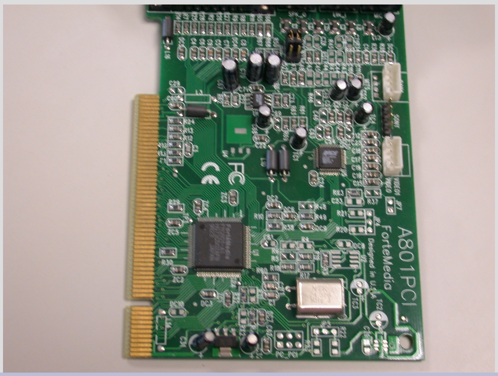
Tema 4. Propiedades eléctricas de los materiales: conductores y dieléctricos



Tema 4. Propiedades eléctricas de los materiales: conductores y dieléctricos

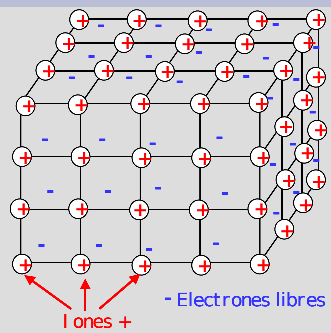
Objetivos:

- Conocer las características de los conductores cargados en equilibrio: campo eléctrico en el interior y en la superficie, potencial y distribución de cargas.
- Conocer las características de los fenómenos de influencia total entre conductores.
- Definir la capacidad de un condensador y saber calcular la capacidad equivalente de asociaciones de condensadores en serie y en paralelo.
- Entender los fenómenos de carga de un condensador y saber hallar la energía almacenada en un condensador.
- Saber discutir los efectos de un dieléctrico sobre la capacidad, carga, energía, diferencia de potencial y campo eléctrico de un condensador.

Tema 4. Conductores y dieléctricos

Introducción

- Modelo de conductor

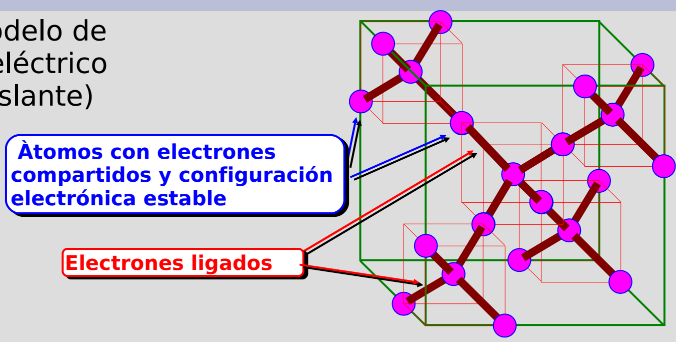


Modelo de conductor: red cristalina regular, compuesta de iones positivos, rodeados por una "nube de electrones", con gran capacidad de movimiento.

(metales, ...)

Introducción

- Modelo de dieléctrico (aislante)



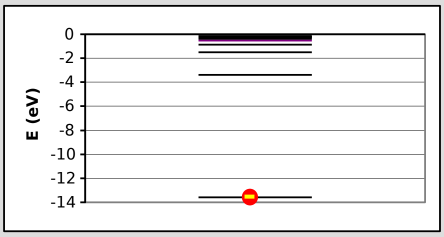
Modelo de dieléctrico (aislante): amorfo o red cristalina regular, los electrones se mantienen ligados a los núcleos de los átomos, con posibilidades de movimiento muy limitadas.

Teoría de bandas de energía

4.1

- Átomo de hidrógeno: $E_n = -\frac{\mu e^4}{(4\pi\varepsilon_0)^2 \, 2\hbar \, n^2} = -\frac{13{,}6 \text{ eV}}{n^2}$

$$\mu = \frac{Mm}{m+M}$$



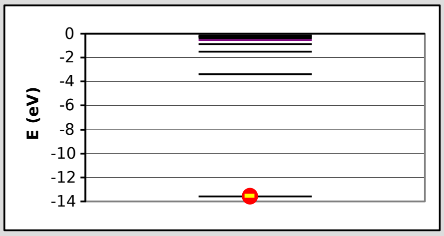
Energía de los 10 primeros niveles energéticos del átomo de hidrógeno, con un **electrón** en su **estado fundamental**

El **electrón-voltio** (eV) es una unidad para medir energía, muy utilizada en física atómica y nuclear. Se define como la energía que adquiere un electrón cuando se acelera mediante una diferencia de potencial de 1 V.

1 eV = 1,6 · 10^{-19} J

Teoría de bandas de energía

- Átomo de hidrógeno: $E_n = -\frac{\mu e^4}{(4\pi\varepsilon_0)^2\, 2\hbar\, n^2} = -\frac{13{,}6 \text{ eV}}{n^2}$

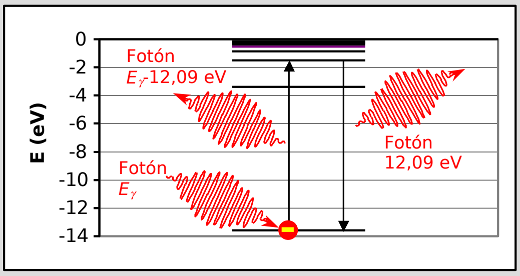


$\mu = \frac{Mm}{m+M}$

Energía de los 10 primeros niveles energéticos del átomo de hidrógeno, con un **electrón** en su **estado fundamental**

La energía que posee el electrón en el átomo se denomina **energía de ligadura**

Teoría de bandas de energía

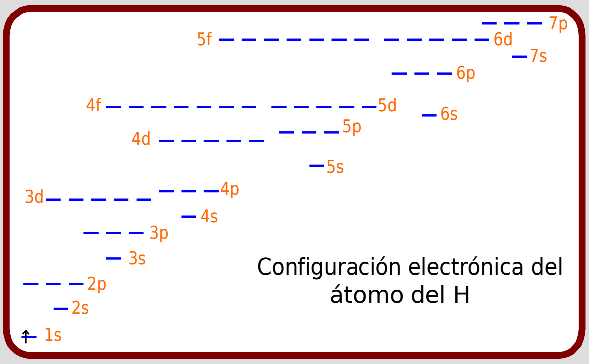


Excitación-desexcitación de un electrón en el átomo de hidrógeno

Si la energía que se aporta al átomo es mayor que la energía de ligadura del electrón, éste podrá "liberarse" del átomo, y entonces se dice que el átomo está ionizado. Por este motivo, a la energía de ligadura se le denomina también **energía de ionización**.

