

Clase 5 – TIM 71

Máquinas eléctricas

Tecnólogo Industrial Mecánico

17 de marzo de 2025

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = \hat{H} \psi$$

$$\phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

$$E = mc^2$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

$$\frac{df}{dt}$$

Plan de clase

1. Aplicaciones de los transformadores
2. Transformador ideal

Tema 2: Transformadores

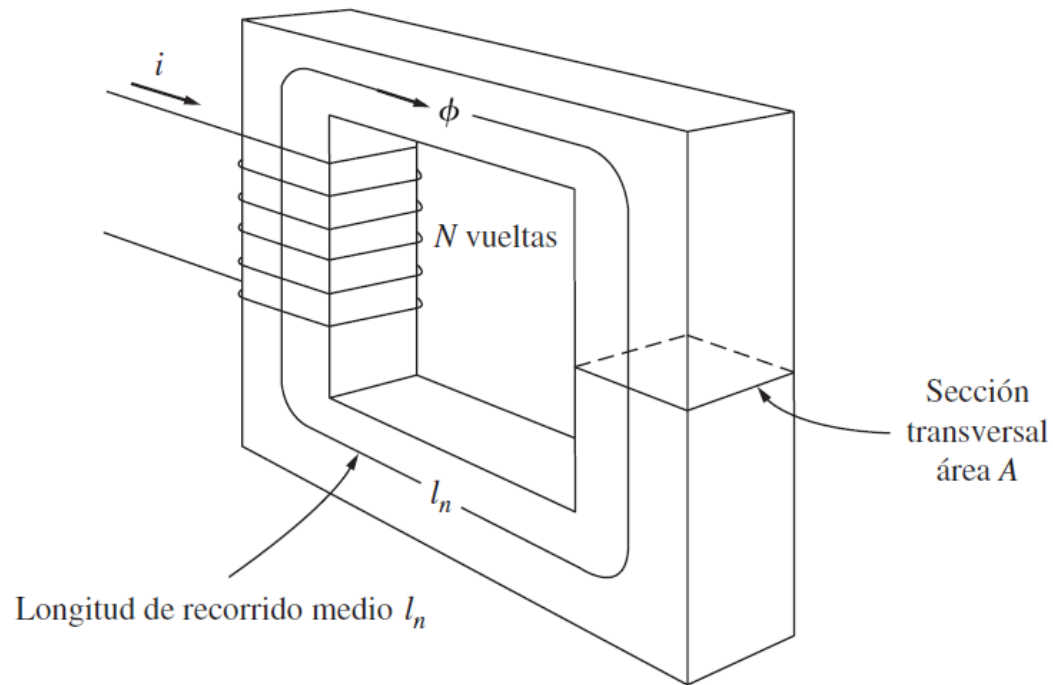
- **Objetivo general:**

- Comprender el funcionamiento, modelado y aplicaciones de los transformadores en sistemas de potencia. Y aplicaciones industriales

- **Temario:**

1. Aplicaciones de los transformadores
2. Propósito del transformador en sistemas de potencia.
3. Relaciones en un transformador ideal.
4. Transformadores reales vs. ideales.
5. Modelado de pérdidas y efectos no ideales.
6. Circuito equivalente del transformador.
7. Pérdidas y eficiencia.
8. Deducción del circuito equivalente a partir de mediciones.
9. Sistema de mediciones por unidad.
10. Regulación de voltaje.
11. Autotransformadores.
12. Transformadores trifásicos.
13. Capacidades nominales.
14. Principios constructivos de los trafos. de potencia

Recapitulando (clase 2):



Ley de Ohm Magnética

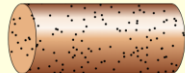
- **Formulación:**

$$\mathcal{F} = \Phi \cdot \mathcal{R}$$

- **Interpretación:** La fuerza magnetomotriz ($\mathcal{F}$) es igual al flujo magnético (Φ) multiplicado por la reluctancia ($\mathcal{R}$).

