

Trabajo de Fin de Grado
Ferrofluidos para Aplicaciones Térmicas



Jesús Castillo Pareja.

Doble Grado en Física e Ingeniería de Materiales.

Tutores: Victorino Franco García

Luis M. Moreno Ramírez

Departamento de Física de la Materia Condensada

Facultad de Física, Universidad de Sevilla

Índice de contenidos.

1. Resumen.....	1
2. Introducción.....	2
2.1. Ferrofluidos.....	2
2.2. Diodos térmicos magnéticamente activados	6
2.3. Objetivos y estructura del trabajo.....	10
3. Resultados y discusión.....	12
3.1. Validación del modelo: conductividad de un material	13
3.2. Diodo con orificio cilíndrico	15
3.2.1. Estado apagado (aire en el orificio)	15
3.2.2. Estado encendido (ferrofluido en el orificio)	17
3.2.3. Variaciones radio del orificio	19
3.3. Diodo con varios orificios cilíndricos	25
3.4. Diodo con orificio rectangulares	33
3.4.1. Orientación perpendicular a la propagación de calor	33
3.4.2. Orientación paralela a la propagación de calor	35
4. Conclusiones	39
5. Bibliografía	42

1. Resumen

En este trabajo se presentan un conjunto de simulaciones de elementos finitos con el objetivo de modelar la respuesta de un sistema de control de la temperatura basado en ferrofluidos. Concretamente estudiaremos los diodos térmicos magnéticamente activados, dispositivos que se basan en la modificación de la conductividad térmica del sistema mediante el movimiento del ferrofluido controlado por campos magnéticos. En este caso, aplicando campo magnético, el ferrofluido actúa como puente térmico entre dos zonas en las que queremos establecer contacto térmico (estado encendido del diodo), mientras que retirando el campo magnético se aíslan térmicamente dichas zonas (estado apagado del diodo).

Mediante las simulaciones realizadas (que considerarán las condiciones encendida y apagada del dispositivo) se comprueba la viabilidad de diversas configuraciones a fin de mejorar la respuesta del dispositivo, considerando como objetivos a optimizar: 1) la diferencia de conductividad entre los estados apagado y encendido del dispositivo, y 2) el tiempo de respuesta del mismo.

Partiendo de una configuración convencional, en la cual el dispositivo consta de un orificio cilíndrico para albergar el ferrofluido, ampliamos el estudio al caso de varios orificios cilíndricos (3, 5 y 8 orificios) y rectangulares orientados perpendicularmente y paralelamente al flujo de calor suministrado (en todos los casos la cantidad de ferrofluido a usar se ha mantenido constante). Encontramos que la configuración de 5 orificios cilíndricos, y la configuración de ranuras orientadas perpendicularmente al flujo de calor, son las configuraciones que nos proporcionan una mejor respuesta. Además, se pone de manifiesto que la formación de caminos para la propagación térmica son un factor importante a la hora de analizar el funcionamiento del sistema.

Se ha de mencionar que parte de este trabajo incluía la elaboración de un dispositivo experimental mediante técnicas de impresión 3D. Sin embargo, su realización ha sido inviable debido al estado de alarma decretado por el COVID-19.

2. Introducción

En esta introducción se van a presentar el concepto de ferrofluido, sus características físicas, y los requerimientos físicos para su síntesis. Esto dará pie a justificar la aplicación en la que queremos emplearlos: el control de las propiedades térmicas mediante diodos térmicos.

2.1. Ferrofluidos

Un ferrofluido es un líquido imanado que responde a la aplicación de campos magnéticos. Está formado por una suspensión coloidal de partículas magnéticas mono-dominio magnético, con un tamaño máximo de 10 nm, en el seno de un líquido portador no magnético (en general no hay líquidos magnéticos, aunque un ejemplo donde si se presenta magnetismo en líquidos lo tenemos en [1]), donde, normalmente, se encuentran recubiertas por una capa protectora para evitar la aglomeración de partículas. En función del tipo de recubrimiento que reciban las partículas, podemos realizar una clasificación donde encontramos ferrofluidos surfactados, si la capa protectora se compone de un material surfactante que se añade en el líquido portador, y ferrofluidos iónicos, si la capa protectora se consigue mediante una densidad de carga de las partículas. En este último tipo, la carga de las partículas magnéticas se obtiene durante el proceso de obtención del ferrofluido, normalmente por un método de precipitación química para este supuesto. En función del pH del medio, las partículas quedan cargadas positivamente en pH ácido, $\text{pH} < 7$, y negativamente en pH básico, $\text{pH} > 7$. Esta densidad de carga atrae partículas del líquido portador formando una capa protectora que impide la aglomeración de estas [2].

Al tratarse de una suspensión de partículas, su estabilidad marcará de manera significativa las propiedades del material en el dominio del tiempo. La estabilidad coloidal tiene tanto requerimientos en presencia de campos magnéticos externos, como en ausencia de ellos. Para encontrar los requerimientos que debe cumplir un ferrofluido para asegurar su estabilidad, hay que llevar a cabo un razonamiento en el que se siga un criterio físico-químico. Por ello, en lo referente a la energía del ferrofluido consideraremos los términos térmico ($k_B T$, siendo k_B la constante de Boltzman y T la temperatura del ferrofluido en Kelvin), magnético ($\mu_0 M H V$, siendo μ_0 la permeabilidad magnética del vacío, M la imanación de las partículas magnéticas, H el campo magnético externo y V el volumen de las partículas de diámetro d ,

asumiendo estas como esféricas) y gravitacional ($\Delta\rho VgL$, donde $\Delta\rho$ es la diferencia de densidades entre las partículas y el líquido portador, g es la aceleración de la gravedad y L es la altura respecto del nivel de referencia).

Al hablar de la estabilidad de un ferrofluido, un factor a tener en cuenta es la formación de aglomerados de partículas (requerimiento de estabilidad en ausencia de campo magnético externo). Al contener un ferrofluido, normalmente, una alta cantidad de partículas se puede considerar que las partículas están en contacto. Esto nos lleva a una interacción dipolar magnética que se puede cuantificar como:

$$E(\text{Dipolo} - \text{Dipolo}) = \frac{1}{12}\mu_0 M^2 V. \quad (1)$$

Esta aglomeración podrá ser disipada mediante la agitación térmica, teniendo que ser el cociente energía térmica/energía dipolo-dipolo mucho mayor que la unidad:

$$\frac{12k_B T}{\mu_0 M^2 V} \gg 1. \quad (2)$$

Particularizando el volumen para el caso de partículas esféricas tenemos:

$$d \leq \left(\frac{72k_B T}{\pi\mu_0 M^2} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (3)$$

obteniendo para el caso de partículas de ferrita que $d \leq 7,8 \text{ nm}$.

Cuando tenemos el ferrofluido en el seno de un campo magnético externo, las partículas magnéticas tienden a moverse hacia las zonas de mayor intensidad de campo, mientras que, por su parte, la energía térmica tiende a contrarrestar dicho movimiento produciendo un movimiento de vibración a las partículas. Este balance energético nos lleva a que las partículas ocupen todo el volumen del ferrofluido. La estabilidad del coloide se ve favorecida por un alto ratio entre la energía térmica y la energía magnética:

$$\frac{k_B T}{\mu_0 M H V} \geq 1. \quad (4)$$

Si ahora tenemos en cuenta que estamos considerando partículas esféricas, sustituimos el volumen concreto de las partículas en la expresión **(4)** obteniendo:

$$d \leq \left(\frac{6k_B T}{\pi \mu_0 M H} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (5)$$

En la expresión **(5)** tenemos otra condición que deben cumplir las partículas del coloide para asegurar su estabilidad.

Desde el punto de vista químico, hay que contemplar la interacción atractiva de van der Waals presente entre las partículas neutras. Esta fuerza representa los dipolos inducidos oscilantes producidos en una partícula, fruto de las fluctuaciones de los electrones orbitales de otra partícula. Esta fuerza tiene un comportamiento con la distancia entre partículas como r^{-3} . La interacción de van der Waals unida a la interacción dipolar magnética, son las dos interacciones atractivas básicas que condicionan la estabilidad del ferrofluido.

Para contrarrestar estas fuerzas atractivas en el ferrofluido, existen otras interacciones de carácter repulsivo como son la repulsión electrostática en el caso de ferrofluidos iónico, y la repulsión estérica en ferrofluidos surfactados.

El mecanismo de repulsión estérica se basa en la adsorción de moléculas orgánicas o largas cadenas moleculares en la superficie de las partículas magnéticas (ilustrado en la **figura 1**).

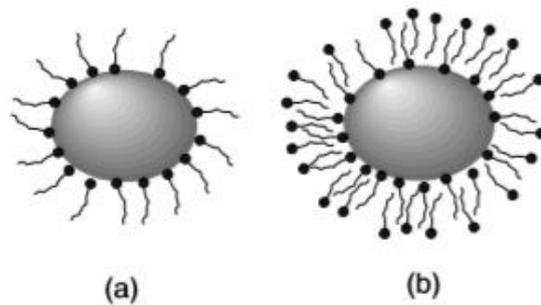


Figura 1. Esquema de una partícula magnética surfactada: (a) Molécula surfactante con cabeza polar y cola apolar, (b) Cadena con cabezas polares [4] pg 178

Las moléculas orgánicas son aportadas al ferrofluido mediante los surfactantes. Estas moléculas pueden estar constituidas por una cabeza polar y una cola apolar, o ser una cadena polimérica con distintas cabezas polares a lo largo de la propia cadena. Al quedar las cabezas polares adsorbidas sobre la superficie de las partículas magnéticas, las colas de las moléculas son las que están en contacto con el fluido portador. Estas moléculas se toman de tal forma que las colas tengan propiedades similares a las del fluido. Finalmente, debido a dicha

repulsión se logra la estabilidad del coloide. En la **figura 2**, a modo de resumen, se representan los diversos términos energéticos en función de las distancias entre partículas magnéticas [3].

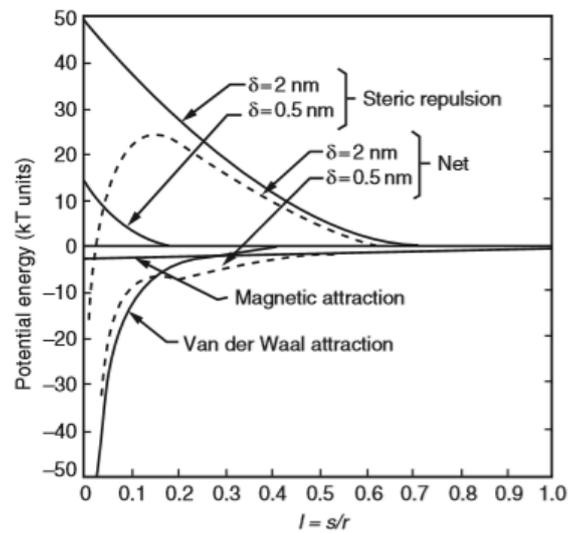


Figura 2. Energía potencial frente a la distancia entre las superficies de partículas surfactadas (s) normalizada por el radio (r) y siendo δ el tamaño de las moléculas adsorbidas [3] p. 49.

Un aspecto importante en los ferrofluidos es su conductividad térmica efectiva. La conductividad térmica es una propiedad física bien definida en los fluidos monofase. En el caso de suspensiones de partículas en un líquido, como es el caso de un ferrofluido, la conductividad térmica se puede describir según distintos modelos tales como el de Maxwell (suspensiones de partículas muy diluidas sin tener en cuenta interacciones entre las partículas en suspensión), Rayleigh (es una extensión del modelo de Maxwell para ferrofluidos con altas concentraciones de partículas sólidas) o Jeffrey (modelo donde se puede tener un cociente relativo entre conductividad del sólido y el fluido desde 0 a ∞) [3,11].

De manera general, la conductividad térmica efectiva de un ferroluido se puede expresar en función de la fracción volumétrica de fase sólida en la suspensión, y las conductividades del fluido y del sólido.

Se ha de notar, que usando los materiales adecuados se pueden conseguir fluidos magnéticamente controlables con una alta conductividad térmica (o baja según la aplicación). Este aspecto da lugar a una aplicación para el control de la temperatura: los diodos térmicos basados en ferrofluidos.

2.2. Diodos térmicos magnéticamente activados

El concepto de diodo térmico dentro del ámbito de la tecnología, de circuitos integrados o sistemas micro/nano electromecánicos, trata de abordar uno de los mayores factores limitantes en el desarrollo de estas tecnologías: la disipación de calor. El control del calor en los dispositivos tecnológicos es un aspecto fundamental para asegurar el correcto funcionamiento de estos. En la actualidad están cogiendo gran auge los sistemas de microfluídica, disipadores de calor e interruptores térmicos, también llamados diodos térmicos. El fin de estos dispositivos es mantener a los sistemas en el punto de trabajo óptimo desde el punto de vista térmico mediante el control de intercambio de calor con el medio.

Los diodos o interruptores térmicos se pueden clasificar en 3 grandes categorías: diodos activos de estado sólido, diodos pasivos de estado sólido y diodos de estado líquido. De manera resumida, los diodos térmicos activos, como su propio nombre indica, tienen que ser activados de manera externa mediante la aplicación de una diferencia de potencial, un campo magnético o cualquier otro mecanismo externo. La aplicación de dicha acción externa permite o rompe el contacto térmico entre la superficie caliente y la superficie fría [5].

Por otro lado, los diodos pasivos de estado sólido se basan en el uso de materiales con propiedades térmicas anisotrópicas, es decir, para temperatura constante transfieren un mayor flujo de calor en una determinada dirección que en las otras. Este funcionamiento tiene como ventaja la eliminación del mecanismo externo de activación, necesitando únicamente el uso de un par de materiales con diferentes conductividades térmicas. Este comportamiento se puede obtener principalmente con polímeros [7] o metales [8].

Sin embargo, estos diodos tienen una serie de limitaciones desde el punto de vista de la transmisión de calor referidas a la interfase entre los dos materiales sólidos, debidas a la rugosidad de la superficie de los materiales que reduce el área de contacto y, por consiguiente, la transferencia de calor [8]. Este problema se soluciona empleando fluidos en vez de sólidos (tercera categoría mencionada anteriormente), ya que se aumenta la superficie de contacto y se reduce la resistencia interfacial a la transferencia térmica. Tradicionalmente, se han venido utilizando líquidos como refrigerantes basados en el fenómeno de “electrowetting” [10]. En particular, los ferrofluidos aportan una gran mejora en conductividad en comparación con otros líquidos, fruto de la mayor conductividad efectiva de éstos [9].

Además de una mejora desde el punto de vista de la conductividad térmica, los diodos térmicos basados en ferrofluidos tienen la ventaja de que, gracias a su respuesta a un campo magnético, pueden ser direccionados a conveniencia en un sistema complejo de refrigeración mediante la aplicación de un pequeño campo magnético. La actuación sin contacto mediante este campo magnético abre un abanico de posibilidades a la hora de poder aplicarlos, lo cual es también otro plus en favor de este tipo de dispositivo de control térmico [6].

La función del diodo térmico desde el punto de vista del control de la temperatura es permitir la transferencia de calor desde una superficie caliente hacia una superficie fría (el disipador de calor) mediante un mecanismo de transmisión de calor, ya sea por conducción, convección o radiación. En adelante, nos centraremos en el diodo térmico por conducción.

La ley que rige la transferencia de calor en los diodos térmicos por conducción no es otra que la ley de Fourier [12]:

$$Q = kA \left(\frac{T_{Caliente} - T_{Frío}}{L} \right) \quad (6)$$

donde k es la conductividad térmica, A el área transversal perpendicular a la dirección de transferencia de calor, L la distancia entre punto de aplicación de calor y punto de medida, $T_{Caliente}$ es la temperatura del punto caliente, $T_{Frío}$ temperatura del punto frío, y Q es el flujo de calor.

