

## **5. PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LOS MATERIALES**

- 2.1 Conductividad (resistividad) de los metales**
- 2.2 Conducción en aleaciones**
- 2.3 Fenómenos termoeléctricos**
- 2.4 Superconductividad**
- 2.5 Aislantes y Semiconductores**
- 2.6 Propiedades dieléctricas**
- 2.7 Ferroelectricidad y piezoelectricidad**

- Se explorarán las respuestas de los materiales a la aplicación de un campo eléctrico.**
- Mecanismos de conducción**
- Estructura de bandas**
- Metales, semiconductores y aisladores**
- Fenómenos peculiares de la ferroelectricidad y piezoelectricidad**



## 2.1 CONDUCTIVIDAD DE LOS METALES

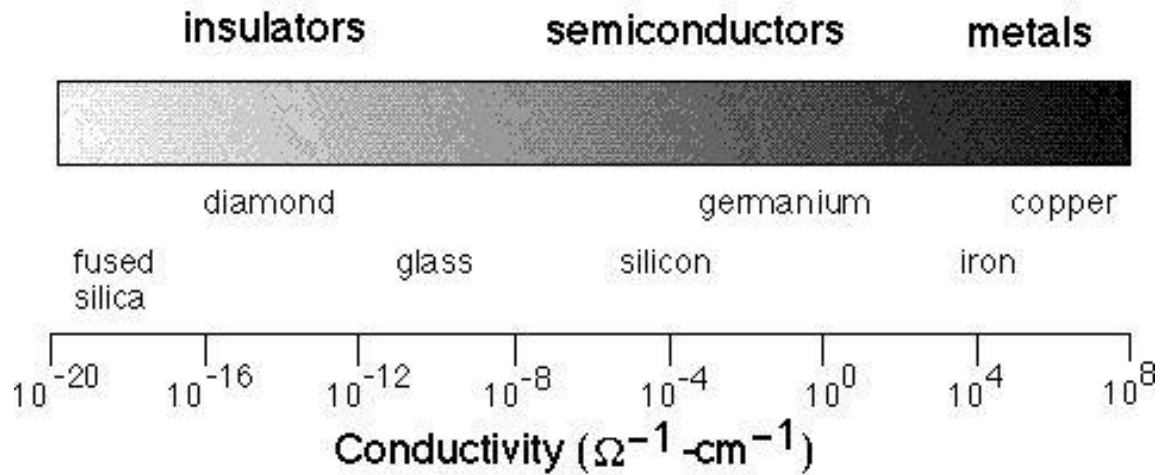
### 2.1.1 PORTADORES DE CARGA Y CONDUCCIÓN

- La conducción de carga en los materiales la realizan los portadores de carga.
- Ejemplo más simple: el electrón,  $q = -0,16 \times 10^{18} \text{ C}$
- Concepto más abstracto: el hueco del e-,  $q = +0,16 \times 10^{18} \text{ C}$

#### a) El modelo de Drude (1900)

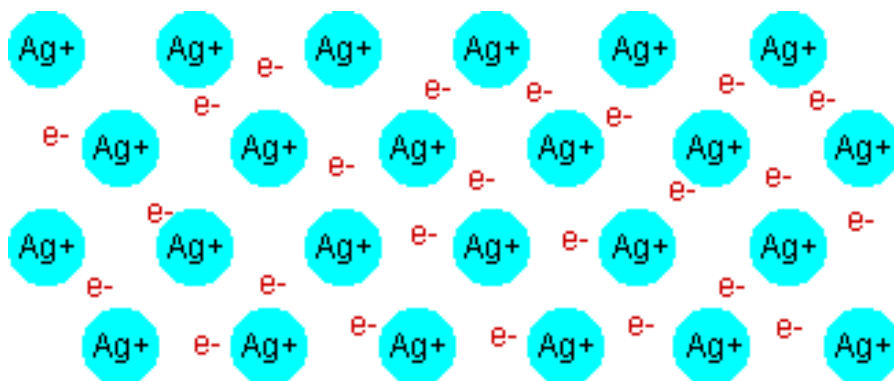
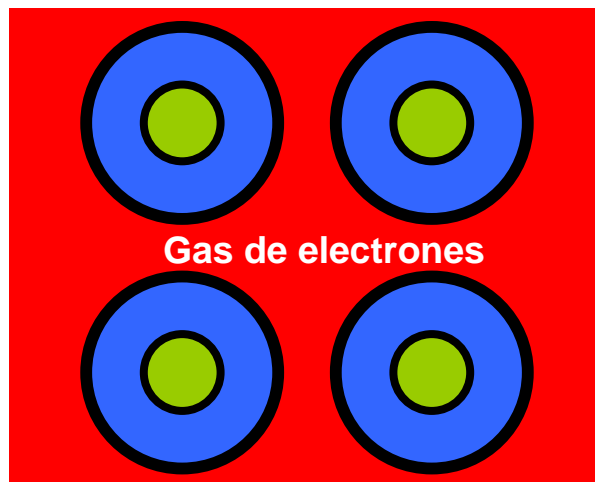
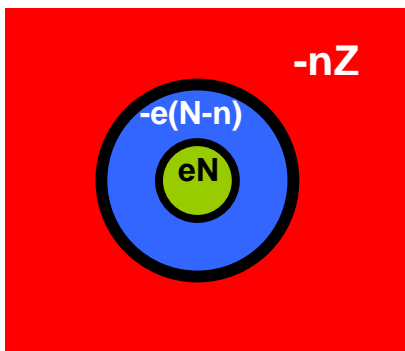
- Permite determinar variables de interés del problema de conducción en metales.
- Observación: e- no acelera eternamente en el conductor en presencia de E
  - **➤** debe existir fricción interna
  - **➤** Ley de Ohm:  $J = \sigma E$   
( $\sigma$ : conductividad eléctrica,  $\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ )