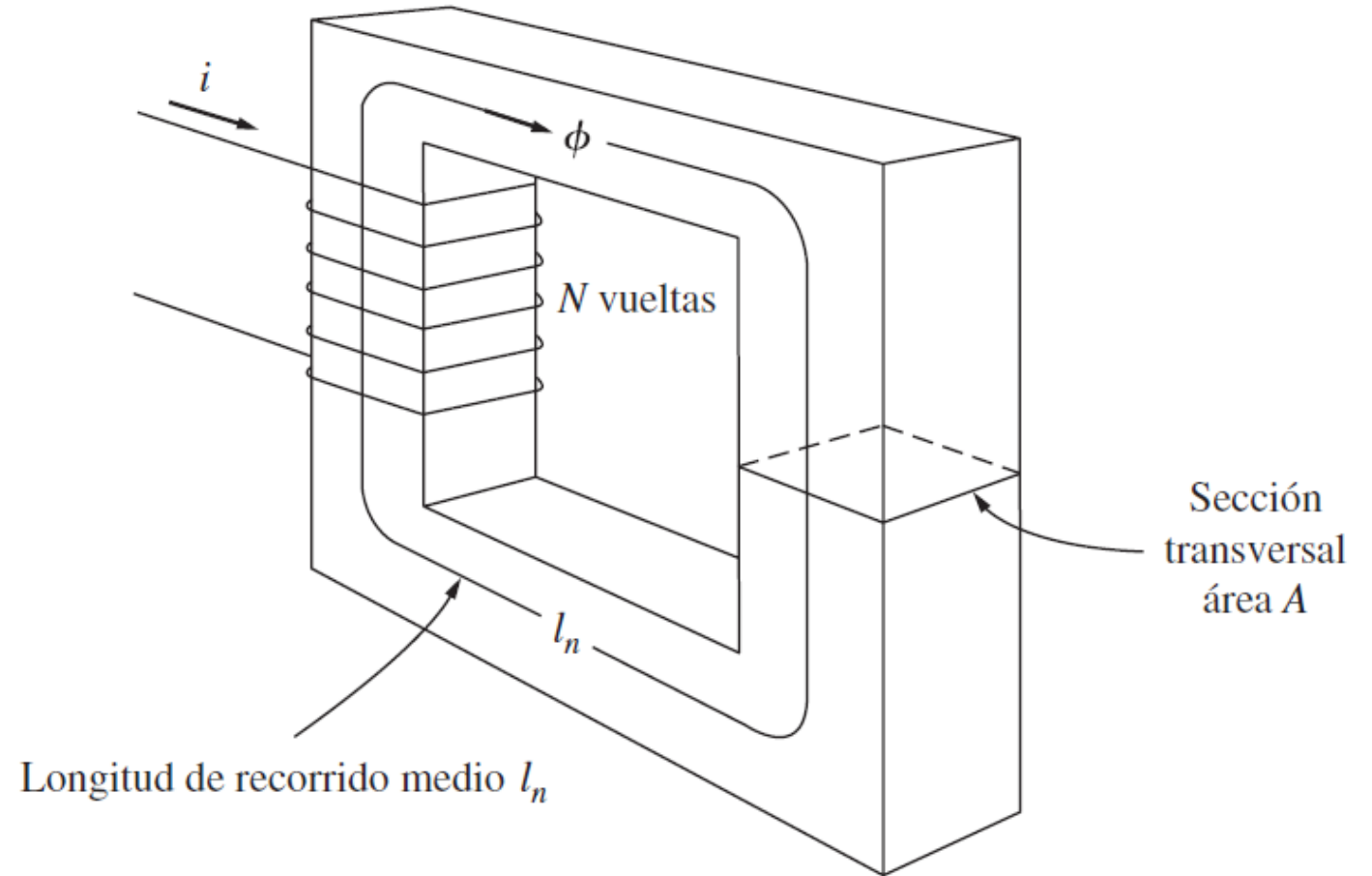
- **Analogía con circuitos eléctricos:**

Circuito Eléctrico	Circuito Magnético
Voltaje (V)	Fuerza magnetomotriz ($\mathcal{F} = NI$)
Corriente (I)	Flujo magnético ($\Phi = B \cdot A$)
Resistencia ($R = \frac{\rho L}{A}$)	Reluctancia ($\mathcal{R} = \frac{L}{\mu A}$)
Ley de Ohm ($V = IR$)	Ley de Ohm Magnética ($\mathcal{F} = \Phi \mathcal{R}$)

$$R = \frac{\rho L}{A}$$


[Simulación R cable](#)

Núcleo magnético sencillo:



Recapitulando (clase 4):

1. Ley de Faraday

- **Enunciado:**

$$e_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

- e_{ind} : Voltaje inducido en una espira.
- Φ : Flujo magnético que atraviesa la espira.

- **Para una bobina de N vueltas:**

$$e_{\text{ind}} = -N\frac{d\Phi}{dt}$$

- N : Número de vueltas.

- **Ley de Lenz:**

- El voltaje inducido se opone al cambio en el flujo magnético.
- **Ejemplo:** Si Φ aumenta, e_{ind} genera un flujo opuesto.

