Pontificia Universidad Católica de Chile
Instituto de Física
Electricidad y Magnetismo FIS1533-5
Benjamin Wassermann.

Resumen
Electricidad y Magnetismo

- **Ley de Coulomb**:

  Existe una fuerza, parecida a la gravedad, que se produce entre dos partículas con carga. La ley de Coulomb nos dice que la fuerza que ejerce una partícula con carga q_1 (en posición r_1) sobre otra con carga q_2 (en r_2) es:

$$\mathbf{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0} \frac{\mathbf{r_2} - \mathbf{r_1}}{|\mathbf{r_2} - \mathbf{r_1}|^3}.$$

  Notamos que la fuerza es proporcional al producto de las cargas. Si hay dos cargas de igual signo, se repelen, mientras que si tienen signo opuesto, se atraen. Además, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre las cargas.

  Normalmente en vez de preocuparnos por esta fuerza, nos abstraemos un poco y pensamos en el concepto de *Campo Eléctrico*

- **Campo Eléctrico**:

  El campo eléctrico E en un punto r, producido por una carga puntual q que se encuentra en un punto r' es:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0} \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3}.$$

  Luego, si E_1 es el campo producido por q_1, entonces la fuerza que ejerce q_1 sobre q_2 es $F_{12} = q_2 \cdot E_1(r_2)$

- **Superposición**:

  El principio de superposición dice que si tenemos una carga que produce un campo E_1, y otra que produce un campo E_2, el campo eléctrico total será $E1 + E2$. Con este principio podemos calcular el campo que producen muchas cargas puntuales como:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \sum_q q \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3}.$$

- **Trabajo y Energía**:

  Para mover una carga q debemos contrarestar la fuerza que existe sobre ella, luego el trabajo necesario para mover la carga es:

$$W_{a\to b} = -\int_c F \cdot dr$$

  Usando el teorema trabajo energía $W = \Delta U$ podemos definir energía almacenada por una configuración de cargas como:

$$U = \sum_{i<j} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q_i q_j}{|r_i - r_j|}$$

  Cosas importantes:

  1. La energía almacenda por una configuración de cargas es equivalente al trabajo que cuesta armar dicha configuración.
  2. El principio de superposición aplica para todos los conceptos anteriromente mencionados.
  3. "Donde menos de donde"

- **Distribución de Cargas**:

  En la realidad, lo más común es encontrar cuerpos mucho más grandes que el tamaño del electrón, cargados electricamente. Mejor conocidos como *distribuciones continuas de carga.*

  Luego definimos el concepto de densidad de carga para 3 casos posibles:

  1. Lineal:
$$\lambda = \lim_{\Delta l \to\ 0} \frac{\Delta q}{\Delta l}$$
  2. Superficial:
$$\sigma = \lim_{\Delta S \to\ 0} \frac{\Delta q}{\Delta S}$$
  3. Volumétrica:
$$\rho = \lim_{\Delta V \to\ 0} \frac{\Delta q}{\Delta V}$$

  Aplicando el principio de superposición pero en medios continuos, obtenemos una expresión para el campo eléctrico:

$$\boxed{\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \int dq \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3}}$$

  Donde dq depende del tipo de distribución. Para distribuciones lineales $dq = \lambda dl$ para superficies $dq = \sigma dS$ y para volúmenes $dq = \rho dV$.

- **Ley de Gauss**:

  La forma integral nos dice que para una carga puntual q ubicada en un punto fijo del espacio y una superficie S que la encierra. El flujo del campo eléctrico que atraviesa S viene dado por:

$$\boxed{\oint_S \vec{E} \cdot ds = \frac{q}{\varepsilon_0}}$$

  Por otro lado la forma diferencial nos dice que la divergencia del campo en un punto (es decir, cuanto "se separa" el campo en un punto) es proporcional a la densidad de carga en ese punto:

$$\boxed{\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}}$$

  Cosas importantes:

  1. La Ley de Gauss siempre es verdad, pero no siempre es útil, pues necesitamos **simetría**.
  2. La clave es que haya mucha simetría, pues en estos casos podemos tener un campo elétrico constante sobre la superficie, y así sacarlo de la integral. De otra forma, no podríamos calcular la integral.
  3. El campo eléctrico no es necesariamente continuo. Las discontinuidades del campo son provocadas generalmente por cargas puntuales o superficies cargadas
  4. Existen 3 tipos de simetrías: plana, cilíndrica y esférica.