Un claro ejemplo del constante desarrollo en el ámbito de la refrigeración y disipación de calor en dispositivos eléctricos y electrónicos lo podemos ver en el reciente desarrollo de los diodos térmicos magnéticamente activados, MATS (Magnetically-Activated Thermal Switches), que hace uso de las propiedades térmicas y magnéticas de los ferrofluidos. Como ejemplo, destacamos el dispositivo desarrollado por el Instituto de Nanociencia y Nanotecnología del Departamento de Física y Astronomía de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Oporto [6] (**Figura 3**). El fundamento básico de este dispositivo es el uso de un diodo térmico para permitir la transferencia de calor entre dos superficies posibilitando o rompiendo el contacto térmico entre estas mediante el uso de electroimanes para controlar el ferrofluido.

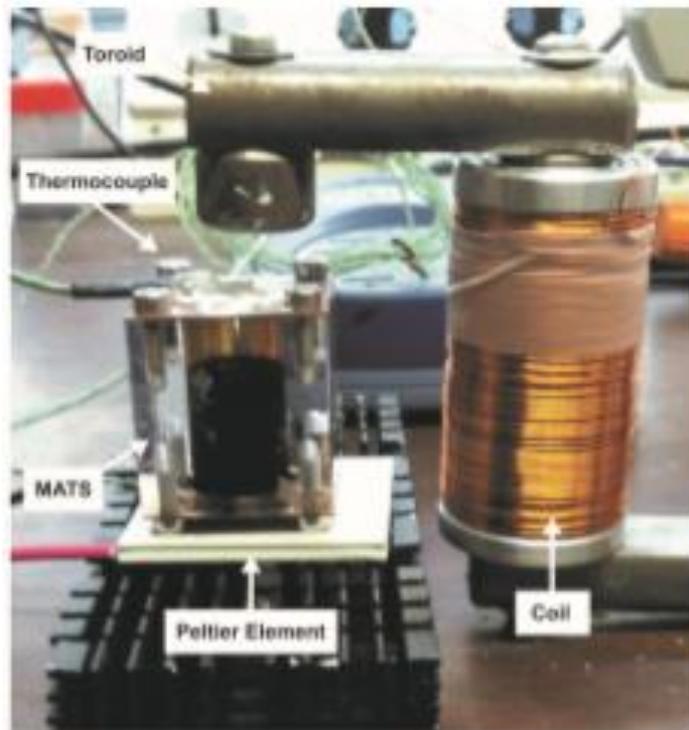


Figura 3. Montaje experimental de un diodo térmico [6]

De manera concreta el MATS realizado en [6] consiste en un recipiente cilíndrico de PMMA de 3 cm de longitud y un diámetro de 1.5 cm, conteniendo 4.42 cm³ de ferrofluido sin llegar a completar el volumen de la cavidad. El recipiente se sella con dos placas de cobre en las bases del cilindro. La placa de cobre superior se pondrá inicialmente a temperatura ambiente, mientras que la inferior se apoya sobre una celda Peltier de tal forma que se crea una diferencia de temperatura entre ambas placas. Al recipiente se le acopla un electroimán compuesto de un núcleo de ferrita el cual, cuando se hace pasar una corriente eléctrica por el bobinado del electroimán, se crea un campo magnético. Cuando este campo es aplicado sobre el cilindro, el fluido se mueve de tal forma que conecta las dos tapas del cilindro por contacto debido a la fuerza magnética a la que es sometido (que vence a la gravitatoria):

$$\vec{F} = \nabla(\mu_0 \vec{H} \cdot \vec{M}), \quad (7)$$

donde \vec{F} es la fuerza resultante y μ_0 es la permitividad magnética del vacío, \vec{H} el campo magnético externo y \vec{M} la magnetización de las partículas del ferrofluido. Cuando se apaga la corriente que fluye por el electroimán, el ferrofluido vuelve a su posición inicial en la parte inferior del recipiente debido a la acción de la fuerza gravitatoria.

En los experimentos llevados a cabo con este dispositivo la corriente era aplicada con un generador de señales y una fuente de alimentación, mientras que los valores de temperatura en las dos superficies eran medidos con termopares acoplados a los contactos de cobre.

En este trabajo se usará como modelo el dispositivo realizado por la Universidad de Oporto [6], extendiendo el análisis de la respuesta en función de diversos parámetros del sistema. El diseño original se modificó para permitir la optimización del dispositivo usando manufactura aditiva, aunque el estado de alarma asociado a la pandemia ha impedido la realización experimental.

2.3. Objetivos y estructura del trabajo

Este trabajo está enfocado en la modelización de los estados encendido y apagado de un diodo térmico por conducción basado en ferrofluidos mediante simulación con el software informático COMSOL Mutliphysics [13]. En las distintas simulaciones se ha buscado la optimización del dispositivo en base a dos parámetros: la diferencia de conductividad entre los dos estados del dispositivo, así como su tiempo de respuesta.

El dispositivo a simular constará de un soporte rectangular de dimensiones 0'943 cm x 0'983 cm x 2 cm de ABS (copolímero termoplástico compuesto por tres monómeros distintos en bloque: Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno), que albergará en su interior un orificio a lo largo de su lado mayor formando un recipiente tubular, el cual será rellenado con distintos materiales (siendo similar al dispositivo presentado en la **figura 3**). Para uniformizar la temperatura en dos de las caras, en las superficies que queremos realizar las medidas de temperatura, se acoplarán al soporte rectangular dos pequeñas placas de cobre. Estas placas simularan los contactos térmicos necesarios para realizar las medidas de temperatura mediante termopares (ver **figura 4** para observar la geometría descrita y sus dimensiones).

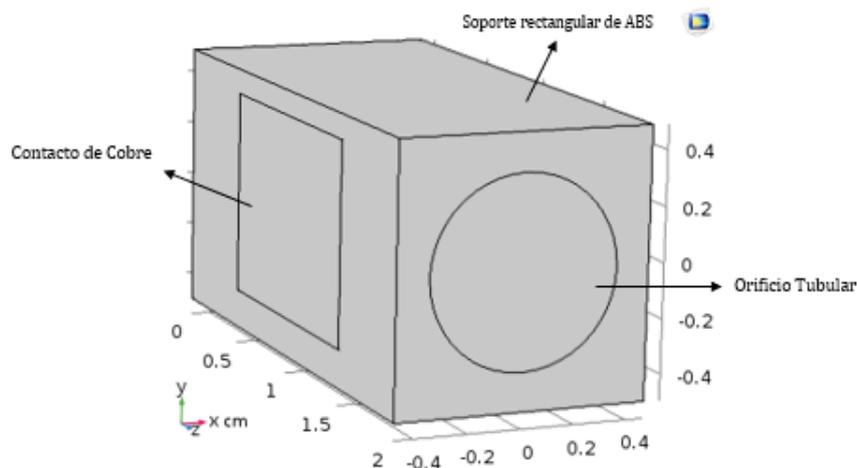


Figura 4. Geometría del Diodo Térmico.

Estudiaremos la evolución temporal de la temperatura en el dispositivo al aplicar una potencia de calentamiento en una de sus superficies, foco caliente. Esta evolución será medida comparativamente entre el foco caliente, y el que denominaremos foco frío, que no es más que la superficie simétricamente opuesta a la caliente.

El objetivo del trabajo es comprobar las diferencias de temperatura que se dan en el dispositivo cuando en el orificio tubular hay distintos materiales. Se comparará la

conductividad y el perfil de temperaturas del dispositivo cuando en el orificio hay aire, (diodo en modo apagado), y cuando el material de relleno es un ferrofluido (diodo en modo encendido). Dichos estados están esquematizados en la **figura 5**.

En un diodo térmico de conducción el proceso de transferencia de calor dependerá de la conductividad térmica del dispositivo. Al tratarse nuestro diodo de un dispositivo compuesto por distintos materiales, se tendrá una conductividad efectiva del diodo que será función de las conductividades de los distintos materiales que lo componen, la cual variará en base al uso de un material en el interior, es decir, aire o ferrofluido.

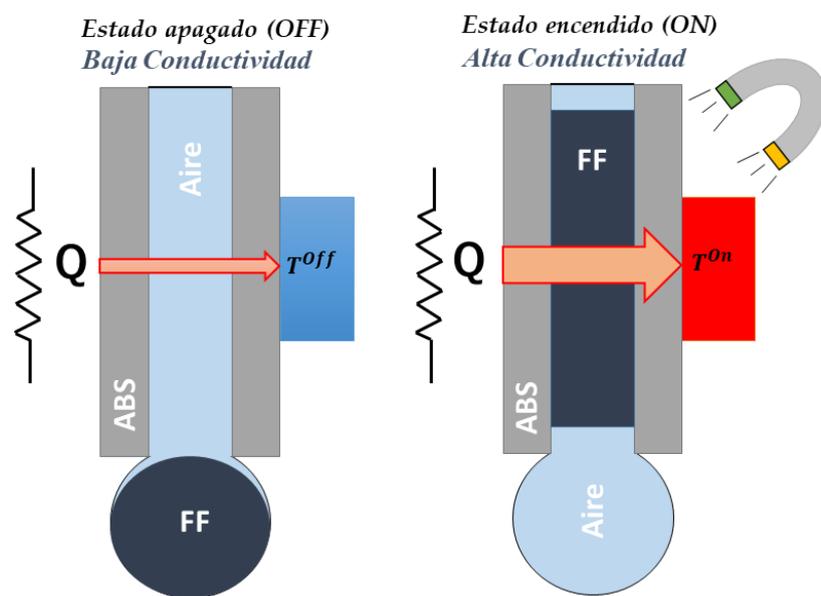


Figura 5. Esquema del diodo térmico experimental

La estructura de trabajo constará en un primer lugar del cálculo de conductividad del dispositivo a estudiar cuando este está compuesto de un solo material (ABS), para validar la bondad de las condiciones de simulación impuestas. Seguidamente, se pasará a los estudios de la dependencia temporal del perfil de temperatura para los estados apagado y encendido del dispositivo (con aire y ferrofluido en su interior, respectivamente). Comprobadas las diferentes respuestas del dispositivo, se pasará a la realización de variaciones en la geometría del dispositivo en lo referente al tamaño del orificio tubular, es decir, se variará la cantidad de fluido que se tiene en el sistema. Por último, para una fracción de volumen de orificio fija, se buscará la dependencia de la diferencia de temperatura entre las caras con la configuración geométrica de los conductos de fluido en el dispositivo.

3. Resultados y discusión

Como se ha comentado anteriormente, este trabajo se han realizado simulaciones del funcionamiento de un diodo térmico por conducción sometido a una potencia de calentamiento mediante el software informático COMSOL Multiphysics.

Este nos permite la reproducción de fenómenos físicos en diferentes situaciones: estudios estacionarios, evolución temporal y dominio de la frecuencia. La versatilidad de COMSOL nos permite que la geometría a estudiar se pueda crear mediante sus propias herramientas de diseño, o también, se permite la opción de importar el CAD (Computer-Aided Design) de la geometría en cuestión realizado con otro software compatible de diseño gráfico. Respecto a los fenómenos físicos consta de distintos bloques temáticos: electrodinámica, transferencia de calor, acústica, electroquímica, óptica y un largo etcétera.

En nuestro caso usamos el módulo de transferencia de calor “Heat Transfer”, que como su nombre indica, se centra en la transferencia de calor en la geometría impuesta. Dentro de este módulo utilizamos el sub-módulo “Heat Transfer in Solids”, ya que nuestro dispositivo es sólido, a salvedad del fluido, el cual se puede considerar como fluido dentro de este sub-módulo.

Con respecto a las condiciones de simulación, en nuestro estudio impondremos un flujo de calor en una cara del dispositivo y veremos cómo varía la temperatura en el extremo opuesto del dispositivo en las dos configuraciones del diodo, es decir, apagado y encendido. Usaremos un valor típico de la literatura para el calor suministrado, $Q=0,23 \text{ W}$, en un área del dispositivo de $A= 1,966 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$.

El calor aplicado en una de las superficies del diodo se propagará por todo el dispositivo. El flujo de calor aplicado se mantendrá constante en todo intervalo de tiempo.

Si únicamente se considera la aplicación de esa potencia en una superficie del diodo, la temperatura en los puntos de medida no llegará a alcanzar el estado estacionario, pues no se ha considerado ningún mecanismo de disipación de calor al ambiente (conducción, convección o radiación), y solo se ha considerado el mecanismo de transmisión de calor a lo largo del dispositivo. Sin tener en cuenta un mecanismo de disipación, estaríamos ante situación de aislamiento térmico. Para simular una situación real, el dispositivo debe estar en contacto con

un fluido, el aire de la atmósfera. Esto supone que de manera natural se estaría dando un proceso de convección entre las distintas superficies del dispositivo y el aire que lo envuelve. Por ello, se impone dicha condición en todas las superficies del dispositivo

$$q = h(T_{ext} - T) \quad (8)$$

siendo h el coeficiente de transferencia de calor por convección, T_{ext} temperatura exterior o del ambiente (293,15 K) y T temperatura de la superficie del dispositivo.

Los valores de h para la convección natural del aire oscilan entre 5-25 W/m²·K (este coeficiente no es una propiedad del fluido, sino que es un parámetro que depende de la naturaleza del flujo, su velocidad y la geometría de la superficie con la que interacciona [14]). Como únicamente se quiere que el sistema sea capaz de alcanzar el equilibrio térmico, se minimizará la acción de la convección de aire, quedándonos con un valor de 5 W/m²·K, con el fin de que el mecanismo principal de transmisión de calor del dispositivo sea la conducción a través del mismo.

3.1. Validación del modelo: Conductividad de un material

Para validar las condiciones de simulación, realizamos el cálculo de conductividad térmica del bloque de ABS sin conducto para el ferrofluido, sometido a las mismas condiciones a las que será sometido nuestro diodo térmico. En el estado estacionario, podemos calcular el valor de conductividad térmica despejando de la expresión (6), obteniéndose:

$$k = \frac{QL}{A\Delta T}. \quad (9)$$

Para esta primera simulación, se ha realizado un modelo con las siguientes características (mostradas en las **tablas 1 y 2**):

Tabla 1. Propiedades Físicas requeridas en el modelado [15].

Material	Densidad (kg/m ³)	Conductividad Térmica (W/m·K)	Capacidad Calorífica a Presión Constante (J/kg·K)
ABS	1050	0,173	1080

Tabla 2. Condiciones impuestas en el modelado.

Dimensiones	Q (W)	A (cm ²)	L (cm)	h (W/m ² ·K)
0,943 cm x 0.983 cm x 2 cm	0,23	1,966·10 ⁻⁴	0,943	5

El calor Q es aplicado en una de las caras de la geometría, foco caliente, durante un determinado tiempo que permita alcanzar el estado estacionario, 4500 s. Se tomarán datos de valores de temperatura tanto del punto de aplicación de calor como del extremo opuesto, foco frío.

En la **figura 6 a)** tenemos representada la geometría en estudio, y en la **figura 6 b)** la distribución del perfil de temperatura en diagrama de colores, junto con el flujo total de calor en forma de flechas, en el instante final de simulación, $t=4500$ s. Vemos como a medida que nos alejamos del punto de aplicación de calor, la temperatura que alcanza el sistema se va disminuyendo hasta alcanzar su valor mínimo en la superficie fría.

