

Optimización Topológica y Paramétrica de Dispositivos DC-iEK para la Mitigación del Efecto Joule y la Eficiencia Electrocinética

Ari Emilio Núñez Menéndez,¹ Jesús Armando Uribe Gaeta,² Diego Carrillo Orona³

Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey

Fecha: 07/12/25

NT2003B Desarrollo de nanosistemas fluidicos y mecánicos

Víctor Hugo Pérez González

Roberto Carlos Gallo Villanueva

Resumen

Se presenta un análisis numérico integral y la optimización topológica de un dispositivo microfluídico electrocinético de corriente directa (DC-iEK) con postes aislantes de SU-8, simulado mediante el Método de Elemento Finito (FEM) en COMSOL Multiphysics. Se aborda la limitación crítica del calentamiento por efecto Joule en la dielectroforesis basada en aislantes (iDEP), la cual compromete la viabilidad de muestras biológicas en geometrías convencionales. A través del acoplamiento multifísico de corrientes eléctricas y transferencia de calor se evaluó primero un diseño base con postes de aristas vivas, reproduciendo el incremento de temperatura promedio del fluido hacia $\sim 31\text{--}33^\circ$. Posteriormente, el dispositivo se optimizó introduciendo radios de curvatura de $25\text{ }\mu\text{m}$ (fillets) en los postes y reduciendo el potencial de operación de 2500 a 1500 V, reduciendo la temperatura promedio en más de un 27 % y la potencia en aproximadamente 40 %,

Posteriormente se creó un diseño paramétrico variando los espaciamientos entre postes en dirección longitudinal (gap_x) y transversal (gap_y). Para cada combinación se resolvió el problema acoplado y se cuantificaron la temperatura máxima y promedio del fluido, así como la magnitud máxima del campo eléctrico normal en la región de gargantas. Los resultados muestran un compromiso claro, la reducción de los gaps intensifica el campo pero aumenta el calentamiento de Joule, mientras que gaps excesivamente grandes reducen ambos. Se identificó una región intermedia de diseño en la que se conservan campos del orden de $1.8\text{--}2.0 \times 10^6\text{ V/m}$ con temperaturas máximas por debajo de 30°C y promedios cercanos a ambiente.

1 Introducción

La manipulación precisa de biopartículas en suspensión, tales como células, microorganismos, vesículas, etc. es un requisito central en el desarrollo de plataformas para diagnóstico, separación y análisis *lab-on-a-chip*. Entre las tecnologías más versátiles para este fin se encuentran los dispositivos microfluídicos basados en dielectroforesis con aislantes (*insulator-based dielectrophoresis*, iDEP), que es la antigua teoría, y los sistemas electrocinéticos impulsados por estructuras aislantes (*insulator-based electrokinetics*, iEK). En estas arquitecturas con arreglos de postes dieléctricos dentro del microcanal logran distorsionar de manera controlada el campo eléctrico aplicado, dando lugar a gradientes no uniformes de la magnitud del campo ($\nabla|E|^2$) capaces de generar fuerzas dielectroforéticas que permiten atrapar, concentrar o desviar partículas con alta resolución espacial (Barbaros Çetin, 2011; Blanca H. Lapizco-Encinas, 2018)

Esta intensificación local del campo eléctrico exige trabajar con diferencias de potencial relativamente altas en medios electrolíticos conductores, por lo que bajo estas condiciones, la disipación de energía eléctrica en forma de calor, el cual es el denominado calentamiento por efecto Joule, $Q = \sigma |E|^2$, produce incrementos de temperatura que llegan a modificar las propiedades críticas del fluido como la viscosidad, la conductividad iónica y el flujo electroosmótico. (Roberto C. Gallo-Villanueva, 2019). Cuando el aumento térmico no se

51 controla, se pueden superar rápidamente los umbrales de biocompatibilidad y comprometer la
52 viabilidad de células, proteínas u otras biomoléculas sensibles que se buscan manipular (Perez-
53 Gonzalez, 2021) Por ello, el análisis y la gestión del calentamiento de Joule se han convertido
54 en un componente indispensable del diseño de dispositivos iDEP/iEK.

55 Varios estudios numéricos y experimentales recientes han demostrado que en
56 geometrías convencionales con postes de aristas vivas la distribución del campo eléctrico
57 presenta singularidades en los vértices de los aislantes. En esas zonas, la densidad de corriente
58 se concentra y se generan “puntos calientes” (*hotspots*) donde la temperatura se incrementa de
59 forma desproporcionada respecto al resto del canal. (Nakano et al., 2014) Modelos
60 tridimensionales de dispositivos iDEP han mostrado que el aumento térmico más pronunciado
61 ocurre durante los primeros segundos tras aplicar el campo y que la temperatura promedio del
62 fluido tiende a estabilizarse en un intervalo de $\sim 31\text{--}33\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que concuerda con mediciones
63 de temperatura espacial y temporal dentro de microcanales con aislantes. (Roberto C. Gallo-
64 Villanueva, 2019).

65 La presente investigación se centró en un dispositivo DC-iEK fabricado en SU-8 sobre
66 un sustrato de vidrio, configurado con arreglos de postes aislantes en el interior del microcanal.
67 A diferencia de trabajos previos basados en sustratos poliméricos tipo PDMS, el uso de SU-8
68 como estructura rígida permanente modifica la respuesta termo-mecánica del sistema,
69 manteniendo el aislamiento eléctrico de los postes pero cambiando la forma en la que el calor
70 se conduce hacia el exterior. (*Kayaku SU-8 Permanent Negative Epoxy Photoresist*, n.d.). Para
71 capturar adecuadamente estas interacciones se desarrolló un modelo multiprofísico
72 tridimensional en COMSOL Multiphysics que acopla los módulos de *Electric Currents* y *Heat*
73 *Transfer in Fluids/Solids* mediante una fuente volumétrica de calor de Joule explícita $Q_b = J \cdot$
74 E . (Roberto C. Gallo-Villanueva, 2019).

75 A partir de dicho diseño se implementó una optimización topológica y
76 operativa mediante la introducción de radios de curvatura (*fillets*) en los postes y la reducción
77 del potencial de entrada. Esta combinación logró disminuir la distribución del campo eléctrico,
78 lo que logró eliminar los *hotspots* en las aristas y así redujo la temperatura promedio del
79 sistema en más de un 27 % y disminuyó el voltaje requerido en aproximadamente un 40 %,
80 manteniendo gradientes $\nabla|E|^2$ bien definidos en las gargantas entre postes. (Roberto C. Gallo-
81 Villanueva, 2019). Finalmente, se llevó a cabo un estudio paramétrico geométrico en los
82 espaciamientos entre postes en dirección longitudinal (*gap_x*) y transversal (*gap_y*). Este
83 barrido permitió cuantificar cómo las variaciones en *gap_x* y *gap_y* modifican
84 simultáneamente la intensificación del campo eléctrico, el gradiente $\nabla|E|^2$ y la generación de
85 calor por Joule, mapeando el compromiso entre eficiencia electrocinética y gestión térmica.

