

# TEMA 5: INTROD. AL ESTADO SÓLIDO

## RESUMEN

- Conductividad en sólidos:
  - Descripción cualitativa: distinguir buenos/malos conductores
  - Descripción cuantitativa: cálculo de  $\sigma$
- Modelo de Drude: gas ideal (estadística de Maxwell-Boltzmann)
  - Descripción cualitativa: no explica la diferente conductividad
  - Descripción cuantitativa:  $\sigma \neq f(E)$  buena;  $\sigma = f(T)$  mala
- Modelo de bandas:
  - Descripción cualitativa: explica la diferente conductividad
  - Descripción cuantitativa:  $\sigma$  depende del modelo concreto de estadística
    - Estadística de Fermi-Dirac: distribución de energía cuántica

# TEMA 5: INTROD. AL ESTADO SÓLIDO

## RESUMEN

- Electrones en sólidos: sólo pueden ocupar bandas de energía
  - **Banda de valencia:** última banda ocupada o semiocupada
  - **Banda de conducción:** primera banda vacía
- Para la conducción eléctrica: niveles libres en bandas próximas (en la misma banda de valencia o en la de conducción)
  - En metales **buenos conductores:** banda de valencia semiocupada o solapada con la de conducción (tipo Na y Mg)
  - En **aislantes y semiconductores:** las bandas se hibridan y dan lugar a:
    - banda de valencia totalmente llena
    - banda de conducción totalmente vacía
    - Separadas por un gap de energía  $E_g$

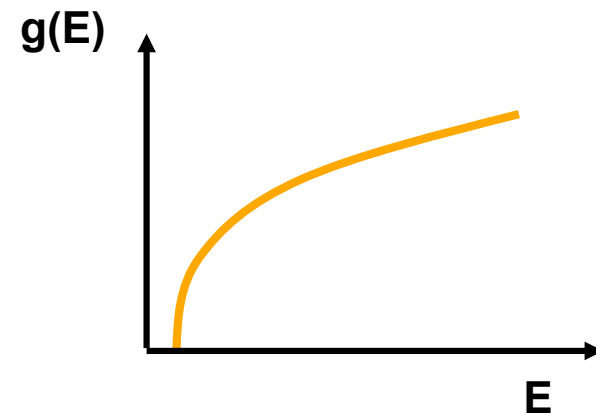
# TEMA 5: INTROD. AL ESTADO SÓLIDO

## 5.5 Ocupación de las bandas

- Modelo de Sommerfeld:

- El número de electrones por unidad de volumen que tienen energía entre  $E$  y  $E + dE$   $dn(E) = g(E) dE \cdot f_{FD}(E)$

- $g(E)$ : densidad de estados de energía = N° de estados por intervalo de energía
- $g(E) \cdot dE$ : número de estados que tienen energía entre  $E$  y  $E + dE$



# TEMA 5: INTROD. AL ESTADO SÓLIDO

## 5.5 Ocupación de las bandas

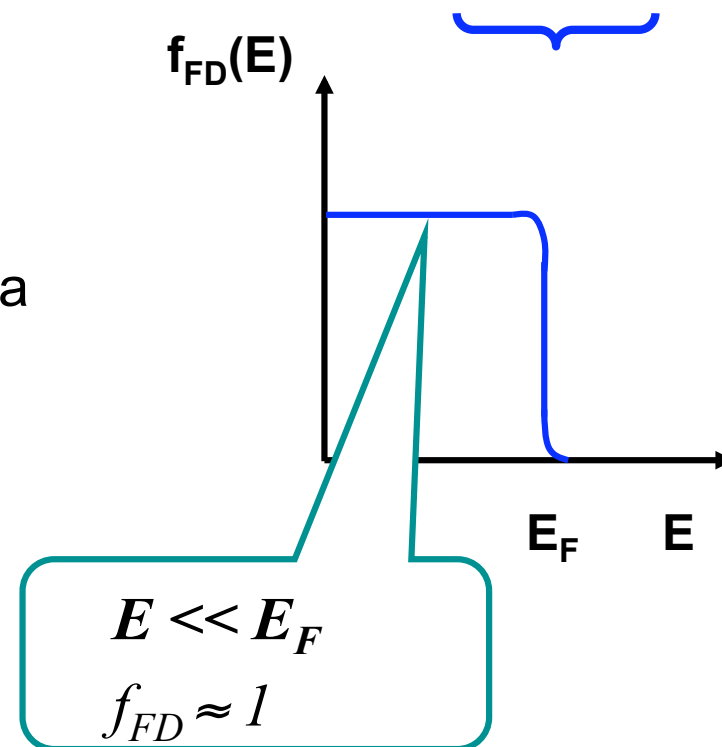
### ■ Modelo de Sommerfeld (cont):

