



Title: Methodology for Rogowski coil simulation in LTspice

Authors: ALFARO-JIMENEZ, Andrea Itzel, GALLARDO-GARCIA, Omar, TRASLOSHEROS-MICHEL, Alberto and RAMIREZ-VILLA, Goretti

Editorial label ECORFAN: 607-8695
BCIERMMI Control Number: 2022-01
BCIERMMI Classification (2022): 261022-0001

Pages: 18
RNA: 03-2010-032610115700-14

ECORFAN-México, S.C.
143 – 50 Itzopan Street
La Florida, Ecatepec Municipality
Mexico State, 55120 Zipcode
Phone: +52 1 55 6159 2296
Skype: ecorfan-mexico.s.c.
E-mail: contacto@ecorfan.org
Facebook: ECORFAN-México S. C.
Twitter: @EcorfanC

www.ecorfan.org

| Holdings | | |
|----------|-------------|------------|
| Mexico | Colombia | Guatemala |
| Bolivia | Cameroon | Democratic |
| Spain | El Salvador | Republic |
| Ecuador | Taiwan | of Congo |
| Peru | Paraguay | Nicaragua |

Introducción

Metodología

Resultados

Conclusiones

Referencias

Agradecimientos

Introducción

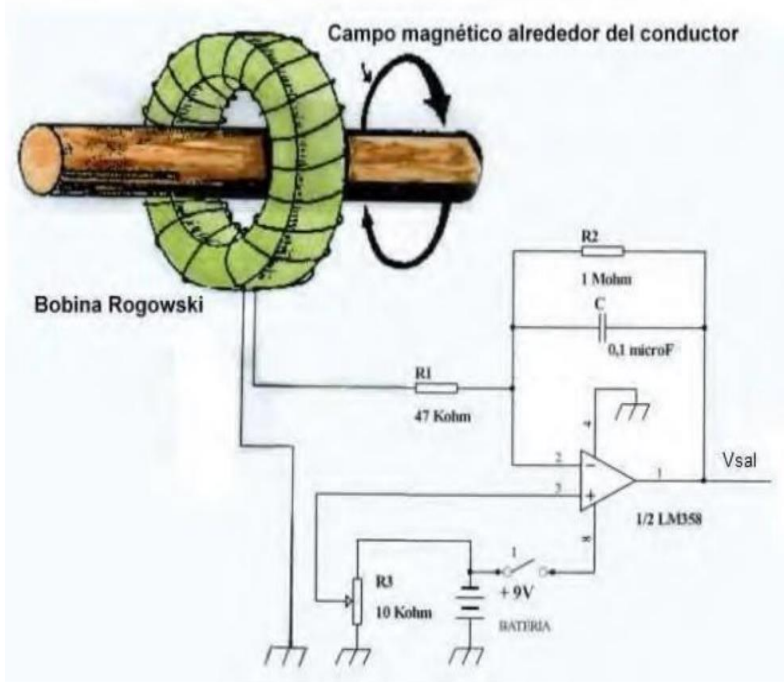


Figura 1 Bobina Rogowski con circuito integrador (All about circuits, 2020)

Las bobinas Rogowski ofrecen varias ventajas como:

- Estructura simple
- Buena linealidad
- Amplia banda de medición
- Menor peso y espacio
- Instalación más sencilla
- Mayor seguridad sin problemas de sobrecarga o saturación
- Aislamiento galvánico

Se propone el uso de estas bobinas para una aplicación en particular:

Entrada y salida de convertidores de corriente alterna (AC) con un ancho de banda desde 100 Hz a 1 kHz.

- Se requiere cubrir todo el ancho de banda con una sola bobina y un solo circuito integrador.
- Se pretende encontrar las dimensiones óptimas de la bobina para su futura aplicación en PCB de manera que se tenga un buen rendimiento y un tamaño y peso adecuados para aplicaciones aeroespaciales.
- Se busca la linealidad del circuito a lo largo de todo el ancho de banda.

Introducción

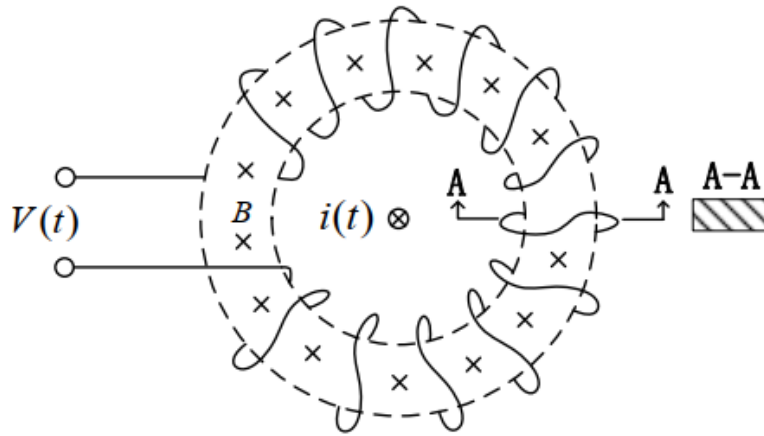


Figura 2 Estructura de una bobina Rogowski simple (Qinghua Tan, y otros, 2022)

$$\epsilon = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

Donde:

- ϵ es la fuerza electromotriz
- ϕ_B es el flujo magnético
- t es el tiempo

$$\phi = \int_a^b B \cdot dA$$

Donde:

- B es la intensidad de inducción magnética en el punto espacial
- A es el área de la sección transversal de la bobina
- a es el diámetro interno de la bobina
- b es el diámetro externo

Principios matemáticos y teoría de operación

$$B = \frac{\mu_0 i(t)}{2\pi r}$$

Donde:

- $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ y es la permeabilidad del vacío
- $i(t)$ es la corriente del conductor en el tiempo
- r es la distancia entre el punto espacial y el conductor de corriente.

