



**Evaluación del rendimiento térmico de los intercambiadores de calor compactos con núcleos TPMS.**

Dávila Torres, Brandon Alexander

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

PhD. Lara Padilla, Hernán Vinicio

25 de agosto de 2023



### Davila\_Torres\_Antiplagio.docx

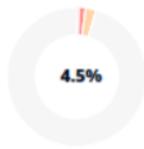
#### Scan details

Scan time:  
August 25th, 2023 at 16:55 UTC

Total Pages:  
50

Total Words:  
12303

#### Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
● Identical	0.5%	65
● Minor Changes	1.5%	188
● Paraphrased	2.5%	302
● Omitted Words	0%	0

#### AI Content Detection



Text coverage  
● AI text  
○ Human text



## Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

### Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

#### Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular. **“Evaluación del rendimiento térmico de los intercambiadores de calor compactos con núcleos TPMS.”** fue realizado por el señor **Dávila Torres, Brandon Alexander**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 25 de agosto del 2020.

.....  
**Ing. Lara Padilla, Hernán Vinicio PhD**

C.C. 0603247362



**Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica**

**Carrera de Ingeniería en Mecatrónica**

**Responsabilidad de Autoría**

Yo, **Dávila Torres, Brandon Alexander**, con cédula de ciudadanía N° 1727283598, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Evaluación del rendimiento térmico de los intercambiadores de calor compactos con núcleos TPMS** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangoquí, 1 de agosto del 2020.

.....  
**Dávila Torres Brandon Alexander**

C.C. 1727283598



**Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica**

**Carrera de Ingeniería en Mecatrónica**

**Autorización de Publicación**

Yo, **Dávila Torres, Brandon Alexander**, con cédula de ciudadanía N° 1727283598, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Evaluación del rendimiento térmico de los intercambiadores de calor compactos con núcleos TPMS** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 1 de agosto del 2020.

.....  
**Dávila Torres Brandon Alexander**

C.C. 1727283598

## **Dedicatoria**

A mi madre Fernanda quien ha sido mi mayor apoyo en todo este largo trayecto, mi gran ejemplo a seguir, quien me enseñó a luchar por cumplir mis sueños y me ha guiado a crecer profesionalmente y ser un mejor hombre cada día.

A mi segunda madre Flora, quien ha sido un pilar fundamental en el desarrollo de este trabajo y me ha apoyado en los momentos donde más lo necesité.

A mi hermana Army, por haberme llenado de risas y alegrías desde su llegada.

A mis amigos Sarahí, Viviana, Diana, Michael y Daniel por ser mi segunda familia, por ayudarme a madurar como persona y ser mi apoyo emocional.

A mis primos Gael, Sol, Daniel, Emilio y Fiorela por alegrar mis días y motivarme a ser el mejor ejemplo para ustedes cultivando los mejores valores.

Este trabajo es el fruto de todo el amor que me han dado, una demostración de que ustedes son parte de lo que soy. Les agradezco de todo corazón por siempre estar a mi lado, por enseñarme el significado de la perseverancia, el trabajo duro y a nunca bajar los brazos para cumplir las metas propuestas a pesar de las dificultades que se presenten en el camino.

## **Agradecimientos**

A los docentes Hernán Lara y Luis Carrión quienes han sido un apoyo fundamental brindándome la orientación necesaria para el desarrollo de este proyecto. Su ayuda fue muy importante.

A mis compañeros universitarios, por todo ese apoyo, preocupación y ánimos que me han transmitido en este proceso.

A mi padre Henry, que a pesar de la distancia siempre me apoyó y animó al inicio de mi carrera universitaria.

A mis tíos Wilman, Raquel y Silvana, por ser el mejor ejemplo a seguir y ayudarme a confiar en mis habilidades.

A mi padrastro Marco, por siempre tratarme como a uno de sus hijos, por la constante motivación y ayuda moral para seguir adelante a pesar de las adversidades.

A mi abuelo Wilman, por ser clara voz de sabiduría, buen consejo y experiencia.

A la universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por ayudarme con todas las herramientas necesarias para mi formación profesional.

## Índice de Contenido

Dedicatoria .....	6
Agradecimientos .....	7
Índice de tablas.....	11
Índice de figuras.....	13
Índice de ecuaciones .....	16
Resumen.....	17
Abstract .....	18
Terminología.....	19
Capítulo I: Introducción.....	21
Antecedentes .....	21
Justificación e importancia.....	23
Alcance .....	24
Objetivos .....	26
Objetivo general .....	26
Objetivos específicos.....	26
Capítulo II: Estado del arte .....	27
Intercambiadores de calor .....	27
Estereolitografía en geometrías complejas.....	27
Superficie mínima triple periódica (TPMS).....	29
Estructura Schwartz Diamante.....	31
Estructura Schwartz Primitiva .....	33

Estructura Schoen Giroide .....	34
Fabricación de intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS.....	35
Industria 4.0 e Internet de las cosas (IoT).....	36
Capítulo III: Métodos y materiales .....	39
Prototipo de plataforma de evaluación.....	39
Generalidades .....	39
Materiales utilizados .....	41
Montaje de la plataforma de evaluación .....	69
Conexión IoT .....	71
Validación del experimento mediante balance energético .....	74
Fabricación de Intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS .....	81
Diseño.....	81
Impresión 3D por estereolitografía.....	86
Fundición .....	87
Capítulo IV: Diseño de experimentos .....	89
Desarrollo de diseño de experimentos (DOE) .....	89
Planteamiento del problema.....	89
Selección de variables de salida.....	89
Selección de factores .....	90
Reporte de fundición de intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS .....	93
Elección del tipo de diseño experimental.....	97

	10
Diseño experimental .....	100
Protocolo experimental .....	102
Ejecución de experimentos.....	105
Análisis experimental .....	112
Diferencia de temperatura.....	113
Caída de Presión.....	115
Rendimiento.....	117
Análisis general y validación .....	120
Capítulo V: Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro .....	125
Conclusiones.....	125
Recomendaciones y trabajo futuro.....	126
Bibliografía .....	128
Apéndices .....	133

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Tabla comparativa de variables estudiadas en el fenómeno de estudio</i> .....	40
<b>Tabla 2</b> <i>Especificaciones técnicas de Celda de Peltier</i> .....	47
<b>Tabla 3</b> <i>Especificaciones técnicas de controlador electrónico</i> .....	48
<b>Tabla 4</b> <i>Especificaciones técnicas de resina térmica</i> .....	50
<b>Tabla 5</b> <i>Cuadro comparativo de alternativas para la variable temperatura</i> .....	54
<b>Tabla 6</b> <i>Especificaciones técnicas de multímetro</i> .....	56
<b>Tabla 7</b> <i>Cuadro comparativo de alternativas para la variable presión</i> .....	57
<b>Tabla 8</b> <i>Especificaciones técnicas del anemómetro</i> .....	60
<b>Tabla 9</b> <i>Especificaciones técnicas del controlador de motor DC</i> .....	64
<b>Tabla 10</b> <i>Especificaciones técnicas de fuente de alimentación</i> .....	66
<b>Tabla 11</b> <i>Especificaciones técnicas de la tarjeta de adquisición de datos</i> .....	67
<b>Tabla 12</b> <i>Valores constantes en el balance energético del sistema</i> .....	80
<b>Tabla 13</b> <i>Especificaciones técnicas de resina de fundición</i> .....	87
<b>Tabla 14</b> <i>Intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS planificados para fundición.</i> .....	94
<b>Tabla 15</b> <i>Impresión de estructuras TPMS para fundición</i> .....	95
<b>Tabla 16</b> <i>Intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS fundidos</i> .....	96
<b>Tabla 17</b> <i>Factores y niveles Shwartz Diamante</i> .....	98
<b>Tabla 18</b> <i>Factores y niveles Shwartz Primitiva</i> .....	98
<b>Tabla 19</b> <i>Tablas y factores Schoen Giroide</i> .....	99
<b>Tabla 20</b> <i>Resumen de número de experimentos a realizar</i> .....	99
<b>Tabla 21</b> <i>Orden de ejecución de experimentos Shwartz Diamante</i> .....	100
<b>Tabla 22</b> <i>Orden de ejecución de experimentos Shwartz Primitiva</i> .....	101
<b>Tabla 23</b> <i>Orden de ejecución de experimentos Shoen Giroide</i> .....	101
<b>Tabla 24</b> <i>Variables internas medidas por la plataforma de evaluación e instrumentación</i> .....	105

<b>Tabla 25</b> <i>Variables externas medidas en la plataforma de evaluación con instrumentación. ..</i>	106
<b>Tabla 26</b> <i>Propiedades del fluido en el volumen de control.....</i>	107
<b>Tabla 27</b> <i>Perdidas por convección natural en pieza central de plataforma de evaluación.....</i>	108
<b>Tabla 28</b> <i>Flujos másicos de entrada y salida del volumen de control. ....</i>	109
<b>Tabla 29</b> <i>Balance energético y eficiencia de sistema de experimentos.....</i>	110
<b>Tabla 30</b> <i>Variables de salida de experimentos .....</i>	111
<b>Tabla 31</b> <i>Valor R-cuadrado para las variables de respuesta.....</i>	122

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> <i>Esquema gráfico de un intercambiador de calor compacto con núcleo TPMS.</i> .....	22
<b>Figura 2</b> <i>Esquema gráfico del alcance de la plataforma de evaluación</i> .....	24
<b>Figura 3</b> <i>Esquema gráfico de la arquitectura IoT de la plataforma de evaluación</i> .....	25
<b>Figura 4</b> <i>Esquema de funcionamiento de impresora 3D basada en estereolitografía</i> .....	28
<b>Figura 5</b> <i>Comparativa de piezas impresas de filamento FDM vs resina SLA</i> .....	29
<b>Figura 6</b> <i>Modelos gráficos de las estructuras TPMS esqueléticas más estudiadas</i> .....	30
<b>Figura 7</b> <i>Esquema gráfico de superficie y solido Schwartz Diamante</i> .....	32
<b>Figura 8</b> <i>Esquema gráfico de superficie y solido Schwartz Primitiva</i> .....	33
<b>Figura 9</b> <i>Esquema gráfico de superficie y solido Schoen Giroide</i> .....	34
<b>Figura 10</b> <i>Fases principales del proceso de fabricación de estructuras TPMS</i> .....	36
<b>Figura 11</b> <i>Esquema de desarrollo de la capa límite de velocidad en una tubería</i> .....	42
<b>Figura 12</b> <i>Modelo 3D de canales de entrada y salida del fluido</i> .....	44
<b>Figura 13</b> <i>Canal de acrílico para fluido</i> .....	44
<b>Figura 14</b> <i>Canal de acrílico aislado adiabáticamente</i> .....	45
<b>Figura 15</b> <i>Celda de Peltier TEC1-706</i> .....	46
<b>Figura 16</b> <i>Idea Former Bed Mosfet V1</i> .....	48
<b>Figura 17</b> <i>Modelo 3D de pieza central de plataforma de evaluación</i> .....	49
<b>Figura 18</b> <i>Configuración de impresión de pieza central de plataforma</i> .....	51
<b>Figura 19</b> <i>Proceso de post curado pieza central de la plataforma</i> .....	52
<b>Figura 20</b> <i>Esquema de vista de sección de anclaje Pieza central - Canales</i> .....	53
<b>Figura 21</b> <i>Acople Pieza central-Canal de entrada</i> .....	54
<b>Figura 22</b> <i>Esquema de ubicación de sensores de temperatura</i> .....	55
<b>Figura 23</b> <i>Esquema de medición de presión estática y dinámica</i> .....	58
<b>Figura 24</b> <i>Esquema de ubicación de sensores de presión estática</i> .....	59
<b>Figura 25</b> <i>Modelo 3D de pieza auxiliar para medición de velocidad de fluido</i> .....	61

<b>Figura 26</b> <i>Esquema de ubicación de pieza auxiliar para medición de velocidad de fluido</i> .....	61
<b>Figura 27</b> <i>Anclaje de pieza auxiliar con canal para medición de velocidad de fluido</i> .....	62
<b>Figura 28</b> <i>Ventilador reciclado para generación de flujo</i> .....	63
<b>Figura 29</b> <i>Modelo 3D de acople para ventilador</i> .....	65
<b>Figura 30</b> <i>Acople de ventilador con canal de entrada</i> .....	65
<b>Figura 31</b> <i>Soportes para canales con regulación de fijación</i> .....	68
<b>Figura 32</b> <i>Modelo 3D de plataforma de evaluación</i> .....	69
<b>Figura 33</b> <i>Plataforma de evaluación de rendimiento térmico de intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS</i> .....	70
<b>Figura 34</b> <i>Diagrama de flujo de tarjeta de adquisición de datos</i> .....	71
<b>Figura 35</b> <i>Implementación creada en Google App Scripts</i> .....	72
<b>Figura 36</b> <i>Prueba preliminar de conexión de plataforma de evaluación con la nube</i> .....	73
<b>Figura 37</b> <i>Volumen de control en plataforma de evaluación</i> .....	74
<b>Figura 38</b> <i>Diagrama de flujo para validación del experimento</i> .....	76
<b>Figura 39</b> <i>Comparación de estructura TPMS MathMod vs PyVista</i> .....	82
<b>Figura 40</b> <i>Estructura TPMS tipo Giroide a distintas porosidades</i> .....	83
<b>Figura 41</b> <i>Estructura TPMS Giroides generado con distinto sistema de coordenadas</i> .....	84
<b>Figura 42</b> <i>Estructura TPMS Diamante generada con diferente orientación de núcleo</i> .....	85
<b>Figura 43</b> <i>Estructuras TPMS Primitivas generadas con diferentes números de celda de unidad</i> .....	85
<b>Figura 44</b> <i>Estructura TPMS Diamante con alimentadores</i> .....	86
<b>Figura 45</b> <i>Diagrama de Ishikawa para rendimiento térmico</i> .....	90
<b>Figura 46</b> <i>Gráfica de temperaturas en plataforma Kaggle</i> .....	104
<b>Figura 47</b> <i>Diagrama de Pareto diferencia de temperatura</i> .....	113
<b>Figura 48</b> <i>Efectos principales de la diferencia de temperatura</i> .....	114
<b>Figura 49</b> <i>Diagrama de Pareto caída de presión</i> .....	115

<b>Figura 50</b> <i>Efectos principales de la caída de presión</i> .....	116
<b>Figura 51</b> <i>Diagrama de Pareto rendimiento térmico</i> .....	117
<b>Figura 52</b> <i>Efectos principales del rendimiento térmico</i> .....	118
<b>Figura 53</b> <i>Gráfico de interacción de factores en rendimiento térmico</i> .....	119
<b>Figura 54</b> <i>Gráfico de residuos para rendimiento térmico</i> .....	121
<b>Figura 55</b> <i>Análisis de varianza para rendimiento térmico</i> .....	123

### Índice de ecuaciones

<b>Ecuación 1</b> <i>Ecuación general de una estructura TPMS</i> .....	31
<b>Ecuación 2</b> <i>Ecuación general de la estructura TPMS Schwartz Diamante</i> .....	32
<b>Ecuación 3</b> <i>Ecuación general de la estructura TPMS Schwartz Primitiva</i> .....	34
<b>Ecuación 4</b> <i>Ecuación general de la estructura TPMS Schoen Giroide</i> .....	35
<b>Ecuación 5</b> <i>Longitud de entrada hidrodinámica</i> .....	43
<b>Ecuación 6</b> <i>Ecuación general de balance de energía</i> .....	76
<b>Ecuación 7</b> <i>Fórmula de potencia eléctrica</i> .....	77
<b>Ecuación 8</b> <i>Fórmula para tasa de calor de salida</i> .....	77
<b>Ecuación 9</b> <i>Fórmula de transferencia de calor por convección</i> .....	78
<b>Ecuación 10</b> <i>Fórmula de trabajo de flujos de entrada y salida</i> .....	78
<b>Ecuación 11</b> <i>Balance energético del sistema</i> .....	78
<b>Ecuación 12</b> <i>Fórmula del flujo másico</i> .....	79
<b>Ecuación 13</b> <i>Balance energético simplificado del sistema</i> .....	79
<b>Ecuación 14</b> <i>Fórmula de eficiencia energética total</i> .....	80
<b>Ecuación 15</b> <i>Fórmula de rendimiento térmico</i> .....	81
<b>Ecuación 16</b> <i>Ecuación de la porosidad en una estructura TPMS</i> .....	83
<b>Ecuación 17</b> <i>Fórmula de número de Reynolds (viscosidad dinámica)</i> .....	93
<b>Ecuación 18</b> <i>Fórmula número de experimentos de tipo factorial</i> .....	97

## Resumen

El presente trabajo tiene el objetivo de encontrar nuevas aplicaciones para las estructuras TPMS (Superficie mínima triple periódica) específicamente en el rendimiento térmico de intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS, para lo cual se ha diseñado una plataforma de evaluación IoT (internet de las cosas) con el uso de estereolitografía e impresión 3D convencional que someterá dichas estructuras en un sistema de convección forzada con una fuente de calor y que recopila las variables físicas más importantes utilizando instrumentación mecatrónica, estos en conjunto registran las mediciones en una hoja de datos en Google Sheets disponible en cualquier lugar y dispositivo con acceso a internet. Se diseñó las estructuras TPMS utilizando código de lenguaje Python asistido con la herramienta PyVista la cual permite controlar características topológicas de las estructuras, se procedió a diseñar y unificar alimentadores para imprimirlos con estereolitografía en resina de fundición para fabricarlos con aluminio por el método de cera perdida. Se realizó un diseño experimental factorial donde los factores fueron los tipos de estructuras más estudiados: Shwartz diamante, Shwartz primitiva y Schoen giroide con tres niveles de porosidad y dos niveles de número de Reynolds. Los experimentos realizados se validaron haciendo uso de un balance energético general aplicado en un volumen de control crítico presente en la plataforma de evaluación, posteriormente se analizó y validó el diseño experimental haciendo uso de software estadístico el cual proyecta mediante gráficas de residuos la distribución normal de los datos y la incidencia de los factores en las variables de respuesta: diferencia de temperatura, caída de presión y rendimiento térmico de intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS.

*Palabras clave:* TPMS, evaluación, térmico, fundición, convección.

### **Abstract**

The objective of this work is to find new applications for TPMS (Triple Periodic Minimum Surface) structures, specifically in the thermal performance of compact heat exchangers with TPMS core, for which an IoT (Internet of Things) evaluation platform has been designed. ) with the use of stereolithography and conventional 3D printing that will submit said structures in a system of forced convection with a heat source and that collects the most important physical variables using mechatronic instrumentation, these together record the measurements in a data sheet in Google Sheets available anywhere and on any device with internet access. The TPMS structures were designed using Python language code assisted with the PyVista tool which allows controlling topological characteristics of the structures, we proceeded to design and unify feeders to print them with stereolithography in casting resin and to manufacture them with aluminum by the wax method loss. A factorial experimental design was carried out where the factors were the most studied types of structures: Shwartz diamond, primitive Shwartz and Schoen gyroid with three levels of porosity and two levels of Reynolds number. The experiments carried out were validated using a general energy balance applied in a critical control volume present in the evaluation platform, later the experimental design was analyzed and validated using statistical software which projects the normal distribution of residuals through residual graphs. the data and the incidence of the factors in the response variables: temperature difference, pressure drop and thermal performance of compact heat exchangers with TPMS core.

*Keywords:* TPMS, evaluation, thermal, casting, convection.

## Terminología

Símbolo	Parámetro	Unidad
$\Psi(r)$	Ecuación general de las TPMS	-
$N_x$	Dominio en dirección x	mm
$N_y$	Dominio en dirección y	mm
$N_z$	Dominio en dirección z	mm
$C$	Contante de nivel	-
$n$	Porosidad de estructura TPMS	-
$V_s$	Volumen de la estructura TPMS	mm <sup>3</sup>
$V_T$	Volumen total del cubo que ocupa la estructura TPMS	mm <sup>3</sup>
$L_{h,turb}$	Longitud de entrada hidrodinámica en régimen turbulento	mm
$Re$	Número de Reynolds	-
$\nu$	Viscosidad dinámica del fluido	kg/m s
$D_H$	Diámetro hidráulico	mm
$\dot{Q}_e$	Tasa de transferencia de calor de entrada	W
$\dot{Q}_s$	Tasa de transferencia de calor de salida	W
$\dot{W}_e$	Potencia de entrada	W
$\dot{W}_{electrico}$	Potencia eléctrica	W
$\dot{m}$	Flujo másico	kg/s
$\dot{m}_e$	Flujo másico de entrada	kg/s
$\dot{m}_s$	Flujo másico de salida	kg/s
$u$	Energía interna del fluido	kJ/kg
$u_e$	Energía interna del fluido en la entrada	kJ/kg
$u_s$	Energía interna en la salida	kJ/kg
$V$	Velocidad del fluido	m/s
$V_e$	Velocidad del fluido en la entrada	m/s
$V_s$	Velocidad del fluido en la salida	m/s
$gz$	Energía potencial	kJ/kg
$gz_e$	Energía potencial en la entrada	kJ/kg
$gz_s$	Energía potencial en la salida	kJ/kg
$V_e$	Voltaje de entrada	V
$I_e$	Corriente de entrada	A
$P_{convección}$	Pérdidas por convección	W
$\dot{Q}_{sup}$	Pérdidas por convección en la superficie superior	W
$\dot{Q}_{inf}$	Pérdidas por convección en la superficie inferior	W
$\dot{Q}_{fron}$	Pérdidas por convección en la superficie frontal	W
$\dot{Q}_{tras}$	Pérdidas por convección en la superficie trasera	W
$h$	Coefficiente de transferencia de calor por convección	W/m <sup>2</sup> K
$A_s$	Área de superficie de transferencia de calor	m <sup>2</sup>
$A_T$	Área transversal	m <sup>2</sup>
$T_s$	Temperatura de la superficie	°C
$T_\infty$	Temperatura ambiente	°C
$T_{sup}$	Temperatura en la superficie superior	°C
$T_{inf}$	Temperatura en la superficie inferior	°C

$T_{fron}$	Temperatura en la superficie frontal	$^{\circ}C$
$T_{tras}$	Temperatura en la superficie trasera	$^{\circ}C$
$P_{fricción}$	Perdidas por fricción	$W$
$\dot{W}$	Trabajo de flujo	$W$
$P$	Presión estática	$Pa$
$P_e$	Presión estática en la entrada	$Pa$
$P_s$	Presión estática en la salida	$Pa$
$\rho$	Densidad del fluido	$kg/m^3$
$\rho_e$	Densidad del fluido en la entrada	$kg/m^3$
$\rho_s$	Densidad del fluido en la salida	$kg/m^3$
$e_{salida\ útil}$	Energía de salida útil	$W$
$e_{entrada}$	Energía de entrada	$W$
$\mu_{sistema}$	Eficiencia del sistema	-
$\eta_{térmico}$	Rendimiento térmico	-

## Capítulo I: Introducción

### Antecedentes

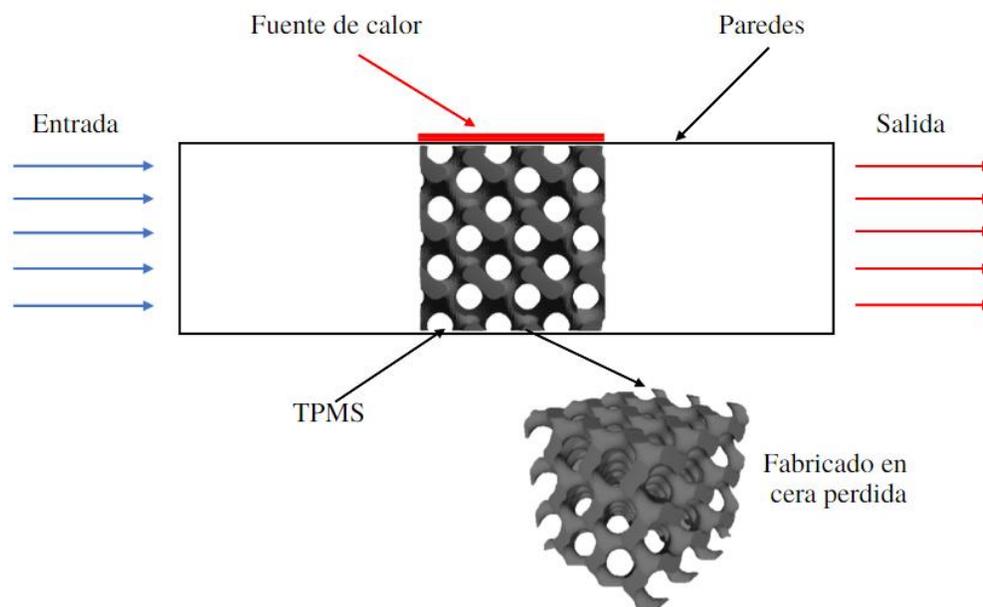
Los intercambiadores de calor cumplen un papel importante en aplicaciones térmicas industriales tales como: alimentaria, marítima, aeronáutica, automovilística, biotecnológica entre otras. Su función es transferir el calor de un fluido a otro de menor temperatura, dicha transferencia se produce a través de una estructura o geometría que favorezca el intercambio entre fluidos.