Teoría de bandas de energía

- Átomo de hidrógeno:

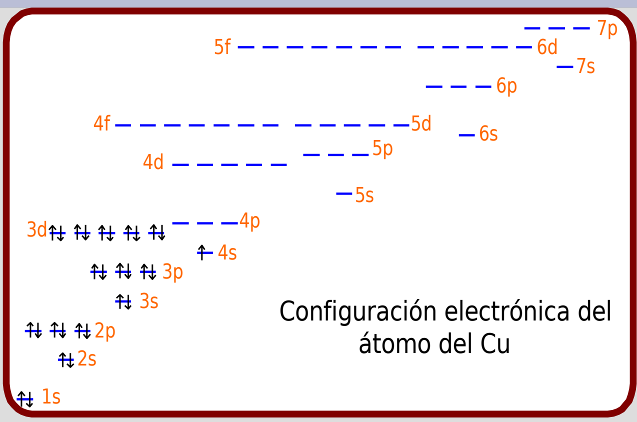


Configuración electrónica del átomo del H

Teoría de bandas de energía

Grupo	1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Periodo																			
1	1 H																		2 He
2	3 Li	4 Be												5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg												13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca		21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr		39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	*	71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	**	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Uun	111 Uuu	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo
			*	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
			**	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		

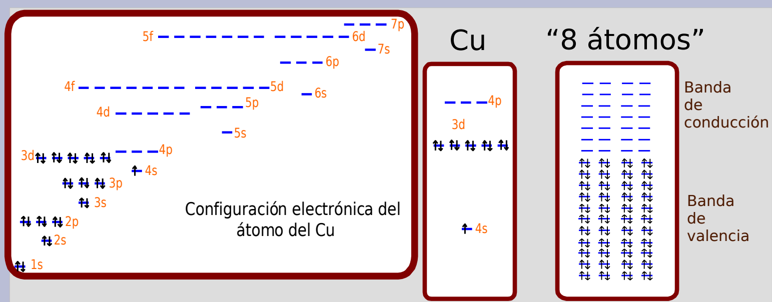
Teoría de bandas de energía



Configuración electrónica del átomo del Cu

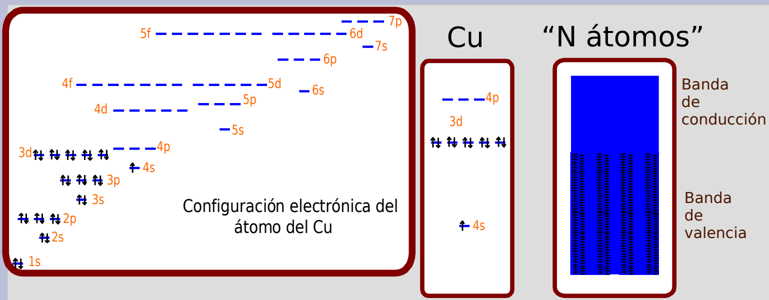
Cu (29 e-): $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 3d^{10}\ 4s^1$

Teoría de bandas de energía



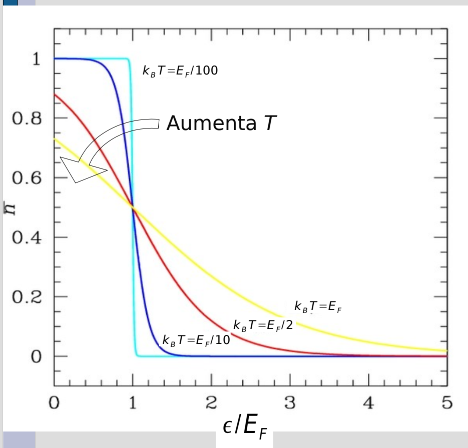
Niveles energéticos de la última capa del átomo de Cu aislado (izquierda), y de ocho átomos de cobre formando una hipotética estructura cristalina de "8 átomos" (derecha). La separación entre los niveles energéticos es meramente ilustrativa y no está dibujada a escala.

Teoría de bandas de energía



Niveles energéticos de la última capa del átomo de Cu aislado (izquierda), y de ocho átomos de cobre formando una hipotética estructura cristalina de "N átomos" (derecha). La separación entre los niveles energéticos es meramente ilustrativa y no está dibujada a escala.

Teoría de bandas de energía



Energía interna $U \propto k_B T$

Constante de Boltzmann

$k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \; J/K$

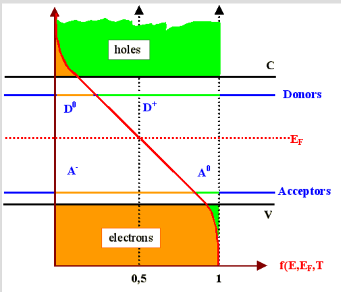
Función de distribución de Fermi-Dirac

$$n(\epsilon) = \frac{1}{1 + \exp[(\epsilon - E_F)/k_B T]}$$

Teoría de bandas de energía

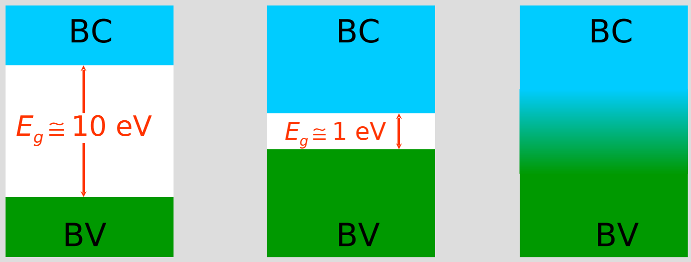
Función de distribución de Fermi-Dirac

Energía de Fermi, E_F



Teoría de bandas de energía

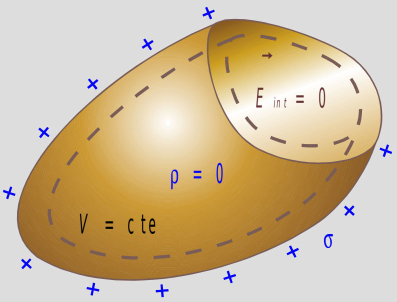
1C



Dieléctrico (aislante) | Semiconductor | Conductor

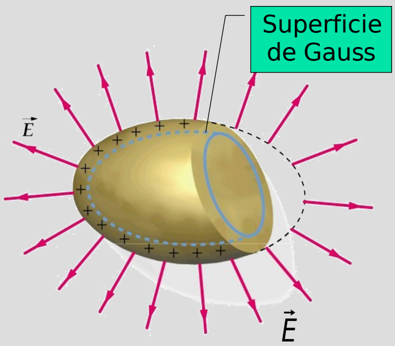
Conductores en equilibrio

- Conductor en **equilibrio electrostático**: no se tiene un movimiento neto de las cargas.
- El campo eléctrico es cero en cualquier punto del interior del conductor.



Conductores en equilibrio

- La carga en un conductor aislado reside sobre su superficie.



