

03_fuentes_reales_thevenin

April 3, 2026

1 Tema 3 - Fuentes Reales y Circuitos Equivalentes

Teoría de Circuitos - ETSI, Universidad de Sevilla

1.1 Objetivos de aprendizaje

- Modelar fuentes reales de tensión y corriente con su resistencia interna
- Trazar la característica U-I de una fuente real y obtener circuito abierto / cortocircuito
- Convertir entre equivalentes Thévenin y Norton
- Calcular el circuito equivalente de Thévenin y Norton de una red arbitraria
- Aplicar el teorema de máxima transferencia de potencia
- Identificar fuentes dependientes y emplear el método de fuente de prueba

Configuración lista.

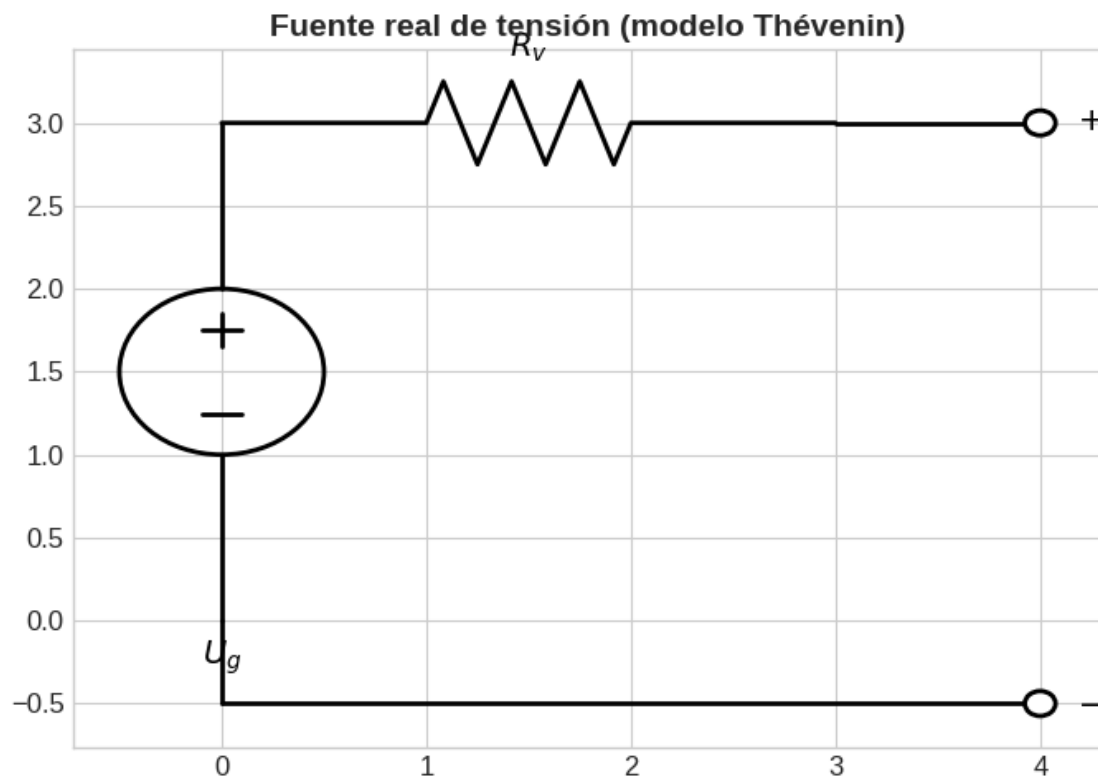
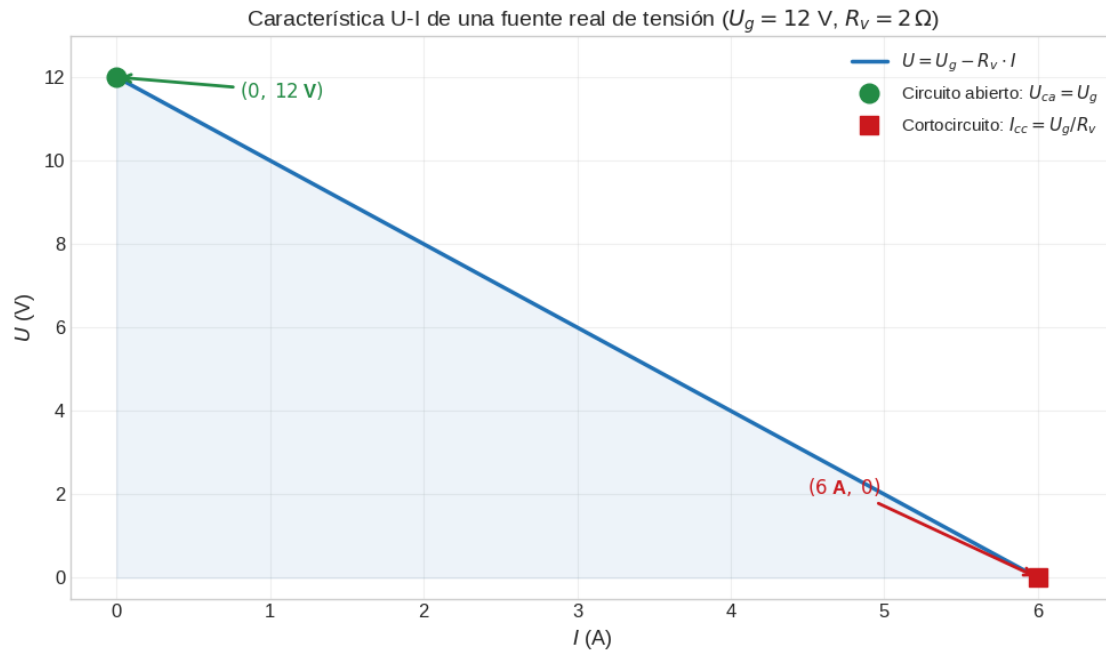
1.2 1. Fuente real de tensión

Una fuente de tensión ideal entrega siempre U_g sin importar la corriente. En la práctica, la fuente tiene una **resistencia interna** R_v en serie que provoca una caída con la corriente:

$$U = U_g - R_v \cdot I$$

Condición	Resultado
Circuito abierto ($I = 0$)	$U_{ca} = U_g$
Cortocircuito ($U = 0$)	$I_{cc} = \frac{U_g}{R_v}$

La **característica U-I** es una recta de pendiente negativa $-R_v$ que parte de $(0, U_g)$ en el eje de tensiones y corta el eje de corrientes en I_{cc} .



