

Análisis Numérico del Flujo y la Transferencia de Calor Dentro de una Estructura Giroide

Numerical Analysis of the Flow and Heat Transfer Through a Gyroid Structure

Luis Guillermo Ornelas-Ramón^{1, a}, Saúl Piedra^{2, b}, Arturo Gómez-Ortega^{2, c}, James Pérez-Barrera^{2, d}

¹Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI).
Av. Playa Pie de la Cuesta No. 702, Santiago de Querétaro, Querétaro 76125, México.

²CONAHCYT-Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI).

Av. Playa Pie de la Cuesta No. 702, Santiago de Querétaro, Querétaro 76125.

^al.ornelas@posgrado.cidesi.edu.mx, ^bsaul.piedra@cidosi.edu.mx,

^carturo.gomez@cidosi.edu.mx y ^djames.perez@cidosi.edu.mx.

Resumen

Las superficies mínimas triplemente periódicas (TPMS) son superficies suaves, periódicas y definidas matemáticamente, que pueden dividir un espacio tridimensional definido en dos regiones independientes, es decir, que no se cruzan o intersecan entre sí. En años recientes, ha crecido el interés en estas estructuras debido a sus prometedoras características para aplicaciones energéticas, como absorbentes y disipadores de calor. En este trabajo se presenta un estudio numérico del flujo y transferencia de calor en régimen laminar dentro de la estructura TPMS giroide. El objetivo principal es caracterizar la transferencia de calor a través de esta estructura y proponer una correlación para el número de Nusselt como función de las características del flujo, tal como las que se han desarrollado para geometrías convencionales usadas en el diseño de intercambiadores de calor.

Abstract

Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS) are smooth, periodic, and mathematically defined surfaces that can divide a defined three-dimensional space into two independent regions, that is, they do not cross or intersect each other. In recent years, interest in these structures has arisen due to their promising features for energy applications, such as absorbers and heat sinks. In this work a numerical study of the flow and heat transfer in laminar regime through gyroid TPMS structures is presented. The main goal is characterizing the heat transfer through this structure and proposing a relationship between the Nusselt number and the flow characteristics, such as those that have been developed for conventional geometries used in the design of heat exchangers.

Palabras clave: Superficies mínimas triplemente periódicas, Intercambiador de calor, Giroide, Transferencia de calor conjugada, Dinámica de fluidos computacional.

Keywords: Triply periodic minimal surface, Heat exchanger, Gyroid, Conjugate heat transfer, Computational fluid Dynamics.

Introducción

Los intercambiadores de calor son dispositivos que permiten el intercambio de energía en forma de calor entre dos fluidos con diferentes temperaturas sin contacto directo, esto es a través de un interfaz (pared) definida por una superficie. Actualmente, son empleados en muchos procesos industriales, y su diseño varía ampliamente para aplicaciones específicas.

Sin embargo, en la mayoría de estos, desde hace alrededor de 50 años no han habido cambios importantes en su diseño que contribuyan a mejorar su desempeño [1].

En distintos sectores industriales se estima que, en los próximos años, los procesos productivos requerirán el uso de fluidos a temperaturas significativamente más altas que las actuales, por ejemplo, en las plantas de generación de energía. Por otro lado, también se busca disminuir el tamaño de los equipos que requieren de un intercambiador de calor para su funcionamiento, sin que ello implique una disminución en su desempeño. En definitiva, estas necesidades representan un desafío para el diseño de intercambiadores de calor de próxima generación [2].

Una propuesta de diseño prometedora para la mejora de intercambiadores de calor consiste en la integración de estructuras geoméricamente complejas basadas en superficies como interfase de intercambio, con el objetivo de incrementar el área superficial específica y promover patrones de flujo que mejoren la transferencia de calor. Entre las estructuras cuyas características cumplen estas demandas, las superficies mínimas triplemente periódicas (TPMS, por sus siglas en inglés), son superficies periódicas suaves que dividen el espacio en dos regiones que no se cruzan entre sí; se definen como una superficie de curvatura media cero, y matemáticamente es posible describirlas mediante funciones implícitas simples, de modo que su diseño paramétrico es sencillo. Particularmente, la TPMS giroide divide un espacio tridimensional en dos volúmenes de igual tamaño, lo que proporciona una gran relación superficie/volumen. Es importante mencionar que, debido a su complejidad geométrica, las TPMS solo se pueden fabricar a través de procesos de manufactura aditiva (MA) [3], también conocidas como tecnologías de impresión 3D, cuyo proceso consiste en la adición de material capa tras capa hasta la formación del

cuerpo tridimensional, este proceso ofrece ventajas prometedoras para el prototipado y fabricación de piezas complejas, que como en el caso de las TPMS no se pueden fabricar por otra técnica. Entre las ventajas, resalta la consolidación de partes, esto es, la fabricación de dispositivos funcionales que normalmente están compuestos por varias piezas unidas mecánicamente (soldadura, pegamento, tornillos, etc.), en una sola pieza, eliminando la necesidad de soldar o unir las diferentes piezas del mismo [4]. Un ejemplo de dispositivos complejos, y de gran número de componentes que puede ser mejorado por consolidación y MA, son los intercambiadores de calor. Sin embargo, el desafío crítico que enfrenta el diseñador de una TPMS para una aplicación específica radica en elegir la forma de celda TPMS adecuada y las características geométricas de la estructura [5].

La superficie giroide es la que más se ha estudiado, y a la que más usos y aplicaciones se le ha dado debido, particularmente, a sus prometedoras características para el diseño de intercambiadores de calor. La TPMS giroide está definida por la Ecuación (1):

$$F(x, y, z) = \cos(\tilde{x})\sin(\tilde{y}) + \cos(\tilde{y})\sin(\tilde{z}) + \cos(\tilde{z})\sin(\tilde{x}) = t, \quad (1)$$

donde $\tilde{x} = \frac{2\pi}{L}x$, $\tilde{y} = \frac{2\pi}{L}y$, $\tilde{z} = \frac{2\pi}{L}z$, L es la longitud periódica, es decir, la longitud del borde de la celda unitaria cúbica (o simplemente el tamaño de la celda unitaria) y t es el parámetro de compensación (isovalor), el cual define el grosor de la pared de la superficie [6].