- $\vec{E} = 0$ en el interior

$$\varphi = \int \vec{E} \cdot d\vec{S} = 0$$

Teorema de Gauss

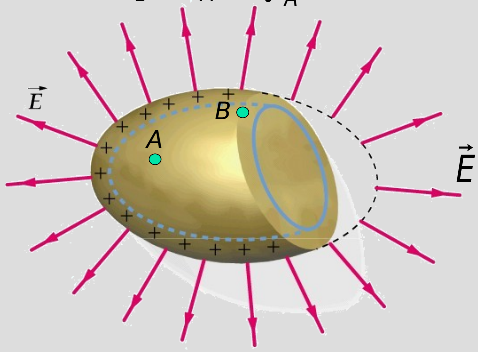
$$\varphi = \frac{\sum Q_i}{\varepsilon_0}$$

$Q_i = 0$

Conductores en equilibrio

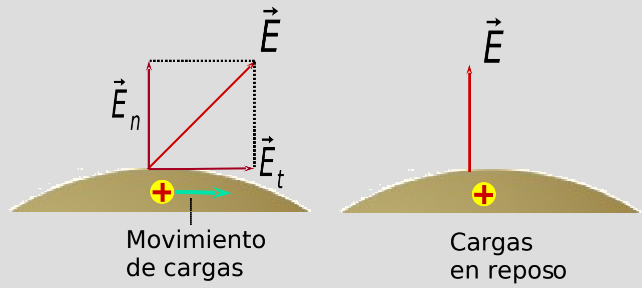
- Todo punto del conductor cargado en equilibrio está al mismo potencial.

$$V_B - V_A = -\int_A^B \vec{E}\cdot d\vec{\ell} = 0$$



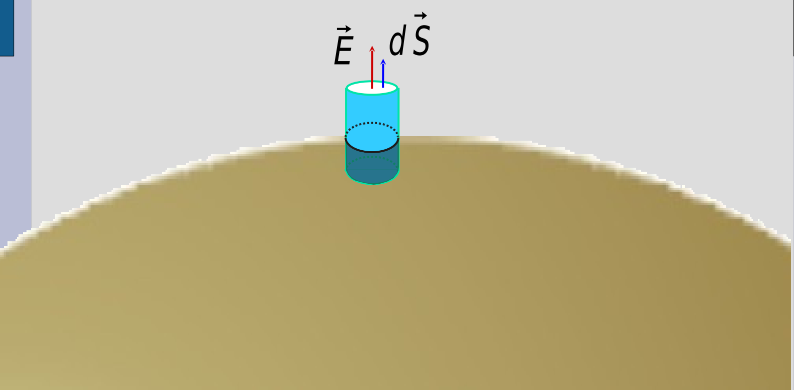
Conductores en equilibrio

- El campo eléctrico es perpendicular a la superficie del conductor.



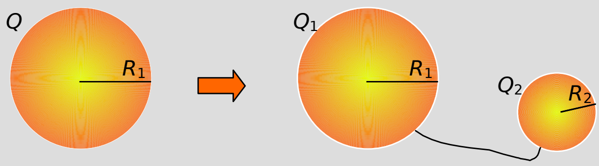
Conductores en equilibrio

- *Teorema de* Coulomb: en los puntos cercanos a la superficie del conductor: $E_n = \sigma / \varepsilon_0$



Ejemplo 4.1

Una esfera conductora, de radio R_1 y carga Q se une mediante un hilo conductor, de capacidad despreciable, a otra esfera de radio R_2 ($R_2 < R_1$), inicialmente descargada. Suponiendo que las esferas están lo suficientemente alejadas entre sí para que los fenómenos de influencia sean despreciables, calcula:
a) Cargas Q_1 y Q_2 de cada esfera; b) Potencial; c) Densidad superficial de carga en cada esfera; d) ¿Qué ocurre si $R_2 >> R_1$?



Ejemplo 4.1

a)

$$Q = Q_1 + Q_2$$

$$V = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 R_1} = \frac{Q_2}{4\pi\varepsilon_0 R_2} \Rightarrow Q_1 = \frac{QR_1}{R_1+R_2}, \quad Q_2 = \frac{QR_2}{R_1+R_2}$$

b)

$$V = V_1 = V_2 = \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0 R_1} = \frac{Q_2}{4\pi\varepsilon_0 R_2} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 (R_1+R_2)}$$

Ejemplo 4.1

c)

$$\sigma_1 = \frac{Q_1}{S_1} = \frac{QR_1}{4\pi R_1^2 (R_1+R_2)} = \frac{Q}{4\pi R_1 (R_1+R_2)}, \quad \sigma_2 = \frac{Q_2}{S_2} = \frac{Q}{4\pi R_2 (R_1+R_2)}$$

d)

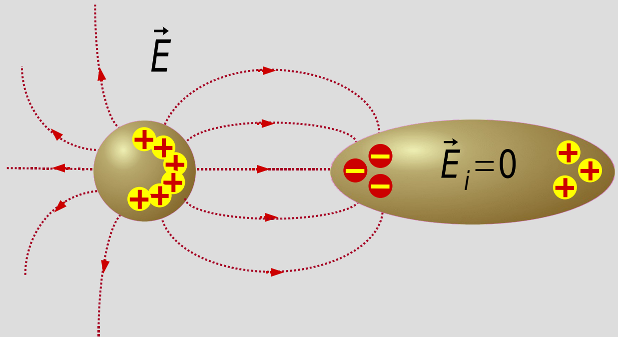
$$\lim_{R_2\to\infty} Q_1 = \lim_{R_2\to\infty}\left|\frac{QR_1}{R_1+R_2}\right| = 0$$

$$\lim_{R_2\to\infty} Q_2 = \lim_{R_2\to\infty}\left|\frac{QR_2}{R_1+R_2}\right| = Q$$

$$\lim_{R_2\to\infty} V = \lim_{R_2\to\infty}\left|\frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 (R_1+R_2)}\right| = 0$$

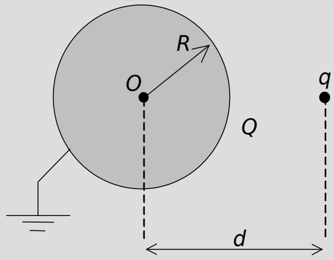
Influencia electrostática

- Cuando situamos alguna carga eléctrica en las proximidades de un conductor, dicha carga ejerce un fenómeno de influencia electrostática sobre el conductor.



Problema 11

11. Sea una esfera conductora, con centro en *O* y radio *R*. Dicha esfera, que se encuentra conectada a tierra (potencial nulo) está sometida a la influencia de una carga puntual *q*, situada a una distancia *d* de *O* (*d*>*R*). Calcula la carga que aparece en la esfera en función de *q*, *R* y *d*.