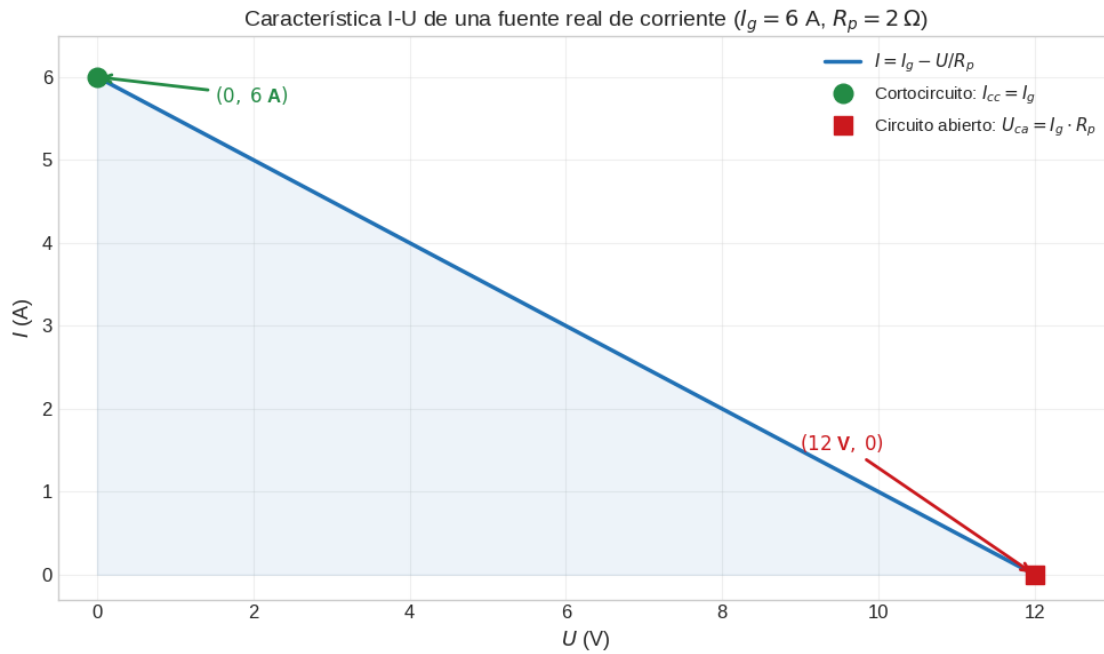
1.3 2. Fuente real de corriente

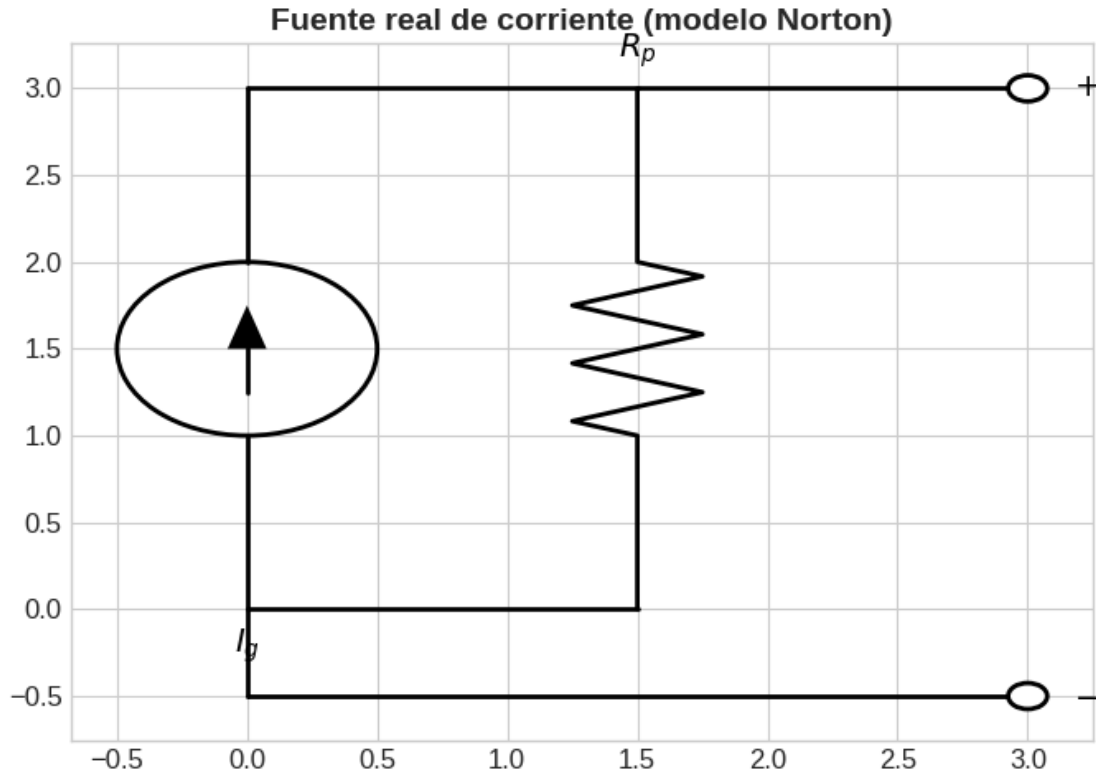
La fuente ideal de corriente entrega siempre I_g independientemente de la tensión en bornes. En la práctica, parte de esa corriente se desvía por una **resistencia interna** R_p en paralelo:

$$I = I_g - G_p \cdot U = I_g - \frac{U}{R_p}$$

Condición	Resultado
Cortocircuito ($U = 0$)	$I_{cc} = I_g$
Circuito abierto ($I = 0$)	$U_{ca} = I_g \cdot R_p$

La **característica I-U** es una recta de pendiente negativa $-G_p = -1/R_p$.





1.4 3. Equivalencia Thévenin Norton

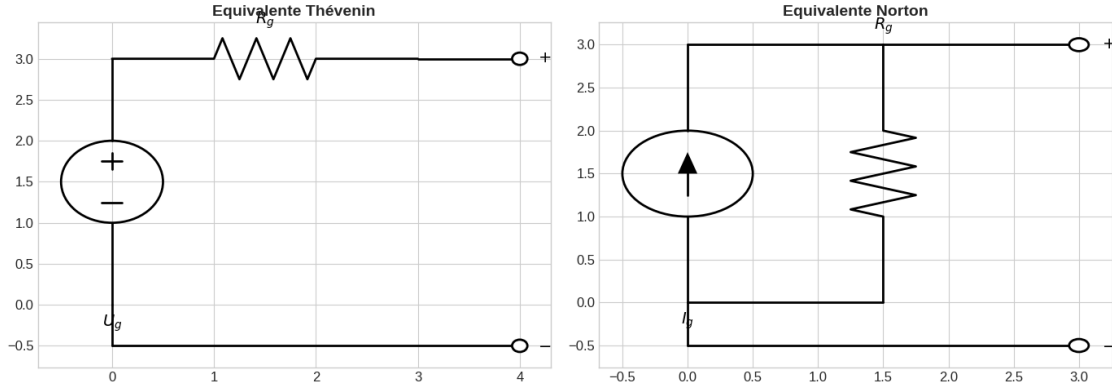
Dos circuitos son **equivalentes** si producen la **misma característica U-I** en sus bornes. La fuente real de tensión (Thévenin) y la fuente real de corriente (Norton) son equivalentes cuando:

$$\boxed{U_g = R_g \cdot I_g \quad R_g = R_v = R_p}$$

Conversión Thévenin $\rightarrow$ Norton: - $I_g = \frac{U_g}{R_g}$, $R_p = R_g$

Conversión Norton $\rightarrow$ Thévenin: - $U_g = R_g \cdot I_g$, $R_v = R_g$

Ambos modelos comparten: - La misma tensión de circuito abierto: $U_{ca} = U_g = I_g \cdot R_p$ - La misma corriente de cortocircuito: $I_{cc} = U_g / R_v = I_g$ - La misma pendiente en la curva U-I: $-R_g$