# Electrical Conductivity



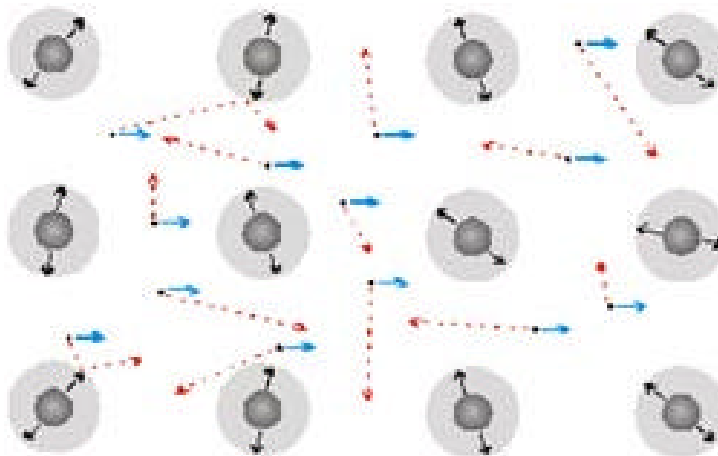
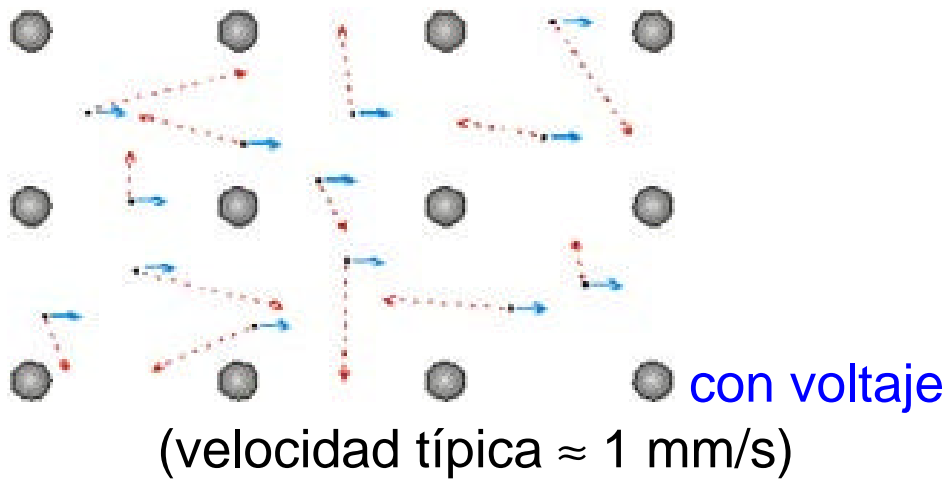
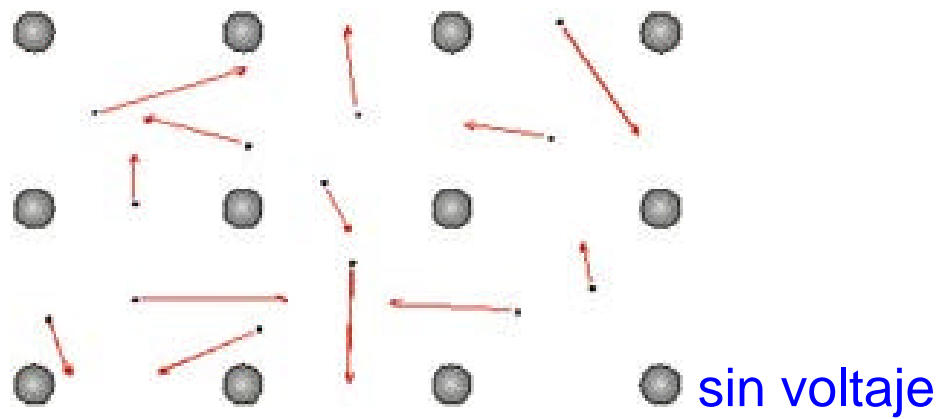
© 1995 by the Division of Chemical Education, Inc., American Chemical Society.  
Reproduced with permission from Solid-State Resources.

