Fundamentos de Transmisión y Propagación de Ondas

TEMA I. EL MODELO ELECTROMAGNÉTICO BASADO EN LAS ECUACIONES DE MAXWELL.

TEMA II. MEDIOS Y TRANSFERENCIA DE ENERGÍA.

TEMA III. ONDAS PLANAS HOMOGÉNEAS (OPH).

TEMA IV. INCIDENCIA DE ONDAS PLANAS SOBRE OBSTÁCULOS PLANOS.

TEMA V. ONDAS GUIADAS POR SOPORTE FÍSICO. LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.

Fundamentos de Transmisión y Propagación de Ondas
2º curso, 2º cuatrim. del Grado en Ing. de T^{as} y Servicios de Telecomunicación
Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid
Jorge A. Ruiz Cruz (jorge.ruizcruz@uam.es, http://rfcas.eps.uam.es)

Tema I. El modelo electromagnético basado en las ecuaciones de Maxwell.

I.1. DEFINICIÓN DEL MODELO ELECTROMAGNÉTICO MACROSCÓPICO: ECUACIONES DE MAXWELL EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

I.2. DEFINICIÓN DE LOS MEDIOS MATERIALES EN EL MODELO ELECTROMAGNÉTICO.

I.3. DEFINICIÓN DE RÉGIMEN ESTÁTICO: ELECTROSTÁTICA Y MAGNETOSTÁTICA.

I.4. DEFINICIÓN DE RÉGIMEN DE VARIACIÓN TEMPORAL LENTA. LEYES DE KIRCHOFF.

I.5. DEFINICIÓN DE RÉGIMEN DE VARIACIÓN TEMPORAL ARBITRARIA.

I.6. TRANSFORMADA DE FOURIER APLICADA A LAS ECUACIONES DE MAXWELL. RÉGIMEN MONOCROMÁTICO.

Jorge A. Ruiz Cruz (jorge.ruizcruz@uam.es, http://rfcas.eps.uam.es)
Escuela Politécnica Superior, Universidad Autónoma de Madrid

Grupo de RadioFrecuencia: Circuitos, Antenas y Sistemas

I.3. Definición de Régimen Estático: Electrostática y Magnetostática.

- Debido a la complejidad de las ecuaciones de Maxwell no es aconsejable iniciar su estudio con problemas electromagnéticos generales.

- Es más razonable comenzar por los casos más sencillos e ir aumentando la complejidad gradualmente; así es más fácil asimilar las operaciones del análisis vectorial y nociones sencillas que luego se complicarán en casos generales.

- El caso más sencillo es el estudio de campos cuando no hay variaciones temporales. En este caso, se dice que los campos son estáticos en el tiempo, estacionarios o simplemente estáticos.

- En este tema se presentarán los resultados fundamentales de la electrostática y magnetostática, haciendo énfasis en como se obtienen estos casos desde el modelo general, pero sin entrar en sus aplicaciones y casos específicos.

- El objetivo es encuadrar los conocimientos previos adquiridos de campos estacionarios en otras asignaturas dentro del modelo general de Maxwell, y recordar conceptos como resistencia, capacidad e inductancia.

Definición de *régimen estático*

- **El régimen estático o estacionario se define por:** $\boxed{\frac{\partial}{\partial t}=0}$

- El problema de Maxwell en el régimen estático se convierte en :