- **Potencial Eléctrico**:

  El campo eléctrico producido por una carga Q a una distancia r viene dado por:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}\hat{r}$$

  Ahora, usando la identidad vectorial:

$$\boxed{\frac{\hat{r}}{r^2} = -\nabla\frac{1}{r}}$$

  Podemos escribir:

$$\boxed{\vec{E} = -\nabla\phi}$$

  Donde ϕ es un campo escalar que llamaremos "Potencial Electrostático"

  Para satisfacer la condición de arriba lo habitual es usar un punto de referencia r_0, donde el potencial lo definimos como cero, de modo que:

$$\phi(r) = -\int_{r_0}^{r} E \cdot dl$$

Usualmente $r_0 = \infty$.

Entonces el potencial producido por una carga Q en R, tomando el infinito como punto de referencia es:

$$\phi(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{|r-R|}$$

Por otra parte, si tenemos una carga q sometida a un campo $\vec{E}$ debemos ejercer una fuerza que contrarreste la acción del campo sobre ella. Luego el trabajo necesario es:

$$W_{a\to b} = -\int_c F \cdot dr$$

Pero $\vec{F} = q\vec{E} = -q\nabla\phi$, reemplazando:

$$W_{a\to b} = q\int_c \nabla\phi \cdot dr = q[\phi(b) - \phi(a)]$$

Lo que nos recuerda que $\vec{E}$ es conservativo.

Por lo tanto:

$$\boxed{W = q \cdot \Delta\phi}$$

Cosas importantes:

1. ϕ es un escalar.
2. El potencial cumple con el principio de superposición.
3. Podemos interpretar el potencial como el trabajo por unidad de carga.

- **Conductores**:

En un conductor, la última capa de elecrones, puede desplazarse libremente en presencia de un campo eléctrico. Sin embargo, los electrones no pueden salir.

Si acercamos una carga Q a un conductor los electrones de este se reacomodan llegando a una posición de equilibrio despues de un tiempo llamado "tiempo de relajación".Transcurrido ese tiempo el campo eléctrico en el interior del conductor es cero. Pues si no lo fuera los electrones libres seguirían moviéndose.

Sin embargo es en la superficie donde el campo no necesariamente es nulo. Por lo que aparece una densidad de carga superficial σ.

Para calcular el campo en la superficie usamos la ley de Gauss de forma local tomando un cilindro recto de área δa y altura h

Y obtenemos que el campo en la superficie de un conductor es:

$$\boxed{\vec{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\hat{n}}$$

Resumiendo, algunas propiedades importantes de los conductores son:

- $\vec{E}_{int} = 0$
- $\vec{E}$ no tiene componente tangencial.
- $\vec{E}$ es siempre normal a la superficie.
- En el borde existe una densidad de carga σ
- $\vec{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\hat{n}$
- ϕ es constante dentro del conductor, pues no hay campo.

- **Capacitores**:

Un capacitor es un dispositivo el cual tiene la capacidad de almacenar carga. Puede estar compuesto por uno o dos conductores de forma arbitraria.

Luego si sometemos un capacitor a una diferencia de potencial tenemos que nuestras principales ecuaciones son:

$$\boxed{Q = CV}$$

Donde Q es la carga almacenada, V el voltaje y C la capacitancia del capacitor en Farads [F].

Y la energía almacenada es:

$$\boxed{U = \frac{1}{2}CV^2}$$

Por otro lado podemos realizar conexiones entre capacitores. Donde la capacitancia se comporta de manera inversa a la resistencia.