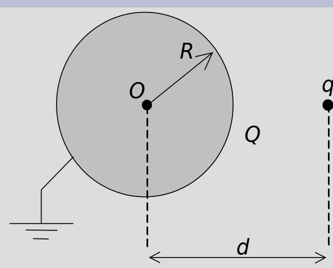


Problema 11

$$V_{QO}=\int \frac{dq}{4\pi\varepsilon_0 r}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0 R}\int dq=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{R}$$

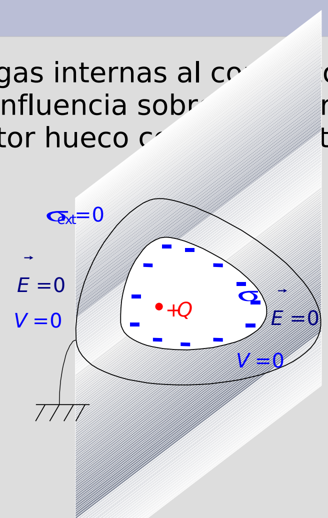
$$V_O=V_{QO}+V_{qO}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{Q}{R}+\frac{q}{d}\right)=0$$

$$Q=-\frac{qR}{d}$$



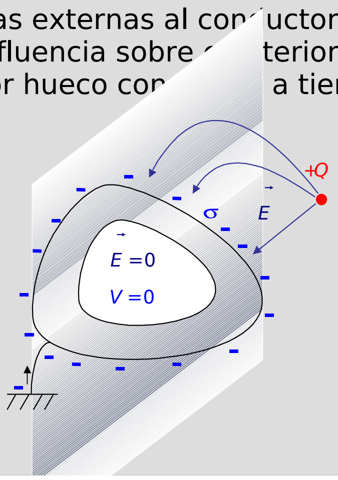
Pantallas

- Las cargas internas al co… or hueco no tienen influencia sobr… rior del conductor hueco c… tierra.

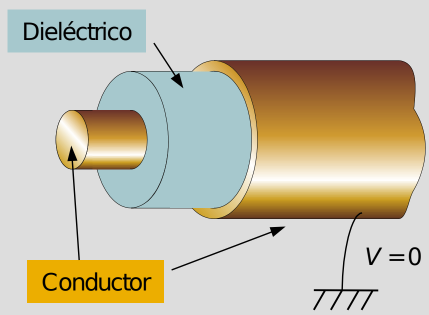


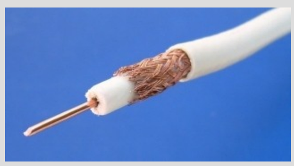
Pantallas

- Las cargas externas al con…uctor hueco no tienen influencia sobre … terior del conductor hueco con … a tierra.



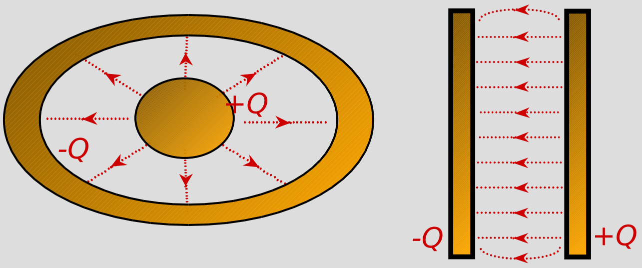
Pantallas





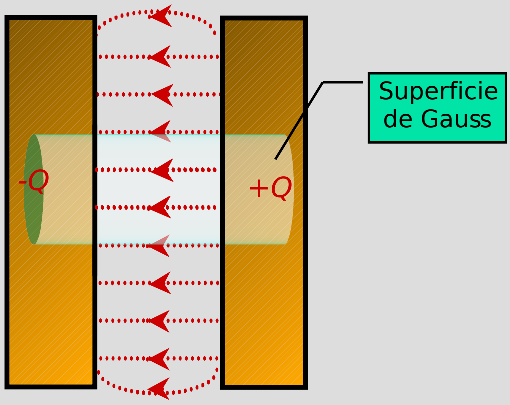
El condensador

- ***Influencia electrostática total:*** la influencia electrostática entre dos conductores se denomina total cuando todas las líneas de campo de un conductor atraviesan el otro.



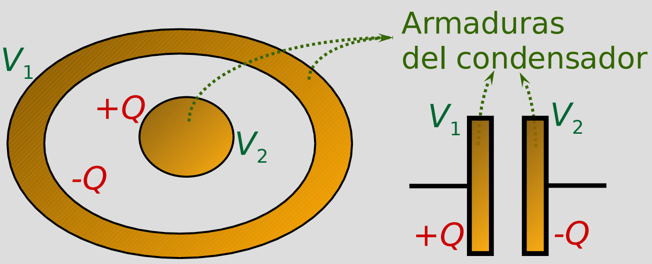
El condensador

- ***Influencia electrostática total:***



El condensador

- Sistema de dos conductores que se ejercen una influencia total.
- Almacenan carga eléctrica (y energía).



El condensador. Capacidad

- Capacidad de un condensador:

$$C = \frac{Q}{V_1 - V_2} = \frac{Q}{V_{12}}$$

Magnitud de la carga en cualquiera de las armaduras

Diferencia de potencial entre las armaduras

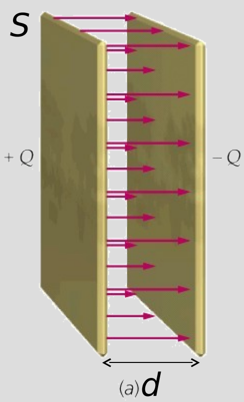
- En los circuitos eléctricos, el condensador se representa del siguiente modo:

- *Faradio:* es la unidad SI de capacidad.

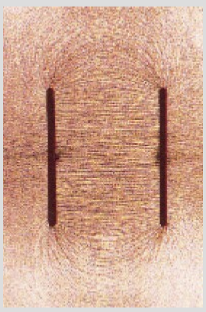
1F = 1C/V

El condensador

Condensador plano



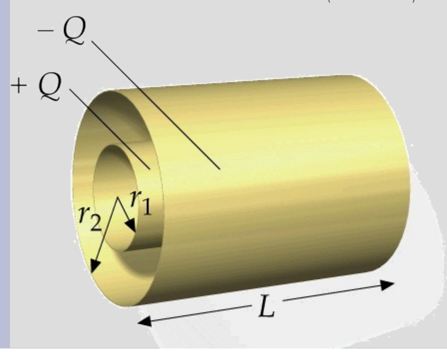
$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$$

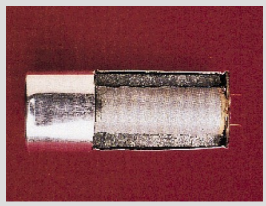


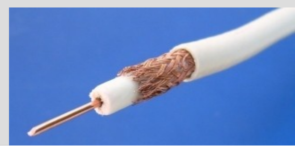
El condensador

Condensador cilíndrico

$$C = \frac{2\pi\,\varepsilon_0\,L}{\ln\left(r_2/r_1\right)}$$

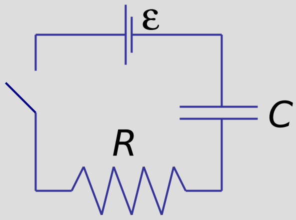






Circuit RC. Carga y descarga de un condensador

- El tiempo de carga de un condensador no es instantáneo.