Recursos: Ley de Faraday

Demostración experimental ([Ley de Faraday](#))

Simulación 1: [Ley de Faraday](#)

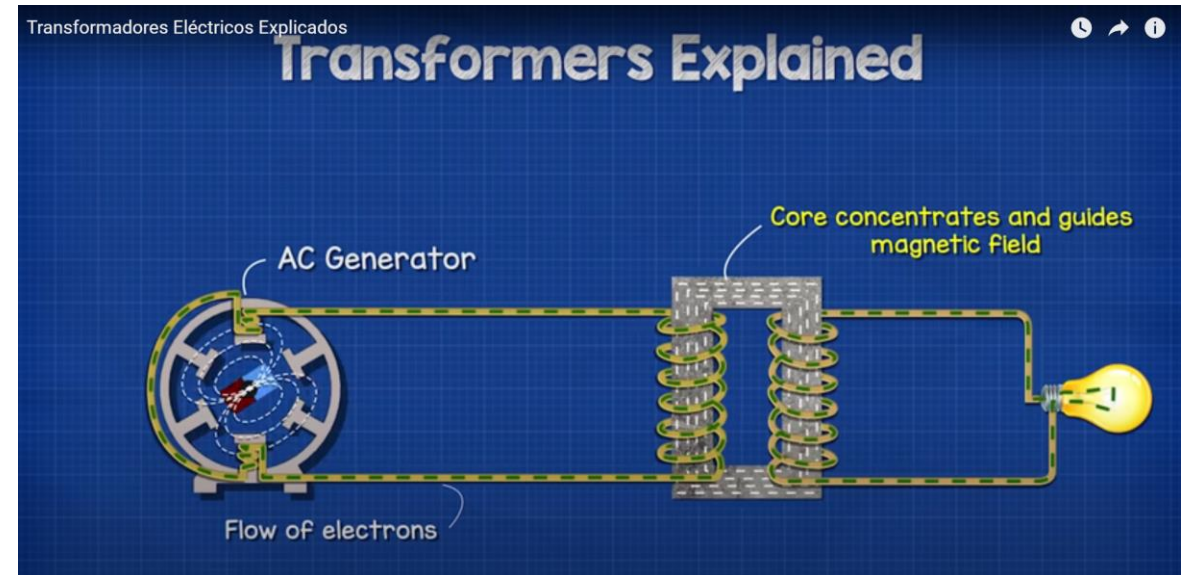
Simulación 2: [Ley de Faraday](#) (2 bobinas acopladas)

Aquí se ilustra el principio físico de un transformador

Faraday's first transformer - IGCSE Physics ([link](#))

*Transformadores Eléctricos
Explicados ([link](#))*

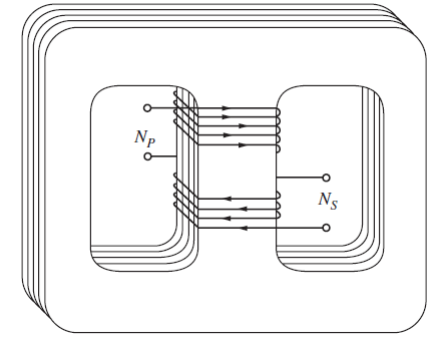
Trafos: Video Introductorio



Introducción a los Transformadores

¿Qué es un transformador?

- Dispositivo que cambia la potencia eléctrica alterna de un nivel de voltaje a otro mediante un campo magnético.



- **Componentes principales:**

- **Devanados:** Bobinas de alambre conductor (primario, secundario y, en algunos casos, terciario).
- **Núcleo:** Material ferromagnético que confina el flujo magnético.

- **Funcionamiento básico:**

- El devanado primario se conecta a una fuente de energía eléctrica alterna.
- El devanado secundario suministra energía a las cargas.
- El flujo magnético común en el núcleo acopla los devanados sin conexión eléctrica directa.

Aplicaciones Globales

- **Electrónica:**
 - Fuentes de alimentación (cargadores, adaptadores).
 - Aislamiento galvánico en circuitos integrados.
- **Medicina:**
 - Equipos de resonancia magnética (MRI).
 - Desfibriladores y monitores cardíacos.
- **Física Experimental:**
 - Transformadores de alta frecuencia en aceleradores de partículas.
 - Sistemas de alimentación para experimentos de plasma.

- **Telecomunicaciones:**

- Transformadores de impedancia en antenas y líneas de transmisión.
- Fuentes de poder para estaciones base.

- **Dispositivos Cotidianos:**

- Electrodomésticos (microondas, refrigeradores).
- Sistemas de iluminación LED.

* Lista ilustrativa (tienen más aplicaciones!)

