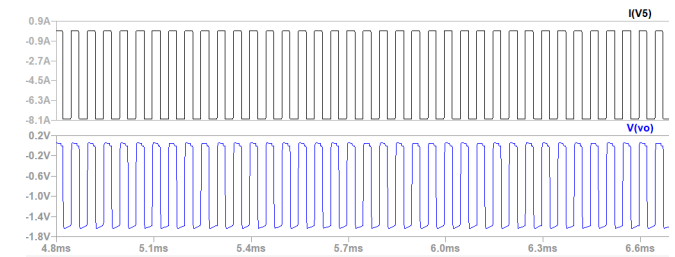


Figura 28: Comparación de señal de corriente de entrada y señal de salida de voltaje (Elaboración propia, 2023).

9. Trabajos futuros

Para futuras aplicaciones, se considera armar el circuito final obtenido en una placa de circuito impreso (PCB), debido a que actualmente no es muy usual encontrar este tipo de tecnología en diferentes ámbitos; además esta posible implementación presentaría distintas ventajas, tales como:

- Un menor peso.
- Reducción en los costos de producción.
- Mejora en la precisión de la fabricación.
- Una mayor seguridad con algún problema de sobrecarga o saturación como sucede con los transformadores.

Agradecimientos

En primera instancia, agradezco profundamente a todas las personas que participaron en la investigación y desarrollo de este artículo. Sin pasar por alto el apoyo invaluable de los mentores y asesores de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo y de la Universidad Aeronáutica en Querétaro. Finalmente, agradezco a la comunidad académica y a todos aquellos que se beneficiarán de este artículo en el futuro.

Referencias

- Alfaro, A., Gallardo, O., Traslosheros, A., y Ramírez, G. (2022). Rogowski coil simulation methodology in Itspice. *Journal of Scientific and Technical Applications*, 8:23–35.
- Liu, X., Huang, H., y Jiao, C. (2019). Modeling and analyzing the mutual inductance of rogowski coils of arbitrary skeleton. *Sensors*, 19:3397.
- Mingotti, A., Peretto, L., y Tinarelli, R. (2020). Smart characterization of rogowski coils by using a synthesized signal. *Sensors*, 20:3359.
- Qinghua, T., Wenbin, Z., Xiangyu, T., yang, L., Yanan, R., y yang, H. (2022). Design of open-ended structure wideband pcb rogowski coil based on new winding method. *electronics*, p. 18.

Rivera, N., Rueda, J. P., y Perez, E. (2017). Diseño y construcción de bobina rogowski para la medición de corriente en descargadores de sobretensión. *g*, p. 6.

Shafiq, M., Stewart, B. G., Hussain, G. A., Hassan, W., Choudhary, M., y Palo, I. (2022). Design and applications of rogowski coil sensors for power system measurements: A review. *Elsevier*, 203.

Shepard, D. E. y Yauch, D. W. (2019). An overview of rogowski coil current sensing technology. *Pennsylvania State University*, 12:3397.