Los intercambiadores de calor pueden ser catalogados de acuerdo a la construcción, tipo de proceso de transferencia, grado de compactación de la superficie, área y fase de los fluidos involucrados. (Universidad Industrial de Santander, Colombia et al., 2018)

Los intercambiadores de calor de estructura de superficies mínimas triples periódicas TPMS (del inglés *Triply Periodic Minimal Surface*) resultan ser prometedores gracias a sus propiedades termo físicas, lo que los convierte en un candidato adecuado para las aplicaciones térmicas de la industria. Dichas estructuras complejas han provocado que las nuevas tecnologías de manufactura aditiva de metales sean aptas para la fabricación de intercambiadores de calor de estructura TPMS. Desafortunadamente Ecuador carece de desarrollo y práctica de manufactura aditiva de metales, en consecuencia, se ha planteado la propuesta de usar técnicas de impresión 3D tipo estereolitografía y fundición de cera perdida para la fabricación del intercambiador de calor TPMS metálico.

**Figura 1**

Esquema gráfico de un intercambiador de calor compacto con núcleo TPMS.



*Nota.* El gráfico representa un intercambiador de calor compacto con núcleo TPMS

El rendimiento térmico de un intercambiador de calor compacto con núcleo TPMS está vinculado a complejos patrones de flujo dentro de sus poros y su interacción con las paredes, los cuales han sido evaluados en diversos estudios con simulaciones tridimensionales de transferencia de calor conjugado CHT (del inglés *conjugate heat transfer*) (Attarzadeh et al., 2021) o análisis de elementos finitos FEM (del inglés *finite element method*) (Gawronska & Dyja, 2021). Sin embargo, hasta la fecha no se ha logrado evidenciar la aplicación de un sistema de evaluación de los intercambiadores de calor utilizando instrumentación mecatrónica.

El presente proyecto propone el desarrollo de una plataforma de evaluación orientada a la evaluación del rendimiento térmico de los intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS.

## **Justificación e importancia**

Un disipador de calor es un intercambiador de calor que extrae calor de una fuente con el objetivo de cederlo a otro, dicho proceso es muy importante tanto en sistemas de refrigeración como de calentamiento los cuales están inmersos en la industria. Existen dos tipos de disipadores de calor: pasivos (convección natural) y activos (convección forzada) (Martínez-Vega et al., 2018), donde la convección forzada tiene la necesidad del uso de ventiladores para generar un flujo que favorezca la transferencia de calor.

El rendimiento térmico de los intercambiadores de calor influye de manera significativa los procesos térmicos industriales, en términos de eficiencia energética, calidad, sustentabilidad y mantenimiento.

La energía representa la mayor participación en los costos de operación de una industria. El uso de esta energía está directamente relacionado con la eficiencia térmica de equipos de transferencia de calor, así como en el diseño de procesos, la operación y el control de los mismos. Como resultado de esta problemática, la investigación del rendimiento térmico y los métodos de monitoreo han aumentado favorablemente y han conducido a una mejor comprensión de los mecanismos que favorecen el proceso de ensuciamiento, así como la aparición de herramientas que permitan darle seguimiento al problema, que no solo afecta al rendimiento de los intercambiadores de calor, sino a la reducción de la transferencia de calor que debe ser compensada con la adición de energía en la fuente de calor y por lo tanto un consumo energético mayor. (Velazquez, 2013)

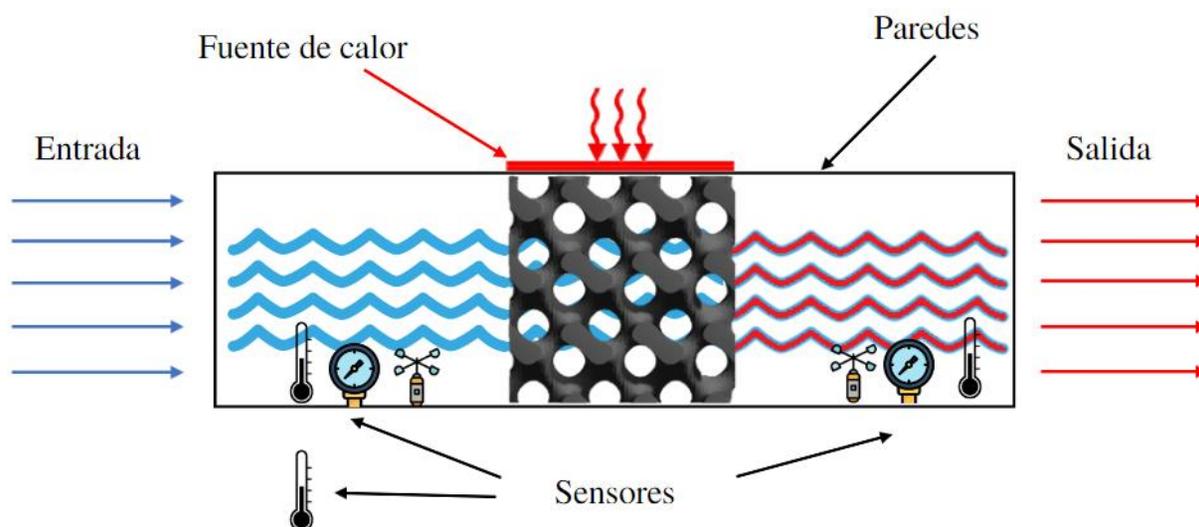
Dichas razones impulsan al presente proyecto propuesto ya que las simulaciones computacionales realizadas con el método de análisis de elementos finitos, expuestas en los antecedentes no han sido respaldadas de manera experimental denotando una gran falta de investigación de alto impacto presente en el uso de intercambiadores de calor presentes en la industria.

## Alcance

El presente proyecto se centra en el análisis del rendimiento térmico de intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS para lo cual se diseñará y construirá un prototipo de plataforma de evaluación de rendimiento térmico esquematizado en la figura 2. En la entrada del canal ingresará el fluido (aire) para pasar a través del intercambiador de calor TPMS el cual tendrá una fuente de calor constante en una sección del canal, donde se espera que el fluido eleve su temperatura al final del canal, las variables físicas a medir se realizarán dentro del régimen estacionario para facilitar la evaluación del rendimiento térmico. La plataforma de evaluación tendrá como objetivo abarcar el intercambiador, fuente de calor y sensores encapsulados de manera que optimice el espacio físico requerido, la misma que tendrá su fase de diseño adecuado para una correcta ejecución del experimento.

## Figura 2

*Esquema gráfico del alcance de la plataforma de evaluación*

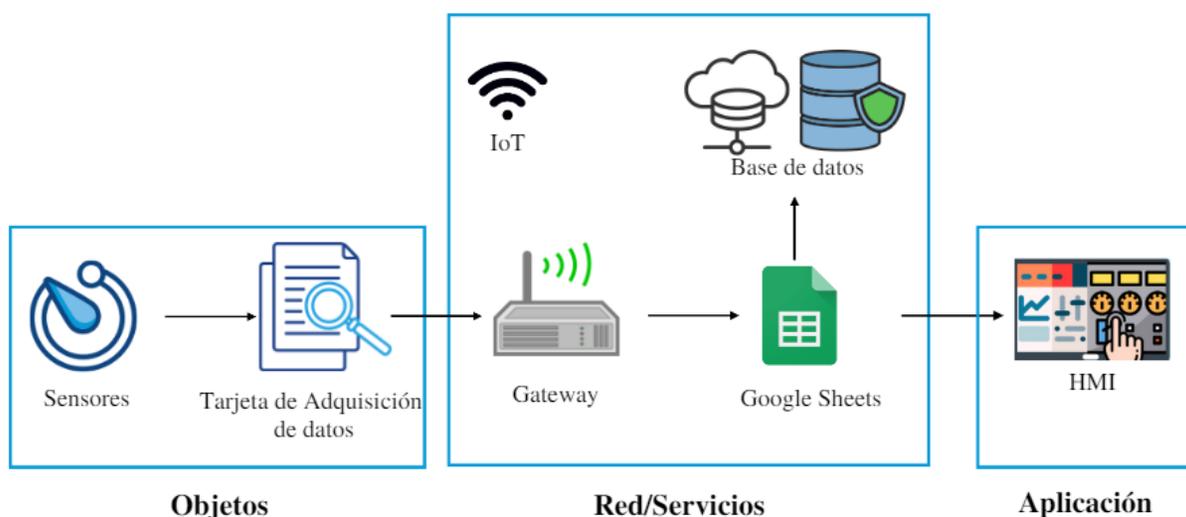


*Nota.* El esquema muestra de manera gráfica y resumida el alcance de la plataforma de evaluación de rendimiento térmico para intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS para cumplir sus objetivos.

La plataforma de evaluación y monitoreo in-situ propuesto se ve reflejado en la figura 3. Las variables físicas medidas en el experimento serán transmitidas hacia una tarjeta de adquisición de datos que se conecta a internet y envía los datos mediante protocolos de comunicación HTTP (del inglés Hyper Text Transfer Protocol) hacia una hoja de datos en Google Sheets lo cual facilita la observación en tiempo real simultáneamente con el almacenamiento de las variables medidas a lo largo del tiempo.

### Figura 3

*Esquema gráfico de la arquitectura IoT de la plataforma de evaluación*



*Nota.* El esquema gráfico muestra la arquitectura IoT de la plataforma de evaluación de rendimiento térmico para intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS.

El presente proyecto tiene como alcance los siguientes entregables:

- Investigación bibliográfica sobre el rendimiento de intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS.
- Intercambiadores de calor TPMS diseñados y fabricados con aluminio por el método de cera perdida.

- Memoria técnica de diseño de intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS.
- Prototipo de plataforma de evaluación de rendimiento térmico para intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS.
- Memoria técnica de diseño e instrumentación de prototipo
- Planos mecánicos y eléctricos.
- Memoria de cálculo para rendimiento térmico
- Análisis de resultados
- Conclusiones

## **Objetivos**

### ***Objetivo general***

Evaluar el rendimiento térmico de los intercambiadores de calor compactos con núcleos TPMS.

### ***Objetivos específicos***

- Investigar las variables empleadas para la validación y cálculo de desempeño de intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS.
- Desarrollar un protocolo experimental para medir variables para intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS.
- Diseñar, construir y desarrollar una plataforma IoT para instrumentar y monitorear el desempeño de los intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS.
- Evaluar factores de rendimiento térmico significativos usando diseño experimental.

## Capítulo II: Estado del arte

### Intercambiadores de calor

Como su nombre lo expresa, los intercambiadores de calor son dispositivos los cuales abarcan dos fluidos que se encuentran en un sentido de flujo determinados y en los cuales se intercambia calor sin la necesidad de tener un contacto directo. (Çengel & Boles, 2015)

Los disipadores de calor son un caso especial de los intercambiadores de calor donde la transferencia de calor se da entre partículas sólida y un fluido los cuales se encuentran en contacto y a distinta temperatura, estos dispositivos cumplen el objetivo principal de transferir el calor generado por una fuente hacia el fluido para disiparlo. Su uso más común se encuentra en los componentes electrónicos los cuales necesitan de un disipador para evitar futuros fallos en su funcionamiento gracias al exceso de calor.

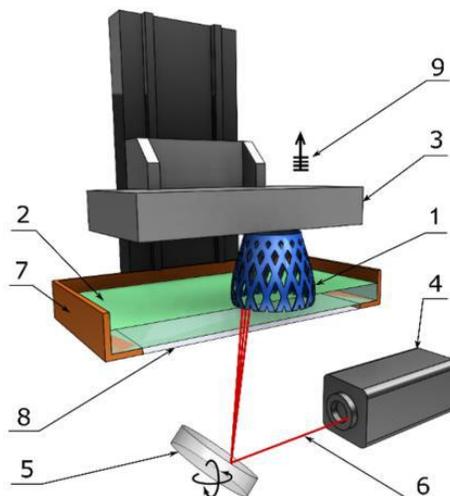
La funcionalidad y rendimiento de los componentes electrónicos son aumentados rápidamente con la tecnología en desarrollo; sin embargo, el calor no deseado de los componentes también aumenta. Cuando los componentes electrónicos son expuestos a altas temperaturas, a menudo presentan fallos en su funcionamiento y su desempeño se reduce. Dichos disipadores son los candidatos preferidos para ser usados de forma activa o pasiva, para este punto es muy importante mantener los costos de material y la fabricación al mínimo para realizar un diseño ideal que se ajuste a las necesidades de la aplicación. (Şevik & Özdilli, 2021)

### Estereolitografía en geometrías complejas

La estereolitografía (SLA, por sus siglas en inglés *Stereo Lithography Apparatus*), es una de las tecnologías contenidas en la manufactura aditiva (MA), como se aprecia en la figura 4, consiste en la creación de un objeto sólido mediante la impresión continua de capas delgadas de resina que se endurecen por polimerización cuando se expone a una luz ultravioleta (UV), este proceso se denomina curado.

## Figura 4

Esquema de funcionamiento de impresora 3D basada en estereolitografía

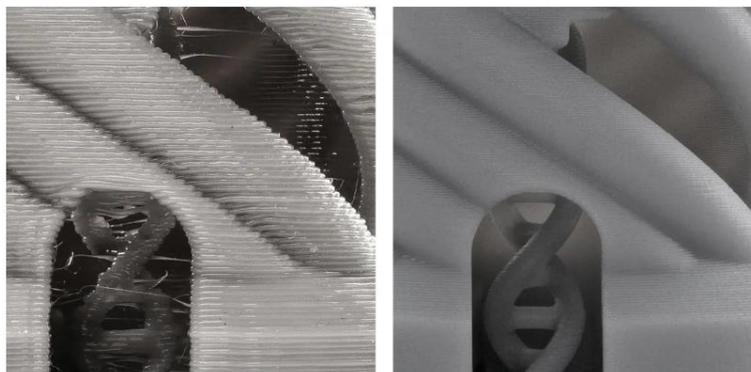


*Nota.* En el esquema se observa las partes fundamentales de una típica impresora 3D basada en estereolitografía: (1) Sección de pieza impresa, (2) Resina, (3) Base de plataforma de impresión, (4) Fuente de láser UV, (5) Espejo de escáner XY, (6) Rayo láser UV, (7) Reservorio de resina, (8) Cristal, (9) Elevación continua de capa. Tomada de *A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing* (p. 4), por (Pagac et al., 2021), MDPI: polymers

La estereolitografía a diferencia de la impresión 3D convencional o FMD (por sus siglas en inglés *Fused Deposition Modeling*) que imprime con filamento se diferencia principalmente en costos y calidad, para el objeto de estudio la estereolitografía representa un rol importante gracias a la resolución en el orden de las micras que resulta en un acabado superficial excelente en sus productos finales como se observa en la figura 5, si lo que se busca es fabricar objetos detallados como piezas de joyería, dentales, miniatura donde la alta precisión es fundamental, sin duda es la mejor opción.

## Figura 5

Comparativa de piezas impresas de filamento FDM vs resina SLA



Nota. A la izquierda se muestra una pieza impresa en 3D con filamento FDM, a la derecha se muestra una pieza impresa en 3D con resina SLA, se aprecia la diferencia significativa en el acabado superficial. Tomado de (*Impresión 3D*, s. f.)

<https://www.liqcreate.com/es/supportarticles/3d-printing-resin-vs-filament/>

### Superficie mínima triple periódica (TPMS)

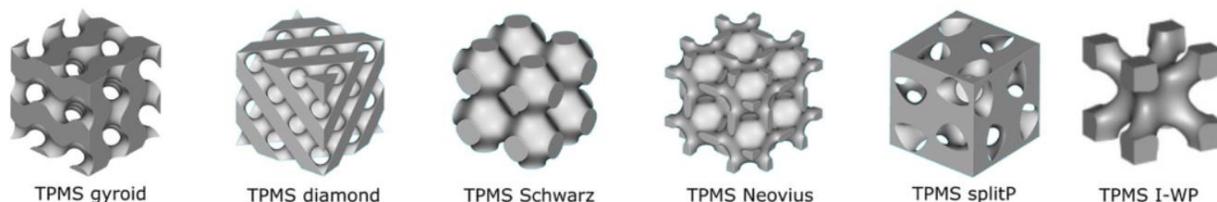
Las estructuras de superficie mínima triple periódica tienen muchas propiedades topológicas que han demostrado ser interesantes para su fabricación debido a sus geometrías de superficie de curva continua. (Afshar et al., 2016)

La primera referencia a un TPMS se hizo en el siglo XIX por Schwartz, quien presentó las superficies denominadas Primitiva y Diamante. Dichas estructuras TPMS son superficies creadas matemáticamente de manera que no tienen superficies auto intersecadas. “Triple periódica” significa que la estructura se puede empaquetar en un patrón 3D periódico y “Superficie mínima” significa que minimiza localmente el área de superficie para un límite dado, de tal manera que la curvatura media de la superficie en cada punto es cero. (Benedetti et al., 2021)

En la figura 6 se muestra las estructuras TPMS más investigadas, estas pertenecen a la categoría 'TPMS esquelético' el cual se diseña creando primero sintetizando la denominada "superficie TPMS" a partir de su fórmula matemática característica para luego tomar ese volumen separado y convertirlo en un sólido.

### Figura 6

*Modelos gráficos de las estructuras TPMS esqueléticas más estudiadas*



Nota. Se observan los modelos gráficos de las estructuras TPMS esqueléticas más estudiadas. Tomada de *Architected cellular materials: A review on their mechanical properties towards fatigue-tolerant design and fabrication* (p. 7), por Benedetti et al., 2021, ELSEVIER: Materials Science & Engineering R.

Las estructuras TPMS mencionadas se han colocado en objeto de muchos estudios gracias a sus propiedades muy distintivas al resto de estructuras porosas, los TPMS han demostrado tener amortiguamiento de vibraciones, capacidad de absorber energía de compresión de una manera eficaz además de sus excelentes propiedades térmicas y físicas. (Attarzadeh et al., 2021)

La geometría compleja de las estructuras TPMS tiene propiedades que, en teoría, favorecen la dinámica de un fluido circundante a través de él, sin penalizar la presión manejada por el mismo, en consecuencia, utilizado como un intercambiador de calor, da como resultado un aumento favorable de la turbulencia que causa una mejor transferencia de calor y masa. (Andrade Villacis, 2022)

Las estructuras TPMS pueden describirse matemáticamente con una ecuación general, la cual se deriva de métodos de conjuntos de nivel (Benedetti et al., 2021; Walker et al., 2017) y que a su vez se pueden aproximar en términos utilizando la serie de Fourier. De esta manera resultando en la ecuación 1 como la ecuación general de una estructura TPMS.

### **Ecuación 1**

*Ecuación general de una estructura TPMS*

$$\Psi(r) = f(N_x x, N_y y, N_z z) - C = 0$$

*Nota.* La ecuación general de una estructura TPMS es una función de ajuste de nivel adaptada. Adaptada de *Design and mechanical characterization of solid and highly porous 3D printed Poly(Propylene Fumarate) Scaffolds* (p. 100), por (Walker et al., 2017), Progress in Additive Manufacturing.

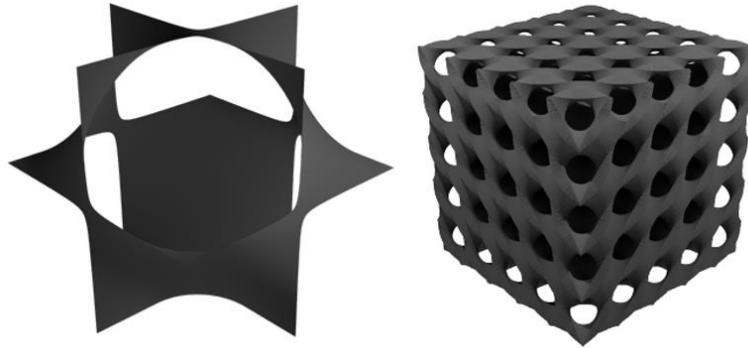
A partir de la ecuación 1, es posible definir las estructuras TPMS esqueléticas más estudiadas y representadas en los tres primeros gráficos de la figura 6 (Benedetti et al., 2021)

### **Estructura Schwartz Diamante**

Como se muestra en la figura 7, se compone de dos laberintos entrelazados formando una especie de tubo inflado de la estructura de enlace del diamante, esta estructura se caracteriza por dar paso a la formación de un conjunto de superficies mínimas a raíz de modificar su celda unitaria. (Schoen, 1970).

## Figura 7

*Esquema gráfico de superficie y sólido Schwartz Diamante*



*Nota.* En el gráfico izquierdo se observa un esquema de la geometría característica de la superficie Schwartz Diamante por una celda de unidad, en el gráfico derecho se observa un esquema gráfico de la geometría característica del sólido Schwartz Diamante compuesto de varias celdas de unidad y modeladas matemáticamente a partir de sus ecuaciones correspondientes. Tomado de *Mechanical properties of ceramic structures based on Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) processed by 3D printing.* (p. 3), por Restrepo et al., 2017, *Journal of Physics: Conference Serie*, 935.

La estructura Schwartz Diamante se describe en la ecuación 2.

### Ecuación 2

*Ecuación general de la estructura TPMS Schwartz Diamante*

$$\sin(N_z z) \cos(N_x x - N_y y) + \cos(N_z z) \sin(N_x x + N_y y) - C = 0$$

*Nota.* Adaptada de *A Numerical Study of Geometry's Impact on the Thermal and Mechanical Properties of Periodic Surface Structures* (p.4), por Gawronska & Dyja, 2021, MDPI: Materials

### ***Estructura Schwartz Primitiva***

Como se aprecia en la figura 8, se compone de dos laberintos entrelazados formando una especie de tubo inflado de la estructura cúbica simple, esta estructura se caracteriza por tener una alta relación de superficie, volumen y porosidad. (Shin et al., 2012)

### **Figura 8**

*Esquema gráfico de superficie y sólido Schwartz Primitiva*



*Nota.* En el gráfico izquierdo se observa un esquema de la geometría característica de la superficie Schwartz Primitiva por una celda de unidad, en el gráfico derecho se observa un esquema gráfico de la geometría característica del sólido Schwartz Primitivo compuesto de varias celdas de unidad y modeladas matemáticamente a partir de sus ecuaciones correspondientes. Tomado de *Mechanical properties of ceramic structures based on Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) processed by 3D printing.* (p. 3), por Restrepo et al., 2017, Journal of Physics: Conference Serie, 935.

La estructura Schwartz Primitiva se describe en la ecuación 3.