Circuit RC. Carga y descarga de un condensador

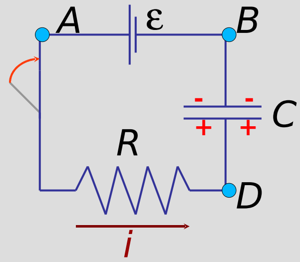
- El tiempo de carga de un condensador no es instantáneo.

$$(V_B - V_A) + (V_D - V_B) + (V_A - V_D) = 0$$

$$\varepsilon = V_R(t) + V_C(t)$$

$$\varepsilon = i(t)R + V_C(t) = \left[\frac{dq(t)}{dt}\right]R + \frac{q(t)}{C}$$

$$\left[\varepsilon - \frac{q(t)}{C}\right]\left[\frac{dt}{R}\right] = dq(t)$$

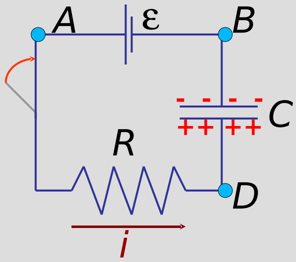


$$C = q(t)/V_C(t)$$

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$$

Circuit RC. Carga y descarga de un condensador

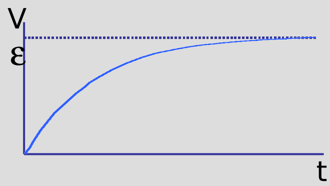
- El tiempo de carga de un condensador no es instantáneo.
- Diferencia de potencial en los bornes del condensador:



$$\left[\varepsilon - \frac{q(t)}{C}\right]\left[\frac{dt}{R}\right] = dq(t)$$

$$V(t) = \varepsilon\left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

$$t \to 0 \quad \Rightarrow \quad V = 0$$
$$t \to \infty \quad \Rightarrow \quad V = \varepsilon$$



Circuit RC. Carga y descarga de un condensador

Constante de tiempo

- **Carga** de un condensador:

$$C = q(t)/V_C(t)$$

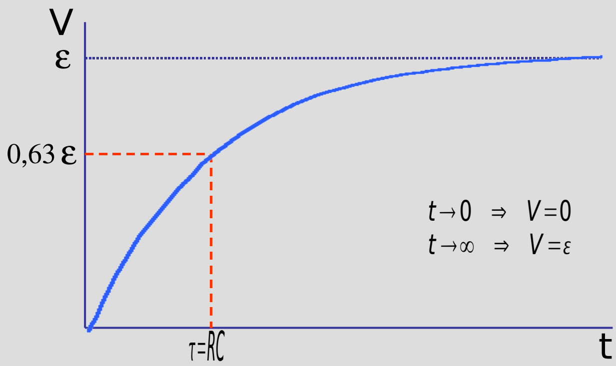
- Constante de tiempo: $\tau = RC$

$$V(\tau) = \varepsilon\left(1 - e^{-RC/RC}\right) = \varepsilon \cdot 0{,}63$$

- Tiempo transcurrido cuando el potencial alcanza el 63% del valor máximo.

Circuit RC. Carga y descarga de un condensador

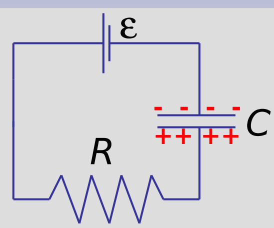
Constante de tiempo



$$t \to 0 \quad \Rightarrow \quad V = 0$$
$$t \to \infty \quad \Rightarrow \quad V = \varepsilon$$

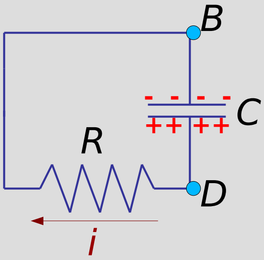
Circuit RC. Carga y descarga de un condensador

- El tiempo de descarga tampoco es instantáneo.



Circuito RC. Carga y descarga de un condensador

- El tiempo de descarga tampoco es instantáneo.



$$(V_D - V_B) + (V_B - V_D) = 0$$

$$\frac{q(t)}{C} - i(t)R = 0$$

$$\boxed{dq(t) < 0}$$

$$\frac{q(t)}{C} = -\frac{dq(t)}{dt}R$$

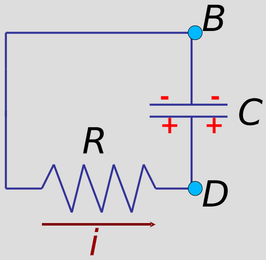
$$\frac{dq(t)}{q(t)} = -\frac{dt}{RC}$$

$$C = q(t)/V_C(t)$$

$$i(t) = -\frac{dq(t)}{dt}$$

Circuito RC. Carga y descarga de un condensador

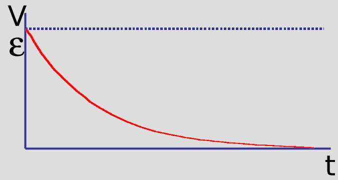
- El tiempo de descarga tampoco es instantáneo.
- Diferencia de potencial en los bornes del condensador:



$$\frac{dq(t)}{q(t)} = -\frac{dt}{RC}$$

$$V(t) = \varepsilon e^{-t/RC}$$

$$t \to 0 \quad \Rightarrow \quad V = \varepsilon$$
$$t \to \infty \quad \Rightarrow \quad V = 0$$



Circuito RC. Carga y descarga de un condensador

Constante de tiempo

- **Descarga** de un condensador:

$$V(t) = \varepsilon e^{-t/RC}$$

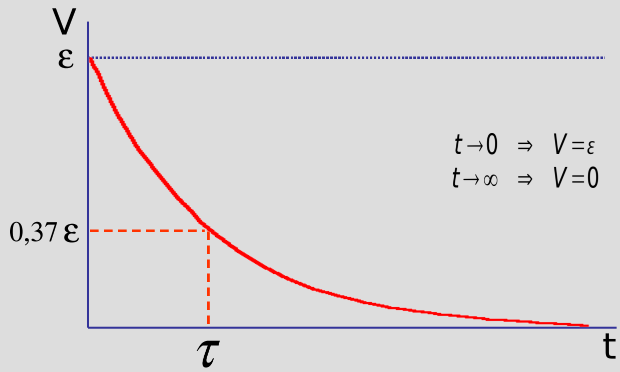
- Constante de tiempo: $\tau = RC$

$$V(\tau) = \varepsilon e^{-RC/RC} = \varepsilon \cdot 0{,}37$$

- Tiempo transcurrido cuando el potencial alcanza el 37% del valor máximo.

