

# **ANÁLISIS DE RUIDO DE COLORES EN UN CIRCUITO RLC SERIE DE FORMA EXPERIMENTAL**

## *COLOR NOISE ANALYSIS IN A SERIAL CIRCUIT RLC EXPERIMENTALLY*

**Carlos Alejandro Crisantos**

Universidad Veracruzana, México  
*zs18015225@estudiantes.uv.mx*

**Joaquín Hernández Santiago**

Universidad Veracruzana, México  
*zs19017105@estudiantes.uv.mx*

**Beatris Adriana Escobedo Trujillo**

Universidad Veracruzana, México  
*bescobedo@uv.mx*

**Javier Garrido Meléndez**

Universidad Veracruzana, México  
*vgarrido@uv.mx*

**Recepción:** 29/noviembre/2022

**Aceptación:** 22/diciembre/2022

### **Resumen**

La contribución principal de este trabajo es determinar el color del ruido de forma experimental analizando la densidad espectral de potencia (PSD) de una señal medida en un sistema eléctrico, para esto, se generan y simulan los ruidos de colores (blanco, rosa, rojo, azul y violeta) mediante el software Matlab para alimentar a un circuito RLC serie y analizar el color de ruido presente, lo anterior se realiza en cuatro escenarios diferentes: Ruido, Fuente de Señal CD + Ruido, Fuente de CA + Ruido y Fuente de CD + CA + Ruido, las mediciones se realizan con un sistema de adquisición de datos y el software LabVIEW. Los resultados obtenidos identifican que los ruidos de colores generados y medidos tienen el mismo comportamiento, además, se presentan los resultados de medir el circuito RLC alimentado con solo una fuente de CD para identificar el ruido de color presente en el sistema.

**Palabras Clave:** Circuito RLC, densidad espectral de potencia, ruido de colores.

## **Abstract**

*The main contribution of this work is to determine the noise color experimentally by analyzing the power spectral density (PSD) of a signal measured in an electrical system, for this, colored noises (white, pink, red, blue, and violet) are generated and simulated using Matlab software to feed a serial RLC circuit and analyze the noise color present, the above is performed in four different scenarios: Noise, DC Signal Source + Noise, AC Source + Noise and DC Source+ AC Source+ Noise, the measurements are performed using a data acquisition system and LabVIEW software. The results obtained identify that the generated and measured color noise have the same behavior, in addition, the results of measuring the RLC circuit powered with only a DC source are presented to identify the color noise present in the system.*

**Keywords:** *Noise colors, power spectral density, RLC circuit.*

## **1. Introducción**

El ruido es un fenómeno parasito generalmente aleatorio puede presentarse en cualquier sistema de medición, produce variaciones en las señales y puede ocasionar distorsión, pérdida o deterioro de la información. En [Vasilescu, 2005] se menciona que es una perturbación no deseada dentro de la banda de frecuencia útil y en [Wolf, 1978] se describe su presencia en los dispositivos semiconductores, superconductores y materiales magnéticos enfocando una parte de su trabajo al ruido y describiendo la forma de medirlos utilizando la termometría.

Por otra parte, en [Moss, 1989] se muestra el estudio y la experimentación de los efectos que produce el ruido en los sistemas dinámicos no lineales como la transición turbulenta en los líquidos, la inestabilidad electrodinámica de los cristales líquidos neumáticos, las fluctuaciones del láser colorantes, la dinámica en sistemas ópticamente biestables y en la física estocástica no lineal. También, en [Hänggi, 1995] se desarrolla una amplia teoría sobre los ruidos de colores llegando a utilizarlos en el análisis de sistemas dinámicos como los sistemas biestables accionados y aplicando ruido de color multiplicativo y estadísticas de fotones de los láseres colorantes.

La creación de ruidos de colores es un tema de interés por varios autores, [Zhivomirov, 2018], [Kasdin, 1995] y [Fox, 1988] proponen los algoritmos para generarlos y han realizado las simulaciones con objetivo de observar su comportamiento. También, en [Billah, 1990] se propone un método numérico para la generación de ruido de colores y sus aplicaciones en sistemas biestables.

Con respecto a trabajos relacionados, en [Gradziuk, 2022] se estudian los efectos de los ruidos de colores en la irreversibilidad de la dinámica lineal de un sistema mostrando un ejemplo de aplicación y escala de longitud emergente. En [Fragasso, 2019] se explica la presencia del ruido en los nanoporos de estado sólido regido por regiones de acceso y de superficie, parte interesante de su trabajo es la gráfica de la densidad espectral de potencia que representa los nanoporos medidos, esta se obtiene con la suma de los ruidos de color blanco, rosa y rojo presentes en su sistema, por otro lado, en [Kennedy, 2020] se aplican modelos de ruidos de color a los filtros Savitzky-Golay para la mejora de la respuesta en frecuencia.