### Ecuación 3

*Ecuación general de la estructura TPMS Schwartz Primitiva*

$$\sin(N_x x) + \cos(N_y y) + \cos(N_z z) - C = 0$$

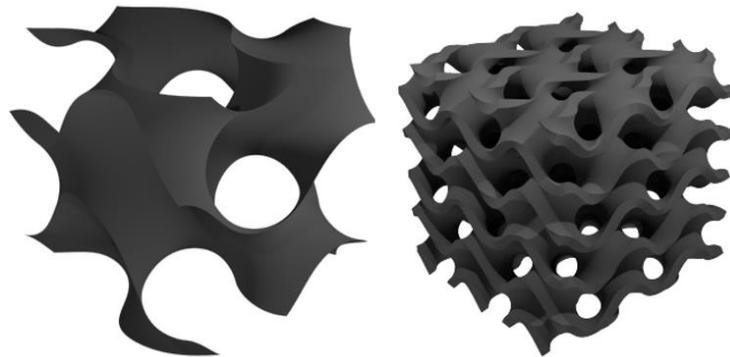
*Nota.* Adaptada de *A Numerical Study of Geometry's Impact on the Thermal and Mechanical Properties of Periodic Surface Structures* (p.4), por Gawronska & Dyja, 2021, MDPI: Materials

### **Estructura Schoen Giroide**

Como se aprecia en la figura 9, se compone del espacio que separa en dos laberintos de canales opuestamente congruentes, dichos canales emergen en ángulos de  $70.5^\circ$  con respecto a cualquier canal, la dirección en la que atraviesa dichos canales mientras gira es lo que le da su nombre. La estructura giroide está relacionada con el cristal K4. (Sunada, 2013)

### **Figura 9**

*Esquema gráfico de superficie y sólido Schoen Giroide*



*Nota.* En el gráfico izquierdo se observa un esquema de la geometría característica de la superficie Schoen Giroide por una celda de unidad, en el gráfico derecho se observa un esquema gráfico de la geometría característica del sólido Schoen Giroide compuesto de varias celdas de unidad y modeladas matemáticamente a partir de sus ecuaciones correspondientes.

Tomado de *Mechanical properties of ceramic structures based on Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) processed by 3D printing*. (p. 3), por Restrepo et al., 2017, Journal of Physics: Conference Serie, 935.

La estructura Schoen Giroide se describe en la ecuación 4.

#### **Ecuación 4**

*Ecuación general de la estructura TPMS Schoen Giroide*

$$\sin(N_x x) \cos(N_y y) + \sin(N_y y) \cos(N_z z) + \sin(N_z z) \cos(N_x x) - C = 0$$

*Nota.* Adaptada de *A Numerical Study of Geometry's Impact on the Thermal and Mechanical Properties of Periodic Surface Structures* (p.4), por (Gawronska & Dyja, 2021), MDPI: Materials

#### **Fabricación de intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS**

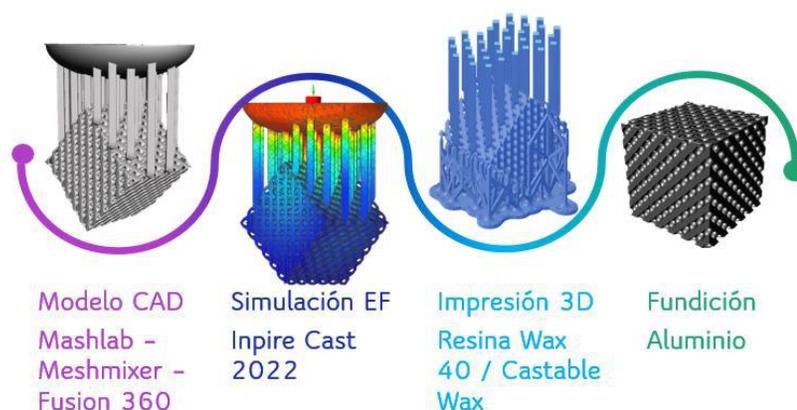
El diseño de intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS parte de los estudios realizados por Iván Trujillo (Trujillo Freire, 2023) los cuales se enfocan en la incidencia de parámetros matemáticos presentes en las ecuaciones que definen dichas estructuras en su comportamiento térmico y mecánico haciendo uso de diseño experimental (DOE), de análisis de elementos finitos (FEM) y utilizando software libre.

En los estudios realizados por Fabricio Veintimilla (Veintimilla Bautista, 2023), se llevó a cabo la fabricación de intercambiadores de calor compactos de núcleo TPMS de tipo diamante utilizando el método de fundición a la cera perdida. Dichas fundiciones fueron realizadas en aluminio gracias a sus propiedades térmicas que se ajustan de manera eficiente a las necesidades de un intercambiador de calor. Gracias al uso del diseño experimental se pudo determinar las condiciones óptimas para poder reproducir la fabricación de más estructuras TPMS siguiendo el flujo mostrado en la figura 10 y respaldándose de los estudios realizados por Cristian Puebla (Velazquez, 2013) (Puebla Montero, 2023) donde se llevó a cabo el monitoreo in-situ del proceso de fundición de intercambiadores de calor compactos con núcleo

TPMS concluyendo en un análisis de gráficas de control del rendimiento del proceso basado en la norma ASTM-E2587 que proyectan las condiciones óptimas para las fundiciones, a su vez, dando un paso a la innovación con el monitoreo para la industria 4.0.

### Figura 10

*Fases principales del proceso de fabricación de estructuras TPMS*



*Nota.* La figura muestra las fases principales para el proceso de fabricación de estructuras TPMS utilizando el método de fundición a la cera perdida. Tomado de *Monitoreo de la fabricación de los intercambiadores compactos usando el método de fundición por cera perdida* (p. 76), por Veintimilla Bautista, 2023, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

El trabajo ejecutado por las fuentes citadas es de gran importancia no solo por pertenecer al mismo marco conceptual sino también por constituir las primeras bases para la evaluación térmica experimental a realizar, su metodología será utilizada de manera práctica para el cumplimiento de los objetivos del presente trabajo.

### Industria 4.0 e Internet de las cosas (IoT)

Con la rápida y constante evolución de la tecnología, el modo de producción de las empresas manufactureras está en plena transformación de digital a inteligente. La industria 4.0 es un conjunto de sistemas ciber físicos ligados a los procesos de fabricación que se apoya

con el internet de las cosas, el termino Industria 4.0 hace referencia a la cuarta revolución industrial, se hace una analogía como un último nivel de control y organización sobre la cadena de valor del ciclo de vida de un producto. La disponibilidad de información en tiempo real mediante la conexión de todas las actividades de la cadena valor componen una clara base de la cuarta revolución industrial. (Shi et al., 2020)

Es necesario tomar en cuenta que la industria 4.0 es un gran enfoque de innovación para generar una nueva calidad de producción, sin embargo, requiere una observación cuidadosa del proceso en la etapa de preparación, las investigaciones indican limitaciones y desafíos que pueden enfrentar las empresas en relación con la implementación y las etapas posteriores a esta desde un punto de vista práctico. (Pollak et al., 2020)

Teniendo en cuenta la investigación realizada sobre la Industria 4.0 podemos enlistar las siguientes ventajas las cuales son ampliamente difundidas y aceptadas en la comunidad tecnológica e industrial:

- **EFICIENCIA:** La automatización y la digitalización de las maquinas permiten sacar mayor provecho en la utilización de sus recursos.
- **PRODUCTIVIDAD:** La integración de sistemas inteligentes y el análisis de datos en tiempo real permiten una mejor planificación y toma de decisiones con mayor fundamento.
- **FLEXIBILIDAD:** Facilita la adaptación rápida de las máquinas y procesos a las diferentes demandas que pudieran existir en trabajos futuros.
- **REDUCCIÓN DE COSTOS:** La digitalización de los procesos de producción puede ayudar a reducir los costos energéticos, producción y mantenimiento logrando incrementar la rentabilidad de la empresa.

- **CALIDAD:** La industria 4.0 permite un mayor control de procesos y la detección temprana de posibles problemas, lo que conduce a una mejora en la calidad de los productos.
- **INNOVACIÓN:** La adopción de tecnologías avanzadas dentro de la industria 4.0 impulsa la innovación de productos y procesos lo que aumenta la competitividad de las empresas en el mercado global.

Por ello, los beneficios que nos ofrece la industria 4.0 apoyada del internet de las cosas (IoT) nos ayuda a proyectarnos a los trabajos futuros en la aplicación de este proyecto, lo que le permitirá mantenerse activo en la competencia y preparado para los desafíos del futuro.

### Capítulo III: Métodos y materiales

#### Prototipo de plataforma de evaluación

##### *Generalidades*

Para la ejecución de la evaluación del rendimiento térmico de intercambiadores de calor compactos de núcleo TPMS es preciso tomar en cuenta diversos factores y variables físicas a medir para poder diseñar la plataforma de evaluación de la mejor manera.

Las variables físicas a medir nacen de la investigación bibliográfica revisada, en estudios de transferencia de calor conjugado vistos en *Design analysis of the “Schwartz D” based heat exchanger: A numerical study* por Attarzadeh et al., 2021 y análisis de elementos finitos vistos en *A Numerical Study of Geometry’s Impact on the Thermal and Mechanical Properties of Periodic Surface Structures* por (Gawronska & Dyja, 2021), se plantea tomar en cuenta la temperatura de la fuente de calor, el número de Reynolds del fluido en la entrada del sistema, la caída de presión, permeabilidad, coeficiente de transferencia de calor, tasa de transferencia de calor, número de Nusselt y finalmente el desempeño térmico. Sin embargo, de manera experimental es necesario simplificar la metodología ya que en el campo práctico difícilmente podremos calcular de manera analítica aquellas variables físicas que los ordenadores de estación resuelven de manera matricial e iterada hasta llegar a una convergencia y un error mínimo, para ello se ha tomado como referencia bibliográfica al libro *Termodinámica* por (Çengel & Boles, 2015) y a los estudios experimentales (Vilarrubí et al., 2018) quien nos da una noción más acertada del objeto de estudio, como resultado de la discusión con expertos en el tema las variables físicas a medir se proyectan en la tabla comparativa con los estudios previos presentes en la bibliografía.

**Tabla 1**

*Tabla comparativa de variables estudiadas en el fenómeno de estudio*

<b>Variable</b>	<b>Simulación computacional</b>	<b>Medición experimental</b>	<b>Cálculo analítico</b>
Temperatura	✓✓	✓✓	-
Presión	✓	✓✓	-
Velocidad del fluido	✓	✓✓	-
Temperaturas externas de convección	-	✓	-
Potencia eléctrica de fuente de calor	✓✓	✓✓	-
Rendimiento térmico	✓	-	✓

Nota. La tabla resume las variables físicas tomadas en cuenta en diversos estudios de intercambiadores de calor: Color rojo por (Attarzadeh et al., 2021), color azul por (Gawronska & Dyja, 2021), color verde por (Vilarrubí et al., 2018) y color negro por el presente proyecto.

Como resultado de discusiones posteriores entre expertos surgieron los siguientes requerimientos para la plataforma de evaluación:

- **EFICIENCIA:** Diseño práctico y enfocado a la evaluación del rendimiento térmico mediante la recopilación de variables físicas a través de su instrumentación mecatrónica.
- **FLEXIBILIDAD:** Debe ser desmontable para facilitar la reproducción de distintos experimentos con los distintos tipos de estructura TPMS.

- **MONITOREO IN-SITU:** Debe abarcar toda la instrumentación mecatrónica necesaria para monitorear las variables físicas en tiempo real, almacenarlas en una hoja de datos en la nube para su posterior análisis.
- **SUSTENTABILIDAD:** Optimización de construcción, costos sin penalización de calidad de los experimentos.
- **REPRODUCIBILIDAD:** Diseño compatible con variaciones técnicas futuras como distintas estructuras de intercambiadores de calor, regímenes de flujo y diferentes condiciones iniciales de fluido.

Teniendo presente estas consideraciones se procede a realizar el respectivo diseño sin desviarse de los objetivos planteados y enfocados al estudio actual. Todas las actividades fueron realizadas en el laboratorio de ingeniería inversa y prototipado de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

### ***Materiales utilizados***

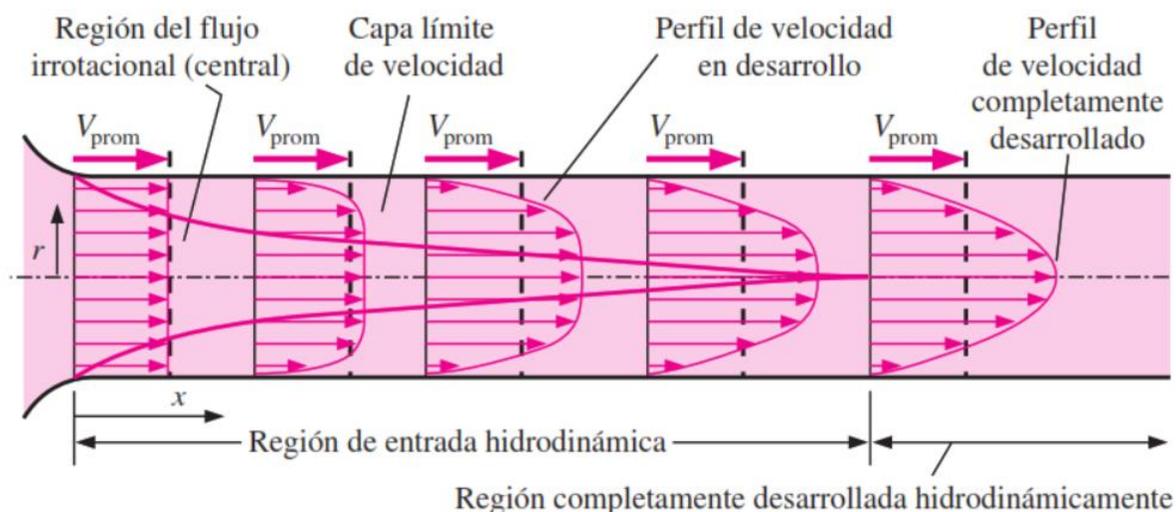
**Canales de flujo.** Los canales de flujo deben ser de un material lo menos rugoso posible, la forma es cuadrada y está dada por la geometría de los intercambiadores de calor compactos con núcleos TPMS fabricados en (Veintimilla Bautista, 2023), los cuales son cuadrados y tienen el volumen de un cubo de lado 30 mm.

La longitud de los canales viene dada por el régimen de flujo el cual puede ser laminar o turbulento, gracias a la geometría compleja de las estructuras TPMS no se puede trabajar en régimen laminar ya que la geometría del mismo cambiará las líneas de acción del fluido haciéndolo turbulento, por lo tanto, para evitar dicho cambio de régimen, se trabajará en régimen turbulento desde un inicio.

Considerando un flujo que entra por la tubería cuadrangular a una velocidad uniforme, debido a las condiciones de no deslizamiento, las partículas del fluido estudiado que están en contacto con las paredes del canal llegan a detenerse por completo. Para compensar esta caída de velocidad, la velocidad del fluido tiende a aumentar en el centro de la tubería con el objetivo de mantenerse constante lo cual da una oportunidad a una medición de velocidad de flujo correcta. La figura 11 muestra un esquema del desarrollo del perfil de velocidades en una tubería.

**Figura 11**

*Esquema de desarrollo de la capa límite de velocidad en una tubería.*



*Nota.* Se observa un esquema del desarrollo de la capa límite de velocidad en una tubería, donde la región desde la entrada de la tubería hasta el punto donde la capa límite se une en la línea central se llama Región de entrada hidrodinámica, por otro lado, la región que contiene el perfil de velocidades ya desarrollado se denomina Región completamente desarrollada hidrodinámica. Tomada de *Fundamentos de transferencia de calor* (p. 469), por (Incropera & DeWitt, 1999), School of Mechanical Engineering Purdue University

Tomando en cuenta dicho parámetro de diseño recurrimos a la ecuación para régimen turbulento la cual nos dice la longitud necesaria que necesita el canal para llegar a la región completamente desarrollada hidrodinámicamente, donde usaremos el diámetro hidráulico establecido en la fabricación de las estructuras TPMS.

### **Ecuación 5**

*Longitud de entrada hidrodinámica*

$$L_{h,turb} \approx 10 D_H$$

*Nota.* Tomada de *Fundamentos de transferencia de calor* (p. 471), por (Incropera & DeWitt, 1999), School of Mechanical Engineering Purdue University

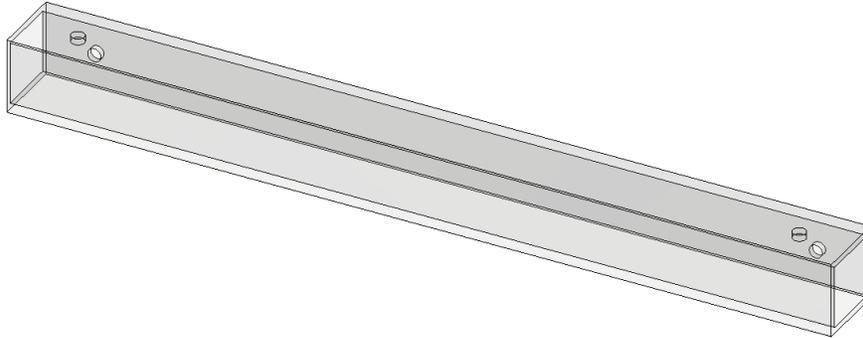
Utilizando la ecuación 5 tenemos:

$$L_{h,turb} = 10 (30mm) = 300mm$$

La canaleta necesita 300 mm para llegar al desarrollo del perfil de velocidades, para ellos se tomará una canaleta de 400 mm para obtener también la región el flujo se encuentra completamente desarrollado hidrodinámicamente.

**Figura 12**

*Modelo 3D de canales de entrada y salida del fluido*



*Nota.* La figura muestra el modelo 3D de las canales de entrada y salida del fluido junto con unos agujeros auxiliares que servirán en el futuro para mediciones de temperatura y presión estática. Los detalles constructivos se encuentran en el apéndice A.

El material seleccionado para la construcción de los canales del fluido fue acrílico el cual apoyado del corte láser es una opción práctica y de bajo costo para la aplicación.

La figura 13 muestra la construcción y ensamble del canal el cual se compone de sus cuatro aristas unidas con pegamento acrílico y silicona de uso general entre sus uniones.

**Figura 13**

*Canal de acrílico para fluido*



*Nota.* La figura muestra la construcción y ensamble del canal el cual se compone de sus cuatro aristas unidas con pegamento acrílico y silicona de uso general entre sus uniones.

Finalmente es de vital importancia que las paredes sean adiabáticas para evitar pérdidas por convección en las paredes de los canales y que todo el calor fluya desde la fuente hacia el intercambiador compacto de núcleo TPMS para disiparse en el fluido, para ello, se los ha forrado con lana de vidrio con el objetivo de aislarlos térmicamente del ambiente como se muestra en la figura 14.

### **Figura 14**

*Canal de acrílico aislado adiabáticamente*



*Nota.* La figura muestra el canal de acrílico cuyas paredes fueron forradas con lana de vidrio ayudándose de bridas plásticas y con teflón en su extremo para un acople hermético con la pieza central de la plataforma.

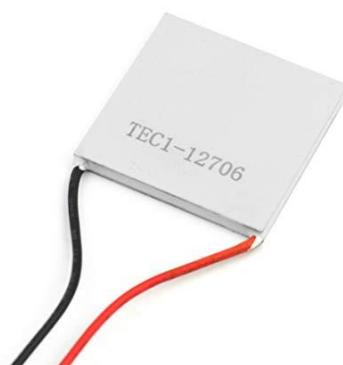
**Fuente de calor.** Para la fuente de calor se pueden utilizar placas metálicas que contengan resistencias térmicas internas, estas se utilizan en las camas calientes de impresión 3D convencionales, sin embargo, estas requieren de una caracterización en su rango de operación donde la entrada es la potencia eléctrica suministrada a la resistencia térmica y la salida es la temperatura máxima que es capaz de alcanzar. Para evitar esta caracterización que puede presentar inconvenientes principalmente en su confección o comportamiento

inestable que requiere un lazo de control lo cual dificulta la evaluación del rendimiento térmico de las estructuras TPMS debido a que dicho lazo de control hace que la potencia eléctrica suministrada a la resistencia térmica sea diferente para todas las estructuras, se ha optado por una opción comercial como una celda de Peltier la cual cuenta con su rango de operación ya establecido en su hoja de datos técnica y ha mostrado buenos resultados en los estudios realizados por Brandon Andrade (Andrade Villacis, 2022)

La celda de Peltier es un conjunto de semiconductores que genera una diferencia de temperatura entre sus dos caras para actuar como refrigerador o su vez en esta aplicación como un calentador, su principio de funcionamiento se basa en el efecto termoeléctrico Peltier el cual básicamente con el suministro de un diferencial de voltaje eléctrico, genera una diferencia de temperaturas entre sus dos caras. En la figura 15 se puede apreciar la geometría cuadrada de la celda de Peltier la cual se ajusta de manera práctica a la geometría cuadrada de las estructuras TPMS, además de sus principales especificaciones técnicas en la tabla 2.

### **Figura 15**

*Celda de Peltier TEC1-706*



Nota. La figura muestra una fotografía de la celda de Peltier comercial modelo TEC1-706.

Tomado de: *TEC1-12706 Datasheet*, 2016

<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/227422/ETC2/TEC1-12706.html>

**Tabla 2***Especificaciones técnicas de Celda de Peltier*

<b>Celda de Peltier</b>	
Marca	HB Electronic Components
Modelo	TEC1-12706
Dimensiones	40x40x3.6 mm
Voltaje de operación	3 – 16 V
Corriente de operación	1.5 – 7 A
Resistencia	1.98 – 2.30 $\Omega$
Potencia eléctrica máxima	112 W (16V @ 7A)
Máxima temperatura en cara caliente	75°C

Nota. La tabla muestra las principales especificaciones técnicas de la celda de Peltier.

Adaptado de: *TEC1-12706 Datasheet*, 2016

<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/227422/ETC2/TEC1-12706.html>

La celda de Peltier no tendrá un lazo de control cerrado sino uno abierto, logrando así que la potencia eléctrica suministrada sea constante en todos los experimentos, puesto que es necesario cuidar que la celda no llegue a su temperatura máxima, se requiere un controlador que sea capaz de suministrar una potencia eléctrica controlable por el experimentador, para ello existe en el mercado un controlador electrónico muy utilizado en camas calientes de impresión cuya imagen se representa en la figura 16 y sus especificaciones técnicas principales se muestran en la tabla 3.

## Figura 16

*Idea Former Bed Mosfet V1*



*Nota.* En la figura muestra una fotografía del controlador electrónico Idea Former Bed Mosfet V1 acompañado de un cable de señal de control. Tomado de Super 3D Technology CO.

<https://es.aliexpress.com/i/32954376712.html?gatewayAdapt=glo2esp>

## Tabla 3

*Especificaciones técnicas de controlador electrónico*

<b>Controlador electrónico</b>	
Marca	Idea Former
Modelo	Bed Mosfet V1
Voltaje de operación	12- 24 V
Corriente máxima	30 A
Señal de control PWM	3.3 - 24 V

*Nota.* La tabla muestra las principales especificaciones técnicas del controlador electrónico Idea Former Bed Mosfet V1. Tomado de Super 3D Technology CO.