<b>Metales</b>	<b><math>\gg 10^7 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}</math></b>
<b>Semiconductores</b>	<b><math>10^{-6} - 10^4 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}</math></b>
<b>Aislantes</b>	<b><math>10^{-10} - 10^{-20} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}</math></b>



## Hipótesis modelo de Drude:

- Los  $e^-$  están libres, no sienten potenciales dentro del cristal (=metal).
- Los  $e^-$  son independientes (interacciones  $e^-e^-$  son despreciables).
- La población de niveles electrónicos descrita por distribución de Maxwell-Boltzmann.
- Los  $e^-$  están confinados al metal.



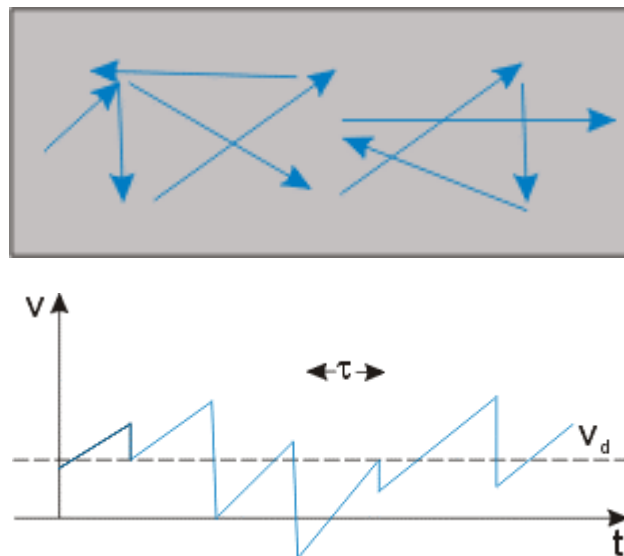
Movimiento de e<sup>-</sup> se describe como el de partículas clásicas:

- tiempos de relajación (t promedio entre colisiones)
- colisiones provocan equilibrio térmico
- colisiones son instantáneas y alteran bruscamente (aleatoriamente) la dirección de vuelo del e<sup>-</sup>

• Densidad de corriente, **J**:

$$\mathbf{J} = q\mathbf{v} = (-ne)\mathbf{v}_m$$

Donde  $\mathbf{v}_m$  es velocidad media de los electrones (velocidad de arrastre).



- Después de cada choque la partícula tendrá velocidad  $\vec{v}_i$ :

$$\vec{v}_i = (\vec{v}_o)_i + \vec{a}_i(t_{i+1} - t_i), \quad \text{donde } \vec{a} = -e\vec{E}/m$$

$$\Rightarrow \vec{v}_{media} = \sum_i^n \frac{\vec{v}_i}{n} = \underbrace{\sum_i \left( \frac{(\vec{v}_o)_i}{n} \right)}_{=0} + \underbrace{\sum_i \left( \vec{a}_i \frac{(t_{i+1} - t_i)}{n} \right)}_{=a \sum_i \left( \frac{(t_{i+1} - t_i)}{n} \right) = at}$$

$$\therefore \vec{v}_m = \vec{a}t$$

- i.e. se reconoce la ley de Ohm:  $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$

$$\mathbf{s} = ne^2 \mathbf{t}/m$$

- Como

$$\mathbf{m} = \mathbf{v}_m / \mathbf{t}$$

$$\mathbf{P} \quad \mathbf{s} = n \text{ lel } \mathbf{m}$$

- Observaciones:

- Se estableció relación lineal entre  $\mathbf{J}$  y  $\mathbf{E}$ .
- Todos los parámetros se conocen, excepto  $\mathbf{t}$

$$\mathbf{t} = \mathbf{sm}/ne^2$$

## CONDUCTIVIDADES ELÉCTRICAS ( $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ )

Plata	$6,8 \times 10^7$
Cobre	$6,0 \times 10^7$
Oro	$4,3 \times 10^7$
Aluminio	$3,8 \times 10^7$
Hierro	$1,0 \times 10^7$
Latón (70% Cu-30% Zn)	$1,6 \times 10^7$
Acero al carbono	$0,6-0,9 \times 10^7$
Acero inoxidable	$0,2 \times 10^7$



- **EJEMPLO: Cu a temperatura ambiente.**

- $\sigma = 6 \times 10^7 \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$
- $m = 9,1035 \times 10^{-31} \text{ kg}$
- $e = 1,60219 \times 10^{-19} \text{ C}$
- $n = 104 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$

$$\Rightarrow \mathbf{t_{Cu} = sm/ne^2 = 1,98 \times 10^{-14} \text{ s}}$$

- **CAMINO LIBRE MEDIO:** distancia entre colisiones

$$\lambda = v_m \tau$$

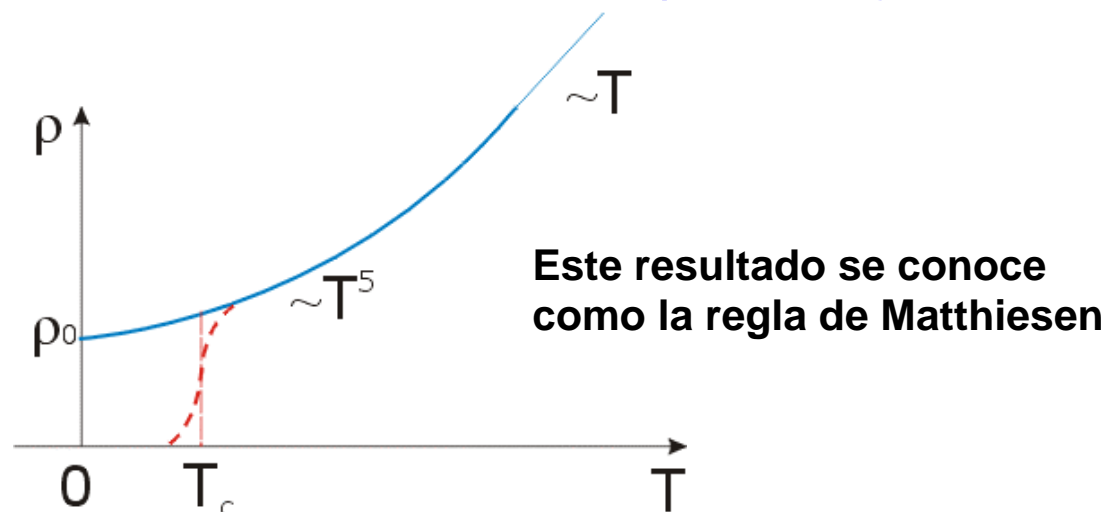
Suponiendo que

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m (v_m)^2 &= (3/2) kT \\ \Rightarrow v_m &\approx 10^5 \text{ ms}^{-1} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \lambda \approx 0,1\text{-}1 \text{ nm} \quad \checkmark \quad (\text{espaciado interatómico})$$

Otro resultado:  $\sigma \propto T^{-1/2}$  ✗

(experimentalmente se encuentra que  $\sigma \propto T$ )



### PROBLEMA

Si suponemos que la conductividad del Cu se debe exclusivamente a electrones libres ( $\mu_{Cu} = 3,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )

$$\Rightarrow \sigma = nq\mu \Rightarrow n = \frac{\sigma}{\mu q}$$

$$\therefore n = \frac{5,0 \times 10^7 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}}{3,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{V}^{-1}\text{s}^{-1} \times 0,16 \times 10^{-18} \text{ C}}$$

$$n_{Cu} = 104 \times 10^{27} \text{ m}^{-3}$$

		$m_e^*/m_0$
METALES	Al	1,2
	Cu	1,0
	Zn	0,85
SEMICONDUCTORES	Si	0,19
	GaAs	0,063
	CdS	0,2
AISLADORES : no interesa		