1.5 4. Asociación de fuentes reales

1.5.1 4.1 Asociación en serie (modelo Thévenin)

Al conectar n fuentes reales de tensión en **serie**:

$$U_{g,eq} = \sum_{k=1}^n U_{g,k} \quad R_{eq} = \sum_{k=1}^n R_{v,k}$$

Las tensiones se suman algebraicamente (pueden restarse si están en sentido opuesto) y las resistencias internas se suman.

1.5.2 4.2 Asociación en paralelo (modelo Norton)

Al conectar n fuentes reales de corriente en **paralelo**:

$$I_{g,eq} = \sum_{k=1}^n I_{g,k} \quad G_{eq} = \sum_{k=1}^n G_{p,k} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_{p,k}}$$

Las corrientes se suman algebraicamente y las conductancias se suman (equivalente a resistencias en paralelo).

Truco para el examen: Para asociar fuentes mixtas, convierte todas al mismo tipo (todas a Thévenin para serie, todas a Norton para paralelo) antes de sumar.

1.6 5. Equivalente de Thévenin

Cualquier red lineal con dos terminales puede sustituirse por una fuente real de tensión equivalente.

1.6.1 Procedimiento

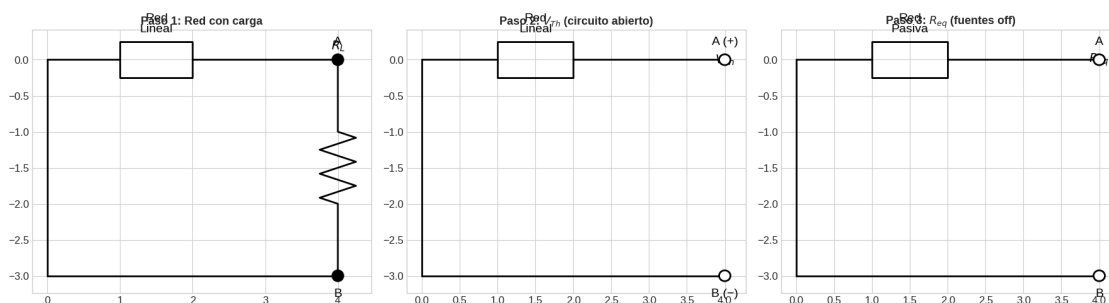
Paso 1: Identificar los terminales A-B donde se quiere el equivalente.

Paso 2: Calcular $V_{Th} =$ **tensión de circuito abierto** entre A y B (desconectar la carga).

Paso 3: Calcular $R_{eq} =$ resistencia equivalente vista desde A-B con **todas las fuentes independientes desactivadas**: - Fuentes de tensión $\rightarrow$ **cortocircuito** (cable) - Fuentes de corriente $\rightarrow$ **circuito abierto** (eliminar)

$$V_{Th} = V_{AB, \text{circuito abierto}} \quad R_{eq} = R_{AB, \text{fuentes off}}$$

Error frecuente: No se apagan las fuentes dependientes. Las fuentes dependientes **nunca** se apagan porque dependen de una variable del circuito.



1.7 6. Equivalente de Norton

El equivalente de Norton es una fuente de corriente I_N en paralelo con R_{eq} .

Paso 1: Calcular $I_N =$ **corriente de cortocircuito** entre A y B.

Paso 2: R_{eq} se calcula igual que en Thévenin.

$$I_N = I_{AB, \text{cortocircuito}} \quad R_{eq} = R_{AB, \text{fuentes off}}$$

1.7.1 Relación Thévenin-Norton

$$V_{Th} = R_{eq} \cdot I_N$$

Esto permite calcular el Norton a partir del Thévenin o viceversa sin necesidad de resolver de nuevo el circuito.

Truco para el examen: Si el circuito abierto es difícil de calcular pero el cortocircuito es simple (o viceversa), calcula uno y obtén el otro por la relación $V_{Th} = R_{eq} \cdot I_N$.

1.8 7. Máxima transferencia de potencia

Dado un circuito con equivalente de Thévenin V_{Th} , R_{eq} conectado a una carga R_L , la potencia disipada en la carga es:

$$P_L = R_L \cdot I^2 = R_L \cdot \left(\frac{V_{Th}}{R_{eq} + R_L} \right)^2$$

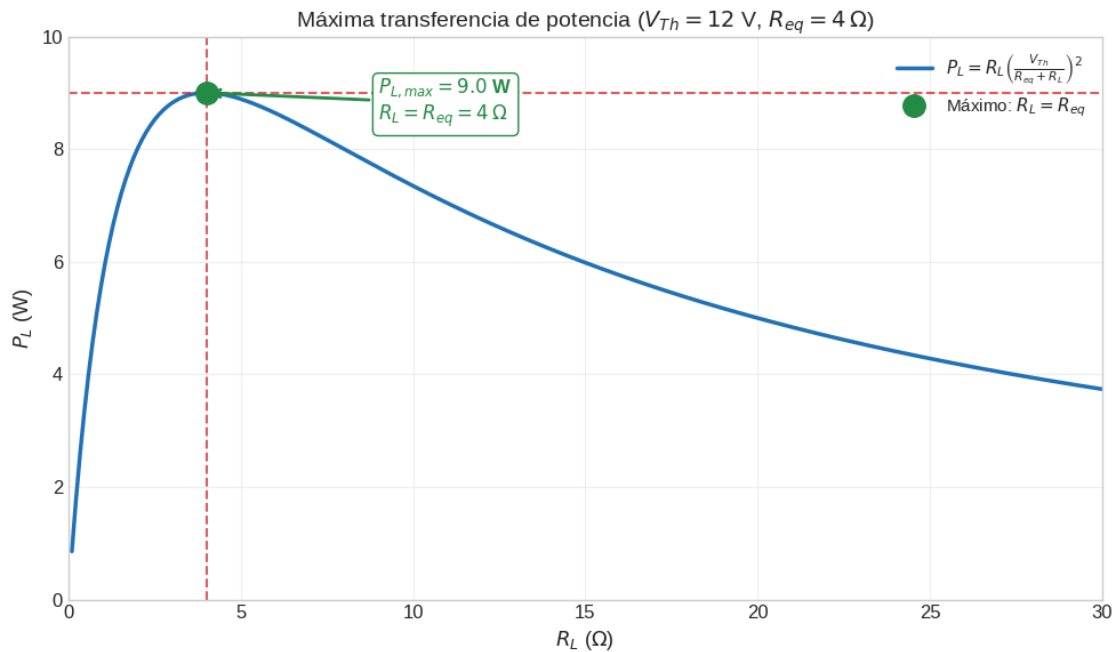
Derivando e igualando a cero:

$$\frac{dP_L}{dR_L} = 0 \Rightarrow \boxed{R_L = R_{eq}}$$

La **potencia máxima** transferida a la carga es:

$$\boxed{P_{L,\max} = \frac{V_{Th}^2}{4R_{eq}}}$$

Nota: Cuando $R_L = R_{eq}$, el **rendimiento** es del 50 %. La mitad de la potencia se disipa en R_{eq} y la otra mitad en R_L .



Ejercicio resuelto: Máxima transferencia de potencia Datos: $V_{Th} = 48 \text{ V}$, $R_{eq} = 12 \Omega$

Paso 1: Para máxima potencia, $R_L = R_{eq} = 12 \Omega$.

Paso 2: Corriente en el circuito:

$$I = \frac{V_{Th}}{R_{eq} + R_L} = \frac{48}{12 + 12} = 2 \text{ A}$$

Paso 3: Potencia máxima:

$$P_{L,\max} = \frac{V_{Th}^2}{4R_{eq}} = \frac{48^2}{4 \times 12} = \frac{2304}{48} = 48 \text{ W}$$

Verificación: $P_L = R_L \cdot I^2 = 12 \times 2^2 = 48 \text{ W} \checkmark$

Rendimiento: $\eta = \frac{P_L}{P_{total}} = \frac{48}{96} = 50\%$

1.9 8. Fuentes dependientes

Las fuentes **dependientes** (o controladas) son fuentes cuyo valor depende de una variable del circuito. Existen cuatro tipos:

Tipo	Símbolo	Relación	Unidad del parámetro
VCVS (tensión controlada por tensión)	Rombo con $+/-$	$V = \mu \cdot V_x$	μ (adimensional)
VCCS (corriente controlada por tensión)	Rombo con flecha	$I = g \cdot V_x$	g (S, siemens)
CCVS (tensión controlada por corriente)	Rombo con $+/-$	$V = r \cdot I_x$	r (Ω)
CCCS (corriente controlada por corriente)	Rombo con flecha	$I = \alpha \cdot I_x$	α (adimensional)

1.9.1 Thévenin/Norton con fuentes dependientes

Las fuentes dependientes **NO se apagan** al calcular R_{eq} . En su lugar se usa el **método de la fuente de prueba**:

1. Apagar todas las fuentes **independientes**
2. Conectar una fuente de prueba V_p (o I_p) entre A y B
3. Resolver el circuito para obtener I_p (o V_p)
4. $R_{eq} = V_p/I_p$

$$R_{eq} = \frac{V_p}{I_p}$$

Error frecuente: Apagar una fuente dependiente como si fuera independiente. Esto da un resultado incorrecto.

1.10 9. Ejercicios resueltos del boletín

1.10.1 9.1 Problema 1: Thévenin simple

Ejercicio resuelto: Equivalente Thévenin (P1) Datos: Red con fuentes independientes.
Resultado esperado: $E_{Th} = 100 \text{ V}$, $R_{eq} = 25 \Omega$.

Paso 1: Calcular V_{Th} (tensión de circuito abierto entre A-B).

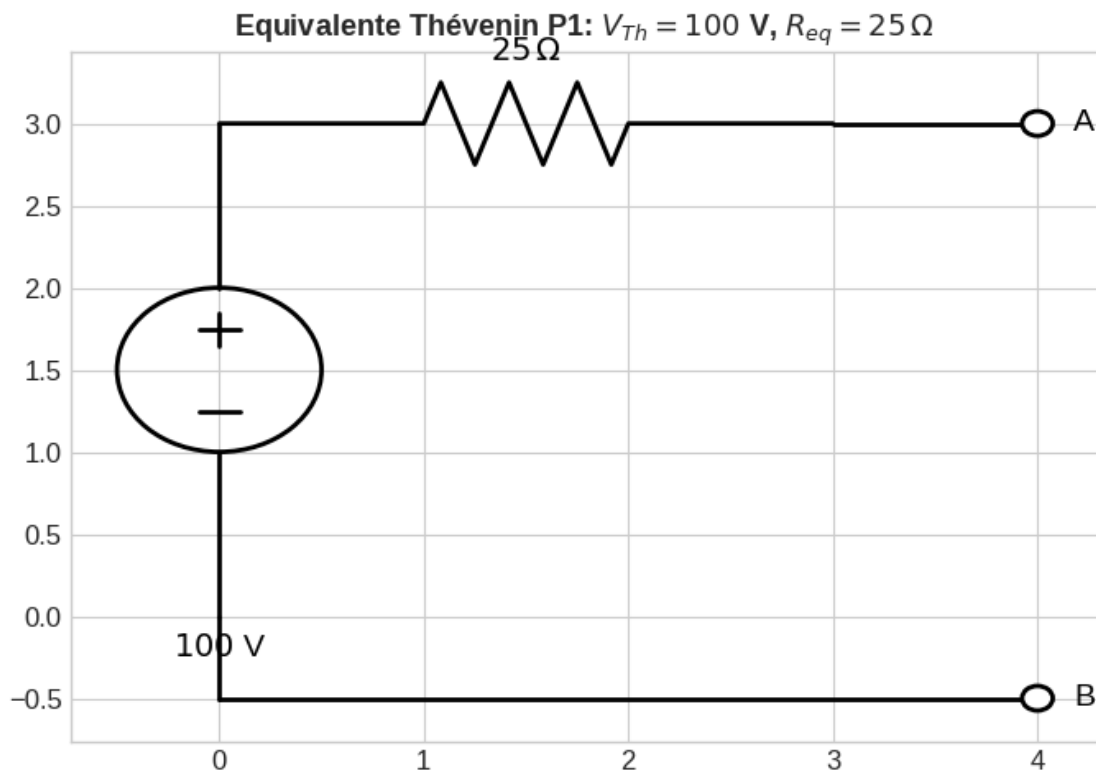
Se desconecta la carga y se resuelve el circuito. Aplicando divisor de tensión o mallas:

$$V_{Th} = E_{Th} = 100 \text{ V}$$

Paso 2: Calcular R_{eq} apagando fuentes independientes: - Fuentes de tensión $\rightarrow$ cortocircuito -
Fuentes de corriente $\rightarrow$ circuito abierto

$$R_{eq} = 25 \Omega$$

Paso 3: Circuito equivalente: fuente de 100 V en serie con 25 Ω .