2 Marco Teórico

2.1 Electrocínética y dielectroforesis en microcanales con aislantes

Los dispositivos electrocinéticos impulsados por estructuras aislantes (iEK) y, en particular, los sistemas basados en dielectroforesis con aislantes (iDEP), se fundamentan en la interacción entre un campo eléctrico no uniforme y partículas polarizables suspendidas en un medio electrolítico (Barbaros Çetin, 2011; Blanca H. Lapizco-Encinas, 2018). En este tipo de plataformas, arreglos de postes dieléctricos dentro del microcanal distorsionan el campo aplicado y generan gradientes espaciales del cuadrado de su magnitud, $\nabla|E|^2$, que son los responsables directos de la fuerza dielectroforética que actúa sobre las partículas (Gallo-Villanueva et al., 2014).

Existe un vínculo directo entre la geometría del y la magnitud de $\nabla|E|^2$, que es el núcleo del diseño de dispositivos iDEP/DC-iEK, pero también es el origen de las ineficiencias térmicas que se buscan mitigar en este proyecto. (Roberto C. Gallo-Villanueva, 2019).

2.2 Formulación del problema eléctrico en régimen DC

El comportamiento eléctrico del dispositivo se modela en régimen cuasiestático de corriente continua (DC), apropiado para las escalas de tiempo y frecuencias consideradas en dispositivos DC-iEK.[1], [8], [9] La descripción se basa en la conservación de la corriente eléctrica:

$$\nabla \cdot J = 0$$

la descripción se basa en la conservación de la corriente eléctrica:

$$J = \sigma E$$

y el campo eléctrico se relaciona con el potencial eléctrico mediante:

$$E = -\nabla V$$

Al sustituir estas relaciones en la ecuación de conservación se obtiene la forma conductiva de la ecuación de Poisson para medios con conductividad espacialmente variable:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0$$

Donde V es el potencial eléctrico y σ la conductividad eléctrica del medio (Melcher & Taylor, 2025). En el dominio fluido (agua con buffer iónico), σ se toma dependiente de la temperatura para reproducir el incremento de conductividad que acompaña al calentamiento por efecto Joule.

En el modelo base, la conductividad a 20 °C se fijó en $\sigma_0 = 0.0020 S/m$ se hizo depender linealmente de la temperatura con un coeficiente de 0.02 [1/°C].

En los dominios sólidos de SU-8 y vidrio se impuso aislamiento eléctrico ($\sigma \rightarrow 0$) de modo que $J = 0$ y únicamente el fluido conduce corriente dentro del canal.(Blanca H. Lapizco-Encinas, 2018; *Kayaku SU-8 Permanent Negative Epoxy Photoresist*, n.d.)

2.3 Acoplamiento termoelectrónico y calentamiento por efecto Joule

El calentamiento por efecto Joule surge de la disipación de energía eléctrica en forma de calor dentro del electrolito conductor. A nivel continuo, la densidad de potencia volumétrica asociada a Joule se expresa como:

$$Q_b = J \cdot E = \sigma |E|^2$$

Esta fuente de calor se acopla a la ecuación de energía térmica, que en un dominio fluido con conducción y convección se escribe como:

$$pCp\left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T\right) = \nabla \cdot (k\nabla T) + Q$$

Donde p es la densidad, Cp , y k son la densidad, capacidad calorífica y conductividad térmica del material, respectivamente. Dado que se modelan postes sólidos estacionarios, el término convectivo ($u \cdot \nabla T$) se anula en los dominios sólidos y la ecuación se reduce

$$pCp \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k\nabla T)$$

Es decir, únicamente se considera conducción de calor a través de los sólidos

En el modelo desarrollado, el acoplamiento entre la física eléctrica y térmica se implementa mediante el interfaz de *Electromagnetic Heat Source (Joule)*, que transfiere la potencia volumétrica $Q_b = J \cdot E$ calculada en el módulo de *Electric Currents* al módulo de *Heat Transfer in Fluids/Solids* como fuente interna de calor (Cardenas-Benitez et al., 2020).

Otros mecanismos de generación de calor, como la disipación viscosa del flujo y los efectos de compresibilidad, se consideran despreciables frente a Joule en las condiciones de operación de este dispositivo, de acuerdo con el análisis previo y la literatura de referencia en iDEP (Nakano et al., 2014). Las fronteras externas se modelaron con convección y radiación al ambiente.

2.4 Modelado de materiales: electrolito, SU-8 y vidrio (vs. PDMS)

El sistema modelado consta de cuatro dominios principales: el fluido electrolítico, la estructura de SU-8 (que define el canal y los postes aislantes), el sustrato de vidrio inferior y la tapa de vidrio superior (Roberto C. Gallo-Villanueva, 2019).

a) Fluido (agua con buffer iónico)

Sus propiedades $\rho(T)$, $C_p(T)$, $\mu(T)$ se toman de la librería de materiales de COMSOL, mientras que la conductividad $\sigma(T)$ se especifica de forma explícita según la ley lineal mencionada anteriormente.[1]

b) SU-8

Esta sustitución impacta tanto a la distribución de temperatura como la la estabilidad dimensional del dispositivo

c) Vidrio (sustrato y tapa)

Se modela con propiedades térmicas estándar de la librería de COMSOL, actuando como soporte mecánico y ruta de disipación de calor por conducción-

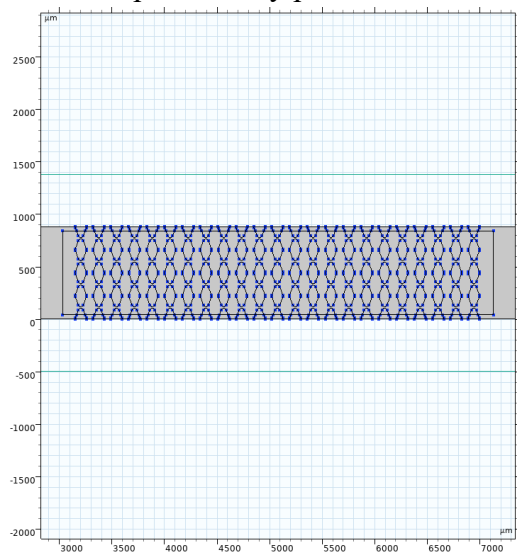
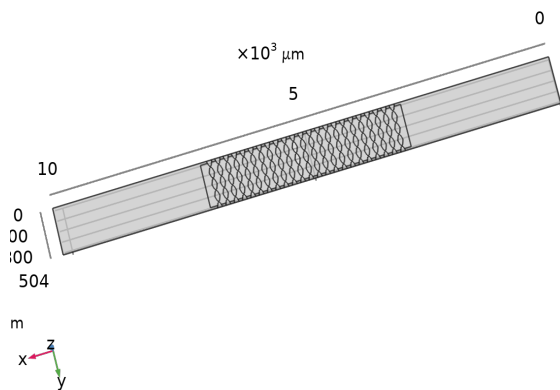
Una diferencia clave respecto al trabajo de referencia es que, en ese estudio, el material estructural principal era PDMS; en el presente modelo se sustituye por SU-8 como estructura rígida, manteniendo el aislamiento eléctrico pero modificando la forma en la que el calor se conduce fuera del canal. Esta sustitución impacta tanto en la distribución de temperatura como en la estabilidad dimensional del dispositivo, y se integra explícitamente en la parametrización del modelo numérico (Blanca H. Lapidco-Encinas, 2018).