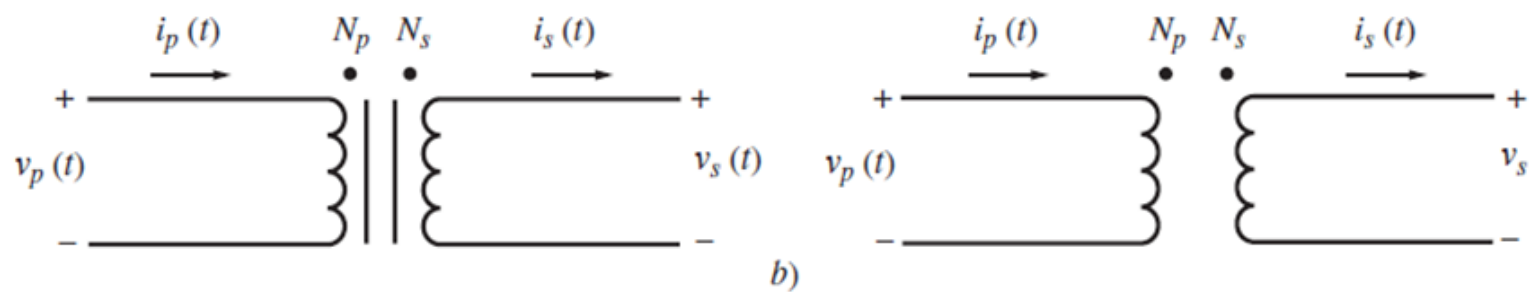
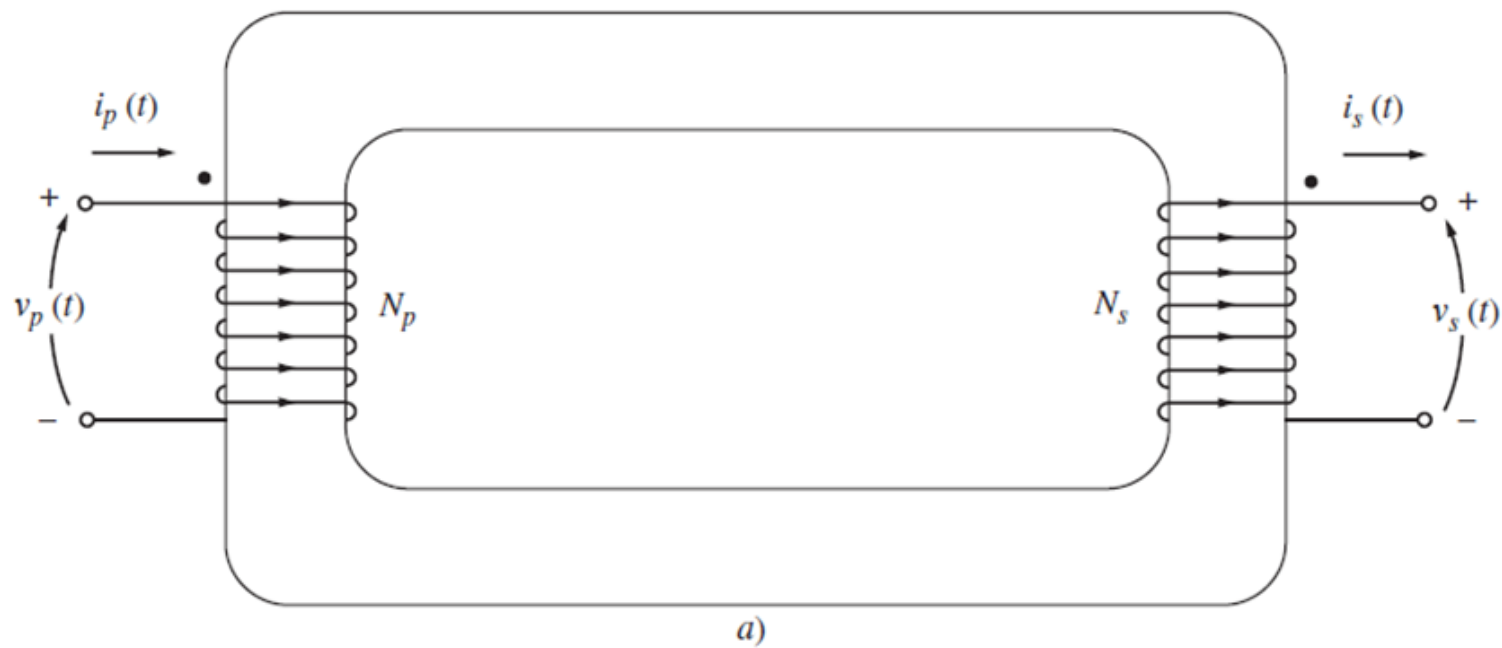
Sistemas Eléctricos e Industriales

- **Redes de potencia:**
 - Subestaciones de transmisión (ej: 220 kV a 24 kV).
 - Transformadores de distribución en zonas urbanas.
- **Industria pesada:**
 - Maquinaria de alta tensión (hornos eléctricos, motores industriales).
 - Transformadores de aislamiento para seguridad en plantas.
- **Sistemas de Medida:**
 - **Transformadores de corriente (TC):** Reducen corrientes altas para medición y protección.
 - **Transformadores de voltaje (TV):** Reducen voltajes altos para instrumentación y control.
- **Autotransformadores:**
 - Usados en ajustes de voltaje en sistemas de potencia y equipos industriales.
 - Ventaja: Menor tamaño y costo comparado con transformadores convencionales.