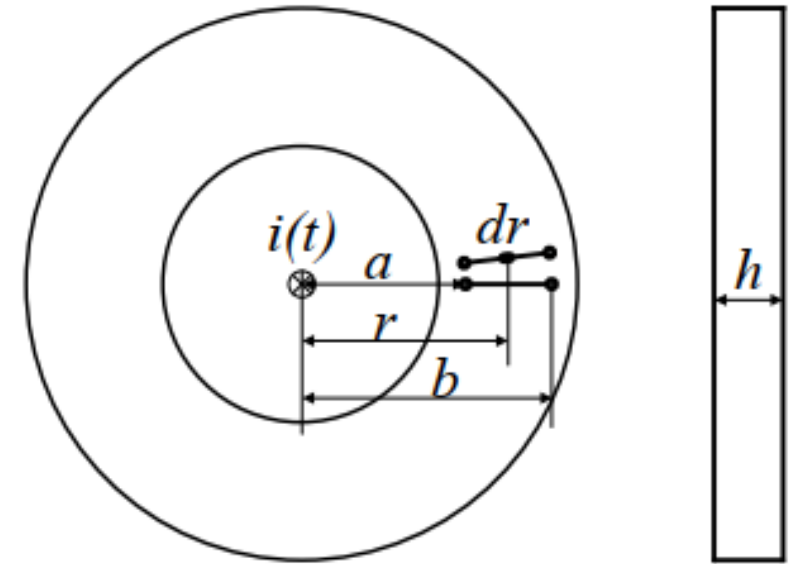


Figura 3 Cotas de las dimensiones de la bobina
(Qinghua Tan, y otros, 2022)

$$\phi = \int_a^b \frac{N\mu_0 i(t)h}{2\pi r} dr = \frac{N\mu_0 i(t)h}{2\pi} \ln \frac{b}{a}$$

Principios matemáticos y teoría de operación

$$V(t) = \frac{N\mu_0 h}{2\pi} I_n \frac{b}{a} \frac{di(t)}{dt} = M \frac{di(t)}{dt}$$

Donde:

- $V(t)$ es la fuerza electromotriz inducida de la bobina
- M es la inductancia mutua debida al conductor
- N es el número de vueltas

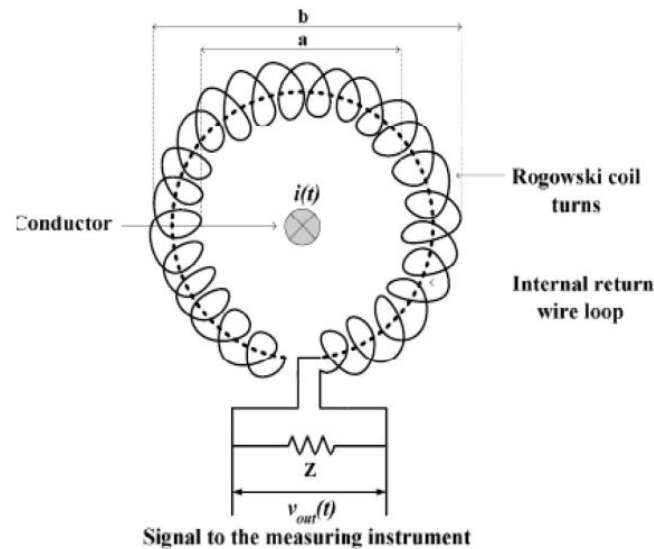


Figura 5 Estructura de la bobina Rogowski (Cristian A. Meraz, José de J. Durón, Jeziel O. Juárez, & Alberto Castillo, 2017)

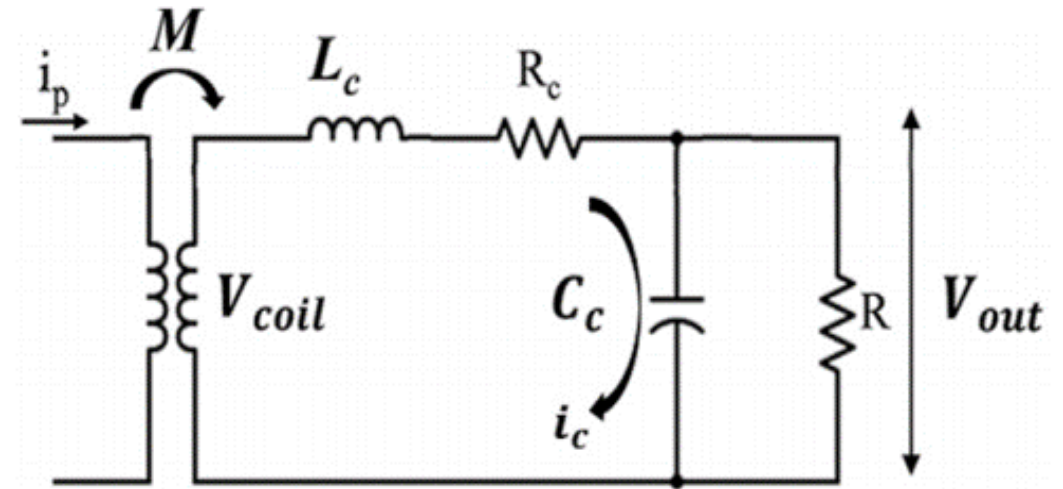


Figura 4 Circuito equivalente de una bobina Rogowski (A. Ahmed, L. Coulbeck, A. Castellazzi, & C. M. Johnson, 06)

Donde:

- i_p es la corriente del conductor a medir
- L_c es la autoinductancia de la bobina
- R_c es la resistencia de la bobina
- C_c es la capacitancia de la bobina
- V_{Coil} es el voltaje inducido
- R es la resistencia de derivación
- M es la inductancia mutua