Nombre	Expresión	Valor
L_ch	10.16 [mm]	0.01016 m

Nombre	Expresión	Valor
W_ch	880[um]	8.8E-4 m
H_ch	7 [um]	7E-6 m
R_rombo	56.1 [um]	5.61E-5 m
rows	5	5
col	23	23
gap_x	57.8 [um]	5.78E-5 m
gap_y	26.6 [um]	2.66E-5 m
dist_x	$(2*R_rombo) + gap_x$	1.7E-4 m
L_array	$(col*2*R_rombo) + ((col - 1)*gap_x)$	0.0038522 m
W_array	$(rows*2*r_rombo) + ((rows - 1)*gap_x)$	0.0011982 m
r_inlet	W_ch/4	2.2E-4 m
eps_r_water	80	80
sigma_water	150[uS/cm]	0.015 S/m
eps_r_pdms	2.75	2.75
sigma_pdms	2.5E-14 [S/m]	2.5E-14 S/m
V0	1500[V]	1500 V
L_pdms	L_ch + 1000[um]	0.01116 m
W_pdms	W_ch + 1000[um]	0.00188 m
H_pdms	H_ch + 1000[um]	0.001007 m
r_rombo	96.7[um]	9.67E-5 m
r_post	98.35[um]	9.835E-5 m
eps_r_vacio	8.8541878176e-12[F/m]	8.8542E-12 F/m
e_m	$(eps_r_water)*(eps_r_vacio)$	7.0834E-10 F/m
Z_pot	-66.7[mV]	-0.0667 V
alfa	0.02[1/K]	0.02 1/K
T0	293.15[K]	293.15 K
gap_y_p	10.5 [um]	1.05E-5 m
dist_y	$(2*r_rombo) + gap_y_p$	2.039E-4 m
r_fillet	25 [um]	2.5E-5 m
GAPY	220 [um]	2.2E-4 m
GAPX	$((112.2/\sqrt{2})) - 4.5$ [um]	7.4837E-5 m

165

Tabla 1. Declaración de parámetros en modelo optimizado y parametrizado.



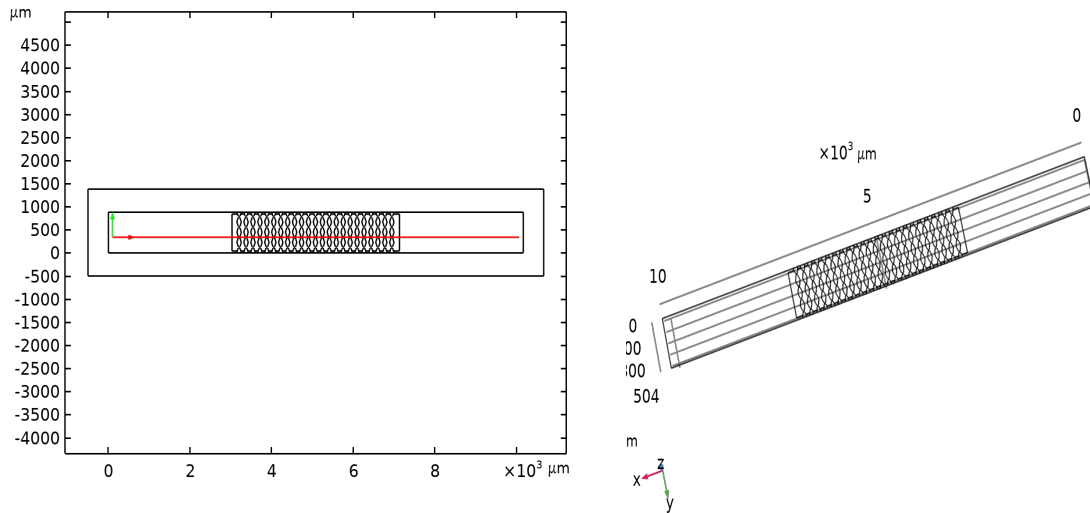


Figura 1. Geometría del diseño base (izquierda) vs modelo optimizado(derecha)

2.5 Singularidades geométricas, gradiente de campo y efecto Joule

En geometrías con ángulos rectos o agudos, tales como postes rectangulares, el campo eléctrico experimenta una intensificación asintótica en los vértices. Desde el punto de vista matemático, estas regiones se comportan como singularidades en las que las líneas de campo se concentran fuertemente, elevando tanto $|E|$ como $|E|^2$ en volúmenes muy pequeños (Nakano et al., 2014).

Por la parte numérica, estas singularidades conducen a valores de $|E|$ y J artificialmente altos en una pequeña vecindad del vértice, lo que se traduce en picos de generación de calor $Q_b \propto |E|^2$ que no contribuyen de manera proporcional a la fuerza dielectroforética efectiva en el volumen útil del canal. El resultado es la aparición de *hotspots* térmicos en tiempos del orden de decenas de segundos, elevando la temperatura promedio del fluido a $\sim 31\text{--}33\text{ }^\circ\text{C}$, tal como se observó en el modelo validado de la Etapa 3 y en mediciones experimentales reportadas en la literatura (Perez-Gonzalez, 2021).

Es importante mencionar que la geometría de los postes controla la distribución de $\nabla|E|^2$ a lo largo del canal. En el diseño base, los gradientes máximos se localizan en las gargantas entre postes, coincidiendo espacialmente con las regiones donde también se concentra el calentamiento por Joule.

La estrategia de optimización se basaron en buscar geometrías que eliminen o mitiguen las singularidades locales sin perder el *pattern* global de intensificación en las gargantas.

2.6 Geometría, gaps y diseño paramétrico en dispositivos Dc-iEK

El comportamiento del dispositivo se rige por el acoplamiento multifísico entre las corrientes eléctricas y la transferencia de calor. El campo eléctrico en el microcanal se describe mediante la ecuación de conservación de la corriente para un medio conductor óhmico en estado estacionario:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0$$

$$E = -\nabla V [V/m]$$

Donde V es el potencial eléctrico, E es el campo eléctrico, J es la densidad de corriente y σ es la conductividad eléctrica del medio (Melcher & Taylor, 2025)

El calentamiento por efecto Joule, que actúa como fuente de calor volumétrica (Q_{gen}), se acopla a la ecuación de la energía térmica:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$$

Donde ρ , C_p , y k son la densidad, capacidad calorífica y conductividad térmica del material, respectivamente. Dado que se modelan postes sólidos estacionarios, el término convectivo ($\mathbf{v} \cdot \nabla T$) se anula en los dominios sólidos

3 Metodología

El dispositivo analizado es un microcanal DC-iEK tridimensional con arreglos de postes aislantes fabricados en SU-8 sobre un sustrato de vidrio, sellado con una tapa también de vidrio y llenado con una solución acuosa conductora. El modelo numérico se implementó en COMSOL Multiphysics como un problema multifísico acoplado entre Corrientes eléctricas (Electric Currents, EC), en régimen cuasiestático, para describir la distribución del potencial eléctrico, el campo eléctrico y la densidad de corriente en el fluido.

3.1 Construcción del modelo base

Corrientes eléctricas (Electric Currents, EC), en régimen cuasiestático, para describir la distribución del potencial eléctrico, el campo eléctrico y la densidad de corriente en el fluido. Transferencia de calor (Heat Transfer in Fluids/Solids, HT), para capturar el incremento de temperatura por efecto Joule y su difusión en el fluido, en el SU-8 y en los sustratos de vidrio.