$$\left\{\begin{array}{l} \nabla\times\vec{\boldsymbol{E}}(\vec{\boldsymbol{r}},t)=-\frac{\partial\vec{\boldsymbol{B}}(\vec{\boldsymbol{r}},t)}{\partial t} \\ \nabla\times\vec{\boldsymbol{H}}(\vec{\boldsymbol{r}},t)=\vec{\boldsymbol{J}}(\vec{\boldsymbol{r}},t)+\frac{\partial\vec{\boldsymbol{D}}(\vec{\boldsymbol{r}},t)}{\partial t} \\ \nabla\cdot\vec{\boldsymbol{D}}(\vec{\boldsymbol{r}},t)=\rho(\vec{\boldsymbol{r}},t) \\ \nabla\cdot\vec{\boldsymbol{B}}(\vec{\boldsymbol{r}},t)=0 \\ \nabla\cdot\vec{\boldsymbol{J}}(\vec{\boldsymbol{r}},t)+\frac{\partial\rho(\vec{\boldsymbol{r}},t)}{\partial t}=0 \end{array}\right. \xrightarrow[\boxed{\frac{\partial}{\partial t}=0}]{} \left\{\begin{array}{l} \nabla\times\vec{\boldsymbol{E}}(\vec{\boldsymbol{r}})=\boldsymbol{0} \\ \nabla\times\vec{\boldsymbol{H}}(\vec{\boldsymbol{r}})=\vec{\boldsymbol{J}}(\vec{\boldsymbol{r}}) \\ \nabla\cdot\vec{\boldsymbol{D}}(\vec{\boldsymbol{r}})=\rho(\vec{\boldsymbol{r}}) \\ \nabla\cdot\vec{\boldsymbol{B}}(\vec{\boldsymbol{r}})=0 \\ \nabla\cdot\vec{\boldsymbol{J}}(\vec{\boldsymbol{r}})=0 \end{array}\right. \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{\begin{array}{l} \nabla\times\vec{\boldsymbol{E}}(\vec{\boldsymbol{r}})=\boldsymbol{0} \\ \nabla\cdot\vec{\boldsymbol{D}}(\vec{\boldsymbol{r}})=\rho(\vec{\boldsymbol{r}}) \end{array}} \quad \nabla\cdot\vec{\boldsymbol{J}}(\vec{\boldsymbol{r}})=0 \quad \boxed{\begin{array}{l} \nabla\times\vec{\boldsymbol{H}}(\vec{\boldsymbol{r}})=\vec{\boldsymbol{J}}(\vec{\boldsymbol{r}}) \\ \nabla\cdot\vec{\boldsymbol{B}}(\vec{\boldsymbol{r}})=\boldsymbol{0} \end{array}}$$

El problema de la *Electrostática* (I)

• El caso más sencillo es el estudio de campos cuando no hay variaciones temporales, donde se obtienen dos ecuaciones donde el campo eléctrico y magnético están desacoplados, sin que exista ninguna interrelación:

$$\left\{\begin{array}{l}\nabla \times \vec{E}(\vec{r}) = \mathbf{0} \\ \nabla \cdot \vec{D}(\vec{r}) = \rho(\vec{r})\end{array}\right. \qquad \left\{\begin{array}{l}\nabla \times \vec{H}(\vec{r}) = \vec{J}(\vec{r}) \\ \nabla \cdot \vec{B}(\vec{r}) = 0\end{array}\right.$$

• En esta situación, aunque no haya variación temporal en los campos ni en la densidad de corriente, podría haber cargas en movimiento, siempre que:

$$\nabla \cdot \vec{J}(\vec{r}) = 0$$

• El problema de la electrostática es el problema del régimen estático asociado al campo eléctrico, donde además se impone que no haya cargas en movimiento, es decir, que no haya ninguna corriente:

$$\boxed{\frac{\partial}{\partial t} = 0} \qquad \boxed{\vec{J}(\vec{r}, t) = \vec{J}_s(\vec{r}, t) = \mathbf{0}}$$

• Al no haber corrientes (que son la única fuente de campo magnético si no hay variación temporal), se tiene que desde el punto de vista físico se debe cumplir:

$$\boxed{\begin{array}{l}\vec{H}_{electrostica} = 0 \\ \vec{B}_{electrostatica} = 0\end{array}}$$

El problema de la *Electrostática* (y II)

• En realidad, rigurosamente hablando, en la naturaleza no existen fenómenos reales de electrostática:

- los campos precisan de un tiempo infinito para alcanzar su valor.

- siempre hay corrientes de conducción en los medios (p. ej. una batería se descarga en el aire debido a la existencia de una corriente pequeñísima).

- además cualquier movimiento de las cargas originará un campo magnético.

• Sin embargo, cuando las corrientes y las velocidades de las partículas cargadas son muy pequeñas, el campo puede ser considerado como electrostático.

• De los "*tres ingredientes*" del modelo electromagnético, se ha hablado sólo de la ecuación de continuidad y de las ecuaciones de Maxwell.

- Faltaría por ver el papel de los medios (las relaciones constitutivas).

