

04_conductores_dielectricos

June 19, 2026

1 Tema 4 — Conductores y dieléctricos

Física II · GIERM · 1.º (Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica)

Apuntes propios destilados de los apuntes oficiales «*Electrostática en conductores*» y «*Electrostática (Dieléctricos)*» (Dpto. Física Aplicada III, curso 2023/2024). Enfoque de examen, alumno de Mecatrónica: **resultado y uso primero**, demostración solo donde aporta intuición. Cada bloque trae idea central, el *porqué*, fórmulas, ejemplos paso a paso y errores típicos.

1.1 Mapa del tema

El tema responde a una sola pregunta con dos respuestas opuestas: **¿qué le hace un campo eléctrico a la materia?**

	Conductor	Dieléctrico (aislante)
Cargas	libres (se mueven)	ligadas (no se mueven)
Respuesta al campo	se redistribuyen hasta anularlo dentro	se polarizan y lo debilitan dentro
Campo interior	$E_{int} = 0$ (equilibrio)	$E_{int} = E_0/\kappa < E_0$
Idea estrella	jaula de Faraday / efecto punta	constante dieléctrica κ , rigidez

Las dos columnas son **el mismo fenómeno en distinto grado**: un conductor es el caso límite $\kappa \rightarrow \infty$ de un dieléctrico.

2 Parte A — Conductores en equilibrio electrostático

2.1 A.1 Idea central

Un **conductor** tiene portadores de carga libres (en un metal, los electrones de valencia: “gas de electrones” sobre la red de iones positivos).

Si aplicamos un campo externo $\vec{E}_0$, esas cargas libres se mueven: las negativas en sentido opuesto a $\vec{E}_0$, las positivas a favor. Al acumularse en la superficie crean un **campo propio** $\vec{E}_{propio}$ que se opone al aplicado. El movimiento continúa **hasta que ambos se cancelan en el interior**. Eso es el *equilibrio electrostático*.

$$\boxed{\vec{E}_{int} = \vec{E}_0 + \vec{E}_{propio} = \vec{0}} \quad (\text{en el interior, en equilibrio})$$

El porqué (clave de todo el tema): si quedara campo dentro, habría fuerza $\vec{F} = q\vec{E}$ sobre las cargas libres $\rightarrow$ seguirían moviéndose $\rightarrow$ no sería equilibrio. Luego *en equilibrio, por definición, el campo interior es cero*. Para un buen conductor (cobre) esto ocurre en $\sim$ nanosegundos.

2.2 A.2 Las seis propiedades (todas salen de $E_{int} = 0$)

Memorizar **una** ($E_{int} = 0$) y deducir las demás:

1. **Campo interior nulo:** $\vec{E}_{int} = \vec{0}$.
2. **Volumen equipotencial:** como $\Delta V = -\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$ y dentro $\vec{E} = 0 \Rightarrow V = \text{cte}$. La **superficie es equipotencial**.
3. **Toda la carga neta vive en la superficie.** Por Gauss: una superficie gaussiana interna al conductor encierra $E = 0$ en toda ella $\Rightarrow Q_{enc} = 0$. El exceso de carga se deposita en la superficie (espesor $\sim$ diámetro atómico).
4. **El campo exterior es perpendicular a la superficie.** Si tuviera componente tangencial, las cargas de superficie se moverían $\rightarrow$ no equilibrio.
5. **Relación campo–densidad superficial** (caja gaussiana con una tapa fuera, otra dentro):

$$\boxed{E_{sup} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}}$$

6. **Efecto punta:** donde el radio de curvatura es menor, σ y E son **mayores**. En las puntas el campo se dispara.

2.3 A.3 Efecto punta — el porqué con dos esferas

Modelo clásico: dos esferas conductoras de radios r_1 y r_2 unidas por un hilo conductor largo. Al estar conectadas forman **un solo conductor** $\rightarrow$ mismo potencial:

$$V_1 = V_2 \Rightarrow k \frac{Q_1}{r_1} = k \frac{Q_2}{r_2} \Rightarrow \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{r_1}{r_2}$$

Pero el campo en la superficie de una esfera es $E = \frac{kQ}{r^2} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$, con $\sigma = \frac{Q}{4\pi r^2}$. Combinando:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{Q_1/r_1^2}{Q_2/r_2^2} = \frac{r_2}{r_1}, \quad \frac{E_1}{E_2} = \frac{r_2}{r_1}$$

$$\boxed{\sigma \propto \frac{1}{r}, \quad E_{sup} \propto \frac{1}{r}}$$

La esfera **pequeña** (r menor) acumula **más** densidad de carga y **más** campo. Una “punta” es una esfera de radio diminuto $\rightarrow$ campo enorme. **Aplicación:** el pararrayos concentra el campo en la punta hasta ionizar el aire y canalizar el rayo.