Si bien existen diversos estudios que reportan el análisis de las propiedades mecánicas de las estructuras TPMS [7, 8], los trabajos interesados en el análisis de transferencia de calor y flujo de fluidos dentro de estructuras TPMS son pocos. Peng, Gao & Hu (2019) realizaron simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) para evaluar el flujo y transferencia de calor a través de la estructura giroide. Comparando su desempeño con el de un intercambiador de calor tradicional de placas con canales rectos, concluyeron que el dominio con la TPMS presenta menor caída de presión, y tasas y coeficientes de transferencia de calor más altos. Luo, J. *et al.* (2020), mediante el método de Lattice Boltzmann (LBM), y variando la porosidad de la estructura giroide, a través del isovalor t , simularon el flujo y determinaron su permeabilidad, difusividad y conductividad térmica efectiva [9]. Al-Ketan *et al.* (2020) analizaron, mediante CFD, la convección forzada en disipadores de calor basados en TPMS. Para tres TPMS distintas, compararon la transferencia de calor y la distribución del flujo, mostrando que las láminas del giroide en fase de red exhibieron el mayor coeficiente de transferencia de calor por convección debido a su gran área superficial [10]. Attarzadeh *et al.* (2021) desarrollaron una metodología robusta para el cálculo del desempeño térmico de la TPMS Schwartz “D” para diferentes condiciones de flujo. A través del cálculo del coeficiente

de transferencia de calor y la caída de presión, concluyeron que la transferencia de calor en la TPMS Schwartz “D”, es más efectiva comparada con un canal vacío [4]. Coimbra *et al.* (2021) realizaron simulaciones en una TPMS giroide, con las que analizaron el campo de velocidades para diferentes velocidades de flujo, comparándolos con sus datos experimentales, hallando buena concordancia en el flujo, transferencia de calor y perfil de adsorción para la matriz del criogel [11]. Si bien en los estudios reportados se ha concluido que las estructuras TPMS pueden incrementar significativamente la transferencia de calor en comparación con las configuraciones tradicionales de intercambiadores de calor (ej. aletas), muy pocos trabajos han buscado caracterizar la transferencia de calor de forma sistemática, buscando correlaciones que puedan ser utilizadas para el diseño de intercambiadores de calor integrando este tipo de estructuras.

En este trabajo se presenta un estudio numérico que tiene como objetivo caracterizar la transferencia de calor del flujo dentro de una estructura tipo giroide. Primeramente, se describe el flujo de trabajo desarrollado para diseñar estructuras giroides en software libre especializado y adecuarlos a un software de simulación numérica para implementar un modelo CFD-CHT (Transferencia de Calor Conjugada), y de este modo simular el flujo y la transferencia de calor para diferentes condiciones. Finalmente, se presentan características cualitativas y cuantitativas del flujo, y se obtiene una correlación para la transferencia de calor como función del flujo.

Diseño de Estructuras TPMS

Las estructuras TPMS han llamado la atención para ser utilizadas en aplicaciones de mecánica estructural [12, 13, 14], transferencia de calor [15, 16] y dispositivos biomédicos [17, 18], debido a su simplicidad matemática y propiedades geométricas altamente personalizables que, a su vez, afectan directamente a diferentes propiedades físicas efectivas. A pesar de sus aplicaciones evidentes, el software disponible para diseñar e integrar TPMS en dispositivos funcionales aún es escaso. Particularmente, existen algunas opciones comerciales (nTopology) [19] y de código abierto [20, 21, 22] que se han desarrollado recientemente. En el caso de los softwares comerciales, estos resultan ser costosos, en tanto que los de código abierto (open-source) están limitados en algunos aspectos fundamentales. En este trabajo se utilizó el software MaSMaker [23] para generar las estructuras giroides estudiadas. MaSMaker es un software de licenciamiento libre que es capaz de diseñar e integrar estructuras TPMS en geometrías complejas (Ver Figura 1). Dado que MaSMaker produce un archivo STL, las estructuras diseñadas en dicho software se preprocesaron para que fueran compatibles con el software de simulación CFD. Este preprocesamiento consistió en una reparación de la superficie triangulada en MeshMixer, y la solidificación en FreeCAD, para finalmente integrarse al dominio computacional de interés.

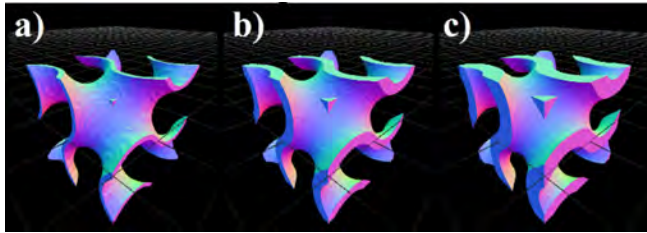


Figura 1. Celdas unitarias de la estructura giroide generadas en el software MaSMaker [23]. Resolución de 30³ vóxeles e isovalor de a) $t=0.2$, b) $t=0.4$ y c) $t=0.6$.

Modelo Físico y Matemático

El flujo de fluidos y la transferencia de calor dentro de la estructura giroide fueron estudiados de forma numérica. Para esto, se simuló un canal con una celda unitaria del giroide, tal como se puede observar en la Figura 2. En este esquema se muestran las condiciones de frontera térmicas y de flujo aplicadas, esto es, flujo a baja temperatura ($T=273$ K) a la entrada del canal; flujo hidrodinámica y térmicamente desarrollado a la salida; no deslizamiento y aislamiento térmico en las paredes laterales y temperatura alta ($T=313$ K) en la placa de calentamiento.

