

Análisis Teórico y Práctico del Circuito RC en el Acondicionamiento de Señales Analógicas para Automatización Industrial

Hernán Eduardo Conejeros Oyarzún

h.conejeros01@ufromail.cl

22 de septiembre de 2026

Resumen

El presente informe examina el acondicionamiento de señales analógicas de 4 a 20 [mA] mediante un filtro pasivo RC para módulos de entrada de controladores lógicos programables (PLC) en entornos industriales con alta interferencia electromagnética. A través de un modelado dinámico en los dominios del tiempo y de la frecuencia, se analiza la conversión de corriente a voltaje utilizando una resistencia de precisión de 250 [Ω], justificando el rango de 1 a 5 [V] bajo el principio de "cero vivo" para la detección oportuna de fallas y cortes de línea. Asimismo, se evalúa la efectividad del condensador en la atenuación de ruido de alta frecuencia y se discute el compromiso técnico entre la tasa de filtrado y el retardo inducido por la constante de tiempo (τ). Finalmente, se integran las limitaciones físicas del entorno real como variaciones térmicas y capacitancias parásitas del cableado, concluyendo que el diseño RC constituye una solución robusta, estandarizada y económica para garantizar la integridad de las mediciones en la automatización industrial.

1. Introducción

En la automatización de procesos industriales, la confiabilidad de las decisiones tomadas por los sistemas de control depende directamente de la calidad de las señales adquiridas desde los sensores en la planta. Los entornos industriales presentan altos niveles de interferencia electromagnética, generados principalmente por la operación de motores de alta potencia, variadores de frecuencia y conmutación de cargas inductivas.

En este contexto, las señales analógicas de medición son vulnerables al ruido de alta frecuencia, lo que puede provocar lecturas erróneas o inestabilidad en los lazos de control. Para mitigar este problema, la aplicación de fundamentos eléctricos básicos como la combinación de resistencias y condensadores en configuraciones de filtrado RC resulta esencial. Este informe analiza el comportamiento teórico del circuito RC como filtro pasa-bajo, su integración en el acondicionamiento de señales para PLC y cómo las condiciones reales del entorno, tales como las variaciones de temperatura y la longitud de las líneas de transmisión, afectan la validez del modelo ideal.

2. Objetivo

Analizar el comportamiento teórico del circuito RC y su aplicación como filtro pasa-bajo en el acondicionamiento de señales analógicas para entradas de PLC, evaluando el impacto de la temperatura y la longitud del cableado sobre la validez del modelo ideal en entornos industriales.

3. Metodología

El desarrollo del presente informe se estructuró mediante un enfoque analítico y aplicado, dividido en tres fases principales:

- **Revisión teórica y modelado matemático:** Se analizó el comportamiento físico de la resistencia y el condensador. A partir de las leyes de Kirchhoff y las relaciones características de cada componente, se dedujo la ecuación diferencial del circuito RC y su correspondiente función de transferencia en el dominio de la frecuencia.
- **Contextualización en automatización:** Se definió la aplicación del circuito RC como un filtro pasa-bajo pasivo en las etapas de entrada analógica de un PLC. Se examinó su rol en el acondicionamiento de señales de 4-20 mA para la supresión de ruido electromagnético de alta frecuencia.
- **Análisis crítico de limitaciones:** Se evaluaron las desviaciones entre el modelo ideal y el comportamiento real en planta, enfocándose en las variaciones térmicas de la resistencia y los efectos de parámetros distribuidos en líneas de transmisión extensas.

3.1 Subsección: Uso de IA

En la elaboración de este informe se utilizó una herramienta de Inteligencia Artificial Generativa como apoyo operativo y de investigación. La atribución de responsabilidades y la transparencia del proceso se rigen formalmente por el marco analítico de Ciencia Generativa (Alarcón, 2026).

- **Hernán Eduardo Conejeros Oyarzún (Humano):** Conceptualización, Metodología, Validación, Redacción del borrador original, Revisión y edición, Visualización.
- **Gemini (IA):** Investigación, Análisis formal, Redacción del borrador original, Revisión y edición.