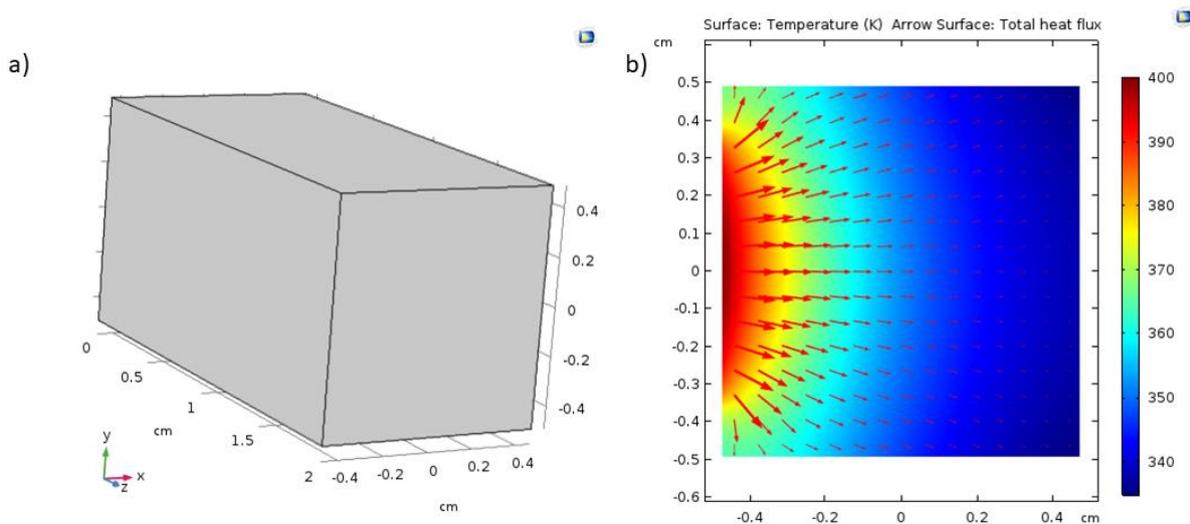


Figura 6. a) Geometría; b) Temperatura superpuesta con líneas de flujo convectivo en el plano central la geometría ($z=1$ cm) en plano XY.

Con los datos que se pueden inferir de la **figura 7** una vez alcanzado el estado estacionario, que son representado en la **tabla 3**, puede realizarse el cálculo de la conductividad del material

Tabla 3. Resultados Térmicos modelo de chequeo.

Material	T _{Caliente} (K)	T _{Frío} (K)	ΔT (K)
ABS	400,1	338,1	62

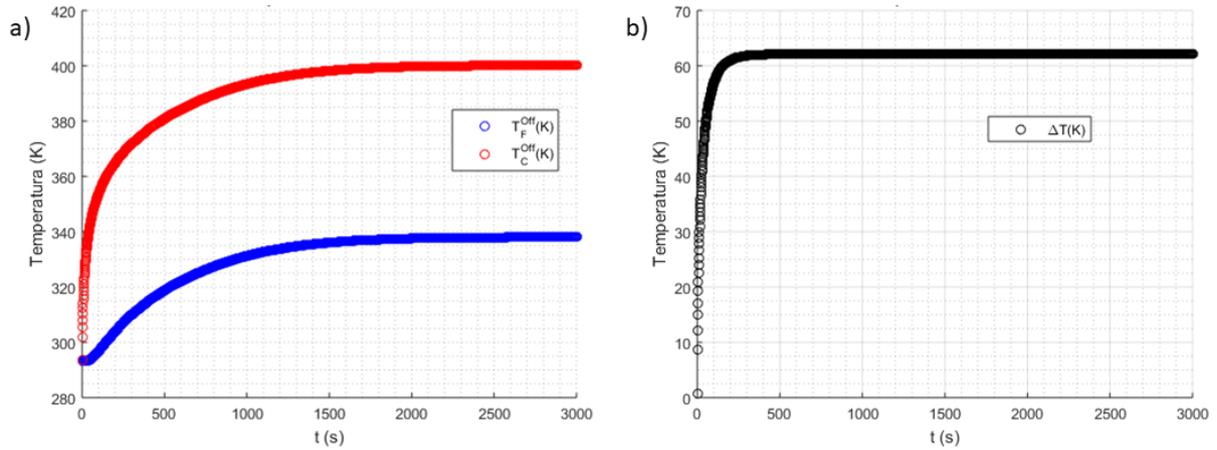


Figura 7. a) Evolución de la temperatura en los focos caliente y frío del dispositivo; b) Diferencia, ΔT , de temperaturas entre superficies.

Hacemos uso de la expresión (9) para el cálculo de la conductividad térmica:

$$k_{Calculada} = 0,1779 \text{ W/m} \cdot \text{K} \quad (10) \quad \varepsilon(k) = \left| \frac{k_{Calculada} - k_{Teórica}}{k_{Teórica}} \right| \cdot 100 = 3 \% \quad (11)$$

En base a los resultados que se obtienen en (10) y (11), se puede afirmar que las condiciones de simulación impuestas casan con los valores parametrizados, ya que el valor obtenido es muy similar al parametrizado (con un error relativo del 3%). Esto indica que las condiciones usadas en las simulaciones deben dar resultados fiables y similares a los experimentales.

3.2. Diodos con un orificio cilíndrico

Una vez que las condiciones de experimentación han sido validadas en el apartado 3.1., se pasa a la simulación del diodo en las dos condiciones de operación: apagado y encendido.

3.2.1. Estado apagado (aire en el orificio)

En primer lugar, se verá el comportamiento del diodo cuando en su interior el orificio tubular consta de aire (estado apagado, baja conductividad del dispositivo). Veremos qué perfil de temperaturas tiene el dispositivo con un material tan poco conductor térmico como es el aire.

Las condiciones aplicadas al modelo son las mismas que en el caso anterior, y las propiedades de los materiales que componen el diodo se recogen en la **tabla 4**:

Tabla 4. Propiedades de los materiales usados en las simulaciones [15].

Material	Conductividad Térmica (W/m·K)	Densidad (Kg/m ³)	Capacidad calorífica (J/Kg·K)
ABS	0,173	1050	1080
Aire	0,025	1,275	1,007
Cobre	385	8960	390

En la **figura 8 b)** vemos claramente como entran en juego las distintas conductividades de los materiales que conforman el dispositivo (al contrario que en la **figura 6 b)**). El aire al ser un mal conductor térmico, no permite prácticamente la propagación por su interior. El flujo de energía a través del tubo lleno de aire es prácticamente nulo, dándose la transferencia energética a través de los puentes térmicos de ABS que se forman. Además, se puede observar como a medida que se da la transferencia de calor por el dispositivo, el flujo de calor que alcanza la superficie fría es bastante reducido.

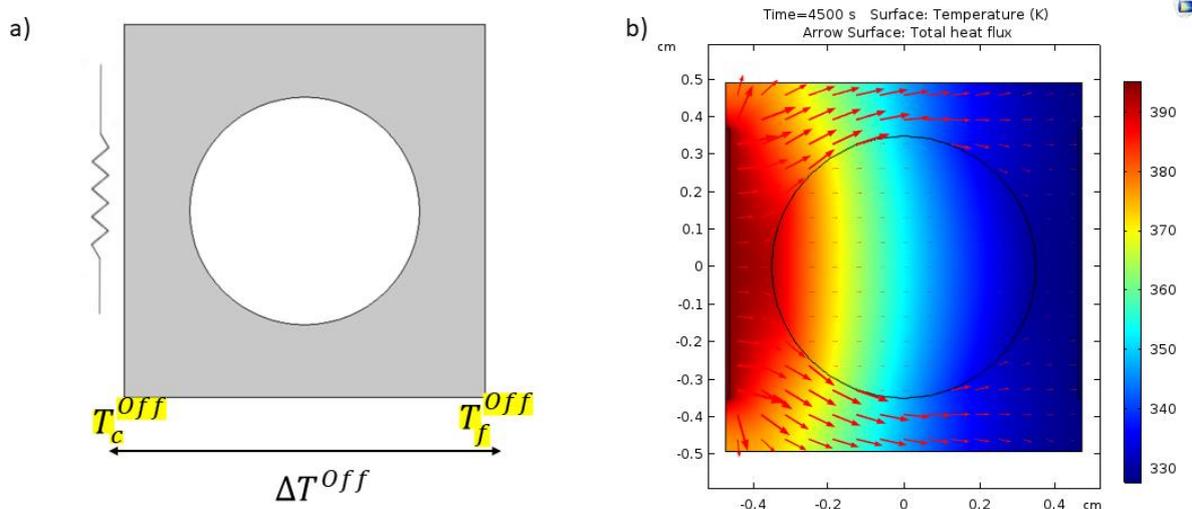


Figura 8. a) Esquema aclaratorio de medidas realizadas (marcadas en amarillo); b) Evolución de la temperatura y del flujo térmico en un corte XY para $z=1\text{cm}$ de la geometría del diodo modo apagado.

En la **figura 9** puede observarse la evolución temporal de la temperatura en los focos caliente y frío del dispositivo. De esta figura se infiere que las temperaturas que se alcanzan en estado estacionario son de 395,2 K y 327,8 K. Esto resulta en una diferencia de temperatura entre los dos focos ($\Delta T^{Off} = T_C^{Off} - T_F^{Off}$, **figura 9 (b)**) de 64,4 K. Se puede ver como a tiempos muy altos, la temperatura del foco frío permanece estable y muy por debajo de la del foco caliente, por lo que el aislamiento térmico entre ambas

zonas cuando el diodo está apagado es significativo. El tiempo necesario para alcanzar el estado estacionario del foco frío en el estado apagado es de 1010 s, calculado como el tiempo al cual la diferencia de la temperatura del foco es un 99 % de la que alcanza a 4500 s (tiempo suficiente para que el sistema esté estabilizado).

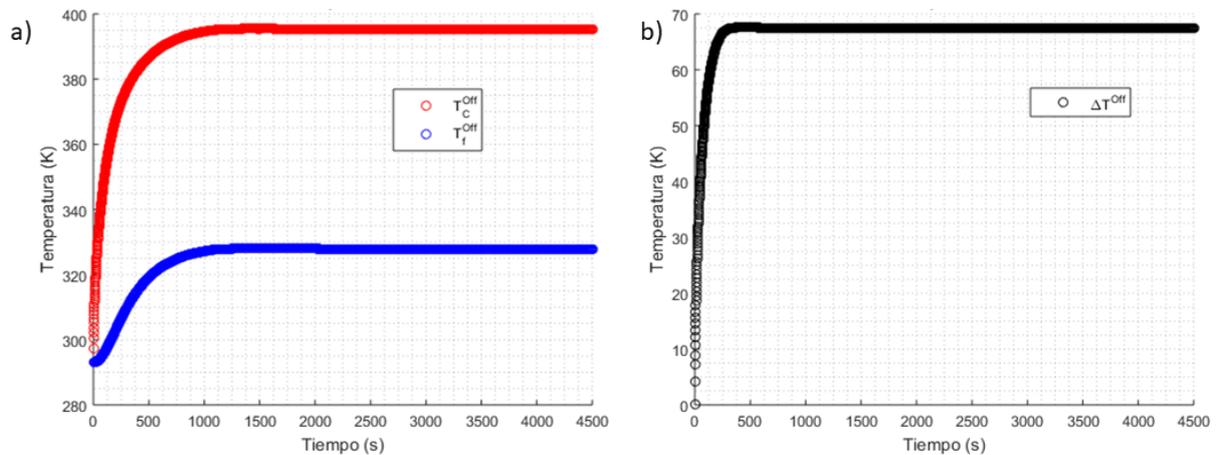


Figura 9. a) Evolución temporal de temperatura en los focos en modo apagado; b) Diferencia, ΔT , entre temperatura de foco caliente y foco frío en modo apagado.

3.2.2. Estado encendido (ferrofluido en el orificio)

Una vez visto el comportamiento del sistema en el estado apagado, se pasa al uso de un ferrofluido comercial como material en el interior del orificio, para simular el estado encendido del mismo. De nuevo, veremos el perfil de temperatura que nos puede aportar el dispositivo con un material con una conductividad bastante superior a la del aire.

Las condiciones aplicadas al modelo son las mismas que en el caso anterior, y en las propiedades del material únicamente es preciso cambiar las del aire por las del ferrofluido, como se refleja en la **tabla 5**.

Tabla 5. Propiedades de los materiales usados en la simulación [15].

Material	Conductividad Térmica (W/m·K)	Densidad (Kg/m ³)	Capacidad calorífica (J/Kg·K)
Ferrofluido	0,190	1221	1840

En la **figura 10** puede verse como en comparación con la del aire, **figura 8**, el ferrofluido permite más fácilmente un cambio de temperatura en el volumen que ocupa gracias a una mayor conductividad térmica. Vemos en el diagrama de flujo representado con flechas como el paso de flujo a través del orificio con ferrofluido es muy superior al que se da con el orificio lleno de aire. Puede verse como a través del orificio la dirección del flujo no sufre apenas

deformaciones, siguiendo un camino horizontal a lo largo del eje X entre los focos caliente y frío.

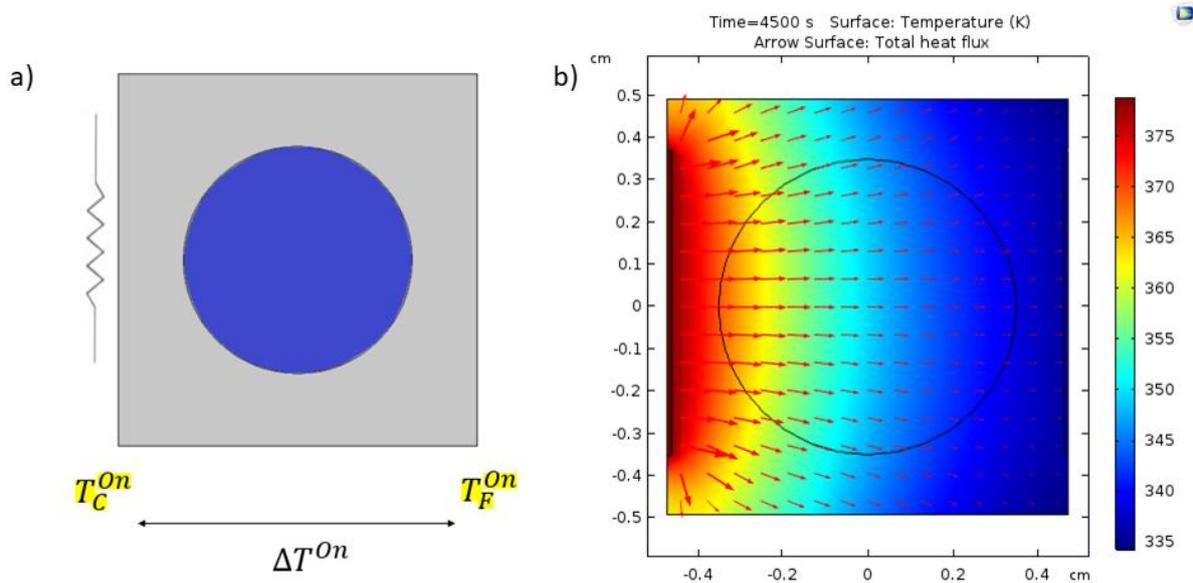


Figura 10. a) Esquema del estado encendido (marcadas en amarillo); b) Evolución de la temperatura y del flujo térmico en un corte XY para $z=1\text{cm}$ de la geometría del diodo en modo encendido

El estado estacionario para el foco frío en el modo encendido se alcanza a un tiempo de 2750 s, tomando un valor de temperatura de 335,7 K, mientras que para el foco caliente es de 378,9 K (tal como puede verse en la **figura 11 a**)). La diferencia de temperatura entre focos ($\Delta T^{On} = T_C^{On} - T_F^{On}$, **figura 11 b**)) resulta un valor de 43,1 K.