1.10.2 9.2 Problema 2: Potencia y rendimiento

Ejercicio resuelto: Potencia y rendimiento (P2) Datos: Equivalente Thévenin con $V_{Th} = 100 \text{ V}$, $R_{eq} = 25 \Omega$, carga $R_L = 75 \Omega$.

Paso 1: Corriente:

$$I = \frac{V_{Th}}{R_{eq} + R_L} = \frac{100}{25 + 75} = 1 \text{ A}$$

Paso 2: Potencia en la carga:

$$P_L = R_L \cdot I^2 = 75 \times 1^2 = 75 \text{ W}$$

Paso 3: Potencia total y rendimiento:

$$P_{total} = V_{Th} \cdot I = 100 \times 1 = 100 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_L}{P_{total}} = \frac{75}{100} = 75\%$$

Nota: El rendimiento del 75 % es mayor que el 50 % de máxima transferencia porque $R_L > R_{eq}$. Mayor rendimiento implica menor potencia absoluta en la carga respecto al máximo posible.

1.10.3 9.3 Problema 4: Relación $R = 3R_g$ para $P/P_{\max}$

Ejercicio resuelto: Fracción de potencia máxima (P4) Datos: $R_L = 3R_{eq}$. Calcular $P_L/P_{L,\max}$.

Paso 1: Potencia con $R_L = 3R_{eq}$:

$$P_L = 3R_{eq} \cdot \left(\frac{V_{Th}}{R_{eq} + 3R_{eq}} \right)^2 = 3R_{eq} \cdot \frac{V_{Th}^2}{16R_{eq}^2} = \frac{3V_{Th}^2}{16R_{eq}}$$

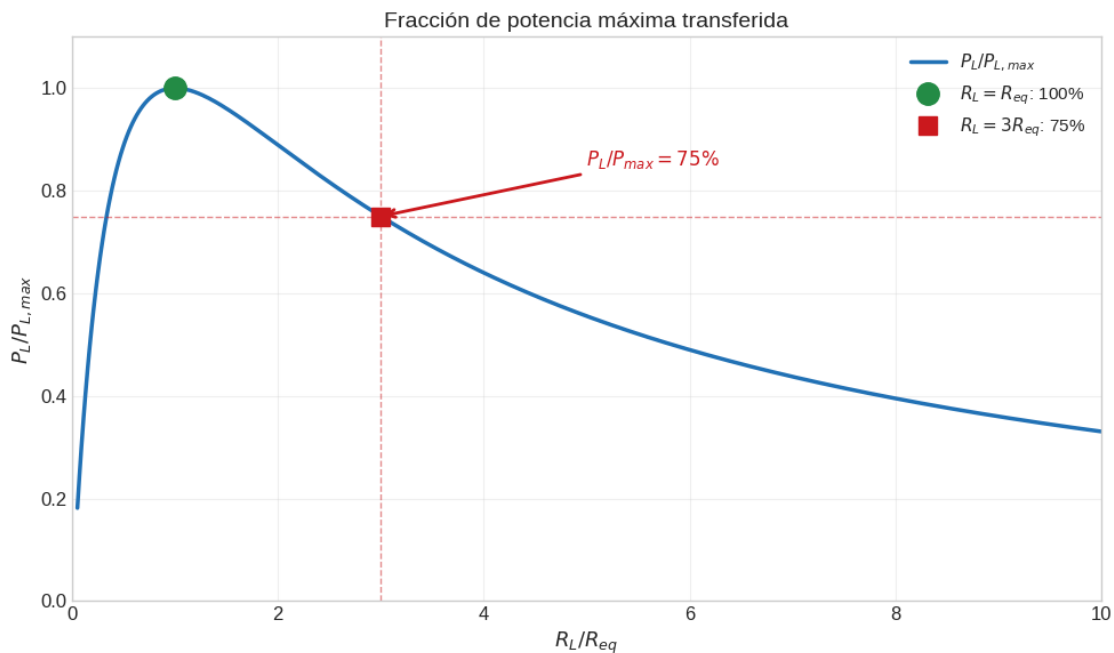
Paso 2: Potencia máxima ($R_L = R_{eq}$):

$$P_{L,\max} = \frac{V_{Th}^2}{4R_{eq}}$$

Paso 3: Razón:

$$\frac{P_L}{P_{L,\max}} = \frac{3/16}{1/4} = \frac{3}{4} = 75\%$$

Con $R_L = 3R_g$ se obtiene el 75 % de la potencia máxima.



1.10.4 9.4 Problema 6: Thévenin con red de resistores

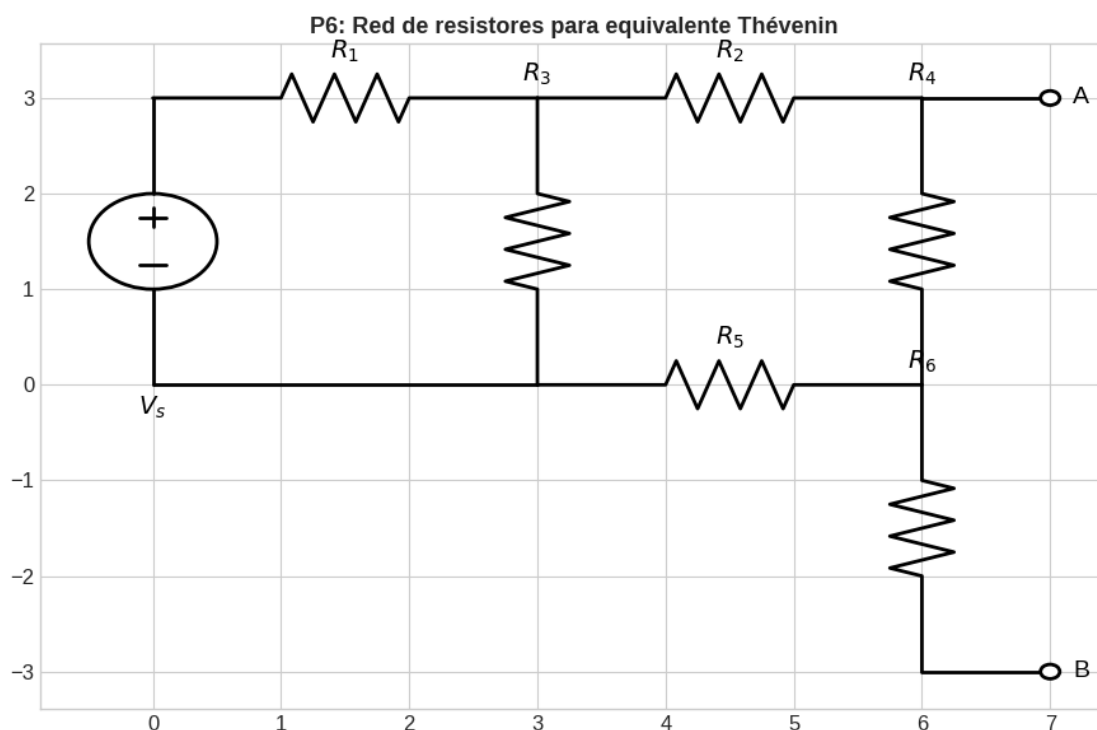
Ejercicio resuelto: Thévenin con 6 resistores (P6) Datos: Red con 6 resistores y una fuente de tensión. Calcular el equivalente de Thévenin visto desde los terminales A-B.