<https://es.aliexpress.com/i/32954376712.html?gatewayAdapt=glo2esp>

El funcionamiento del controlador electrónico es simple, mediante una señal PWM suministrada en sus pines de señal, tomara el ciclo de trabajo de dicha señal para fraccionar el

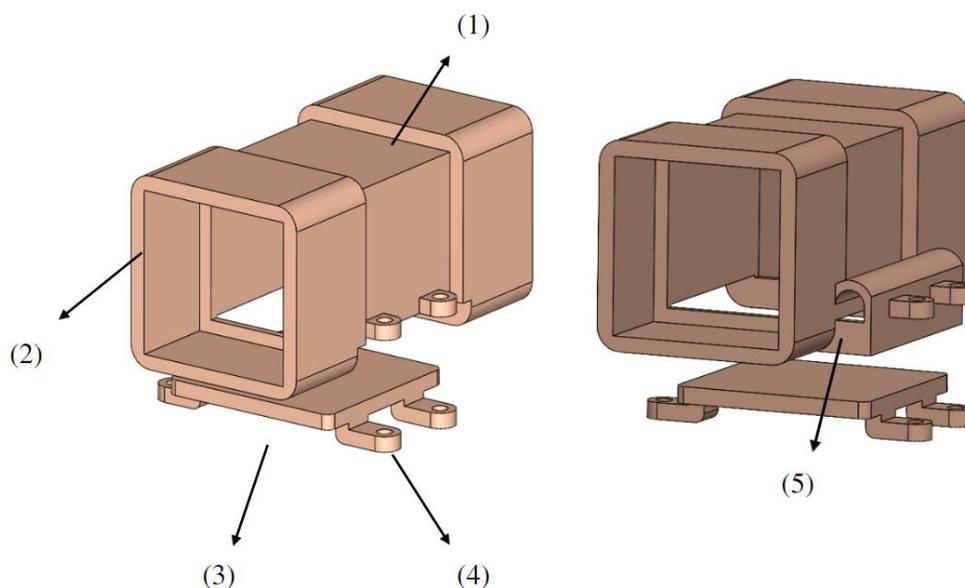
voltaje eléctrico suministrado en los pines de entrada y entregarlo en sus pines de salida, es muy útil ya que en las fuentes de alimentación comerciales generalmente no se tiene esta regulación de voltaje.

**Pieza central de la plataforma de evaluación.** Esta debe contener la celda de Peltier acompañado de un sensor de seguridad que mida la temperatura de la cara caliente, así como unas aberturas que se anclen herméticamente a los canales de acrílico. Tomando en cuenta que las dimensiones de los lados del cubo que ocupan las estructuras TPMS es de 30 mm, igual que el diámetro hidráulico de los canales de entrada y salida, tenemos el espacio suficiente para colocar el sensor de seguridad en la celda Peltier de dimensiones 40x40mm.

Tomando en cuenta las consideraciones necesarias, la figura 17 muestra el modelo 3D de la pieza central de la plataforma.

**Figura 17**

*Modelo 3D de pieza central de plataforma de evaluación*



*Nota.* En el esquema se observa las partes fundamentales de pieza central de la plataforma: (1) Contenedor de estructura TPMS, (2) Acople con canales, (3) Tapa para celda Peltier, (4) Orejas para tornillos y sellado a presión, (5) Espacio para sensor de temperatura. Los planos mecánicos se encuentran en el apéndice A.

Puesto que la geometría es muy compleja se ha optado por fabricarla utilizando estereolitografía con la impresora 3D de resina Form Labs 3 del laboratorio. La resina utilizada fue la denominada High Temp (*Form Labs*, 2018), la cual es una opción indiscutible para imprimir prototipos detallados y precisos que requieran aplicaciones con resistencia a altas temperatura dejando de lado las características mecánicas. La tabla 4 muestra las principales especificaciones técnicas de la resina High Temp.

**Tabla 4**

*Especificaciones técnicas de resina térmica*

<b>Resina térmica</b>	
Marca	Form Labs
Modelo	High Temp
Temperatura de flexión bajo carga a 0.45 MPA	142 °C
Expansión térmica	79.6 $\mu\text{m} / \text{m}/^{\circ}\text{C}$
Resoluciones de impresión compatibles	100-50-25 $\mu\text{m}$

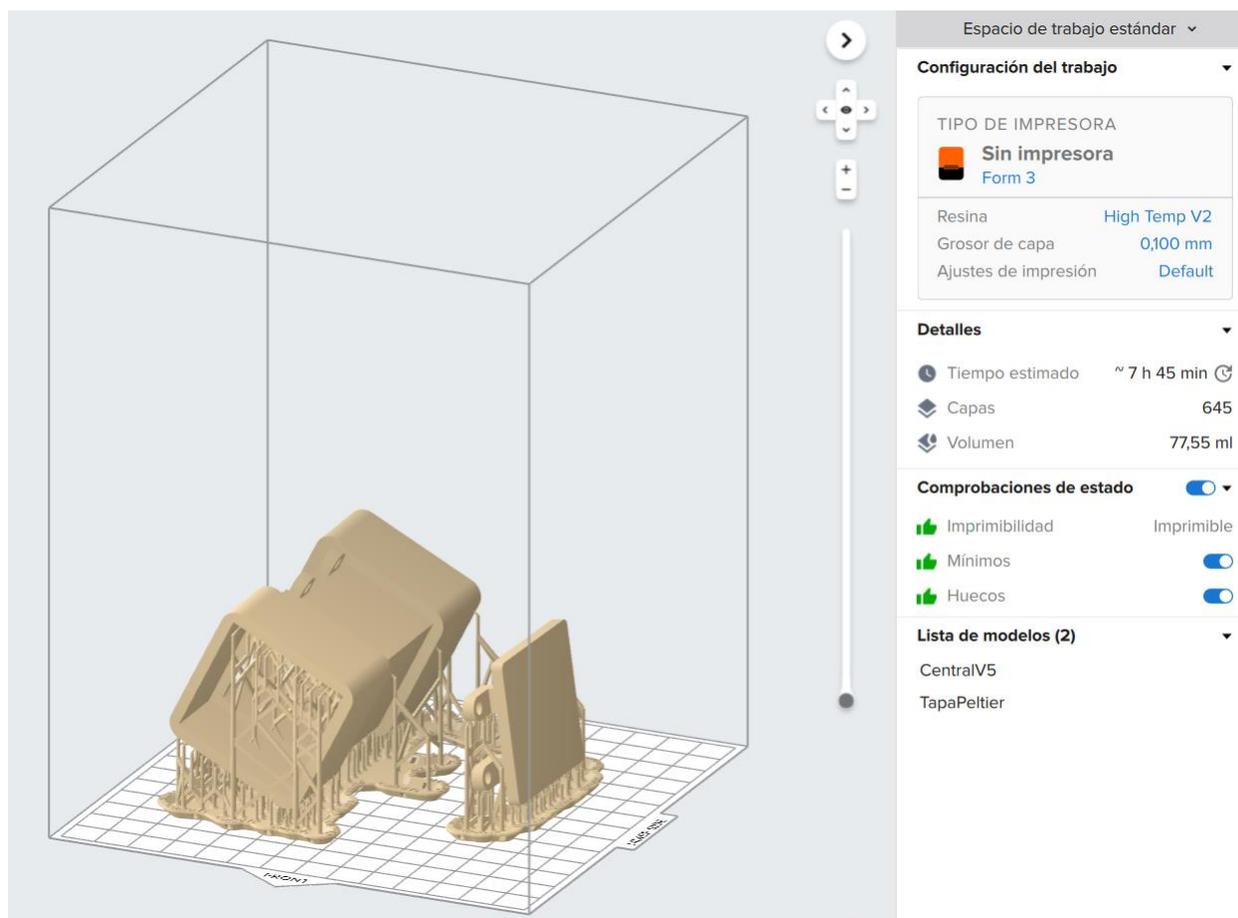
*Nota.* Los valores expresados en esta tabla muestran las principales especificaciones técnicas de la resina High Temp de Form Labs tomando en cuenta el proceso de post curado. Adaptado de *High Temp Resin* por *High Temp Resin*, 2018 , Form Labs.

<https://formlabs.com/es/store/materials/high-temp-resin/>

Utilizando el software Pre Form (Form Labs , 2018) se ha configurado el grosor de capa, soportes necesarios y el grado de inclinación mostradas en la figura 18 para asegurar una impresión exitosa.

### Figura 18

#### Configuración de impresión de pieza central de plataforma



*Nota.* La figura muestra la configuración del grosor de capa, soportes necesarios y el grado de inclinación mostrando un tiempo de impresión de casi ocho horas.

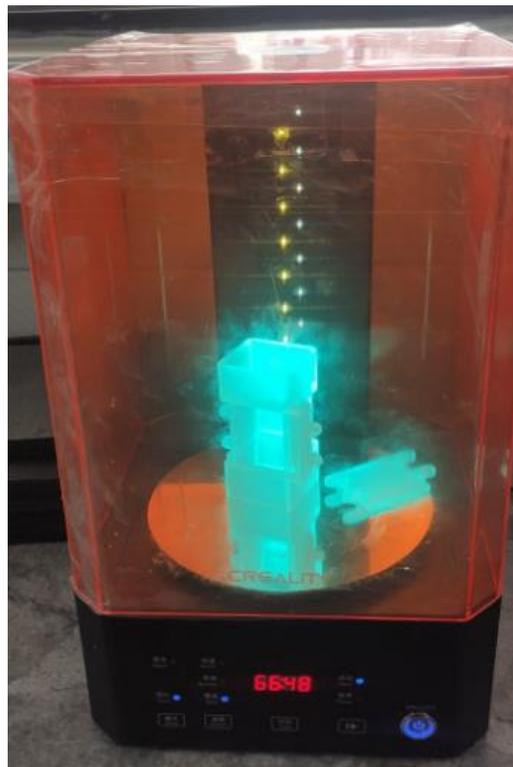
Una vez terminada la impresión se procede a retirar los soportes utilizando pinzas y teniendo cuidado de no alterar la geometría final de la pieza, luego se debe limpiar los excesos

de resina utilizando alcohol isopropílico, para ello se utilizó la piscina ultrasónica BK-2400 (Creality, s. f.) del laboratorio.

Luego del proceso de lavado, se debe curar la pieza, para ello se ha utilizado la máquina de post curado Any Cubic (ANYCUBIC, s. f.) disponible en el laboratorio, los ajustes de tiempo y temperatura para el post curado de la resina se pueden encontrar en la hoja de datos técnica de la resina o en su página web, para el caso de la resina High Temp (Form Labs, 2018) se requieren 120 minutos de curado a una temperatura de 80°C, la figura 19 muestra el proceso de post curado de la pieza central de la plataforma.

### Figura 19

*Proceso de post curado pieza central de la plataforma*

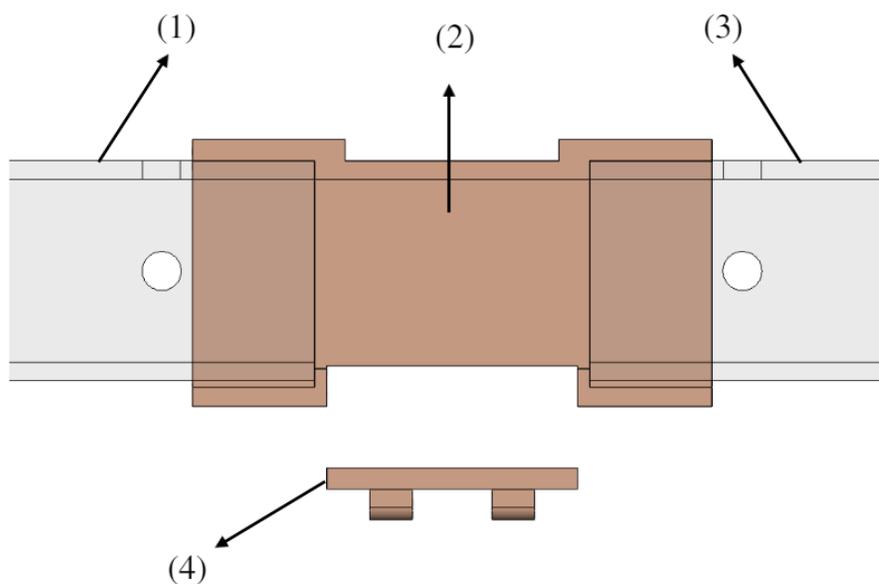


*Nota.* La figura muestra el proceso de post curado de la pieza central de la plataforma de evaluación, la reacción que tiene la resina con los rayos UV denotan un color característico con una notable fluorescencia.

La forma de anclaje de la pieza central con los canales de entrada y salida del fluido se representan en la figura 20.

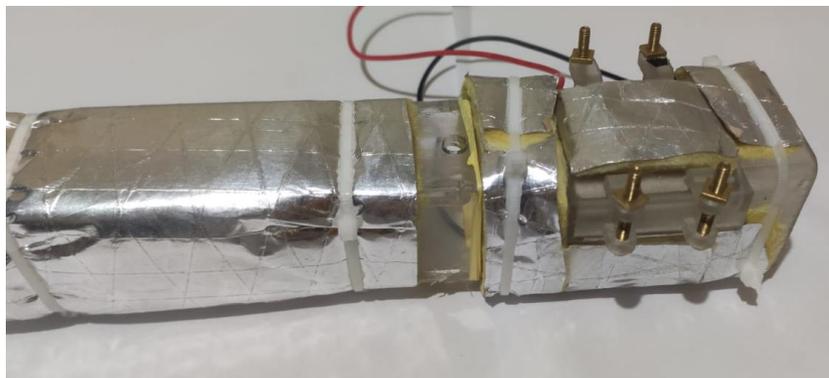
### Figura 20

*Esquema de vista de sección de anclaje Pieza central - Canales*



*Nota.* En el esquema se observa una vista de sección con las partes fundamentales del acople de la pieza central de la plataforma con los canales del fluido: (1) Canal de entrada, (2) Pieza central de la plataforma, (3) Canal de salida, (4) Tapa para celda Peltier

A pesar que la pieza central de la plataforma de evaluación fue impresa con una resina térmica, no nos asegura que sea adiabática, para ello al igual que los canales se la ha forrado con lana de vidrio para aislarlo de su entorno y asegurarnos que todo el calor generado por la celda de Peltier fluya a la estructura TPMS y no se disipe en las paredes de la pieza. La figura muestra la pieza final aislada, anclada con los canales y con sus tornillos M3 – 0.5 x 25.

**Figura 21***Acople Pieza central-Canal de entrada*

*Nota.* En la figura se observa una fotografía del acople de la pieza central de la plataforma con los canales del fluido con teflón para un cierre hermético, la pieza central se encuentra aislada ayudándose de bridas plásticas y con sus tornillos puestos para presionar la celda de Peltier con el intercambiador de calor compacto de núcleo TPMS.

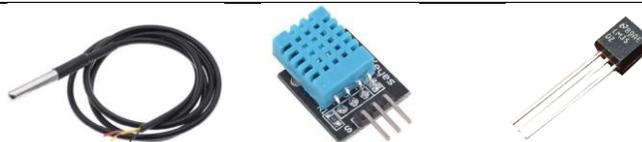
**Medición de temperatura de fluido.** Las temperaturas críticas a medir vienen dadas específicamente por el sensor de temperatura de emergencia presente en la celda de Peltier el cual debería registrar un valor máximo de 65 °C dependiendo de la estructura TPMS.

Las mejores alternativas para monitorear la temperatura se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5***Cuadro comparativo de alternativas para la variable temperatura*

<b>Especificación técnica</b>	<b>DS18B20</b>	<b>DHT11</b>	<b>LM35</b>
Rango	-55 a 125 °C	-20 a 60 °C	-55 a 150 °C
Voltaje de operación	3 a 5.5 V	3.3 a 5.5 V	4 a 30 V
Señal de salida	Digital (OneWire)	Digital (DHT)	Voltaje proporcional
Precisión	± 0.5 a ± 2 °C	± 2 °C	± 0.5 °C

Imagen referencial



*Nota.* La tabla muestra una comparativa de las mejores alternativas para la variable física temperatura haciendo énfasis en sus especificaciones técnicas. Adaptado de DS18B20 DataSheet, DHT11 DataSheet, LM35 DataSheet por *DS18B20 datasheet*, s. f., *LM35 Datasheet*, 2011 y *DHT11 Datasheet*, s. f.

<https://html.alldatasheet.com/html-pdf/58557/DALLAS/DS18B20/181/1/DS18B20.html>

<https://html.alldatasheet.com/html-pdf/517588/T11/LM35/849/15/LM35.html>

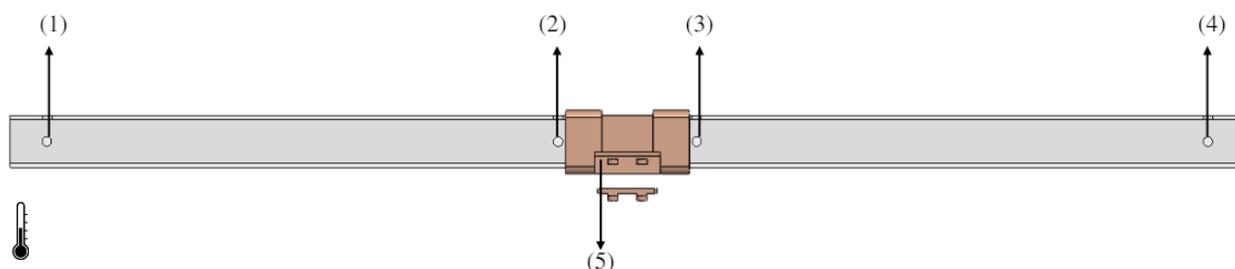
<https://html.alldatasheet.com/html-pdf/1132088/ETC2/DHT11/109/1/DHT11.html>

Se decide usar el sensor de temperatura DS18B20 no solo por sus características fáciles de implementar en una tarjeta de adquisición de datos sino por su rango compatible con la aplicación y una precisión valorable con un bajo costo.

La ubicación de los sensores de temperatura se esquematiza en la figura 22.

## Figura 22

*Esquema de ubicación de sensores de temperatura*



*Nota.* En el esquema se observa la ubicación de los sensores de temperatura: (1) Sensor de entrada de fluido, (2) Sensor de entrada de volumen de control, (3) Sensor de salida de

volumen de control, (4) Sensor de salida de fluido y (5) Sensor de emergencia para celda de Peltier.

**Medición de temperatura ambiente y potencia eléctrica.** La medición de la temperatura ambiente y también para temperaturas por encima de ella a lo largo de la plataforma de evaluación son importantes para el cálculo de pérdidas por convección.

A su vez, es necesario medir la potencia eléctrica que se suministra a la fuente de calor, para ello se cuenta con un multímetro capaz de medir dichas variables eléctricas y temperaturas en un solo instrumento. En la tabla 6 se muestran las principales especificaciones técnicas del multímetro.

**Tabla 6**

*Especificaciones técnicas de multímetro*

<b>Multímetro</b>	
Marca	Proskit
Modelo	MT-1280
Rangos de medición de voltaje DC	200mV/2V/20V/200V $\pm$ (0.5%)
Rangos de medición de corriente DC	200mA $\pm$ (1.2%)
Rango de temperatura	(-20 °C a 1000 °C) <400 $\pm$ (1.0%)
Ilustración	

*Nota.* La tabla muestra las principales especificaciones del multímetro Proskit MT-1280 el cual servirá para medir la potencia eléctrica de la fuente de calor así como la temperatura ambiente

y temperaturas de pérdidas por convección. Adaptado de PROSKIT MT-1280 User Manual por *PROSKIT MT-1280 User Manual*, 2012

<https://www.manualslib.com/manual/877771/Proskit-Mt-1280.html#product-MT-1280>

**Medición de presión.** La medición de presión o a su vez, la caída de presión es muy importante en dinámica de fluidos ya que esta estrictamente ligada a la energía del flujo, las mejores alternativas para monitorear la presión se muestran en la tabla 7.

**Tabla 7**

*Cuadro comparativo de alternativas para la variable presión*

Especificación técnica	MPX10DP	MPX5700	MPS20N0040D-D
Rango	-10 a 10 kPa	0 a 700 kPa	0 a 40 kPa
Voltaje de operación	4.75 a 5.25 V	4.75 a 5.25 V	3.3 a 5 V
Señal de salida	Analógica	Analógica	Analógica
Precisión	± 2.5 %	± 1.5 %	± 1.5 %
Imagen referencial			

*Nota.* La tabla muestra una comparativa de las mejores alternativas para la variable física presión haciendo énfasis en sus especificaciones técnicas. Adaptado de MPX10DP DataSheet, MPX5700 DataSheet, MPS20N0040D-D DataSheet por *MPX5010DP Datasheet*, s. f., *MPX5700 Datasheet*, s. f. y *MPS20N0040D-S Datasheet*, s. f.

<https://html.alldatasheet.com/html->

[pdf/5185/MOTOROLA/MPX5010DP/2636/10/MPX5010DP.html](https://html.alldatasheet.com/html-pdf/5185/MOTOROLA/MPX5010DP/2636/10/MPX5010DP.html)

<https://html.alldatasheet.com/html-pdf/5185/MOTOROLA/MPX5700/258/1/MPX5700.html>

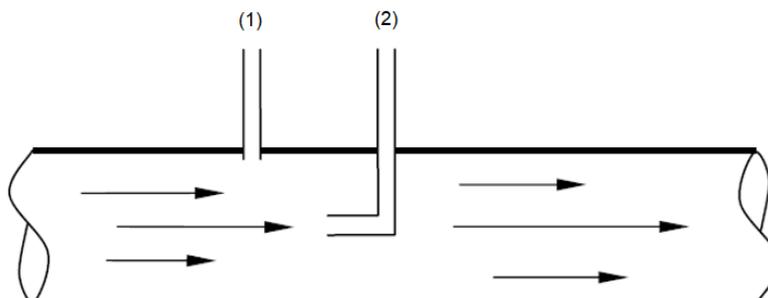
<https://html.alldatasheet.es/html-pdf/1134997/ETC2/MPS20N0040D-S/117/1/MPS20N0040D-S.html>

Es importante mencionar que para medir la caída de presión en un canal debido a la resistencia del flujo o en este caso, a la presencia de obstáculos como el intercambiador de calor compacto con núcleo TPMS, se deben medir las presiones estáticas en las paredes del canal ya que estas con las que se involucran directamente con las pérdidas por fricción, dichas presiones también están relacionadas con la energía interna del fluido, por otro lado, las presiones dinámicas se miden en el medio de la tubería en la región completamente desarrollada hidrodinámicamente y están ligadas a la velocidad de flujo. La figura 23 muestra un esquema de puntos de medición de presión estática y dinámica.

Es preferible tener un sensor que mida la presión estática en un solo punto, en caso de querer estudiar la caída de presión de cada experimento es preciso restar las presiones estáticas medidas, por lo tanto, se escoge el sensor MPS20N0040D-D ya que se ajusta a las necesidades de la aplicación, el sensor MPX5700 también resulta ser una buena opción, pero queda descartado por su alto costo y baja disponibilidad en el mercado local.

### Figura 23

*Esquema de medición de presión estática y dinámica.*

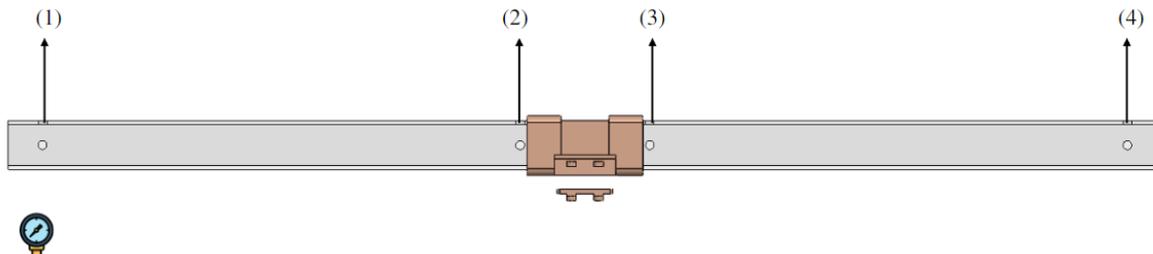


Nota. La figura muestra un esquema de puntos de medición de presión: (1) estática y (2) dinámica. Adaptado de *Fundamentos de transferencia de calor*, por (Incropera & DeWitt, 1999), School of Mechanical Engineering Purdue University

Este sensor se utilizará con la asistencia de mangueras neumáticas o de caucho, en un punto a la vez, en la entrada y salida del volumen de control (ya que la caída de presión es la diferencia entre dos puntos) esquematizado en la figura 24.

### Figura 24

*Esquema de ubicación de sensores de presión estática*



Nota. En el esquema se observa la ubicación de los sensores de temperatura: (1) Abertura sellada, (2) Sensor de presión en entrada de volumen de control, (3) Sensor de presión en salida de volumen de control y (4) Abertura sellada.

