

**COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO Y DISIPACIÓN DE POTENCIA EN CIRCUITOS
SERIE-PARALELO ANTE VARIACIONES DE RESISTENCIA Y VOLTAJE
ELECTRICAL BEHAVIOR AND POWER DISSIPATION IN SERIES-PARALLEL
CIRCUITS UNDER RESISTANCE AND VOLTAGE VARIATIONS**

Autores: ¹José Miguel Núñez De Luca, ²Jenipher Johanna Paucar Bastidas, ³Raúl Ulises Sánchez Moscoso y ⁴Marco Antonio Nolivos Vimos.

¹ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-6951-8342>

²ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-2483-8592>

³ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6102-2938>

⁴ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7695-2284>

¹E-mail de contacto: miguel.nunez@educacion.gob.ec

²E-mail de contacto: johana.paucar2012@gmail.com

³E-mail de contacto: rsanchez@unach.edu.ec

⁴E-mail de contacto: mnolivos@unach.edu.ec

Afiliación: ^{1*}Unidad Educativa Dr. Alfredo Pareja Diezcanseco, (Ecuador). ^{2*}Autor Independiente, (Ecuador). ^{3*4*}Universidad Nacional de Chimborazo, (Ecuador).

Artículo recibido: 19 de Agosto del 2026.

Artículo revisado: 21 de Agosto del 2026.

Artículo aprobado: 21 de Agosto del 2026.

¹Licenciado en Ciencias de la Educación mención Informática, graduado de la Universidad Central del Ecuador, (Ecuador). Especialista Superior en Educación y Nuevas Tecnologías de la Información y la Comunicación, graduado de la Universidad Andina Simón Bolívar, (Ecuador). Magíster en Innovación de la Educación, graduado de la Universidad Andina Simón Bolívar, (Ecuador).

²Física, graduada de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, (Ecuador).

³Licenciado en Ciencias de la Educación, profesor de Enseñanza media en la Especialización de Biología y Química, graduado de la Universidad Nacional de Chimborazo, (Ecuador). Magíster en Gestión Ambiental de la Universidad Nacional de Chimborazo, (Ecuador).

⁴Ingeniero en Electricidad, especialización Electrónica, graduado de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, (Ecuador). Máster en Dirección de Empresas mención Proyectos graduado de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, (Ecuador). Magíster en Gestión Académica Universitaria de la Universidad Nacional de Chimborazo, (Ecuador).

Resumen

El objetivo de este estudio fue analizar el comportamiento eléctrico, la disipación de potencia y la robustez de un circuito resistivo serie-paralelo ante variaciones de resistencia y voltaje, incorporando la relación entre máxima potencia y eficiencia energética. Se evaluaron tres configuraciones resistivas definidas por razones entre la rama fija y las resistencias externas de 1, 2 y 4, nueve valores de resistencia variable y seis niveles de voltaje, para 162 combinaciones paramétricas. Se calcularon corrientes, resistencias equivalentes y potencias mediante relaciones analíticas; los resultados se verificaron con un análisis nodal independiente. Además, se efectuaron seiscientos mil realizaciones Monte Carlo con tolerancias uniformes de $\pm 1\%$ y $\pm 5\%$ y un análisis de sensibilidad local. El incremento de la resistencia variable redujo la corriente total hasta 60,32 %, mientras que la máxima potencia se obtuvo al igualar la carga con la resistencia de Thévenin. Sin embargo, la máxima

eficiencia global ocurrió con cargas superiores a esa condición y dependió de la configuración resistiva. Con tolerancias de $\pm 5\%$, la desviación estándar de la resistencia de Thévenin se mantuvo entre 1,48 % y 1,71 %, pero la pérdida respecto de la máxima potencia realizable no superó 0,25 % en el análisis de esquinas. La validación nodal mostró diferencias relativas inferiores a $1,4 \times 10^{-15}$. Se concluye que la condición de máxima potencia es localmente robusta frente a tolerancias moderadas, mientras que el compromiso entre potencia y eficiencia depende de la distribución resistiva de la red.

Palabras clave: Circuitos resistivos, Potencia eléctrica, Eficiencia energética, Equivalente de Thévenin, Tolerancia de resistores, Análisis de sensibilidad, Circuitos serie-paralelo.

Abstract

The objective of this study was to analyze the electrical behavior, power dissipation, and

robustness of a series-parallel resistive circuit under variations in resistance and supply voltage, while incorporating the relationship between maximum power and energy efficiency. Three resistive configurations were evaluated, defined by ratios between the fixed branch and the external series resistances of 1, 2, and 4, together with nine variable-resistance values and six voltage levels, yielding 162 parametric combinations. Currents, equivalent resistances, and powers were calculated analytically, and the results were verified through an independent nodal analysis. In addition, six hundred thousand Monte Carlo realizations were performed using uniform tolerances of $\pm 1\%$ and $\pm 5\%$, along with a local sensitivity analysis. Increasing the variable resistance reduced total current by as much as 60.32%, whereas maximum load power occurred when the load equaled the Thévenin resistance. Maximum global efficiency, however, occurred at load values above that condition and depended on the resistive configuration. With $\pm 5\%$ tolerances, the standard deviation of the Thévenin resistance remained between 1.48% and 1.71%, while the loss relative to the achievable maximum power did not exceed 0.25% in the corner analysis. Nodal validation produced relative differences below 1.4×10^{-15} . It is concluded that the maximum-power condition is locally robust to moderate resistor tolerances, whereas the trade-off between delivered power and global efficiency depends on the resistive distribution of the network.