Las aplicaciones de ruido en el área eléctrica pueden encontrarse en [Deng, 2019], en donde se estudia el ruido presente en los sensores de imagen Quanta CMOS, realizando una comparación del ruido modelado con diferentes orígenes y el medido en los dispositivos QIS, obteniendo resultados similares y otros no satisfactorios bajo ciertas consideraciones. En [Kamada, 2021] y [Santos, 2019] se evalúan los ruidos de colores aplicados a un sistema de paneles fotovoltaicos con la finalidad de evitar afectar las metodologías de la estimación de los parámetros de la calidad de energía, en [Farnoosh, 2011] se estudian los circuitos eléctricos RL utilizando diferentes tipos de ruidos térmicos, además, la generación de ruido de colores aplicados a los circuitos RLC se ha presentado en [Nabati, 2021]. Es importante recalcar que la mayoría de los trabajos se limitan hasta la parte computacional dejando a un lado la parte experimental.

### **Clasificación del ruido en colores**

El ruido se clasifica en colores por el comportamiento de su densidad espectral de potencia, la cual es proporcional al recíproco de la frecuencia  $f^\alpha$  tal como se muestra en la ecuación 1.

$$PSD = \frac{1}{f^\alpha} \quad (1)$$

Donde

$PSD$ : Densidad Espectral de Potencia

$f$ : Frecuencia

$\alpha$ : Variable  $\alpha \in [2,2]$

Basados en la ecuación 1, se clasifican los ruidos por color como:

- **Blanco**: Su característica definitoria es tener una densidad espectral de potencia plana, es decir, tiene la misma potencia en cualquier frecuencia.
- **Rosa**: Señal cuya densidad espectral de potencia disminuye proporcionalmente a la inversa de la frecuencia, donde  $\alpha = 1$ .
- **Rojo**: Creado por un movimiento browniano o aleatorio, donde  $\alpha = 2$ , también, puede ser generado integrando un ruido blanco.
- **Azul**: Señal cuya densidad espectral de potencia aumenta proporcionalmente a la frecuencia, donde  $\alpha = -1$ .
- **Violeta**: Se genera cuando el valor de  $\alpha = -2$ , este tiene más energía a frecuencias más altas y puede generarse diferenciando un ruido blanco.

El análisis espectral de frecuencias (PSD por sus siglas en inglés) es una herramienta matemática que da información de la distribución de la potencia de una señal en el dominio de la frecuencia. El PSD es parte de este análisis y proporciona información de la distribución de la potencia de un proceso aleatorio.

En figura 1 se muestra el análisis espectral de frecuencias de los diferentes tipos de ruidos de colores, se puede observar que cuando  $\alpha = 0$  la pendiente espectral se mantiene a un valor constante en db/década, si  $\alpha$  es igual a -1, -2, 1 y 2 la pendiente de ganancia toma valores de 10, 20, -10 y -20 db/década respectivamente.

### **Análisis y obtención de la función de transferencia del circuito RLC en serie**

Un circuito RLC serie es un circuito eléctrico lineal que contiene al menos una resistencia  $R$ , un inductor  $L$  y un capacitor  $C$  conectados en serie, un voltaje de

entrada  $V_i$  y un voltaje de salida  $V_o$ . Para obtener la función de transferencia se aplica la ley de tensiones de Kirchoff en la malla del circuito, ecuación 2.

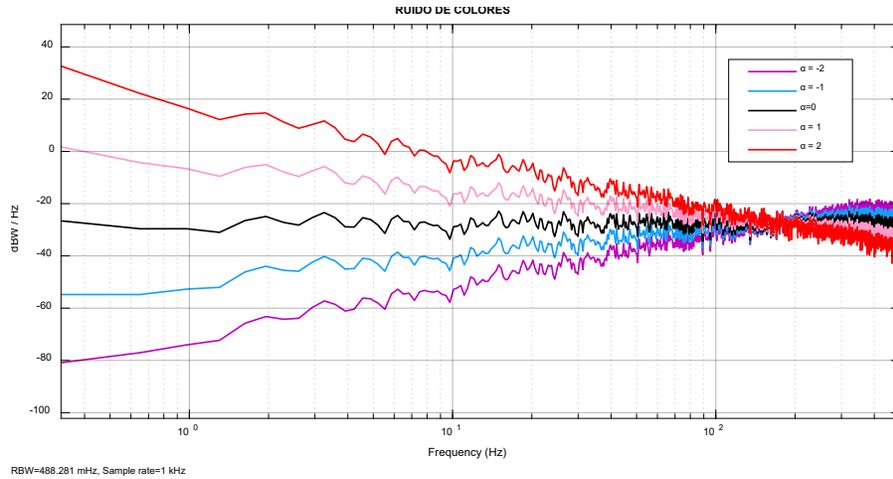


Figura 1 Tipos de ruidos (clasificados por colores).

$$V_i(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad (2)$$

El voltaje en la resistencia ( $V_R$ ), el inductor ( $V_L$ ) y el capacitor ( $V_C$ ) de la ecuación 3 se encuentran descritos en las ecuaciones 3, 4 y 5, respectivamente.