- El número de electrones por unidad de volumen que tienen energía entre  $E$  y  $E + dE$   $dn(E) = g(E) dE \cdot f_{FD}(E)$

- $f_{FD}(E)$ : probabilidad de que un estado de energía esté ocupado

- Depende de la estadística
- Función escalón

$$f_{FD} = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F) / kT}}$$



# TEMA 5: INTROD. AL ESTADO SÓLIDO

## 5.5 Ocupación de las bandas

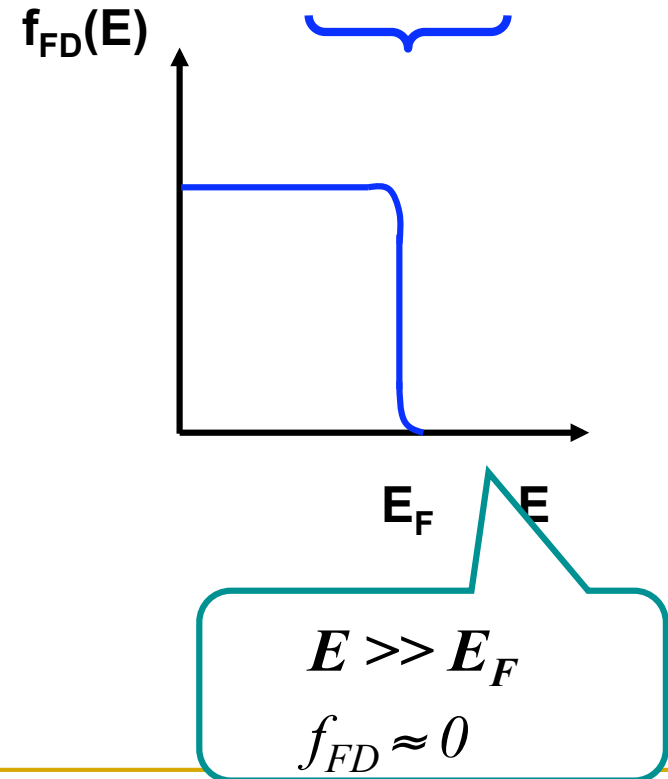
### ■ Modelo de Sommerfeld (cont):

- El número de electrones por unidad de volumen que tienen energía entre  $E$  y  $E + dE$   $dn(E) = g(E) dE \cdot f_{FD}(E)$

- $f_{FD}(E)$ : probabilidad de que un estado de energía esté ocupado

- Depende de la estadística
- Función escalón

$$f_{FD} = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F) / kT}}$$



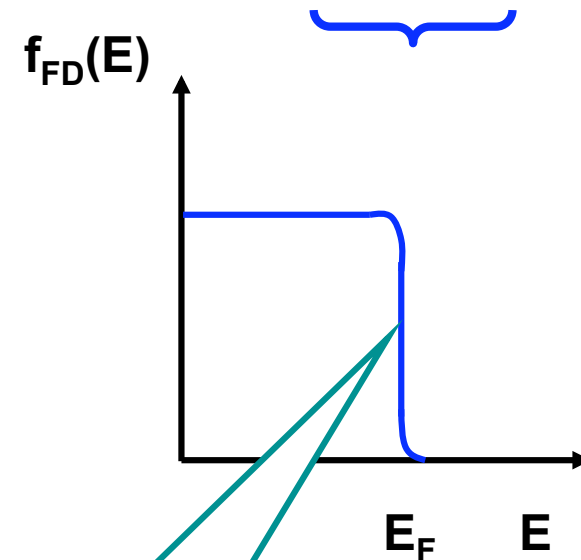
# TEMA 5: INTROD. AL ESTADO SÓLIDO

## 5.5 Ocupación de las bandas

### ■ Modelo de Sommerfeld (cont):

- El número de electrones por unidad de volumen que tienen energía entre  $E$  y  $E + dE$   $dn(E) = g(E) dE \cdot f_{FD}(E)$