Principios matemáticos y teoría de operación

$$R_c = \frac{\rho_w l_w}{\pi r^2}$$

$$R = 100R_c$$

$$L_c = \frac{N^2 \mu_0 h}{2\pi} \ln \frac{b}{a} = NM$$

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

Donde:

- ρ_w es la resistividad del cobre = $1.72 \times 10^{-8} \Omega$
- l_w es la longitud del cable
- ϵ_0 es la permitividad eléctrica del vacío = $8.854 \times 10^{-12} Fm^{-1}$

$$AB = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_c C_c}}$$

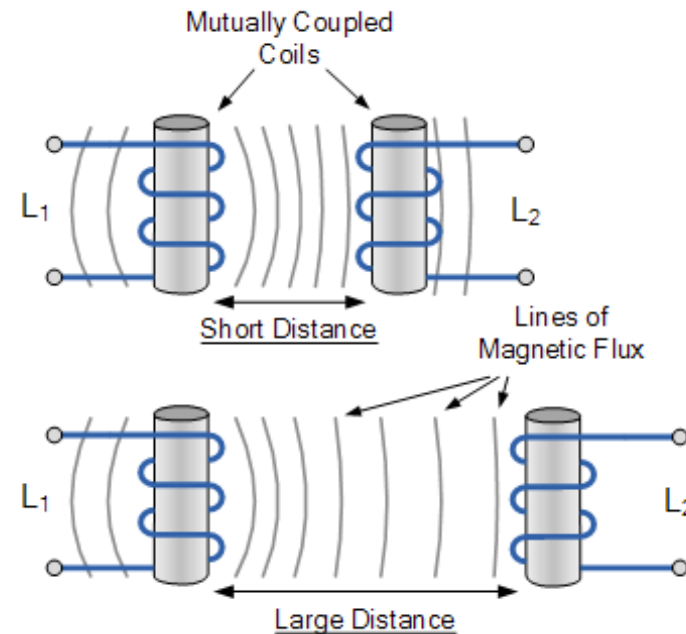


Figura 6 Inductancia mutua entre dos bobinas (Storr, 2020)

$$L_1 = \frac{\mu_0 \mu_r N_1^2 A}{l}$$

$$M = \sqrt{L_1 L_2}$$

$$L_2 = \frac{\mu_0 \mu_r N_2^2 A}{l}$$

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

Metodología

| Aplicación | Diámetro interno min (ID) | Diámetro externo max (OD) | Altura (h) |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|------------|
| Convertidor 100 Hz | 0.055 m | 0.035 m | 0.015 m |
| Convertidor 1000 Hz | 0.025 m | 0.015 m | 0.01m |

Tabla 1 Dimensiones de los transformadores de corriente (Pulse Yageo Company, 2020)

| Aplicación | Diámetro interno min (ID) | Diámetro externo max (OD) | Altura (h) |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|------------|
| Convertidor 100 Hz | 0.055m | 0.035m | 0.0016 m |
| Convertidor 1000 Hz | 0.025m | 0.015m | 0.0016 m |

Tabla 2 Dimensiones para la bobina Rogowski en PCB (Elaboración propia, 2022)

$$N = \frac{(b-a)\pi}{w} = \frac{(0.025m-0.015m)\pi}{0.000405m} = 77$$

$$l_w = (b - a)(N) = (0.025 - 0.015)(77) = 0.77m$$

$$M = \frac{(77)(4\pi \times 10^{-7})(0.0016)}{2\pi} \ln \frac{0.025}{0.015} = 125.15 nH$$

$$R_c = \frac{(1.72 \times 10^{-8} \Omega)(0.7757m)}{\pi \left(\frac{0.000405m}{2}\right)^2} = 103.57m\Omega$$

$$L_c = (77)(125.15nH) = 9.71\mu H$$

$$C_c = \frac{\pi^2 8.854 \times 10^{-12} (0.025+0.015)}{\ln \frac{0.025+0.015}{0.025-0.015}} = 2.52pF$$

Metodología

$$L_{wire} = 2l \left\{ \ln \left[\left(\frac{2L}{D} \right) \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{D}{2L} \right)^2} \right) \right] - \right.$$

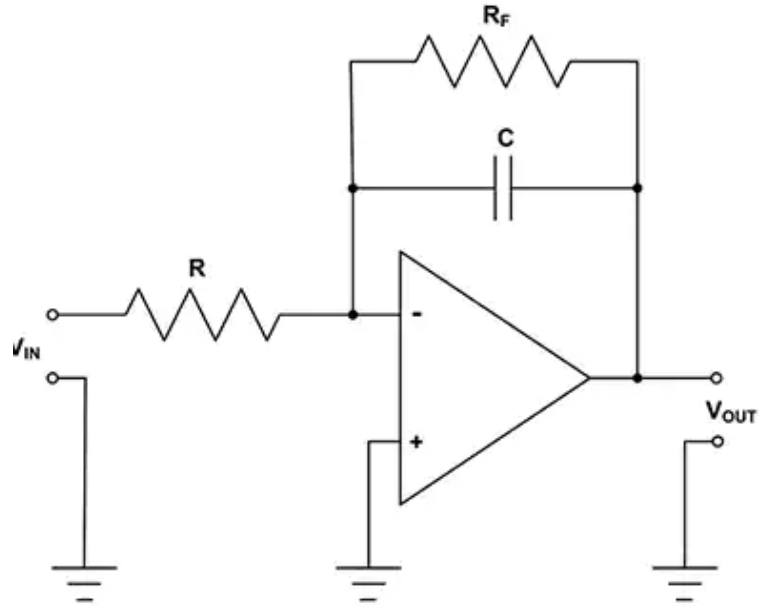
$$k = \frac{125.15nH}{\sqrt{(1.62nH)(9.71\mu H)}} = 0.99$$