$$V_R(t) = Ri(t) \quad (3)$$

$$V_L(t) = \frac{di(t)}{dt} \quad (4)$$

$$V_C(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad (5)$$

El voltaje de la salida  $V_o = V_c$ , por lo tanto se tienen las ecuaciones 6 y 7.

$$V_o(t) = V_c(t) = \frac{1}{C} \int i(t) \quad (6)$$

$$i(t) = i_R(t) = i_L(t) = i_C(t) = C \frac{dV_o}{dt} \quad (7)$$

Para determinar el modelo mediante la función de transferencia del circuito se determina la transformada de Laplace con las ecuaciones 2, 6 y 7 con condiciones iniciales igual a cero, la función de transferencia resultante es de segundo orden

debido a que, contiene dos elementos que almacenan energía y se expresa como en la ecuación 8.

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{\frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (8)$$

### Circuito RLC serie en resonancia

La resonancia es una condición en un circuito RLC en el cual las reactancias capacitivas e inductivas son de igual magnitud, pero desfasadas  $180^\circ$ , es decir la parte imaginaria de la impedancia del sistema es cero, tal como se muestra en la ecuación 9, obteniéndose un circuito resultante con una impedancia resistiva. Los circuitos resonantes (en serie o en paralelo) son útiles para construir filtros, pues sus funciones de transferencia pueden ser altamente selectivas en frecuencia [Alexander, 2013], ecuación 9. Donde  $\omega$  es la frecuencia angular.

$$j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = 0 \quad (9)$$

El valor de  $\omega$  que anula la parte imaginaria de la impedancia del sistema recibe el nombre de frecuencia resonante  $\omega_0$ . Al despejar la ecuación 9 se obtienen las ecuaciones 10 y 11. Donde  $\omega_0 = 2\pi f_0$ .

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (10)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ Hz} \quad (11)$$

La frecuencia resonante dada en las ecuaciones 10 y 11 permiten calcular la frecuencia de corte del circuito RLC, debido a que este actúa como filtro y puede atenuar el ruido, lo que afectaría al momento de analizar las señales.

## 2. Métodos

El principal objetivo de este trabajo es comprobar de manera experimental los ruidos de colores en los sistemas eléctricos, para esto se utiliza un circuito RLC en serie. La metodología se explica a continuación:

- Etapa 1: Generar los diferentes tipos de ruido de colores
- Etapa 2: Agregar diferentes tipos de ruido y aplicarlos físicamente a un circuito RLC en serie en tiempo real
- Etapa 3: Medir y analizar el ruido en el voltaje del capacitor y comprobar si el ruido generado es igual al medido

### Etapa 1: Generar los diferentes tipos de ruido de colores

Para la generación de los diferentes tipos de ruidos se utilizó el software Matlab, mediante un programa en script se genera un vector de datos aleatorios con distribución normal de tamaño  $n$  (donde  $n$  es el tamaño de datos), al cual se calcula su espectro de frecuencia y se aplica la ecuación 1, el valor de  $\alpha$  depende del tipo de ruido a generar, para obtener el ruido en función del tiempo se utiliza la transformada inversa de Fourier, obteniendo los diferentes tipos de ruido de color como se mostró en la figura 1. Una vez generados los datos se almacenan en un archivo CSV para posteriormente ser utilizado en el software de LabVIEW.

### Etapa 2: Agregar diferentes tipos de ruido al circuito RLC en serie

Para generar el ruido mediante el software de LabVIEW es necesario primero convertir los datos del formato con extensión CSV a TDMS, para lo anterior se utilizó el programa que se muestra en la figura 2.

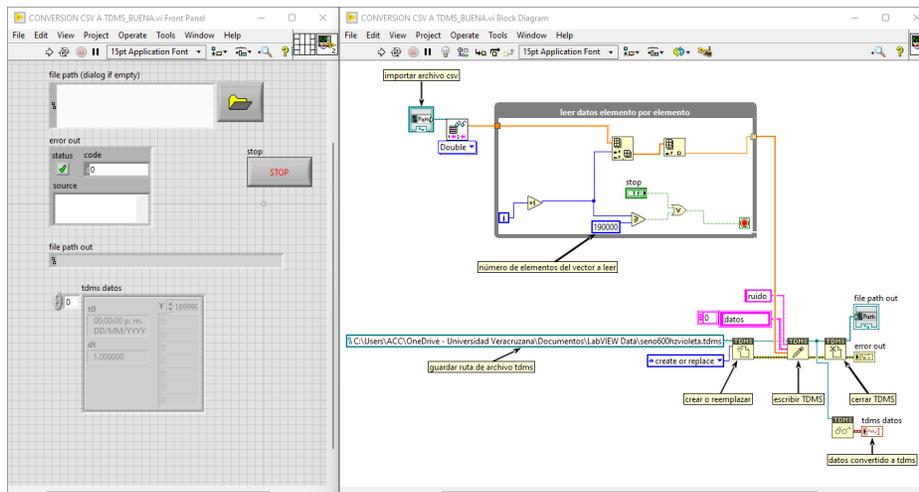


Figura 2 Programa utilizado para convertir los datos CSV a TDMS.