- $f_{FD}(E)$ : probabilidad de que un estado de energía esté ocupado
  - Depende de la estadística
  - Función escalón



$$f_{FD} = \frac{1}{1 + e^{(E - E_F) / kT}}$$

Energía del nivel de Fermi

$$E = E_F$$
$$f_{FD} = 0.5$$

# TEMA 5: INTROD. AL ESTADO SÓLIDO

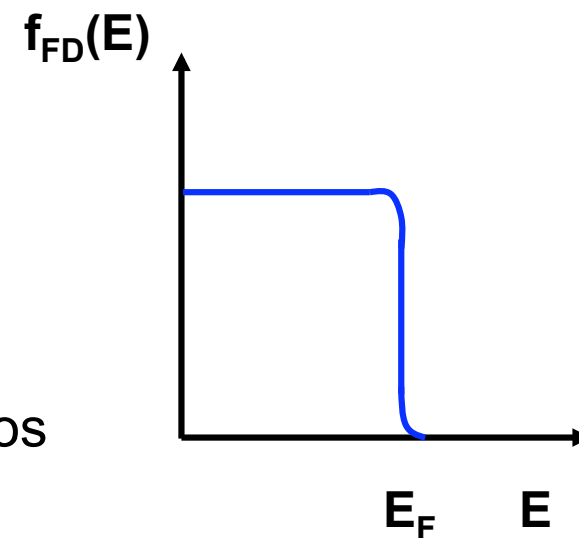
## 5.5 Ocupación de las bandas

### ■ Modelo de Sommerfeld (cont):

- El número de electrones por unidad de volumen que tienen energía entre  $E$  y  $E + dE$   $dn(E) = g(E) dE \cdot f_{FD}(E)$

### ■ Nivel de Fermi ( $E_F$ )

- Nivel con una probabilidad de ocupación del 50%
  - $f_{FD}(E=E_F) = 0.5$
  - Niveles con  $E < E_F$  ocupados
  - Niveles con  $E > E_F$  libres



# TEMA 5: INTROD. AL ESTADO SÓLIDO

## 5.5 Ocupación de las bandas

### ■ Modelo de Sommerfeld (cont):

- El número de electrones por unidad de volumen que tienen energía entre  $E$  y  $E + dE$   $dn(E) = g(E) dE \cdot f_{FD}(E)$

### ■ Nivel de Fermi ( $E_F$ )

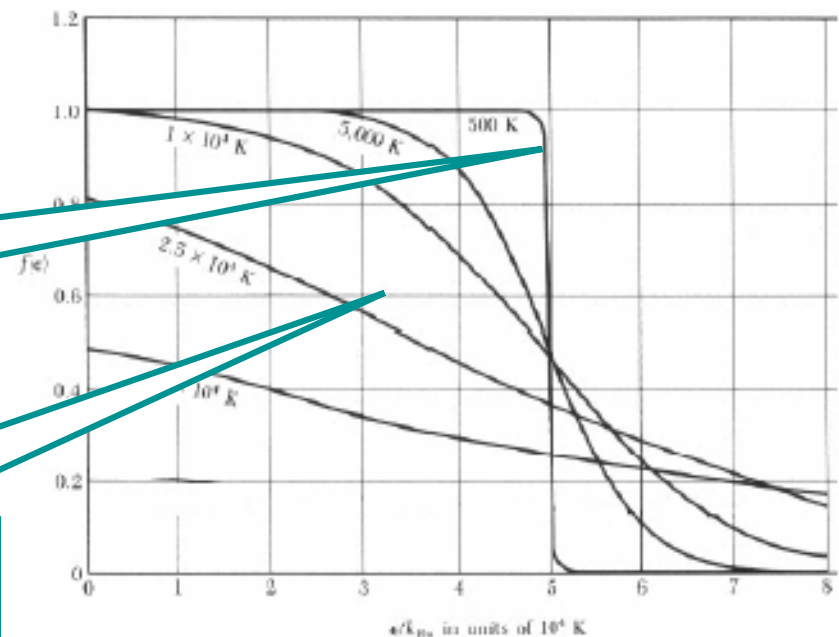
- $E_F$  en función de  $T$

$T = 0$

Todos ocupados  
(escalón cuadrado)