Keywords: Resistive circuits, Electrical power, Energy efficiency, Thévenin equivalent, Resistor tolerance, Sensitivity analysis, Series-parallel circuits.

Sumário

O objetivo deste estudo foi analisar o comportamento elétrico, a dissipação de potência e a robustez de um circuito resistivo série-paralelo diante de variações de resistência e tensão de alimentação, incorporando a relação entre potência máxima e eficiência energética. Foram avaliadas três configurações resistivas definidas por razões entre o ramo fixo e as

resistências externas em série iguais a 1, 2 e 4, nove valores de resistência variável e seis níveis de tensão, totalizando 162 combinações paramétricas. Correntes, resistências equivalentes e potências foram calculadas por relações analíticas, e os resultados foram verificados por uma análise nodal independente. Além disso, foram executadas seiscentas mil realizações de Monte Carlo com tolerâncias uniformes de $\pm 1\%$ e $\pm 5\%$, acompanhadas de análise de sensibilidade local. O aumento da resistência variável reduziu a corrente total em até 60,32%, enquanto a potência máxima na carga ocorreu quando esta se igualou à resistência de Thévenin. A eficiência global máxima, entretanto, ocorreu para valores de carga superiores a essa condição e dependeu da configuração resistiva. Com tolerâncias de $\pm 5\%$, o desvio padrão da resistência de Thévenin permaneceu entre 1,48% e 1,71%, enquanto a perda em relação à potência máxima realizável não ultrapassou 0,25% na análise de extremos. A validação nodal apresentou diferenças relativas inferiores a $1,4 \times 10^{-15}$. Conclui-se que a condição de potência máxima é localmente robusta a tolerâncias moderadas, enquanto o compromisso entre potência fornecida e eficiência global depende da distribuição resistiva da rede.

Keywords: Resistive circuits, Electrical power, Energy efficiency, Thévenin equivalent, Resistor tolerance, Sensitivity analysis, Series-parallel circuits.

Introducción

Los circuitos resistivos constituyen una representación fundamental para estudiar la relación entre voltaje, corriente, resistencia equivalente y disipación de potencia. Aunque las asociaciones elementales en serie y paralelo admiten soluciones analíticas directas, la respuesta de una red depende de la forma en que los elementos se conectan y de la distribución de sus valores resistivos. En años recientes se han desarrollado formulaciones y algoritmos para calcular potenciales y resistencias

equivalentes en redes de puente, globo, abanico, cilíndricas y periódicas, lo que confirma la vigencia de la teoría de redes resistivas incluso en estructuras compuestas únicamente por resistores (Fang y Tan, 2022; Zhou et al., 2022; Zhao et al., 2023; Fang et al., 2024; Meng et al., 2024; Wang et al., 2024).

En una red serie-paralelo, la modificación de una resistencia local altera simultáneamente la resistencia equivalente, la corriente suministrada por la fuente y la distribución de tensión y potencia entre las ramas. Esta interacción impide interpretar el comportamiento de una carga únicamente a partir de su valor nominal. Además, en una implementación física los resistores presentan tolerancias de fabricación, de modo que la red real no coincide exactamente con el conjunto de valores nominales utilizado en el cálculo. Pandey y Tan (2022) demostraron que la tolerancia puede modificar de forma significativa el desempeño de redes resistivas y que su efecto debe considerarse cuando la respuesta depende de varias resistencias. De forma complementaria, el análisis Monte Carlo se utiliza en circuitos analógicos contemporáneos para representar la variabilidad introducida por tolerancias de componentes y examinar la robustez de la respuesta eléctrica (Dieste, 2024).

Los equivalentes de Thévenin y Norton permiten representar una red lineal observada desde dos terminales mediante parámetros que conservan su comportamiento externo y facilitan el análisis de una carga específica (Chatzarakis, 2010). Su utilidad no se limita a circuitos elementales; el equivalente de Thévenin continúa empleándose para identificación de parámetros y representación de sistemas eléctricos, mientras que se han desarrollado extensiones dinámicas para

situaciones en las que el modelo estático resulta insuficiente (Song et al., 2024; Zonetti et al., 2024). Para una carga resistiva variable, esta representación conduce al teorema de máxima transferencia de potencia, cuya condición clásica establece que la potencia en la carga es máxima cuando su resistencia coincide con la resistencia de Thévenin vista desde sus terminales (Rathore, 2017).

La condición de máxima potencia, sin embargo, no equivale necesariamente a la condición de máxima eficiencia. En sistemas donde interesa la fracción de energía útil entregada a una carga, el incremento de la resistencia puede reducir la potencia absoluta y, al mismo tiempo, modificar favorablemente la proporción de potencia aprovechada. Esta distinción entre potencia y eficiencia aparece también en investigaciones sobre adaptación de carga y captación de energía, donde se ha mostrado que ambos objetivos pueden requerir condiciones de operación diferentes (Bonnin et al., 2021). Estudios recientes han retomado la máxima transferencia de potencia mediante nuevas representaciones equivalentes y reglas de adaptación para sistemas discretos y cargas más generales (Hong, 2024; Masoliver, 2024, 2025).