2.4 A.4 Cavidades y jaula de Faraday

Cavidad vacía dentro de un conductor: el campo en la cavidad es **nulo**, *independientemente* de lo que pase fuera. Demostración: las paredes son equipotenciales, y entre dos puntos de la pared la circulación de $\vec{E}$ por dentro del hueco debe ser cero por cualquier camino $\rightarrow \vec{E} = 0$ en el hueco. La cavidad queda **apantallada**: es una región libre de campo. Esto es la **jaula de Faraday** (carcasas metálicas, malla del cable coaxial, coche en una tormenta).

Conductor con carga neta + cavidad vacía: la carga neta va a la superficie **exterior**; la pared interior no tiene carga neta.

Cavidad con una carga q_h dentro: por Gauss sobre una superficie interior al metal que rodee la cavidad ($E = 0$ en ella $\Rightarrow \Phi = 0 \Rightarrow Q_{enc} = 0$), en la **pared del hueco se induce** $-q_h$, y (si el conductor era neutro) aparece $+q_h$ en la superficie exterior.

$$q_{pared} = -q_h$$

2.5 A.5 Energía de un sistema de conductores

Cada conductor es equipotencial, así que toda su carga está al mismo V :

$$U = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n Q_i V_i$$

Conductor aislado vs conectado a fuente (a recordar para el Tema 5, condensadores):

	Aislado	Conectado a fuente
Se fija	la carga Q	el potencial V
Lo desconocido	V	Q (la fuente la ajusta)

2.6 A.6 Ejemplo resuelto 1 — efecto punta numérico

Enunciado. Dos esferas conductoras de radios $r_1 = 2,0$ cm y $r_2 = 8,0$ cm, unidas por un hilo largo, comparten una carga total $Q = 12$ nC. Halla la carga y el campo superficial de cada una.

Paso 1 — mismo potencial: $\frac{Q_1}{r_1} = \frac{Q_2}{r_2} \Rightarrow Q_1 = Q_2 \frac{r_1}{r_2} = Q_2/4$.

Paso 2 — conservación: $Q_1 + Q_2 = 12$ nC $\Rightarrow Q_2/4 + Q_2 = 12 \Rightarrow Q_2 = 9,6$ nC, $Q_1 = 2,4$ nC.

Paso 3 — campos ($E = kQ/r^2$, $k = 8,99 \cdot 10^9$): - $E_1 = \frac{(8,99 \cdot 10^9)(2,4 \cdot 10^{-9})}{(0,02)^2} \approx 5,4 \cdot 10^4$ V/m -
 $E_2 = \frac{(8,99 \cdot 10^9)(9,6 \cdot 10^{-9})}{(0,08)^2} \approx 1,3 \cdot 10^4$ V/m

Lectura: la esfera pequeña tiene $4\times$ **menos carga** pero $\sim 4\times$ **más campo**. Confirma $E \propto 1/r$. (Cálculo numérico al final, celda de verificación.)

2.7 A.7 Ejemplo resuelto 2 — cavidad con carga inducida

Enunciado. Una esfera conductora **neutra** tiene una cavidad. En su centro colocamos $q_h = +5 \text{ nC}$. ¿Qué carga aparece en la pared del hueco y en la superficie exterior? ¿Cuánto vale el campo a una distancia r fuera de la esfera?

Paso 1 — pared del hueco: Gauss en el metal $\Rightarrow q_{\text{pared}} = -q_h = -5 \text{ nC}$.

Paso 2 — superficie exterior: el conductor era neutro, así que $q_{\text{ext}} = +q_h = +5 \text{ nC}$ (la carga total del metal sigue siendo 0).

Paso 3 — campo fuera: Gauss en una esfera de radio r encierra $q_h + q_{\text{pared}} + q_{\text{ext}} = +5 \text{ nC}$. Luego, **visto desde fuera, todo se comporta como una carga puntual $+5 \text{ nC}$ en el centro:**

$$E(r) = \frac{k(5 \text{ nC})}{r^2}$$

Idea para recordar: desde fuera no se ve dónde está la carga dentro; el conductor “borra” la posición interna. Esto es apantallamiento.