- En situación estática no puede haber dispersión temporal, y se trabajará en esta asignatura con medios lineales e isótropos.

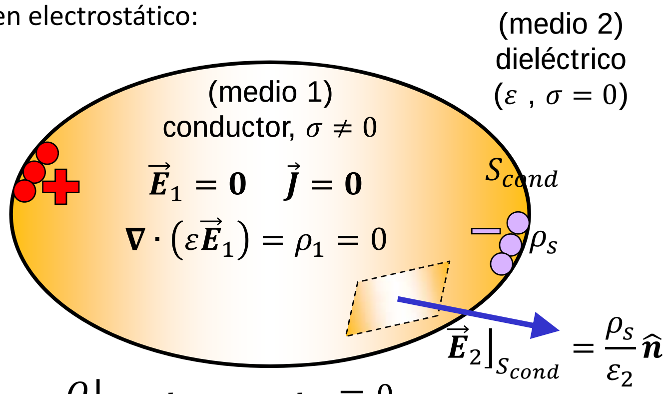
Campo Electrostático en los conductores

• Puesto que no hay corriente, no hay campo eléctrico ni densidad volumétrica de carga dentro de los conductores en régimen electrostático:

(relación const. del medio conductor) $\vec{\boldsymbol{J}}_1 = \sigma \vec{\boldsymbol{E}}_1$

(electrostática) $\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \vec{\boldsymbol{D}} = \rho \\ \vec{\boldsymbol{J}} = 0 \end{array} \right.$

(condiciones de salto) $\left\{ \begin{array}{l} \hat{\boldsymbol{n}} \times \left(\vec{\boldsymbol{E}}_2 - \vec{\boldsymbol{E}}_1\right)\big|_{S_{cond}} = \boldsymbol{0} \\ \hat{\boldsymbol{n}} \cdot \left(\vec{\boldsymbol{D}}_2 - \vec{\boldsymbol{D}}_1\right)\big|_{S_{cond}} = \rho_S \end{array} \right.$



$$Q\big|_{\substack{total\ encerrada \\ por\ el\ condutcor}} = 0$$

• El único sitio en el que puede haber carga en un conductor es en su superficie, que es la única manera que se puede cumplir la condición de campo nulo en su interior.

• En electrostática las cargas libres de un cuerpo conductor se redistribuyen en su superficie donde ocupan posiciones que hacen que el campo que ellas producen, anule exactamente el campo total en el interior del conductor.

Concepto de *potencial electrostático*

• La ecuación $\nabla \times \vec{\boldsymbol{E}} = \boldsymbol{0}$ indica que el campo electrostático es irrotacional.

• Cualquier campo irrotacional puede obtenerse a partir del gradiente de un campo escalar ϕ , que se denomina potencial, como: $\vec{\boldsymbol{E}} = -\nabla\Phi$

• El campo electrostático es conservativo, ya que al moverse una carga incremental por cualquier camino cerrado, el trabajo realizado por el es :

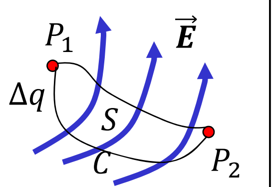
$$W_{P_1 \to C \to P_1} = \oint_C \vec{\boldsymbol{F}} \cdot d\vec{\boldsymbol{l}} \overset{(1)}{=} \Delta q \oint_C \vec{\boldsymbol{E}} \cdot d\vec{\boldsymbol{l}} \overset{(2)}{=} \Delta q \iint_S \nabla \times \vec{\boldsymbol{E}} \cdot d\vec{\boldsymbol{S}} = 0$$

(1): $\vec{\boldsymbol{F}} = \Delta q \vec{\boldsymbol{E}}$

(2): Th. de Stokes

• El signo negativo en la definición viene para que al calcular el trabajo realizado por el campo para llevar una carga incremental entres dos puntos quede como la diferencia de potencial entre ambos, que será independiente del camino tomado (por ser el campo irrotacional):

$$W_{P_1 \to P_2} = \int_{P_1}^{P_2} \vec{\boldsymbol{F}} \cdot d\vec{\boldsymbol{l}} = \Delta q \int_{P_1}^{P_2} \vec{\boldsymbol{E}} \cdot d\vec{\boldsymbol{l}} = \Delta q(\Phi(P_1) - \Phi(P_2))$$