Por tanto, la contribución de un análisis actual de una red resistiva sencilla no radica en proponer una nueva ley de circuitos, sino en caracterizar de forma integrada su respuesta paramétrica, verificar la consistencia de las relaciones clásicas y cuantificar aspectos que suelen tratarse por separado: redistribución de corriente, máxima potencia, eficiencia global, sensibilidad de los parámetros equivalentes y robustez frente a tolerancias. Esta integración resulta útil porque permite distinguir entre una condición nominal óptima y su comportamiento cuando los valores físicos se apartan de los nominales. En este estudio se consideró una

misma estructura de conexión serie-paralelo y se modificó de manera sistemática la distribución de resistencias. Las tres configuraciones se definieron mediante razones controladas entre la resistencia de la rama fija y la suma de las resistencias externas, evitando interpretar como cambios topológicos lo que corresponde a cambios paramétricos. La resistencia variable se evaluó tanto por debajo como por encima de la resistencia de Thévenin nominal y el voltaje se modificó en un intervalo que permitió comprobar las leyes de escalamiento de corriente y potencia. Adicionalmente, se incorporaron tolerancias de $\pm 1\%$ y $\pm 5\%$ mediante propagación Monte Carlo y análisis de esquinas.

El objetivo fue analizar el comportamiento eléctrico, la disipación de potencia y la robustez de un circuito resistivo serie-paralelo ante variaciones de resistencia y voltaje, determinando la condición de máxima potencia, el compromiso entre potencia entregada y eficiencia global, y la sensibilidad frente a tolerancias de los resistores. Los resultados se obtuvieron mediante relaciones analíticas, se verificaron mediante análisis nodal y se expresaron también en forma adimensional para identificar patrones independientes de la escala de voltaje.

Materiales y Métodos

Se desarrolló un estudio cuantitativo y computacional de una red resistiva lineal en corriente continua. No existió población ni muestra observacional, puesto que las unidades de análisis fueron combinaciones paramétricas deterministas y realizaciones de incertidumbre generadas a partir de tolerancias especificadas. La red estuvo compuesta por dos resistencias externas en serie, R_1 y R_4 , y una sección intermedia en paralelo formada por una resistencia variable R_v y una rama fija

constituida por R_2 y R_3 conectadas en serie. La Figura 1 muestra la estructura analizada.

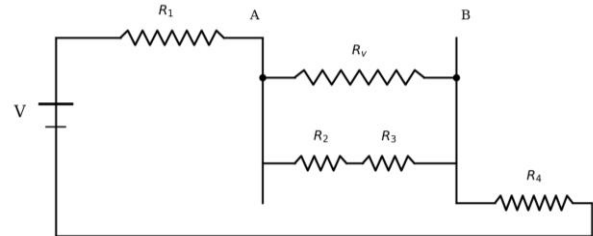


Figura 1. Esquema del circuito resistivo serie-paralelo analizado.

Fuente: elaboración propia.

Se fijaron $R_1 = 15\ \Omega$ y $R_4 = 10\ \Omega$, por lo que la resistencia externa total fue de $25\ \Omega$. La rama fija adoptó valores de 25, 50 y $100\ \Omega$, obtenidos con pares R_2 - R_3 de 10-15, 20-30 y 40-60 Ω . Esta selección produjo razones controladas de 1, 2 y 4 entre la rama fija y las resistencias externas. La resistencia variable tomó nueve valores entre 5 y $100\ \Omega$, cubriendo valores menores y mayores que la resistencia de Thévenin de las tres configuraciones. Se evaluaron seis voltajes entre 5 y 30 V. En total se analizaron 162 combinaciones paramétricas nominales.

Tabla 1. Parámetros utilizados en el análisis.

Parámetro	Valores
R_1 ; R_4	15 Ω ; 10 Ω
Configuración A: R_2 , R_3	10 Ω ; 15 Ω
Configuración B: R_2 , R_3	20 Ω ; 30 Ω
Configuración C: R_2 , R_3	40 Ω ; 60 Ω
R_v	5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, 100 Ω
Voltaje	5, 10, 15, 20, 25, 30 V
Razón q	1, 2, 4

Fuente: Elaboración propia.