**Medición de velocidad de fluido.** La medición de velocidad del fluido depende de la naturaleza del mismo, es posible utilizar tubos de Pitot, tubos de Prandtl o anemómetro.

Como el fluido es aire, a bajas velocidades causa ruido en el tubo de Pitot dando paso a un error mayor, por otro lado el tubo de Prandtl funciona mucho mejor que el tubo de Pitot ya que mide con más precisión la presión estática y dinámica en un solo punto de observación, con la ayuda de técnicos pertenecientes a la empresa FV Área Andina se pudo realizar pruebas con un tubo de Pitot que funciona con un sensor de diferencial de presión y con un Arduino para mostrar la velocidad del aire en una pantalla LCD pequeña, por políticas de la empresa no

fue posible tomar fotografías, sin embargo, los valores se compararon con un anemómetro resultando en valores casi iguales, cabe mencionar que el tubo de Pitot tiene mucha variación debido a su principio de funcionamiento mientras que el anemómetro arroja valores estables resultando en la elección del mismo. En la tabla 8 se puede apreciar las principales características técnicas del instrumento.

**Tabla 8**

*Especificaciones técnicas del anemómetro*

<b>Anemómetro</b>	
Marca	Benetech
Modelo	GM816
Rangos de medición	0.1 a 30 m/s
Resolución	0.1 m/s
Exactitud	$\pm 5 \%$
Batería de alimentación	3 V CR2032
Ilustración	

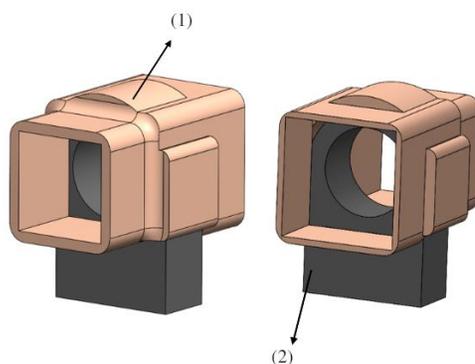
*Nota.* La tabla muestra las principales especificaciones del anemómetro Benetech GM816 el cual servirá para medir la velocidad del fluido aire. Adaptado de *Anemómetro Termómetro BENETECH GM816* por *Anemómetro Termómetro BENETECH GM816*, s. f..

<https://www.sirioimportaciones.cl/web/medidores-digitales/420-anemometro-termometro-benetech-gm816.html>

Es importante considerar que el anemómetro debe estar lo más hermético posible dentro de los canales del fluido para obtener una medición adecuada, para ello se ha diseñado una pieza auxiliar que también es desmontable y servirá para medir la velocidad de flujo en los mismos puntos de mediciones de presiones estáticas. La figura 25 muestra el modelo 3D de la pieza diseñada junto con el instrumento de medición el cual se fabricará con impresión 3D convencional con filamento PLA.

### Figura 25

*Modelo 3D de pieza auxiliar para medición de velocidad de fluido*

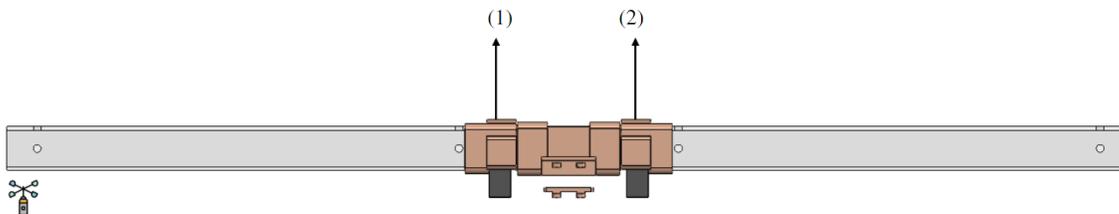


*Nota.* En el esquema se observa la pieza auxiliar para la medición de velocidad del fluido: (1) Pieza auxiliar y (2) Anemómetro. Los planos mecánicos se encuentran en el apéndice A.

En la figura 26 se observa la ubicación de la pieza auxiliar dentro del sistema.

### Figura 26

*Esquema de ubicación de pieza auxiliar para medición de velocidad de fluido*

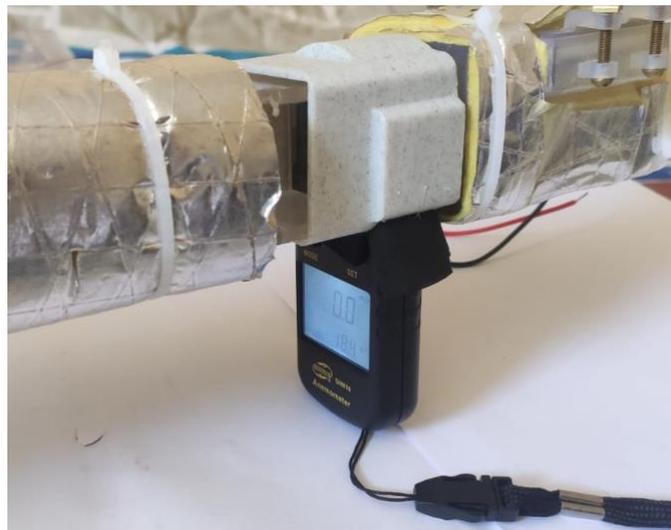


*Nota.* En el esquema se observa la ubicación de los dos puntos de medición de velocidad de fluido utilizando el mismo conjunto auxiliar: (1) Medición de velocidad de fluido en la entrada del volumen de control y (2) Medición de velocidad de fluido en la salida del volumen de control.

Como solo se cuenta con un anemómetro es necesario medir primero la velocidad de fluido de entrada hasta asegurar un valor requerido, posteriormente con ese valor seteado se puede medir la velocidad del fluido de salida, esto no representa ningún inconveniente ya que la plataforma es desmontable. La figura 27 muestra un ejemplo de el anclaje de la pieza auxiliar con una canal logrando medir la velocidad del fluido.

### **Figura 27**

*Anclaje de pieza auxiliar con canal para medición de velocidad de fluido*

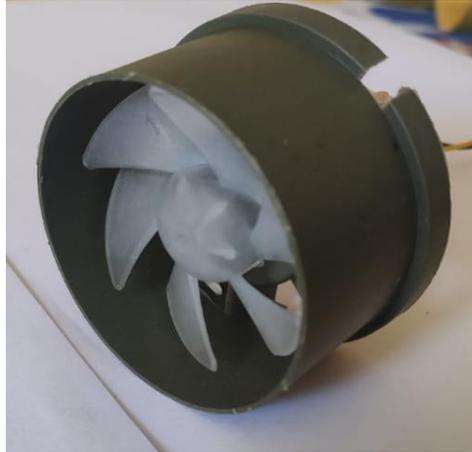


*Nota.* La figura muestra el anclaje de pieza auxiliar con canal para medición de velocidad de fluido

**Control de velocidad de fluido de trabajo.** El actuador encargado de generar el aire forzado desde el canal de entrada es un motor de corriente continua (DC) junto con su ventilador reciclado de un secador de cabello que se aprecia en la figura 28.

**Figura 28**

*Ventilador reciclado para generación de flujo*



Nota. En la figura se aprecia una fotografía de ventilador reciclado de un secador de cabello el cual funciona con un voltaje de hasta 12 V y su hélice de plástico compuesta por 6 álabes.

El control de la velocidad de flujo se puede realizar controlando la velocidad angular del motor, para ello es necesario un controlador de motores DC como el módulo puente H L298N, que permite controlar dicho motor con una señal PWM y manualmente con un potenciómetro igual que el controlador electrónico utilizado en la fuente de calor. La tabla 9 muestra las principales especificaciones técnicas del controlador.

**Tabla 9***Especificaciones técnicas del controlador de motor DC*

<b>Controlador Motor DC</b>	
Driver	L298N
Voltaje de alimentación	6 a 48 V
Corriente máxima de cada canal	2 A
Salida lógica	5 V
Potencia máxima	25 W
Señal de control PWM requerida	3.3 a 5 V
Ilustración	

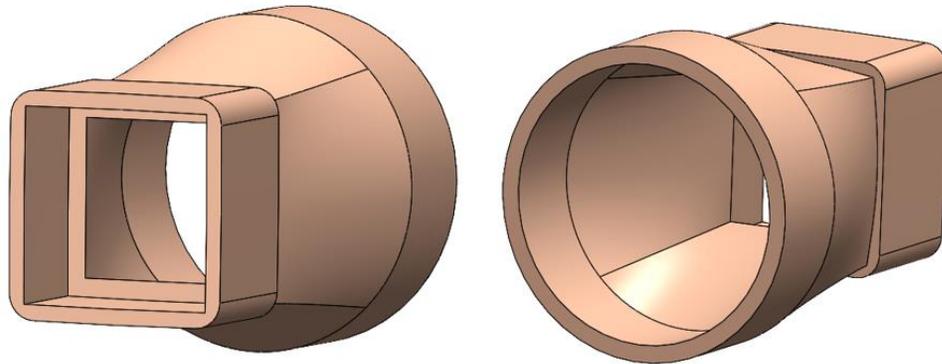
*Nota.* La tabla muestra las principales especificaciones del módulo puente H L298N el cual servirá para controlar la velocidad del fluido aire. Adaptado de *Módulo controlador de motores L298N* por *Módulo controlador de motores L298N*, s. f.

<https://www.prometec.net/l298n/>

El motor reciclado del secador de cabello cuenta con una carcasa que necesita un acople para lograr anclarse al canal de entrada, la figura 29 muestra el modelo 3D de dicho acople el cual se fabricó con impresión 3D convencional de filamento PLA y que permitirá la correcta entrada del fluido al sistema con la menor pérdida de carga posible, el conjunto total acoplado al canal de entrada se aprecia en la figura 30.

**Figura 29**

*Modelo 3D de acople para ventilador*



Nota. La figura muestra el modelo 3D del acople que permite acoplar la carcasa del ventilador con el canal de entrada. Los planos mecánicos se encuentran en apéndice A.

**Figura 30**

*Acople de ventilador con canal de entrada*



Nota. La figura muestra el acople del ventilador con el canal de entrada permitiendo la generación del flujo.

**Fuente de alimentación.** La fuente a utilizar se encuentra disponible en el laboratorio, su potencia se ajusta sin problemas a la carga total del sistema y sus especificaciones técnicas se muestran en la tabla 10.

**Tabla 10**

*Especificaciones técnicas de fuente de alimentación*

<b>Fuente de alimentación</b>	
Marca	ATX INS
Modelo	P4-800
Potencia eléctrica	800 W
Voltajes de salida	3.3/±5/±12/ V
Corrientes de salida	27/30/38 A
Ilustración	

*Nota.* La tabla muestra las principales especificaciones de la fuente de alimentación ATX INS P4-800 la cual servirá para abastecer la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento correcto de toda la plataforma de evaluación. Adaptado de *Fuente de poder ATX INS P4-800W* por Fuente de poder ATX INS P4-800W, s. f.

<https://tecnit.com.ec/producto/fuente-de-poder-atx-ins-p4-800w-de-800w-conectores-sata-ide-38a/>

**Tarjeta de adquisición de datos.** Para lograr una plataforma IoT que facilite el monitoreo in-situ del comportamiento del sistema en tiempo real y que lo guarde en la nube es fundamental una tarjeta que tenga integrado tecnología WiFi, para ello la tarjeta por excelencia es la ESP32 cuyas especificaciones técnicas se muestran en la tabla 11.

**Tabla 11**

*Especificaciones técnicas de la tarjeta de adquisición de datos*

<b>Tarjeta de adquisición de datos</b>	
Marca	Expressif
Modelo	WROOM-32
Procesador	Tensilica Xtensa 32bits LX6 hasta 240MHz
WiFi	802.11b/g/n/e/i (802.11n @ 2.4 Ghz hasta 150 Mbit/s)
ROM	448 KiB
Voltaje de trabajo	3.3 V
STAM	512 kB
Ilustración	

*Nota.* La tabla muestra las principales especificaciones de la tarjeta de adquisición de datos ESP WROOM-32 la cual servirá para recopilar todas las variables medidas por los sensores, abastecer las señales PWM a los controladores y almacenar sus datos en la nube. Adaptado de *ESP32 Datasheet* por *ESP32 Datasheet*, 2019.

<https://html.alldatasheet.com/html-pdf/1148023/ESPRESSIF/ESP32/564/1/ESP32.html>

**Materiales adicionales.** Los materiales adicionales utilizados son:

- Tabla de madera base destinada al montaje de la plataforma de evaluación.
- Teflón para asegurar un acople hermético entre las piezas desmontables.

- Canaleta ranurada y canaletas domésticas para organizar de mejor manera todos los cables eléctricos.
- Interruptores que controla el estado de la fuente de alimentación, ventilador y fuente de calor.
- Borneras para facilitar conexiones de fuente de alimentación hacia la plataforma sin la necesidad de soldar.
- Tornillos M3, 0.5x25 para asegurar algunos soportes y controladores a la tabla base.
- Soportes guía fabricados con impresión 3D convencional con filamento PLA que fijan y elevan los canales del fluido ligeramente que facilitan la reproducibilidad de experimentos ante distintos generadores de flujo (sopladores, ventiladores).
- Piezas de apriete auxiliares fabricados con impresión 3D convencional con filamento PLA para asegurar los canales hacia el soporte con una fijación adecuada como lo muestra la figura 31.

### **Figura 31**

*Soportes para canales con regulación de fijación*



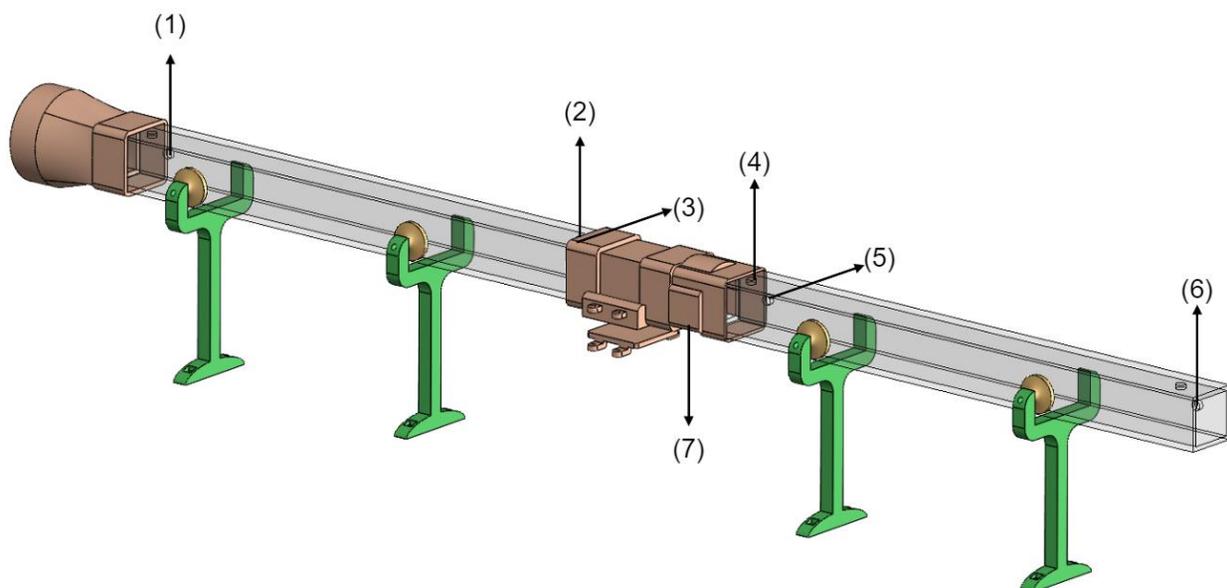
*Nota.* La figura muestra una fotografía de los soportes para canales con regulación de fijación con el uso de tornillos. El diseño está pensado para brindar el espacio suficiente para la medición de velocidad de fluido con el anemómetro además de abrir la posibilidad a utilizar diferentes generadores de flujo mucho más potentes cuya salida generalmente se ubica a una distancia significativa con respecto al nivel del suelo. Los planos mecánicos se encuentran en el apéndice A.

### **Montaje de la plataforma de evaluación**

Una vez definidos todos los materiales a utilizar, se procede a ensamblar la plataforma de evaluación sobre la tabla base, la figura 32 muestra el modelo 3D de la plataforma de evaluación sin su etapa electrónica, es decir, únicamente el sistema donde se genera el fenómeno térmico y señaladas las variables a medir. Los planos mecánicos de la plataforma de evaluación se encuentran en el apéndice A.

### **Figura 32**

*Modelo 3D de plataforma de evaluación*

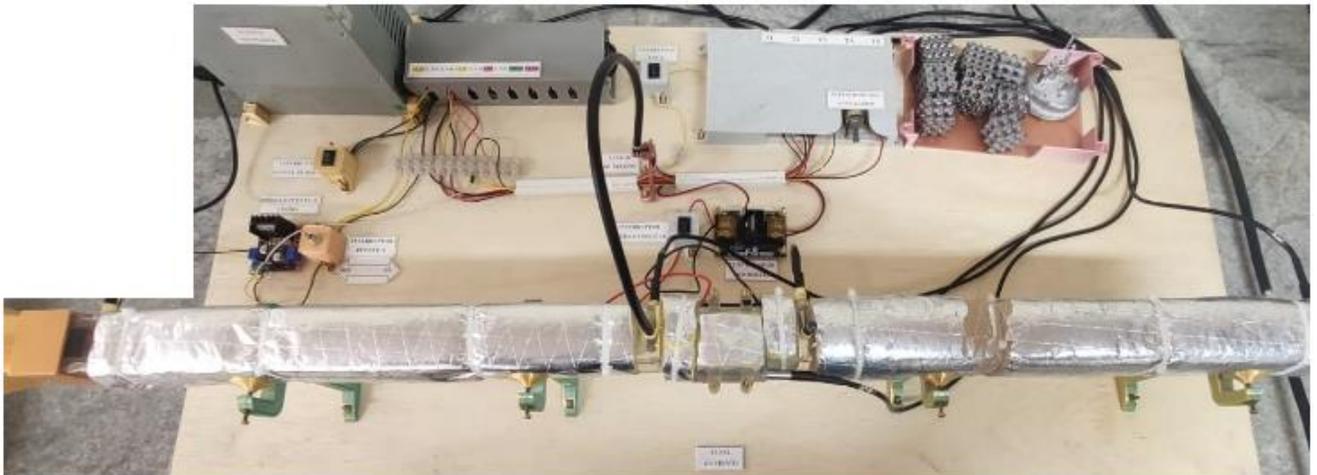


*Nota.* La figura muestra el modelo 3D de la plataforma enfocada en el lugar donde se desenvuelve el fenómeno térmico y la ubicación de sus sensores: (1) Temperatura de entrada de flujo  $T1$ , (2) Presión estática en entrada de volumen de control  $P1$ , (3) Temperatura de entrada de volumen de control  $T2$ , (4) Presión estática en salida de volumen de control  $P2$ , (5) Temperatura de salida de volumen de control  $T3$ , (6) Temperatura de salida de flujo  $T4$  y (6) Velocidad de fluido en salida de volumen de control  $V2$

En la figura 33 se observa la plataforma de evaluación final montada en su tabla base, con toda su instrumentación mecatrónica, controladores, fuentes de calor, flujo y energía eléctrica. El plano eléctrico de la plataforma de evaluación y las hojas de datos técnicas de toda la instrumentación se encuentra en los apéndices.

### Figura 33

*Plataforma de evaluación de rendimiento térmico de intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS*



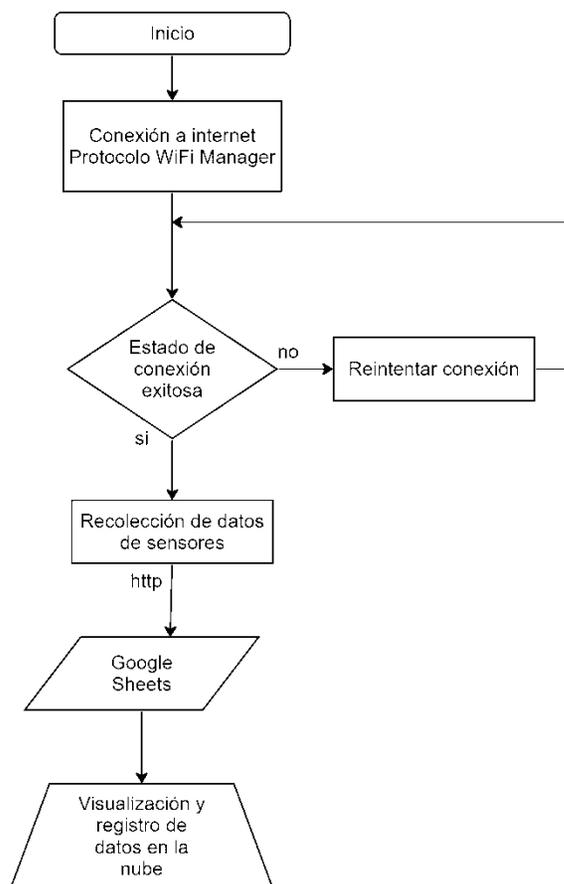
*Nota.* En la figura se aprecia una fotografía de la plataforma de evaluación de rendimiento térmico de intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS que se utilizará para la ejecución de los experimentos.

## Conexión IoT

En los estudios realizados por Cristian Puebla, (Puebla Montero, 2023) se usa la misma tarjeta de adquisición de datos para el monitoreo in-situ de la fabricación de estructuras TPMS de tipo diamante, todo esto usando FireBase Real time Data base el cual es práctico de usar gracias a sus librerías disponibles para una conexión sencilla, dicho método es funcional, sin embargo se puede simplificar mucho más, ya que podemos monitorear el comportamiento de las variables físicas medidas directamente en la hoja de datos utilizando Google Sheets con su extensión AppScript sin usar FireBase Real Time. En la figura 34 se observa un diagrama de flujo que sigue la tarjeta de adquisición de datos.

### Figura 34

Diagrama de flujo de tarjeta de adquisición de datos



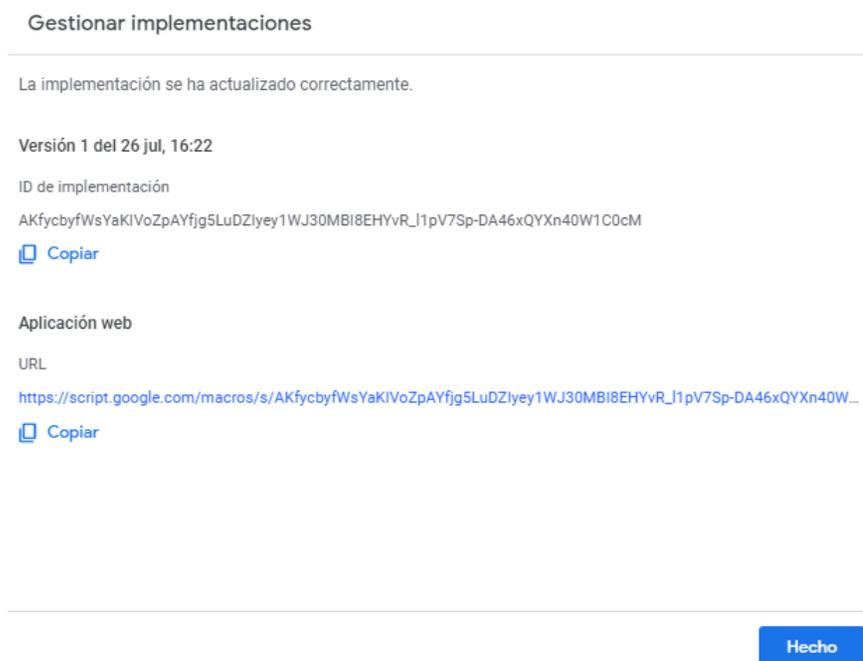
*Nota.* La figura muestra el diagrama de flujo seguido por la tarjeta de adquisición de datos ESP32.

Para implementar la conexión de la tarjeta de adquisición con la hoja de datos en Google Sheets. Primero crearemos una hoja de datos común, para luego ingresar a su extensión de Google App Scripts. Una vez en la pantalla del Script debemos colocar el código que se muestra en el apéndice C.