La formulación parte de la ecuación de conservación de la corriente en un medio conductor óhmico:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0,$$

de la cual se obtiene el campo eléctrico $\mathbf{E} = -\nabla V$ y la densidad de corriente $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$. La potencia disipada por efecto Joule se expresa como fuente volumétrica de calor:

$$Q_{Joule} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} = \sigma |\mathbf{E}|^2,$$

y se acopla a la ecuación de energía térmica en el fluido y en los sólidos:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_{Joule}.$$

226

227 En los dominios sólidos (SU-8 y vidrio) se resuelve únicamente conducción de calor (sin
228 convección), mientras que en el fluido se incluye conducción y, cuando es relevante,
229 convección. Los términos de disipación viscosa y compresibilidad del fluido se consideran
230 despreciables frente al aporte de Joule en los regímenes estudiados.

231 **3.2 Validación del modelado**

232 En la Etapa 3 se construyó y resolvió el modelo base validado del calentamiento de Joule en
233 el dispositivo DC-iEK.

234 **Condiciones de frontera eléctricas**

- 235 a) Potencial aplicado en la entrada del canal (típicamente 2500 V en la línea base).
- 236 b) Tierra eléctrica en la salida.
- 237 c) Aislamiento eléctrico en paredes y postes de SU-8, suponiendo que no conducen
238 corriente ($\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0$).

239 **Condiciones térmicas**

- 240 a) Temperatura inicial uniforme de $T_0 = 293.15 \text{ K}$ (20°C) en todos los dominios.
- 241 b) Condiciones mixtas de disipación en las superficies externas (convección natural y,
242 cuando se requirió, radiación simplificada) para representar el intercambio térmico
243 con el aire ambiente.

244 **Estudios numéricos**

- 245 1. Estacionario (EC): se resolvió el campo eléctrico hasta obtener V , E y el gradiente del
246 cuadrado del campo $\nabla |E|^2$, que es la magnitud directamente relacionada con la
247 fuerza dielectroforética.
- 248 2. Dependiente del tiempo (HT): a partir de la solución eléctrica se integró la evolución
249 térmica de 0 a 120 s para capturar el incremento inicial de temperatura y su posterior
250 estabilización.

251 El análisis se estructuró jerárquicamente en vistas 3D, 2D y perfiles 1D para correlacionar
252 regiones de máximo calentamiento con las zonas de intensificación del campo eléctrico.

253

254 **3.2.1 Optimización geométrica y operativa**

255 Sobre el modelo validado se implementó una optimización topológica y paramétrica enfocada
256 en mitigar las singularidades geométricas que amplifican el efecto Joule.

257 **Modificación geométrica (fillets)**

El diseño base con postes de sección cuadrada y aristas vivas se sustituyó por una geometría con radios de curvatura (fillets) en los vértices de los postes. El radio de fillet se trató como parámetro de diseño, fijándose en un valor representativo (por ejemplo, 25 μm) que suaviza las aristas sin comprometer la viabilidad de fabricación en SU-8.

Esta modificación elimina las singularidades del campo eléctrico en las esquinas, redistribuyendo la densidad de corriente y reduciendo los “puntos calientes” térmicos sin anular la intensificación del campo en las gargantas entre postes.

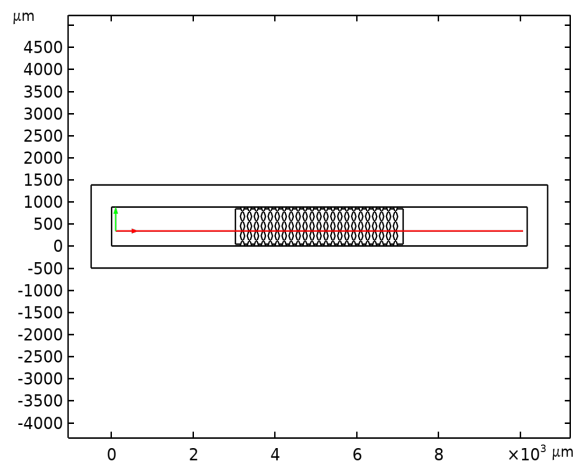


Figura 2. Cut line del modelo optimizado (B)

Reajuste de la densidad de energía

En paralelo, se redujo el voltaje de entrada desde 2500 V hasta un valor optimizado de 1500 V (40 % menos), manteniendo la misma geometría global del canal.

El esquema de estudios se mantuvo:

- Solución estacionaria del campo eléctrico con la nueva geometría y el nuevo voltaje.
- Simulación dependiente del tiempo para la temperatura en el mismo intervalo temporal.

Las métricas de desempeño incluyeron:

- Temperatura promedio volumétrica del fluido.
- Temperatura máxima local.
- Magnitud máxima del campo eléctrico $|E|$.
- Gradiente máximo de $|E|^2$ en las gargantas.

Los resultados mostraron que la geometría con fillets y el nuevo voltaje estabilizan la temperatura promedio en torno a 23 °C y disminuyen la demanda energética en ~40 %, manteniendo zonas de alto gradiente de campo adecuadas para iDEP.

3.3 Estudio paramétrico de separación entre postes: GAPX y GAPY

Se incorporó un estudio paramétrico geométrico sobre la configuración optimizada de la Etapa 4, con el objetivo de cuantificar cómo la separación entre postes aislantes que influye simultáneamente en:

- La intensidad del campo eléctrico y de $\nabla |E|^2$
- El calentamiento por efecto Joule y las temperaturas de operación.

3.4.1 Definición de parámetros geométricos

Se introdujeron dos parámetros globales en la geometría:

- GAPX: separación efectiva entre filas de postes en la dirección longitudinal del canal (x), que controla el espaciado entre gargantas sucesivas.
- GAPY: separación entre postes opuestos en la dirección transversal (y), equivalente al ancho de la garganta activa donde se concentra el campo.

A partir de la geometría optimizada con fillets, se definieron cuatro niveles para GAPX y tres niveles para GAPY, generando en total 12 combinaciones paramétricas (su1–su12), identificadas en las soluciones de COMSOL como:

- GAPX = 73.337, 74.837, 76.337 y 79.337 (μm)
- GAPY = 220, 215 y 212.5 (μm)

combinados de forma cruzada para explorar tanto reducciones como incrementos relativos respecto al espaciado base. La parametrización se implementó editando las dimensiones y desplazamientos de las entidades geométricas asociadas a los postes en el croquis, de modo que, al cambiar GAPX y GAPY, COMSOL reconstruyera automáticamente la geometría antes de cada simulación.

3.4.2 Configuración del barrido paramétrico

Sobre el modelo optimizado, se configuraron dos barridos paramétricos anidados:

1. Barrido en GAPX: cuatro valores discretos que modifican la separación longitudinal entre filas de postes.
2. Barrido en GAPY: tres valores discretos de separación transversal, que ajustan el ancho de la garganta.

El estudio principal se definió como un “Time Dependent” con subnodos de “Soluciones paramétricas” asociados a GAPX y GAPY. Para cada pareja (GAPX, GAPY):

- Se resolvió primero el problema de corrientes eléctricas en estado estacionario, obteniendo V , E y $\nabla |E|^2$.

- Con esa solución, se integró la transferencia de calor dependiente del tiempo hasta alcanzar el régimen estacionario térmico, bajo las mismas condiciones de disipación que en la Etapa 4 (aire a $T_{\infty} = 293.15$ K).