Por lo tanto si tenemos capacitores en paralelo:

$$C_{eq} = C_1 + C_2$$

Para una conexión en serie:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Por último, para capacitores de 2 cuerpos es importante conocer ciertos valores de capacitancia:

- C Placas paralelas: $C = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$
- C Cilíndrico: $C = \frac{4\pi\varepsilon_0}{\ln \frac{b}{a}}$
- C Esférico: $C = \frac{4\pi\varepsilon_0}{(\frac{1}{a} - \frac{1}{b})}$

Cosas importantes:

1. En un conductor $\vec{E}_{int} = 0$
2. Existe una fuerza entere conductores que viene dada por $\vec{F} = -\nabla U$
3. La capacitancia depende exclusivamente de la geometría.
4. Efecto punta: Menor radio de curvatura, mayor campo Eléctrico.

- **Dieléctrico**:

En un material aislante las cargas se encuentran "ligadas", es decir no pueden moverse libremente. Por lo tanto al aplicar un campo eléctrico externo, los átomos del material se polarizan.De esta forma el material se convierte en una distribución de dipolos. Esta redistribución produce un nuevo campo eléctrico propio del material.

Para facilitarnos las cosas definimos un vector de polarización $\vec{P}$ como el momento dipolar eléctrico por unidad de volumen en un material. También definimos nuestro vector de desplazamiento $\vec{D}$ como:

$$\boxed{\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}}$$

Tenemos densidades de carga inducidas en el dieléctrico debido al campo eléctrico externo que produce un reordenamiento de las moléculas. Donde la densidad de carga superficial de polarización es:

$$\sigma_p = \vec{P} \cdot \hat{n}$$

Y la densidad de polarización volumétrica es:

$$\rho_p = -\nabla \cdot \vec{P}$$

Por otro lado tenemos que el vector de polarización es proporcional al campo externo aplicado:

$$\boxed{\vec{P} = \varepsilon_0 \chi \vec{E}}$$

Donde ε_0 es la permitividad del vacío y χ es la susceptibilidad eléctrica. La cual nos indica que tan susceptible es el material a polarizarse.

En general tenemos 2 tipos de cargas : $\begin{cases} \rho_l, & \text{Las cargas libres, que están a nuestra disposición} \\ \rho_p, & \text{Cargas de polarización al interior del material} \end{cases}$

Escribiendo la Ley de Gauss en forma diferencial:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

Hay que recordar que en este caso ρ considera todas las cargas. Sean libres o de polarizaión.

Luego:

$$\rho = \rho_l + \rho_p$$

Reemplazando en la ecuación tenemos:

$$\varepsilon_0 \vec{E} = \rho_l + \rho_p$$

Donde $\rho_p = -\nabla \cdot \vec{P}$, entonces:

$$\varepsilon_0 \vec{E} = \rho_l - \nabla \cdot \vec{P}$$

Reordenando y agrupando obtenemos:

$$\nabla \cdot (\varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) = \rho_l$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_l$$

Por lo tanto:

$$\boxed{\oint_s \vec{D} \cdot ds = Q_l}$$

Por último, algunas relaciones útiles son:

$$\boxed{\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = (1 + \chi) \geq 1}$$

$$\boxed{\vec{D} = \varepsilon_o (1 + \chi) \vec{E} = \varepsilon_o \varepsilon_r \vec{E} = \varepsilon \vec{E}}$$

- **Corriente Eléctrica**:

Se entiende corriente eléctrica como el flujo de cargas en un determinado tiempo. Es decir:

$$I = \frac{dq}{dt}$$

Ahora si nos concentramos en una sección transversal S, podemos definir la densidad de corriente $\vec{J}$ como la carga que pasa por esa sección en un determinado tiempo:

$$I = \oint_s \vec{J} \cdot ds$$

De manera alternativa:

$$\vec{J} = Nq\vec{v}$$

Donde N es número de portadores por unidad de volumen, q es la carga y v la velocidad que llevan.