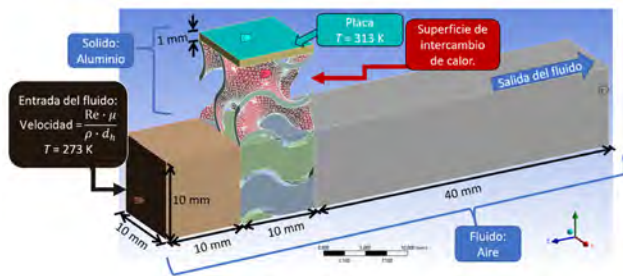


Figura 2. Esquema del dominio computacional. La estructura giroide se muestra sobre el canal para representar su complejidad geométrica y condición de intercambio con el fluido.

Comúnmente los intercambiadores de calor se fabrican de acero inoxidable, titanio, aluminio, entre otros metales. Los fluidos más comunes con los que trabajan son: aire, agua, aceites y refrigerantes. Para las simulaciones presentadas en este trabajo se utilizaron las propiedades físicas del aire como fluido de trabajo, y aluminio para la estructura TPMS y placa de calentamiento, las cuales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades materiales del sólido y fluido de trabajo.

Materiales	$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	$C_p \left(\frac{J}{kg K} \right)$	$k \left(\frac{W}{m K} \right)$	$\mu \left(\frac{kg}{m s} \right)$
Aire	1.225	1006.43	0.0242	1.82×10^{-5}
Aluminio	2700	900	205	-

El flujo de aire, la caída de presión y la transferencia de calor a lo largo del canal se verán perturbados debido a la presencia de la estructura TPMS. El fenómeno está gobernado por las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía para un fluido Newtoniano e incompresible

y la ecuación de conservación de energía para la estructura TPMS:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0, \tag{2}$$

$$\rho_f \left[\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu (\nabla \vec{u} + \nabla^T \vec{u}) \right], \tag{3}$$

$$\rho_f C_{p_f} \left[\frac{\partial T_f}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) T_f \right] = \nabla \cdot (k_f \nabla T_f), \tag{4}$$

$$\rho_s C_{p_s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (k_s \nabla T_s), \tag{5}$$

donde, \vec{u} el campo vectorial de velocidad, ρ_s y ρ_f son la densidad del fluido y del sólido, respectivamente, p es la presión estática, μ es la viscosidad dinámica, C_{p_f} y C_{p_s} son el calor específico del fluido y del sólido, respectivamente, T_f y T_s son las temperaturas del fluido y del sólido, respectivamente, k_f y k_s son la conductividad térmica del fluido y del sólido, respectivamente [24].

Para cerrar el sistema de ecuaciones gobernantes se utilizaron las condiciones de frontera mostradas en la Tabla 2 y esquematizadas en la Figura 2.

Tabla 2. Condiciones de frontera empleadas en las simulaciones CFD-CHT.

Entrada	$u=v=0$ $w = \frac{Re \cdot \mu}{\rho_f \cdot d_h}$	$T_f=273 K$
Salida	$\frac{\partial \vec{u}}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial T_f}{\partial z} = 0$
Región de fluido		
Laterales Izquierda y derecha	$u=v=w=0$	$\frac{\partial T_f}{\partial x} = 0$
Arriba y abajo	$u=v=w=0$	$\frac{\partial T_f}{\partial y} = 0$
TPMS		
Laterales Izquierda y derecha	$\frac{\partial T_s}{\partial x} = 0$	
Arriba	$T_s=313 K$	
Abajo	$\frac{\partial T_s}{\partial y} = 0$	
Interfaz de acoplamiento	$-k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} = -k_f \frac{\partial T_f}{\partial n}$	

Las simulaciones se realizaron variando el número de Reynolds del flujo dentro de la estructura TPMS. En este estudio,

el Re está basado en el diámetro hidráulico de la estructura como función del isovalor t , y está dado por

$$Re = \frac{\rho_f w d_h}{\mu}, \tag{6}$$

donde w es la velocidad de entrada del fluido en la dirección z . El diámetro hidráulico para la estructura giroide está definido como:

$$d_h = \frac{4V_f}{A_s}, \tag{7}$$

donde V_f es el volumen de fluido dentro de la región de la estructura (en color azul en la Figura 3a), y A_s es el área de la superficie mojada (en color verde en la Figura 3b). Las superficies TPMS, al ser triplemente periódicas, mantendrán el mismo valor de diámetro hidráulico sin importar cuantas celdas unitarias se utilicen. La Figura 3c muestra una vista lateral de la estructura TPMS, donde se observan los canales interconectados que se forman debido al diseño del giroide, por lo cual es posible considerar que el flujo a través de estas estructuras puede estudiarse como un medio poroso.

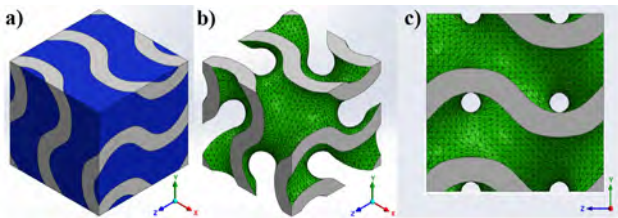


Figura 3. Celda unitaria de la estructura giroide de $t=0.6$ a) volumen de fluido dentro de la región de la estructura (azul), b) superficie mojada (verde) y c) vista lateral.