3.5.3 Métricas de desempeño y post-proceso

Para cada combinación de GAPX y GAPY se extrajeron métricas cuantitativas mediante operadores de promediado y máximos sobre dominios y líneas de interés:

- Temperatura promedio volumétrica del fluido en el dominio del canal ($\langle T \rangle_V$).
- Temperatura máxima local en el fluido ($T_{\max}$), asociada a los “hotspots” residuales.
- Magnitud máxima del campo eléctrico $|E|_{\max}$ en la garganta principal.
- Gradiente máximo de $|E|^2$ en la zona activa.
- Potencia total disipada por Joule que se obtuvo como integral volumétrica de Q_{Joule} en el fluido.

4 Resultados y discusión

4.1 Validación del modelo de referencia

El punto de partida del proyecto fue la implementación en COMSOL Multiphysics de un modelo de referencia de un dispositivo DC-iEK con postes aislantes, basado en la geometría y condiciones reportadas previamente por Gallo-Villanueva et al. (2019) para un sistema iDEP de mitocondrias. En esta etapa se reprodujeron las dimensiones del microcanal, la disposición de los postes romboidales y las condiciones operativas, en donde es un potencial aplicado del orden de 2500 V entre electrodos y una solución electrolítica con conductividad en el rango de los mS/m, representativa de medios de baja fuerza iónica usados en aplicaciones de biomanipulación.

En el modelo base se acopló el módulo de Corrientes Eléctricas con el módulo de Transferencia de Calor en sólidos y fluidos, de manera que el término de calentamiento por efecto Joule, $Q_{\text{gen}} = \sigma |E|^2$, alimentara directamente la ecuación de energía térmica en el fluido. La solución estacionaria del campo eléctrico mostró, como se esperaba por la teoría y por el trabajo experimental de referencia, una fuerte intensificación del campo en las esquinas agudas de los postes. Las líneas de corriente se concentraron en los cuellos formados entre poste y poste, donde $|E|$ alcanzó máximos locales y el gradiente $\nabla |E|^2$ fue suficiente para inducir fuerzas dielectroforéticas relevantes en la región central del canal.

No obstante, esta misma concentración del campo se tradujo en una distribución de temperatura heterogénea, con “hotspots” térmicos localizados en los vértices de los postes romboidales. El análisis de la temperatura a lo largo de la línea central del canal reveló un máximo del orden de $t = 33.3^{\circ}\text{C}$ para el caso de referencia, partiendo de una condición inicial cercana a ambiente ($23\text{--}25^{\circ}\text{C}$). La temperatura promedio del fluido se mantuvo en el intervalo

31–33 °C, en concordancia con el comportamiento reportado para geometrías con aristas vivas en sistemas DC-iEK similares.

Desde el punto de vista electrocinético, estas temperaturas siguen siendo utilizables para muchas aplicaciones de iDEP; sin embargo, presentan varias desventajas: (i) reducen el margen de seguridad térmica para partículas biológicas sensibles, (ii) modifican propiedades termo-dependientes del medio, como la viscosidad y la propia conductividad, y (iii) representan un uso ineficiente de la energía eléctrica, pues una fracción significativa del consumo de potencia se disipa como calor en regiones que no contribuyen de forma proporcional al gradiente útil $|\nabla E|^2$.

4.2 Optimización geométrica y operativa: postes con fillets

Se propuso una modificación topológica de los postes consistente en redondear las esquinas mediante la introducción de un radio de curvatura (fillet). El objetivo es eliminar las singularidades geométricas asociadas con ángulos agudos, suavizando la concentración de líneas de corriente y redistribuyendo tanto el campo eléctrico como la generación local de calor.

La geometría optimizada se definió sobre la misma malla global del microcanal, reemplazando los vértices romboidales por transiciones circulares y ajustando el potencial aplicado. Mientras que el modelo de referencia operaba a 2500 V, en el modelo con postes suavizados se trabajó con un potencial reducido del orden de 1500 V, lo que de entrada implica una disminución cuadrática en el término $\sigma |E|^2$. Esta reducción de voltaje se compensó con la mayor eficiencia geométrica para concentrar el campo eléctrico alrededor de los postes.

Los resultados del acoplamiento electro-térmico mostraron un cambio cualitativo en la distribución de temperatura. Las isosuperficies térmicas indicaron que, al introducir fillets, los picos de temperatura en las esquinas se aplanaron y se transformaron en regiones más extendidas, con gradientes térmicos menos abruptos. Cuantitativamente, el análisis de la temperatura sobre una línea de corte en el plano medio del canal mostró que el valor máximo pasaba de aproximadamente 33.4 °C en la geometría con aristas vivas a cerca de 31.0–31.1 °C en la geometría con fillets.

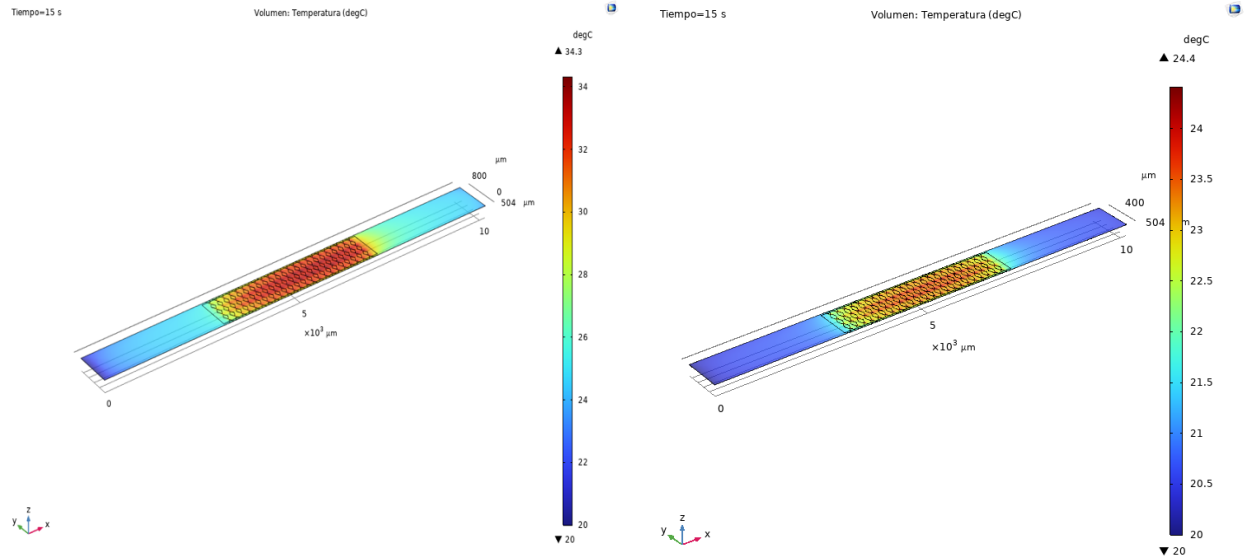


Figura 3. Vista 3D del cambio de Temperatura en el dispositivo en $t=15$ segundos del modelo validado (A) y el modelo optimizado (B)

Más relevante aún, el cálculo de la temperatura promedio volumétrica del fluido indicó una reducción de más del 27 % respecto al diseño original, estabilizándose alrededor de 23 °C tras el régimen transitorio. Esta disminución implica que el sistema opera prácticamente a temperatura ambiente, ampliando de manera significativa el margen de seguridad térmica para muestras biológicas y reduciendo el impacto en las propiedades fisicoquímicas del medio.