$T > 0$

Algunos ocupados  
(escalón redondeado)



<http://victék.is-a-geek.com/Repositorios/Apuntes/>

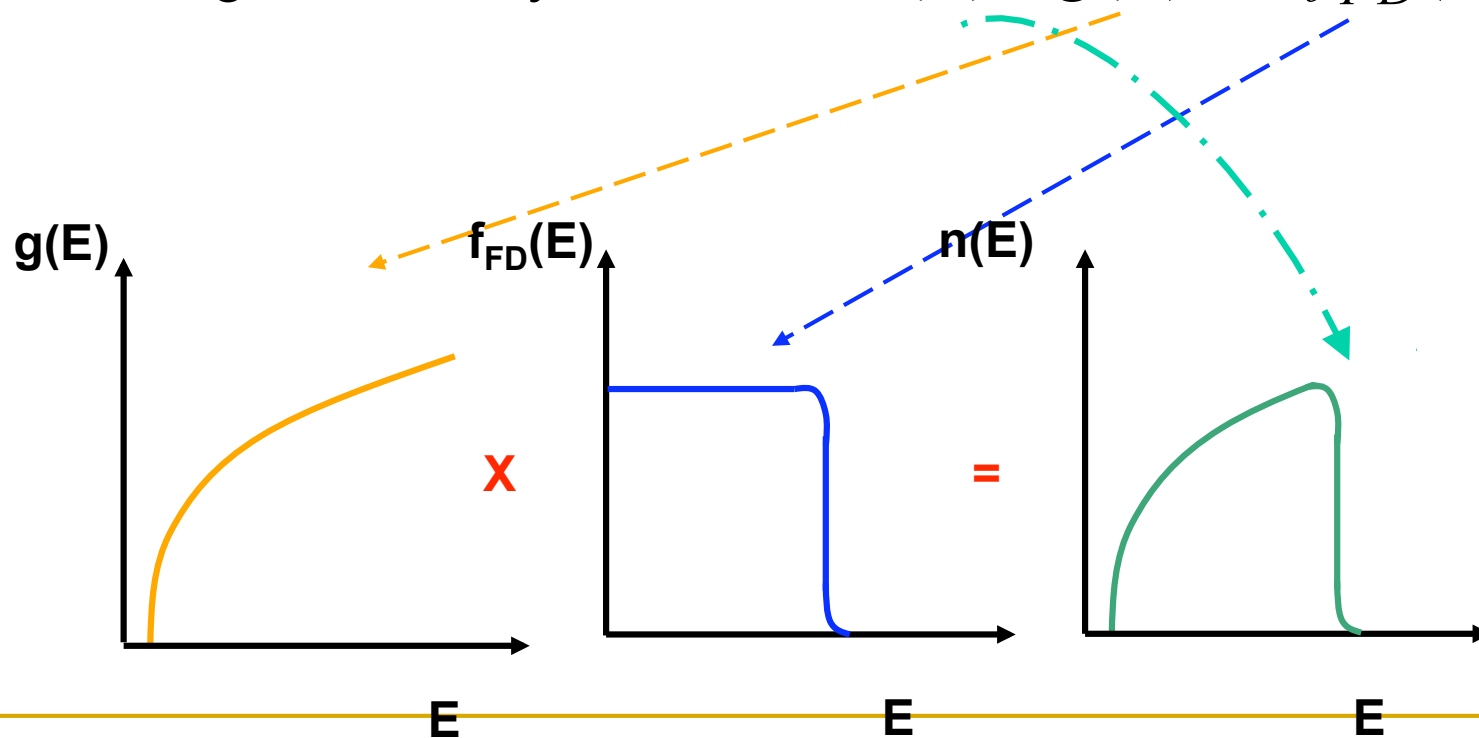


# TEMA 5: INTROD. AL ESTADO SÓLIDO

## 5.5 Ocupación de las bandas

### ■ Modelo de Sommerfeld (cont):

- El número de electrones por unidad de volumen que tienen energía entre  $E$  y  $E + dE$   $dn(E) = g(E) dE \cdot f_{FD}(E)$



# TEMA 5: INTROD. AL ESTADO SÓLIDO

## 5.5 Ocupación de las bandas

### Ejemplo: OCUPACION SALA DE CINE

- Analogía: filas de butacas = niveles de energía de un átomo
  - N° identificativo fila = N° nivel energético ( $N = 1, N = 2, \dots$ )