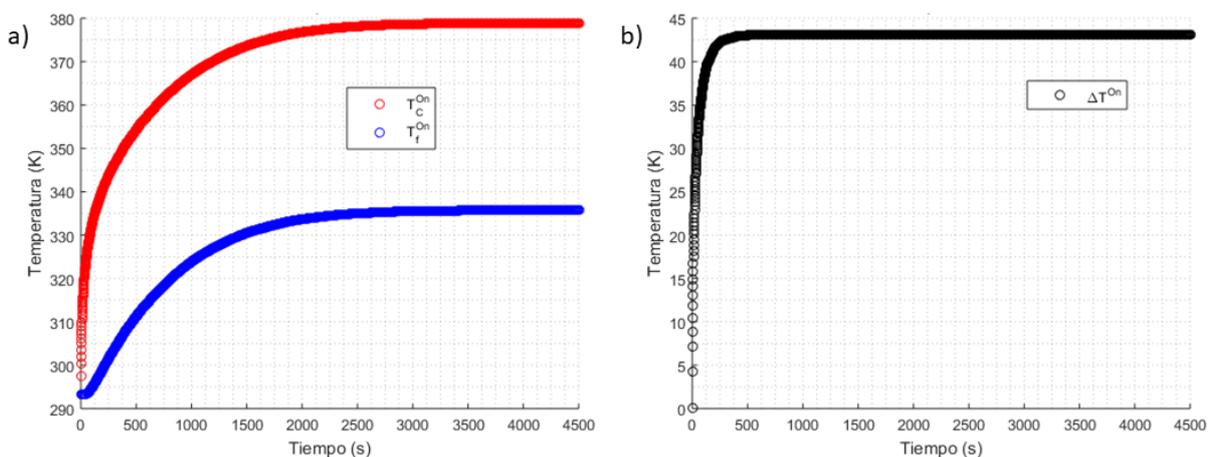


Figura 11. a) Evolución temporal de temperatura en los focos en modo encendido; b) Diferencia, ΔT , entre temperatura de foco caliente y foco frío en modo encendido.

Si comparamos los resultados de temperatura y tiempo en alcanzar el estacionario entre el estado apagado y estado encendido, vemos como en el foco caliente se alcanza una mayor temperatura en el estado apagado que en el encendido. Esto se explica por la baja conductividad térmica del aire, al dispositivo le cuesta más permitir el flujo de temperatura

hacia la superficie fría, conllevando esto a un aumento de temperatura en el foco caliente. Al hacer uso de ferrofluido como fluido en el dispositivo, vemos como se permite un mayor flujo energético, reduciendo la temperatura en el foco caliente en favor de un aumento de temperatura en el foco frío. Respecto a la temperatura en el foco frío para el estado encendido ésta es superior en 7,9 K a la del estado apagado. El uso del ferrofluido nos permite conectar el foco frío con el caliente de una manera satisfactoria, aunque para que se alcance el estado estacionario en el foco frío se necesite un mayor tiempo (1740 s más que el estado apagado).

3.2.3. Variaciones del radio del orificio.

Comprobado el buen funcionamiento del diodo, ahora sería interesante encontrar la dependencia del control de temperatura con distintos parámetros del modelo.

En un primer lugar vamos a estudiar cómo evoluciona las temperaturas estacionarias fría y caliente en nuestro dispositivo con el volumen de orificio tubular, lo que es equivalente a ver la variación que sufre el sistema cuando se modifica la cantidad de fluido que estamos usando, ya sea aire o ferrofluido. La evolución de estos valores de temperatura estacionaria se estudiará con la variación del radio de la circunferencia del orificio tubular, siguiendo el punto de vista de un corte transversal en el plano XY de nuestra geometría.

En la **figura 12**, donde se tiene la evolución de las temperaturas del foco caliente y frío con el radio del orificio tubular, podemos ver cómo a bajos radios el comportamiento del sistema no encuentra diferencias entre los modos apagado y encendido. Esto se explica por ser la cantidad de fluido tan pequeña que su contribución a la conductividad térmica efectiva del dispositivo es prácticamente despreciable. Vemos como a partir de 0.3 cm de radio, se tiene una mayor diferencia entre ambos modos, las cantidades de fluido son más notables y, por tanto, sus conductividades térmicas sí influyen en la conductividad térmica efectiva del dispositivo, dando lugar a diferencias de temperatura tanto en el foco frío como foco caliente, tal como hemos visto en los apartados 3.2.1 y 3.2.2.

Como se ha visto anteriormente, la subida acusada de temperatura del foco caliente en el modo apagado está relacionada con la mala conducción térmica del aire. Esto conlleva también a una disminución en la temperatura del foco frío, ya que con cada aumento de radio

del orificio se está disminuyendo la conductividad térmica efectiva del dispositivo, permitiendo un menor flujo energético hacia el foco frío.

Por su parte en el modo encendido tenemos una disminución en la temperatura del foco caliente y un leve aumento en la temperatura del foco frío. Con el aumento del tamaño de orificio, la cantidad de ferrofluido en el sistema es mayor, consiguiendo aumentar la conductividad térmica efectiva del dispositivo. Esto nos permite realizar una mejor conexión térmica entre los focos.

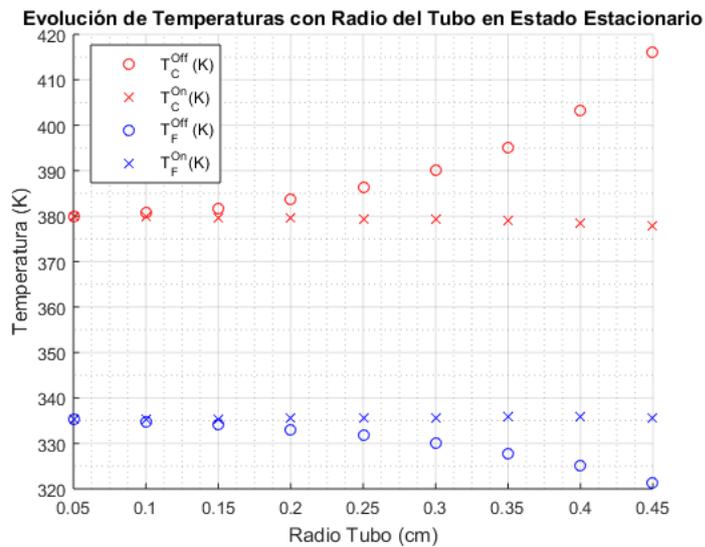


Figura 12. Evolución de la temperatura estacionaria en los focos en los estados apagado y encendido con el radio del orificio cilíndrico.

Si nos fijamos en las diferencias de temperatura entre los focos con respecto al radio de los orificios, **figura 13**, se observa la diferencia de comportamiento entre los dos modos de funcionamiento con el aumento de radio. Aunque en el caso del diodo en modo encendido las diferencias de temperaturas que se alcanzan no son muy distintas entre los distintos casos. Esto es debido a que las conductividades térmicas del ABS y del ferrofluido no difieren mucho entre sí (ambas presentan el mismo orden de magnitud, y además sus valores son muy cercanos como se ve en las **tablas 4 y 5**) como ocurre en el caso apagado, por lo que un pequeño cambio en volumen de ABS y volumen de orificio (que es equivalente a modificar el volumen de ferrofluido) no reporta una gran diferencia de comportamiento térmico como si ocurre en el modo apagado que un pequeño cambio en volumen del orificio conlleva un cambio significativo de conductividad (la diferencia de conductividad entre ABS y aire es de un orden de magnitud).

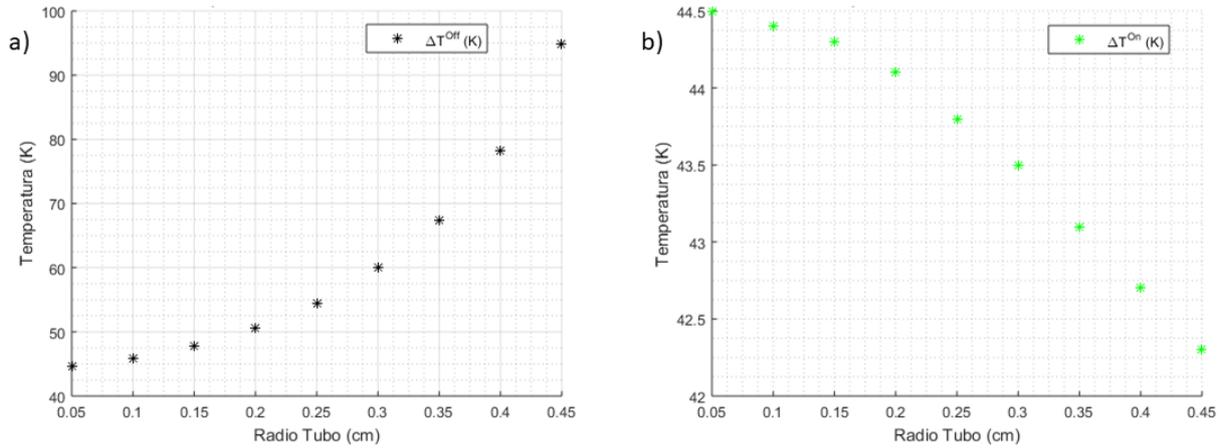


Figura 13. Evolución de la diferencia de temperatura estacionaria entre los focos con el radio del orificio en los modos: a) Apagado; b) Encendido.

A fin de estandarizar el comportamiento del dispositivo sin atender a sus dimensiones, vamos a ver como se traduce este cuando se representan los valores de temperatura frente a la fracción volumétrica de orificio en el sistema.

El interés en ver esta evolución se encuentra en encontrar una relación con las conductividades efectivas del dispositivo en cada caso. Las variaciones volumétricas se llevan a cabo manteniendo constante una de las dimensiones del orificio tubular (la altura del cilindro contenedor de fluido se mantiene constante), siendo la fracción de volumen (F_V):

$$F_V = \frac{A_{xy} \cdot L}{V}, \quad (12)$$

donde L es la longitud del orificio, A_{xy} es el área transversal del orificio tubular en el plano XY y V es el volumen total del dispositivo.

Se representan en la **figura 14** las temperaturas de ambos focos en los dos modos de operación frente a los valores de fracción de volumen, calculados mediante la expresión (12). A simple vista se observa como el comportamiento de las temperaturas en el dispositivo sigue una tendencia similar, pero si nos fijamos con detenimiento la dependencia es menor con respecto a la fracción volumétrica.

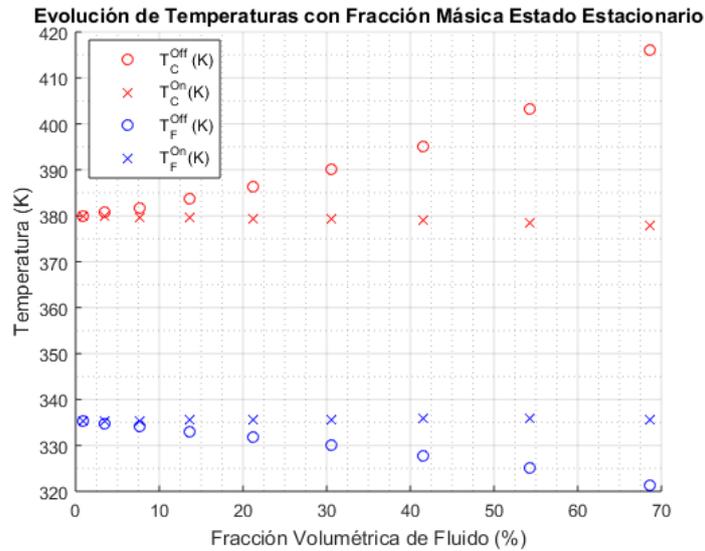


Figura 14. Evolución de la temperatura estacionaria en los focos en los estados apagado y encendido con la fracción volumétrica de fluido.

Esta evolución se ve de manera más clara en la **figura 15**, donde se tienen representadas las diferencias de temperatura entre los focos en los dos modos de operación. Las tendencias de estas magnitudes con el radio del orificio se podrían aproximar de una manera más o menos exacta a un polinomio de segundo orden (**figura 13**), mientras que en este caso las tendencias de las magnitudes se pueden aproximar por un polinomio de primer orden, es decir, tienen comportamiento aproximadamente lineal con la fracción de volumen (más evidente para el modo encendido del dispositivo).

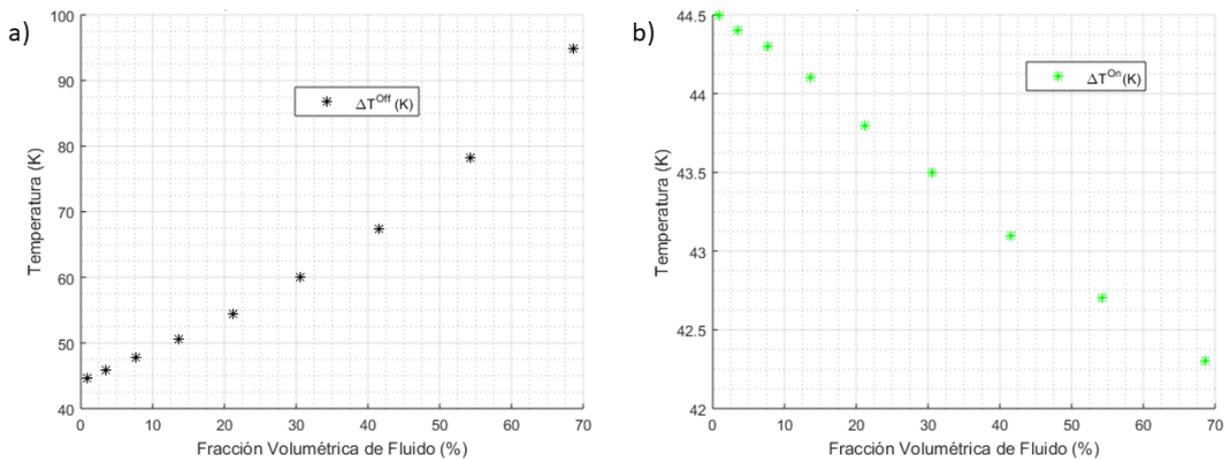


Figura 15. Evolución de la diferencia de temperatura estacionaria entre los focos con la fracción volumétrica del orificio en los modos: a) Apagado; b) Encendido.

Atendiendo a la expresión **(12)** vemos como realmente la fracción volumétrica variará de manera lineal con el área transversal del orificio tubular en el plano XY. Si tenemos en cuenta la expresión **(9)**, la conductividad térmica del dispositivo también varía linealmente

con el área. Esto nos lleva a una relación lineal entre conductividad y fracción volumétrica, la cual deberá verse reflejada en los datos.

Si se calculan las conductividades térmicas efectivas del sistema en el estado estacionario y se representan frente a la fracción volumétrica del orificio (**figura 16**), puede verse como se corrobora el comportamiento lineal que se predice de manera teórica por las expresiones (9) y (12).

Además del comportamiento lineal, se puede ver como, conforme aumenta la fracción de volumen, en el caso apagado (**figura 16 a**)), la conductividad efectiva disminuye. La baja conductividad del aire hace que cuando se aumenta el volumen de este el sistema presente mayores problemas para transmitir la energía térmica desde el foco caliente hacia el foco frío. Por su parte, en el modo encendido (**figura 16 b**)), el comportamiento es el contrario, a mayor cantidad de fracción de orificio, mayor volumen de ferrofluido, el sistema permite la transferencia de energía entre focos más fácilmente.

Se ha de notar que las conductividades para el modo encendido no presentan mucha variación, lo cual ya se ha comentado que es debido a la similitud en conductividad térmica entre ABS y ferrofluido.