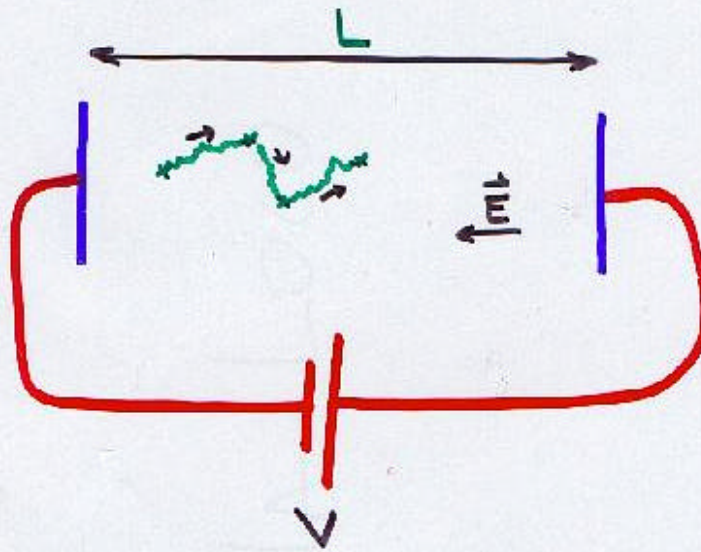
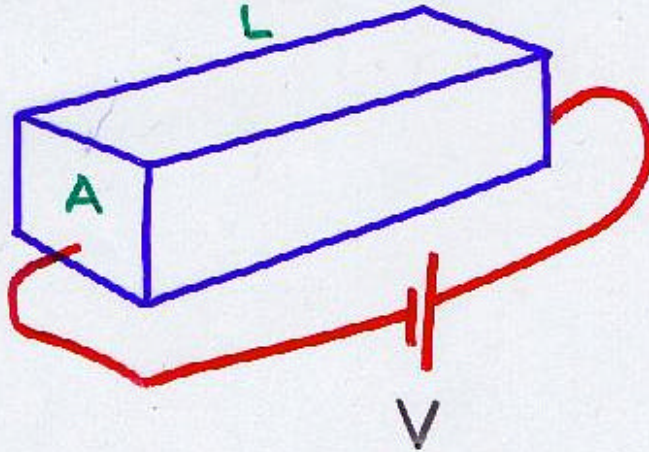
¿Cuál es la diferencia entre velocidad termal y velocidad de arrastre?

- $V_t$  : aleatoria
- $V_a$  : dirección opuesta a  $\vec{E}$  (en  $e^-$ )

$$V_t \approx \sqrt{2kT/m_e^*} \stackrel{300\text{ K}}{=} 1 \times 10^5 \text{ m/s}$$

$$V_a \propto E$$

## b) ELECTRONES EN SÓLIDOS





Ejemplo : En un sólido sin colisiones,  
calcule  $t$  requerido para  
que el  $e^-$  adquiera una  
velocidad de  $1 \times 10^5 \text{ m/s}$   
si  $E = 1 \times 10^3 \text{ V/m}$ .

- Supongo  $m_e^* = m_0 = 0,91 \times 10^{-30} \text{ kg}$

- $F = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{m \Delta v}{F}$

- $F = -qE$  ( $q$ : carga del  $e^-$ )

$$\Rightarrow \Delta t = \frac{(0,91 \times 10^{-30} \text{ kg})(1 \times 10^5 \text{ m/s})}{(1,6 \times 10^{-19} \text{ C})(1 \times 10^3 \text{ V/m})}$$

$$\Delta t = 0,57 \times 10^{-9} \text{ s} //$$

## 2.2. CONDUCCIÓN EN REACCIONES

### Fuentes de resistencia

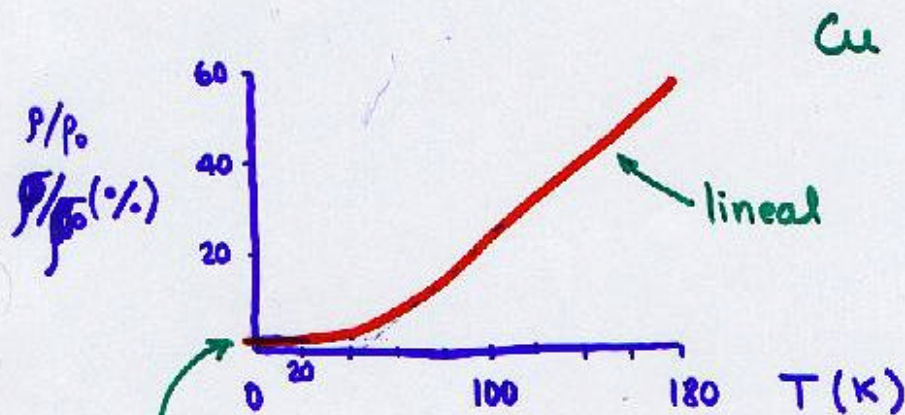
i)• La existencia de  $\tau$  se debe a :

