

## EL TEOREMA DE POYNTING Y EL PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA EN LA ENSEÑANZA DEL ELECTROMAGNETISMO

Fernández Patricia, Tabares Ignacio, Jardon Alberto

Taller de Investigación en Didáctica de la Ciencia y la Tecnología. Departamento de Física y Química. EFB. FCEIA. UNR.  
patricia@fceia.unr.edu.ar, itabares@fceia.unr.edu.ar, ajardon@fceia.unr.edu.ar

La energía y su principio de conservación es un concepto articulador en la física, y está presente en la enseñanza de todas sus áreas, pero mientras en algunas, como mecánica o termodinámica, se presenta de modo integrado, en electromagnetismo su presentación es fragmentada e incompleta. En este trabajo proponemos una secuencia didáctica para el nivel universitario básico, que rescata el teorema de Poynting como expresión del principio de conservación de la energía en el electromagnetismo para dar cuenta de los procesos energéticos que involucran tanto circuitos eléctricos como interacciones entre campos eléctricos y magnéticos. Esta secuencia responde al reclamo de numerosos autores que señalan la ausencia de la discusión de la interacción entre los campos electromagnéticos en circuitos eléctricos y de los procesos de transferencia de energía entre fuente y dispositivos.

La energía en electromagnetismo: presentación tradicional

Electrostática	- energía potencial eléctrica - energía almacenada en capacitores
Magnetismo	- ley de Faraday Lenz y fem - energía almacenada en inductores
Circuitos	- ley de Kirchoff y ley de Joule - circuitos LC, y RLC - potencia en corriente alterna
Ondas E.M.	- intensidad de la onda - definición del vector de Poynting para las ondas electromagnéticas

En el caso de la enseñanza del electromagnetismo, si bien el análisis de la energía no está ausente, no se establecen vínculos explícitos entre las diferentes instancias de presentación y el enfoque resulta fragmentado, incompleto, e incluso, a veces incorrecto. A diferencia de la mecánica y la termodinámica, no hay una discusión integral de los intercambios energéticos entre el sistema y su medio.

En la enseñanza tradicional del electromagnetismo no se presenta el *Teorema de Poynting* sino sólo el *vector de Poynting* al final del cursado, descontextualizado de los circuitos y reducido a la explicación de la propagación de energía en las ondas electromagnéticas. Proponemos una presentación más temprana del *teorema de Poynting* a partir de la discusión del principio de conservación de la energía, para dar cuenta de la totalidad de los intercambios energéticos vinculados al electromagnetismo, destacando que los campos eléctricos y magnéticos almacenan energía y que ambos campos en interacción son responsables de su transmisión.

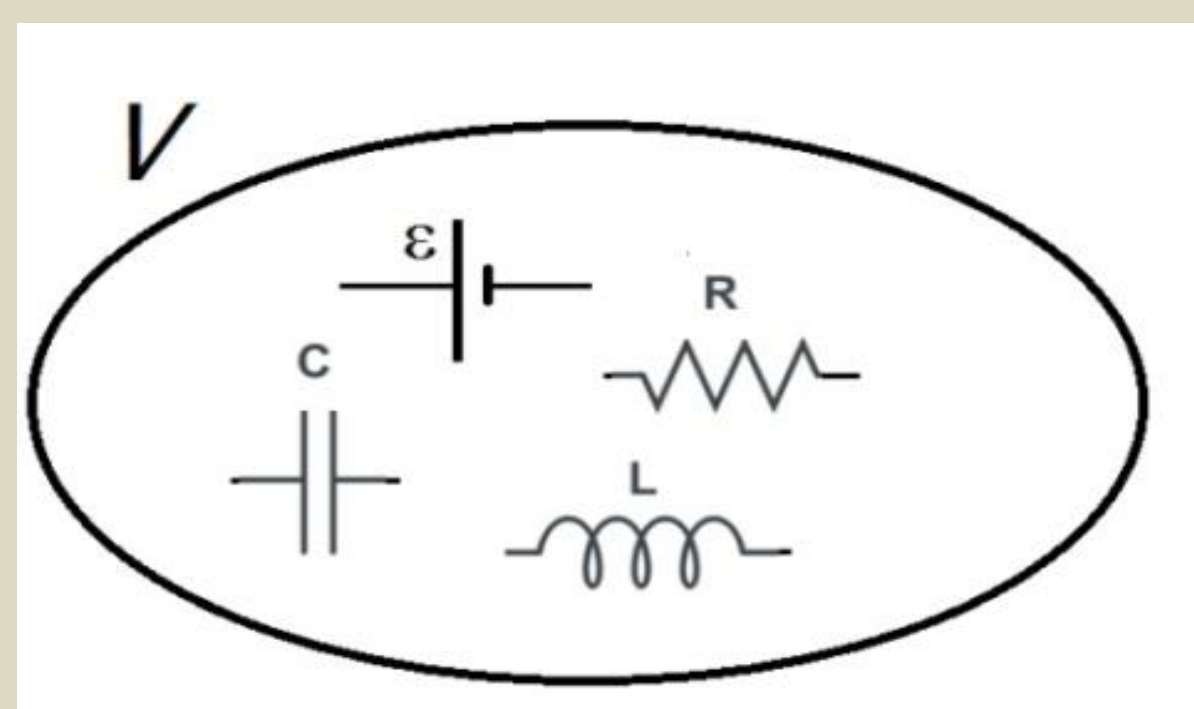
Presentación tradicional del vector de Poynting S:

- Supone ausencia de cargas y corrientes
- Se define S para campos E y B variables y en fase (ondas electromagnéticas)
- Las intensidades de E y B se vinculan a través de la velocidad de la onda.

La presentación tradicional no explica:

- El intercambio de energía en presencia de corrientes y cargas.
- La transferencia de energía por medio de campos estacionarios.
- Mecanismos de transferencias entre fuentes y receptores (resistencias, capacitores, inductores, etc.)
- La conservación de la energía en presencia de campos electromagnéticos.

Alternativa de presentación:



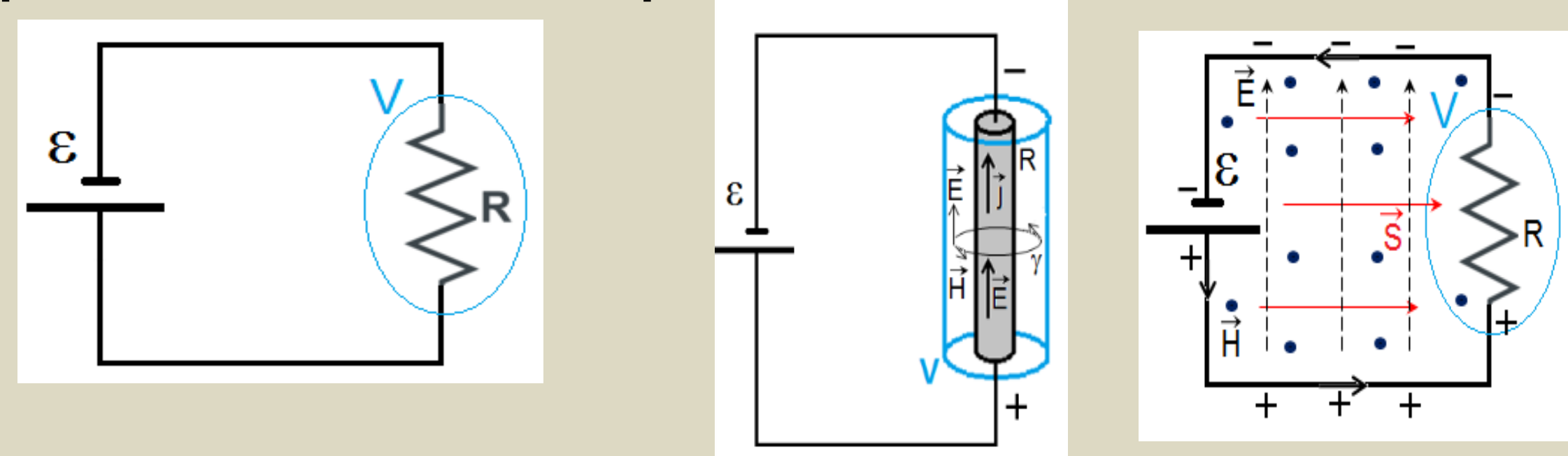
«El balance de energía en un volumen que puede contener resistencias, fuentes y dispositivos en general, debe ser nulo».

$$P_{\text{generador}} + P_{\text{resistores}} + P_{\text{campo eléctrico}} + P_{\text{campo magnético}} + P_S = 0$$

El término  $P_S$  da cuenta de la energía por unidad de tiempo que entra o sale de la región considerada y resulta ser el flujo del vector de Poynting.

$$P_S = \int_A (\vec{E} \wedge \vec{H}) \cdot d\vec{A}$$

Ejemplo: Circuito resistivo simple



La resistencia dentro del volumen V puede modelizarse como una porción de conductor de longitud  $l$ , sección circular de radio  $a$  y resistividad  $\rho$  (centro). Direcciones y sentidos del campo eléctrico, campo magnetizante, y del vector de Poynting indicando la potencia que ingresa al volumen V (der.)

La energía que disipa la resistencia proviene del campo eléctrico responsable de las corrientes, y del campo magnético generado por dichas corrientes. La interacción entre estos campos hace posible la transferencia de energía que se transforma en calor por efecto Joule.

El balance de potencia en el volumen V es:

$$\int_V \vec{j}_c \cdot \vec{E} dV + \int_A (\vec{E} \wedge \vec{H}) \cdot d\vec{A} = 0$$

↑  
Potencia disipada por la resistencia

↑  
Potencia que llega al volumen V desde la fuente