El programa comienza con la lectura del archivo CSV, posteriormente son introducidos en un ciclo while en donde se seleccionan la cantidad de elementos a leer y, una vez fuera del ciclo son guardados en la ruta indicada.

El experimento en tiempo real se realizó con ayuda de un sistema de adquisición de datos Compact Rio (Crio), el cual se programa mediante el software de LabVIEW, para generar el voltaje de entrada del circuito RLC y los diferentes tipos de ruidos. En este trabajo se analizaron los siguientes casos:

- **Caso 1:** Ruido. Una señal puramente ruidosa es notoria una aleatoriedad diferente para cada tipo de ruido de color existente,  $V_i = 0$ .
- **Caso 2:** Señal de corriente directa, (cd). Una señal de corriente directa con ruido se utiliza para analizar el circuito RLC que se energizan con un voltaje de cd.  $V_i = 5 V + Ruido$ .
- **Caso 3:** Señal de corriente alterna (ca). Una señal de corriente alterna con ruido que, se utiliza para analizar el circuito RLC que se energizan con un voltaje de ca.  $V_i = 5V_p \quad y \quad f = 60 Hz + Ruido$
- **Caso 4:** Señal de cd más ca más ruido. Una señal alterna se agrega un offset para determinar cómo se comporta el circuito RLC con este tipo de entrada.  $V_i = 3 V + 5 V_p \quad y \quad f = 60 Hz + Ruido$ .

En la figura 3, se muestra la Interfaz Hombre Máquina del circuito RLC serie, se gráfica la señal del  $V_i$  con ruido y la medición del  $V_C$ , una tabla de los valores del ruido, los periodos de muestreo y el número de elementos a graficar.

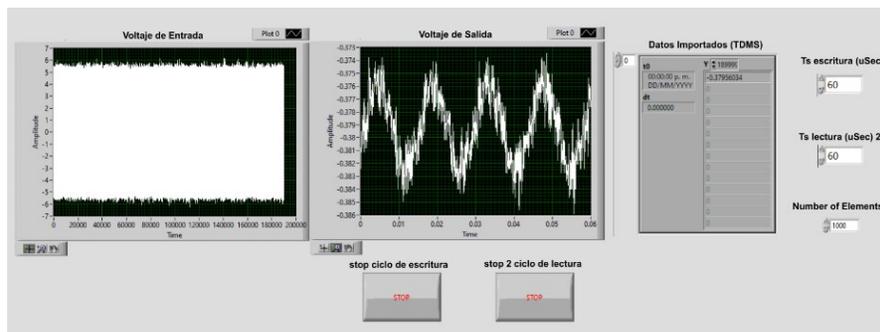


Figura 3 Panel frontal de LabVIEW.

### Etapa 3: Medir y analizar el ruido

Para comprobar que el ruido simulado es igual al medido se debe analizar el voltaje en las terminales del capacitor del circuito RLC serie de forma experimental. Para el proceso experimental los valores de los elementos del circuito RLC son:  $R = 3.3\text{ k}\Omega$ ,  $L = 10\text{ mH}$  y  $C = 22\text{ nF}$ . Para la conexión de los elementos pasivos se utilizó un panel DIGIAC 3000 AC circuits.

### 3. Resultados

A continuación, se presentan las simulaciones y experimentos en tiempo real del ruido de color rosa para los 4 casos, por lo extenso de los análisis solo se presentan algunos ejemplos de los diferentes tipos de ruido de color aplicados al circuito RLC en serie. Al analizar las señales en el dominio del tiempo no se puede deducir el tipo de ruido de color presente, por lo que es necesario calcular el PSD, en este trabajo se aplicó el periodograma promediado de Welch.

#### Análisis del circuito RLC en serie con ruido añadido

Las figuras 4 y 5 muestran resultados de simulación de los 4 casos con ruido rosa, a la izquierda esta la señal en el dominio del tiempo y a la derecha el PSD.