1. vibraciones atómicas por agitación térmica
2. presencia de defectos geométricos o químicos
  - vacancias
  - átomos intersticiales
  - dislocaciones
  - bordes de grano
  - impurezas
  - etc.
3. Efectos de superficie o de borde  
Ej.: películas delgadas





## ii) Evidencia experimental (metales)



$\rho(\text{residual}) \neq 0$

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha (T - T_0)]$$

1. comportamiento lineal ( $> 70 K$ )
2. resistividad residual ( $T=0K$ )  $\neq 0$   
↳ hasta 15 K
3. Sobre 20 K : **2 contribuciones**

⇒ calcular pbb de dispersión (scattering)

$$\rho_{bb} \propto \frac{1}{\tau}$$

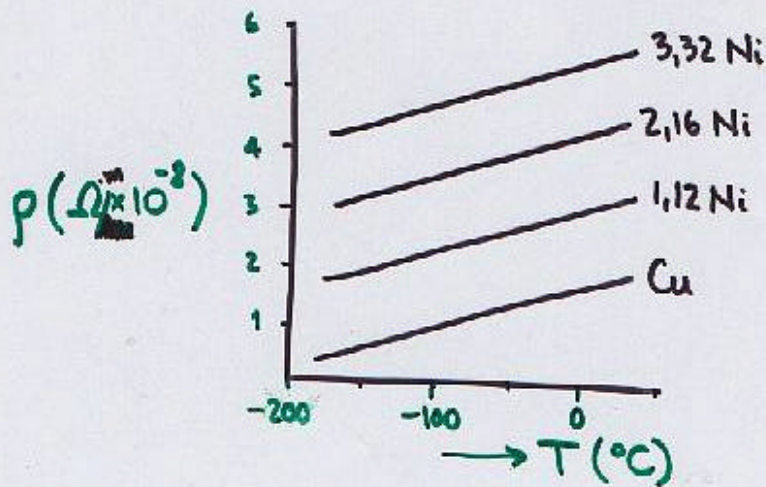
$$\Rightarrow \boxed{\frac{1}{\tau_{\text{total}}(T)} = \frac{1}{\tau_R(T)} + \frac{1}{\tau_T(T)}}$$

$\rho_R$       defectos      termal

$$\frac{1}{\sigma} \Rightarrow \rho = \frac{m^*}{n e^2} \left( \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_T} \right)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_R + \rho_T} \quad \boxed{\rho = \rho_R + \rho_T} = \frac{1}{\frac{1}{\sigma_R} + \frac{1}{\sigma_T}}$$

- La presencia de 2 contribuciones en una aleación : EFFECTO DE LA COMPOSICIÓN



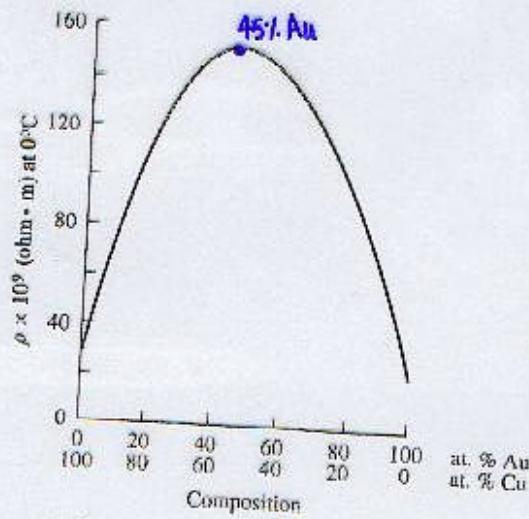
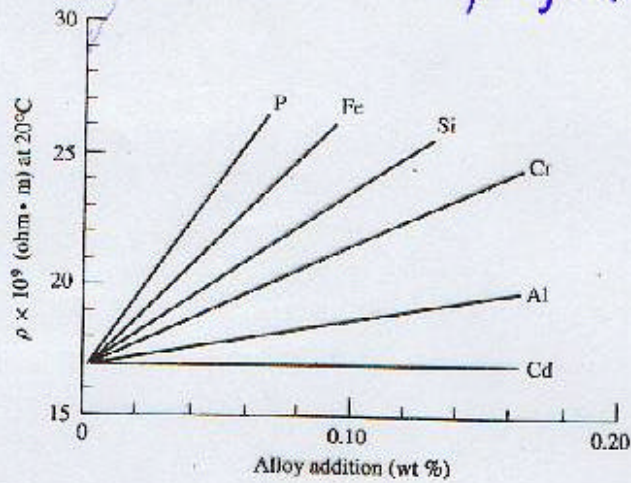