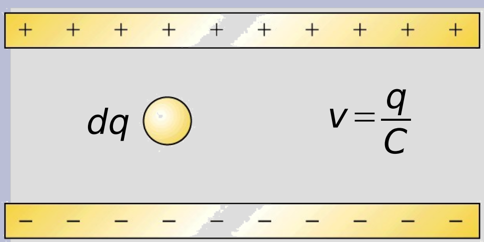
Circuito RC. Carga y descarga de un condensador

Constante de tiempo



$$t \to 0 \quad \Rightarrow \quad V = \varepsilon$$
$$t \to \infty \quad \Rightarrow \quad V = 0$$

Energía almacenada por un condensador



$$v = \frac{q}{C}$$

$$du = dq\,v = dq\,\frac{q}{C}$$

$$U = \int_0^U du = \int_0^Q dq\,\frac{q}{C}$$

$$U = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$$

$$U = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2}QV = \frac{1}{2}CV^2$$

Densidad de energía

- Energía de un condensador plano:

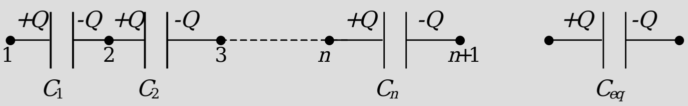
$$U = \frac{1}{2}\varepsilon E^2 (S\,d)$$

- Densidad de energía de un campo electrostático:

$$u_e = \frac{1}{2}\varepsilon E^2 = \frac{1}{2}\varepsilon_r \varepsilon_0 E^2$$

Asociación de condensadores

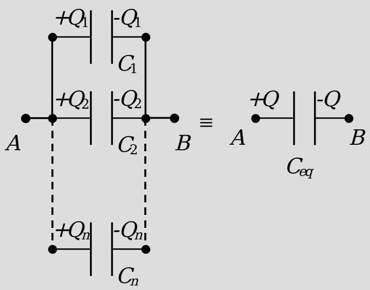
- Condensadores en serie.



$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n} = \sum_i \frac{1}{C_i}$$

Asociación de condensadores

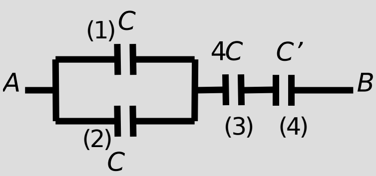
- Condensadores en paralelo.



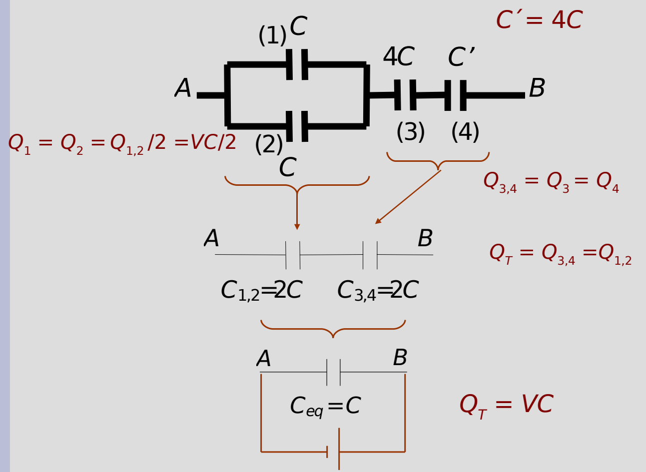
$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \cdots + C_n = \sum_i C_i$$

Ejemplo 4-4

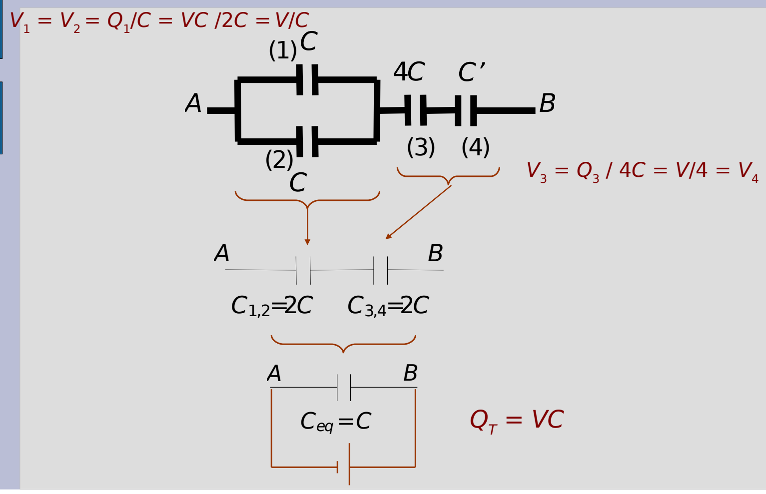
4.4. Entre los puntos *A* y *B* de la asociación de condensadores de la figura se aplica una diferencia de potencial *V*. El condensador 4 tenía una capacidad *C* vacío, pero se rellena de dieléctrico de $\varepsilon_r = 4$ antes de aplicar la diferencia de potencial *V*. Halla la capacidad *C'* de este condensador, la carga y la diferencia de potencial en cada condensador.



Ejemplo 4-4

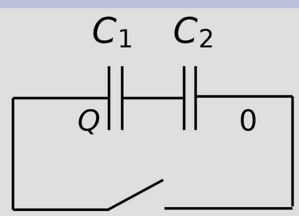


Ejemplo 4-4



Problema 6

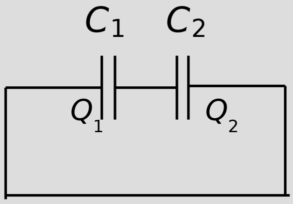
6. Un condensador de capacidad C_1, cargado con carga *Q*, se conecta con otro de capacidad C_2, inicialmente descargado, tal como se indica en la figura. Calcula el valor de la carga en cada condensador antes y después de cerrar el interruptor.



Problema 6

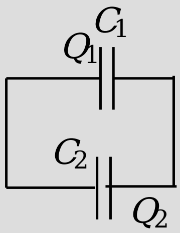
$Q = Q_1 + Q_2$

$\frac{Q_1}{C_1} = \frac{Q_2}{C_2}$



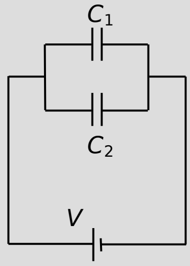
$$Q_2 = \frac{QC_2}{(C_1 + C_2)}$$

$$Q_1 = \frac{QC_1}{(C_1 + C_2)}$$



Problema 8

8. Se dispone de dos condensadores de capacidad C_1 y C_2, tras conectarlos en paralelo se aplica a la asociación una diferencia de potencial V. Calcula la carga que adquiere cada condensador (Q_1 y Q_2) así como la diferencia de potencial entre las placas de cada uno de ellos (V_1 y V_2).