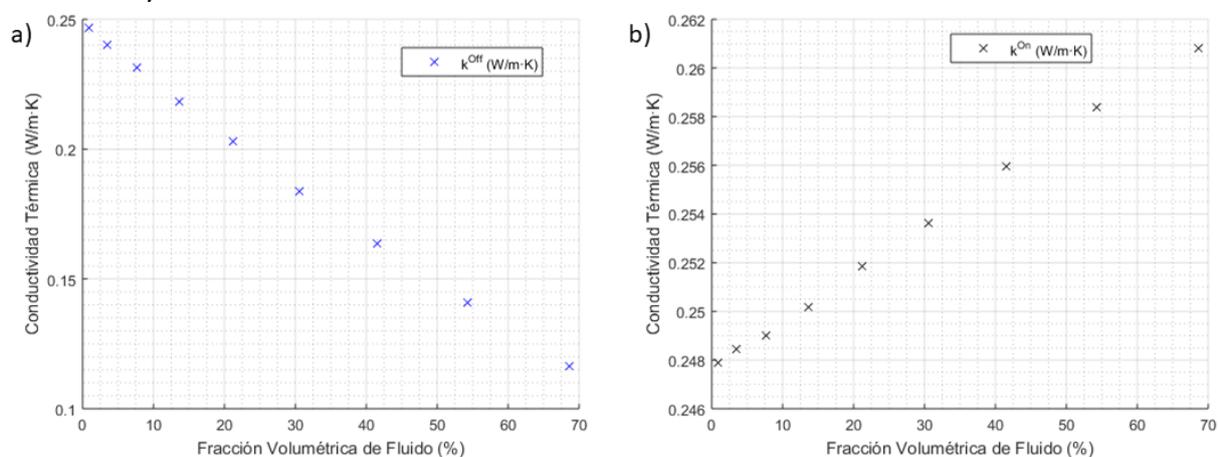


Figura 16. Evolución de la conductividad térmica efectiva del dispositivo con la fracción volumétrica de orificio: a) Apagado; b) Encendido.

También es importante destacar que los valores de conductividades son mayores a los de los materiales principales del dispositivo: ABS y ferrofluido. Esto nos evidencia que los contactos de cobre que se han usado para simular el contacto térmico entre los dispositivos de medida de temperatura, termopares, y el sistema, están influyendo en la conductividad efectiva del dispositivo. Si se prescindiera de estos contactos se deberían de obtener unas

conductividades térmicas entre los valores que adopta esta magnitud para el ferrofluido y el ABS. Esta posibilidad se ha simulado considerando que no existen contactos de cobre y en el sistema únicamente tenemos el orificio (usando convenientemente la conductividad de cada material en función del modo de operación), y el soporte de ABS, sometiendo el sistema a las mismas condiciones de simulación (calor aplicado y tiempo de simulación) que en los casos anteriores.

Al analizar la evolución temporal de la temperatura de los focos caliente y frío (ilustrados en la **figura 17**) se han encontrado una serie de problemas: diferencias en los valores de la temperatura de los focos con respecto a los casos con contactos de cobre, y en concreto, el valor de temperatura del foco caliente para ciertas configuraciones. Para el modo apagado, a partir de una determinada dimensión del orificio tubular (0,35 cm), las temperaturas que se alcanzan en el foco caliente ($T_C^{Off} = 488,0 K$) presentaría una diferencia con su caso homólogo con los contactos de cobre de 92,8 K ($T_C^{Off} = 395,2 K$ con los contactos de cobre para el caso de $r=0,35$ cm). En el foco frío ($T_F^{Off} = 322,0 K$) la temperatura presentaría una diferencia de 5,8 K ($T_F^{Off} = 327,8 K$ con los contactos de cobre para el caso de $r=0,35$ cm). Se tendría una leve mejora en el foco frío a costa de aumentar de manera considerable la temperatura del foco caliente. Además, la temperatura del foco caliente rebasaría la temperatura de fusión del ABS (473 K), lo cual nos conllevaría a la fusión del soporte de ABS, y a la destrucción del sistema. En el modo encendido, las temperaturas no llegan a sobrepasar el valor de la temperatura de fusión del ABS ($T_C^{On} = 396,5 K$, $T_F^{On} = 338,5 K$ sin placas de cobre), pero en la comparación de las temperaturas de los dos focos con el caso homólogo con los contactos de cobre ($T_C^{On} = 378,9 K$, $T_F^{On} = 335,7 K$), no se obtiene un gran aumento en el foco frío (2,8 K en favor del caso sin contactos de cobre) en detrimento de un aumento de 17,6 K para el foco caliente en la configuración sin contactos de cobre. Además, los tiempos para alcanzar el estado estacionario en el foco frío son de 750 s para el modo apagado, y 3500 s para el modo encendido, es decir, en el modo apagado se necesitaría un menor tiempo para la estabilización a costa de tener unos menores valores de temperatura en el foco frío (peor conexión térmica entre focos), y en el modo encendido se necesitaría un mayor tiempo de estabilización para valores de temperatura ligeramente superiores.

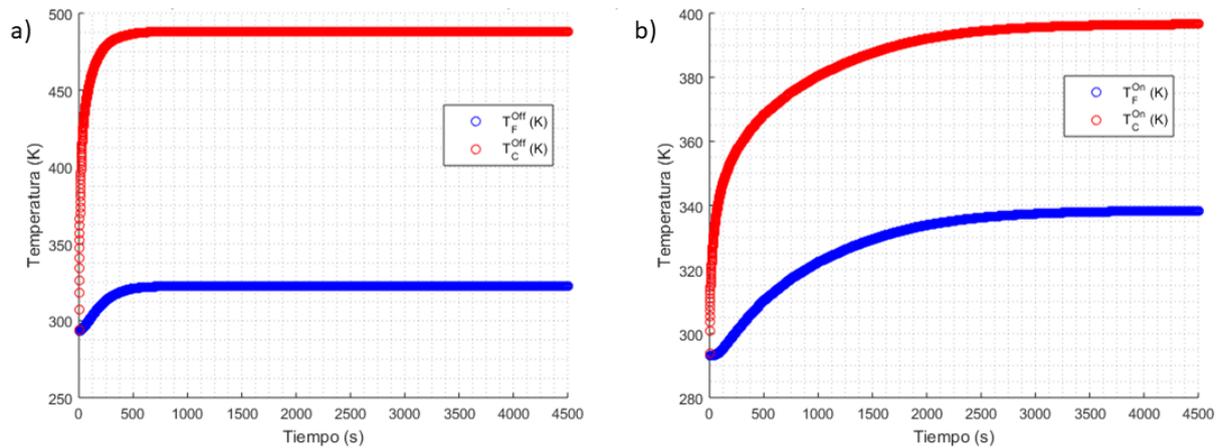


Figura 17. a) Evolución temporal de temperatura en los focos de medida en modo apagado sin contactos de cobre para $r=0,35$ cm; b) Evolución temporal de temperatura en los focos de medida en modo encendido sin contactos de cobre, $r=0,35$ cm

Con los argumentos presentados, y teniendo presente la idea de simular un sistema que sea reproducible de manera experimental, los contactos de cobre se mantendrán en el modelado, tal y como se ha venido haciendo hasta ahora.

3.3. Diodos con varios orificios cilíndricos

Hasta el momento en la presentación de esta memoria, se ha seguido una geometría del sistema según la **figura 4**, donde todo el fluido se encontraba alojado en un único orificio cilíndrico tubular a lo largo del dispositivo.

Como hemos podido ver los diagramas de flujo energético ilustrados en las **figuras 8** y **10**, este flujo de energía depende de manera importante de la conductividad térmica del material que se aloje en el orificio, observándose como el flujo tomaba caminos preferentes en su transmisión desde el foco caliente al foco frío. Por esta razón, se van a realizar distintas distribuciones del volumen de orificio del caso concreto correspondiente a $r=0,35$ cm, $F_V=41,5\%$ (el cual ha sido usado en los apartados 3.2.1 y 3.2.2) en diferentes orificios más pequeños manteniendo constante el volumen de referencia.

El fin de modificar la distribución de fluido en el sistema es observar cómo afecta al perfil de temperatura del sistema la formación o no de esos caminos preferentes de transmisión de energía. Para este cometido se distribuirá el volumen de orificio en 3, 5 y 8 cilindros, además de la distribución en 1 cilindro. Los casos intermedios a los mostrados (2, 4 y 6 cilindros) se comprobaron, pero por similitud entre ellos, y simplicidad, se han tomado 1, 3, 5, 8 cilindros como casos representativos. En cada uno de los casos considerados se presentarán los perfiles

de temperatura de manera conjunta con los diagramas de flujo, y las evoluciones temporales de las temperaturas en los focos caliente y frío.

La **figura 18** muestra los perfiles de temperatura del sistema con 3 cilindros en el instante final, $t=4500$ s, junto con el diagrama de flujo de calor para las configuraciones apagada y encendida. Se puede observar como en el modo apagado (**figura 18 a**)), la disposición de los orificios produce un perfil de temperaturas simétrico con respecto a la coordenada $y=0$ cm. La zona entre los dos focos térmicos que contiene dos orificios (coordenada $y=0,25$ cm aproximadamente) tiene un perfil de temperatura menor en las proximidades del foco caliente, en comparación con la zona que únicamente tiene un orificio (coordenada $y=-0,25$ cm aproximadamente). Esta disimetría es fruto de la menor conductividad térmica que presentaría un camino térmico que fuese desde el foco caliente al frío siguiendo una línea horizontal en la coordenada $y=0,25$ cm, comparada con la mayor conductividad que se encuentra en la coordenada $y=-0,25$ cm. A medida que se avanza en dirección horizontal en el sentido del foco frío, la asimetría en el perfil de temperaturas va disminuyendo hasta que en el foco frío ambas zonas presentan unos mismos valores de temperatura. En el modo encendido (**figura 18 b**)), se observa una pequeña diferencia entre perfiles en la vertical con $x=-0,4$ cm, en favor de la línea con coordenada $y=0,25$ cm. Esto pone de manifiesto que, aunque las conductividades de ABS y ferrofluido son muy similares, las pequeñas diferencias de conductividad nos producen diferencias de temperatura. Salvando lo comentado, el perfil de temperaturas es simétrico respecto a la coordenada $y=0$ cm a lo largo de todo el sistema.

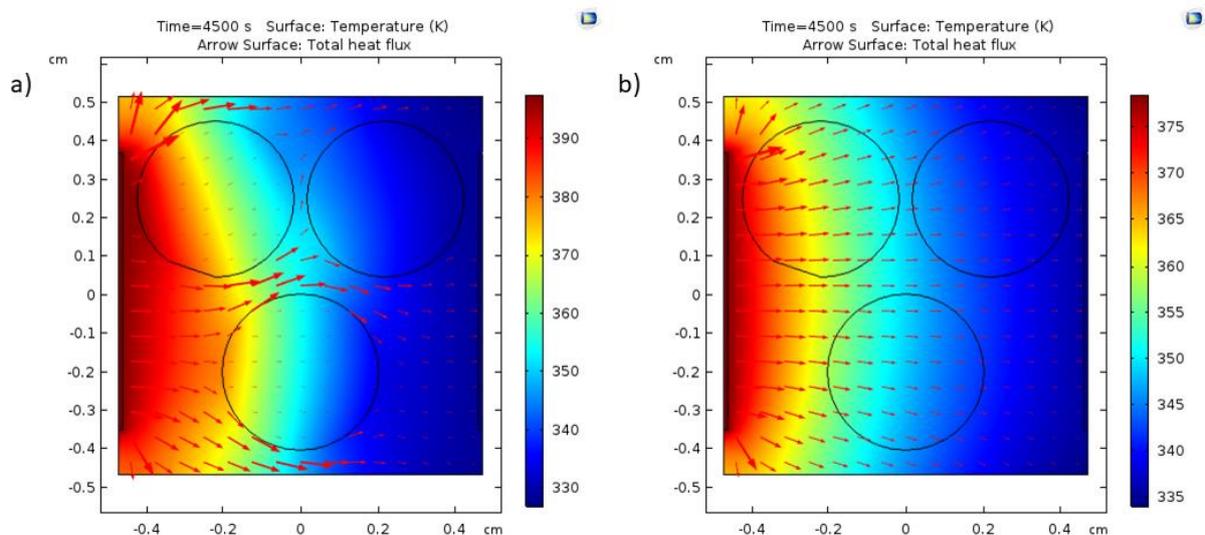


Figura 18. Evolución de la temperatura y del flujo térmico en el dispositivo en un corte con el plano XY ($z=1$ cm) para 3 cilindros: a) Apagada; b) Encendida.

Las evoluciones temporales en los focos caliente y frío del sistema (ilustrados en la **figura 19**), nos evidencian las diferencias en respuesta del sistema entre un modo y otro. Para el modo apagado, la temperatura del foco caliente alcanza un valor de 397,6 K, mientras que en el modo encendido un valor de 378,8 K, con una diferencia entre modos de operación de 18,8 K. En el foco frío, la temperatura es de 328,5 K y 335,7 K, para modo apagado y encendido, respectivamente, dando una diferencia de 7,2 K entre modos.

La **figura 19** también muestra como los tiempos necesarios para la estabilización son muy diferentes entre un modo y otro. Para la temperatura del foco frío, el modo apagado necesita de 1230 s, mientras que el modo encendido necesita de 2810 s. Vemos como para instantes de tiempo elevados, el aislamiento térmico entre foco caliente y frío es considerable en ambos modos de funcionamiento. Por su parte, las diferencias entre temperatura de foco caliente y frío son de 69,1 K para el modo apagado, y de 43,1 K para el modo encendido.

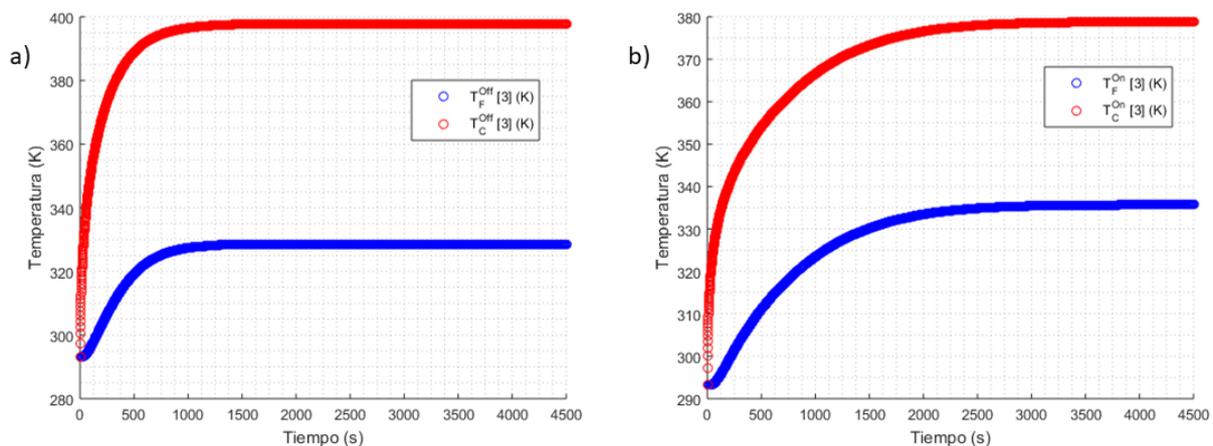


Figura 19. Evolución temporal de la temperatura en los focos caliente y frío en ambos modos de configuración para 3 cilindros: a) Apagada; b) Encendida.