Cuando el código ha sido ejecutado con los permisos asignados que pide, se debe crear una implementación cuyo ID se usara en el código de la tarjeta de adquisición de datos. La figura 35 muestra la implementación creada.

### Figura 35

#### *Implementación creada en Google App Scripts*



Gestionar implementaciones

---

La implementación se ha actualizado correctamente.

Versión 1 del 26 jul, 16:22

ID de implementación  
AKfycbyfWsYaKIVoZpAYfjg5LuDZlyey1WJ30MBI8EHYvR\_1pV7Sp-DA46xQYXn40W1C0cM  
[Copiar](#)

Aplicación web

URL  
[https://script.google.com/macros/s/AKfycbyfWsYaKIVoZpAYfjg5LuDZlyey1WJ30MBI8EHYvR\\_1pV7Sp-DA46xQYXn40W...](https://script.google.com/macros/s/AKfycbyfWsYaKIVoZpAYfjg5LuDZlyey1WJ30MBI8EHYvR_1pV7Sp-DA46xQYXn40W...)  
[Copiar](#)

---

[Hecho](#)

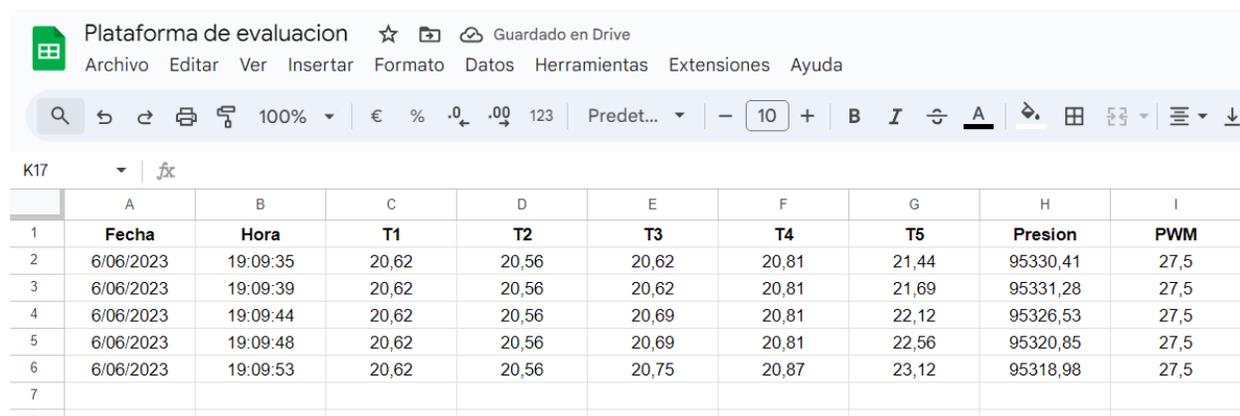
*Nota.* La figura muestra la implementación creada en Google App Scripts, el denominado ID de implementación se usará posteriormente en el código de programación para la tarjeta de adquisición de datos.

Después de configurar la hoja de datos se implementará el código visto en los apéndices a la tarjeta de adquisición de datos la cual enviará los valores de temperaturas, presiones y señal PWM enviada al controlador de la celda de Peltier.

Finalmente se realiza una prueba preliminar para asegurarse que la conexión de la tarjeta de adquisición de datos entabla una conexión exitosa con la hoja de Google Sheets en la nube. La figura 36 muestra los resultados para 5 datos.

### Figura 36

#### *Prueba preliminar de conexión de plataforma de evaluación con la nube*



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	<b>Fecha</b>	<b>Hora</b>	<b>T1</b>	<b>T2</b>	<b>T3</b>	<b>T4</b>	<b>T5</b>	<b>Presion</b>	<b>PWM</b>
2	6/06/2023	19:09:35	20,62	20,56	20,62	20,81	21,44	95330,41	27,5
3	6/06/2023	19:09:39	20,62	20,56	20,62	20,81	21,69	95331,28	27,5
4	6/06/2023	19:09:44	20,62	20,56	20,69	20,81	22,12	95326,53	27,5
5	6/06/2023	19:09:48	20,62	20,56	20,69	20,81	22,56	95320,85	27,5
6	6/06/2023	19:09:53	20,62	20,56	20,75	20,87	23,12	95318,98	27,5
7									
8									

*Nota.* La figura muestra el resultado de la prueba preliminar de conexión de la plataforma de evaluación con la hoja de datos en la nube. Se registran cinco valores de temperaturas en °C, la presión estática medida en Pascales y el ciclo de trabajo de la señal PWM (0-100%) enviada a la celda de Peltier. Los detalles del proceso experimental se pueden consultar en la sección:

### **Validación del experimento mediante balance energético**

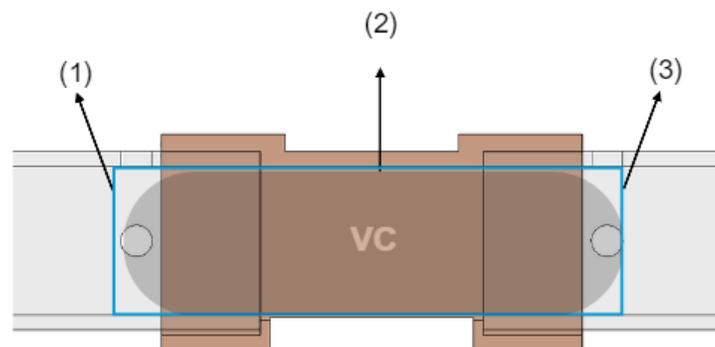
Puesto que realizar simulaciones computacionales representan un reto que sobrepasa los objetivos del presente estudio. Se puede validar el experimento realizando un análisis de balance de masa y energía en un volumen de control (VC).

El volumen de control es una región elegida convenientemente en el espacio. Dicho volumen debe encerrar el objeto de estudio que en este caso es el intercambiador de calor compacto con núcleo TPMS. Muchos casos de estudio y problemas de ingeniería los cuales tienen que ver con flujos másicos como calentadores de agua, toberas, radiadores, intercambiadoras y demás sistemas se modelan como volúmenes de control. (Çengel & Boles, 2015)

No existen reglas específicas para la selección del volumen de control pero una apropiada selección facilita el análisis del sistema, para el objeto de estudio, la entrada de superficie de control será en el punto donde se mide la velocidad y la presión estática de entrada, por otro lado, la superficie de control de salida será en el punto donde se mide la velocidad y la presión estática de salida, como se representa en la figura 37, el volumen de control encierra principalmente la pieza central de la plataforma de evaluación diseñada.

#### **Figura 37**

*Volumen de control en plataforma de evaluación*



Nota. La figura muestra el volumen de control seleccionado en la plataforma de evaluación: (1) Superficie de control de entrada, (2) Contorno que encierra el volumen de control (región sombreada) y (3) Superficie de control de salida.

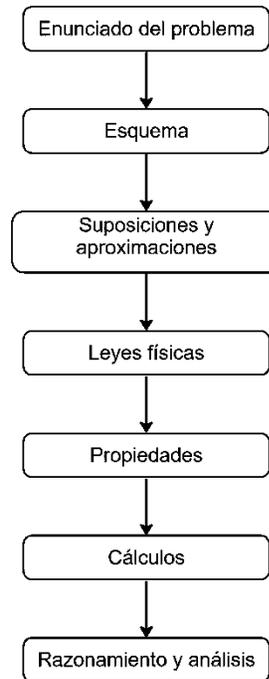
Con el volumen de control definido recurrimos a la siguiente metodología de resolución de problemas:

1. **Enunciado del problema.** Se expresa el problema con palabras propias, esto nos ayuda a proyectarnos hacia los objetivos del objeto de estudio.
2. **Esquema.** Se traza un esquema que proyecte de manera práctica el problema, el bosquejo ayuda a ver un panorama global del sistema.
3. **Suposiciones y aproximaciones.** Se debe enunciar todas las suposiciones y aproximaciones que ayudan a simplificar el problema.
4. **Leyes físicas.** Se debe aplicar los principios físicos y las leyes básicas para reducirlas a su forma más simple utilizando las consideraciones hechas.
5. **Propiedades.** Se determinan que propiedades o características desconocemos para la resolución del problema, en el caso de no tenerlas se pueden obtener de distintas tablas de ingeniería basadas en experimentos realizadas por profesionales.
6. **Cálculos.** Se sustituyen los valores numéricos conocidos en las ecuaciones simplificadas siempre teniendo en cuenta los dígitos significativos que merece nuestra respuesta.

La figura 38 resume la metodología a emplear para la validación del experimento.

**Figura 38**

*Diagrama de flujo para validación del experimento*



Nota. La figura muestra el diagrama de flujo a seguir para la validación de los experimentos mediante balance de más y energía. Adaptada de *Termodinámica* (p. 34) por Çengel & Boles, 2015, Mc Graw Hill Education.

Tomando en cuenta el volumen de control procedemos a realizar el balance de energía como nos muestra (Çengel & Boles, 2015) en el capítulo 5: Análisis de energía de sistemas de flujo estacionario.

**Ecuación 6**

*Ecuación general de balance de energía*

$$\dot{Q}_e + \dot{W}_e + \sum_e \dot{m} \left( u + \frac{V^2}{2} + gz \right) = \dot{Q}_s + \dot{W}_s + \sum_s \dot{m} \left( u + \frac{V^2}{2} + gz \right)$$

*Nota.* La ecuación describe el balance de energía para sistemas de flujo estacionario, los términos contenidos en las sumatorias responden a la suma de energía interna, cinética y potencial. Tomado de *Termodinámica*, (p. 227) por Çengel & Boles, 2015, Mc Graw Hill Education.

Dentro de la tasa del calor de entrada tenemos trabajo eléctrico el cual es la potencia eléctrica que le suministramos a la fuente de calor. Ver ecuación 7.

### **Ecuación 7**

*Fórmula de potencia eléctrica*

$$\dot{Q}_e = \dot{w}_{el\acute{e}ctrico} = V_e I_e [W]$$

*Nota.* La ecuación describe el cálculo de la potencia eléctrica a una carga resistiva. Adaptada de *Fundamentos de circuitos eléctricos*, (p.53) por Velásquez Santos & Ramírez Echavarría, 2012, Instituto tecnológico metropolitano.

En la tasa de calor de salida tenemos una suma de pérdidas por convección y fricción del intercambiador de calor como se muestra en la ecuación 8.

### **Ecuación 8**

*Fórmula para tasa de calor de salida*

$$\dot{Q}_s = P_{convección} + P_{fricción}$$

*Nota.* Adaptado de *Termodinámica*, por Çengel & Boles, 2015, Mc Graw Hill Education.

De la ecuación 8 es posible calcular únicamente las pérdidas de convección como lo describe la ecuación 9, por otra parte, las pérdidas de fricción se necesitan realizar análisis computacionales gracias a las geometrías complejas de las estructuras TPMS.

**Ecuación 9**

*Fórmula de transferencia de calor por convección*

$$P_{convección} = hA_s(T_s - T_\infty)$$

*Nota.* Tomada de *Fundamentos de transferencia de calor* (p. 375), por (Incropera & DeWitt, 1999), School of Mechanical Engineering Purdue University

Dentro del segundo término de la ecuación 6 tenemos los trabajos de flujo de entrada y salida expresados en la ecuación 10.

**Ecuación 10**

*Fórmula de trabajo de flujos de entrada y salida*

$$\dot{w} = \dot{m} \frac{P}{\rho}$$

*Nota.* Adaptado de *Termodinámica*, (p. 223) por Çengel & Boles, 2015, Mc Graw Hill Education.

Reemplazando las ecuaciones 7, 8, 9 y 10 en la ecuación 6 y desarrollando las sumatorias para un fluido de una sola corriente tenemos desarrollado el balance energético del sistema.

**Ecuación 11**

*Balance energético del sistema*

$$\dot{w}_{eléctrico} + \dot{m}_e \frac{P_e}{\rho_e} + \dot{m}_e \left( u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) = \dot{m}_s \frac{P_s}{\rho_s} + \dot{m}_s \left( u_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) + P_{convección} + P_{fricción}$$

*Nota.* Se expresa el balance energético de sistemas considerando una sola corriente de flujo.

El flujo másico se describe con la ecuación y representa la cantidad de masa circundante por unidad de tiempo.

**Ecuación 12***Fórmula del flujo másico*

$$\dot{m} = \rho v A_T$$

Nota. Adaptado de *Termodinámica*, (p. 377) por Çengel & Boles, 2015, Mc Graw Hill Education.

Tomando en cuenta que la altura del fluido permanece constante, simplificando y reemplazando la ecuación 12 en la ecuación 11 obtenemos el balance de energía del sistema simplificado que se utilizara para evaluar el rendimiento térmico del sistema.

**Ecuación 13***Balance energético simplificado del sistema*

$$\dot{W}_{el\acute{e}ctrico} + \dot{m}_e \left( \frac{P_e}{\rho_e} + u_e + \frac{V_e^2}{2} \right) = \dot{m}_s \left( \frac{P_s}{\rho_s} + u_s + \frac{V_s^2}{2} \right) + P_{convección} + P_{fricción}$$

Nota. La ecuación refleja el balance energético del sistema en función de las variables medidas de la plataforma de evaluación diseñada. Adaptado de *Termodinámica*, (p. 223) por Çengel & Boles, 2015, Mc Graw Hill Education.

Dicho balance energético contiene las propiedades: densidad y energía interna que se encuentran en función de la temperatura y serán tomadas de las tablas A-15 de (Incropera & DeWitt, 1999) y A17 de (Çengel & Boles, 2015) . Es importante mencionar que dichas herramientas toman en cuenta el fluido aire como un gas ideal, dicha aproximación funciona muy bien a bajas presiones, simplifica de manera práctica los cálculos y consideraciones del rendimiento térmico a estudiar.

Los valores constantes del balance energético del volumen de control se aprecian en la tabla 12.

**Tabla 12**

*Valores constantes en el balance energético del sistema*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
$D_h$	30	mm
$A_T$	0,0009	$m^2$
$h$	5	$W/m^2K$
$A_s$	0,0016	$m^2$
$V_e$	3,47	V
$I_e$	0,84	A
$\dot{w}_{el\acute{e}ctrico}$	2,9148	W

*Nota.* La tabla muestra los parámetros que no se verán alterados en los experimentos a realizar. El coeficiente de transferencia de calor por convección natural fue obtenido de *Fundamentos de transferencia de calor.* (p.26) por Incropera & DeWitt, 1999, School of Mechanical Engineering Purdue University.

Finalmente, la eficiencia del sistema y el rendimiento térmico se describen por las ecuaciones 14 y 15.

#### **Ecuación 14**

*Fórmula de eficiencia energética total*

$$\mu_{sistema} = \frac{e_{salida\ útil}}{e_{entrada}} = \frac{\dot{m}_s \left( \frac{P_s}{\rho_s} + u_s + \frac{V_s^2}{2} \right)}{\dot{w}_{el\acute{e}ctrico} + \dot{m}_e \left( \frac{P_e}{\rho_e} + u_e + \frac{V_e^2}{2} \right)}$$

*Nota.* La ecuación muestra la eficiencia energética total del sistema, contempla la energía interna, cinética, potencial y del flujo. Adaptado de *Termodinámica*, capítulo 2 por Çengel & Boles, 2015, Mc Graw Hill Education.

## Ecuación 15

*Fórmula de rendimiento térmico*

$$\eta_{t\acute{e}rmica} = \frac{\dot{m}_s u_s}{\dot{W}_{el\acute{e}ctrico} + \dot{m}_e u_e}$$

Nota. La ecuación muestra el rendimiento térmico del sistema que se utilizara para la evaluación de los intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS. Adaptado de *Termodinámica*, capítulo 2 por Çengel & Boles, 2015, Mc Graw Hill Education.

La ecuación 15 contempla la energía interna del fluido que está en función de la temperatura y el trabajo que realiza el flujo, estamos condicionados a utilizar este enfoque debido a las limitaciones experimentales, las simulaciones computacionales son un buen complemento para el estudio ya que estos enfocan la eficiencia de sistemas térmicos en base al coeficiente de convección calculado como se aprecia en la metodología de (Attarzadeh et al., 2021), sin embargo, este enfoque también es válido ya que contiene explícitamente la diferencia de temperatura del fluido y la restricción que representa el intercambiador de calor en términos de caída de presión y velocidad.

## Fabricación de Intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS

### **Diseño**

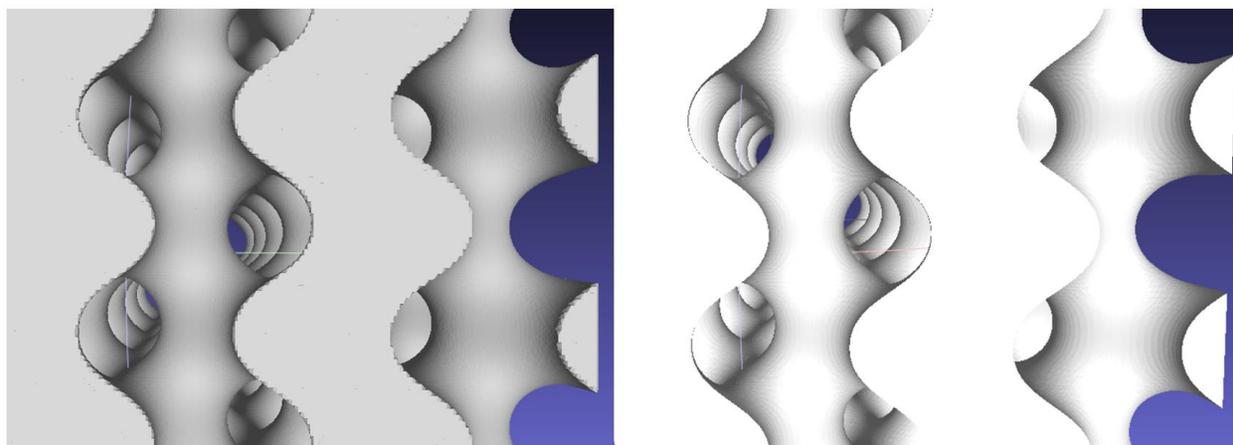
En los estudios realizados por Iván Trujillo, (Trujillo Freire, 2023) se plantea el uso de un software llamado MathMod el cual es un software de gráfico matemático que permite generar superficies a partir de sus ecuaciones paramétricas o implícitas, dicho software está distribuido con la licencia GNU GPL-2.0. Dicha herramienta fue utilizada en los estudios de Fabricio Veintimilla, (Veintimilla Bautista, 2023) cuyos resultados fueron excelentes, sin embargo dentro de trabajos posteriores a los estudios de Trujillo los cuales aún no se encuentran documentados, se encuentra una nueva herramienta llamada Pyvista como librería de Python

la cual proporciona una interfaz concisa y bien documentada que nos ayuda a realizar el mismo trabajo que el software MathMod, con la ventaja de trabajar directamente con código simple y amigable además de simplificar la creación de mallas estándar y las rutinas de trazado que pueden comprometer la velocidad de ejecución del código. (Sullivan & Kaszynski, 2019)

En la figura 39 se aprecia una comparación usando el software de visualización MeshLab para una estructura tipo Diamante de la cual se notan ligeras imperfecciones en las curvaturas de la geometría de las estructuras generadas por MathMod,

### Figura 39

*Comparación de estructura TPMS MathMod vs PyVista*



Nota. La figura muestra una comparativa de una estructura TPMS generadas con diferentes herramientas: a la izquierda con MathMod y a la derecha con PyVista.

Es importante mencionar que el archivo de formato STL (por sus siglas en inglés *Standard Triangle Language*) generado en el software MathMod contiene más elementos y por lo tanto es más pesada (a nivel de memoria computacional), mientras que la estructura generada por la herramienta PyVista posee menos elementos y un suavizado notablemente mejor, si se desea realizar futuros análisis computacionales con estas estructuras, la herramienta PyVista entregará mallas suavizadas sin necesidad del uso de algoritmos de

optimización que lograrán decrementar significativamente la resolución del análisis computacional con un tiempo de convergencia mucho menor.

Los códigos escritos en lenguaje Python y disponibles en los apéndices E,F y G para el diseño de estructuras TPMS apoyadas por la herramienta PyVista permiten modificar las siguientes propiedades topológicas importantes vistas en (Walker et al., 2017) :

**Porosidad.** Es la relación del volumen del solido con respecto al volumen total que ocupa. La porosidad se describe en la ecuación 16, la figura 40 muestra una estructura TPMS tipo Giroide a distintas porosidades.

### Ecuación 16

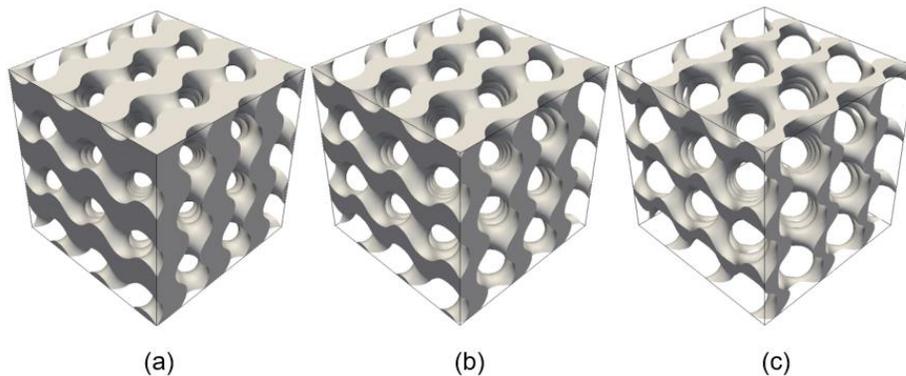
*Ecuación de la porosidad en una estructura TPMS*

$$n = 1 - \frac{V_s}{V_T}$$

Nota. Se muestra la ecuación de la porosidad en una estructura TPMS, también puede ser escrita en valor porcentual. Tomada de *Design and mechanical characterization of solid and highly porous 3D printed poly (propylene fumarate) scaffolds*, (p. 103), por Walker et al., 2017, Progress in Additive Manufacturing.

### Figura 40

*Estructura TPMS tipo Giroide a distintas porosidades*



*Nota.* La figura muestra tres estructuras TPMS tipo Giroide con distintos valores de porosidad: (a) 50%, (b) 65% y (c) 80%

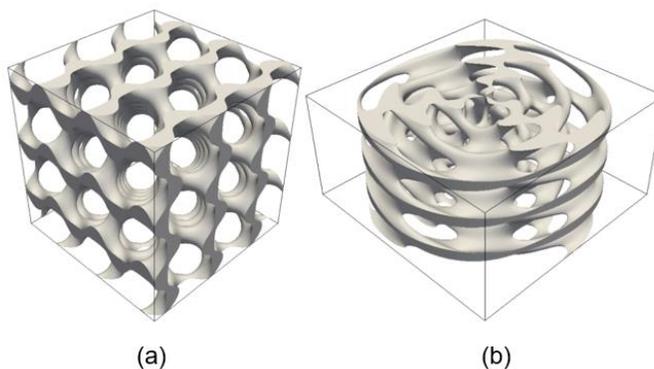
**Dominio.** Esta estrictamente relacionado con las longitudes del volumen total que ocupa una estructura TPMS en los ejes cartesianos o cilíndricos.

**Generación cartesiana o cilíndrica.** Corresponde al enfoque matemático brindado a la ecuación general que define la estructura, en coordenadas cartesianas el volumen total de una estructura es un cubo mientras que en coordenadas cilíndricas el volumen total es un cilindro.

La figura 41 nos muestra un ejemplo con una estructura TPMS Giroide generada con coordenadas cartesianas y cilíndricas.