Implementación Numérica

El modelo matemático presentado en la sección anterior se resolvió numéricamente mediante el método del volumen finito implementado en el software ANSYS Fluent 2020 R2. El dominio computacional consistió en una estructura giroide cúbica de $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$, cuyos diseños se realizaron utilizando una resolución de 30^3 vóxeles. La estructura TPMS fue confinada en un canal cerrado ($10 \times 10 \times 60 \text{ mm}^3$), con una placa de 1 mm de espesor en la parte superior, como se muestra en la Figura 2. Se construyeron mallas computacionales tetraédricas no estructuradas, obteniendo métricas de calidad promedio aceptables para asegurar la convergencia de la solución (relación de aspecto = 1.8567, oblicuidad = 0.23138 y calidad ortogonal = 0.76719), con una aproximado de 500,000 celdas (ver Figura 4). Se resolvió el flujo en estado estacionario, utilizando el método SIMPLEC como algoritmo de desacople presión-velocidad, y esquemas upwind de segundo orden para discretizar los términos convectivos de las ecuaciones de conservación. Los residuales de las ecuaciones fueron monitoreados a lo largo del cálculo,

asegurando que convergieran a una tolerancia máxima de 10^{-4} para la ecuación de continuidad, y 10^{-6} para las ecuaciones de cantidad de movimiento y energía. Con el objetivo de verificar que el modelo CFD-CHT estuviera correctamente implementado, se reprodujeron los resultados reportados por Attarzadeh *et al.* (2022) [5].

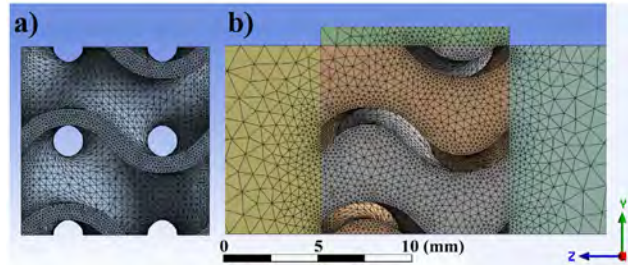


Figura 4. Vista lateral de a) malla de la celda unitaria giroide (sólido) y b) malla de canal (fluido). Nótese que en el dominio del fluido, la malla está refinada cerca de la estructura sólida para resolver la capa límite de forma adecuada.

El desempeño térmico se reporta a través del coeficiente de transferencia de calor por convección, h , el cual fue calculado por secciones de 1 mm de espesor a lo largo de la estructura giroide, como se puede observar en la Figura 5, mediante:

$$h_i = \frac{Q_i}{A_{s,i} (T_w - T_{b,i})} \tag{8}$$

donde h_i , Q_i y $A_{s,i}$ son el coeficiente de transferencia de calor por convección, calor total transferido y área de la superficie mojada de la sección i (región verde de la Figura 5), respectivamente. T_w es la temperatura de la placa caliente, y $T_{b,i}$ es la temperatura aparente promedio en la sección i , que se calcula mediante

$$T_{b,i} = \frac{\int w T dA}{\int w dA}$$

donde A es la región gris de la Figura 5. Con esta información, se calculó el número de Nusselt promedio, definido como

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{h_i} d_h}{k_f}, \tag{9}$$

donde h_i es el promedio del coeficiente de transferencia de calor por convección.

Resultados

Análisis de la resolución geométrica de estructuras TPMS Giroide.

Como primer paso para realizar el estudio numérico, se caracterizó geométricamente una celda unitaria TPMS giroide, de $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$, con isovalor $t=0.4$, variando la resolución de diseño, y calculando el error relativo con respecto a la relación volumen/área

$$e = \frac{\left(\frac{V}{A} \right)_{60} - \left(\frac{V}{A} \right)_i}{\left(\frac{V}{A} \right)_i}$$

con respecto al de 60^3 vóxeles. Aumentar la resolución por encima de 60^3 vóxeles no varía el valor de la relación V/A de manera significativa, por lo cual se eligió esta resolución como punto de comparación. La Figura 6 muestra una comparación de dos estructuras con resoluciones de 15^3 y 60^3 vóxeles. Nótese que, para bajas resoluciones, la superficie de la estructura presenta triángulos muy grandes, lo que lleva a que no se represente correctamente la superficie de las TPMS. El objetivo de esta caracterización fue encontrar la resolución mínima de diseño, en número de vóxeles, con la cual es posible representar de forma adecuada una estructura tipo giroide. Los resultados obtenidos de esta caracterización se reportan en la Tabla 3.

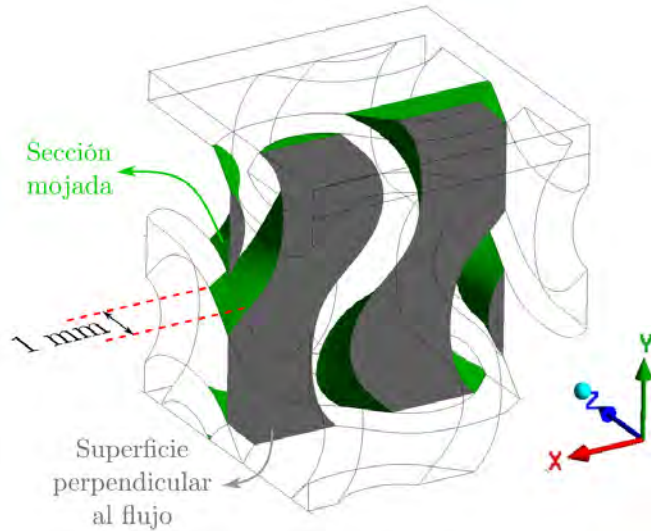


Figura 5. Ejemplo de sección de 1 mm de espesor para el cálculo del coeficiente h_f . La región verde corresponde a el área mojada, $A_{s,p}$ de la Ecuación (8). La región Gris es el área en la que se calcula la temperatura promedio del fluido, $T_{b,t}$.

Dado que para una resolución de 30^3 vóxeles, el error relativo es menor al 2% con respecto a la de 60^3 vóxeles, se recomienda que los diseños deben tener al menos esta resolución para representar la estructura de forma correcta. Lo anterior es importante debido a que, entre mayor sea la resolución de los diseños, los archivos STL generados serán más pesados y el consumo de tiempo y recursos computacionales necesarios para su preprocesamiento será mayor.