La resistencia de la rama fija se definió como:

$$R_b = R_2 + R_3 \quad (1)$$

La resistencia equivalente de la sección paralela fue:

$$R_p = \frac{R_v R_b}{R_v + R_b} \quad (2)$$

La resistencia equivalente total se calculó mediante:

$$R_{eq} = R_1 + R_p + R_4 \quad (3)$$

La corriente suministrada por la fuente se obtuvo como:

$$I_T = \frac{V}{R_{eq}} \quad (4)$$

El voltaje de la sección paralela fue:

$$V_p = I_T R_p \quad (5)$$

Las corrientes de la resistencia variable y de la rama fija se determinaron mediante:

$$I_v = \frac{V_p}{R_v} \quad (6)$$

$$I_b = \frac{V_p}{R_b} \quad (7)$$

y se verificó la relación:

$$I_T = I_v + I_b \quad (8)$$

La potencia disipada por cada resistor se calculó según:

$$P = I^2 R \quad (9)$$

Mientras que la potencia suministrada por la fuente fue:

$$P_s = V I_T \quad (10)$$

Como control de consistencia se verificó, para cada combinación nominal:

$$P_s = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_v \quad (11)$$

Visto desde los terminales de R_v , el resto de la red se representó mediante un equivalente de Thévenin. La resistencia equivalente fue:

$$R_{Th} = \frac{(R_1 + R_4) R_b}{R_1 + R_4 + R_b} \quad (12)$$

El voltaje de circuito abierto fue:

$$V_{Th} = V \frac{R_b}{R_1 + R_4 + R_b} \quad (13)$$

La potencia disipada en la resistencia variable se expresó como:

$$P_v = \frac{V_{Th}^2 R_v}{(R_{Th} + R_v)^2} \quad (14)$$

La condición clásica de máxima potencia fue:

$$R_v = R_{Th} \quad (15)$$

con:

$$P_{max} = \frac{V_{Th}^2}{4 R_{Th}} \quad (16)$$

Para expresar la estructura resistiva se definió:

$$q = \frac{R_b}{R_1 + R_4} \quad (17)$$

y para normalizar la carga:

$$r = \frac{R_v}{R_{Th}} \quad (18)$$

La potencia normalizada resultó:

$$p = \frac{P_v}{P_{max}} = \frac{4r}{(1+r)^2} \quad (19)$$

Esta relación se utilizó como referencia teórica, no como una ley nueva, para verificar la convergencia de las combinaciones paramétricas sobre el comportamiento esperado de una carga resistiva conectada a un equivalente de Thévenin. Se definió la eficiencia global de entrega hacia R_v como la

fracción de la potencia suministrada por la fuente que se disipó en la resistencia variable:

$$\eta = \frac{P_v}{P_s} \quad (20)$$

Al sustituir las expresiones del circuito y utilizar las variables q y r , se obtuvo:

$$\eta(q, r) = \frac{qr}{(r+1)(q+r+1)} \quad (21)$$

La derivación respecto de r mostró que la eficiencia global alcanza su máximo cuando:

$$r_\eta = \sqrt{q + 1} \quad (22)$$

Esta condición permitió comparar la carga de máxima potencia con la carga de máxima eficiencia para cada configuración. Se evaluaron tolerancias independientes de $\pm 1 \%$ y $\pm 5 \%$ en R_1 , R_2 , R_3 , R_4 y R_v . Para cada configuración y nivel de tolerancia se generaron 100 000 realizaciones mediante distribuciones uniformes dentro de los límites nominales, para un total de 600 000 realizaciones.

Se utilizó una semilla fija de 20260821 para reproducibilidad. La resistencia variable nominal se fijó en el valor nominal de R_{Th} de cada configuración, y se cuantificaron la resistencia de Thévenin realizada, la potencia absoluta, la fracción P_v/P_{max} y la eficiencia global. Se reportaron desviaciones estándar e intervalos empíricos entre los percentiles 2,5 y 97,5. Además, se evaluaron las 32 combinaciones extremas de los cinco resistores para cada configuración y tolerancia, con el fin de identificar el peor caso de potencia normalizada. La sensibilidad local de la resistencia de Thévenin se expresó mediante el coeficiente normalizado:

$$S_i = \frac{\partial \ln R_{Th}}{\partial \ln R_i} \quad (23)$$

No se aplicaron pruebas de inferencia estadística, porque las realizaciones Monte Carlo se utilizaron para propagación de incertidumbre y no constituyeron una muestra de una población experimental. Las 162 combinaciones nominales se resolvieron también mediante un sistema independiente de ecuaciones nodales basado en las leyes de Kirchhoff, sin utilizar las expresiones de reducción serie-paralelo empleadas en el cálculo principal. Se compararon la corriente total, la corriente de la carga, la corriente de la rama fija y la potencia en R_v . Esta segunda formulación se utilizó como comprobación numérica independiente del procedimiento algebraico. Los cálculos se realizaron con aritmética de doble precisión.

Resultados y Discusión

El incremento de R_v aumentó la resistencia equivalente de la sección paralela y redujo la corriente total, aunque la magnitud de la reducción dependió de la distribución de resistencias. A 30 V, al aumentar R_v de 5 a 100 Ω , la corriente total disminuyó de 1,029 a 0,667 A en la configuración A, de 1,015 a 0,514 A en B y de 1,008 a 0,400 A en C. Las reducciones relativas fueron 35,19 %, 49,35 % y 60,32 %, respectivamente. El efecto más intenso en C se explica porque una rama fija de mayor resistencia hace que la variación de R_v tenga un efecto proporcionalmente mayor sobre la resistencia equivalente de la sección paralela. La variación de corriente con R_v fue no lineal porque la carga no se suma directamente a las resistencias externas, sino que se combina en paralelo con R_b . Este comportamiento es consistente con el principio general de que las propiedades equivalentes dependen de la distribución resistiva de la red, aspecto que también sustenta los desarrollos recientes para redes de mayor complejidad (Fang et al., 2024; Meng et al., 2024; Wang et al., 2024).