- N° de espectadores en una fila =  
= N° de butacas en una fila x probabilidad de ocupación

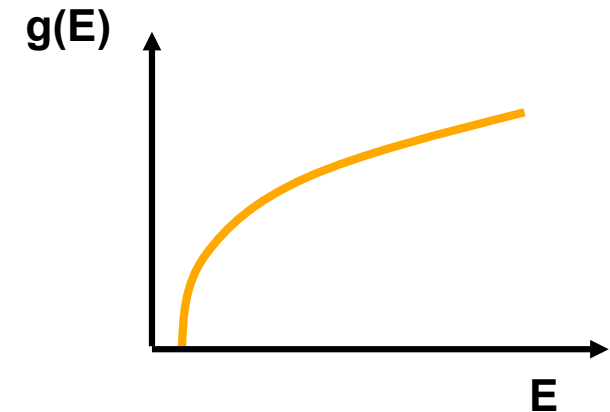
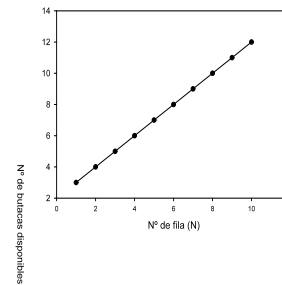
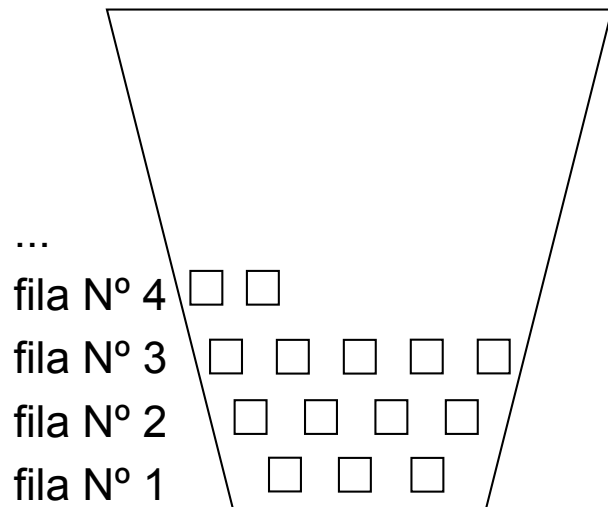
- N° d'espectadores en una fila =  $g(N) \times f_{FD}(N)$

# TEMA 5: INTROD. AL ESTADO SÓLIDO

## 5.5 Ocupación de las bandas

Ejemplo: **OCUPACION SALA DE CINE**

- $g(N)$  (número de butacas en una fila)
  - Sala trapezoidal
  - Número de butacas en cada fila



$$\rightarrow g(N)$$

$$\rightarrow g(N) = 2 + N$$

# TEMA 5: INTROD. AL ESTADO SÓLIDO

## 5.5 Ocupación de las bandas

### Ejemplo: OCUPACION SALA DE CINE

- $f_{FD}(N)$  (Probabilidad de ocupación):
  - Número de espectadores que ocupan butaca (en % respecto número butacas en una fila)
  
- CASOS:
  - 1) Espectadores “disciplinados” ( $T = 0$  K): ocupan ordenadamente los asientos
  
  - 2) Espectadores “no disciplinados” ( $T > 0$  K): dejan huecos, aunque empiezan por ocupar las primeras filas

# TEMA 5: INTROD. AL ESTADO SÓLIDO

- **Ejemplo numérico:** distribución de 25 espectadores

nº fila (N)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOT
nº butacas	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	75
<b>CASO 1</b> <b>ESPECTADORES</b> <b>DISCIPLINADOS)</b>											
nº espectadores	3	4	5	6	7	0	0	0	0	0	25
% ocupación	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0	

- **Fila de Fermi:**
  - Porcentaje de ocupación:  $\geq 50\%$ )
    - Nivel de Fermi:  $N_F = 5$
- ■ Intuitivamente: última fila mayoritariamente ocupada

# TEMA 5: INTROD. AL ESTADO SÓLIDO

- **Ejemplo numérico:** distribución de 25 espectadores

nº fila (N)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOT
nº butacas	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	75
<b>CASO 2</b> <b>ESPECTADORES</b> <b>NO DICIPLINADOS</b>											
nº espectadores	3	4	5	5	4	2	1	1	0	0	25
% ocupación	100	100	100	83	57	25	11	10	0	0	