#### Figura 41

*Estructura TPMS Giroides generado con distinto sistema de coordenadas*

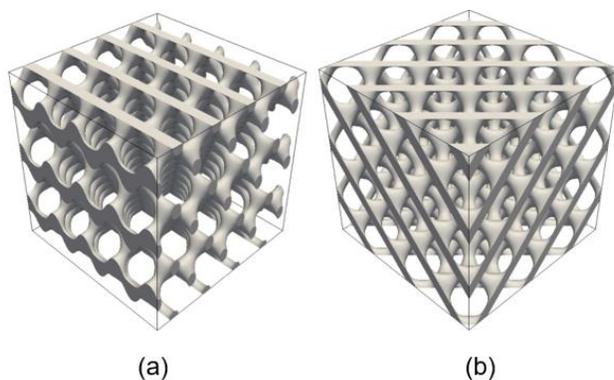


*Nota.* La figura muestra dos estructuras TPMS tipo Giroide generadas con distintos sistemas de coordenadas: (a) Cartesianas y (b) Cilíndricas.

**Orientación del núcleo.** Corresponde al grado de inclinación de la estructura sin alterar su dominio matemático, en la figura 42 se observa una estructura TPMS Diamante con diferentes orientaciones de núcleo.

### Figura 42

*Estructura TPMS Diamante generada con diferente orientación de núcleo*

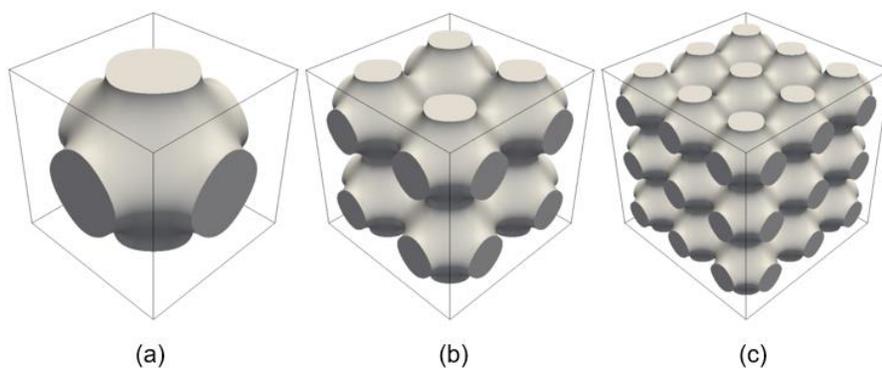


*Nota.* La figura muestra dos estructuras TPMS tipo Diamante generadas con distinto grado de orientación del núcleo: (a)  $0^\circ$  y (b)  $45^\circ$

**Celda de unidad.** Hace referencia a la generación de una estructura TPMS fundamental de dominio igual a 1. El número de celdas de unidad en una estructura TPMS por cada lado se puede obtener fácilmente dividiendo el dominio matemático entre la longitud de dicha celda. En la figura 43 se aprecia una estructura TPMS Primitiva con diferente número de celdas de unidad.

### Figura 43

*Estructuras TPMS Primitivas generadas con diferentes números de celda de unidad*



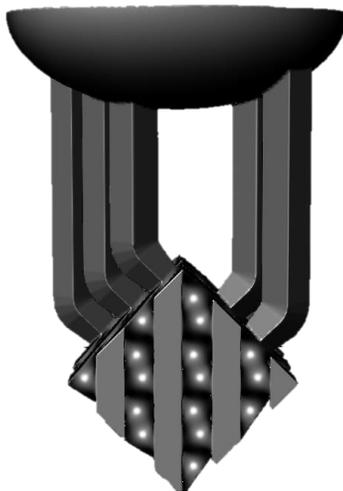
*Nota.* La figura muestra dos estructuras TPMS tipo Primitiva generadas con distinto número de celdas de unidad: (a) Celda unitaria, (b) 2 Celdas de unidad por cada lado, 4 en total y (c) 3 celdas de unidad por cada lado, 9 en total.

### ***Impresión 3D por estereolitografía***

Una vez diseñada la estructura TPMS deseada, se debe utilizar la metodología realizada por (Veintimilla Bautista, 2023), donde se debe diseñar alimentadores que servirán como canales donde fluirá el material para fundir. El número y dimensiones de los alimentadores se escogen en función de la superficie de la estructura TPMS y del volumen que encierra el mismo. La figura 44 muestra un ejemplo de estructura TPMS Diamante con sus alimentadores anclados utilizando el software MeshMixer.

### **Figura 44**

*Estructura TPMS Diamante con alimentadores*



*Nota.* La figura muestra una estructura TPMS Diamante con sus alimentadores unidos que posteriormente serán fabricados con estereolitografía. Tomado de *Fabricación de intercambiadores compactos usando el método de fundición por cera perdida*, (p. 103) por (Veintimilla Bautista, 2023), Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

La resina a utilizar es la denominada Castable Wax Resin (*Form Labs*, 2018) la cual es un fotopolímero de alta precisión con un 20% de cera que facilita una fundición confiable y sin ceniza, esta resina es muy utilizada en joyería y sus principales características técnicas se aprecian en la tabla 13. También es posible utilizar la denominada Castable Wax 40 que tiene propiedades similares, sin embargo, esta última es mucho más robusta en el aspecto mecánico lo cual ayuda a la fabricación de estructuras TPMS de alta porosidad donde el espesor que divide los poros es muy delgado.

**Tabla 13**

*Especificaciones técnicas de resina de fundición*

<b>Resina de fundición</b>	
Marca	Form Labs
Modelo	Castable Wax
Módulo de Young	11.6 MPa
Resoluciones de impresión compatibles	50-25 $\mu\text{m}$

Nota. La tabla muestra las principales especificaciones técnicas de la resina Castable Wax, cabe mencionar que en su manual se detallan las temperaturas adecuadas para utilizarla en fundición. Adaptada de *Castable Wax Resin* por (*Castable Wax Resin*, 2018), Form Labs.

<https://formlabs.com/es/store/materials/castable-wax-resin/>

### ***Fundición***

Los pasos para realizar la fundición una vez que se tiene impreso el molde, se debe el siguiente proceso riguroso que se detalla en (Veintimilla Bautista, 2023) y forman una parte esencial en sus resultados obtenidos:

- Fabricación del molde de fundición.
- Des encerado y calcinación de la resina.
- Vertido y solidificación.
- Post procesamiento.

## Capítulo IV: Diseño de experimentos

### Desarrollo de diseño de experimentos (DOE)

Tomando en cuenta la principal fuente bibliográfica acerca de diseño y análisis de experimentos (Montgomery, 2020), se debe seguir el siguiente procedimiento:

1. Planteamiento del problema
2. Selección de variables de salida
3. Selección de factores y niveles
4. Elección del tipo de diseño experimental

#### ***Planteamiento del problema.***

Identificar y evaluar las variables físicas significativas del rendimiento térmico de intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS, utilizando la plataforma IoT de evaluación diseñada.

#### ***Selección de variables de salida.***

Tomando en cuenta (Çengel & Boles, 2015) y (Incropera & DeWitt, 1999), los sistemas térmicos, específicamente los intercambiadores de calor como disipadores se analizan de manera experimental con las siguientes variables necesarias para la evaluación de su rendimiento:

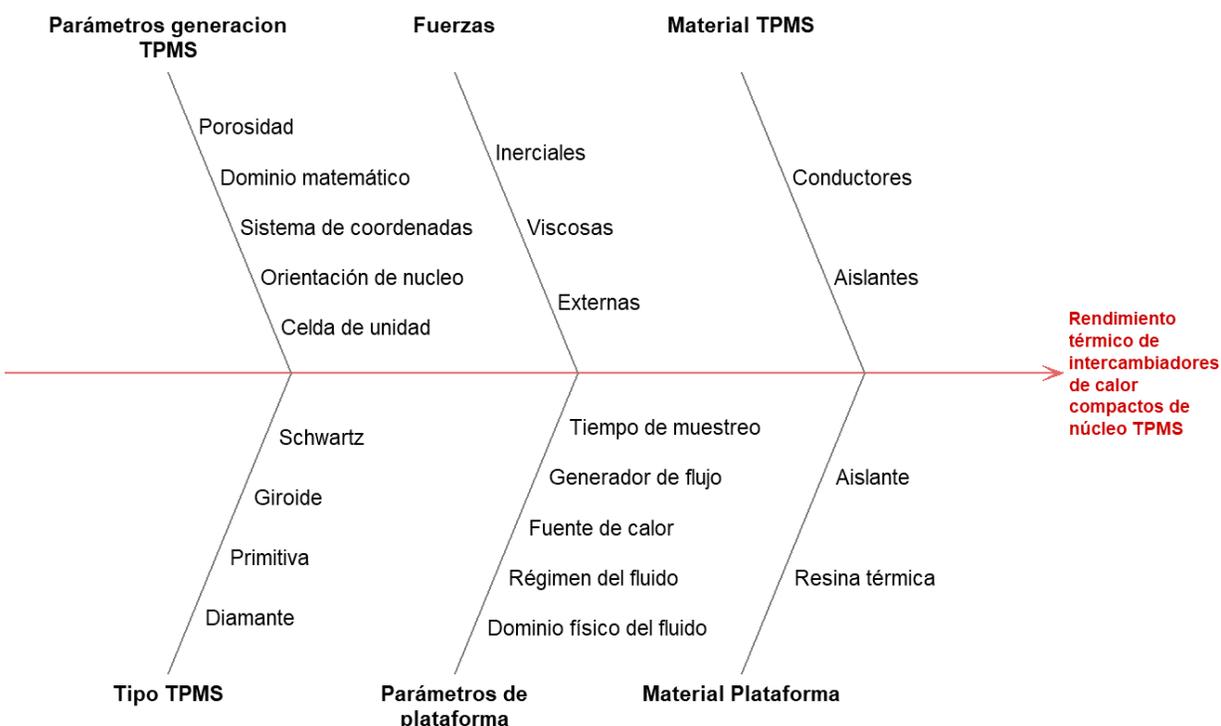
- Diferencia de temperatura de entrada y salida del volumen de control.
- Caída de presión entre entrada y salida del volumen de control.
- Rendimiento térmico

## Selección de factores

Para una selección adecuada y mejor visión global, nos ayudaremos que un diagrama de Ishikawa que se aprecia en la figura 45, esta contiene los parámetros más importantes que intervienen no solo en el diseño, fabricación sino también de manera teórica en su rendimiento térmico.

### Figura 45

Diagrama de Ishikawa para rendimiento térmico



*Nota.* La figura muestra el diagrama de Ishikawa con los parámetros más importantes que rigen el comportamiento del rendimiento térmico de intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS.

Los factores elegidos con la asistencia de la figura 42 y las investigaciones numéricas realizadas en (Gawronska & Dyja, 2021) y (Attarzadeh et al., 2021) son:

- Factor A: Tipo de TPMS. Cada estructura tiene una geometría característica que afectara la dinámica del flujo.
- Factor B: Porosidad. Afecta directamente al área efectiva de disipación de calor en el fluido y el área de contacto de la estructura TPMS con la fuente de calor.
- Factor C: Régimen de flujo. Si bien será turbulento, específicamente podemos movernos dentro del régimen con el número de Reynolds, la relación proporcional de las fuerzas inerciales entre las fuerzas viscosas presentes en la Ecuación de Navier – Stokes (usada en análisis numérico de dinámica de fluidos)

Los factores que se mantendrán constantes son:

- Dominio matemático de la estructura TPMS. Se mantiene en un cubo de 30 mm, conservando la calidad sin elevar costos.
- Sistema de coordenadas. Serán cartesianas asegurando lo mejor posible una fundición exitosa.
- Orientación del núcleo. Para las estructuras TPMS de tipo Primitiva y Giroide, la orientación será de cero grados, por otra parte, la estructura TPMS de tipo Diamante tendrá un grado de inclinación de  $45^\circ$  como se apreció en la figura 39, dicha alteración es necesaria para el correcto flujo de aire a través de su núcleo.
- Celda de unidad. Gracias a los experimentos preliminares realizados por (Veintimilla Bautista, 2023) y (Puebla Montero, 2023), se vio que las estructuras TPMS con un dominio matemático de 30 mm y una longitud de celda de unidad de 10 mm resultando en 3 celdas de unidad por cada lado, 9 en total son

prometedoras gracias a la mayor diferencia de temperatura generada en los contornos del sistema.

- Material TPMS. Debe ser un material conductor facilitando la transferencia de calor, para el objeto de estudio las fundiciones se mantienen en aluminio.
- Parámetros de plataforma. Deben mantenerse constantes de acuerdo al diseño realizado y mantener su compatibilidad con las dimensiones de las estructuras TPMS fundidas.

A manera de planificación los niveles de cada factor se escogen de la siguiente manera:

- Factor A. Se seleccionan las estructuras TPMS más estudiadas según (Benedetti et al., 2021)
  - Nivel 1: Shwartz Diamante
  - Nivel 2: Shwartz Primitiva
  - Nivel 3: Schoen Giroide
- Factor B. Se escogen 3 niveles para observar la tendencia de las curvas a obtener.
  - Nivel 1: 50%
  - Nivel 2: 65%
  - Nivel 3: 80%
- Factor C. Se escogen números de Reynolds que se mantengan en el régimen turbulento, también basados en pruebas preliminares realizadas con el generador de flujo presente en la plataforma de evaluación diseñada y descrita

por la ecuación 17 que está en función de la velocidad y propiedades del fluido aire (2m/s y 2.7 m/s).

- Nivel 1: 4500
- Nivel 2: 5600

### **Ecuación 17**

*Fórmula de número de Reynolds (viscosidad dinámica)*

$$Re = \frac{V D_H}{\nu_{dinamica}}$$

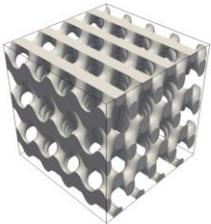
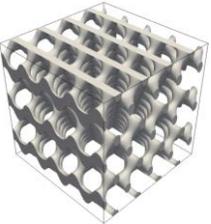
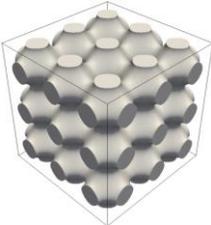
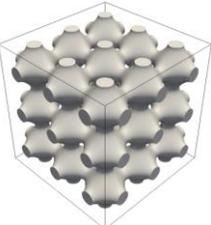
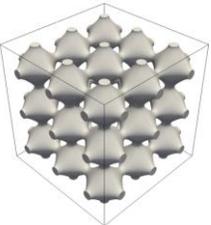
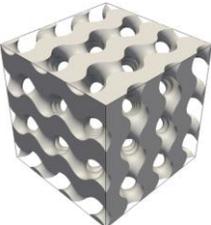
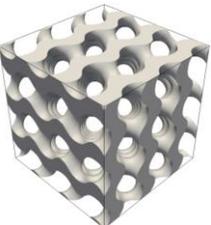
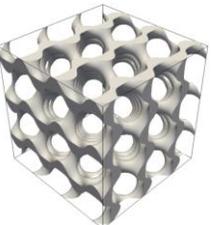
Tomada de *Fundamentos de transferencia de calor* (p. 385), por (Incropera & DeWitt, 1999), School of Mechanical Engineering Purdue University.

### ***Reporte de fundición de intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS***

Siguiendo la metodología planificada, las probetas requeridas para fundir se resumen en la tabla 14.

**Tabla 14**

*Intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS planificados para fundición.*

Tipo TPMS	Porosidad		
	50	65	80
Shwartz Diamante			
Shwartz Primitiva			
Schoen Giroide			

*Nota.* La tabla muestra los intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS planificados para la fundición.

Con las probetas diseñadas, se procede a diseñar los alimentadores y colocarlos utilizando el software MeshMixer. La tabla 15 muestra las impresiones realizadas con la resina Castable Wax.

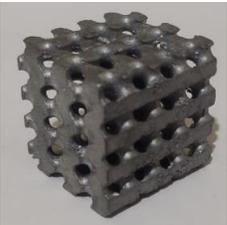
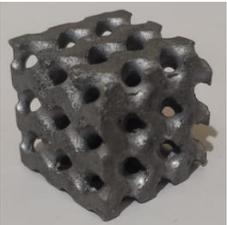
**Tabla 15***Impresión de estructuras TPMS para fundición*

Tipo TPMS	Porosidad		
	50	65	80
Shwartz Diamante			
Shwartz Primitiva			
Schoen Giroide			

*Nota.* La tabla muestra las impresiones realizadas con estereolitografía de las estructuras TPMS con sus alimentadores planificadas a fundición.

Con la ayuda de Fabricio Veintimilla y su metodología aplicada en (Veintimilla Bautista, 2023) se presenta la tabla 16 con los intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS fundidos.

**Tabla 16***Intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS fundidos*

Tipo TPMS	Porosidad		
	50	65	80
Shwartz Diamante			
Shwartz Primitiva			
Schoen Giroide			

Nota. La tabla muestra las fundiciones realizadas de intercambiadores de calor compactos de núcleo TPMS.

La mayoría de probetas fueron fabricadas con éxito excepto la estructura TPMS tipo diamante de porosidad 80. Esto puede deberse a que dicha estructura al ser de alta porosidad, tiene los conductos muy delgados, lo cual dificulta el vertido del aluminio líquido ocasionando que se solidifique antes de llegar a su punto final ocasionando una fundición incompleta. El inconveniente reportado con dicha probeta afectará ligeramente el diseño experimental que se planteará.

### ***Elección del tipo de diseño experimental.***

Debido al fallo presentado en el reporte de fundiciones, la estructura TPMS de tipo diamante al tener distinto número de probetas nos condiciona a fraccionar el experimento total en tres diseños diferentes para cada estructura. El modelo elegido que se llevara a cabo es un diseño factorial, el número de experimentos se define por la ecuación 18.

### **Ecuación 18**

*Fórmula número de experimentos de tipo factorial*

$$\# \text{ Experimentos} = (\text{Niveles}^{\text{Factores}}) * \# \text{ Réplicas}$$

*Nota.* La fórmula describe el número de experimentos en función de cada factor con sus respectivos niveles y número de replicas. Adaptada de *Design and analysis of experiments por* (Montgomery, 2020).

El criterio para escoger el número de replicas se basa en la variabilidad de las mediciones de los sensores, se debe tener un equilibrio entre tiempo de ejecución de experimentos y calidad de experimentos, también hay que cuidar que el diseño factorial tenga suficientes grados de libertad al error, mientras más réplicas, más información para el análisis de las variables de salida, dado que se estudiará el rendimiento térmico de diferentes tipos de estructura TPMS con diferentes números de Reynolds y con un nivel de significancia del 95%, 2 réplicas es un valor adecuado en esta aplicación, ligeramente conservador pero que mantiene un correcto equilibrio entre número de experimentos, tiempo y calidad de experimentos.

Las tablas 17, 18 y 19 resumen el diseño de experimentos factorial de cada tipo de estructura TPMS para aprovechar las fundiciones a pesar del fallo discutido anteriormente.

**Tabla 17***Factores y niveles Shwartz Diamante*

Factor	Unidad	Número de niveles	Nivel de factor		
			Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Porosidad	%	2	50	65	-
Reynolds	-	2	4500	5600	-

Nota. La tabla muestra los factores y niveles del diseño experimental de estructuras TPMS tipo Diamante

**Tabla 18***Factores y niveles Shwartz Primitiva*

Factor	Unidad	Número de niveles	Nivel de factor		
			Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Porosidad	%	2	50	65	80
Reynolds	-	2	4500	5600	-

Nota. La tabla muestra los factores y niveles del diseño experimental de estructuras TPMS tipo Primitiva

**Tabla 19***Tablas y factores Schoen Giroide*

Factor	Unidad	Número de niveles	Nivel de factor		
			Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Porosidad	%	2	50	65	80
Reynolds	-	2	4500	5600	-

Nota. La tabla muestra los factores y niveles del diseño experimental de estructuras TPMS tipo Giroide.

La tabla 20 muestra la cantidad de experimentos que se realizaran para la evaluación del rendimiento térmico de intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS usando la ecuación 18.

**Tabla 20***Resumen de número de experimentos a realizar*

Tipos de estructura TPMS	Número de experimentos
Shwartz Diamante	8
Shwartz Primitiva	12
Schoen Giroide	12
<b>Número total de experimentos</b>	<b>32</b>

Nota. La tabla muestra el número total de experimentos a realizar en sus tres tipos de estructura TPMS.

De esta manera se utilizan todas las probetas que fueron fundidas con éxito para su posterior análisis experimental.

### **Diseño experimental**

Se utilizará el software Minitab (Minitab, s. f.) el cual es una herramienta estadística que permite examinar experimentos con el objetivo de calcular cuales son los factores más significativos que influyen en las variables de salida del sistema. El software toma como entrada los factores definidos con su respectivo número de niveles, nos dará la secuencia aleatorizada de experimentos a realizar, dicho aleatorización es muy importante para burlar el ruido residual que se podría ocasionar gracias a la repetitividad de los experimentos en las mismas condiciones. Las tablas 21, 22 y 23 muestran el orden de ejecución de experimentos para cada tipo de estructura TPMS generadas con el software Minitab.

### **Tabla 21**

*Orden de ejecución de experimentos Shwartz Diamante*

<b>Orden</b>	<b>Corrida</b>	<b>Porosidad</b>	<b>Reynolds</b>
1		65	5600
2		50	4500
3		65	5600
4		65	4500
5		50	4500
6		50	5600
7		65	4500
8		50	5600

*Nota.* La tabla muestra el orden a seguir de ejecución de experimentos para estructura TPMS Diamante.

**Tabla 22***Orden de ejecución de experimentos Shwartz Primitiva*

<b>Orden Corrida</b>	<b>Porosidad</b>	<b>Reynolds</b>
1	50	4500
2	65	4500
3	80	5600
4	65	4500
5	65	5600
6	50	5600
7	80	5600
8	50	5600
9	50	4500
10	80	4500
11	80	4500
12	65	5600

*Nota.* La tabla muestra el orden a seguir de ejecución de experimentos para estructura TPMS Primitiva.

**Tabla 23***Orden de ejecución de experimentos Shoen Giroide*

<b>Orden Corrida</b>	<b>Porosidad</b>	<b>Reynolds</b>
1	80	4500
2	65	4500
3	65	5600
4	80	5600
5	65	5600
6	65	4500
7	80	5600
8	80	4500
9	50	4500
10	50	4500
11	50	5600
12	50	5600

*Nota.* La tabla muestra el orden a seguir de ejecución de experimentos para estructura TPMS Giroide.

## Protocolo experimental

A continuación, se detalla los pasos a seguir para cada experimento haciendo uso de la plataforma de evaluación diseñada y respetando el orden de ejecución planteado. El manual de usuario el cual fue realizado en la plataforma *Kaggle: Machine Learning and Data Science Community* en (Dávila, 2023).

1. Abrir la hoja de datos en Google Sheets.
2. Verificar que los canales de entrada y salida se encuentren correctamente anclados a la pieza central de la plataforma de evaluación, además de su respectiva instrumentación y correcta fijación a los soportes.
3. Tomar el intercambiador de calor del experimento vigente, colocarlo en la pieza central de la plataforma, poner la fuente de calor encima, colocar la tapa y ajustarlo con sus respectivos tornillos.
4. Colocar la pieza auxiliar del anemómetro en condición de velocidad de entrada, encender el controlador del ventilador con el interruptor y mover el potenciómetro hasta llegar al número de Reynolds correspondiente al experimento vigente. (2 m/s para Reynolds 4500 o 2.7 m/s para Reynolds 5600)
5. Colocar la pieza auxiliar del anemómetro en condición de velocidad de salida, conectar la fuente de calor al controlador y encender la plataforma de evaluación en su totalidad, esperar alrededor de 12 minutos a la estabilización del sistema. registrar las temperaturas y velocidad de salida.
6. Con el sistema estable registrar el valor de presión de entrada, cambiar la manguera para registrar la presión de salida.

7. Medir con el termómetro las temperaturas alrededor de las cuatro caras de la pieza central (para calcular pérdidas de convección)
8. Desconectar la fuente de calor y esperar alrededor de 6 minutos a que el sistema vuelva a sus condiciones iniciales con el ventilador encendido.
9. Retirar los pernos de la pieza central, la tapa, la fuente de calor y el intercambiador de calor para el siguiente experimento.
10. Realizar una copia de los datos guardados en la hoja de Google Sheets y guardarla para su futuro análisis.