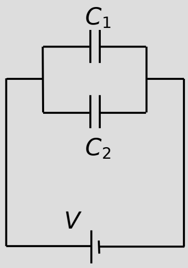


Problema 8

$$V_1 = V_2 = V$$

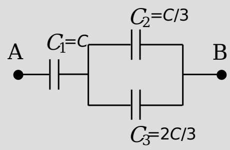
$$Q_1 = C_1V_1 = C_1V$$

$$Q_2 = C_2V_2 = C_2V$$



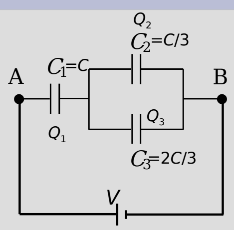
Problema 9

9. En la asociación de condensadores de la figura, indica en qué condensador se almacena:
a) la mayor carga, y
b) la menor carga,
al aplicar entre *A* y *B* una d.d.p. *V*.
($C_1 = C$; $C_2 = C/3$; $C_3 = C(2/3)$).



Problema 9

9. En la asociación de condensadores de la figura, indica en qué condensador se almacena:
a) la mayor carga, y
b) la menor carga,
al aplicar entre *A* y *B* una d.d.p. *V*.
($C_1 = C$; $C_2 = C/3$; $C_3 = C(2/3)$).



$Q_1 = Q_2 + Q_3$ C_1 mayor carga

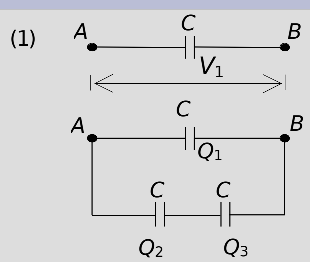
$V_2 = V_3$

$C_2 = \frac{Q_2}{V_2} \Rightarrow Q_2 = C_2V_2 = CV_2/3$ C_2 menor carga

$C_3 = \frac{Q_3}{V_3} \Rightarrow Q_3 = C_3V_3 = 2CV_2/3$

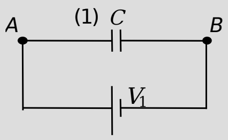
Problema 15

15. Sea un condensador (1) de capacidad C sometido a una diferencia de potencial V_1, y otros dos de igual capacidad y descargados. Tras aislar el primer condensador se asocia a los otros dos tal como se muestra en la figura. Calcula las cargas que adquieren los tres condensadores, Q_1, Q_2, y Q_3.

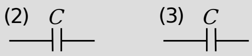


Problema 15

1



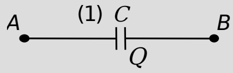
$$Q = CV_1$$



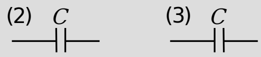
$$Q = 0 \qquad Q = 0$$

Problema 15

2



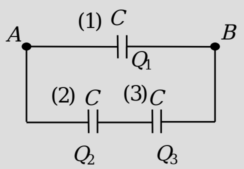
$$Q = CV_1$$



$$Q = 0 \qquad Q = 0$$

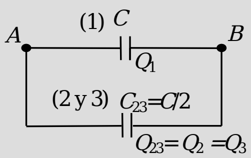
Problema 15

3



$$\frac{1}{C_{23}} = \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{2}{C} \quad \Rightarrow \quad C_{23} = \frac{C}{2}$$

$$Q_2 = Q_3 = Q_{23}$$



Problema 15

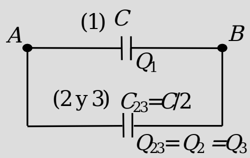
3

$$Q = Q_1 + Q_{23}$$

$$\frac{Q_1}{C} = \frac{Q_{23}}{C/2}$$

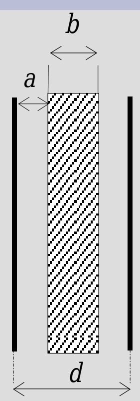
$$Q_2 = Q_3 = Q_{23} = Q/3 = \frac{1}{3}V_1C$$

$$Q_1 = 2Q_{23} = \frac{2}{3}V_1C$$



Problema 7

7. Una lámina de cobre de espesor *b* se introduce dentro de las armaduras planas de un condensador de superficie *S*, tal como se indica en la figura. ¿Cuál es la capacidad del condensador antes y despise de introducir la lámina?

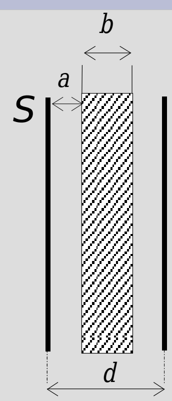


Problema 7

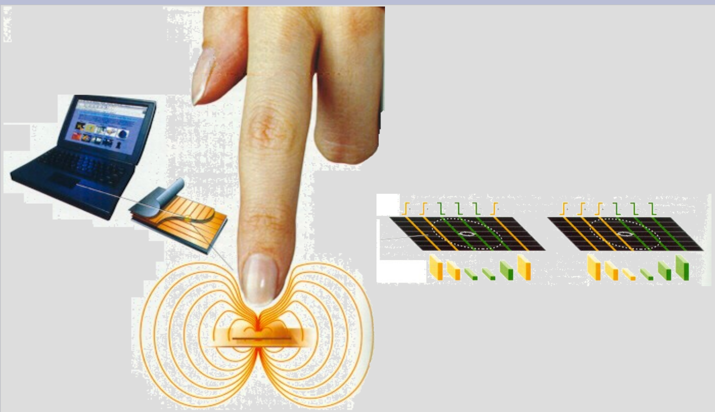
$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 S}{d}$$

$$C = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)^{-1} = \left(\frac{1}{\frac{\varepsilon_0 S}{a}} + \frac{1}{\frac{\varepsilon_0 S}{d-b-a}}\right)^{-1} = \frac{\varepsilon_0 S}{d-b}$$

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 S}{a} \qquad C_2 = \frac{\varepsilon_0 S}{d-b-a}$$