2.8 A.8 Errores típicos (conductores)

- Decir que **no hay cargas** dentro del conductor. Las hay (muchísimas); lo que es cero es la **carga neta** y el **campo**.
- Aplicar $E = \sigma/\epsilon_0$ a un plano aislante. Esa fórmula es para la **superficie de un conductor**; un plano de carga aislado da $E = \sigma/2\epsilon_0$ (el factor 2 cambia).
- Pensar que la jaula de Faraday protege solo de fuera hacia dentro. Apantalla **en ambos sentidos** si está a potencial fijo (conectada a tierra).
- Olvidar el signo de la carga inducida en la pared: es $-q_h$, opuesta a la del hueco.
- Creer que “más carga — más campo” siempre. En el efecto punta, la esfera con *menos* carga tiene *más* campo porque domina $1/r^2$.

3 Parte B — Dieléctricos (aislantes)

3.1 B.1 Idea central

Un **dieléctrico** no tiene cargas libres: están ligadas a sus átomos por enlaces fuertes. No conducen. Pero al aplicar un campo $\vec{E}_0$ la materia **se polariza**:

- **No polares** (centros $+$ y $-$ coinciden): el campo *induce* dipolos que se alinean con $\vec{E}_0$.
- **Polares** (HCl, H₂O: ya son dipolos permanentes): el campo *orienta* parcialmente los dipolos (la agitación térmica impide el alineamiento total).

En ambos casos aparecen **cargas de polarización** (cargas ligadas) en la **superficie**: negativa donde entra el campo, positiva donde sale. Esas cargas crean un campo inducido $\vec{E}_{\text{ind}}$ **opuesto** a $\vec{E}_0 \rightarrow$ el campo dentro **se debilita** (no se anula, a diferencia del conductor).

3.2 B.2 Dipolo eléctrico (la pieza básica)

Momento dipolar: $\vec{p} = q \vec{L}$, vector de la carga $-q$ a la $+q$.

- **Campo uniforme:** fuerza neta nula, pero hay **par** $\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E}$ que tiende a alinear $\vec{p}$ con $\vec{E}$.

- **Campo no uniforme:** además del par, **fuerza neta** hacia donde el campo es más intenso. Por eso un peine cargado atrae trocitos de papel **neutros**: el campo no uniforme polariza el papel y luego lo arrastra hacia la zona de campo intenso. *La no uniformidad es esencial.*

3.3 B.3 Constante dieléctrica y permitividad — el resultado de examen

Para campos no muy intensos, el campo inducido es proporcional al aplicado, y el resultado neto es:

$$E_{int} = \frac{E_0}{\kappa}$$

donde $\kappa = 1 + \chi_e > 1$ es la **constante dieléctrica** (relativa) y $\chi_e > 0$ la **susceptibilidad**.

- $\kappa \rightarrow \infty$: el campo interior se anula **conductor** (caso límite).
- $\kappa = 1$ ($\chi_e = 0$): no hay polarización **vacío**.

Permitividad del medio:

$$\varepsilon = \kappa \varepsilon_0 = (1 + \chi_e) \varepsilon_0 \quad [\varepsilon] = \text{F/m}$$

Vector desplazamiento $\vec{D}$ (la magnitud cómoda: solo “ve” la carga libre, ignora la de polarización):

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} = \kappa \varepsilon_0 \vec{E}, \quad \oint \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q_{libre}$$

En un condensador plano con dieléctrico, $D = \sigma_{libre}$ es continuo aunque E baje a E_0/κ dentro del material.

3.4 B.4 Rigidez dieléctrica (campo de ruptura)

Todo dieléctrico aguanta hasta un **campo máximo** E_{rup} (rigidez dieléctrica). Si se supera, el material se ioniza, deja de aislar y se produce una descarga.

$$V_{rup} = E_{rup} \cdot d \quad (\text{condensador plano, separación } d)$$

Valores típicos: aire $\approx 3 \times 10^6 \text{ V/m}$, papel $\approx 16 \times 10^6 \text{ V/m}$. **Por eso se mete dieléctrico en los condensadores:** sube la capacidad ($\times \kappa$) y eleva la tensión que aguantan antes de la ruptura, además de dar rigidez mecánica.