Seguidamente, se realiza una distribución del volumen de orificio en 5 cilindros. Para este caso la distribución de los orificios es simétrica respecto de la horizontal $y=0$ cm. Comparando los perfiles de temperatura del modo apagado y modo encendido (ilustrados en la **figura 20**), vemos como ambos presentan un perfil de temperatura simétrico respecto $y=0$ cm, aunque diferentes entre sí. En la propia horizontal $y=0$ cm, vemos como para el modo apagado (**figura 20 a**) el perfil de temperaturas alcanza unos mayores valores de temperatura que en las horizontales en $y=0,25$ cm e $y=-0,25$ cm. Estos mayores valores son debidos a que en la horizontal de $y=0$ cm el flujo se encuentra con el orificio con aire a una mayor distancia respecto del foco caliente que sus homólogos en $y=0,25$ cm e $y=-0,25$ cm. Aun

con esta diferencia en el canal central, a partir de la vertical $x=0,25$ cm vemos como el perfil de temperaturas se homogeniza para todo valor de y y hasta alcanzar el valor mínimo de temperatura en el foco frío. Estas diferencias que se presentan en el modo apagado no se evidencian en el modo encendido (**figura 20 b**) debido a la similitud en las conductividades.

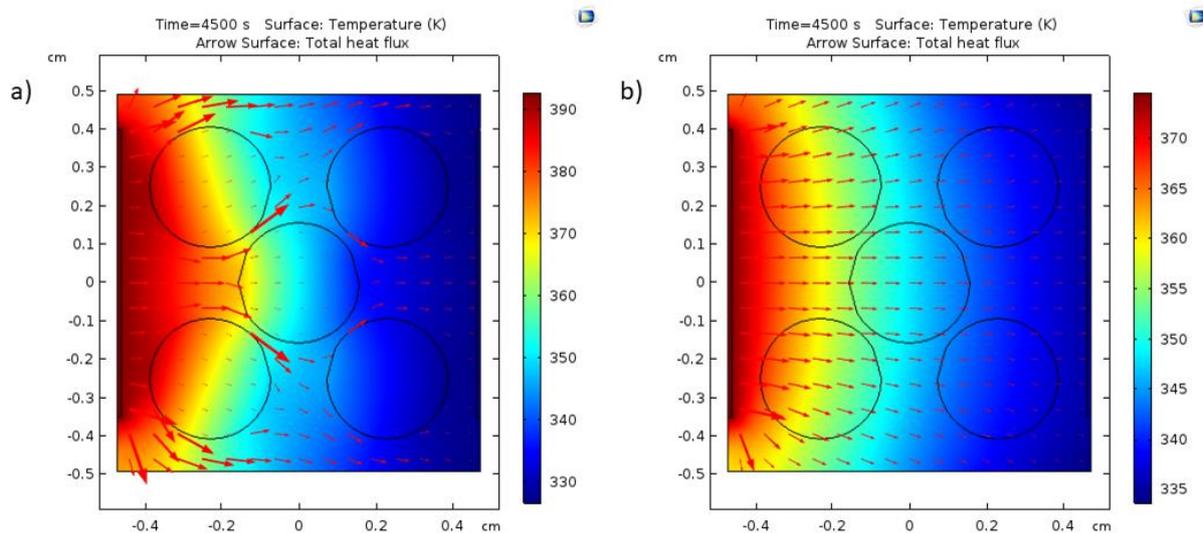


Figura 20. Evolución de la temperatura y del flujo térmico en el dispositivo en un corte con el plano XY ($z=1$ cm) para 5 cilindros: a) Apagada; b) Encendida.

En las evoluciones temporales en los focos caliente y frío del sistema con 5 cilindros (ilustrados en la **figura 21**), se ve cómo en el modo apagado el foco caliente alcanza una temperatura de 392,8 K, mientras que el foco frío registra una temperatura de 327,1 K. Por su parte, en el modo encendido la temperatura del foco caliente es de 374,6 K, y la del foco frío de 335,1 K. Comparando un modo con otro vemos como para el foco caliente se obtiene una diferencia de temperatura de 18,2 K en favor del modo apagado, mientras que para el foco frío la diferencia entre modos es de 8 K en favor del modo encendido. Estos valores son inferior y superior, respectivamente, a los encontrados con la distribución en 3 cilindros. Siguiendo la comparación con la distribución en 3 cilindros, el tiempo para alcanzar el estacionario en el foco frío es superior para la distribución de 5 cilindros en el modo encendido (2940 s), y, ligeramente inferior para el modo apagado (1140 s). Las diferencias entre temperaturas de focos, aunque menores tanto en el modo apagado (65,7 K), como en el encendido (39,5 K), aseguran el aislamiento térmico entre focos para tiempos elevados.

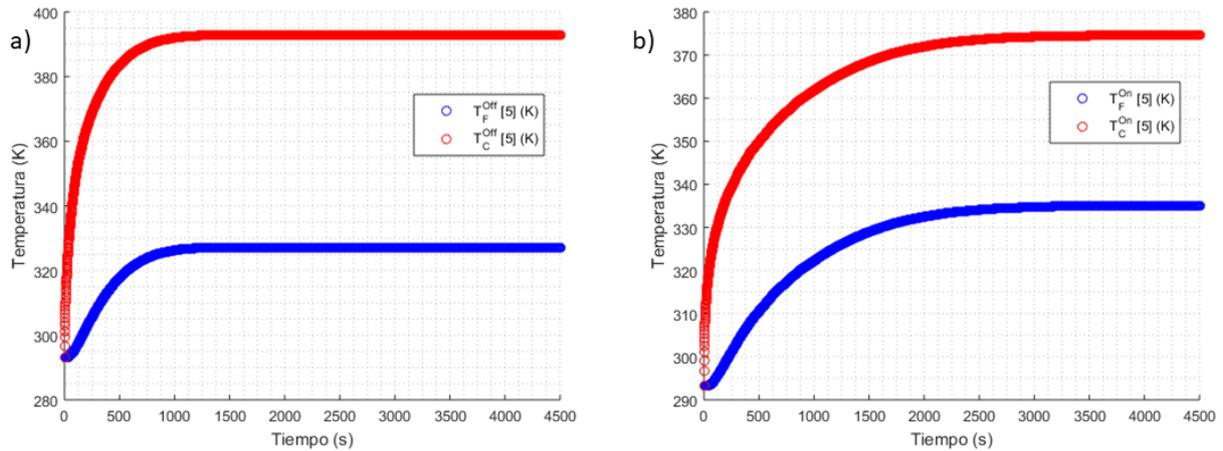


Figura 21. Evolución temporal de la temperatura en los focos caliente y frío en ambos modos de configuración para 5 cilindros: a) Apagada; b) Encendida.

Como última configuración del volumen del orificio, se distribuye el volumen del orificio en el sistema con 8 cilindros.

Los perfiles de temperatura para los dos modos de funcionamiento (ilustrados en la **figura 22**) no presentan una gran diferencia visual con los que se obtienen para 5 cilindros, ya que la diferencia entre distribuciones es el tamaño de los orificios, el cual hace que para la coordenada $y=0,30$ cm se tengan 3 orificios en la horizontal que une foco caliente y foco frío, 2 orificios para la horizontal en $y=0$ cm, y 3 orificios en la horizontal de $y=-0,30$ cm. La principal diferencia se encuentra para el modo apagado donde, para $y=0$ cm, el perfil de temperatura presenta una forma menos pronunciada que en el caso anterior, es decir, el perfil presenta una distribución más homogénea respecto al eje de simetría del sistema para $y=0$ cm. El modo encendido visualmente es igual al presentado en la **figura 20 b**).

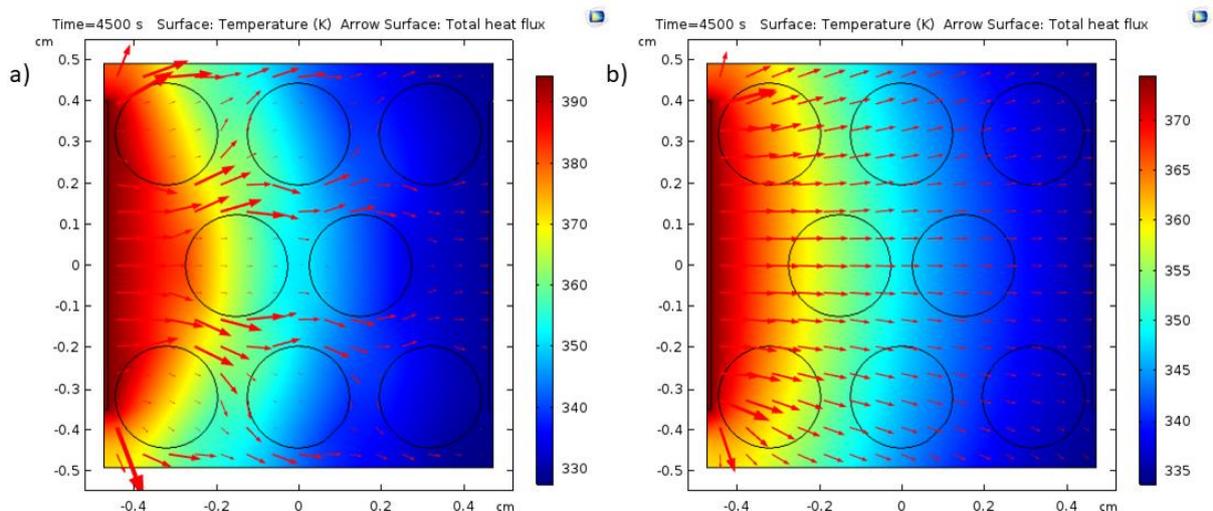


Figura 22. Evolución de la temperatura y del flujo térmico en el dispositivo en un corte con el plano XY ($z=1$ cm) para 8 cilindros: a) Apagada; b) Encendida.

De las evoluciones temporales de temperatura en los focos caliente y frío (ilustradas en la **figura 23 a)** y **23 b)**, respectivamente) no se observa una diferencia sustancial con la configuración de 5 orificios. Las temperaturas del foco caliente para la distribución de 8 orificios son 394,4 K y 374,5 K, respectivamente, para modo apagado y encendido. Sus diferencias con sus homólogos en la distribución de 5 orificios son de 1,6 K en favor de la configuración de 8 orificios para el modo apagado, y de 0,1 K en favor de la configuración de 5 orificios para el modo encendido. Para la temperatura del foco frío ocurre un comportamiento similar ya que, las temperaturas son de 329,2 K para el modo apagado, y 335,1 K para el modo encendido, las cuales dan una diferencia con la distribución de 5 orificios de 2,1 K en favor de la distribución de 8 orificios para el modo apagado, y de 0 K para el modo encendido. Estas leves diferencias nos llevan a que la diferencia de temperatura entre foco caliente y frío no presente mucha desigualdad entre configuraciones, 0,5 K para el modo apagado (la diferencia entre focos para 8 orificios es de 65,2 K), y de 0 K para el modo encendido (la diferencia entre focos para 8 orificios es de 39,4 K). Las principales diferencias entre una configuración y otra se presentan en los valores de tiempo en alcanzar el estacionario, donde la distribución de 8 orificios necesita un menor tiempo en los dos modos de funcionamiento, 1120 s para el modo apagado (20 s menos), y 2590 s para el modo encendido (350 s menos), en comparación con la distribución de 5 orificios.

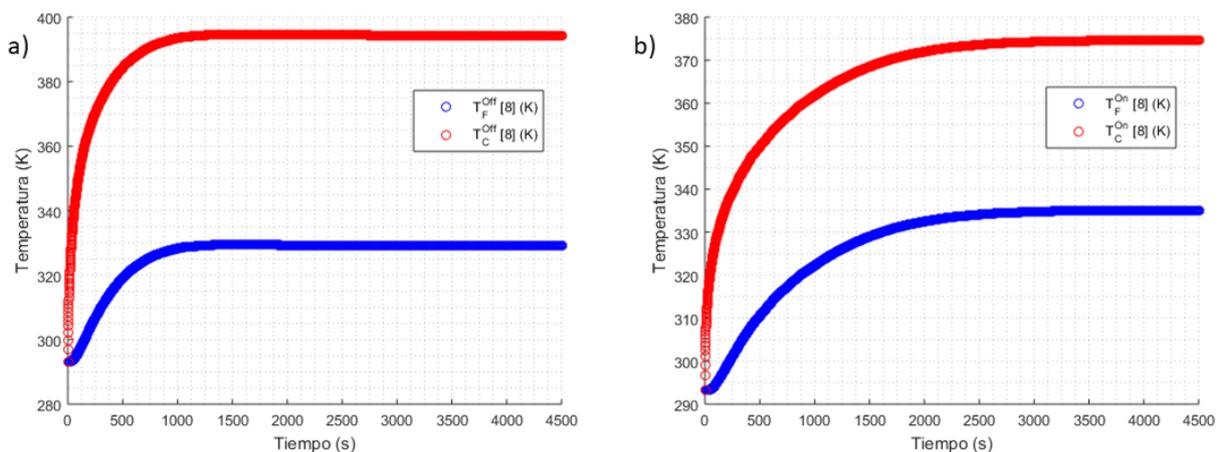


Figura 23. Evolución temporal de la temperatura en los focos caliente y frío en ambos modos de configuración para 8 cilindros: a) Apagada; b) Encendida.

La **tabla 6** recoge los resultados a modo de resumen:

Tabla 6. Datos de temperatura y tiempo para alcanzar el estacionario para distintas distribuciones del fluido en el dispositivo.

Distribución	$T_F^{Off}(K)$	$T_F^{On}(K)$	$T_F^{On} - T_F^{Off}(K)$	$t_{est}[T_F^{Off}](s)$	$t_{est}[T_F^{On}](s)$
1 cilindro	327,8	335,7	7,9	1010	2750
3 cilindros	328,5	335,7	7,2	1230	2810
5 cilindros	327,1	335,1	8,0	1140	2940
8 cilindros	329,2	335,1	5,9	1120	2590

De la comparativa entre las distintas distribuciones de un volumen fijo que se han probado, apoyándonos en los valores de las **tabla 6**, se ve como a mayor número de orificios, en el modo apagado, la temperatura la del foco frío aumenta, mientras que, en el modo encendido, la temperatura del foco frío disminuye.

Las conductividades efectivas del dispositivo en cada uno de los modos se ilustran en la **figura 24**. Vemos como en el modo apagado a mayor número de orificios, la conductividad es mayor, aunque la configuración de 3 orificios se escapa de dicha tendencia, presentando una conductividad menor que el caso de 1 orificio cilíndrico. En el modo encendido las conductividades también aumentan con el número de cilindros. En esta podemos ver como las configuraciones de 1 y 3 cilindros, y las de 5 y 8 cilindros, son, respectivamente, muy similares entre sí, en consonancia con la similitud de la temperatura del foco frío que puede verse en la **tabla 6**.

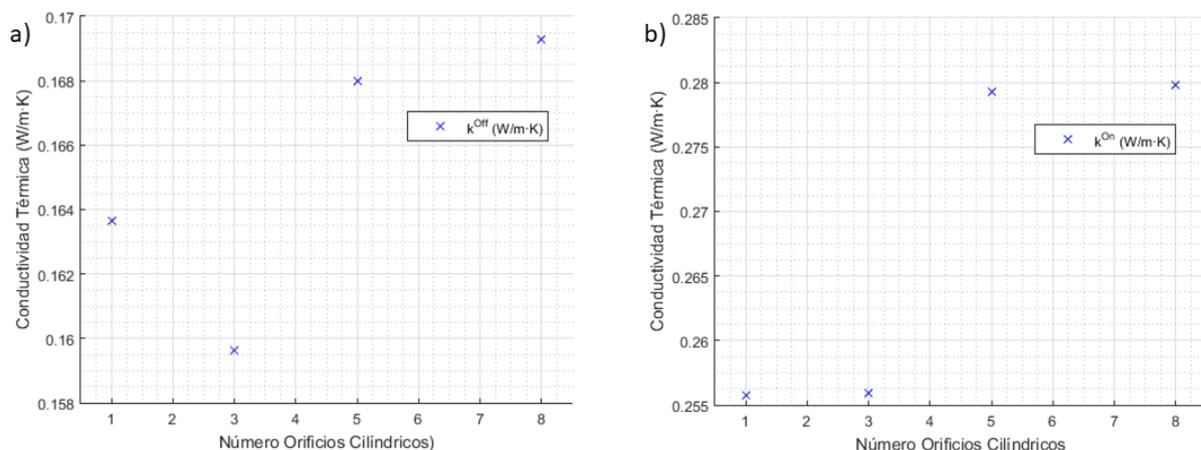


Figura 24. Conductividad térmica efectiva del dispositivo con el número de orificios para los modos: a) Apagada; b) Encendida.