Tabla 2. Respuesta nominal de las tres configuraciones a 30 V.

Config.	q	R _{Th} (Ω)	Reducción IT (%)	P _{máx} (W)
A	1	12,500	35,19	4,500
B	2	16,667	49,35	6,000
C	4	20,000	60,32	7,200

Fuente: Elaboración propia.

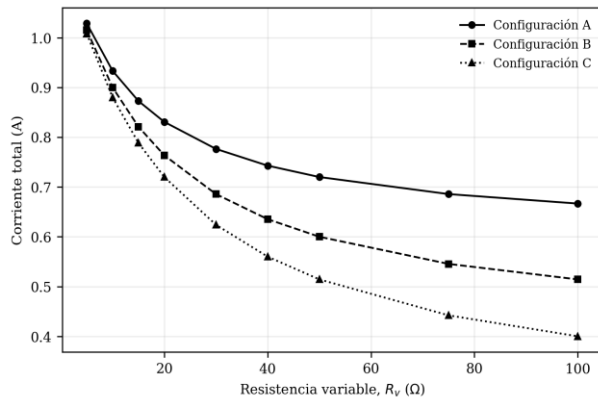


Figura 2. Corriente total frente a la resistencia variable para las tres configuraciones a 30 V.

Fuente: Elaboración propia.

La potencia de R_v presentó el comportamiento clásico no monótono: aumentó con la carga hasta un máximo y disminuyó después. Los máximos continuos ocurrieron en 12,500, 16,667 y 20,000 Ω para A, B y C, coincidiendo con R_{Th} . A 30 V, las potencias máximas fueron 4,500, 6,000 y 7,200 W. En la malla discreta de nueve resistencias, la configuración C incluyó exactamente el valor óptimo, mientras que 15 Ω produjo 99,17 % y 99,72 % de la máxima potencia en A y B. En consecuencia, el estudio reproduce la condición clásica de máxima transferencia y no la presenta como un hallazgo nuevo; su función es establecer una referencia para los análisis posteriores de eficiencia y tolerancia (Rathore, 2017; Hong, 2024; Masoliver, 2024, 2025). La normalización mediante $r = R_v/R_{Th}$ hizo que las combinaciones de las tres configuraciones y los seis voltajes coincidieran con $p = 4r/(1+r)^2$.

Esta coincidencia confirma que el cambio de voltaje modifica la escala absoluta de potencia, pero no la forma de la relación normalizada.

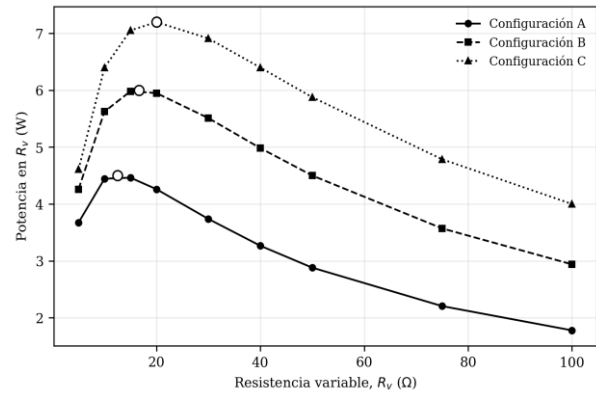


Figura 3. Potencia disipada en la resistencia variable y máximos teóricos a 30 V.

Fuente: Elaboración propia.

También muestra por qué la máxima potencia es relativamente insensible a pequeños errores de ajuste alrededor de $r = 1$: si $r = 1 + \varepsilon$, la expansión local es:

$$p \approx 1 - \frac{\varepsilon^2}{4} + O(\varepsilon^3) \quad (24)$$

El término lineal desaparece en el máximo, de modo que las desviaciones pequeñas de la carga generan pérdidas de segundo orden. La condición que maximiza la potencia en R_v no coincidió con la que maximiza la fracción de potencia de la fuente entregada a esa carga. En $r = 1$, las eficiencias globales fueron 16,67 %, 25,00 % y 33,33 % para A, B y C. Al optimizar la ecuación de eficiencia, los máximos se obtuvieron en $r = 1,414$, 1,732 y 2,236, equivalentes a resistencias de 17,678, 28,868 y 44,721 Ω. Las eficiencias aumentaron a 17,16 %, 26,79 % y 38,20 %, respectivamente, pero con reducciones de potencia respecto del máximo de 2,94 %, 7,18 % y 14,59 %.

Tabla 3. Compromiso entre potencia máxima y eficiencia global a 30 V.

Config.	η en $P_{\text{máx}}$ (%)	$r\eta$	R_v para $\eta_{\text{máx}}$ (Ω)	$\eta_{\text{máx}}$ (%)	$P_v/P_{\text{máx}}$ (%)
A	16,67	1,414	17,678	17,16	97,06
B	25,00	1,732	28,868	26,79	92,82
C	33,33	2,236	44,721	38,20	85,41

Fuente: Elaboración propia.