3.5 B.5 Efecto en el condensador (puente al Tema 5)

Insertar un dieléctrico que llena el condensador multiplica la capacidad por κ :

$$C = \kappa C_0 = \frac{\kappa \varepsilon_0 A}{d} = \frac{\varepsilon A}{d}$$

El **porqué** depende de cómo esté el condensador:

	Aislado (Q fija)	Conectado a batería (V fija)
Campo	baja: $E = E_0/\kappa$	no cambia (la batería fija V)
Tensión	baja: $\Delta V = \Delta V_0/\kappa$	fija
Carga	fija Q_0	sube: $Q = \kappa Q_0$ (la batería aporta extra)
Capacidad	$C = Q_0/\Delta V = \kappa C_0$	$C = \kappa Q_0/\Delta V_0 = \kappa C_0$

En los dos casos C sube $\times \kappa$, pero por mecanismos distintos. **Examen:** identifica primero qué se conserva (Q o V).

3.6 B.6 Ejemplo resuelto 3 — campo con y sin dieléctrico

Enunciado. Condensador plano, $d = 1,0\text{ mm}$, conectado a $V_0 = 200\text{ V}$. Se rellena con mica ($\kappa = 5,4$). El condensador **sigue conectado** a la batería. Halla E antes y después, y verifica que no haya ruptura ($E_{rup,mica} \approx 100 \times 10^6\text{ V/m}$).

Sin dieléctrico: $E_0 = \frac{V_0}{d} = \frac{200}{10^{-3}} = 2,0 \times 10^5\text{ V/m}$.

Con dieléctrico, conectado a batería: la batería **fija** V E **no cambia:** $E = E_0 = 2,0 \times 10^5\text{ V/m}$. Lo que sube es la carga: $Q = \kappa Q_0$.

Ruptura: $2,0 \times 10^5 \ll 100 \times 10^6$ no hay descarga. Margen de seguridad amplio.

Contraste (si estuviera aislado): E bajaría a $E_0/\kappa = 2,0 \times 10^5/5,4 \approx 3,7 \times 10^4\text{ V/m}$. *El mismo dieléctrico, distinto resultado según qué se conserve.*

3.7 B.7 Errores típicos (dieléctricos)

- Confundir **conductor** ($E_{int} = 0$) con **dieléctrico** ($E_{int} = E_0/\kappa \neq 0$). El dieléctrico solo *debilita*.
- Usar $\kappa < 1$. Siempre $\kappa \geq 1$ (vacío = 1).
- Aplicar $E = E_0/\kappa$ a un condensador **conectado a batería**: ahí E no cambia (sube la carga). E baja solo si está **aislado**.
- Olvidar que $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ usa $\epsilon = \kappa \epsilon_0$, **no** ϵ_0 a secas.
- Creer que las cargas de polarización pueden conducir corriente. Son **ligadas**: crean campo, pero no se desplazan libremente.
- Olvidar comprobar la **rigidez dieléctrica** en problemas de diseño: si $E > E_{rup}$, el aislante deja de aislar.

4 Parte C — Figuras (Python: numpy + matplotlib)

Tres visualizaciones, autocontenidas, para fijar las ideas estrella:

1. **Redistribución de carga / apantallamiento** en una placa conductora dentro de un campo externo.
2. **Jaula de Faraday:** campo externo que no penetra en una cavidad conductora.
3. **Campo con y sin dieléctrico** en un condensador plano.

4.1 Figura 1 — Redistribución de carga y apantallamiento

Un conductor neutro (placa) dentro de un campo externo uniforme $\vec{E}_0$. Las cargas libres migran: − a la cara izquierda (donde entra el campo), + a la derecha. El campo propio de esas cargas **anula** E_0 dentro de la placa $\rightarrow E_{int} = 0$.