Paso 1: Desconectar la carga de A-B.

Paso 2: Calcular V_{Th} por superposición o mallas/nodos. Aplicar divisores de tensión donde sea posible.

Paso 3: Apagar fuentes independientes y calcular R_{eq} combinando resistencias en serie y paralelo sucesivamente.

Método general para R_{eq} : 1. Cortocircuitar fuentes de tensión 2. Abrir fuentes de corriente 3. Simplificar: buscar resistencias en serie (misma corriente) y en paralelo (misma tensión) 4. Repetir hasta obtener una sola resistencia entre A y B



1.10.5 9.5 Problema 7: Equivalente Norton

Ejercicio resuelto: Norton (P7) Datos: Red con fuente de tensión y resistencias. Calcular el equivalente de Norton.

Paso 1: Cortocircuitar A-B y calcular I_N (corriente que circula por el cortocircuito).

Paso 2: Calcular R_{eq} apagando fuentes independientes (igual que Thévenin).

Paso 3: El equivalente Norton es I_N en paralelo con R_{eq} .

Verificación: $V_{Th} = R_{eq} \cdot I_N$ debe coincidir con la tensión de circuito abierto.

1.10.6 9.6 Problema 11: Thévenin con fuente dependiente

Ejercicio resuelto: Fuente dependiente (P11) Datos: Circuito con fuente dependiente tipo CCVS ($V = r \cdot I_x$). Calcular V_{ca} e I_{cc} .

Paso 1 — Tensión de circuito abierto (V_{ca}):

Con A-B abierto, $I_{AB} = 0$. Resolver el circuito con la fuente dependiente activa. La fuente dependiente **no se apaga**.

Paso 2 — Corriente de cortocircuito (I_{cc}):

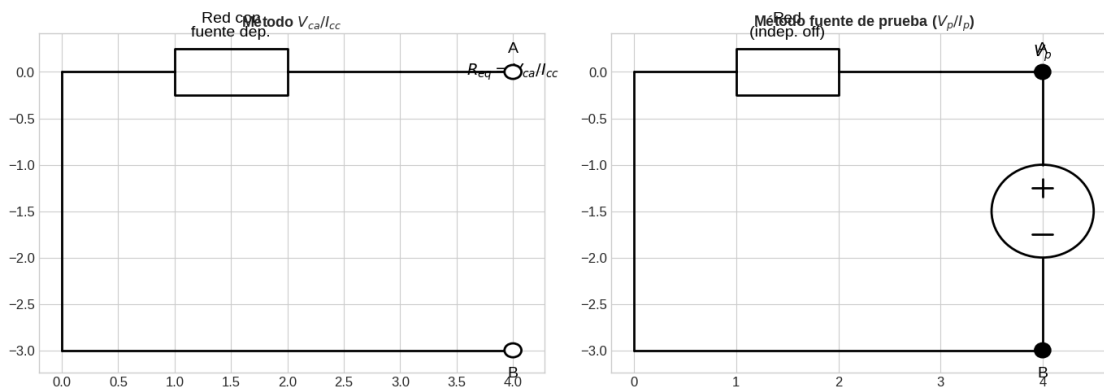
Con A-B en corto, resolver para la corriente que circula por el cortocircuito. La fuente dependiente sigue activa y su valor cambia porque las variables del circuito cambian.

Paso 3 — Resistencia equivalente:

$$R_{eq} = \frac{V_{ca}}{I_{cc}}$$

Alternativa (método de fuente de prueba): 1. Apagar fuentes independientes 2. Conectar fuente de prueba V_p entre A-B 3. Resolver para I_p con la fuente dependiente activa 4. $R_{eq} = V_p/I_p$

Error frecuente: Si se apaga la fuente dependiente, R_{eq} sale incorrecto.



1.11 10. Catálogo completo de ejercicios: todos los patrones

#	Tipo	Componentes	Ecuación clave	Dificultad
1	Thévenin simple (solo resistores + fuente V)	V_s , resistores	V_{Th} = divisor de tensión, R_{eq} = serie/paralelo	

#	Tipo	Componentes	Ecuación clave	Dificultad
2	Norton simple	V_s o I_s , resistores	$I_N = I_{cc}$, R_{eq} ídem	
3	Thévenin con fuente de corriente	I_s , resistores	$V_{Th} = I_s \cdot R$, convertir a Thévenin	
4	Conversión Thévenin Norton	V_{Th} , R_{eq}	$I_N = V_{Th}/R_{eq}$, $V_{Th} = R_{eq} \cdot I_N$	
5	Máxima transferencia de potencia	V_{Th} , R_{eq} , R_L	$R_L = R_{eq}$, $P_{max} = V_{Th}^2/(4R_{eq})$	
6	Rendimiento y potencia	V_{Th} , R_{eq} , R_L	$\eta = R_L/(R_{eq} + R_L)$	
7	Asociación serie de fuentes	Varias $V_{g,k}$, $R_{v,k}$	$V_{eq} = \Sigma V_k$, $R_{eq} = \Sigma R_k$	
8	Asociación paralelo de fuentes	Varias $I_{g,k}$, $R_{p,k}$	$I_{eq} = \Sigma I_k$, $G_{eq} = \Sigma G_k$	
9	Thévenin con fuente dependiente	Fuente dep. + independientes	Fuente de prueba: $R_{eq} = V_p/I_p$	
10	Fracción de potencia máxima	$R_L = n \cdot R_{eq}$	$P/P_{max} = 4n/(1+n)^2$	

1.11.1 10.1 Tipo 1: Thévenin simple (fuente V + resistores)

El caso más básico: una fuente de tensión con resistores. Se calcula V_{Th} por divisor de tensión y R_{eq} por combinación serie/paralelo.

$$\boxed{V_{Th} = V_s \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}} \quad \boxed{R_{eq} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}}$$

Cómo afectan los componentes: - Si R_1 **aumenta** $\rightarrow V_{Th}$ disminuye $\rightarrow$ cae más tensión en R_1
- Si R_2 **aumenta** $\rightarrow V_{Th}$ aumenta $\rightarrow$ se acerca a V_s - R_{eq} siempre es menor que el menor de R_1 , R_2

Ejercicio resuelto: Divisor de tensión Datos: $V_s = 20$ V, $R_1 = 10$ Ω , $R_2 = 40$ Ω .