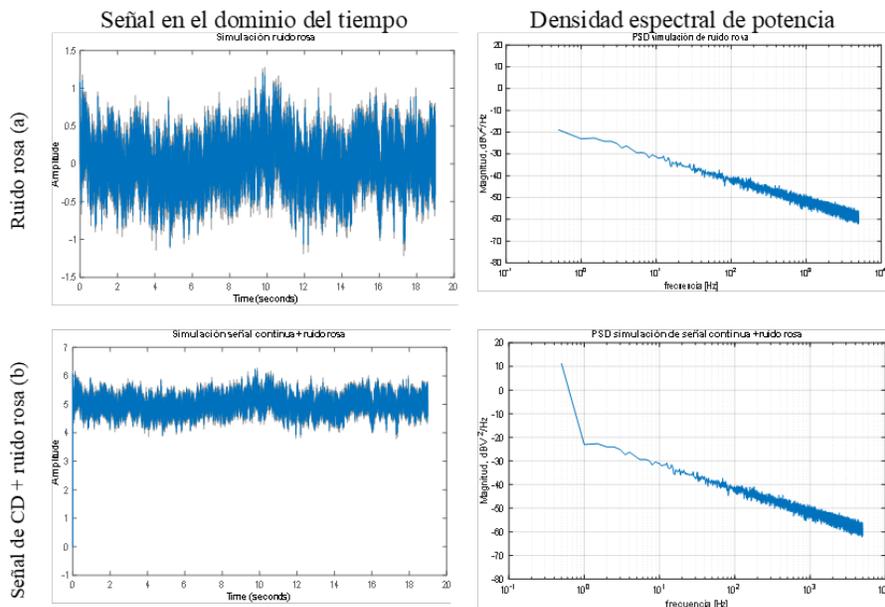


Figura 4 Resultados en simulación del Ruido Rosa caso 1 y 2.

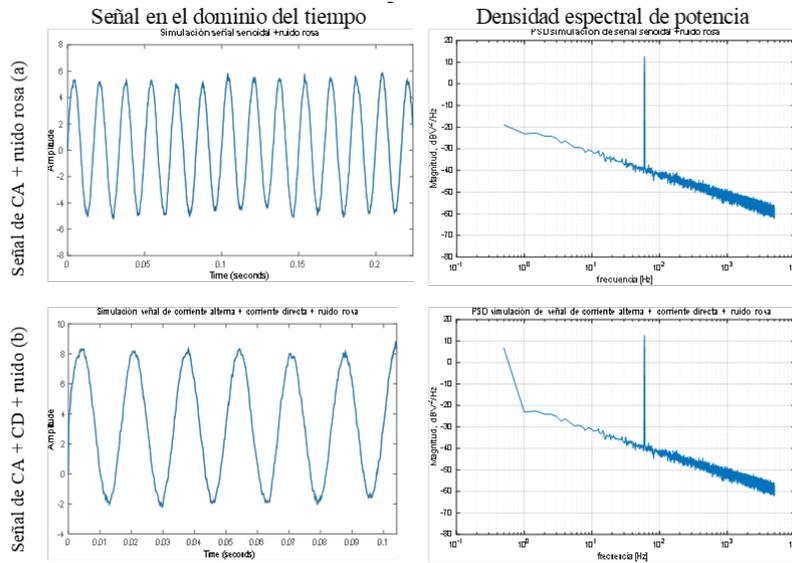


Figura 5 Resultados en simulación del Ruido Rosa caso 3 y 4.

En los cuatro casos el PSD presenta una pendiente espectral con -10 db/década y su comportamiento particular se describe a continuación:

- Caso Comportamiento
- Caso 1: Sin Picos debido a que solo está presente el ruido rosa
- Caso 2: Pico en 0 Hz debido a que existe una señal en cd
- Caso 3: Pico en 60 Hz debido a que existe una señal en ca
- Caso 4: Picos en 0 y 60 Hz debido a que existe una señal en ca y cd.

Los experimentos en tiempo real para los 4 casos se muestran en las figuras 6 y 7, para analizar estas señales se consideró la frecuencia de muestreo la cual debe ser por lo menos al doble de la frecuencia máxima de la señal de acuerdo con el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon. En las simulaciones y resultados experimentales se observa que la potencia de la pendiente espectral disminuye en 10 decibeles por década, que es el comportamiento esperado del ruido rosa.

En la figura 8a se muestra el caso 1 para un ruido de color azul donde se observa que su pendiente espectral aumenta 10 db/década, en la figura 8b se muestra el caso 2 para un ruido de color rojo se observa que su pendiente espectral disminuye 20 db/década y tiene un pico en 0 Hz debido a la presencia de la señal de CD. En la figura 9a se observa el caso 3, donde el ruido agregado es de color blanco, la

señal de CA es de 60 Hz con una amplitud de  $5 V_p$ , en la gráfica PSD se observa una pendiente igual a cero, en la figura 9b se muestra el caso 4 con ruido de color violeta agregado a la fuente con un  $V_{CD} = 3 V$ , y  $V_{ca} = 5 V_p$  con una frecuencia de 60 Hz, en la gráfica de PSD se observa una pendiente que se incrementa en 20 db/década y presenta picos en 0 y 60 Hz generados por las señales de CD y CA respectivamente.