4. Resultados

4.1. Descripción y Función de los Componentes (Resistencia y Condensador)

En la etapa de acondicionamiento de señales analógicas para automatización, el filtro se fundamenta en la interacción de dos componentes pasivos esenciales:

- **Resistencia (R):** Su función principal es limitar el flujo de corriente eléctrica y disipar energía. En el filtro, la resistencia establece una oposición medida al paso de la corriente, determinando junto al condensador la velocidad de carga del sistema y fijando la impedancia de la etapa de filtrado (Alexander & Sadiku, 2013).
- **Condensador:** Componente capaz de almacenar energía en un campo eléctrico electrostático. Su reactancia capacitiva ($X_C = \frac{1}{2\pi fC}$) es inversamente proporcional a la frecuencia (f) de la señal. Para las variables de proceso lentas o de corriente continua ($f \rightarrow 0$), el condensador ofrece una impedancia extremadamente alta, comportándose como un circuito abierto y dejando pasar la señal útil. Para el ruido electromagnético de alta frecuencia (f elevada), presenta una impedancia casi nula, desviando dichas perturbaciones directamente a tierra (Alexander & Sadiku, 2013).

4.2. Desarrollo Teórico y Matemático del Circuito RC

El análisis dinámico del filtro RC combina el comportamiento del circuito en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia:

- **Análisis en el tiempo y constante de tiempo:**
Aplicando la Ley de Voltajes de Kirchhoff al circuito serie, la relación entre el voltaje de entrada $v_{int}(t)$ y el voltaje de salida $v_{out}(t)$ en el condensador se expresa mediante la ecuación diferencial ordinaria de primer orden:

$$RC \frac{dv_{out}(t)}{dt} + v_{out}(t) = v_{int}(t)$$

La constante de tiempo τ define la velocidad de respuesta del sistema y representa el tiempo requerido para que el condensador alcance el 63.2% de su valor final ante una entrada tipo escalón (Dorf & Svoboda, 2018):

$$\tau = R \cdot C$$

- **Análisis en la frecuencia y función de transferencia:**
Aplicando la Transformada de Laplace bajo condiciones iniciales nulas, se obtiene la función de transferencia $H(s)$ en el dominio de la frecuencia compleja:

$$H(s) = \frac{dv_{out}(s)}{v_{int}(s)} = \frac{1}{1 + sRC}$$

La frecuencia de corte f_c marca el punto de atenuación de -3[dB] (donde la amplitud de la señal de entrada cae al 70.7%), definiendo el límite superior de las frecuencias pasantes (Alexander & Sadiku, 2013):

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

4.3. Aplicación Práctica en Módulos de Entrada Analógica del PLC

En instalaciones industriales, los bucles de corriente de 4-20 mA procedentes de transmisores de proceso (presión, temperatura, flujo) recorren largas distancias y quedan expuestos a interferencias electromagnéticas generadas por variadores de frecuencia, motores y contactores. El circuito RC se integra directamente en el acondicionamiento previo del módulo analógico del PLC:

- **Conversión de corriente a voltaje ($I \rightarrow V$):** Puesto que la mayoría de los convertidores analógico-digitales del PLC procesan tensión, la señal de 4–20 mA atraviesa una resistencia de precisión (típicamente $R = 250 [\Omega]$) conectada en los bornes de entrada. Esto transforma el bucle de corriente en un rango de tensión de 1-5 [V] ($V = I \cdot R$) (Alexander & Sadiku, 2013).
- **Atenuación de interferencias (Filtrado Pasivo):** El condensador C, dispuesto en paralelo a la entrada del ADC, presenta una impedancia casi nula para los picos de ruido y armónicos de alta frecuencia inducidos en el cableado, derivando estas perturbaciones a tierra antes de la etapa de digitalización.
- **Compromiso entre filtrado y tiempo de respuesta:** La constante de tiempo ($\tau = R \cdot C$) se calcula para que el filtro atenúe las altas frecuencias del ruido sin distorsionar la dinámica real de la planta. La frecuencia de corte f_c se ubica por encima de la velocidad de variación de la variable física, pero muy por debajo de las frecuencias de conmutación del ruido eléctrico industrial (Dorf & Svoboda, 2018).

4.4. Limitaciones Físicas y Condiciones Reales en Planta

El comportamiento ideal del filtro RC se ve alterado en la práctica por factores ambientales y constructivos propios de las instalaciones industriales:

- **Variación térmica y tolerancia:** Los componentes pasivos presentan tolerancias comerciales (típicamente $\pm 5\%$) y coeficientes de temperatura. El incremento de temperatura dentro de los tableros eléctricos modifica los valores reales de R y C, desplazando la constante de tiempo τ y la frecuencia de corte f_c respecto a su diseño teórico (Dorf & Svoboda, 2018).
- **Efectos parásitos del cableado:** En trayectos largos, los cables apantallados añaden una capacitancia distribuida a la línea. Esta capacitancia parásita se suma en paralelo al

condensador del filtro, disminuyendo la frecuencia de corte real y ralentizando la respuesta frente a cambios rápidos en el proceso (Alexander & Sadiku, 2013).