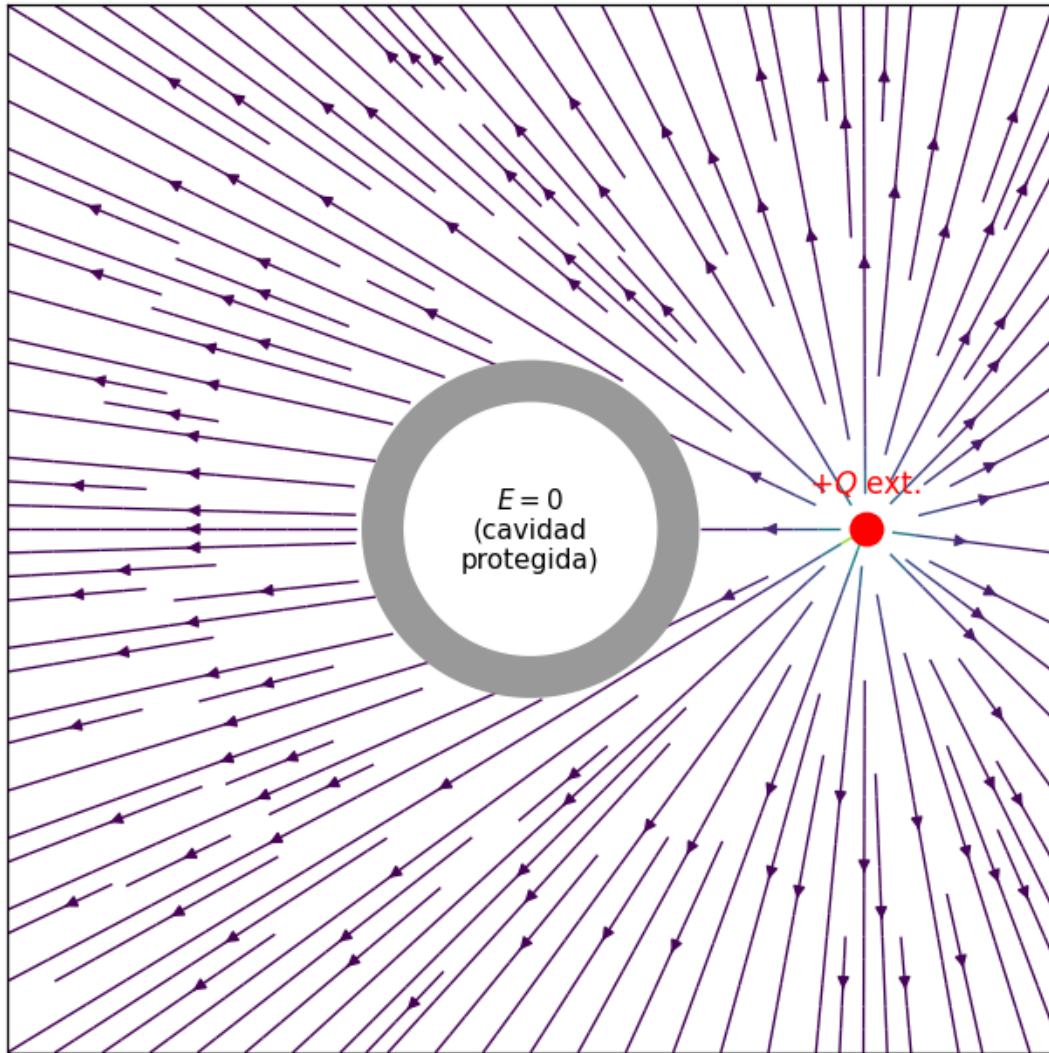
Apantallamiento: el conductor redistribuye su carga hasta anular el campo interior



4.2 Figura 2 — Jaula de Faraday

Una carcasa conductora con una cavidad vacía, inmersa en el campo de una carga externa. Las líneas de campo **terminan en la superficie** del conductor y **no penetran** en la cavidad: $E = 0$ dentro. Forzamos el campo a cero en el metal y en el hueco para visualizar el apantallamiento.

Jaula de Faraday: el campo externo no entra en la cavidad



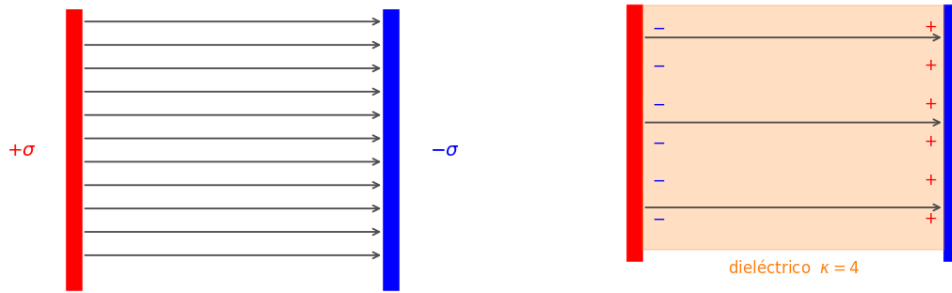
4.3 Figura 3 — Campo con y sin dieléctrico (condensador plano, Q fija / aislado)

Mismo condensador, misma carga libre σ_{libre} . Al insertar el dieléctrico aparecen cargas de polarización en sus caras que crean un campo opuesto: el campo neto cae de E_0 a E_0/κ . Mostramos el esquema y el perfil $E(x)$ entre placas.