Tenemos nuestra ecuación de continuidad:

$$\boxed{\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \vec{J} = 0}$$

Por último la ley de Ohm en forma local sería:

$$\vec{J} = g\vec{E}$$

Donde g es la conductividad eléctrica, que corresponde al inverso de la resistividad.

Cosas importantes:

1. Para el cálculo de $\vec{E}$ tanto cargas libres como de polarización son "fuentes"
2. Para el cálculo de $\vec{D}$ sólo actuan como fuentes las cargas libres.
3. ε_r suele llamarse constante dieléctrica que también se conoce como κ
4. Si ponemos un dieléctrico dentro de un capacitor su capacitancia aumenta: $C' = C \cdot \varepsilon_r$

- **Ley de Ohm**:

Se entiende corriente eléctrica como el flujo de cargas en un determinado tiempo. Es decir:

$$I = \frac{dq}{dt}$$

Definimos la ley de Ohm en forma local como:

$$\vec{J} = g\vec{E}$$

En forma global, la Ley de Ohm relaciona la diferencia de potencial V entre dos puntos en un circuito, con la corriente I que fluye entre los puntos:

$$\boxed{V = IR}$$

Donde R es la constante de proporcionalidad entre voltaje y corriente. Conocida como resistencia, donde:

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

Con l el largo, A la sección transversal y ρ resistividad. Que corresponde al inverso de la conductividad g.

Por último las perdidas de potencia en forma de calor que provocan las resistencias pueden ser calculadas como:

$$\boxed{P = VI = RI^2 = \frac{V^2}{R}}$$

- **Resistencias**:

Existen principalmente 2 tipos de arreglos de resistencias.

i) Serie:

Si tenemos n resistencias en serie podemos condensarlas en una sola resistencia equivalente R_{eq} donde

$$\boxed{R_{eq} = R_1 + R_2 + ... + R_n}$$

ii) Paralelo

Lo mismo ocurre para el arreglo en paralelo, donde:

$$\boxed{\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + ... + \frac{1}{R_n}}$$

Por otro lado resulta muy util definir el operador paralelo como:

$$R_1 // R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

- **Leyes de Kirchhoff**:

  i) Ley de nodos: La suma de todas las corrientes que entran a un nodo debe ser igual a la suma de las corrientes que salen del mismo.

$$\boxed{\sum I_{in} = \sum I_{out}}$$

  ii) Ley de mallas: La suma de todos los voltajes correspondientes a cada uno de los elementos que forman un circuito o una parte de él es nula cuando se recorre un camino cerrado (malla).

$$\boxed{\sum_{i=1}^{n} V_i = 0}$$

  Cosas importantes:

  1. Para resistencias en serie tenemos que la corriente es constante
  2. Para resistencias en paralelo tenemos que el voltaje es constante
  3. El voltaje puede ser interpretado como trabajo por unidad de carga $[\frac{J}{C}]$
  4. Un nodo es una zona del circuito que tiene igual voltaje en todos sus puntos.
  5. Una malla es un camino cerrado dentro del circuito.

- **Ley de Biot-Savart**:

  El campo magnético que genera una corriente I en un circuito puede ser determinado como:

$$\boxed{\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I\vec{dl} \times (\vec{r} - \vec{R})}{|\vec{r} - \vec{R}|^3}}$$

  Con $\vec{r}$ el lugar donde se desea conocer el campo, $\vec{R}$ es el lugar donde se encuentra la corriente, $\vec{dl}$ es el elemento vectorial que parametriza la dirección de la corriente y μ_0 la permeabilidad magnética del vacío.

  Por otro lado, la fuerza magnética que ejerce el circuito **a** sobre el circuito **b** es:

$$\boxed{\vec{F} = \int_b I_b \ \vec{dl}_b \times \vec{B_a}}$$

  Notar que si la corriente es constante puede salir de la integral. Por otra parte $\vec{B_a}$ viene dado por la expresión para el campo magnético, nuestra primera ecuación. Luego resulta evidente que conviene calcular primero el campo magnético y luego la fuerza.