Paso 1: Tensión de circuito abierto (divisor):

$$V_{Th} = 20 \cdot \frac{40}{10 + 40} = 20 \cdot 0.8 = 16 \text{ V}$$

Paso 2: Resistencia equivalente ($V_s \rightarrow$ cortocircuito, $R_1 \parallel R_2$):

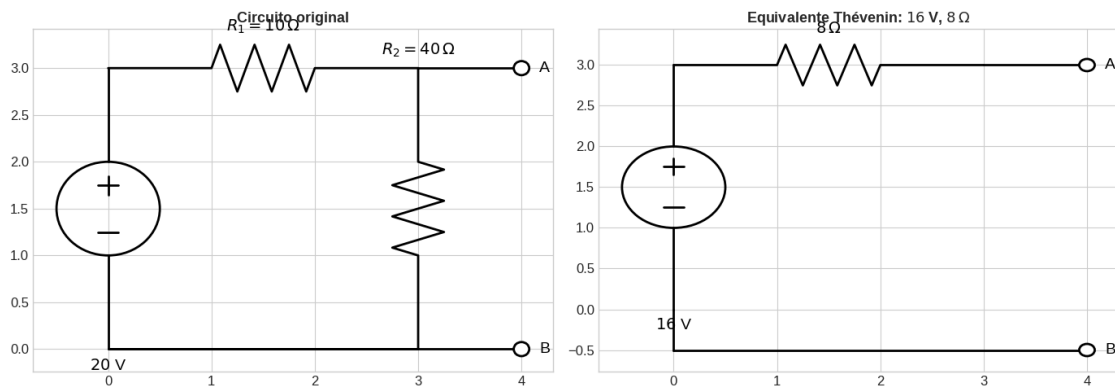
$$R_{eq} = \frac{10 \times 40}{10 + 40} = \frac{400}{50} = 8 \Omega$$

$$V_{Th} = 16 \text{ V}, \quad R_{eq} = 8 \Omega$$

```
/home/danielmf31/Documentos/Documentos_Trabajo/Ingenieria/Programacion/VSCoDe/Pr
oyectos_personales/Ciencia_Datos/.venv/lib/python3.12/site-
packages/schemdraw/elements/elements.py:185: UserWarning: Duplicate `at`
parameter in element: `Point(3.0,3.0)` changed to
`Point(0.0,3.673940397442059e-16)`.
```

```
warnings.warn("Duplicate `at` parameter in element: "
/home/danielmf31/Documentos/Documentos_Trabajo/Ingenieria/Programacion/VSCoDe/Pr
oyectos_personales/Ciencia_Datos/.venv/lib/python3.12/site-
packages/schemdraw/elements/elements.py:863: UserWarning: Duplicated direction
parameter in element. `down` changed to `right`.
```

```
warnings.warn(f"Duplicated direction parameter in element.
`{self._userparams['d']}` changed to `right`.")
```



1.11.2 10.2 Tipo 2: Norton simple

Se obtiene el equivalente Norton directamente o convirtiendo desde Thévenin.

$$I_N = \frac{V_{Th}}{R_{eq}} \quad R_{eq} = (\text{misma que Thévenin})$$

Ejercicio resuelto: Norton a partir de Thévenin Datos: $V_{Th} = 16 \text{ V}$, $R_{eq} = 8 \Omega$ (del ejercicio anterior).

$$I_N = \frac{V_{Th}}{R_{eq}} = \frac{16}{8} = 2 \text{ A}$$

$$\boxed{I_N = 2 \text{ A}, \quad R_{eq} = 8 \Omega}$$

1.11.3 10.3 Tipo 3: Thévenin con fuente de corriente

Cuando la red contiene fuentes de corriente, se aplica el mismo procedimiento pero la fuente de corriente se **abre** al calcular R_{eq} .

$$\boxed{V_{Th} = I_s \cdot R \quad (\text{si la corriente pasa íntegra por } R)}$$

Ejercicio resuelto: Red con fuente de corriente Datos: $I_s = 3 \text{ A}$, $R_1 = 6 \Omega$ (en paralelo con I_s), $R_2 = 4 \Omega$ (en serie con el paralelo).

Paso 1: V_{Th} (circuito abierto): Toda la corriente I_s pasa por R_1 (A-B abierto, no hay camino por R_2):

$$V_{Th} = I_s \cdot R_1 + 0 = 3 \times 6 = 18 \text{ V}$$

Paso 2: R_{eq} : I_s se abre. Queda R_1 en serie con R_2 :

$$R_{eq} = R_1 + R_2 = 6 + 4 = 10 \Omega$$

$$\boxed{V_{Th} = 18 \text{ V}, \quad R_{eq} = 10 \Omega}$$

1.11.4 10.4 Tipo 4: Conversión Thévenin Norton

$$\boxed{\text{Th} \rightarrow \text{N}: \quad I_N = \frac{V_{Th}}{R_{eq}}, \quad R_N = R_{eq}}$$

$$\boxed{\text{N} \rightarrow \text{Th}: \quad V_{Th} = R_{eq} \cdot I_N, \quad R_{Th} = R_{eq}}$$

Ejercicio resuelto: Doble conversión Datos: Norton con $I_N = 5 \text{ A}$, $R_{eq} = 20 \Omega$.

Th: $V_{Th} = 20 \times 5 = 100 \text{ V}$, $R_{Th} = 20 \Omega$.

Verificación (vuelta a Norton): $I_N = 100/20 = 5 \text{ A} \checkmark$

1.11.5 10.5 Tipo 5: Máxima transferencia de potencia

$$\boxed{R_L = R_{eq}} \quad \boxed{P_{L,\max} = \frac{V_{Th}^2}{4R_{eq}}}$$

Cómo afectan los parámetros: - Si V_{Th} **aumenta** $\rightarrow P_{max}$ aumenta cuadráticamente - Si R_{eq} **aumenta** $\rightarrow P_{max}$ disminuye $\rightarrow$ fuente menos “potente”

Ejercicio resuelto: Máxima potencia Datos: $V_{Th} = 24$ V, $R_{eq} = 6 \Omega$.

$$R_L = R_{eq} = 6 \Omega$$

$$P_{L,\max} = \frac{24^2}{4 \times 6} = \frac{576}{24} = 24 \text{ W}$$

$$\boxed{P_{L,\max} = 24 \text{ W con } R_L = 6 \Omega}$$

1.11.6 10.6 Tipo 6: Rendimiento y potencia

$$\boxed{\eta = \frac{P_L}{P_{total}} = \frac{R_L}{R_{eq} + R_L}}$$

Nota: Máxima potencia ($R_L = R_{eq}$) da $\eta = 50\%$. Para η mayor se necesita $R_L \gg R_{eq}$, pero la potencia absoluta baja.