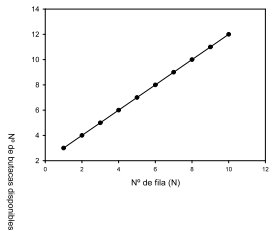
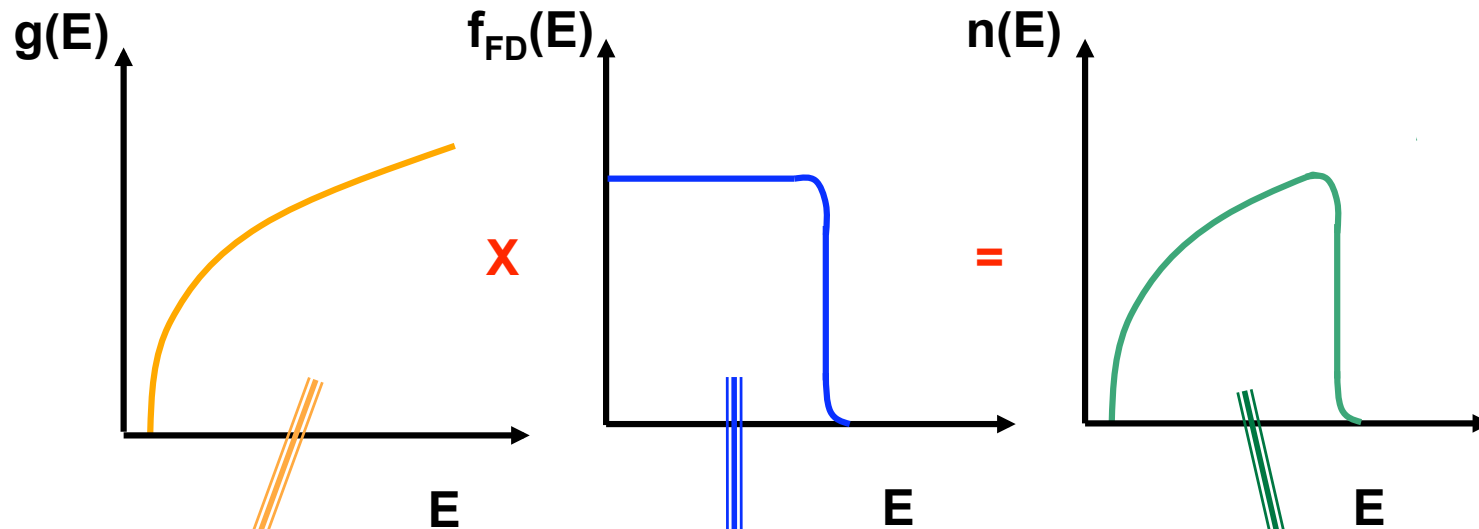
- **Fila de Fermi:**

- Porcentaje de ocupación:  $\geq 50 \%$ )

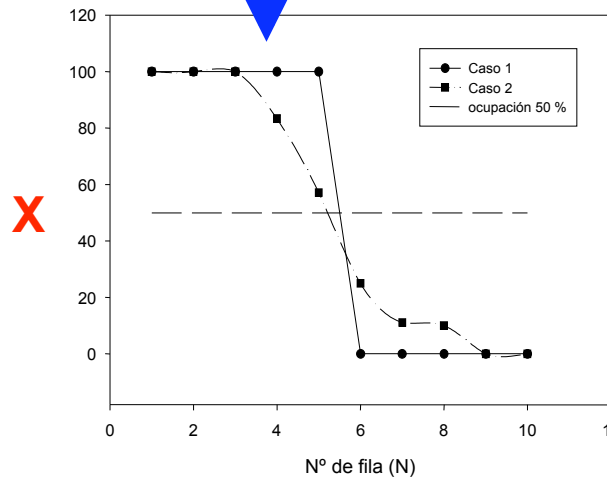
- Nivel de Fermi:  $N_F = 5$

- Intuitivamente: última fila mayoritariamente ocupada

# TEMA 5: INTROD. AL ESTADO SÓLIDO



Porcentaje de ocupación (%)



Nº de butacas ocupadas