- Impedancia de entrada del módulo PLC: La resistencia interna del canal analógico del PLC no es infinita. Esta impedancia se conecta en paralelo con la etapa de acondicionamiento, pudiendo generar un pequeño desfase en el rango convertido de 1 a 5 [V] si no se considera en la calibración.

Tabla de Síntesis del Acondicionamiento de Señal RC

Parámetro / Etapa	Rango o Expresión	Función Principal
Señal en Terreno	4 a 20 [mA]	Transmisión de corriente inmune a la caída de tensión en cables largos.
Conversión ($I \rightarrow V$)	$V = I \cdot R$ $\Downarrow$ 1 a 5 [V]	Resistencia de $R = 250 [\Omega]$ adapta la corriente al rango que lee el ADC del PLC.
Filtrado Pasivo (C)	$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$	Ofrece baja impedancia a picos de ruido de alta frecuencia, desviándolos a tierra.
Respuesta Temporal	$\tau = R \cdot C$	Define la velocidad del sistema; tiempo para alcanzar el 63.2% del valor final.
Límite de Frecuencia	$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$	Punto de caída a -3 dB (70.7% de amplitud); filtra armónicos superiores.

5. Discusión

Opinión sobre los Resultados Obtenidos: Los resultados demuestran que el

acondicionamiento mediante un filtro pasivo RC es una solución eficiente e indispensable en la instrumentación industrial. La conversión de la señal de 4 a 20 mA al rango de 1 a 5 V mediante la resistencia de 250 Ω aplica el principio de "cero vivo", lo que no solo adapta el voltaje para la tarjeta del PLC, sino que permite diferenciar con precisión una medición en su nivel mínimo (1 [V]) de una falla por cable cortado o falta de energía (0 V) (Alexander & Sadiku, 2013). Asimismo, se valida el compromiso técnico del circuito: el condensador absorbe con éxito el ruido eléctrico de alta frecuencia proveniente de variadores y motores, aunque exige calcular cuidadosamente su valor para no introducir un retardo (τ) que vuelva lenta la respuesta del control (Dorf & Svoboda, 2018).

Uso Real de la Inteligencia Artificial: Durante la elaboración del trabajo, la IA se utilizó como un tutor virtual interactivo para la estructuración del informe, la simplificación conceptual de las ecuaciones y la traducción de la teoría a ejemplos prácticos del entorno industrial. La IA permitió acelerar el flujo de trabajo y clarificar dudas sobre la relación entre corriente, voltaje y ruido. La validación del contenido fue estrictamente humana: se verificaron de forma independiente las conversiones matemáticas, se filtraron las referencias bibliográficas y se aseguró el entendimiento conceptual de cada etapa, garantizando la transparencia y la ética académica (Alarcón, 2026).

6. Conclusiones

Estandarización de la Interfaz y Detección de Fallas: El documento demuestra que la conversión de 4 a 20 mA al rango de 1 a 5 V mediante una resistencia de 250 Ω es la solución técnica más eficiente y estandarizada para conectar sensores industriales a la entrada analógica de un PLC. Esta configuración valida el uso del "cero vivo" (1 V), garantizando que el computador industrial diferencie un nivel mínimo de proceso de un cable cortado o falla de energía (0 V).

Eliminación de Mediciones Erróneas mediante Filtrado RC: La integración de un condensador en arreglo RC elimina de forma efectiva la interferencia electromagnética de alta frecuencia en la planta. Esto previene que el PLC registre lecturas falsas o erráticas provocadas por el ruido de motores y variadores, asegurando que la información procesada sea representativa de la variable real.

Aporte Práctico al Diseño Industrial: El valor central de esta lectura radica en entregar una guía directa para acondicionar señales industriales con bajo costo y alta fiabilidad, protegiendo la tarjeta del PLC y garantizando un control seguro sin registrar datos erróneos en el sistema.

8. Licencia

Este trabajo se disponibiliza a través de licencia CC 4.0

Licencia: Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) - <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Bibliografía

Alarcon, C. (2026). Generative Science as an analytical framework for integrating the full capabilities of generative artificial intelligence into scientific research while preserving scientific recognition.

~~Generative Science Preprints, 2026, 319055673.~~
<https://arxiv.org/abs/2605.06731>

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

Dorf, R. C., & Svoboda, J. A. (2018). Circuitos eléctricos (9.^a ed.). Alfaomega.