Las diferencias entre las conductividades efectivas del dispositivo entre modos de funcionamiento para las distintas configuraciones (ilustradas en la **figura 25**), nos reflejan que la configuración de 5 orificios es aquella donde se experimenta una mayor diferencia de conductividad entre modo apagado y encendido, de ahí que esta configuración sea la que mayor diferencia de temperatura en el foco frío presente.

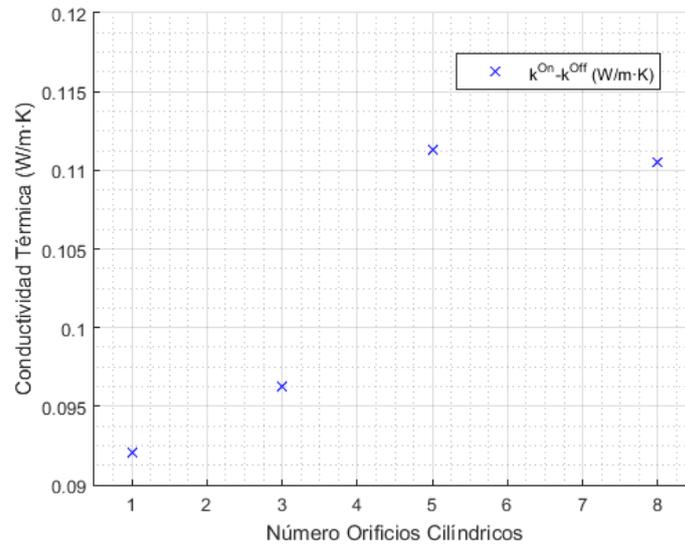


Figura 25. Diferencia entre conductividad efectiva en el modo encendido y apagado en función del número de cilindros.

Con respecto a los tiempos para alcanzar el estado estacionario, a mayor número de orificios se necesita un mayor tiempo para el foco frío para el modo apagado, saliéndose de nuevo la configuración de 3 orificios de la tendencia, necesitando un mayor tiempo que las configuraciones de 5 y 8 orificios. Por su parte en el modo encendido, también se observa que, a mayor número de orificios, el tiempo para alcanzar el estado estacionario en el foco frío es mayor, salvo en el caso de 8 cilindros, que necesita menor tiempo que sus predecesoras.

Al haberse mantenido constantes el calor aplicado y el volumen de orificio, estas diferencias entre configuraciones tienen que ser debidas a la idea de la formación de caminos preferentes o puentes térmicos de transmisión preferente de calor entre los focos. En los distintos modos apagado que se han presentado, los puentes térmicos se ven de manera clara en los diagramas de flujo térmico debido a las grandes diferencias de conductividad térmica entre el aire y el ABS. En los modos encendido es difícil ver la influencia de los puentes térmicos de manera visual, debido a la gran similitud entre las conductividades implicadas.

La selección de las distintas distribuciones que se han probado se ha hecho con la única restricción en la distribución de la conservación de la fracción de volumen de orificio. Aunque en las distribuciones más sencillas se podría haber realizado el cálculo analíticamente, conforme aumenta el número de orificios el cálculo analítico se hace más complejo, llegando a ser prácticamente imposible de realizar a mano, de ahí la importancia del uso de simulaciones para la posible optimización del dispositivo.

Estudiado el dispositivo convencional, seguidamente se va a estudiar un caso límite con gran cantidad de orificios cilíndricos. Esto se llevará a cabo mediante arrays rectangulares contemplando distintas configuraciones en base a la orientación de los arrays con respecto a la propagación de calor.

3.4. Diodos con varios orificios rectangulares

En este apartado, un array de orificios tubulares se aproximará por un único rectángulo en un plano de corte XY. El hecho de realizar esta aproximación por rectángulos y no definir una gran cantidad de pequeños tubos es debido a las limitaciones de cálculo que se tienen, ya que la potencia computacional del ordenador no es suficiente para realizar la simulación en un tiempo adecuado. Aun así, la aproximación es aceptable, ya que la idea a nivel experimental sería la de formar arrays con un gran número de tubos, estando estos tan cercanos unos de otros, que la aproximación por tiras rectangulares sería buena.

A continuación, vamos a estudiar dos configuraciones distintas en función de la orientación de los arrays con la dirección de propagación de calor: una orientación de los arrays perpendicular a la propagación de calor, y otra orientación paralela de los arrays a la propagación de calor.

3.4.1. Orientación perpendicular a la propagación del calor

Como se ha venido realizando hasta ahora, se presentarán los resultados correspondientes al perfil de temperatura, el diagrama de flujo de calor, y las evoluciones temporales de las temperaturas de los focos caliente y frío. En la orientación perpendicular, se ha optado por la distribución del volumen de orificios en 4 bandas de arrays. Se ha de

mencionar que el volumen total de los arrays es el mismo que el de los casos anteriormente estudiados (1, 3, 5 y 8 orificios cilíndricos).

Como podemos ver en la **figura 26 a)**, modo apagado, la baja conductividad de los arrays hace que el flujo tome como camino preferente de propagación el ABS que se encuentra entre los límites de la geometría (y los límites de los arrays). Sin embargo, en el modo encendido (**figura 26 b)**), como ha venido ocurriendo en los distintos casos estudiados, debido a la similitud en conductividades térmicas entre ABS y ferrofluido, visualmente no se observan caminos preferenciales de flujo entre los focos.

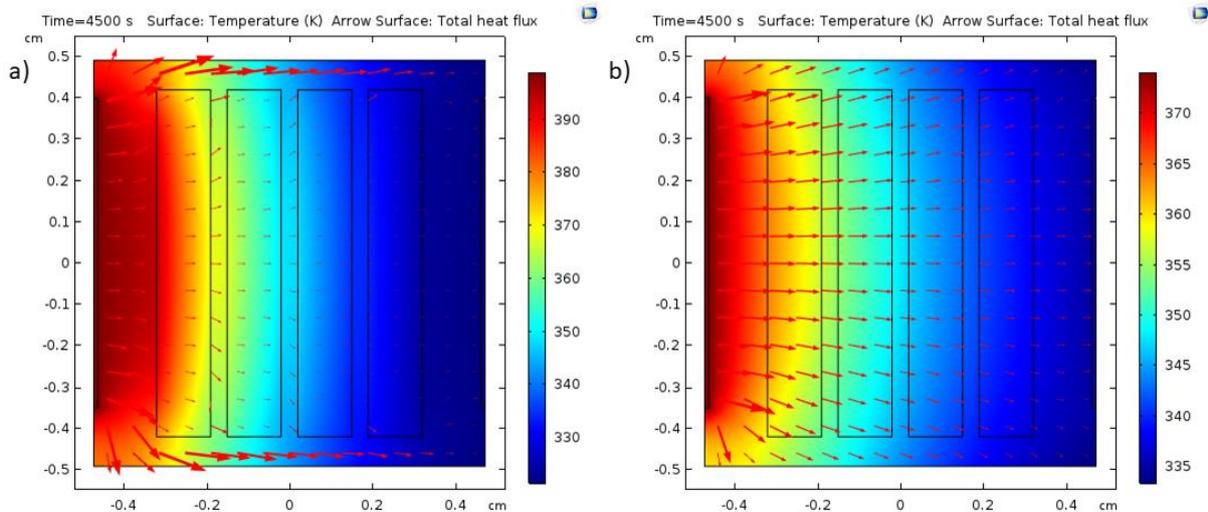


Figura 26. Evolución de la temperatura y del flujo térmico en el dispositivo en un corte con el plano XY ($z=1$ cm) para orientación perpendicular de los arrays: a) Apagada; b) Encendida.

En las evoluciones temporales de las temperaturas en los focos caliente y frío (ilustrados en la **figura 27**) se pueden ver las diferencias de manera más clara. Respecto al foco caliente, en el modo apagado, se alcanza una temperatura de 398,9 K, mientras que en el modo encendido la temperatura es de 374,3 K. La diferencia entre ambos modos es de 24,5 K en el modo apagado. Por su parte, el foco frío presenta una temperatura de 321,6 K en el modo apagado, y de 335,0 K para el modo encendido, siendo la diferencia entre modos de 13,5 K. Los tiempos para alcanzar el estacionario en el foco frío son de 1030 s, en el modo apagado, y de 2850 s, en el modo encendido.

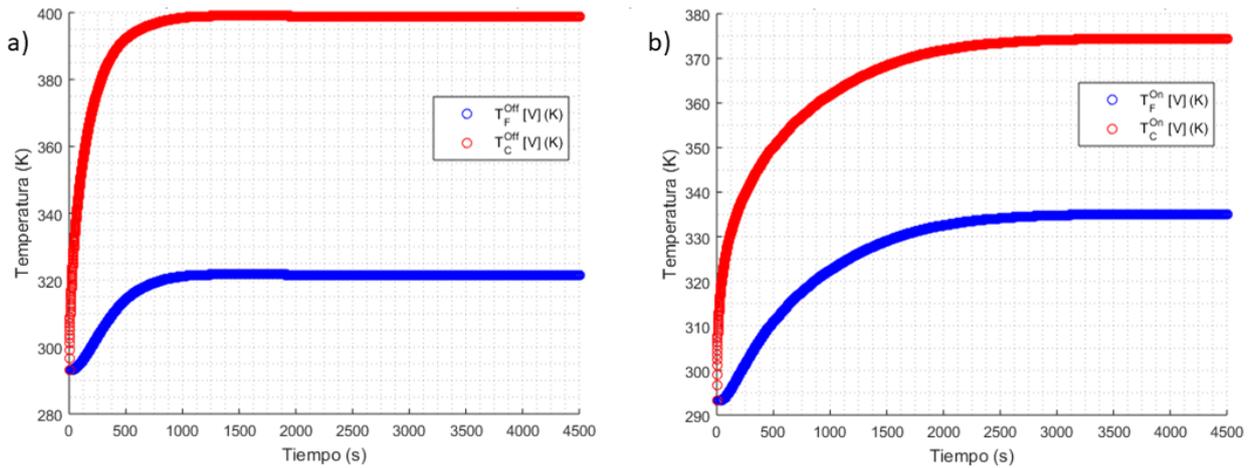


Figura 27. Evolución temporal de la temperatura en los focos caliente y frío en ambos modos de configuración para orientación perpendicular de los arrays: a) Apagada; b) Encendida.

Con respecto a los resultados anteriores vemos como esta configuración presenta unas diferencias en la temperatura del foco frío con los distintos casos cilíndricos de unos 6-8 K para el modo apagado, mientras que el modo encendido no presenta diferencias considerables. En referencia a los tiempos para alcanzar el estado estacionario, tanto en el modo apagado como en el modo encendido los tiempos son muy similares con los correspondientes a las configuraciones de orificios cilíndricos.

3.4.2. Orientación paralela a la propagación del calor

Pasando ahora a la configuración paralela, se han dispuesto también 4 bandas de arrays. En el perfil de temperatura y diagrama de flujo (ilustrados en la **figura 28**) puede verse como, en el modo apagado, el flujo sigue de manera preferente los caminos que unen el foco caliente y el foco frío mediante ABS (al igual que en el caso anterior, aunque el número de uniones era bastante menor). Vemos como el perfil de temperatura es simétrico respecto a eje de simetría del sistema en $y=0$ cm. Para el caso encendido, visualmente el flujo prácticamente no distingue en su propagación entre ABS y ferrofluido.

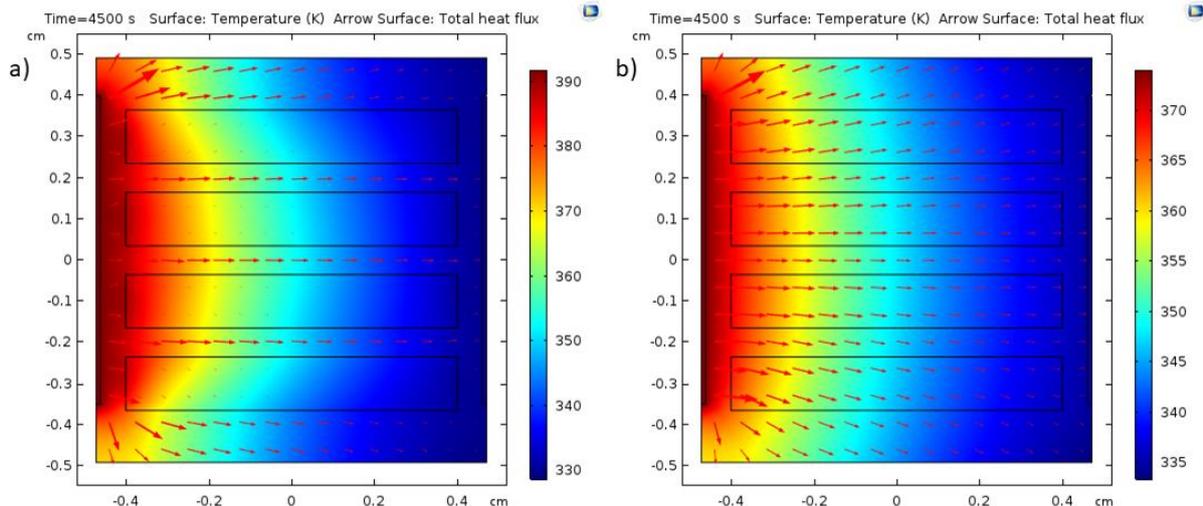


Figura 28. Evolución de la temperatura y del flujo térmico en el dispositivo en un corte con el plano XY ($z=1$ cm) para orientación paralela de los arrays: a) Apagada; b) Encendida.

Respecto a la evolución temporal en el modo apagado (**figura 29 a**) el foco caliente alcanza una temperatura de 391,8 K, y el foco frío una temperatura de 329,7 K. Por su parte, en el modo encendido (**figura 29 b**), se registran temperaturas de 374,4 K para el foco caliente, y de 335,1 K para el foco frío, alcanzándose una diferencia de 5,4 K con el modo apagado. Las diferencias térmicas entre los focos en los dos modos son de 62,1 K y 39,3 K, para modo apagado y encendido, respectivamente. En esta configuración, los tiempos para alcanzar el estacionario en el foco frío son ligeramente superiores, siendo 1115 s para el modo apagado, y de 2900 s para el modo encendido.

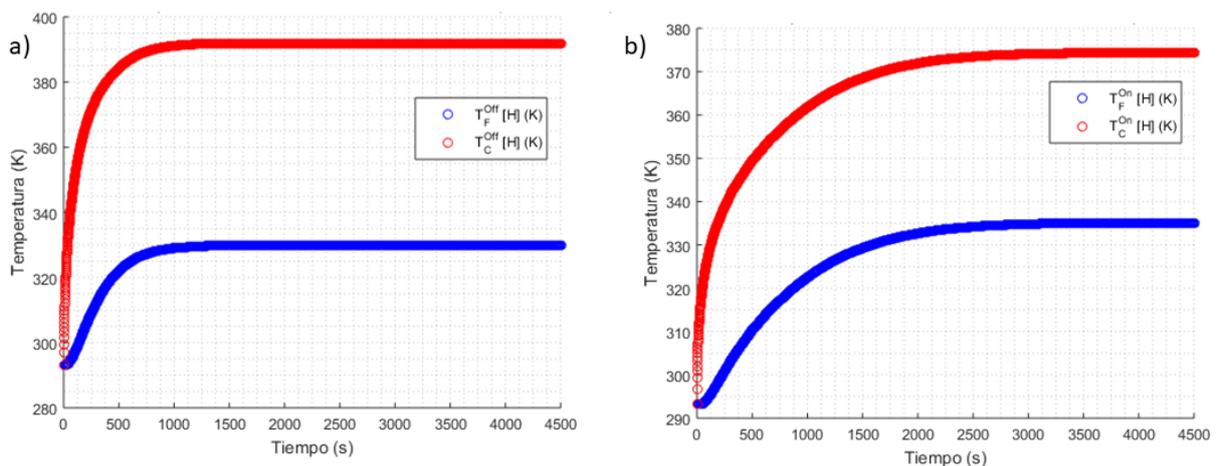


Figura 29. Evolución temporal de la temperatura en los focos caliente y frío en ambos modos de configuración para orientación horizontal de los arrays: a) Apagada; b) Encendida.