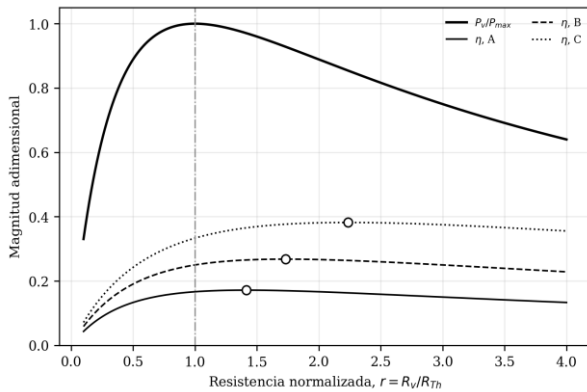


Figura 4. Potencia normalizada y eficiencia global en función de la resistencia normalizada.

Fuente: Elaboración propia.

El desplazamiento de la condición de máxima eficiencia hacia cargas mayores que R_{Th} se debe a que el circuito original contiene una rama fija que disipa potencia incluso cuando la carga variable se aleja de la condición de máxima transferencia. El resultado evidencia que optimizar potencia y optimizar aprovechamiento energético constituyen

objetivos distintos. Esta distinción es consistente con trabajos de adaptación de carga en los que una mejora de la eficiencia puede requerir renunciar a parte de la potencia máxima disponible (Bonnin et al., 2021). En el presente circuito, el parámetro q controla la magnitud del compromiso: cuanto mayor es la resistencia de la rama fija respecto de las resistencias externas, mayor es la eficiencia global alcanzable, pero más se desplaza la carga eficiente respecto de la carga de máxima potencia.

El análisis Monte Carlo mostró que las tolerancias afectan de forma apreciable los valores absolutos de resistencia y potencia, pero afectan mucho menos la fracción de potencia obtenida respecto del máximo realizable de cada circuito. Con tolerancias de $\pm 1\%$, la desviación estándar de R_{Th} estuvo entre 0,295 % y 0,343 %. Con $\pm 5\%$, aumentó a 1,477 %-1,713 %. En el mismo escenario de $\pm 5\%$, la desviación estándar de la potencia absoluta fue de 3,306 % en A, 2,858 % en B y 2,537 % en C.

Tabla 4. Propagación de tolerancias sobre R_{Th} y la potencia de carga.

Config. /tol.	DE R_{Th} (%)	IC 95 % R_{Th} (Ω)	DE P_v (%)	Peor $P_v/P_{\text{máx}}$ (%)
A $\pm 1\%$	0,295	12,429-12,571	0,658	99,99
A $\pm 5\%$	1,477	12,144-12,857	3,306	99,75
B $\pm 1\%$	0,309	16,568-16,765	0,571	99,99
B $\pm 5\%$	1,549	16,168-17,156	2,858	99,75
C $\pm 1\%$	0,343	19,871-20,130	0,507	99,99
C $\pm 5\%$	1,713	19,349-20,643	2,537	99,75

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5, la diferencia entre variación absoluta y pérdida relativa es relevante. Las tolerancias modifican el voltaje de Thévenin y la resistencia equivalente, por lo que la potencia máxima disponible puede variar varios puntos porcentuales. Sin embargo, cuando R_v se selecciona a partir del valor nominal de R_{Th} , la

pérdida adicional causada por el desajuste se mantiene pequeña. En el análisis de las 32 esquinas por escenario, incluso con $\pm 5\%$ la fracción mínima fue 99,75 % de la máxima potencia realizable. Los resultados complementan la evidencia de Pandey y Tan (2022), quienes mostraron que la tolerancia de

resistores puede ser determinante en redes donde el desempeño depende de múltiples elementos, y coinciden con el uso contemporáneo de análisis Monte Carlo para representar variabilidad de componentes en circuitos analógicos (Dieste, 2024). El análisis de sensibilidad permitió identificar qué resistencias controlan en mayor medida R_{Th} .

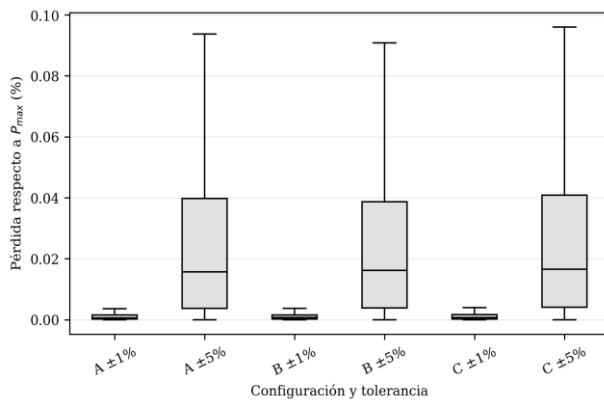


Figura 5. Distribución de la pérdida de potencia normalizada bajo tolerancias de $\pm 1\%$ y $\pm 5\%$.

Fuente: Elaboración propia.

En A, R_1 y R_3 presentaron coeficientes de 0,30; en B, R_1 aumentó a 0,40; y en C alcanzó 0,48. En contraste, la sensibilidad asociada con R_2 disminuyó de 0,20 a 0,08 al aumentar q . Por tanto, cuando la rama fija es grande respecto de las resistencias externas, la incertidumbre de R_{Th} queda dominada progresivamente por las resistencias externas, especialmente por R_1 debido a su mayor proporción dentro de $R_1 + R_4$.