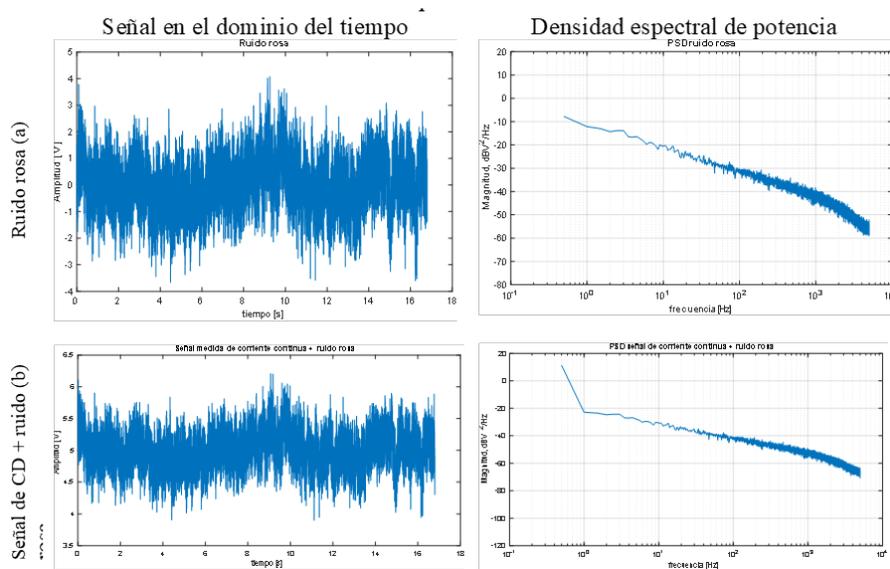


Figura 6 Resultados experimentales del Ruido Rosa caso 1 y 2.

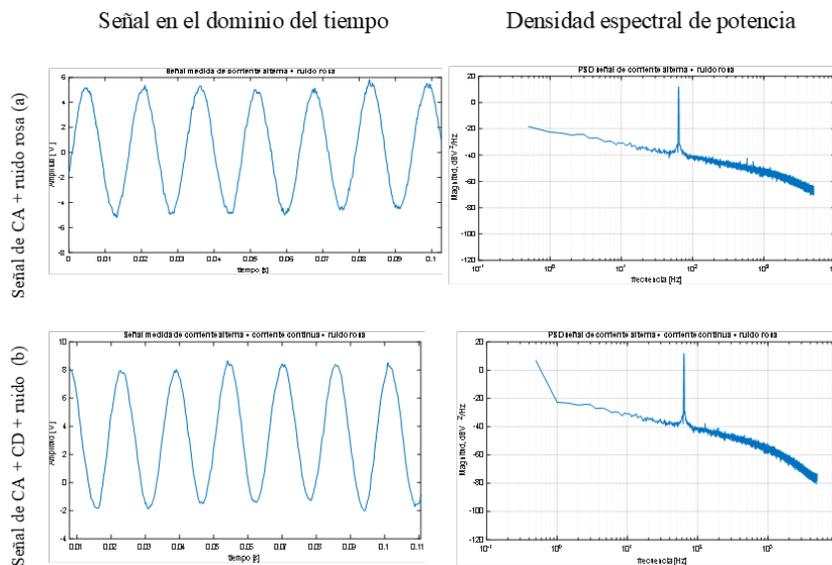
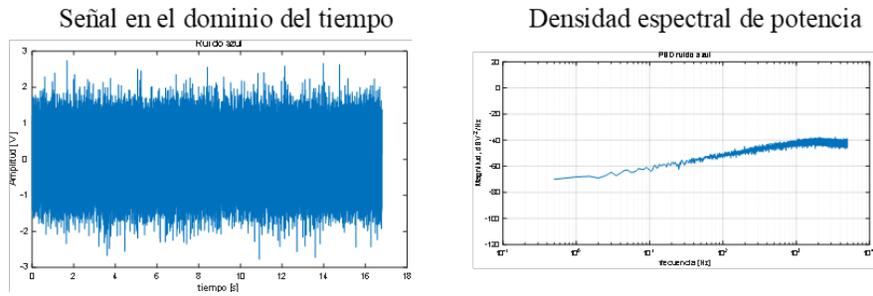
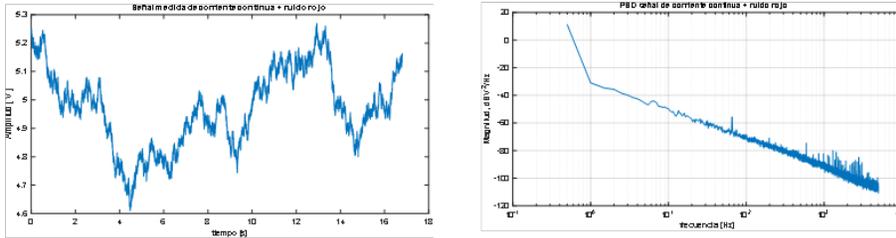


Figura 7 Resultados experimentales del Ruido Rosa caso 3 y 4.