Ejercicio resuelto: Rendimiento del 80 % Datos: $V_{Th} = 50$ V, $R_{eq} = 10 \Omega$. ¿Qué R_L da $\eta = 80\%$?

$$\eta = \frac{R_L}{R_{eq} + R_L} = 0.8 \implies R_L = 0.8(10 + R_L) \implies 0.2R_L = 8$$

$$\boxed{R_L = 40 \Omega}$$

Verificación: $I = 50/(10 + 40) = 1$ A, $P_L = 40 \times 1 = 40$ W, $P_{total} = 50$ W, $\eta = 40/50 = 80\%$ ✓

1.11.7 10.7 Tipo 7: Asociación serie de fuentes

$$\boxed{V_{eq} = V_{g1} + V_{g2} + \dots} \quad \boxed{R_{eq} = R_{v1} + R_{v2} + \dots}$$

(Con signos: sumar si el sentido de la fuente coincide, restar si es opuesto.)

Ejercicio resuelto: Dos pilas en serie Datos: Pila 1: $V_{g1} = 1.5 \text{ V}$, $R_{v1} = 0.5 \Omega$. Pila 2: $V_{g2} = 1.5 \text{ V}$, $R_{v2} = 0.3 \Omega$. Misma polaridad.

$$V_{eq} = 1.5 + 1.5 = 3 \text{ V}$$

$$R_{eq} = 0.5 + 0.3 = 0.8 \Omega$$

$$\boxed{V_{eq} = 3 \text{ V}, \quad R_{eq} = 0.8 \Omega}$$

1.11.8 10.8 Tipo 8: Asociación paralelo de fuentes

$$\boxed{I_{eq} = I_{g1} + I_{g2} + \dots}$$

$$\boxed{G_{eq} = G_{p1} + G_{p2} + \dots}$$

Ejercicio resuelto: Dos fuentes de corriente en paralelo Datos: $I_{g1} = 2 \text{ A}$, $R_{p1} = 12 \Omega$. $I_{g2} = 3 \text{ A}$, $R_{p2} = 6 \Omega$.

$$I_{eq} = 2 + 3 = 5 \text{ A}$$

$$G_{eq} = \frac{1}{12} + \frac{1}{6} = \frac{1}{12} + \frac{2}{12} = \frac{3}{12} = 0.25 \text{ S}$$

$$R_{eq} = \frac{1}{G_{eq}} = \frac{1}{0.25} = 4 \Omega$$

$$\boxed{I_{eq} = 5 \text{ A}, \quad R_{eq} = 4 \Omega}$$

Thévenin equivalente: $V_{Th} = R_{eq} \cdot I_{eq} = 4 \times 5 = 20 \text{ V}$

1.11.9 10.9 Tipo 9: Thévenin con fuente dependiente

Método obligatorio: fuente de prueba (las fuentes dependientes NO se apagan).

$$\boxed{R_{eq} = \frac{V_p}{I_p}} \quad (\text{con fuentes independientes apagadas})$$

Cómo afecta la fuente dependiente: - Una fuente dependiente puede hacer que R_{eq} sea **mayor** o **menor** que la combinación de resistores pasivos - En casos extremos, R_{eq} puede ser incluso **negativa** (circuitos con ganancia)

Ejercicio resuelto: CCVS con fuente de prueba Datos: $R = 10 \Omega$, fuente dependiente $V_d = 5I_x$ (CCVS, $r = 5 \Omega$), donde I_x es la corriente por R .

Paso 1: Apagar fuentes independientes. Conectar V_p entre A-B.

Paso 2: Por KVL: $V_p = R \cdot I_p + V_d = R \cdot I_p + r \cdot I_x$.

Si $I_x = I_p$ (en serie): $V_p = (R + r) \cdot I_p = (10 + 5) \cdot I_p = 15I_p$

$$R_{eq} = \frac{V_p}{I_p} = 15 \Omega$$

Sin la fuente dependiente sería $R_{eq} = 10 \Omega$. La CCVS **suma** su resistencia equivalente r .

1.11.10 10.10 Tipo 10: Fracción de potencia máxima

Cuando $R_L = n \cdot R_{eq}$:

$$\frac{P_L}{P_{L,\max}} = \frac{4n}{(1+n)^2}$$

R_L/R_{eq}	$P_L/P_{L,\max}$
0.5	88.9 %
1.0	100 %
2.0	88.9 %
3.0	75.0 %
5.0	55.6 %
10.0	33.1 %

Observación: La curva es simétrica en escala logarítmica respecto a $R_L = R_{eq}$.

Ejercicio resuelto: ¿Qué R_L da el 90 % de P_{max} ?

$$\frac{4n}{(1+n)^2} = 0.9 \implies 4n = 0.9(1+n)^2 = 0.9 + 1.8n + 0.9n^2$$

$$0.9n^2 - 2.2n + 0.9 = 0 \implies n = \frac{2.2 \pm \sqrt{4.84 - 3.24}}{1.8} = \frac{2.2 \pm 1.265}{1.8}$$

$$n_1 \approx 0.52 \quad \text{o} \quad n_2 \approx 1.92$$

Hay dos valores de R_L (uno menor y otro mayor que R_{eq}) que dan el mismo porcentaje.

1.12 11. Resumen y tabla de fórmulas clave

Fórmula	Uso
$U = U_g - R_v \cdot I$	Fuente real de tensión (Thévenin)
$I = I_g - U/R_p$	Fuente real de corriente (Norton)
$U_g = R_g \cdot I_g$	Conversión Thévenin Norton
$V_{Th} = V_{AB,c.a.}$	Tensión de circuito abierto
$I_N = I_{AB,c.c.}$	Corriente de cortocircuito
$R_{eq} = R_{AB, \text{fuentes off}}$	Resistencia equivalente (fuentes independientes)
$R_{eq} = V_p/I_p$	Resistencia equivalente (fuentes dependientes)
$V_{Th} = R_{eq} \cdot I_N$	Relación Thévenin-Norton
$R_L = R_{eq} \implies P_{max}$	Condición de máxima transferencia de potencia
$P_{L,max} = V_{Th}^2/(4R_{eq})$	Potencia máxima en la carga
$\eta = R_L/(R_{eq} + R_L)$	Rendimiento
$P_L/P_{max} = 4n/(1+n)^2$	Fracción de potencia máxima ($n = R_L/R_{eq}$)

1.12.1 Reglas para desactivar fuentes

Tipo de fuente	Para calcular R_{eq}
Fuente de tensión independiente	Cortocircuito (cable)
Fuente de corriente independiente	Circuito abierto (eliminar)
Fuente dependiente (cualquier tipo)	NO se apaga $\rightarrow$ fuente de prueba

1.12.2 Tipos de fuentes dependientes

Tipo	Control	Salida	Parámetro
VCVS	Tensión	Tensión	μ (adimensional)
VCCS	Tensión	Corriente	g (S)
CCVS	Corriente	Tensión	r (Ω)
CCCS	Corriente	Corriente	α (adimensional)