Tabla 5. Coeficientes normalizados de sensibilidad de R_{Th} .

Config.	S(R_1)	S(R_4)	S(R_2)	S(R_3)
A	0,300	0,200	0,200	0,300
B	0,400	0,267	0,133	0,200
C	0,480	0,320	0,080	0,120

Fuente: Elaboración propia.

El análisis nodal independiente reprodujo la corriente total, las corrientes de rama y la potencia en R_v de las 162 combinaciones nominales con una diferencia relativa máxima de $1,36 \times 10^{-15}$. El balance entre potencia suministrada y potencia disipada presentó un error relativo máximo de $3,65 \times 10^{-14} \%$, compatible con el redondeo de la aritmética de doble precisión. Estas comprobaciones respaldan la consistencia interna del procedimiento y evitan que la validación dependa exclusivamente de una única forma algebraica.

El modelo considera resistores lineales, fuente ideal y régimen estacionario. Las tolerancias se representaron mediante distribuciones uniformes independientes porque no se dispuso de distribuciones de fabricación específicas; por ello, los intervalos Monte Carlo deben interpretarse como propagación de incertidumbre bajo ese supuesto y no como predicciones de un lote comercial particular. Tampoco se incorporaron coeficientes térmicos, resistencia interna de la fuente, envejecimiento ni correlaciones de fabricación. Estos factores pueden ser relevantes cuando la potencia disipada modifica la temperatura del componente o cuando se emplean redes de alta precisión. Aun con estas limitaciones, la combinación de análisis nominal, eficiencia, sensibilidad y tolerancias proporciona una caracterización más completa que la comprobación aislada de la condición clásica de máxima potencia.

Conclusiones

De los resultados obtenidos y su análisis se establecen las siguientes conclusiones: La respuesta eléctrica de la estructura serie-paralelo depende de la distribución de resistencias y no puede atribuirse al valor de la carga variable de forma aislada. El parámetro

adimensional q permite representar de manera compacta esa distribución sin confundir cambios paramétricos con cambios de topología. La condición $R_v = R_{Th}$ reproduce correctamente la máxima transferencia de potencia, pero no maximiza la eficiencia global del circuito. La carga que maximiza la fracción de potencia entregada a R_v es mayor que R_{Th} y su separación respecto de la condición de máxima potencia aumenta con q .

La condición de máxima potencia es localmente robusta frente a tolerancias moderadas: la variabilidad de los resistores modifica la potencia absoluta disponible, pero el desajuste entre la carga nominal y la resistencia de Thévenin realizada produce una pérdida relativa pequeña alrededor del máximo. La sensibilidad de la resistencia de Thévenin se desplaza hacia las resistencias externas cuando aumenta la resistencia de la rama fija. Por ello, la selección de tolerancias puede priorizar componentes diferentes según la configuración resistiva del circuito. La concordancia entre el procedimiento analítico, el análisis nodal y el balance de potencia respalda la reproducibilidad del estudio.

Referencias Bibliográficas

- Bonnin, M., Traversa, F., & Bonani, F. (2021). Leveraging circuit theory and nonlinear dynamics for the efficiency improvement of energy harvesting. *Nonlinear Dynamics*, 104, 367–382. <https://doi.org/10.1007/s11071-021-06297-3>
- Chatzarakis, G. (2010). A new method for finding the Thevenin and Norton equivalent circuits. *Engineering*, 2(5), 328–336. <https://doi.org/10.4236/eng.2010.25043>
- Dieste, M. (2024). Fault detection in analog electronic circuits using fuzzy inference systems and particle swarm optimization. *Alexandria Engineering Journal*, 95, 376–393. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.01.054>
- Fang, X., & Tan, Z. (2022). Circuit network theory of n-horizontal bridge structure. *Scientific Reports*, 12, 6158. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-09841-2>
- Fang, X., Zhang, Z., & Tan, Z. (2024). Equivalent resistance of a periodic and asymmetric $2 \times n$ resistor network. *Results in Physics*, 60, 107683. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2024.107683>
- Hong, S. (2024). Modified impedance matching in a discrete battery system: Selection rule for maximum power transfer. *Resonance*, 29, 1295–1308. <https://doi.org/10.1007/s12045-024-1295-7>
- Luo, D., Luo, F., & Luo, L. (2025). An innovative method is applied to solve the equivalent resistance between any nodes of a $2 \times 4 \times n$ tower-shaped cascaded resistive network. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 53(3), 1386–1397. <https://doi.org/10.1002/cta.4157>
- Masoliver, P. (2024). Maximum power equivalent: A unification of Thévenin and Norton equivalents. *IETE Journal of Education*, 65(2), 118–123. <https://doi.org/10.1080/09747338.2024.2342933>
- Masoliver, P. (2025). Generalization of the maximum power equivalent: Overview of its properties and applications. *IETE Journal of Education*, 66(1), 53–59. <https://doi.org/10.1080/09747338.2025.2472632>
- Meng, X., Jiang, X., Zheng, Y., & Jiang, Z. (2024). A novel formula for representing the equivalent resistance of the $m \times n$ cylindrical resistor network. *Scientific Reports*, 14, 21254. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-72196-3>
- Pandey, V., & Tan, C. (2022). Effect of resistor tolerance on the performance of resistor network—An application of the statistical design of experiment. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 50(1), 175–182. <https://doi.org/10.1002/cta.3137>
- Rathore, T. (2017). Generalized maximum power transfer theorem. *IETE Journal of Education*, 58(1), 39–41.