Transformador Ideal

Supuestos Fundamentales

1. **Núcleo ideal:** Permeabilidad infinita ($\mu \rightarrow \infty$), sin pérdidas.
2. **Devanados ideales:**
 - Resistencia $R_p = R_s = 0$.
 - Flujo magnético confinado ($\Phi_p = \Phi_s$).



a) Dibujo de un transformador ideal. b) Símbolos esquemáticos de un transformador.
A veces el núcleo de hierro se muestra en el símbolo y a veces no.

- **Relación de voltajes:**

$$\frac{v_P(t)}{v_S(t)} = \frac{N_P}{N_S} = a$$



$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S} = a \quad (\text{Relación de transformación})$$

- **Relación de corrientes:**

$$N_P i_P(t) = N_S i_S(t)$$



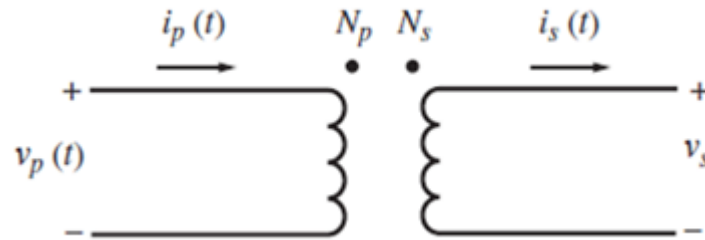
$$\frac{i_P(t)}{i_S(t)} = \frac{1}{a}$$



$$\frac{I_P}{I_S} = \frac{1}{a}$$

Convención de puntos

- **1.** Si el *voltaje* primario es positivo en el extremo del devanado marcado con punto con respecto al extremo que no tiene marca, entonces el voltaje secundario también es positivo en el extremo marcado con punto.
- **2.** Si la *corriente* primaria del transformador fluye *hacia dentro* en el extremo marcado con punto del devanado primario, la corriente secundaria fluye *hacia fuera* en el extremo marcado con punto del devanado secundario.



En clases siguientes veremos el significado físico de dicha convención.

Potencia en el transformador ideal

La potencia P_{entr} que el circuito primario suministra al transformador está dada por la ecuación

$$P_{\text{entr}} = V_P I_P \cos \theta_P$$

donde θ_P es el ángulo entre el voltaje primario y la corriente primaria. La potencia P_{sal} que el circuito secundario del transformador suministra a la carga está dada por la ecuación

$$P_{\text{sal}} = V_S I_S \cos \theta_S$$

También

$$Q_{\text{entr}} = V_P I_P \sin \theta = V_S I_S \sin \theta = Q_{\text{sal}}$$

$$S_{\text{entr}} = V_P I_P = V_S I_S = S_{\text{sal}}$$

$$\overline{S}_{\text{entr}} = \overline{V}_P \overline{I}_P^* = \overline{V}_S \overline{I}_S^* = \overline{S}_{\text{sal}}$$