Aplicación: puntero táctil



J. Gerpheide
*Investigación y Ciencia. Septiembre de 1998.

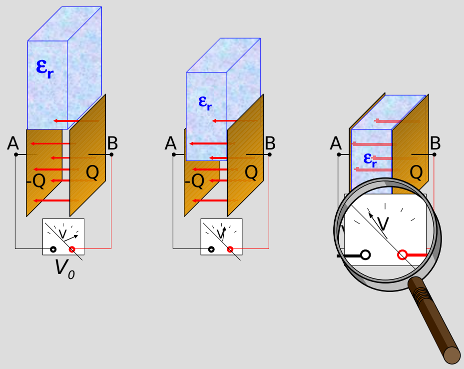
Dieléctricos

Condensador con dieléctrico

V_0

E_0

C_0



$$V=\frac{V_0}{\varepsilon_r}$$

$$E=\frac{E_0}{\varepsilon_r}$$

$$C=\varepsilon_r C_0$$

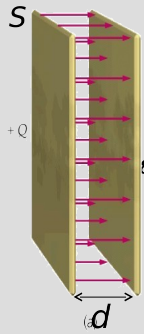
Dieléctricos

- Constante dieléctricas y resistencias a la ruptura del dieléctrico de diversos

Material	Constante Dieléctrica κ	Resistencia del Dieléctrico, kV/mm
Aceite de transformador	2,24	12
Aire	1,00059	3
Baquelita	4,9	24
Mica	5,4	10 – 100
Neopreno	6,9	12
Papel	3,7	16
Parafina	2,1 – 2,5	10
Plexigás	3,4	40
Poliestireno	2,55	24
Porcelana	7	5,7
Vidrio (Pyrex)	5,6	14

Dieléctricos

- Capacidad de un condensador plano lleno de un dieléctrico de constante ε_r:



$$C=\frac{\varepsilon_r\,\varepsilon_0\,S}{d}=\frac{\varepsilon\,S}{d}$$

$\varepsilon_r\varepsilon_0=\varepsilon$: Permitividad del dieléctrico.

Dieléctricos

- En general, las leyes de la electrostática en presencia de un dieléctrico son las mismas que hemos estudiado en el vacío, sustituyendo la constante ε_0, por $\varepsilon_r\,\varepsilon_0$.

$$\varepsilon_0 \rightarrow \varepsilon_r\,\varepsilon_0$$

Dieléctricos

$$\varepsilon_0 \rightarrow \varepsilon_r\,\varepsilon_0$$

$$\vec{E}=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_V\frac{dq}{r^2}\vec{u}_r \rightarrow \frac{1}{4\pi\varepsilon_r\,\varepsilon_0}\int_V\frac{dq}{r^2}\vec{u}_r$$

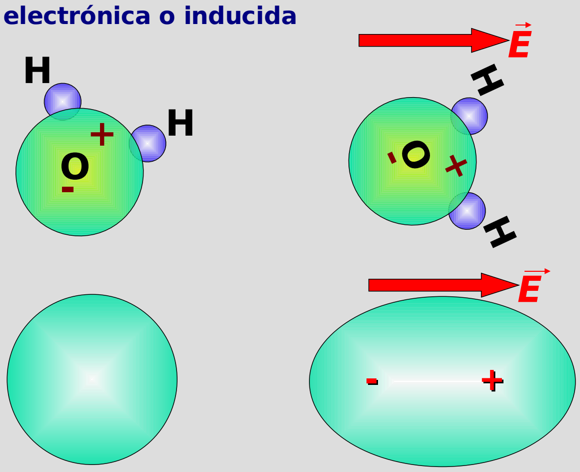
$$V=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_V\frac{dq}{r} \rightarrow V=\frac{1}{4\pi\varepsilon_r\,\varepsilon_0}\int\frac{dq}{r}$$

$$\phi=\frac{Q_{interior}}{\varepsilon_0} \rightarrow \phi=\frac{Q_{interior}}{\varepsilon_r\,\varepsilon_0}$$

. . .

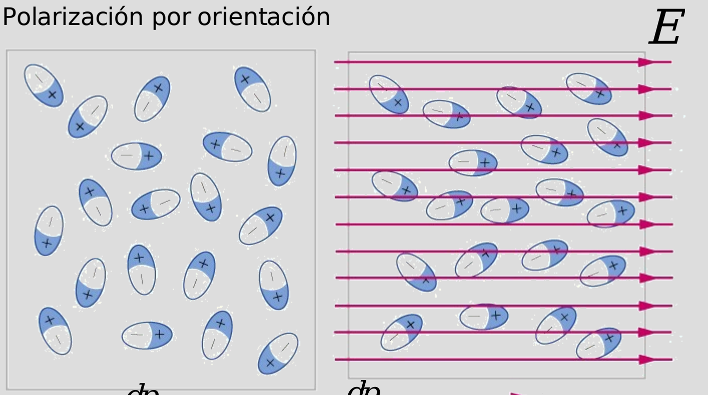
Dieléctricos. Polarización

Polarización electrónica o inducida



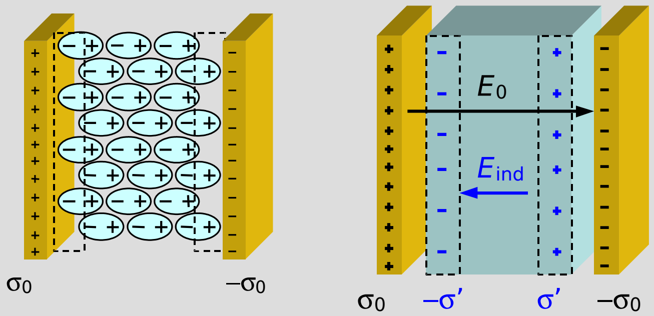
Dieléctricos. Polarización

Polarización por orientación



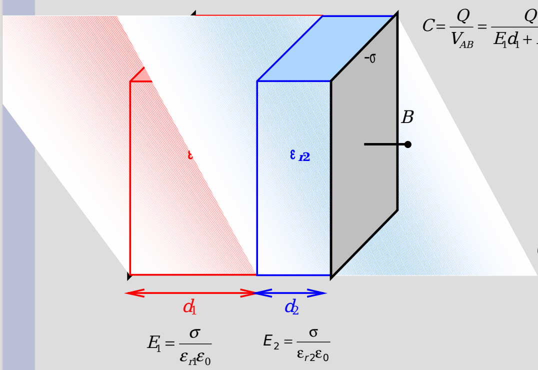
$$\frac{dp}{dv}=0 \qquad \frac{dp}{dv}\neq 0 \qquad E_{ind}$$

Dieléctricos. Polarización



$$\sigma' = \sigma_0\left(1-\frac{1}{\varepsilon_r}\right)$$

Dieléctricos. Polarización



$$C=\frac{Q}{V_{AB}}=\frac{Q}{E_1d_1+E_2d_2}=\frac{Q}{\frac{d_1\sigma}{\varepsilon_{r1}\varepsilon_0}+\frac{d_2\sigma}{\varepsilon_{r2}\varepsilon_0}}=\varepsilon_0\frac{S}{\frac{d_1}{\varepsilon_{r1}}+\frac{d_2}{\varepsilon_{r2}}}$$

$$E_1=\frac{\sigma}{\varepsilon_{r1}\varepsilon_0} \qquad E_2=\frac{\sigma}{\varepsilon_{r2}\varepsilon_0}$$

$$C=\varepsilon_0\frac{S}{\sum_{i=1}^{n}\frac{d_i}{\varepsilon_{ri}}}$$