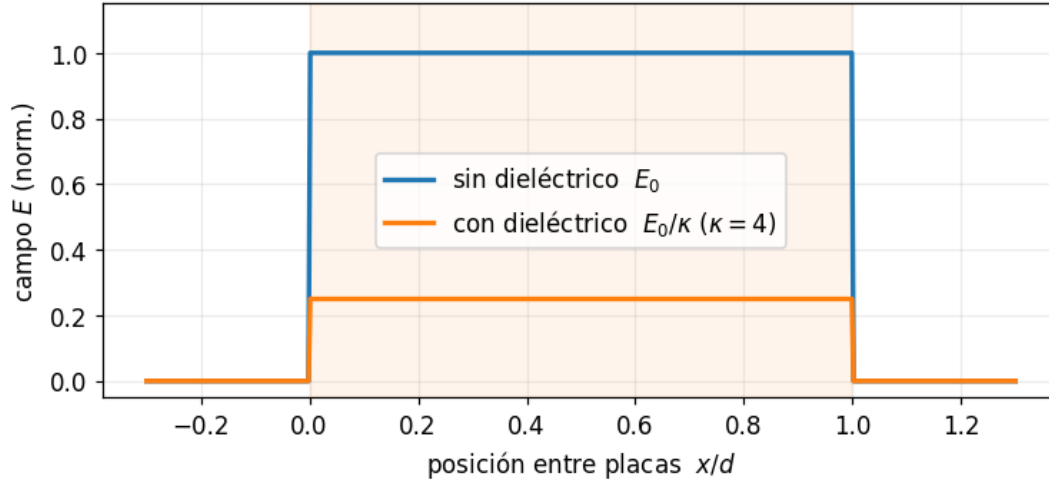
El dieléctrico debilita el campo (menos densidad de líneas), no lo anula

Sin dieléctrico: $E = E_0$

Con dieléctrico: $E = E_0/\kappa = 0.25 E_0$



Perfil del campo: cae a E_0/κ dentro del dieléctrico (condensador aislado)



4.4 Parte D — Verificación numérica de los ejemplos

Comprobamos con números los ejemplos resueltos A.6 y B.6.

=====

Ejemplo A.6 - dos esferas conectadas (efecto punta)

=====

Q1 (r=2cm) = 2.40 nC | E1 = 5.39e+04 V/m

Q2 (r=8cm) = 9.60 nC | E2 = 1.35e+04 V/m

-> esfera pequena: 0.25x carga, pero 4.00x campo (E proporcional a 1/r)

=====

Ejemplo B.6 - dielectrico, condensador conectado a bateria

=====

E sin dielectrico = 2.00e+05 V/m
 E conectado a bateria = 2.00e+05 V/m (V fijo -> E no cambia; sube la carga x5.4)
 E si estuviera AISLADO = 3.70e+04 V/m (= E_0/κ)
 Rigidez de la mica = 1.00e+08 V/m
 Ruptura? NO - margen amplio

4.5 Resumen para el examen

- **Conductor en equilibrio:** $E_{int} = 0$, $V = \text{cte}$, carga en la **superficie**, $E_{sup} = \sigma/\epsilon_0 \perp$ a la superficie. De aquí salen todas las propiedades.
- **Efecto punta:** $E_{sup} \propto 1/r \rightarrow$ las puntas concentran campo (pararrayos).
- **Jaula de Faraday:** cavidad conductora interior con $E = 0$, apantallado. Carga q_h en el hueco induce $-q_h$ en la pared.
- **Dieléctrico:** se polariza, **debilita** el campo: $E_{int} = E_0/\kappa$, con $\kappa = 1 + \chi_e > 1$, $\epsilon = \kappa\epsilon_0$, $\vec{D} = \epsilon\vec{E}$ (solo ve carga libre).
- **Rigidez dieléctrica:** campo máximo E_{rup} ; por encima, descarga.
- **Condensador con dieléctrico:** $C = \kappa C_0$. Aislado $\rightarrow$ baja E ; con batería $\rightarrow$ sube Q . **Identifica qué se conserva.**
- **Conexión clave:** conductor = dieléctrico con $\kappa \rightarrow \infty$.

Fuentes: apuntes oficiales *Electrostática en conductores* y *Electrostática (Dieléctricos)*,
 FII GIERM 2023/2024 (Dpto. Física Aplicada III). Apuntes propios — destilado con
 Claude Code, 2026-06-19.