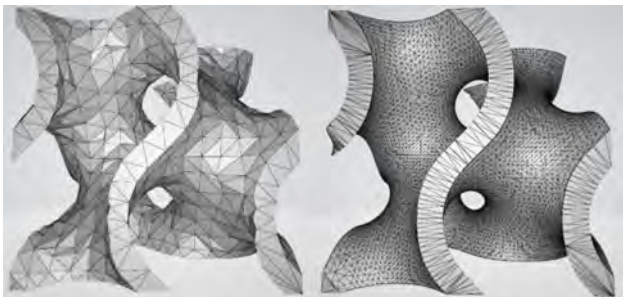


Figura 6. Comparación de celda unitaria con 15^3 (izquierda) y 60^3 (derecha) vóxeles de resolución. Nótese que la estructura del panel izquierdo presenta defectos geométricos importantes, los cuales desaparecen al aumentar la resolución.

Tabla 3. Caracterización geométrica de celdas unitarias giroide para $t=0.4$.

Resolución (vóxeles)	V/A (mm)	Error relativo del volumen (%)	Tamaño del archivo (Mb)
15^3	0.316207	11.6782807	7.151
20^3	0.33485854	5.45782746	12.748
30^3	0.34663499	1.87504156	24.862
40^3	0.35160608	0.43470914	44.164
50^3	0.35228458	0.24127008	64.934
55^3	0.35243459	0.19860602	76.986
60^3	0.35313454	0	95.446

El parámetro más relevante para definir las características de la superficie TPMS giroide es el isovalor t , el cual es directamente proporcional a la relación volumen de la estructura entre área (V/A) e inversamente proporcional al diámetro hidráulico (d_h). Con el fin de caracterizar de forma cuantitativa estas relaciones entre variables, se calcularon el diámetro hidráulico y la relación V/A , los cuales se muestran en la parte de arriba de la Figura 7, los cuales se pueden ajustar a funciones dependientes de t , la Ecuación (10) para la relación V/A con una $R^2=0.9937$ y la Ecuación (11) para el diámetro hidráulico con una $R^2=0.9995$. Se observa que, si bien una mayor relación V/A conlleva a una mayor área de transferencia de calor, el diámetro hidráulico disminuye, por lo que se espera una mayor caída de presión a través de la estructura, asimismo, se puede observar en la parte inferior de Figura 7 cómo se incrementa el grosor de pared de las estructuras giroide como función del isovalor t , con lo cual disminuye la porosidad de la estructura. En este sentido, las simulaciones con el modelo CFD-CHT ayudarán a determinar valores de relación V/A de la estructura, para los cuales se tendrá un buen compromiso entre la transferencia de calor y la caída de presión.

$$V/A = 1.3666t - 0.121, \quad (10)$$

$$d_h = -3.5409t + 6.3898, \quad (11)$$

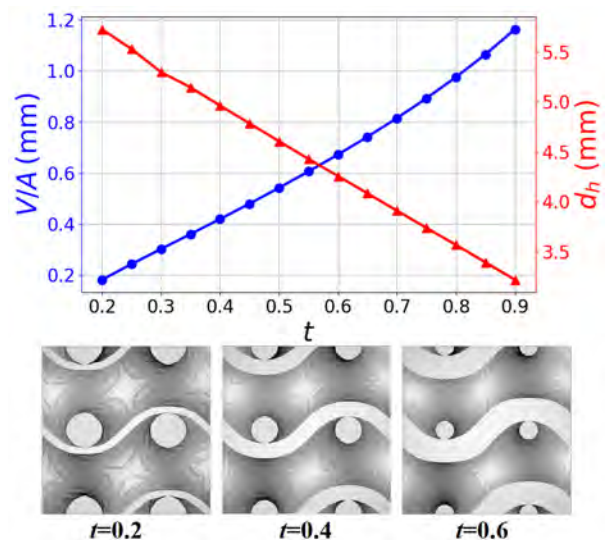


Figura 7. (Arriba) Relación volumen/área de intercambio de calor (línea azul) y diámetro hidráulico (línea roja) de la celda unitaria como funciones del isovalor t . (Abajo) Modelos STL para diferentes valores de t .

Análisis de la transferencia de calor dentro de la estructura giroide

Antes de realizar el estudio del flujo y la transferencia de calor dentro de la estructura giroide, se verificó que la implementación numérica fuera consistente mediante la comparación de resultados con otros trabajos reportados en la literatura. En particular, se compararon los resultados con el caso reportado por Attarzadeh *et al.* (2022), para $Re=150$ y $t=0.3$. En la Figura 8 se muestran los campos de temperatura y magnitud de la velocidad para diferentes planos a lo largo de la dirección z dentro de la estructura giroide. Nótese que el mapa de colores para la magnitud de la velocidad muestra un color gris en la región de la estructura TPMS, donde se cumple una condición de velocidad cero. Se puede observar que, a medida que el fluido atraviesa la estructura TPMS, su temperatura aumenta desde la temperatura de entrada al canal (273 K) hasta aproximadamente 300 K. Nótese que la temperatura de la estructura sólida es muy cercana a la temperatura de la placa (313 K) debido a la alta conductividad térmica del aluminio. Los resultados concuerdan cualitativa y cuantitativamente con lo reportado por Attarzadeh *et al.* (2022) [5]. Al igual que dichos autores, para la validación del modelo, se utilizó el argumento de que cuando se discretiza el dominio de fluido dentro de la celda, las cantidades físicas cambian de forma suave. Por ejemplo, para tener una velocidad que cambia gradualmente dentro de una celda, el número de Reynolds del flujo basado en el tamaño de la celda (Re_{celda}) debe ser de orden 1, en el caso de las mallas computacionales construidas para este estudio, se aseguró que $Re_{\text{celda}} < 1$. Con lo anterior, y sabiendo que el flujo está en un régimen laminar, se asegura que la malla sea lo suficientemente fina para obtener resultados consistentes de las simulaciones.