## EFFECTO DE LA COMPOSICIÓN SOBRE $\rho$ EN METALES

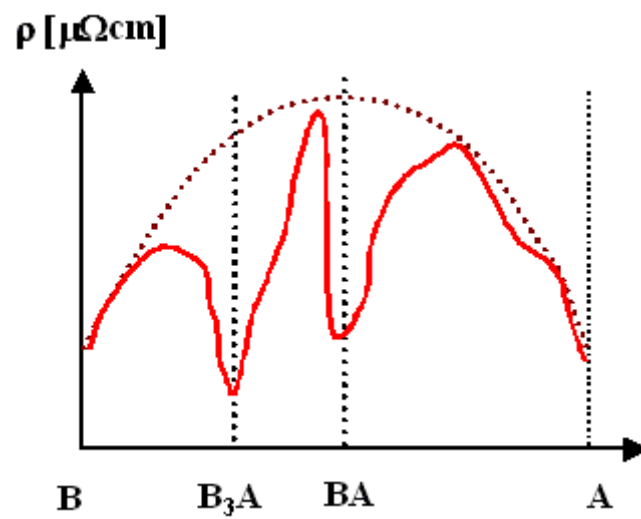
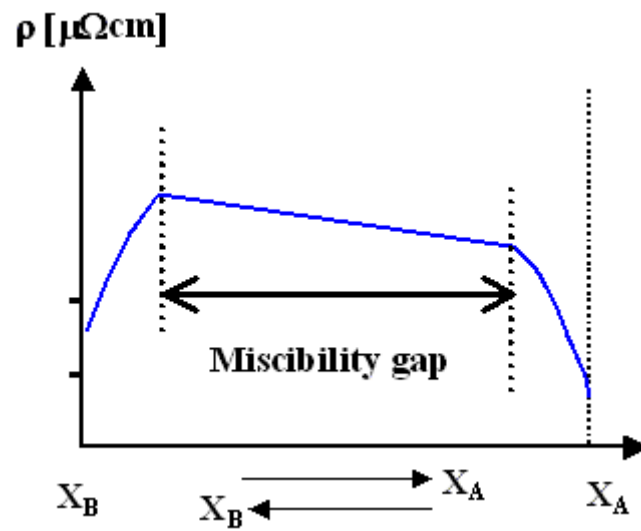
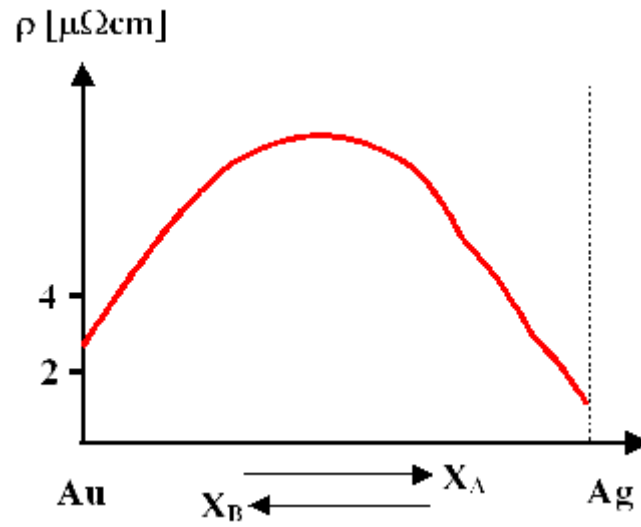
- Impurezas introducen imperfecciones cristalinas

$$\rho = \rho_0 (1 + \beta x) ; \beta = \text{cte}$$

Cu



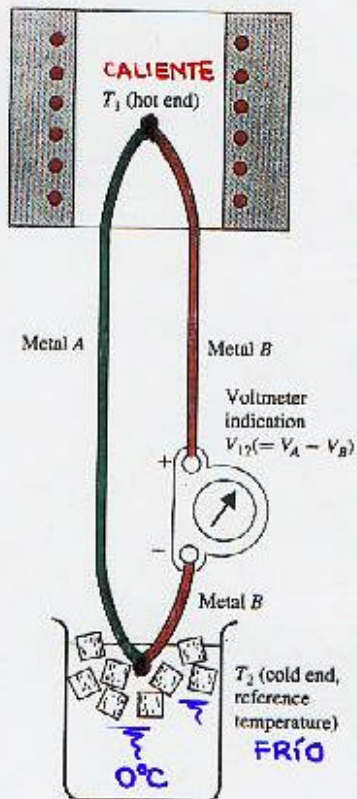
→  
A<sub>cu</sub>



Fuente: [http://www.techfak.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat\\_en/kap\\_2/backbone/r2\\_1\\_2.html](http://www.techfak.uni-kiel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_2/backbone/r2_1_2.html)