Con respecto a los resultados anteriores, esta configuración presenta unas diferencias en el foco frío con los distintos casos cilíndricos de unos 1-2 K para el modo apagado, mientras que el modo encendido presenta diferencias de 0-1 K. Los tiempos para alcanzar el estado

estacionario son muy similares a los obtenidos en las configuraciones de orificios cilíndricos para ambos modos de funcionamiento.

Los resultados de las dos configuraciones se resumen en la **tabla 7**:

Tabla 7. Datos de temperatura y tiempo de estabilización para distribuciones perpendicular y paralela de los arrays en el dispositivo.

Distribución	$T_F^{Off} (K)$	$T_F^{On} (K)$	$T_F^{On} - T_F^{Off} (K)$	$t_{est}[T_F^{Off}] (s)$	$t_{est}[T_F^{On}] (s)$
Perpendicular	321,6	335,0	13,4	1030	2850
Paralela	329,8	335,1	5,3	1115	2900

Apoyándonos en la **tabla 7**, desde el punto de vista de valores de temperatura en el foco frío, se tiene una mejor conexión térmica con el foco caliente en la configuración con arrays orientados de manera paralela a la propagación de calor. La diferencia entre la configuración perpendicular y paralela se hace muy acusada en el modo apagado, ya que, la diferencia entre la temperatura del foco frío entre ambas configuraciones es de 8,2 K. En la **figura 30** podemos ver las conductividades efectivas del dispositivo en las diferentes configuraciones, donde podemos ver que la conductividad de la configuración paralela en el modo apagado es superior a la de la configuración perpendicular. Esta diferencia es debida a la orientación favorable de la configuración paralela, la cual permite la formación de caminos preferentes de alta conductividad térmica, dando lugar a una conductividad efectiva del sistema mayor en la configuración paralela. En el modo encendido no se encuentran diferencias significativas entre las temperaturas que se alcanzan en el foco frío, siendo la diferencia de 0,1 K a favor de la configuración paralela, hecho que también se observa en la pequeña diferencia en las conductividades térmicas efectivas (se diferencian en 0,0005 W/m·K).

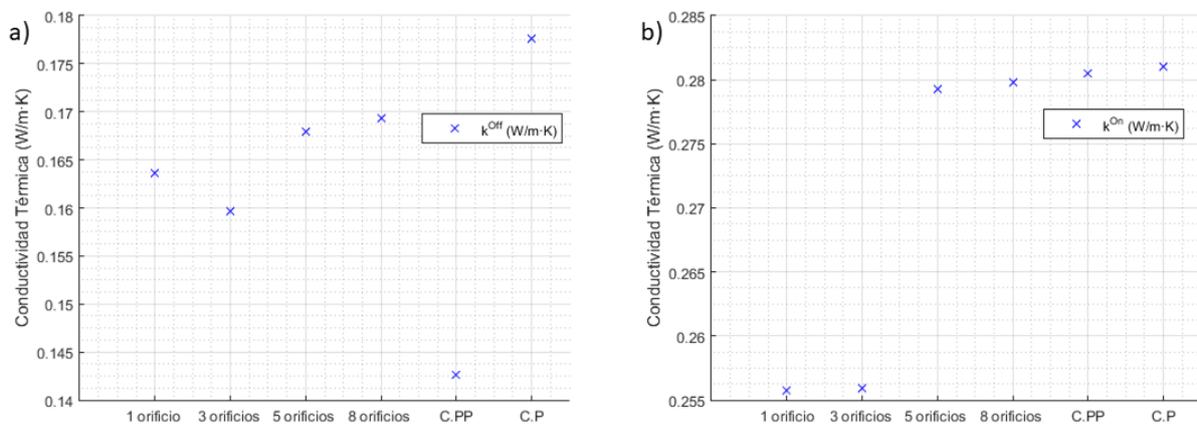


Figura 30. Conductividad térmica efectiva para las distintas configuraciones estudiadas (C.PP: configuración perpendicular; C.P: configuración paralela): a) Apagada; b) Encendida.

Desde el punto de vista del tiempo para alcanzar el estado estacionario, la mejor respuesta se observa para la configuración perpendicular según la temperatura del foco frío, se traduce en la necesidad de un menor tiempo de estabilización, 85 s menos que para el modo apagado en configuración paralela, y 50 s menos para el modo encendido

La capacidad del sistema en alcanzar el estado estacionario se puede visualizar mediante la representación de la diferencia de temperatura respecto a la temperatura inicial normalizada respecto a la misma magnitud en el estado estacionario. Esta capacidad se ilustra mediante la **figura 31**, donde la variables T_1^V se refiere a la diferencia normalizada del foco frío en la configuración perpendicular en el modo apagado, T_1^H la diferencia normalizada del foco frío en la configuración paralela en el modo apagado, T_2^V la diferencia normalizada del foco frío para la configuración perpendicular en el modo encendido y T_2^H la diferencia normalizada en el foco frío para la configuración paralela en el modo encendido.

En la representación de las variables T_1^V , T_1^H (ilustradas en **figura 31 a)**) se ve como la configuración perpendicular a la propagación de calor tiene una pendiente menos acusada que la configuración paralela, es decir, tarda un mayor tiempo en alcanzar su estado estacionario, tal como se ha discutido anteriormente con ayuda de la **tabla 7**. Por su parte, las variables T_2^V , T_2^H (ilustradas en **figura 31 b)**) presentan un comportamiento casi idéntico (en todo el intervalo de tiempo las curvas se superponen una sobre la otra).

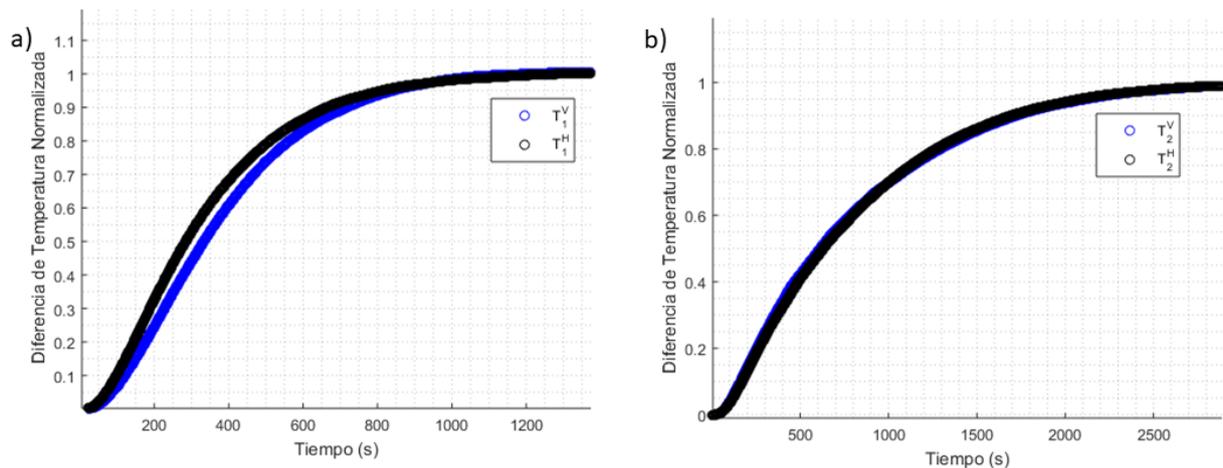


Figura 31. a) Evolución temporal de las variables T_1^V , T_1^H ; b) Evolución temporal de las variables T_2^V , T_2^H

4. Conclusiones

En este trabajo se han realizado simulaciones mediante elementos finitos del comportamiento de diodos térmicos magnéticamente activados. Se ha buscado mejorar la respuesta del dispositivo, considerando como objetivos a optimizar: 1) la diferencia de conductividad entre los estados apagado y encendido del dispositivo, y 2) el tiempo de respuesta del mismo.

En un primer lugar, se ha realizado el cálculo de la conductividad térmica de un único material, ABS, en base a las medidas de temperatura en dos puntos distintos de la geometría del dispositivo haciendo uso de la ley de Fourier. Se obtiene una conductividad para el ABS simulado de $0,178 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ con un error relativo al valor real de la magnitud de un 3%. Al tratarse de un porcentaje de error menor al 5%, se puede afirmar que las condiciones de simulación que se han impuesto nos tienen que llevar a unos resultados coherentes.

Posteriormente, se ha estudiado un dispositivo convencional que consta de un único orificio cilíndrico en su interior para albergar el fluido. El comportamiento del dispositivo desde el punto de vista de la conexión térmica entre el foco caliente y foco frío es altamente dependiente de la conductividad térmica en el interior del orificio (correspondiendo el aire al estado apagado y el ferrofluido al estado encendido). Bajo condiciones usadas, se obtiene una diferencia de conductividad entre las configuraciones apagada y encendida de $0,092 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, lo que da lugar a una variación de la temperatura del foco frío de unos $7,9 \text{ K}$.

Desde el punto de vista del tiempo necesario para alcanzar el estado estacionario la configuración encendida implica un tiempo de estabilización mucho mayor que el correspondiente por una configuración apagada (alrededor de 2700 s y 1000 s , respectivamente).

Tras estudiar la distinta respuesta del dispositivo con el fluido en el interior del orificio, se ha pasado a modificar el tamaño del orificio mediante la variación del radio del orificio. A medida que el radio del orificio aumenta, las diferencias entre las conductividades de los estados apagado y encendido aumentan. Conforme aumenta el volumen de orificio con aire en su interior, la conductividad efectiva del dispositivo disminuye, mientras si es el ferrofluido el que está en su interior, la conductividad efectiva del dispositivo aumenta. La conductividad

con el radio del orificio sigue una aparente evolución según un polinomio de segundo orden (más destacada en el modo apagado que en el encendido), mientras que en función de la fracción volumétrica de orificio, la conductividad sigue una tendencia lineal, creciente en el modo encendido y decreciente en el modo apagado.

Tras estudiar el dispositivo convencional, hemos variado la disposición de los orificios en el dispositivo a fin de optimizar la configuración del mismo. Se ha encontrado que para una fracción de volumen de orificio fija, los resultados en términos térmicos dependen de manera importante de la distribución del volumen en el sistema (se han estudiado las distribuciones de 3, 5 y 8 orificios).

Con respecto a la conductividad del sistema, se ha observado una mayor diferencia entre los estados apagados y encendido para la configuración de 5 orificios. Además es la configuración para la cual se ha alcanzado una mayor diferencia de temperaturas (8,0 K). Con respecto al tiempo de respuesta, el mejor sigue siendo el convencional (1 orificio) aunque las diferencias no son significativas (alrededor del 10% para el modo apagado y 3% para el encendido). Fijándonos en los perfiles de temperatura de las diversas configuraciones, se observa que la de 5 orificios es la que menos puentes térmicos tiene en el estado apagado. Este argumento nos lleva al estudio de arrays de orificios orientados de distinta forma para establecer un mayor o menor número de puentes térmicos.

Por último, extendemos el caso anterior para un caso límite de arrays de orificios cilíndricos (aproximados por orificios rectangulares) orientados paralelamente y perpendicularmente a la propagación de calor. La orientación de los arrays de manera perpendicular a la propagación de calor ha mostrado unos mejores resultados desde el punto de vista de temperatura en el foco frío (mayor diferencia de temperatura entre ambos estados, 13,4 K). Esto es consecuente con la mayor diferencia de conductividad térmica efectiva que se da en esta configuración entre los dos modos de funcionamiento: 0,138 W/m·K en la configuración perpendicular frente a los 0,104 W/m·K en la configuración paralela). Desde la visión del tiempo necesario para alcanzar el estado estacionario en el foco frío, los valores de la configuración perpendicular son ligeramente inferiores a los de la configuración paralela (en torno a los 1000 s y 2900 s para las configuraciones apagada y encendida, respectivamente).

Finalmente, con ambos argumentos, podemos concluir que la orientación perpendicular tiene una mayor respuesta que la paralela, comprobándose que la formación de caminos para la propagación térmica son un factor importante a la hora de analizar el funcionamiento del sistema.

5.-Bibliografía

- [1] Liu X., Kent N., Ceballos A., Streubel R. et al. (2019), *Reconfigurable Ferromagnetic Liquid Droplets*, *Science* 365(6450), 264-267, doi: 10.1126/science.aaw8719
- [2] Derin B., Genc S. (2014), *Synthesis and rheology of ferrofluids: a review*, *Current Opinion in Chemical Engineering*, 118-124, doi: 10.1016/j.coche.2013.12.006
- [3] R. E. Rosensweig (1985), *Ferrohydrodynamics*, Dover Publications Inc. Mineola, New York, 1-72
- [4] Figueredo Neto A. M., Scherer C. (2005), *Ferrofluids: Properties and Applications*, *Brazilian Journal of Physics*, doi: 10.1590/S0103-97332005000400018
- [5] Kitanovski A, Tomc U., Ozbolt M. (2015) *Magnetocaloric Energy Conversion From Theory to Applications*, 167-202, doi: 10.1007/978-3-319-08741-2
- [6] Rodrigues C., Días M. M., Martins L., J. P. Araújo J. P., Oliveira J. C.R.E, Pereira A. M., Ventura J. (2015). *An Electromagnet-Based Magnetically-Activated Thermal Switch Without Moving Parts*. doi: 10.1016/j.enconman.2019.111881
- [7] Pallecchi, E., Chen, Z., Fernandes, G.E., Wan, Y., Kim, J.H., Xu, J. (2015), *A thermal diode and novel implementation in a phase-change material*. *Mater Horiz*, 125–129. doi: 10.1039/c4mh00193a
- [8] Starr, C. (1936), *The Copper Oxide Rectifier*. *Physics* 7 (1) 15-19 doi: 10.1063/1.1745338.
- [9] Cha G., Ju, Y.S. (2009), *Reversible thermal interfaces based on microscale dielectric liquid layers*. *Appl Phys Lett* 2007–2010, doi: 10.1063/1.3142866
- [10] Ma, K.q., Liu, J. (2007), *Heat-driven liquid metal cooling device for the thermal management of a computer chip*, doi: 10.1088/0022-3727/40/15/055
- [11] Nkurikiyimfura, I., Wang, Y., & Pan, Z. (2013). *Heat transfer enhancement by magnetic nanofluids—A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 548–561. doi:10.1016/j.rser.2012.12.039
- [12] Zamora M. (1998), *Termo I. Un estudio de los sistemas termodinámicos*, Secretariado de Publicaciones, Universidad Sevilla. 113-114

[13] COMSOL Multiphysics® v. 5.3. COMSOL AB, Stockholm, Sweden

[14] Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2002). *Fundamentals of heat and mass transfer*. New York: J. Wiley, 559-571

[15] MatWeb (1996-2020). MatWeb. Material Property Data. Recuperado de: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=eb7a78f5948d481c9493a67f0d089646&ckck=1>