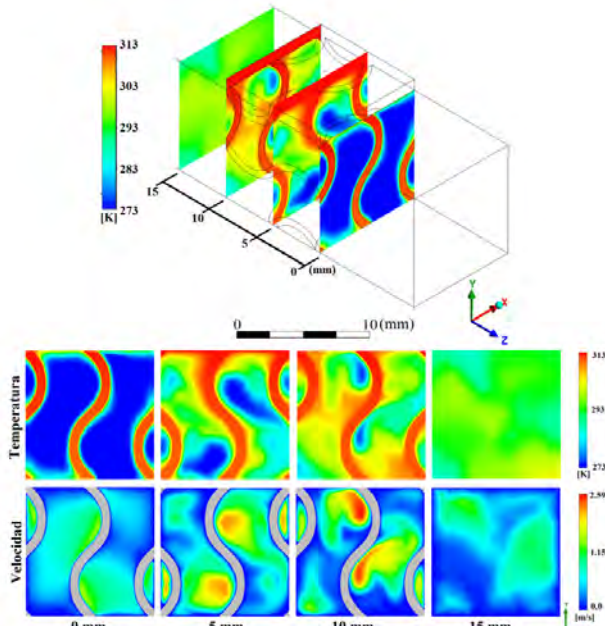


Figura 8. Campo de temperaturas (fila superior) y magnitud de la velocidad (fila inferior) para diferentes posiciones a través de la celda unitaria ($Re=150$, $t=0.3$). Resultados equivalentes a los reportados por Attarzadeh *et al.* [5].

Una vez verificado el modelo implementado, se realizaron simulaciones en las que se varió la relación V/A de la estructura giroide. La Figura 9a muestra, en vista isométrica, las líneas de corriente dentro del canal, coloreadas de acuerdo a la temperatura a lo largo de las mismas. Puede notarse que el flujo, y la temperatura, antes de atravesar la celda unitaria es uniforme, sin embargo, debido a la presencia de la estructura, las líneas de corriente se curvan para intentar formar un patrón helicoidal, el cual es una de las características geométricas de la estructura y por lo que se denomina “giroide”. En la Figura 9b, el acercamiento a uno de los canales muestra un patrón de giro en hélice, mismo que se imprime al fluido una vez que ha atravesado la estructura, lo cual puede observarse en la Figura 9c. Nótese que canales adyacentes tienen un patrón de giro contrario, por lo cual el flujo resultante se debe a la combinación de ambos efectos.

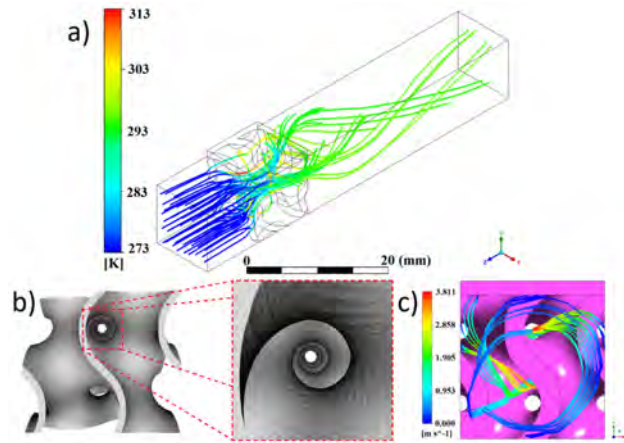


Figura 9. Patrón de flujo a través de la estructura giroide para $t=0.6$. a) El mapa de colores representa la temperatura del fluido. b) Nótese que, a la salida de la estructura, las líneas de corriente muestran un patrón helicoidal debido al giroide, c) el cual imprime esta característica en el flujo debido a la geometría del sólido.

En la Figura 10 se visualiza la distribución de temperaturas a lo largo y en el plano central del canal, para una celda unitaria con $t = 0.6$, en la que se varió la velocidad de entrada, lo que equivale a diferentes números de Reynolds. Se puede observar que, debido a la geometría de sus canales internos, la estructura TPMS homogeniza la temperatura a lo largo de la sección transversal a la salida. Puede notarse que la temperatura a la salida de la estructura disminuye al aumentar Re debido a que el tiempo de residencia del fluido en contacto con la estructura es mayor a bajas velocidades. Nótese también que, para $Re=10$, al observar con detenimiento el campo de temperaturas aguas arriba, a la entrada de la estructura, los efectos difusivos cobran importancia.

Para llevar a cabo un análisis cuantitativo del flujo y la transferencia de calor, se calcularon la caída de presión y la tasa total de transferencia de calor. En el caso de la caída de presión, se promediaron las presiones a la entrada y salida del giroide para calcularla. La tasa de transferencia de calor se obtuvo como:

$$Q = -\int_S k \nabla T \cdot \hat{n} \cdot ds, \tag{12}$$

donde $\hat{n} \, ds$ son el vector normal y el área de la superficie de cada volumen de control que conforma la estructura TPMS, respectivamente, y la integral se realiza sobre toda el área mojada de la estructura giroide.

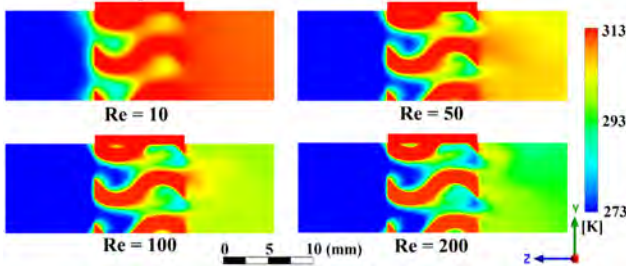


Figura 10. Campo de temperatura en el plano central del canal para distintos valores del número de Reynolds. Al incrementar Re, la temperatura promedio a la salida de la estructura disminuye debido al menor tiempo de contacto del fluido con la superficie calentada.