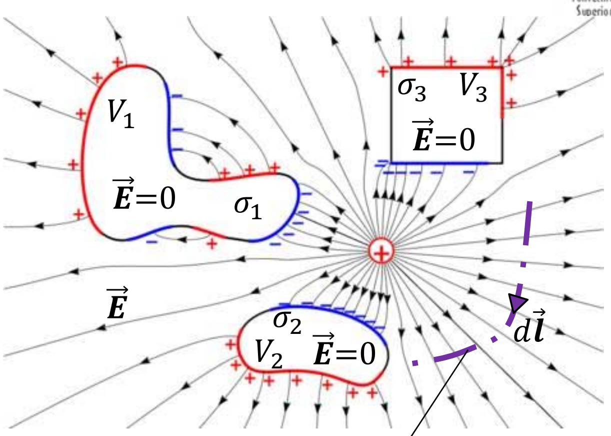


• En conclusión, el campo electrostático es conservativo y se puede definir una función potencial (escalar) fácil de usar y con significado físico a partir de la cual obtener el campo (que es un vector y por tanto más difícil, en principio, de manejar).

Ecuación de *Poisson* y *Laplace* para el potencial

• Se puede ligar el potencial con las densidades de carga, para medios isótropos dieléctricos:

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{\nabla}\cdot\vec{\boldsymbol{D}} &= \rho\\ \vec{\boldsymbol{E}} &= -\boldsymbol{\nabla}\Phi\\ \vec{\boldsymbol{D}} &= \varepsilon\vec{\boldsymbol{E}}\end{aligned}\right\} -\boldsymbol{\nabla}\cdot(\varepsilon\boldsymbol{\nabla}\Phi) = \rho$$



S_{equip}: superficie equipotencial $\Phi = \text{cte}$ (campo es perpendicular)

• La ecuación de segundo orden del potencial para medios lineales, isótropos y homogéneos recibe el nombre de ecuación de Poisson:

$$\boldsymbol{\nabla}\cdot\boldsymbol{\nabla}\Phi \equiv \Delta\Phi(\vec{\boldsymbol{r}}) = -\rho(\vec{\boldsymbol{r}})/\varepsilon$$

• En el caso de regiones sin carga, la ecuación de Poisson se reduce a la Ecuación de Laplace $\boldsymbol{\nabla}\cdot\boldsymbol{\nabla}\Phi \equiv$ $\equiv \Delta\Phi = 0$

$$d\Phi = \boldsymbol{\nabla}\Phi\cdot d\vec{\boldsymbol{l}} = -\vec{\boldsymbol{E}}\cdot d\vec{\boldsymbol{l}}$$

$$d\Phi\rfloor_{S_{equip}} = 0 \Longrightarrow \vec{\boldsymbol{E}} \perp d\vec{\boldsymbol{l}}$$

• El campo electrostático es perpendicular a la superficie de los conductores, por lo que éstas (y su interior) son superficies equipotenciales.

Concepto de *Capacidad y Condensador*

• Se denomina condensador al conjunto de dos conductores (llamados las armaduras) con cargas iguales y de signo opuesto $\pm Q$.

• Se denomina capacidad de un condensador a la relación entre la carga de uno de los conductores y la diferencia de potencial entre ellos:

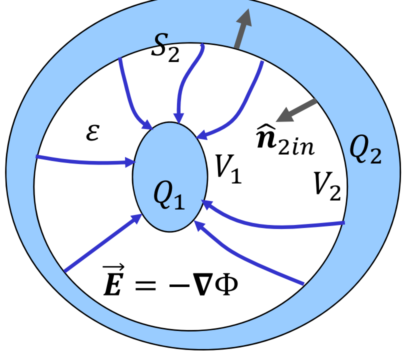
$$C = \frac{|Q|}{|V_2 - V_1|} \quad [\mathrm{F}]$$

• Se pone el valor absoluto para recalcar que es una cantidad positiva, y que, dada una configuración de condensadores fija, es un constante (si se incrementa la diferencia de potencial en un determinado factor, la carga lo hará de la misma manera).