$$AB = \frac{1}{2\pi\sqrt{(9.71\mu H)(2.52pF)}} = 1.27MHz$$

| Aplicaci | M [H] | Lc [H] | Rc [Ω] | R [Ω] | Cc [F] | k | AB [Hz] |
|----------|----------|---------|----------|---------|--------|-------|----------|
| 1000 Hz | 221.46E- | 34.36E- | 414.27E- | 41.4E+0 | 5.23E- | 938.7 | 674.61E+ |
| | 351.73E- | 86.67E- | 1.66E+0 | 166.0E+ | 5.23E- | 938.7 | 424.75E+ |
| 100 Hz | 125.15E- | 9.71E-6 | 103.57E- | 10.4E+0 | 2.52E- | 997.9 | 1.27E+6 |
| | 198.76E- | 24.49E- | 414.92E- | 41.5E+0 | 2.52E- | 997.9 | 799.08E+ |

Tabla 4 Variables de interés para el circuito 1 (Elaboración propia, 2022)

Metodología



$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_F C_1}$$

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R C_1}$$

$$R_F = \frac{1}{2\pi(10nF)(100Hz)} = 159.1 k\Omega$$

$$R = \frac{1}{2\pi(10nF)(1000Hz)} = 15.91 k\Omega$$

Figura 9 Configuración de integrador con resistencia de alto valor R_F (Digi-key Electronics, 2020)

Metodología

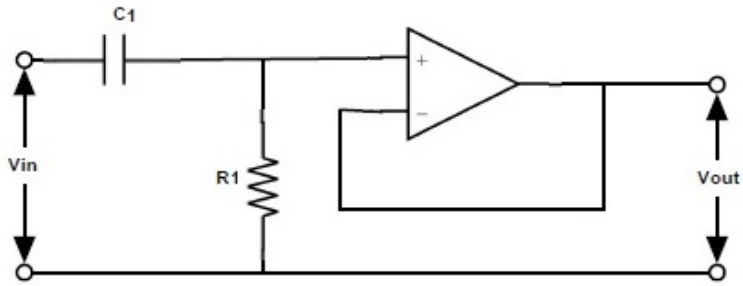


Figura 10 Configuración del filtro pasa altas
(*Electrónica Lugo, 2022*)

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$R = \frac{1}{2\pi f_c C} = \frac{1}{2\pi(1\text{Hz})(1\mu\text{F})} = 159.15 \text{ k}\Omega$$

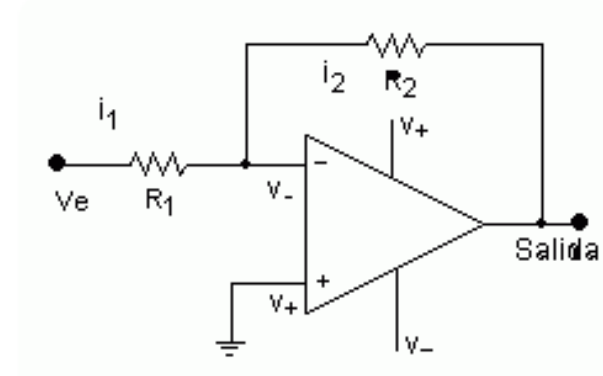


Figura 11 Circuito amplificador (*García, 2010*)

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$R_2 = (10)(1\text{k}\Omega) = 10 \text{ k}\Omega$$

Resultados

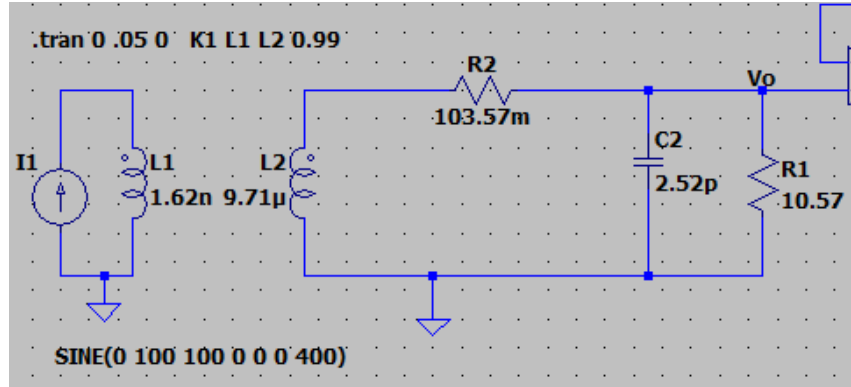


Figura 13 Circuito equivalente de bobina Rogowski (*Elaboración propia, 2022*)

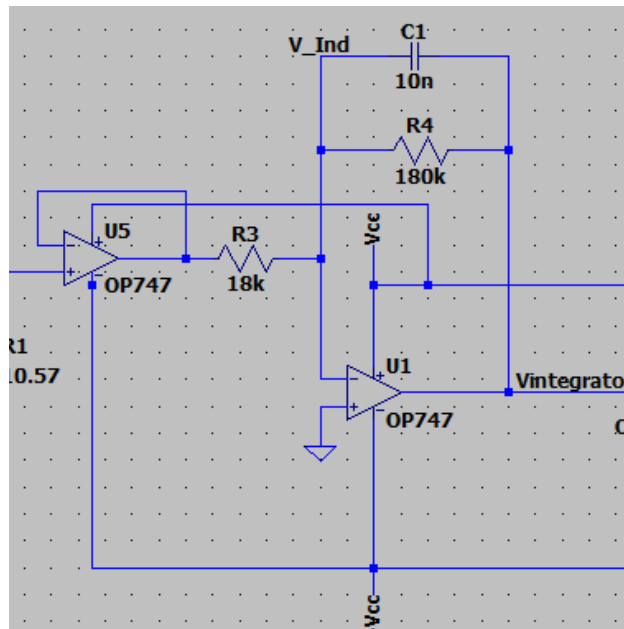


Figura 14 Circuito integrador (*Elaboración propia, 2022*)