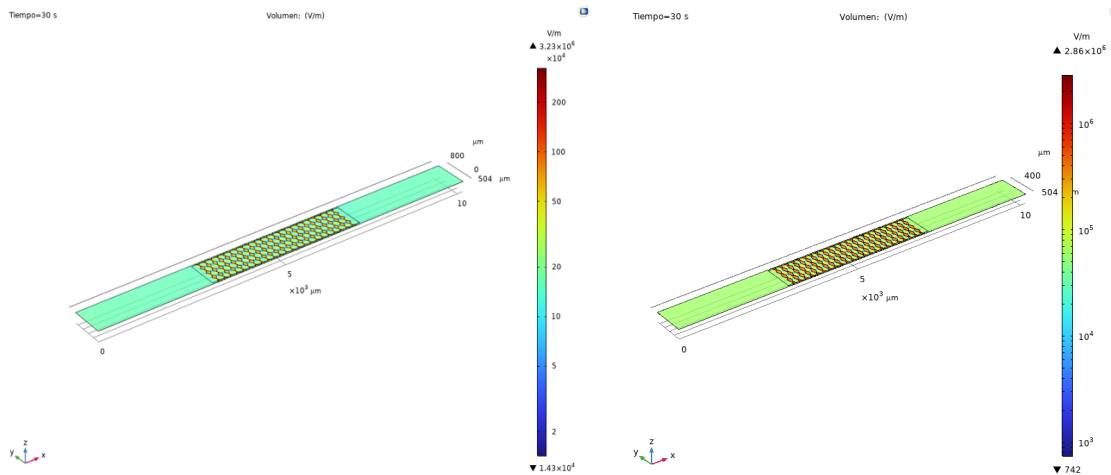


Figura 4. Distribución volumétrica 3D de la magnitud del campo eléctrico en el dispositivo en el dispositivo del modelo validado (A) y el modelo optimizado (B)

Desde el punto de vista eléctrico, la estrategia no penalizó la capacidad de generar gradientes de campo útiles. De hecho, la magnitud del campo eléctrico normal en la región central del microcanal aumentó de $|E|_{\max} \approx 9.8 \times 10^5$ V/m en el modelo de referencia a

valores cercanos a 1.6×10^6 V/m en la geometría optimizada, de acuerdo con los máximos lineales registrados en los cortes centrales. Esto significa que se logró simultáneamente:

- (i) reducir la temperatura global
- (ii) disminuir el potencial aplicado

En términos energéticos, la combinación de menor voltaje y eliminación de singularidades geométricas se tradujo en una reducción aproximada del 40 % en el consumo de potencia respecto al modelo de referencia, manteniendo un entorno electrocinético funcional.

4.3 Estudio paramétrico: variación de GAPX y GAPY

El segundo estudio abordó explícitamente la relación entre la arquitectura del arreglo de postes y el compromiso Joule-calentamiento / eficiencia electrocinética. Partiendo de la geometría optimizada con fillets, se definieron doce combinaciones de separación interpostes dadas por los parámetros GAPX (distancia entre postes consecutivos a lo largo del eje del flujo) y GAPY (distancia entre filas de postes en la dirección transversal).

Para cada combinación se calcularon:

- (i) la temperatura máxima a lo largo de la línea central del canal
- (ii) la componente normal máxima del campo eléctrico $|E_n|$ en esa misma línea
- (iii) La temperatura promedio volumétrica del fluido.

I. Configuraciones con gaps más estrechos (menor GAPY y/o GAPX reducido)

En los casos donde se disminuye la separación entre postes, el campo eléctrico se concentra más fuertemente en los cuellos formados entre ellos. Esto se refleja en valores de $|E_n|_{\max}$ que alcanzan hasta $\sim 2.5 \times 10^6$ V/m, es decir, incrementos del orden del 30–40 % respecto a la configuración base. Este aumento en la intensidad del campo viene acompañado de un incremento significativo de la temperatura máxima, que puede elevarse hasta ~ 35.5 – 35.6 °C en la región central del canal.

La temperatura promedio volumétrica del fluido en estos casos también se sitúa en el extremo superior del rango observado, la cual es cercana a 31–32 °C, de manera similar al modelo de referencia sin optimización térmica. Desde el punto de vista electrocinético, estas configuraciones maximizan la fuerza dielectroforética disponible pero al costo de reintroducir un calentamiento significativo que compromete la estabilidad térmica del sistema y la viabilidad de muestras sensibles.

II. Configuraciones con gaps intermedios (variaciones moderadas de GAPX y GAPY)

Para combinaciones en las que GAPX y GAPY se modifican de forma más moderada en torno a los valores base, se observa un escenario de compromiso más favorable. Los máximos de $|E_n|$ se mantienen en el intervalo $1.8 \times 10^6 - 2.0 \times 10^6$ V/m, es decir, aún por encima de los valores logrados en el modelo de referencia, mientras que las temperaturas máximas sobre la línea central se reducen a $\sim 28-30$ °C.

La temperatura promedio del fluido, evaluada mediante el operador de volumen promedio, se estabiliza para estas configuraciones en torno a $23-25$ °C después de un transitorio de ~ 30 s, es decir, sólo ligeramente por encima de la temperatura ambiente. Este conjunto de configuraciones demuestra que es posible mantener campos eléctricos suficientemente intensos para iDEP sin sacrificar el control térmico logrado con la introducción de fillets y la reducción del potencial aplicado.

III. Configuraciones con gaps más amplios (GAPX y/o GAPY incrementados)

Cuando se incrementan simultáneamente GAPX y GAPY más allá de cierto umbral, las simulaciones muestran una disminución más marcada de $|E_n|$ en la región central del canal, con máximos que se acercan nuevamente a valores del orden de 1.6×10^6 V/m o ligeramente inferiores. Si bien las temperaturas máximas permanecen en el rango bajo ($\sim 28-30$ °C) y la temperatura promedio del fluido sigue muy cercana a ambiente, la reducción en el gradiente $\nabla |E|^2$ compromete la eficiencia dielectroforética y la capacidad de atrapamiento de partículas de baja polarizabilidad.

El dispositivo es térmicamente muy estable, pero electrocinéticamente menos eficiente, por lo que estas configuraciones se consideran subóptimas desde el punto de vista de la funcionalidad DC-iEK.