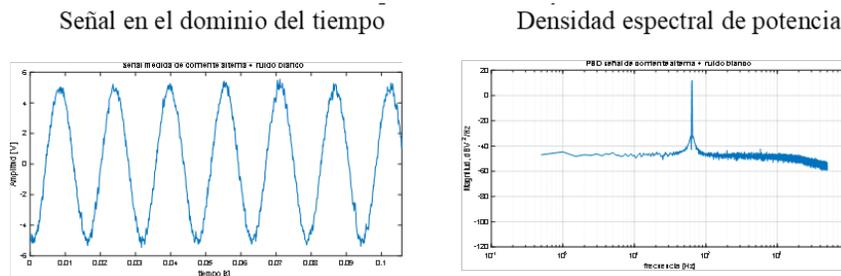


a) Ruido azul

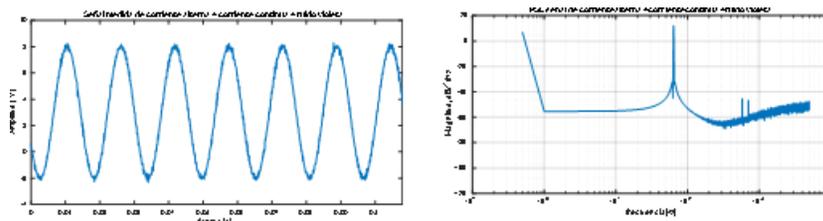


b) Ruido rojo

Figura 8 Resultados de forma experimental.



a) Ruido blanco



b) Ruido violeta

Figura 9 Resultados de forma experimental.

### Análisis de un circuito RLC en serie sin ruido añadido

A continuación, se presentan los resultados experimentales de aplicar  $V_{dc} = 5\text{ V}$  de entrada sin ruido al circuito RLC en serie, con la finalidad de analizar y clasificar el tipo de ruido de color presente, en la figura 10 se muestra el PSD de la simulación del caso 2 al cual se le agregó un ruido blanco con una varianza de 0.00065, en la figura 10, se observa el PSD de las mediciones experimentales al conectar una

fuentes de CD al circuito RLC, analizando los resultados simulados y experimentales se observa que tienen el mismo comportamiento por lo cual podemos decir que este circuito tiene ruido blanco.

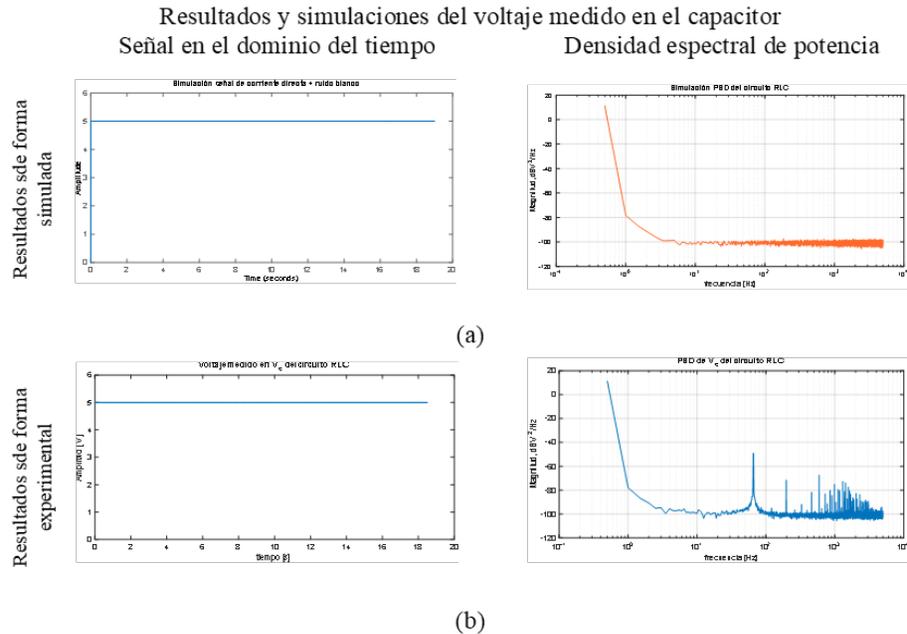


Figura 10 Comparación entre resultados experimentales y simulados de  $V_C$ .

#### 4. Discusión

Después de presentar los resultados de comparar las señales de ruido simuladas y medidas se observa que:

- Se tienen pequeñas diferencias en el valor de la pendiente espectral de la señal simulada y medida, estas diferencias se pueden deber a que el circuito analizado funciona como un filtro y atenúa ciertas amplitudes.
- Es posible determinar el ruido de color presente en un sistema analizando la señal en el dominio de la frecuencia y observar el valor de la pendiente de su PSD, dependiendo del aumento o disminución de decibeles por cada década de frecuencia se clasifica en los cuatro ruidos de color analizados, esto se comprobó ya que el ruido de color identificado en la señal medida coincide con el color de ruido agregado al sistema, por lo tanto, la metodología propuesta para la identificación de ruido de forma experimental es fiable.

- En las mediciones realizadas al circuito RLC sin añadir ruido se observa que, desde el dominio del tiempo la amplitud de ruido es muy baja, sin embargo, en el análisis en el dominio de la frecuencia el ruido de color blanco es 100% identificable, debido a que tiene una pendiente espectral igual a 0, y no se identificó ningún otro ruido de color presente en esta prueba.