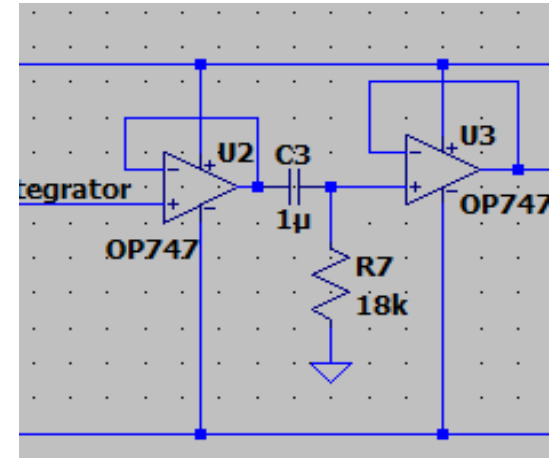


Figura 15 Filtro pasa altas (*Elaboración propia, 2022*)

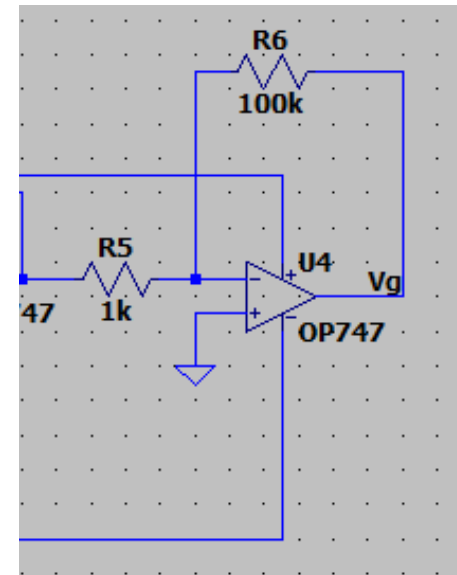


Figura 16 Amplificador (*Elaboración propia, 2022*)

Resultados

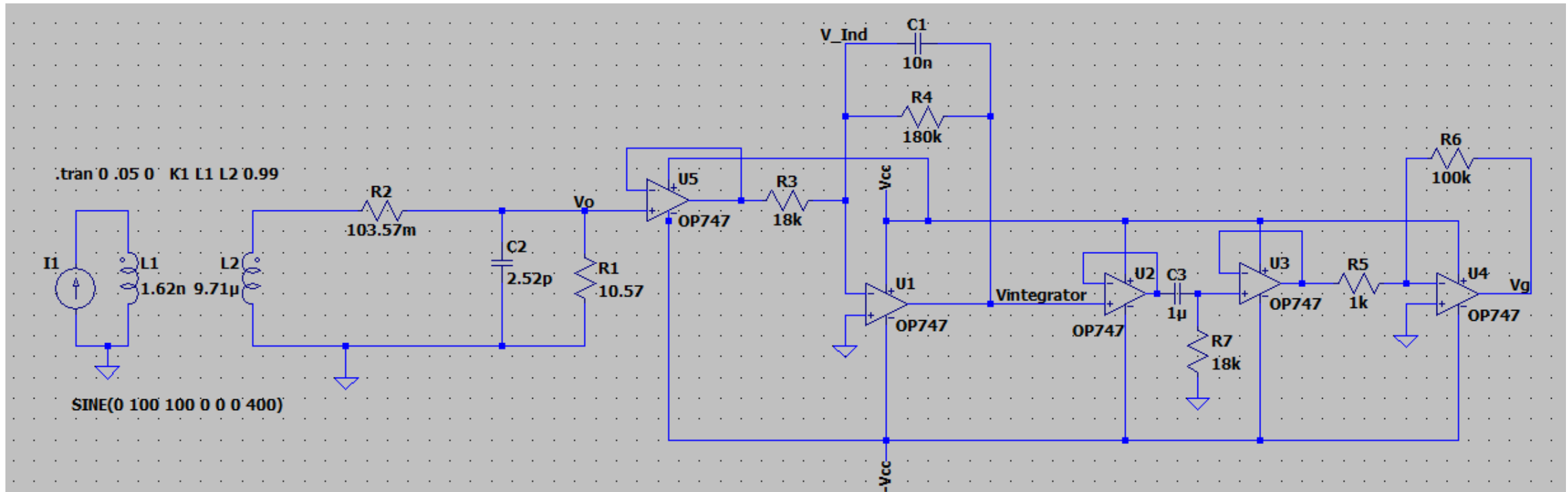


Figura 12 Circuito de bobina Rogowski con integrador, filtro y amplificador (*Elaboración propia, 2022*)

Resultados

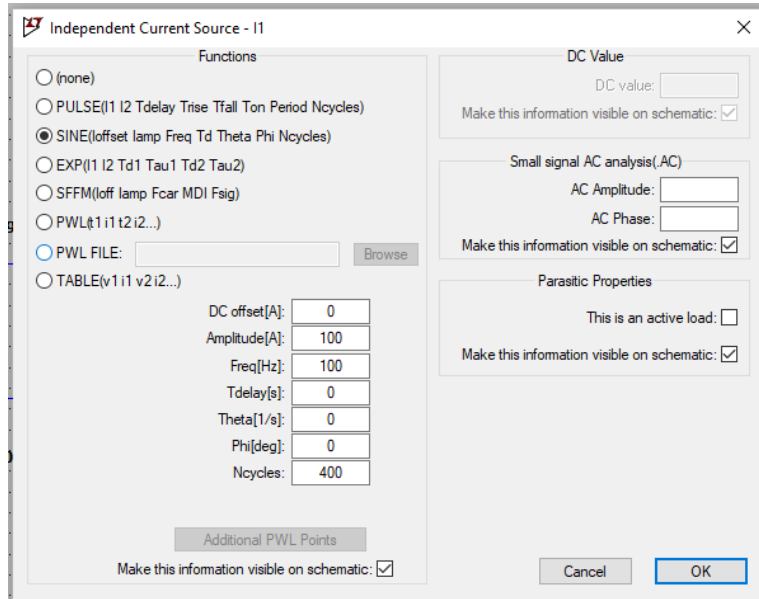


Figura 17 Configuración de la fuente de corriente
(Elaboración propia, 2022)