Transformación de impedancia a través de un transformador

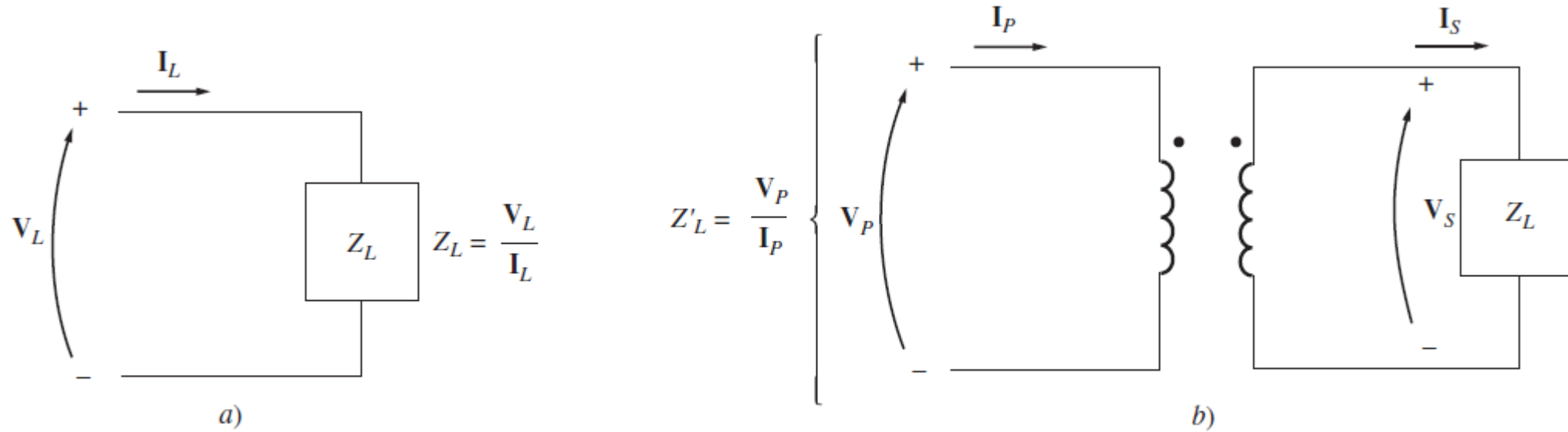


FIGURA 2-5 a) Definición de impedancia. b) La impedancia a través de un transformador.