## APLICACIONES ELÉCTRICAS DE CONDUCTORES

### 1. TERMOCUPLAS



- Efecto Seebeck (1821)
- Es un termómetro
- 2 alambres de metales diferentes

**+ EXTREMO CALIENTE** : se excitan electrones a  $> E$   
 $\Rightarrow$  potencial para transporte de  $e^-$

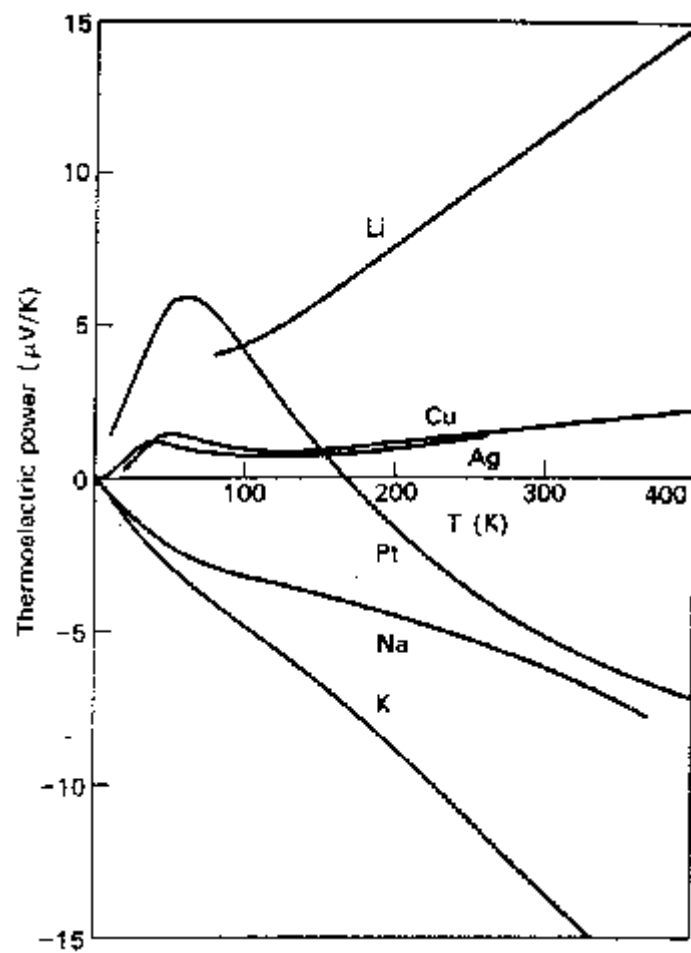
**- EXTREMO FRÍO**

$\therefore \exists \Delta V$  entre extremos

Si Metal A = Metal B :  $\Delta V = 0$

si Metal A  $\neq$  Metal B :  $\Delta V \neq 0$

$$\Delta V = \gamma \Delta T \quad \gamma = \text{cte}$$



# TERMOCUPLAS

COMMON THERMOCOUPLE SYSTEMS

Type	Common name	Positive element <sup>a</sup>	Negative element <sup>a</sup>	Recommended service environment(s)	Maximum service temp. (°C)
B	Platinum-rhodium/ platinum-rhodium	70 Pt-30 Rh	94 Pt-6 Rh	Oxidizing Vacuum Inert	1700
E	Chromel/constantan	90 Ni-9 Cr	44 Ni-55 Cu	Oxidizing	870
J	Iron/constantan	Fe	44 Ni-55 Cu	Oxidizing Reducing	760
K	Chromel/alumel	90 Ni-9 Cr	94 Ni-Al, Mn, Fe, Si, Co	Oxidizing	1260
R	Platinum/platinum-rhodium	87 Pt-13 Rh	Pt	Oxidizing Inert	1480
S	Platinum/platinum-rhodium	90 Pt-10 Rh	Pt	Oxidizing Inert	1480
T	Copper/constantan	Cu	44 Ni-55 Cu	Oxidizing Reducing	370

SOURCE: Data from *Metals Handbook*, 9th Ed., Vol. 3, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1980.

<sup>a</sup>Alloy compositions expressed as weight percents.