## **5. Conclusiones**

El ruido está presente en las mediciones de los sistemas eléctricos y se pueden clasificar por colores, en este trabajo se propuso una metodología confiable para la identificación del color de ruido de forma experimental cuya complejidad radica en la obtención del PSD.

Mediante la utilización de un circuito RLC serie se comprueba que los ruidos de colores generados que se agregaron al sistema coinciden con las lecturas experimentales. Se analizaron cinco tipos de ruidos de colores de manera independiente y en cuatro casos distintos (fuentes de alimentación de CD y CA combinadas con los ruidos de colores generados), las señales adquiridas fueron analizadas en el dominio de la frecuencia y se identificó cada color de ruido de manera exitosa.

Finalmente se analizó un circuito RLC alimentado solo con una fuente DC para determinar el color de ruido en la señal de voltaje del capacitor, con el análisis de su PSD se determinó la presencia del ruido blanco.

Después de analizar el ruido en el circuito RLC serie se concluye que el ruido puede presentarse en cualquier sistema eléctrico ya sea en mayor o menor amplitud, e incluso en sistemas que por sus características sirven como filtros como es el caso de un circuito RLC, este aún conserva el color de ruido que no se observa en el dominio del tiempo debido a su baja amplitud pero que se puede observar en el PSD.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Alexander, C. K., & Sadiku, M. N. O. (2013). *Fundamentos de circuitos eléctricos* (5a ed.). McGraw-Hill Education.

- [2] Billah, K. Y. R., & Shinozuka, M. (1990). Numerical method for colored-noise generation and its application to a bistable system. *Physical Review A*, 42(12), 7492–7495. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.42.7492>.
- [3] Deng, W., & Fossum, E. R. (2019). 1/f Noise Modelling and Characterization for CMOS Quanta Image Sensors. *Sensors*, 19(24), 5459. <https://doi.org/10.3390/s19245459>.
- [4] Farnoosh, R., Nabati, P., Rezaeyan, R., & Ebrahimi, M. (2011). A stochastic perspective of RL electrical circuit using different noise terms. *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 30(2), 812–822. <https://doi.org/10.1108/03321641111101221>.
- [5] Fox, R. F., Gatland, I. R., Roy, R., & Vemuri, G. (1988). Fast, accurate algorithm for numerical simulation of exponentially correlated colored noise. *Physical Review A*, 38(11), 5938–5940. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.38.5938>.
- [6] Fragasso, A., Pud, S., & Dekker, C. (2019). 1/f noise in solid-state nanopores is governed by access and surface regions. *Nanotechnology*, 30(39), 395202. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab2d35>.
- [7] Gradziuk, G., Torregrosa, G., & Broedersz, C. P. (2022). Irreversibility in linear systems with colored noise. *Physical Review E*, 105(2), 24118. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.105.024118>.
- [8] Häunggi, P., & Jung, P. (2007). Colored Noise in Dynamical Systems. En *Advances in Chemical Physics* (Vol. 89, pp. 239–326). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470141489.ch4>.
- [9] Kamada, M., Laitinen, A., Zeng, W., Will, M., Sarkar, J., Tappura, K., Seppä, H., & Hakonen, P. (2021). Electrical Low-Frequency 1/ f  $\gamma$  Noise Due to Surface Diffusion of Scatterers on an Ultra-low-Noise Graphene Platform. *Nano Letters*, 21(18), 7637–7643. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c02325>.
- [10] Zhivomirov, H. (2018). A Method for Colored Noise Generation. *The Romanian Journal of Acoustics and Vibration*, 15(1), 14–19.

- [11] Kasdin, N. J. (1995). Discrete simulation of colored noise and stochastic processes and  $1/f$  or  $1/f^\alpha$  power law noise generation. *Proceedings of the IEEE*, 83(5), 802–827. <https://doi.org/10.1109/5.381848>.
- [12] Kennedy, H. L. (2020). Improving the frequency response of Savitzky-Golay filters via colored-noise models. *Digital Signal Processing*, 102, 102743. <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2020.102743>.
- [13] Moss, F., & McClintock, P. V. E. (1989). *Noise in Nonlinear Dynamical Systems*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511897825>.
- [14] Nabati, P., & Farnoosh, R. (2021). Stochastic approach for noise analysis and parameter estimation for RC and RLC electrical circuits. *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*, 12(1), 433–444.
- [15] Santos, E., Khosravy, M., Lima, M. A. A., Cerqueira, A. S., Duque, C. A., & Yona, A. (2019). High Accuracy Power Quality Evaluation under a Colored Noisy Condition by Filter Bank ESPRIT. *Electronics*, 8(11), 1259. <https://doi.org/10.3390/electronics8111259>.
- [16] Vasilescu, G. (2005). *Electronic Noise and Interfering Signals* (1a ed.). Springer Berlin, Heidelberg.
- [17] Wolf, D. (1978). *Noise in Physical Systems* (Vol. 2). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87640-0>.