$$Z'_L = \frac{V_P}{I_P} = \frac{aV_S}{I_S/a} = a^2 \frac{V_S}{I_S}$$

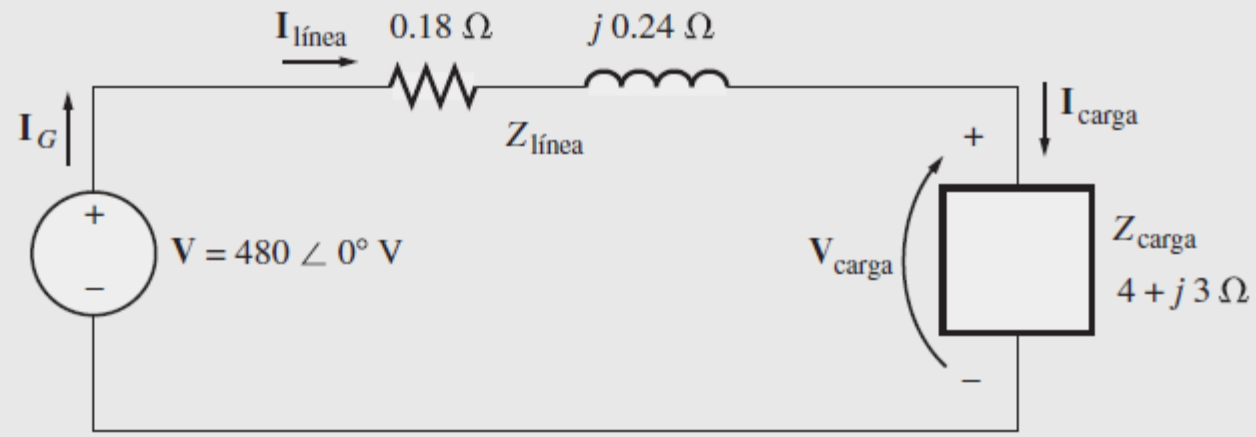
$$Z'_L = a^2 Z_L$$

Análisis de circuitos que contienen transformadores ideales

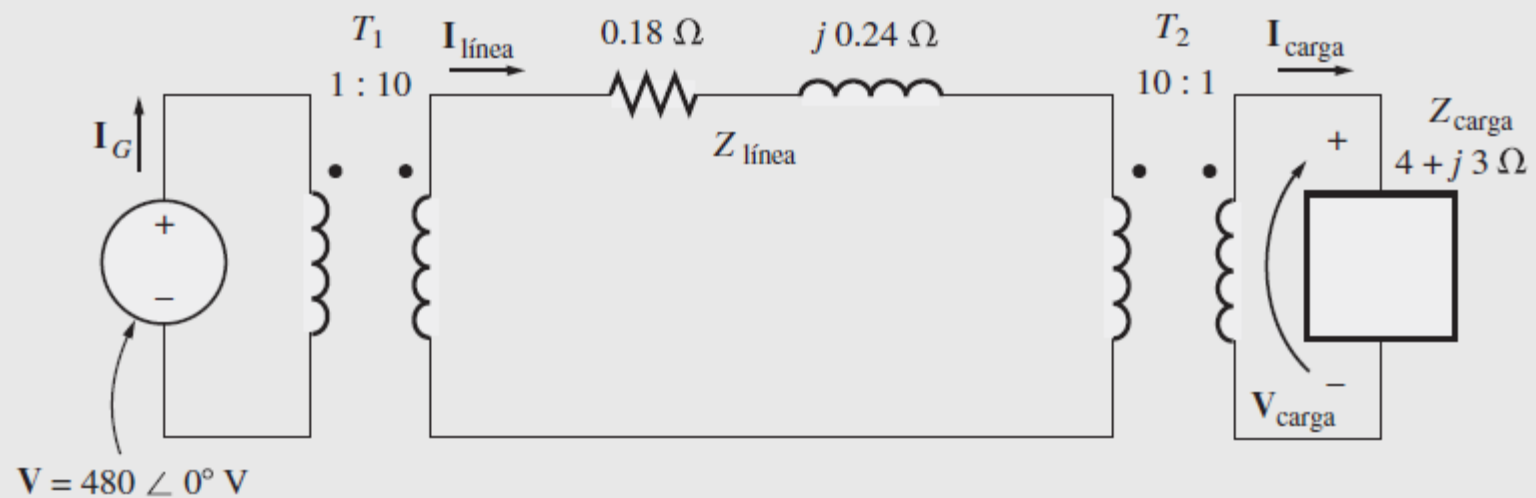
EJEMPLO 2-1

Un sistema de potencia monofásico consta de un generador de 480 V y 60 Hz que suministra potencia a una carga $Z_{\text{carga}} = 4 + j3 \, \Omega$ a través de una línea de transmisión de impedancia $Z_{\text{línea}} = 0.18 + j0.24 \, \Omega$. Conteste las siguientes preguntas sobre el sistema.

- a) Si el sistema de potencia es exactamente como se describe en la figura 2-6a), ¿cuál será el voltaje en la carga? ¿Cuáles serán las pérdidas en la línea de transmisión?
- b) Suponga que un transformador elevador 1:10 se coloca en el extremo del generador de la línea de transmisión y que un transformador reductor 10:1 se coloca en el extremo de carga de la línea de transmisión (figura 2-6b). ¿Cuál será ahora el voltaje de la carga? ¿Cuáles serán las pérdidas en la línea de transmisión?



a)



b)

FIGURA 2-6 El sistema de potencia del ejemplo 2-1 a) sin transformador y b) con un transformador en los extremos de la línea de transmisión.

Solución

- a) La figura 2-6a) muestra un sistema de potencia sin transformadores. Aquí $I_G = I_{\text{línea}} = I_{\text{carga}}$. La corriente de la línea en este sistema está dada por

$$\begin{aligned} I_{\text{línea}} &= \frac{V}{Z_{\text{línea}} + Z_{\text{carga}}} \\ &= \frac{480 \angle 0^\circ \text{ V}}{(0.18 \, \Omega + j0.24 \, \Omega) + (4 \, \Omega + j3 \, \Omega)} \\ &= \frac{480 \angle 0^\circ}{4.18 + j3.24} = \frac{480 \angle 0^\circ}{5.29 \angle 37.8^\circ} \\ &= 90.8 \angle -37.8^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

Por lo tanto, el voltaje en la carga es

$$\begin{aligned} V_{\text{carga}} &= I_{\text{línea}} Z_{\text{carga}} \\ &= (90.8 \angle -37.8^\circ \text{ A})(4 \, \Omega + j3 \, \Omega) \\ &= (90.8 \angle -37.8^\circ \text{ A})(5 \angle 36.9^\circ \, \Omega) \\ &= 454 \angle -0.9^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

y las pérdidas en la línea son

$$\begin{aligned} P_{\text{pérdida}} &= (I_{\text{línea}})^2 R_{\text{línea}} \\ &= (90.8 \text{ A})^2 (0.18 \, \Omega) = 1\,484 \text{ W} \end{aligned}$$

b) La figura 2-6b) muestra un sistema de potencia con los transformadores. Para analizar este sistema se requiere convertirlo a un nivel de voltaje en común. Esto se logra en dos pasos:

1. Eliminar el transformador T_2 refiriendo la carga al nivel de voltaje de la línea de transmisión.
2. Eliminar el transformador T_1 refiriendo los elementos de la línea de transmisión y la carga equivalente al voltaje de la línea de transmisión del lado de la fuente.

El valor de la impedancia de la carga cuando se refleja en el sistema de transmisión del voltaje es

$$\begin{aligned} Z'_{\text{carga}} &= a^2 Z_{\text{carga}} \\ &= \left(\frac{10}{1}\right)^2 (4 \Omega + j3 \Omega) \\ &= 400 \Omega + j300 \Omega \end{aligned}$$

La impedancia total en el nivel de la línea de transmisión ahora es

$$\begin{aligned} Z_{\text{eq}} &= Z_{\text{línea}} + Z'_{\text{carga}} \\ &= 400.18 + j300.24 \Omega = 500.3 \angle 36.88^\circ \Omega \end{aligned}$$