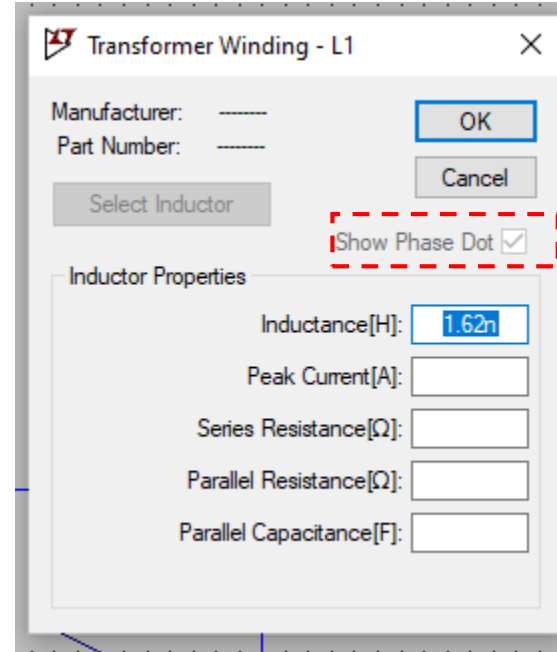


Figura 18 Configuración de los inductores del transformador
(Elaboración propia, 2022)



Figura 20 Habilidad de la directiva de LTspice
(Elaboración propia, 2022)

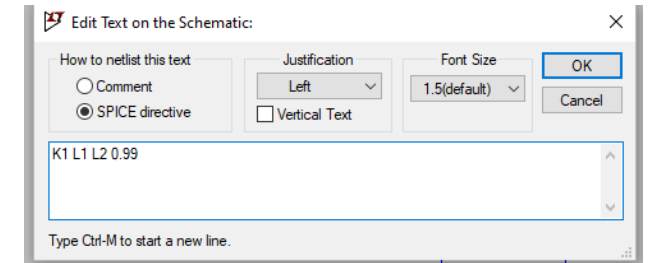


Figura 21 Configuración de factor de acoplamiento
(Elaboración propia, 2022)

Resultados

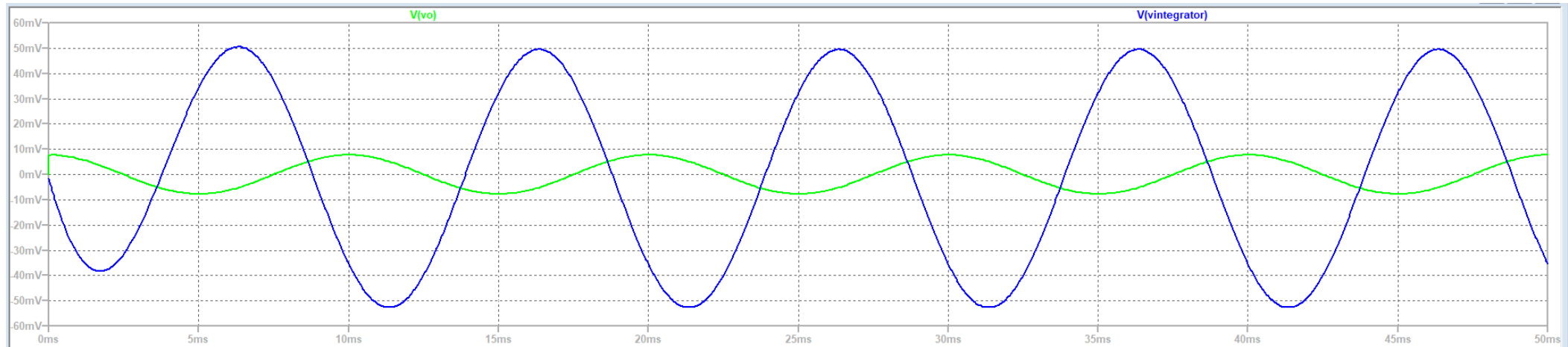


Figura 22 Salida de la bobina vs Integrador (*Elaboración propia, 2022*)