<https://doi.org/10.1080/09747338.2017.1332496>

Song, J., Arévalo, J., Cheah, M., Prieto, E., & Gomis, O. (2024). Dynamic equivalent representation for symmetrical short-circuit analysis of power systems with power electronics. *Electric Power Systems Research*, 235, 110657. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110657>

Wang, R., Jiang, X., Zheng, Y., Jiang, Z., & Xiang, D. (2024). New equivalent resistance formula of $m \times n$ rectangular resistor network represented by Chebyshev polynomials. *Scientific Reports*, 14, 29461. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80899-w>

Zhao, W., Zheng, Y., Jiang, X., & Jiang, Z. (2023). Two optimized novel potential formulas and numerical algorithms for $m \times n$ cobweb and fan resistor networks. *Scientific*

Reports, 13, 12417.

<https://doi.org/10.1038/s41598-023-39478-8>

Zhou, Y., Zheng, Y., Jiang, X., & Jiang, Z. (2022). Fast algorithm and new potential formula represented by Chebyshev polynomials for an $m \times n$ globe network. *Scientific Reports*, 12, 21260.

<https://doi.org/10.1038/s41598-022-25724-y>
 Zonetti, D., Ortega, R., Cisneros, R., Bobtsov, A., Mancilla, F., & Gomis, O. (2024). An observer-based composite identifier for online estimation of the Thévenin equivalent parameters of a power system. *Asian Journal of Control*, 26(5), 2229–2241. <https://doi.org/10.1002/asjc.3345>



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional. Copyright © José Miguel Núñez de Luca, Jenipher Johanna Paucar Bastidas, Raúl Ulises Sánchez Moscoso y Marco Antonio Nolivos Vimos.

Declaraciones éticas y editoriales del artículo

Contribución de los autores (Taxonomía CRediT)

José Miguel Núñez de Luca: Conceptualización, metodología, análisis formal, investigación, redacción del borrador original y redacción
 Jenipher Johanna Paucar Bastidas: Metodología, software, curación de datos, análisis formal, validación, visualización y redacción – revisión y edición.
 Raúl Ulises Sánchez Moscoso: Conceptualización, investigación, validación, análisis formal, recursos y redacción – revisión y edición
 Marco Antonio Nolivos Vimos: Conceptualización, supervisión, administración del proyecto, validación y redacción – revisión y edición.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con la investigación presentada, la autoría del manuscrito ni la publicación del presente artículo.

Declaración de financiamiento

La presente investigación no recibió financiamiento específico de agencias públicas, comerciales o de organizaciones sin fines de lucro. En caso de existir financiamiento institucional o externo, este deberá ser declarado explícitamente por los autores en esta sección.

Declaración del editor

El editor responsable certifica que el proceso editorial del presente artículo se desarrolló conforme a los principios de integridad científica, transparencia y buenas prácticas editoriales. El manuscrito fue sometido a un proceso de evaluación mediante revisión por pares doble ciego, garantizando la confidencialidad de la identidad de los autores y revisores durante todo el proceso de dictamen académico. Asimismo, el editor declara que el artículo cumple con los criterios científicos, metodológicos y éticos establecidos por la revista.

Declaración de los revisores

Los revisores externos que participaron en la evaluación del presente manuscrito declaran haber realizado el proceso de revisión de manera objetiva, independiente y confidencial. Asimismo, manifiestan que no mantienen conflictos de interés con los autores ni con la investigación evaluada, y que sus observaciones y recomendaciones se fundamentan exclusivamente en criterios científicos, metodológicos y académicos.

Declaración ética de la investigación

Los autores declaran que la investigación se desarrolló respetando los principios éticos de la investigación científica, garantizando la confidencialidad de los datos y el respeto a los participantes del estudio. En los casos en que la investigación involucre seres humanos, los procedimientos deben ajustarse a los principios éticos establecidos en la Declaración de Helsinki y a las normativas institucionales correspondientes.

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial

Los autores declaran que el uso de herramientas de inteligencia artificial, en caso de haberse utilizado durante el proceso de investigación o redacción del manuscrito, se realizó únicamente como apoyo técnico para mejorar la claridad del lenguaje o el análisis de información, manteniendo siempre la responsabilidad intelectual sobre el contenido del artículo. Las herramientas de inteligencia artificial no fueron utilizadas como autoras del manuscrito ni sustituyen la responsabilidad académica de los investigadores.

Disponibilidad de datos

Los datos que respaldan los resultados de esta investigación estarán disponibles previa solicitud razonable al autor de correspondencia, respetando las normas éticas y de confidencialidad establecidas por la investigación.