Apéndice A. Simulaciones electrónicas

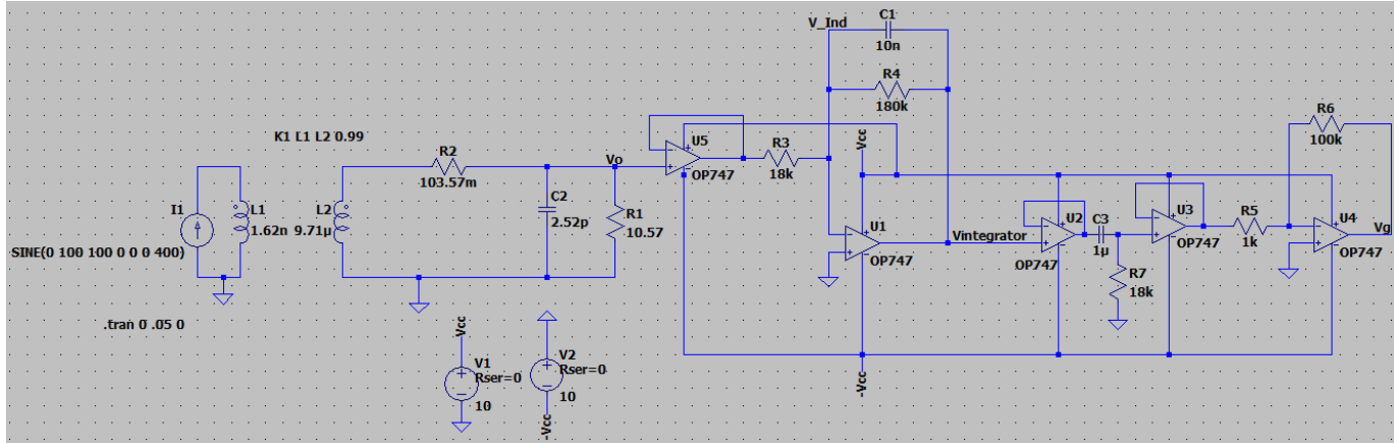


Figura A.29: Circuito de bobina Rogowski para corrientes sinusoidales (A. Alfaro y Ramírez, G. 2022).

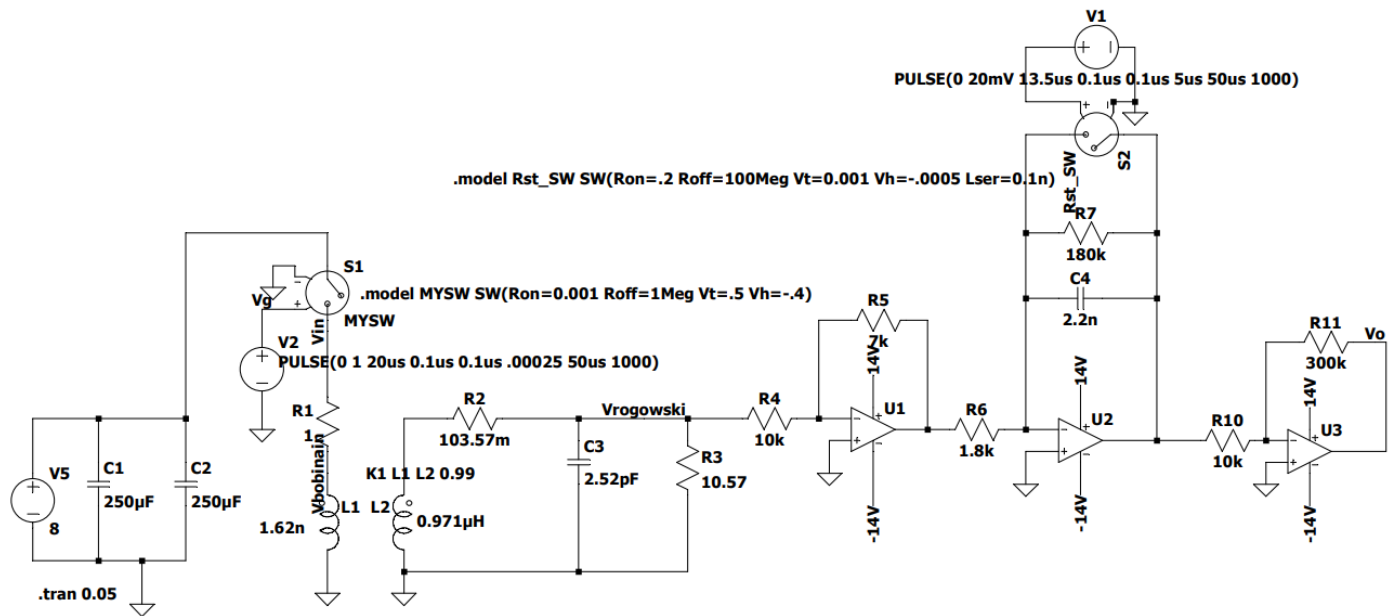


Figura A.30: Circuito final de fuente pulsada (Elaboración propia, 2023).