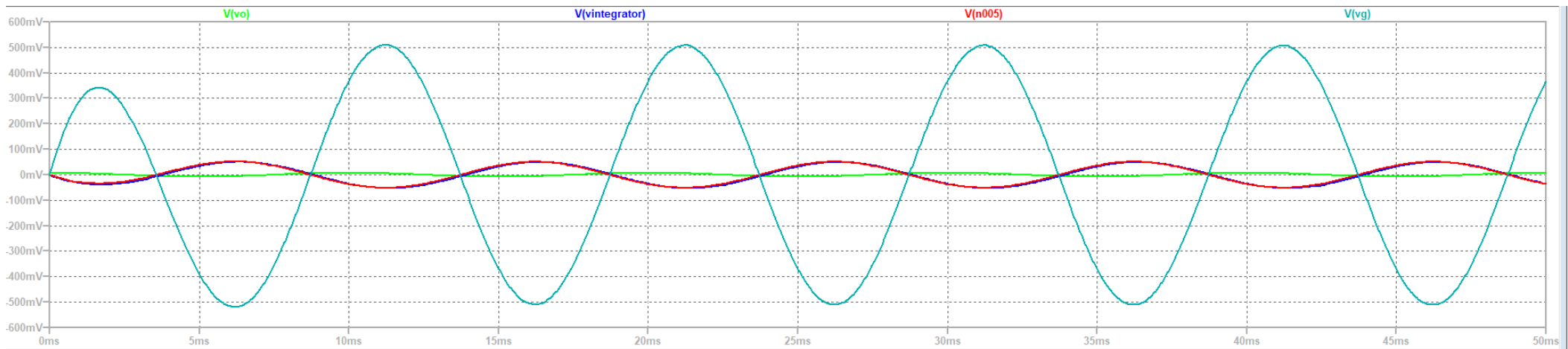
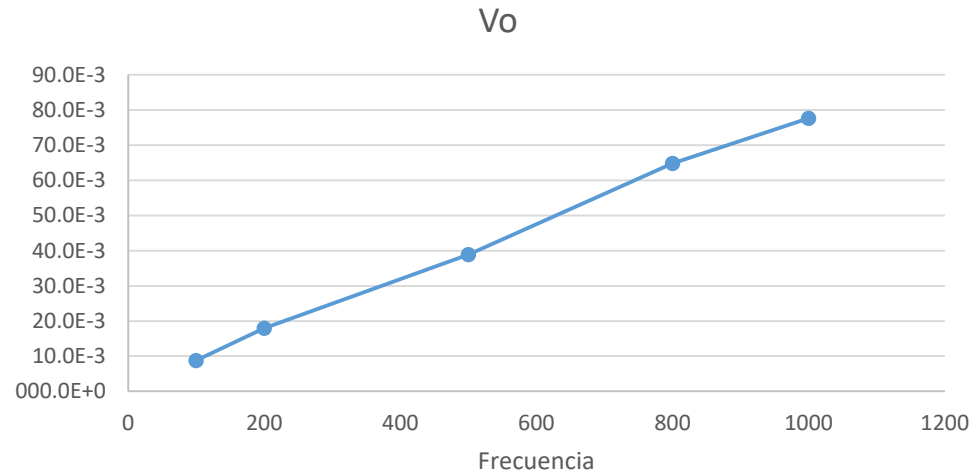


Figura 23 Voltaje de la bobina, integrador, filtro y amplificador (*Elaboración propia, 2022*)

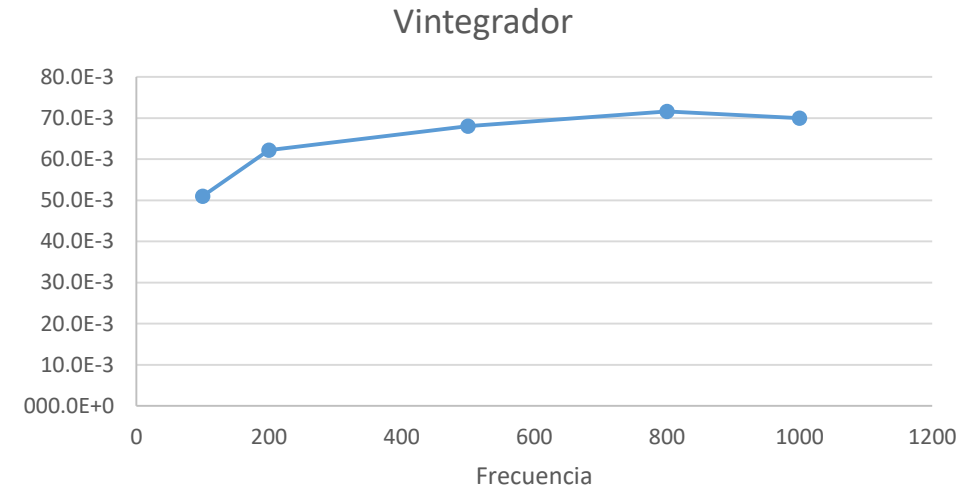
Resultados

| Frecuencia | V_O | $V_{integrador}$ | V_g |
|------------|---------|------------------|----------|
| 100 Hz | 8.8E-3 | 51.0E-3 | 510.0E-3 |
| 200 Hz | 18.0E-3 | 62.2E-3 | 621.9E-3 |
| 500 Hz | 38.9E-3 | 68.0E-3 | 681.2E-3 |
| 800 Hz | 64.8E-3 | 71.6E-3 | 710.0E-3 |
| 1000 Hz | 77.7E-3 | 70.0E-3 | 688.0E-3 |

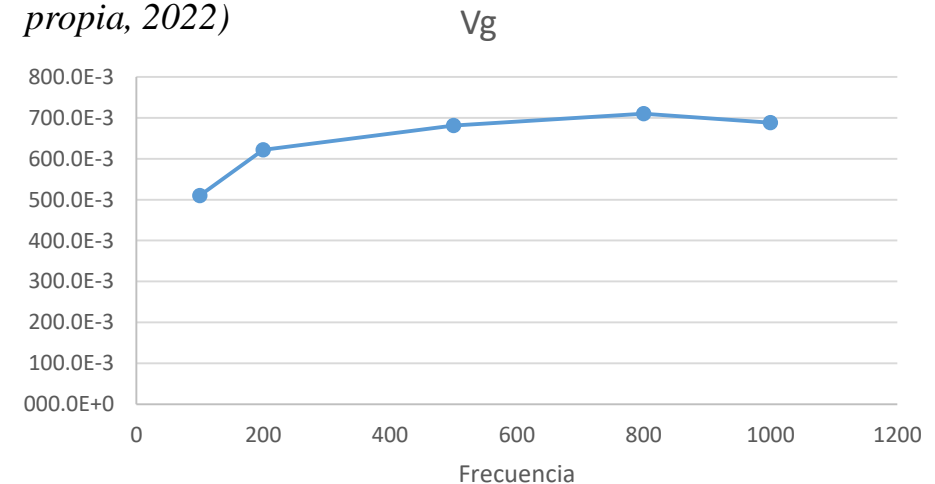
Tabla 6 Voltajes de salida de las diferentes etapas
(Elaboración propia, 2022)