  Cosas importantes:

  1. El campo magnético cumple con el principio de superposición.

2. "Donde quiero medir, menos de donde proviene"
3. Los campos magnéticos siempre rotan en torno a la corriente según la regla de la mano derecha.
4. $\vec{B}$ se mide en tesla, donde $1T = 1N/(A \cdot m)$

- **Fuerza de Lorentz**:

  La fuerza de Lorentz indica que una carga q con una velocidad $\vec{v}$ bajo la influencia de un campo magnético $\vec{B}$ siente una fuerza dada por:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

  Adicionalmente, en presencia de un campo eléctrico $\vec{E}$ la fuerza cambia a:

$$\vec{F} = q\ (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

  Cosas importantes:

  1. Nótese que $\vec{v}$ y $\vec{B}$ son dos vectores que forman un plano. Perpendicular a éste, aparece la fuerza de Lorentz.
  2. Debido a la naturaleza de la fuerza de Lorentz, la energía cinética de la carga es siempre constante, pues la fuerza de Lorentz no realiza trabajo sobre la carga. Debido a lo anterior, el módulo de la velocidad es siempre constante.
  3. En problemas de cargas puntales en zonas de campo magnético constante, siempre tenga en cuenta que esta se moverá en una circunferencia o en una espiral.
  4. Carga positiva $\rightarrow$ Mano Izquierda, Carga negativa $\rightarrow$ Mano Derecha.

- **Ley de Ampere**:

  La ley de Ampere en su forma diferencial plantea que:

$$\boxed{\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}}$$

  Para todo campo magnético se cunple que:

$$\boxed{\nabla \cdot \vec{B} = 0}$$

  En otras palabras, no existen monopolos magnéticos.

  Usando el teorema de Stokes, la ley de Ampere en su forma integral propone que para cualquier camino cerrado Γ se cumple que:

$$\boxed{\oint_{\Gamma} \vec{B} \cdot \vec{dl} = \mu_0 I}$$

Donde I es la corriente encerrada que atraviesa la superficie definida por Γ.

Cosas importantes:

1. Nótese que $\vec{v}$ y $\vec{B}$ son dos vectores que forman un plano. Perpendicular a éste, aparece la fuerza de Lorentz.
2. Debido a la naturaleza de la fuerza de Lorentz, la energía cinética de la carga es siempre constante, pues la fuerza de Lorentz no realiza trabajo sobre la carga. Debido a lo anterior, el módulo de la velocidad es siempre constante.
3. Carga positiva $\rightarrow$ Mano Izquierda, Carga negativa $\rightarrow$ Mano Derecha.
4. Algunos casos para las cuales es util la ley de Ampere son: cilíndros, planos, bobinas y toroides.
5. Recordar que la corriente es la integral de $\vec{J}$ en dS

- **Magnetización**:

Definimos el vector de magnetización $\vec{M}$ como la densidad de momento magnético por unidad de volumen dentro de un medio material.

Para incluir el efecto del campo magnético que generan las corrientes de magnetización definimos el vector intensidad de campo magnético $\vec{H}$ como:

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0}\vec{B} - \vec{M}$$

Luego, podemos escribir la ley de Ampere en forma generalizada:

$$\oint \vec{H} \cdot dl = I_l$$

Donde I_l son las corrientes libres que circulan por el material.

Para gran cantidad de materiales se cumple una relación lineal entre $\vec{M}$ y $\vec{H}$:

$$\vec{M} = \chi_m \cdot \vec{H}$$

Donde χ_m es la susceptibilidad magnética del material. Conocido el valor de este parámetro podemos clasificar a los materiales:

- Paramagnético $\chi_m > 0$; Crean un campo magnético que se alinea con el externo
- Diamagnético $\chi_m < 0$; Crean un campo magnético que se opone al externo
- Ferromagnético $\chi_m \gg 1$; Curva de Histéresis

Por último definimos la permeabilidad magnética relativa como:

$$\mu_r = 1 + \chi_m$$

Por lo tanto es util tener presente todas las siguientes relaciones:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(1 + \chi_m)\vec{H} = \mu\vec{H}$$

Cosas importantes:

1. Recordar que la corriente es la integral de $\vec{J}$ en dS.
2. Algunos casos para las cuales es util la ley de Ampere son: cilíndros, planos, bobinas y toroides. Ya sea para el vacío o medios magnéticos.
3. En histéresis tenemos distinto camino de ida y vuelta, quedamos con un remanente.