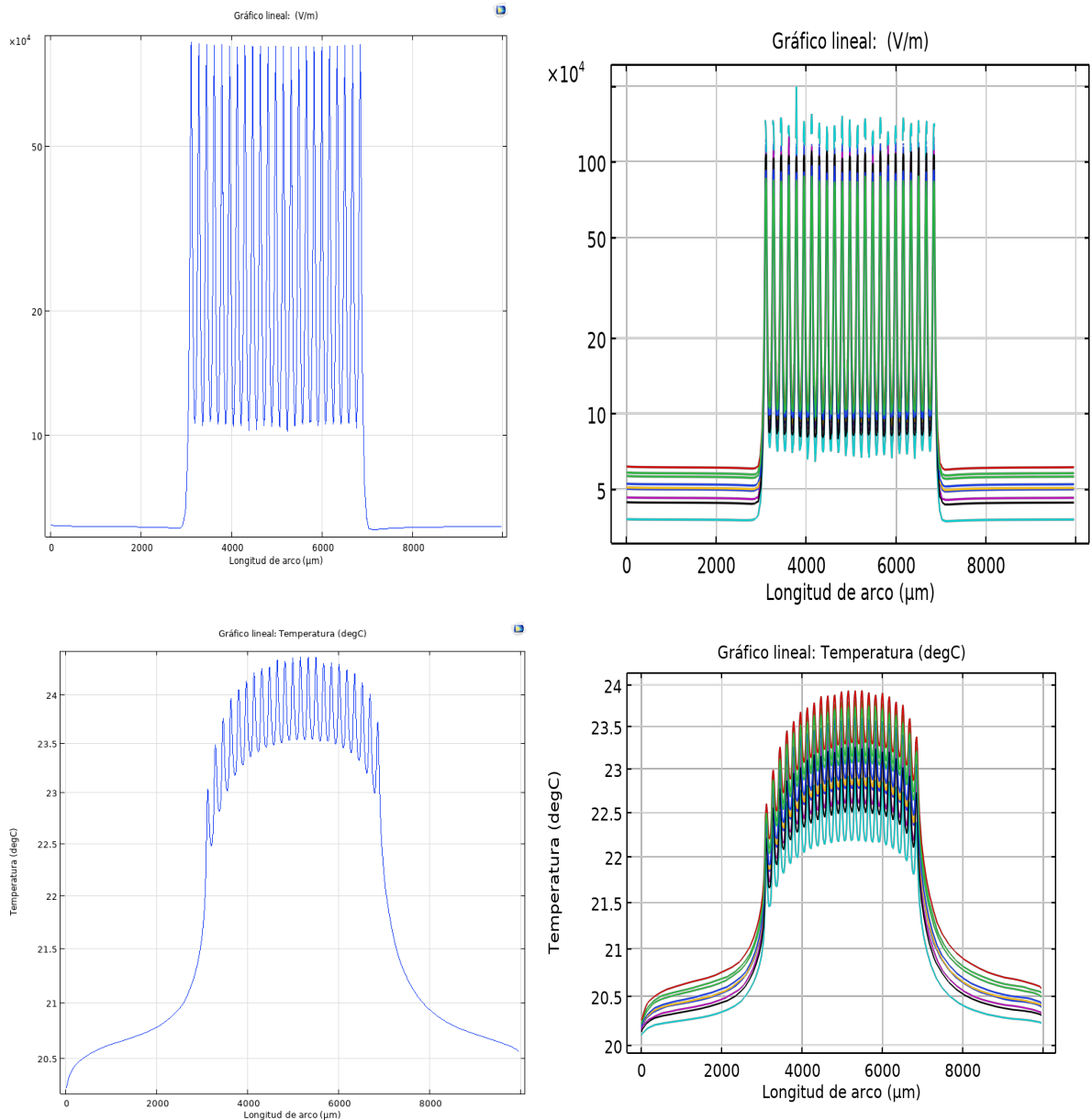


Figura 5. Perfiles lineales de la magnitud del campo eléctrico y de la temperatura a lo largo de la línea central del canal para (a) el diseño optimizado de referencia y (b) el estudio paramétrico en GAP_X y GAP_Y. Las gráficas superiores muestran $|E|$ (V/m) en función de la longitud de arco, mientras que las inferiores muestran la temperatura (°C) en la misma línea. En (b), cada curva corresponde a una combinación distinta de GAP_X-GAP_Y alrededor del diseño optimizado, ilustrando el compromiso entre la intensificación del campo eléctrico y el incremento de temperatura por efecto Joule en la región de postes.

De esa forma se permitió trazar un mapa de compromiso entre calentamiento Joule y eficiencia electrocinética. Las configuraciones más interesantes se ubican en la región intermedia del espacio de parámetros, donde $|E_n|$ supera de forma consistente 1.8×10^6 V/m y la temperatura máxima se mantiene por debajo de ~ 30 °C, con temperaturas promedio volumétricas próximas a 23–25 °C. Estas condiciones combinan un campo suficientemente intenso para generar fuerzas dielectroforéticas robustas con un entorno térmico seguro para biopartículas y energéticamente más eficiente.

Más allá de los valores puntuales de temperatura y campo, el estudio paramétrico permitió caracterizar la respuesta termo-eléctrica del dispositivo a lo largo del tiempo para cada combinación de GAPX–GAPY. En todos los casos, el incremento de temperatura se concentró en los primeros 20–30 s tras la aplicación del potencial, periodo durante el cual la potencia de Joule domina sobre la disipación hacia los sustratos. Una vez alcanzado el equilibrio entre generación y pérdida de calor, la temperatura promedio del fluido se estabilizó en un valor prácticamente constante, mientras que la temperatura máxima en la región de gargantas reflejó de manera sensible la variación en los gaps.

Esta dinámica transitoria es importante porque indica que, aun en configuraciones con gaps más agresivos, el sistema no presenta un crecimiento térmico indefinido, sino que tiende a un estado estacionario bien definido. Sin embargo, el nivel de ese estado estacionario depende fuertemente de la arquitectura del arreglo de postes con configuraciones con GAPY reducido y GAPX corto se alcanzan regímenes estacionarios con T_{max} en torno a 35–36 °C, mientras que combinaciones intermedias se estabilizan por debajo de 30 °C con temperaturas promedio cercanas a 23–25 °C.

Estos resultados sugieren que la selección de GAPX y GAPY no solo fija la intensidad de $|E|$ en la zona activa, sino también la velocidad con la que el dispositivo entra en una “meseta térmica” segura o riesgosa. En configuraciones intermedias, la pendiente inicial del aumento de temperatura es moderada y la diferencia entre T_{max} y T_{prom} se mantiene acotada, lo que se traduce en gradientes térmicos menos severos y en un entorno más homogéneo para la manipulación de biopartículas.

5 Implicaciones electrocinéticas y comparación con el modelo de referencia

5.1 Validación del modelo de referencia y adaptación al SU-8

El dispositivo DC-iEK modelado en COMSOL reprodujo de manera consistente el comportamiento reportado en la literatura para sistemas iDEP con postes aislantes: concentración del campo eléctrico en las gargantas entre postes, aparición de “hotspots” térmicos en las aristas agudas y estabilización de la temperatura promedio del fluido en torno a 31–33 °C bajo operación en DC. La adaptación del diseño a una plataforma basada en SU-8 sobre vidrio permitió incorporar propiedades termo-eléctricas realistas y confirmó que el calentamiento por efecto Joule es un factor limitante inherente a estos dispositivos, más que una particularidad de un material específico.

5.2 Impacto de las singularidades geométricas en el efecto Joule

El modelo de referencia mostró que las singularidades asociadas a postes con aristas vivas concentran tanto el campo eléctrico como la densidad de corriente en volúmenes muy pequeños, produciendo picos locales de $Q_{\text{Joule}} = \sigma |E|^2$ que elevan la temperatura sin aportar de forma proporcional al gradiente útil $|\nabla|E|^2$. Esta coincidencia de máximos eléctricos y térmicos en las esquinas confirmó que la geometría de los postes es un parámetro de diseño

crítico: no solo determina la eficiencia electrocinética, sino también la ventana térmica segura de operación.