Grafica 1 Voltaje de salida de la bobina sometida a diferentes frecuencias (Elaboración propia, 2022)



Grafica 2 Voltaje de salida del integrador sometido a diferentes frecuencias (Elaboración propia, 2022)



Grafica 3 Voltaje de salida del amplificador sometido a diferentes frecuencias (Elaboración propia, 2022)

Conclusiones

Se realizó con éxito la simulación de la bobina Rogowski, obteniendo un comportamiento lineal a la salida de la bobina y valores muy cercanos entre ellos a la salida del integrador, lo que garantiza que la relación de corriente de entrada o medida en el conductor tendrá la misma relación con el voltaje de salida del circuito.

Se encontró un factor que relaciona la corriente medida con el voltaje de salida de 1:0.00064 para un ancho de banda de 100 Hz a 1000 Hz alimentando el circuito con 100 A. Es decir, por cada Amper que circule por el conductor se inducirán en la bobina 0.6422mV.

Se comprueba que es un método efectivo para la medición de corriente ya que tiene bastante linealidad. Se establecieron los primeros pasos para el diseño de una bobina Rogowski para la medición de corriente y se podrá continuar con su implementación a PCB con las medidas que se encontraron a lo largo de este artículo como las adecuadas.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a la Universidad Aeronáutica en Querétaro por su colaboración en la elaboración de este proyecto.

Referencias

- A. Ahmed, L. Coulbeck, A. Castellazzi, & C. M. Johnson. (2012 de Septiembre de 06). *IEEE Explore*. doi: 10.1109/EPEPEMC.2012.6397192. Recuperado el 28 de mayo de 2022 de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6397192>
- Agile Magnetics. (18 de Abril de 2017). *Agile Magnetics*. Recuperado el 3 de Junio de 2022, de <https://www.agilemagco.com/blog/power-transformers-aerospace-navigation/>
- All about circuits. (Septiembre de 2020). *All about circuits*. Recuperado el 1 de Junio de 2022, de <https://www.allaboutcircuits.com/tools/wire-self-inductance-calculator/>
- Cristian A. Meraz, José de J. Durón, Jeziel O. Juárez, & Alberto Castillo. (Marzo de 2017). Recuperado el 21 de Mayo de 2022, de <https://1library.co/document/z3128g7y-construccion-modelado-bobina-rogowski-implementar-relevadores-proteccion.html>
- D.A. Ward, & J. La T. Exon. (1999). *Semantics scholar*. Recuperado el 10 de Junio de 2022, de <https://www.semanticscholar.org/paper/Using-Rogowski-coils-for-transient-current-by-D.-A-Ward/09d8493753cb6638a81913e241acc98a7a53a5af>
- David E. Shepard, Tactical Marketing Manager, & Donald W. Yauch. (2012). Recuperado el 28 de Mayo de 2022, de [http://www.dynamp.net/ldadocum.nsf/c2270fbdd892ac3e86256e75000ad88a/e710af6d3e0f6255862565d7004b19db/\\$FILE/Report.pdf](http://www.dynamp.net/ldadocum.nsf/c2270fbdd892ac3e86256e75000ad88a/e710af6d3e0f6255862565d7004b19db/$FILE/Report.pdf)
- Digi-key Electronics. (4 de Agosto de 2020). *Digi-key Electronics*. Recuperado el 3 de Junio de 2022, de <https://www.digikey.com.mx/es/articles/analog-integrators-how-to-apply-them-for-sensor-interfaces>
- Electrónica Lugo. (2022). *Electrónica Lugo*. Recuperado el 5 de Junio de 2022, de <https://electronicalugo.com/disenio-de-circuito-de-filtro-de-paso-alto-activo-y-aplicaciones/>
- García, V. (9 de Noviembre de 2010). *Electrónica práctica aplicada*. Recuperado el 10 de Junio de 2022, de <https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/el-amplificador-operacional>
- Mohammad Hamed Samimi, Arash Mahari, Mohammad Ali Farahnakian, & Hossein Mohseni. (2013). *IEEE Explore*. doi:10.1109/JSEN.2014.2362940. Recuperado el 27 de mayo de 2022 de <https://ieeexplore.ieee.org/document/6922615>
- Power Green. (2022). *Power Green*. Recuperado el 3 de Junio de 2022, de <https://pepegreen.com/awg-que-es/>
- Pulse Yageo Company. (Enero de 2020). *Pulse Yageo Company*. Recuperado el 03 de Junio de 2022, de <http://www.power.pulseelectronics.com/contact>
- Qinghua Tan, Wenbin Zhang , Xiangyu Tan, Le Yang, Yanan Ren, & Yang Hu. (27 de Enero de 2022). *MDPI*. doi:<https://doi.org/10.3390/electronics11030381>. Recuperado el 3 de junio de 2022 de <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/3/381>
- Storr, W. (Febrero de 2020). Recuperado el 21 de Mayo de 2022, de <https://www.electronics-tutorials.ws/inductor/mutual-inductance.html>



ECORFAN®

© ECORFAN-Mexico, S.C.

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162,163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169,209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. BCIERMMI is part of the media of ECORFAN-Mexico, S.C., E: 94-443.F: 008- (www.ecorfan.org/booklets)