• Suponiendo $V_2 > V_1$ (como en el dibujo), la carga positiva se distribuirá sobre la superficie S_2 del conductor 2, y se podrá calcular usando el valor del campo o del potencial en S_2:

$$Q_2 = -Q_1 = \oiint_{S_2} \vec{\boldsymbol{D}}\cdot d\vec{\boldsymbol{S}} = \varepsilon \oiint_{S_2} \boldsymbol{\nabla}\Phi\cdot\hat{\boldsymbol{n}}_{2in}dS$$

$$d\vec{\boldsymbol{S}} = -\hat{\boldsymbol{n}}_{2in}dS$$



• En la práctica, siempre hay líneas de campo que salen de un conductor y no llegan al otro (situación que se conoce como efecto de bordes), por lo que entonces sólo se daría $Q_2 \approx -Q_1$.

El problema de la *Magnetostática*

- **Magnetostática: ecuaciones del régimen estático asociadas al campo magnético**:

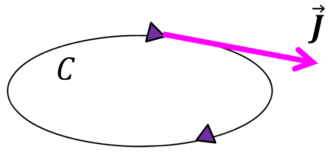
$$\begin{cases} \nabla \times \vec{\boldsymbol{H}}(\vec{\boldsymbol{r}}) = \vec{\boldsymbol{J}}(\vec{\boldsymbol{r}}) \\ \nabla \cdot \vec{\boldsymbol{B}}(\vec{\boldsymbol{r}}) = 0 \end{cases} \qquad \nabla \cdot \vec{\boldsymbol{J}}(\vec{\boldsymbol{r}}) = 0$$

- En el problema electrostático, se tenían las ecuaciones del caso estático para el campo eléctrico, imponiendo además que ***no*** hubiera cargas en movimiento (**corrientes nulas**).

- En el problema de la Magnetostática puede haber corrientes (de hecho son las fuentes), siempre que estas sean estacionarias, esto es, no varíen con el tiempo y sean cerradas como impone la continuidad de carga en régimen estático: $\nabla \cdot \vec{\boldsymbol{J}} = 0$.

- Si hay corrientes estacionarias habrá campos eléctricos asociados por la ley de Ohm a esas corrientes en los conductores, situación que es distinta a la de electrostática.

- Para mantener una corriente estacionaria (cuyas líneas de $\vec{\boldsymbol{J}}$ son cerradas) se necesitan generadores, ya que el campo electrostático no es capaz de mantenerla, como se verá en la pag. siguiente



Corrientes estacionarias

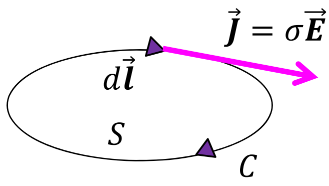
- Las corrientes estacionarias son solenoidales ($\nabla \cdot \vec{\boldsymbol{J}} = 0$) y por tanto las cargas se mueven describiendo un circuito cerrado, por lo que además: $\oint_C \vec{\boldsymbol{J}} \cdot d\vec{\boldsymbol{l}} > 0$

- Supóngase por un momento que esa corriente proviene de un campo estacionario: $\oint_C \vec{\boldsymbol{E}}_{estac} \cdot d\vec{\boldsymbol{l}} = \iint_S \nabla \times \vec{\boldsymbol{E}}_{estac} \cdot d\vec{\boldsymbol{S}} = 0$

  - Se llega a la incongruencia: $0 < \oint_C \vec{\boldsymbol{J}} \cdot d\vec{\boldsymbol{l}} = \sigma \oint_C \vec{\boldsymbol{E}}_{estac} \cdot d\vec{\boldsymbol{l}} = 0!!$

  - La razón es que por un lado, el campo estacionario es conservativo ($\nabla \times \vec{\boldsymbol{E}}_{estac} = \boldsymbol{0}$) y no cede energía en un circuito cerrado C.

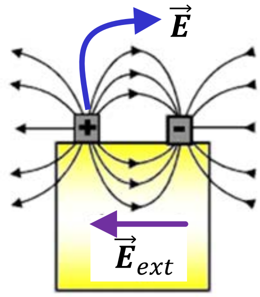
  - Por otro, las cargas en movimiento chocan con la red iónica del medio conductor cediéndole energía (efecto Joule) que debe provenir del campo.