5.3 Optimización topológica: fillets como estrategia robusta de mitigación térmica

La introducción de radios de curvatura (fillets) en los postes aislantes eliminó las singularidades de las esquinas y redistribuyó las líneas de campo en torno a las gargantas. En combinación con una reducción del voltaje de entrada (de 2500 V a 1500 V), el diseño optimizado logró: (i) disminuir la temperatura promedio del fluido a valores cercanos a la temperatura ambiente ($\sim 23\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$), (ii) reducir los máximos de temperatura a $\sim 30\text{--}31\text{ }^{\circ}\text{C}$ y (iii) mantener o incluso incrementar la intensidad del campo eléctrico en la región central. Se demostró que el beneficio principal del fillet es cualitativo y variaciones moderadas en el radio de redondeo producen cambios secundarios, lo que otorga robustez frente a tolerancias de fabricación.

5.4 Estudio paramétrico del radio de redondeo

El primer estudio paramétrico de la Etapa 5, centrado en el radio de fillet, mostró que una vez introducido un redondeo finito, el sistema se vuelve poco sensible a variaciones razonables de ese parámetro. Las temperaturas máximas y promedio, así como los máximos de $|E|$, se mantuvieron en rangos estrechos al modificar r_{fillet} . Esto indica que, desde el punto de vista de diseño, basta con asegurar la presencia de un radio de curvatura suficiente para eliminar la singularidad; la optimización fina de su valor es menos relevante que otros parámetros geométricos.

5.5 Estudio paramétrico geométrico GAPX–GAPY y compromiso Joule–electrocinética

El segundo estudio paramétrico, sobre GAPX (separación longitudinal) y GAPY (separación transversal entre postes), permitió mapear el compromiso entre intensificación de campo y calentamiento de Joule. La reducción de GAPX y/o GAPY incrementó los máximos de $|E|$ y, por tanto, la magnitud de $\nabla|E|^2$, pero también elevó la temperatura máxima y la temperatura promedio del fluido hacia valores cercanos a los del modelo de referencia. Por el contrario, gaps excesivamente grandes disminuyeron el calentamiento, pero también redujeron el gradiente de campo hasta niveles menos favorables para iDEP. Se identificó así una región intermedia de diseño en la que $|E|$ se mantiene por encima de los valores del modelo base y las temperaturas se conservan por debajo de $\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, con promedios próximos a ambiente.

Una forma útil de interpretar el barrido geométrico es agrupar las configuraciones en tres regímenes de diseño:

- (i) un régimen “agresivo con GAPX y/o GAPY reducidos, donde se maximizan $|E|$ y $\nabla|E|^2$ a costa de reproducir temperaturas cercanas a las del modelo de referencia

- (ii) un régimen “intermedio”, en el que los gaps se mantienen próximos a los valores base y se obtiene un equilibrio favorable entre campo intenso y calentamiento moderado
- (iii) un régimen “conservador”, con gaps amplios que minimizan la generación de Joule pero reducen el gradiente de campo hasta valores poco atractivos para iDEP.

El régimen intermedio define una ventana de diseño particularmente relevante: allí, el dispositivo opera con campos del orden de $1.8\text{--}2.0\times 10^6$ V/m, temperaturas máximas por debajo de 30 °C y promedios muy cercanos a la temperatura ambiente. El hecho de que varias combinaciones distintas de GAPX–GAPY caigan dentro de esta ventana sugiere que el diseño optimizado no es un “punto” aislado, sino una región robusta del espacio geométrico.

5.6 Diseño del modelo

De manera integrada, el trabajo mostró una ruta clara de migración desde el modelo de referencia de la Etapa 3 hacia un dispositivo optimizado en la Etapa 4 y refinado mediante estudios paramétricos en la Etapa 5. Primero se validó el modelo con un diseño realista pero térmicamente subóptimo; después se implementó una optimización topológica y de voltaje que mitigó el efecto Joule manteniendo la funcionalidad electrocinética; finalmente, se exploró el espacio geométrico local alrededor de la solución optimizada mediante variaciones sistemáticas de GAPX y GAPY. Esta secuencia demostró que la combinación de simulación multifísica y parametrización geométrica es una herramienta eficaz para el diseño racional de dispositivos DC-iEK.

5.7 Relevancia para el diseño de dispositivos DC-iEK y perspectivas a futuro

Los resultados obtenidos refuerzan la idea de que la eficiencia de un dispositivo DC-iEK no puede evaluarse sólo en términos de gradiente de campo o voltaje aplicado, sino como un compromiso multiparamétrico que incluye gestión térmica, robustez de fabricación y biocompatibilidad. El modelo desarrollado puede extenderse en trabajos futuros para: (i) incorporar de forma explícita el acoplamiento con el flujo electroosmótico resolviendo las ecuaciones de Navier–Stokes, (ii) estudiar el efecto de diferentes conductividades de medio y condiciones de enfriamiento, (iii) explorar voltajes pulsados o AC superpuestos para modular simultáneamente fuerzas electrocinéticas y calentamiento, y (iv) validar experimentalmente las configuraciones óptimas propuestas mediante microfabricación en SU-8 y caracterización térmica in situ.

Link Comsol: [Comsol](#)

6 Referencias

Barbaros Çetin, D. L. (2011). *Dielectrophoresis in microfluidics technology*.

- Blanca H. Lapizco-Encinas. (2018). *On the recent developments of insulator-based dielectrophoresis: A review*.
- Cardenas-Benitez, B., Jind, B., Gallo-Villanueva, R. C., Martinez-Chapa, S. O., Lapizco-Encinas, B. H., & Perez-Gonzalez, V. H. (2020). Direct Current Electrokinetic Particle Trapping in Insulator-Based Microfluidics: Theory and Experiments. *Analytical Chemistry*, 92(19), 12871–12879. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.0c01303>
- Gallo-Villanueva, R. C., Sano, M. B., Lapizco-Encinas, B. H., & Davalos, R. V. (2014). Joule heating effects on particle immobilization in insulator-based dielectrophoretic devices. *Electrophoresis*, 35(2–3), 352–361. <https://doi.org/10.1002/elps.201300171>
- Kayaku SU-8 Permanent Negative Epoxy Photoresist. (n.d.).
- Melcher, J. R., & Taylor, G. I. (2025). *ELECTROHYDRODYNAMICS: A REVIEW OF THE ROLE OF INTERFACIAL SHEAR STRESSES*. www.annualreviews.org.
- Nakano, A., Luo, J., & Ros, A. (2014). Temporal and spatial temperature measurement in insulator-based dielectrophoretic devices. *Analytical Chemistry*, 86(13), 6516–6524. <https://doi.org/10.1021/ac501083h>
- Perez-Gonzalez, V. H. (2021). Particle trapping in electrically driven insulator-based microfluidics: Dielectrophoresis and induced-charge electrokinetics. In *Electrophoresis* (Vol. 42, Issue 23, pp. 2445–2464). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/elps.202100123>
- Roberto C. Gallo-Villanueva, V. H. P.-G. B. C.-B. B. J. S. O. M.-C. B. H. L.-E. (2019). *Joule heating effects in optimized insulator-based dielectrophoretic devices: An interplay between post geometry and temperature rise*.