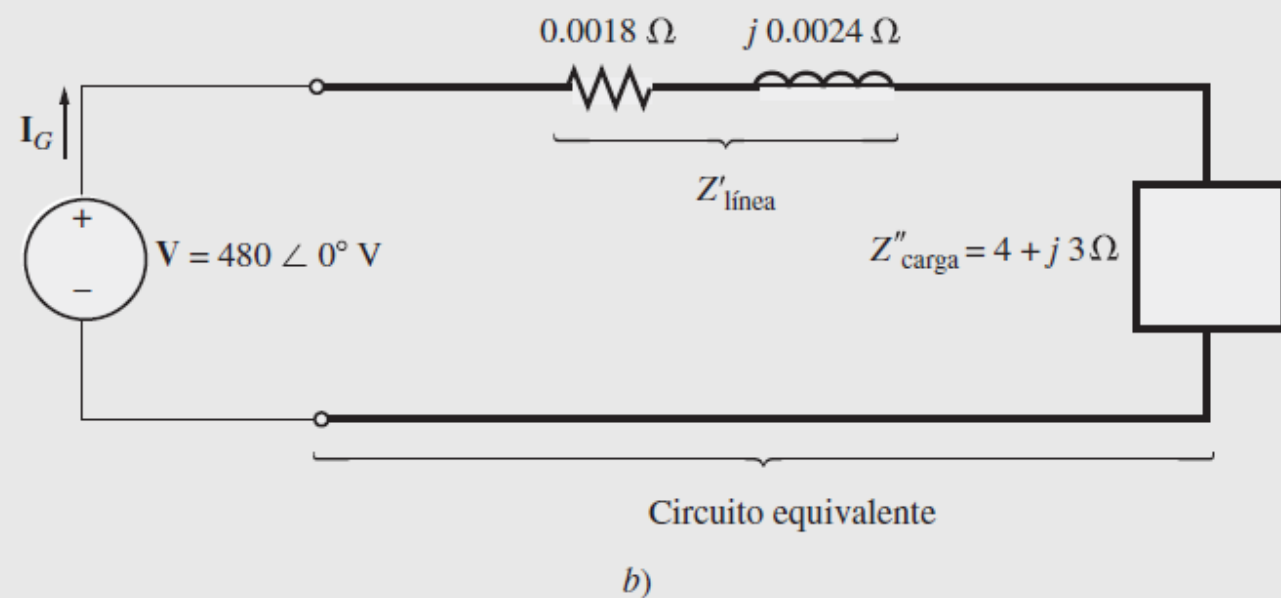
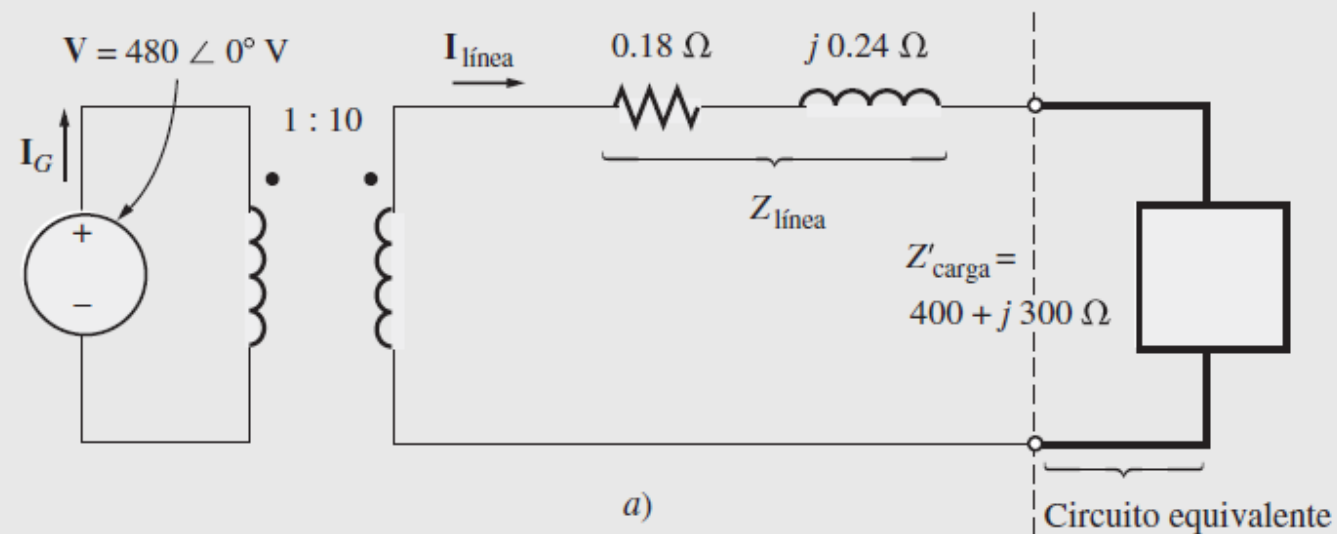


FIGURA 2-7 a) Sistema con la carga referida al nivel de voltaje del sistema de transmisión. b) Sistema con la carga y la línea de transmisión referidas al nivel de voltaje del generador.