- Conclusión: un campo estacionario no es capaz de mantener una corriente estacionaria, y necesita de generadores cuyo campo externo sea no irrotacional (y que generalmente se superpone al estacionario *exclusivamente* en la zona del generador):

$$\vec{\boldsymbol{E}}_{tot}(\vec{\boldsymbol{r}}) = \vec{\boldsymbol{E}}_{ext}(\vec{\boldsymbol{r}}) + \vec{\boldsymbol{E}}_{estac}(\vec{\boldsymbol{r}}) \qquad \vec{\boldsymbol{J}}(\vec{\boldsymbol{r}}) = \sigma(\vec{\boldsymbol{r}})\vec{\boldsymbol{E}}_{tot}(\vec{\boldsymbol{r}})$$

Generadores y fuerza electromotriz



• El campo eléctrico total en un problema estacionario es:

$$\vec{E}_{tot}(\vec{r}) = \vec{E}_{ext}(\vec{r}) + \vec{E}(\vec{r})$$

$\vec{E}_{ext}$: campo impuesto por una elemento externo, localizado en el "generador" (como una batería) y que se rige de manera independiente (p.e. por un proceso químico).

$\vec{E}$ (o $\vec{E}_{estac}$): campo eléctrico estacionario (cuyas ecuaciones coinciden con las del campo electrostático)

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{E}(\vec{r}) = 0 \\ \nabla \cdot \vec{D}(\vec{r}) = \rho(\vec{r}) \end{cases}$$

• Estos generadores aportan la energía que se pierde por efecto Joule debido a las corrientes estacionarias.
Se define la fuerza electromotriz del generador como:

$$\text{fem}_g \equiv \int_{P_-}^{P_+} \vec{E}_{ext} \cdot d\vec{l} \quad [V]$$

$$\oint_C \vec{E}_{tot} \cdot d\vec{l} = \underbrace{\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l}}_{\text{0 por irrotacional}} + \int_{P_-}^{P_+} \vec{E}_{ext} \cdot d\vec{l} = \text{fem}_g$$

Medios dentro de un campo eléctrico estacionario

• **Dieléctricos**: la situación es la misma que en electrostática: $\vec{D}(\vec{r}) = \varepsilon(\vec{r})\vec{E}(\vec{r})$

• **Conductores reales** $\sigma \neq \infty$: comportamiento algo distinto que en electrostática:

- si circula una corriente, existe campo eléctrico en su interior y por tanto no son volúmenes equipotenciales ("*hay una resistencia dada por la ley de Ohm*")

- si son homogéneos, no hay carga en su interior, esto es, $\rho = 0$:

$$0 = \nabla \cdot \vec{J} = \nabla \cdot \left(\sigma \vec{E}\right) = \nabla \cdot \left(\frac{\sigma}{\varepsilon}\vec{D}\right) = \frac{\sigma}{\varepsilon}\nabla \cdot \vec{D} = \frac{\sigma}{\varepsilon}\rho$$

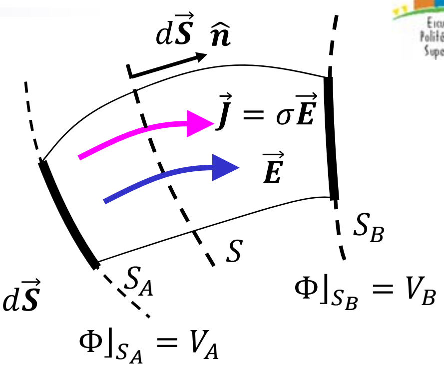
• **Conductores perfectos** $\sigma = \infty$: situación equivalente a los conductores (reales o ideales) de electrostática.