- **Flujo**:

Definiremos ϕ como el flujo de campo magnético que atraviesa una superficie, es decir:

$$\phi = \int_s \vec{B} \cdot \vec{dS}$$

- **Inducción**:

La ley de Faraday indica que la fem inducida en un circuito cerrado está dado por:

$$\boxed{\varepsilon = -\frac{\partial \phi}{\partial t}}$$

Por lo tanto en presencia de campo magnéticos que dependen del tiempo se cumple que:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Lo que vendría a ser la Ley de Faraday en su forma diferencial.

- **Ley de Lenz**:

La corriente inducida en un circuito debido a la variación temporal del flujo del campo magnético siempre es opuesta al crecimiento o decrecimiento del mismo.

Cosas importantes:

1. No habrá una fem inducida si no hay un cambio del flujo en el tiempo.
2. Existen 3 formas de variar el flujo: Variar el campo magnético, la sección o la orientación.
3. El sentido de la corriente queda definido por la Ley de Lenz.
4. Recordemos que la fem es el agente responsable de empujar la corriente a través del circuito.

- **Onda Sinusoidal**:

$$g(t) = A \cdot cos(\omega t + \phi)$$

i) A es la amplitud

ii) $\frac{A}{\sqrt{2}}$ es el valor RMS

iii) $\omega = 2\pi f$

- **Régimen permanente**:

En la repuesta de un circuito de orden mayor a cero se distinguen dos regímenes: el transitorio y el permanente.

El régimen transitorio se asocia a la superposición de la respuesta homogénea y la respuesta forzada del sistema.

El régimen permanente se asocia a lo que queda una vez que la respuesta homogénea ha desaparecido, es decir, sólo la respuesta forzada

Cuando la función $g(t)$ que exita el circuito es una sinusoide, la respuesta forzada corresponde a una sinusoide de la misma frecuencia con cierta amplitud y desfase.

- **Fasores**:

Dado que tenemos 2 grados de libertad, amplitud y fase, una forma muy conveniente de representar las señales es por medio de un fasor.

$$a + jb = \sqrt{a^2 + b^2} < \tan^{-1}(\frac{b}{a})$$

- **Impedancia**:

La impedancia Z es un concepto equivalente al de resistencia. Indica cuánto se opone al flujo de corriente un componente o circuito en régimen sinusoidal permanente.

$$Z = \frac{V}{I}$$

En particular:

Elemento	Z	ϕ	$\omega \to \infty$	$\omega \to 0$
R	R	0	-	-
C	$\frac{1}{j\omega c}$	90	CC	CA
L	$j\omega L$	-90	CA	CC

Cosas importantes:

1. En un circuito en régimen sinusoidal permanente sólo nos interesa la amplitud y el desfase de cada señal, dado que la frecuencia es igual para todas.
2. El desfase por convención indica como está el voltaje respecto de la corriente.

3. La magnitud de un fasor representa la amplitud de la sinusoide, mientras que la fase representa el desfase que tiene la señal con respecto a una señal de referencia.
4. Resulta muy conveniente analizar circuitos en régimen permanente en el dominio de la frecuencia, usando la transformada Fourier o Laplace.
5. Operamos con las impedancias de igual manera que con las resistencias.
6. La frecuencia de resonancia ω_0 de un circuito eléctrico es aquella frecuencia la cual anula la parte imaginaria de la impendancia equivalente. Para esta frecuencia tenemos máxima corriente y potencia promedio.