Asimismo, se calcularon una tasa de transferencia de calor entre el flujo y la placa (Q_{ref}) y una caída de presión por unidad de longitud, $\frac{\Delta P_{ref}}{L} = \left(\frac{P_{in} - P_{out}}{L_{TPMS}} \right)$, en un canal sin estructura

TPMS como valores de referencia. En la Figura 11 se presenta la comparación entre los resultados obtenidos con el modelo CFD-CHT para la tasa de transferencia de calor y caída de presión normalizadas con los valores de referencia. Se puede observar que, al incrementar la razón del volumen de la estructura entre el área de superficie de intercambio (V/A), existe una tendencia lineal creciente en la tasa de transferencia de calor, esto se debe a que la geometría de estructura TPMS favorece la transferencia de calor hacia el fluido, debido al incremento en el área de intercambio. Adicionalmente se puede observar una tendencia creciente no lineal de la caída de presión normalizada, como función de la relación V/A de la celda unitaria.

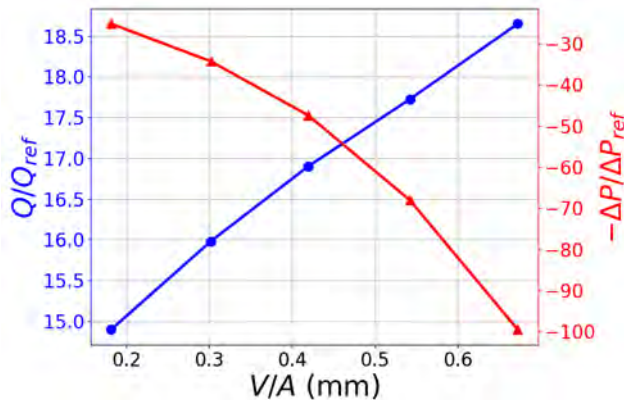


Figura 11. Razón de la tasa total de transferencia de calor (línea azul) y de la caída de presión (línea roja) normalizadas como función de V/A .

En la siguiente serie de simulaciones se calculó el número de Nusselt variando el número de Reynolds en el rango de

$10 \leq Re \leq 300$ (ver Figura 12). Con estos resultados se realizó un ajuste, mediante una ley de potencia, para obtener una correlación del número de Nusselt como función del número de Reynolds, $\overline{Nu} = f(Re)$, dando como resultado

$$\overline{Nu} = 0.61436 Re^{0.53958}, \tag{13}$$

la cual es válida para el rango de Reynolds mencionado y para un $Pr=0.7$, que corresponde al aire como fluido de intercambio. Este tipo de correlaciones son comunes para el cálculo del \overline{Nu} para intercambiadores de calor convencionales [1, 25].

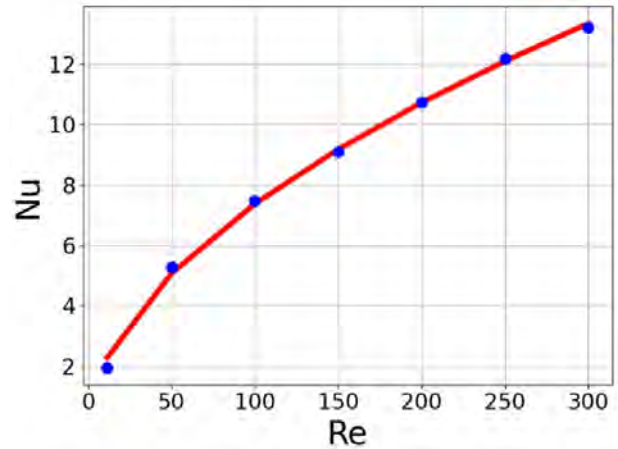


Figura 12. Nusselt como función de Reynolds ($Pr=0.7$). Los puntos azules son los resultados de las simulaciones CFD-CHT, en tanto que la línea roja es el ajuste mediante una ley de potencia (Ecuación 13).

Conclusiones

En el presente trabajo se realizó un estudio numérico del flujo y transferencia de calor a través de la estructura TPMS giroide, la cual es una prometedora propuesta de geometría para el diseño de intercambiadores de calor de próxima generación.

El diseño de las estructuras TPMS, y su procesamiento de adecuación para software de simulación se realizó a través de herramientas de código abierto y licenciamiento libre. Después de un análisis de la resolución de diseño para la estructura en el software MaSMaker, se concluyó que 30^3 vóxeles de resolución es aceptable para aproximar la geometría de la estructura giroide de manera adecuada.

El isovalor t , mediante su efecto directo sobre la relación V/A y el diámetro hidráulico, es el parámetro de la estructura cuya variación puede aprovecharse para optimizar intercambiadores de calor, es decir, maximizar tasa de transferencia de calor y minimizar caída de presión. Relacionando estos factores, al analizar los resultados se puede concluir que un valor V/A entre 0.4 y 0.5 es recomendado para diseñar estructuras para su integración en intercambiadores de calor, ya que en este rango existe un buen compromiso entre una alta tasa de transferencia de calor y una caída de presión aceptable (punto de intersección en la Figura 11).

Finalmente, se obtuvo una correlación en forma de ley de potencia entre el número de Nusselt y el número de Reynolds. Es importante resaltar que las correlaciones de ley de potencia para calcular el Nu son bastante utilizadas para el diseño de intercambiadores de calor convencionales y los coeficientes de dichas correlaciones dependen de la geometría y el tipo de intercambiador de calor. Con el resultado anterior, es posible calcular la transferencia de calor para diferentes flujos a través del giroide de una forma simple, tal como se requiere para el diseño conceptual de intercambiadores de calor convencionales.