- son una idealización de los buenos conductores
- La corriente puede circular sin necesidad de campo
- Son equipotenciales.

$$\lim \begin{Bmatrix} \vec{E} \to 0 \\ \vec{J} \neq 0 \end{Bmatrix} \Longrightarrow \begin{Bmatrix} \vec{E} = 0 \\ \vec{J} \neq 0 \\ \sigma = \infty \end{Bmatrix}$$

Concepto de *Resistencia* y *Resistor*

• Resistor: estructura conductora excitada a través de dos electrodos conductores perfectos bajo la influencia de un campo eléctrico estacionario y por tanto:

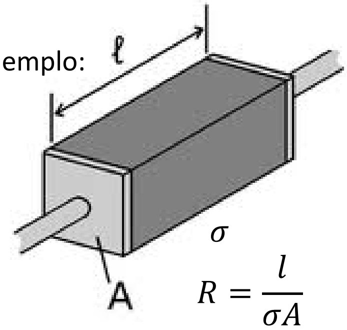


$$V_B - V_A = -\int_A^B \vec{E}\cdot d\vec{l} = \int_A^B \nabla\Phi \cdot d\vec{l}$$

$$I_{A\to B} = \iint_S \vec{J}\cdot d\vec{S} = \sigma \iint_S \vec{E}\cdot d\vec{S} = \sigma \iint_S -\nabla\Phi\cdot\hat{\boldsymbol{n}}_2\cdot d\vec{S}$$

• La corriente es la misma a través de cualquier superficie S intermedia elegida (ya que por los laterales no puede *salir nada*).

Ejemplo:



• Se define la resistencia como el cociente: $R = (V_A - V_B)/I_{A\to B}$ $[\Omega]$

• La resistencia es positiva (o nula) y para una configuración dada, es una constante (si se incrementa la diferencia de potencial en un determinado factor, la corriente lo hará en el mismo factor).

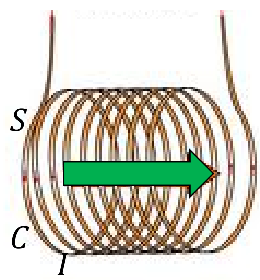
• La resistencia es un problema dual al del condensador, y depende de la forma de excitación/conexión (donde se *ponen* los accesos).

Concepto de *Inductancia* y *Bobina*

• Un inductor o bobina es un elemento conductor por el que puede circular una corriente dando lugar a un flujo del campo magnético asociado a través de ella.

• En medios lineales existe una relación de proporcionalidad entre la corriente y el campo que ésta genera. Esta proporcionalidad, consecuencia de la linealidad de las ecuaciones de Maxwell, se extiende también al flujo:

$$\iint_S \vec{B}\cdot d\vec{S} = LI \ [\text{Wb}]$$



• La constante de proporcionalidad L se denomina coeficiente de autoinducción o inductancia de la bobina, y sólo depende del material y forma de la bobina y se puede calcular a partir del potencial vector magnético:

$$L \equiv \frac{\Phi_B}{I} = \frac{1}{I}\iint_S \vec{B}\cdot d\vec{S} = \frac{1}{I}\oint_C \vec{A}\cdot d\vec{l} \quad [H]$$

• Cualquier campo solenoidal, como $\vec{B}$ (ya que $\nabla\cdot\vec{B} = 0$) puede obtenerse a partir del rotacional de un campo vectorial $\vec{A}$, que se denomina en este caso **potencial vector magnético**, como:

$$\vec{B} = \nabla\times\vec{A}$$

Campos eléctricos y magnéticos estacionarios

- En resumen, el campo eléctrico estacionario (con la ayuda de generadores) produce corrientes estacionarias y éstas generan campo magnético estacionario, pero ambos campos se estudian de forma independiente y desacoplada.

Campo Eléctrico estacionario	Corrientes estacionarias	Magnetostática
$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}) = 0$ $\nabla \cdot \vec{D}(\vec{r}) = \rho(\vec{r})$ $\vec{D}(\vec{r}) = \varepsilon(\vec{r})\vec{E}(\vec{r})$	$\vec{J}(\vec{r}) = \sigma(\vec{r})\vec{E}(\vec{r})$ $\nabla \cdot \vec{J}(\vec{r}) = 0$	$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}) = \vec{J}(\vec{r})$ $\nabla \cdot \vec{B}(\vec{r}) = 0$ $\vec{B}(\vec{r}) = \mu(\vec{r})\vec{H}(\vec{r})$
Primero hay que determinar $\vec{E}(\vec{r})$,$\vec{D}(\vec{r})$	A partir de $\vec{E}(\vec{r})$ se determina $\vec{J}(\vec{r})$	A partir de $\vec{J}(\vec{r})$ se determina $\vec{H}(\vec{r})$, $\vec{B}(\vec{r})$