Referencias

- [1] A. M. Flynn, T. Akashige & L. Theodore, *Kern's Process Heat Transfer*. Wiley-Scrivener, 2019.
- [2] H. Peng, F. Gao & W. Hu, *Design, modeling and characterization of triply periodic minimal surface heat exchangers with additive manufacturing*. En: Solid Free-form Fabrication Symposium, 2019, p. 2325-2337.
- [3] M. R. Johann, *Double-Gyroid-Structured Functional Materials*. En Springer theses. Springer Nature, 2013, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-00354-2>.
- [4] R. Attarzadeh, M. Rovira, & C. Duwig, *Design analysis of the "Schwartz D" based heat exchanger: A numerical study*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 177, 2021, 121415. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121415>.
- [5] R. Attarzadeh, S. Attarzadeh-Niaki, & C. Duwig, *Multi-objective optimization of TPMS-based heat exchangers for low-temperature waste heat recovery*. Applied Thermal Engineering, 212, 2022, 118448. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118448>.
- [6] J. F. Dolan, *Gyroid Optical Metamaterials: Solvent Vapour Annealing, Confined Crystallisation, and Optical Anisotropy*, 2018.
- [7] T. Maconachie, R. Tino, B. Lozanovski, M. O. Watson, A. Jones, C. Pandelidi, A. Al-Ghamdi, A. Almalki, D. R. Downing, M. Brandt & M. Leary, *The compressive behaviour of ABS gyroid lattice structures manufactured by fused deposition modelling*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 107(11-12), 2020, 4449-4467. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05239-4>.
- [8] O. Al-Ketan, D. H. Lee, R. Rowshan & R. K. A. Al-Rub, *Functionally graded and multi-morphology sheet TPMS lattices: Design, manufacturing, and mechanical properties*. Journal of The Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 102, 2020, 103520. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103520>.
- [9] J. Luo, L. Chen, T. Min, F. Shan, Q. Kang, & W. Tao, *Macroscopic transport properties of Gyroid structures based on pore-scale studies: Permeability, diffusivity and thermal conductivity*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 146, 2020, 118837. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118837>.
- [10] O. Al-Ketan, M. Ali, M. Khalil, R. Rowshan, K. Khan, & R. Abu Al-Rub, *Forced Convection Computational Fluid Dynamics Analysis of Architected and Three-Dimensional Printable Heat Sinks Based on Triply Periodic Minimal Surfaces*. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 13(2), 2020, <https://doi.org/10.1115/1.4047385>.
- [11] J. Coimbra, M. Martins, P. Oliveira & L. Minim, *The potential use of a gyroid structure to represent monolithic matrices for bioseparation purposes: Fluid dynamics and mass transfer analysis via CFD*. Separation and Purification Technology, 254, 2021, 117594. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117594>.
- [12] M. Jin, Q. Feng, X. Fan, Z. Luo, Q. Tang, J. Song, S. Ma, N. Yunfei, P. Jin & M. Zhao, *Investigation on the mechanical properties of TPMS porous structures fabricated by laser powder bed fusion*. Journal of Manufacturing Processes, 76, 2022, 559-574. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.02.035>.
- [13] H. Wang, D. Tan, Z. Liu, H. Yin, & G. Wen, *On crashworthiness of novel porous structure based on composite TPMS structures*. Engineering Structures, 252, 2022, 113640. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113640>.
- [14] Q. Sun, J. Sun, K. Guo & L. Wang, *Compressive mechanical properties and energy absorption characteristics of SLM fabricated Ti6Al4V triply periodic minimal/surface cellular structures*. Mechanics of Materials, 166, 2022, 104241. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2022.104241>.
- [15] Z. A. Qureshi, E. Elnajjar, O. Al-Ketan, R. Abu Al-Rub & S. B. Al-Omari, *Heat transfer performance of a finned metal foam-phase change material (FMF-PCM) system incorporating triply periodic minimal surfaces (TPMS)*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 170, 2021, 121001. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121001>.
- [16] S. Oh, J. Ha & K. H. Park, *Adaptive Conformal Cooling of Injection Molds Using Additively Manufactured TPMS Structures*. Polymers, 14(1), 181, 2022, <https://doi.org/10.3390/polym14010181>.

- [17] G. Savio, S. Rosso, R. Meneghello & G. Concheri, *Geometric Modeling of Cellular Materials for Additive Manufacturing in Biomedical Field: A Review*. Applied Bionics and Biomechanics, 2018, 2018, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2018/1654782>.
- [18] Z. Dong & X. Zhao, *Application of TPMS structure in bone regeneration*. Engineered regeneration, 2, 2021, 154-162. <https://doi.org/10.1016/j.engreg.2021.09.004>.
- [19] nTopology, *Next-Generation Engineering Design Software*, 2021, URL <http://ntopology.com/>.
- [20] A. Karakoç, *RegionTPMS — Region based triply periodic minimal surfaces (TPMS) for 3-D printed multiphase bone scaffolds with exact porosity values*. SoftwareX, 16, 2021, 100835. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2021.100835>.
- [21] I. Maskery, D. Padrao, L. Parry, R. J. Hague & I. Ashcroft, *FLatt Pack: A research-focussed lattice design program*. Additive manufacturing, 49, 2021, 102510. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102510>.
- [22] F. Perez-Boerema, M. Barzegari & L. Geris, *A flexible and easy-to-use open-source tool for designing functionally graded 3D porous structures*. Virtual and Physical Prototyping, 17(3), 2022, 682-699. <https://doi.org/10.1080/17452759.2022.2048956>.
- [23] M. I. Tenorio-Suárez, A. Gómez-Ortega, H. Canales, S. Piedra & J. Pérez-Barrera, *Masmaker: An Open-Source, Portable Software to Create and Integrate Maze-Like Surfaces into Arbitrary Geometries*. Social Science Research Network, 2022, <https://doi.org/10.2139/ssrn.4122056>.
- [24] ANSYS, Inc. *ANSYS Fluent Theory Guide 19*, Canonsburg, PA 15317, 2018.
- [25] J. Iyer, T. A. Moore, D. T. Nguyen, P. Roy & J. K. Stolaroff, *Heat transfer and pressure drop characteristics of heat exchangers based on triply periodic minimal and periodic nodal surfaces*. Applied Thermal Engineering, 209, 2022, 118192. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118192>.