Una vez finalizado los experimentos, se deberá registrarlos en una hoja de cálculo donde se realizará los siguiente:

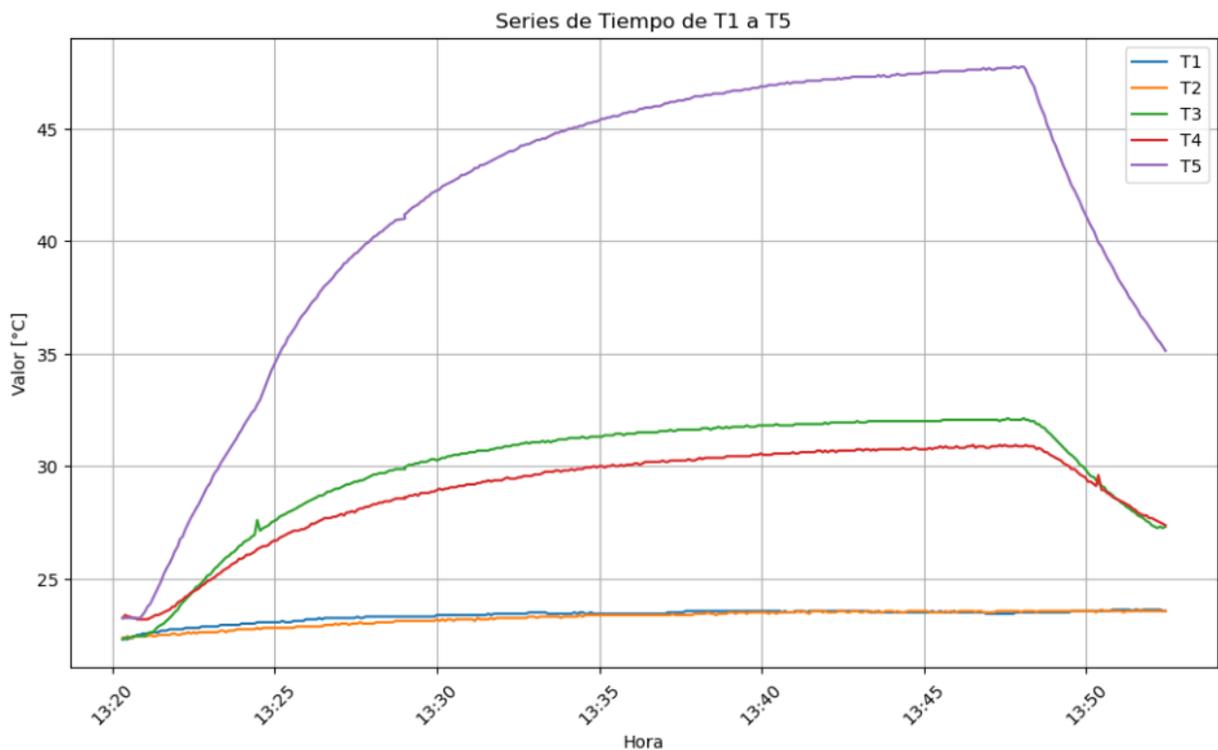
- Calcular densidades y energía interna en función de temperaturas de entrada y salida medidas en el volumen de control.
- Calcular las pérdidas de convección en cada lado de la pieza central con las temperaturas medidas con el termómetro.
- Calcular los flujos máxicos de entrada y salida.
- Calcular la energía de entrada total del sistema y la energía útil.
- Calcular la pérdida de convección total sumando las pérdidas de las cuatro caras de la pieza central.
- Calcular la eficiencia del sistema.
- Calcular las variables de salida.
- Registrar las variables de salida en el software Minitab.

- Analizar los resultados.

Como complemento en el manual de usuario realizado en (Dávila, 2023), se puede observar un código escrito en Python el cual se apoya de la herramienta *matplotlib*, recopila los valores medidos por la plataforma registrados en la hoja de datos en Google Sheets para graficarlos de manera didáctica como se aprecia en la figura 46.

**Figura 46**

*Gráfica de temperaturas en plataforma Kaggle*



*Nota.* La figura muestra un experimento las temperaturas obtenidas de un experimento preliminar realizado con una estructura Shwartz Giroide de porosidad 50% sometida a un número de Reynolds de 4500. Disponible en el manual de usuario en la plataforma Kaggle.

## Ejecución de experimentos

En base al protocolo experimental se ha realizado los experimentos en el orden de corrida adecuado dando como resultados los valores proyectados en las tablas 24 y 25.

**Tabla 24**

*Variables internas medidas por la plataforma de evaluación e instrumentación*

Estructura TPMS	Factores		Variables internas					
	$n$ [%]	$Re$	$V_e$ [m/s]	$V_s$ [m/s]	$P_e$ [Pa]	$P_s$ [Pa]	$T_e$ [°C]	$T_s$ [°C]
Shwartz Diamante	65	5600	2,7	2,2	95576	95467	23,48	30,45
	50	4500	2	1,5	95405	95300	22,88	33,28
	65	5600	2,7	2,2	95716	95606	23,35	29,38
	65	4500	2	1,7	95409	95384	23,01	32,16
	50	4500	2	1,5	95723	95628	23,04	33,15
	50	5600	2,7	2	95478	95328	23,4	31,18
	65	4500	2	1,7	95560	95528	23,11	31,9
	50	5600	2,7	2	95630	95487	23,6	32,63
Shwartz Primitiva	50	4500	2	1,6	95301	95259	21,09	26,98
	65	4500	2	1,8	95598	95557	21,42	25,48
	80	5600	2,7	2,4	95612	95603	22,11	25,02
	65	4500	2	1,8	95526	95499	21,83	26,63
	65	5600	2,7	2,3	95639	95579	22,18	26,09
	50	5600	2,7	2,1	95658	95561	22,37	28,66
	80	5600	2,7	2,4	95086	95057	22	24,5
	50	5600	2,7	2,1	95360	95271	22,38	28,27
	50	4500	2	1,6	95386	95338	22,07	28,91
	80	4500	2	1,9	95337	95304	21,7	24,6
	80	4500	2	1,9	95427	95407	21,95	24,93
	65	5600	2,7	2,3	95459	95402	22,14	25,2
Schoen Giroide	80	4500	2	1,9	95578	95570	20,99	26,15
	65	4500	2	1,8	95641	95606	20,79	27,9
	65	5600	2,7	2,3	95719	95603	21,44	27,23
	80	5600	2,7	2,4	95334	95278	21	25,2
	65	5600	2,7	2,3	95729	95655	21,8	27,59
	65	4500	2	1,8	95261	95169	21,01	27,64
	80	5600	2,7	2,4	95413	95407	21,92	26,44
	80	4500	2	1,9	95318	95282	20,31	24,29
	50	4500	2	1,6	95564	95506	20,57	31,06
	50	4500	2	1,6	95698	95644	20,82	30,78
	50	5600	2,7	2,1	95959	95622	21,27	29,86
	50	5600	2,7	2,1	95963	95637	21,26	29,82

*Nota.* La tabla presenta los valores medidos por la plataforma de evaluación obtenidos en el estado estacionario de cada experimento: Velocidades, presiones y temperaturas del fluido en el volumen de control.

**Tabla 25**

*Variables externas medidas en la plataforma de evaluación con instrumentación.*

Estructura TPMS	Factores		Variables externas				
	$n$ [%]	$Re$	$T_{\infty}$ [°C]	$T_{sup}$ [°C]	$T_{inf}$ [°C]	$T_{fron}$ [°C]	$T_{tras}$ [°C]
Shwartz Diamante	65	5600	23	26	23	25	25
	50	4500	23	25	23	25	25
	65	5600	23	25	23	24	24
	65	4500	23	26	23	24	24
	50	4500	24	27	24	25	25
	50	5600	23	25	23	24	24
	65	4500	23	25	23	25	24
	50	5600	24	26	24	25	25
	50	4500	23	26	23	25	25
	65	4500	23	25	23	24	24
Shwartz Primitivas	80	5600	23	25	23	24	24
	65	4500	23	26	23	24	24
	65	5600	23	26	23	24	24
	50	5600	23	25	23	24	24
	80	5600	23	25	23	24	23
	50	5600	22	25	22	24	23
	50	4500	23	26	23	25	25
	80	4500	23	25	23	25	25
	80	4500	24	27	24	25	25
	65	5600	24	26	24	25	25
Schoen Giroide	80	4500	23	25	23	24	23
	65	4500	23	25	23	24	24
	65	5600	23	25	23	24	24
	80	5600	23	26	23	24	24
	65	5600	23	25	23	25	24
	65	4500	23	25	23	24	24
	80	5600	23	25	23	25	24
	80	4500	22	25	22	24	23
	50	4500	23	26	23	25	25
	50	4500	23	25	23	25	25
50	5600	24	27	24	25	25	
50	5600	24	26	24	25	25	

*Nota.* La tabla presenta las variables externas medidas en la plataforma de evaluación obtenidos en el estado estacionario de cada experimento: Temperaturas en los cuatro lados de la pieza central (pérdidas por convección)

Una vez obtenidos los datos usando la plataforma de evaluación se procede a calcular la densidad y energía interna de flujo apoyándose de las tablas de ingeniería. Ver tabla 26.

**Tabla 26**

*Propiedades del fluido en el volumen de control*

Estructura TPMS	Factores		Propiedades del fluido			
			Entrada		Salida	
			$n$ [%]	$Re$	$\rho_e$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$u_e$ [kJ/kg]
Shwartz Diamante	65	5600	1,1897	211,56	1,1643	216,55
	50	4500	1,1919	211,13	1,1543	218,59
	65	5600	1,1902	211,46	1,1681	215,79
	65	4500	1,1914	211,22	1,1582	217,78
	50	4500	1,1913	211,24	1,1548	218,49
	50	5600	1,1900	211,50	1,1617	217,08
	65	4500	1,1911	211,29	1,1592	217,59
	50	5600	1,1892	211,64	1,1566	218,12
	Shwartz Primitivas	50	4500	1,1987	209,84	1,1768
65		4500	1,1974	210,08	1,1823	212,99
80		5600	1,1948	210,57	1,1840	212,66
65		4500	1,1959	210,37	1,1781	213,81
65		5600	1,1945	210,62	1,1800	213,43
50		5600	1,1938	210,76	1,1707	215,27
80		5600	1,1952	210,49	1,1859	212,29
50		5600	1,1938	210,77	1,1721	214,99
50		4500	1,1950	210,54	1,1698	215,45
80		4500	1,1963	210,28	1,1855	212,36
80		4500	1,1954	210,46	1,1843	212,59
65		5600	1,1947	210,60	1,1833	212,79
Schoen Giroide		80	4500	1,1990	209,77	1,1798
	65	4500	1,1998	209,63	1,1734	214,72
	65	5600	1,1973	210,09	1,1759	214,24
	80	5600	1,1990	209,78	1,1833	212,79
	65	5600	1,1960	210,35	1,1746	214,50
	65	4500	1,1990	209,79	1,1744	214,54
	80	5600	1,1955	210,44	1,1788	213,68
	80	4500	1,2016	209,28	1,1867	212,14
	50	4500	1,2006	209,47	1,1621	216,99

50	4500	1,1997	209,65	1,1631	216,79
50	5600	1,1980	209,97	1,1664	216,13
50	5600	1,1980	209,96	1,1665	216,10

*Nota.* La tabla presenta las propiedades del fluido en el volumen de control: Densidad y energía interna.

Se procede a calcular las pérdidas por convección natural apoyándose de la ecuación 9.

Ver tabla 27.

**Tabla 27**

*Perdidas por convección natural en pieza central de plataforma de evaluación.*

Estructura TPMS	Factores		Perdidas por convección			
	$n$ [%]	$Re$	$\dot{Q}_{sup}$ [W]	$\dot{Q}_{inf}$ [W]	$\dot{Q}_{fron}$ [W]	$\dot{Q}_{tras}$ [W]
<b>Shwartz Diamante</b>	65	5600	0,024	0	0,016	0,016
	50	4500	0,016	0	0,016	0,016
	65	5600	0,016	0	0,008	0,008
	65	4500	0,024	0	0,008	0,008
	50	4500	0,024	0	0,008	0,008
	50	5600	0,016	0	0,008	0,008
	65	4500	0,016	0	0,016	0,008
	50	5600	0,016	0	0,008	0,008
<b>Shwartz Primitivas</b>	50	4500	0,024	0	0,016	0,016
	65	4500	0,016	0	0,008	0,008
	80	5600	0,016	0	0,008	0,008
	65	4500	0,024	0	0,008	0,008
	65	5600	0,024	0	0,008	0,008
	50	5600	0,016	0	0,008	0,008
	80	5600	0,016	0	0,008	0
	50	5600	0,024	0	0,016	0,008
	50	4500	0,024	0	0,016	0,016
	80	4500	0,016	0	0,016	0,016
	80	4500	0,024	0	0,008	0,008
65	5600	0,016	0	0,008	0,008	
<b>Schoen Giroide</b>	80	4500	0,016	0	0,008	0
	65	4500	0,016	0	0,008	0,008
	65	5600	0,016	0	0,008	0,008
	80	5600	0,024	0	0,008	0,008
	65	5600	0,016	0	0,016	0,008

65	4500	0,016	0	0,008	0,008
80	5600	0,016	0	0,016	0,008
80	4500	0,024	0	0,016	0,008
50	4500	0,024	0	0,016	0,016
50	4500	0,016	0	0,016	0,016
50	5600	0,024	0	0,008	0,008
50	5600	0,016	0	0,008	0,008

*Nota.* La tabla presenta los valores de pérdidas de convección natural en la pieza central de la plataforma.

Posteriormente se procede a calcular los flujos máxicos de entrada y salida del volumen de control. Es importante mencionar que la variación de dichos flujos máxicos se encuentra en el orden de las milésimas lo cual valida el balance energético modelado como gas ideal ya que cumple con el principio de la conservación de la masa en un volumen de control. Ver tabla 28.

**Tabla 28**

*Flujos máxicos de entrada y salida del volumen de control.*

Estructura TPMS	Factores		Flujos máxicos	
	$n$ [%]	$Re$	$\dot{m}_e$ [kg/s]	$\dot{m}_s$ [kg/s]
Shwartz Diamante	65	5600	0,002891	0,002305
	50	4500	0,002145	0,001558
	65	5600	0,002892	0,002313
	65	4500	0,002145	0,001772
	50	4500	0,002144	0,001559
	50	5600	0,002892	0,002091
	65	4500	0,002144	0,001774
	50	5600	0,002890	0,002082
	50	4500	0,002158	0,001695
Shwartz Primitivas	65	4500	0,002155	0,001915
	80	5600	0,002903	0,002557
	65	4500	0,002153	0,001908
	65	5600	0,002903	0,002443
	50	5600	0,002901	0,002213
	80	5600	0,002904	0,002562
	50	5600	0,002901	0,002215
	50	4500	0,002151	0,001685

	80	4500	0,002153	0,002027
	80	4500	0,002152	0,002025
	65	5600	0,002903	0,002449
	80	4500	0,002158	0,002017
	65	4500	0,002160	0,001901
	65	5600	0,002910	0,002434
	80	5600	0,002914	0,002556
	65	5600	0,002906	0,002431
<b>Schoen Giroide</b>	65	4500	0,002158	0,001903
	80	5600	0,002905	0,002546
	80	4500	0,002163	0,002029
	50	4500	0,002161	0,001673
	50	4500	0,002159	0,001675
	50	5600	0,002911	0,002204
	50	5600	0,002911	0,002205

*Nota.* La tabla muestra los flujos máxicos de entrada y salida los cuales tienen una variación despreciable, en el orden de las milésimas y que son sensible al cambio de velocidad del fluido al pasar a través de la estructura TPMS.

Analizados los flujos máxicos del volumen de control se realiza el balance energético del sistema junto con su eficiencia. Ver tabla 29.

**Tabla 29**

*Balance energético y eficiencia de sistema de experimentos*

Estructura TPMS	Factores		Balance energético				
	$n$ [%]	$Re$	$e_e$ [W]	$e_{s\text{ útil}}$ [W]	$P_{conv}$ [W]	$P_{fric}$ [W]	$\mu_{sist}$ [%]
Shwartz Diamante	65	5600	846,7612	688,2531	0,056	158,4520	81,28
	50	4500	627,6054	469,2805	0,048	158,2770	74,77
	65	5600	847,0810	688,3915	0,032	158,6576	81,27
	65	4500	627,6277	531,8712	0,04	95,7165	84,74
	50	4500	628,1963	469,7121	0,04	158,4442	74,77
	50	5600	846,5105	625,5181	0,032	220,9604	73,89
	65	4500	627,9110	532,0661	0,04	95,8049	84,74
	50	5600	846,9111	625,9714	0,032	220,9078	73,91
Shwartz Primitivas	50	4500	627,2125	499,9227	0,056	127,2339	79,71
	65	4500	627,7849	562,7388	0,032	65,0141	89,64
	80	5600	846,6351	750,3567	0,032	96,2464	88,63

	65	4500	627,7023	562,7657	0,04	64,8967	89,65
	65	5600	846,7116	719,1851	0,04	127,4866	84,94
	50	5600	846,7873	656,9273	0,032	189,8280	77,58
	80	5600	845,3399	749,1047	0,024	96,2112	88,62
	50	5600	846,0647	656,3314	0,048	189,6853	77,57
	50	4500	627,4779	500,2167	0,056	127,2052	79,72
	80	4500	627,3472	593,4725	0,048	33,8267	94,60
	80	4500	627,5379	593,6851	0,04	33,8128	94,61
	65	5600	846,2680	718,6993	0,032	127,5367	84,93
	80	4500	627,6997	594,0990	0,024	33,5768	94,65
	65	4500	627,7903	563,0725	0,032	64,6858	89,69
	65	5600	846,7913	719,3878	0,032	127,3715	84,95
	80	5600	845,7879	749,6799	0,04	96,0680	88,64
	65	5600	846,8714	719,5438	0,04	127,2875	84,96
	65	4500	627,1314	562,3372	0,032	64,7622	89,67
<b>Schoen Giroide</b>	80	5600	846,1221	750,1321	0,04	95,9500	88,66
	80	4500	627,1543	593,4006	0,048	33,7057	94,62
	50	4500	627,6267	500,6585	0,056	126,9121	79,77
	50	4500	627,8963	500,8313	0,048	127,0170	79,76
	50	5600	847,3483	657,1894	0,04	190,1189	77,56
	50	5600	847,3564	657,2128	0,032	190,1116	77,56

*Nota.* La tabla presenta los parámetros más importantes del balance energético, las pérdidas por fricción han sido estimadas despejando el balance energético para que se cumpla la igualdad.

Finalmente se calculan las variables de salida del diseño experimental para analizarlas con la ayuda del software Minitab. Ver tabla 30.

**Tabla 30**

*Variables de salida de experimentos*

	Estructura TPMS	Factores		Variables de salida		
		$n$ [%]	$Re$	$\Delta T$ [°C]	$\Delta P$ [Pa]	$\eta_{t\acute{e}rmico}$
		65	5600	6,97	109	81,24
		50	4500	10,4	105	74,72
	<b>Shwartz Diamante</b>	65	5600	6,03	110	81,22
		65	4500	9,15	25	84,65
		50	4500	10,11	95	74,71

	50	5600	7,78	150	73,87
	65	4500	8,79	32	84,65
	50	5600	9,03	143	73,89
	50	4500	5,89	42	79,61
	65	4500	4,06	41	89,52
	80	5600	2,91	9	88,53
	65	4500	4,8	27	89,53
	65	5600	3,91	60	84,87
<b>Shwartz Primitivas</b>	50	5600	6,29	97	77,53
	80	5600	2,5	29	88,52
	50	5600	5,89	89	77,53
	50	4500	6,84	48	79,63
	80	4500	2,9	33	94,46
	80	4500	2,98	20	94,46
	65	5600	3,06	57	84,85
	80	4500	5,16	8	94,52
	65	4500	7,11	35	89,59
	65	5600	5,79	116	84,91
	80	5600	4,2	56	88,56
	65	5600	5,79	74	84,91
<b>Schoen Giroide</b>	65	4500	6,63	92	89,58
	80	5600	4,52	6	88,57
	80	4500	3,98	36	94,49
	50	4500	10,49	58	79,70
	50	4500	9,96	54	79,69
	50	5600	8,59	337	77,58
	50	5600	8,56	326	77,58

*Nota.* La tabla muestra las variables de salida del sistema calculadas para su posterior análisis con la ayuda del software Minitab.

### **Análisis experimental**

Se procede a registrar las variables de salida en el software Minitab con el objetivo de analizar las variables más incidentes en el rendimiento térmico de intercambiadoras de calor compactos con núcleo TPMS. La herramienta Minitab nos permite registrar el experimento total fraccionado para darnos una mejor noción del sistema global contemplando los tres factores iniciales: Estructura, porosidad y número de Reynolds además de las interacciones de dichos factores exceptuando la interacción Estructura – Porosidad debido a que en el caso de la

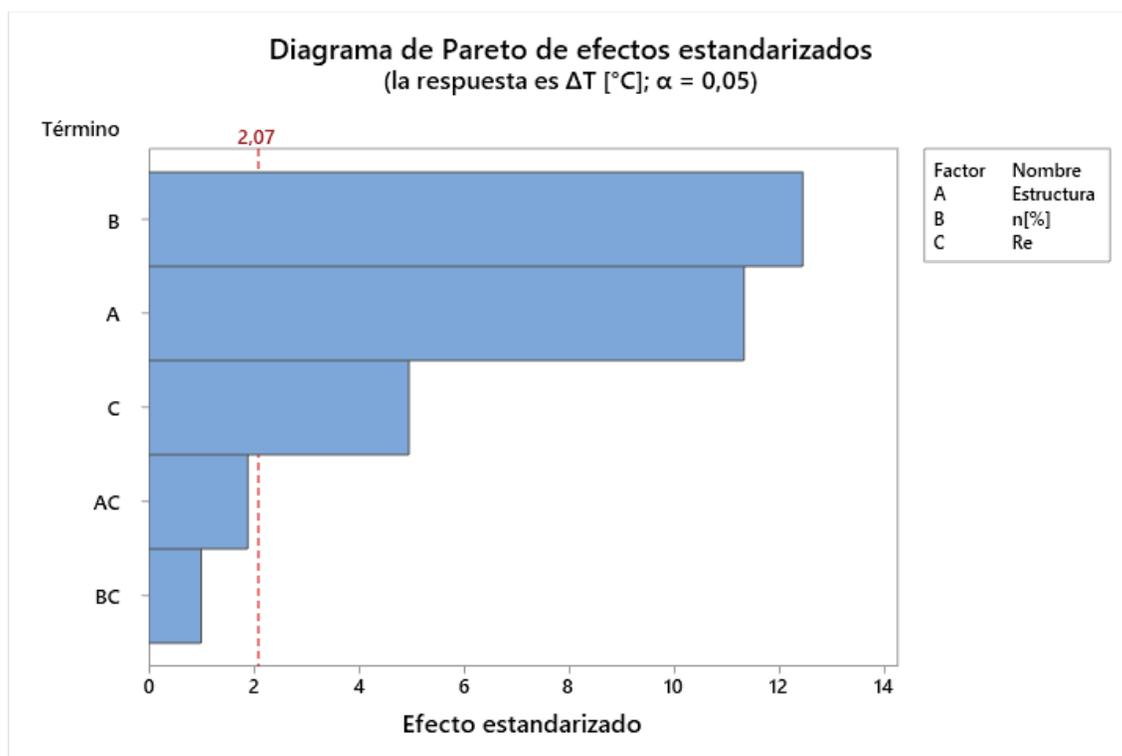
estructura TPMS diamante no cuenta con el mismo número de niveles en dichos factores a diferencia del resto de estructuras.

### ***Diferencia de temperatura***

La figura 47 muestra el diagrama de Pareto para la diferencia de temperatura  $\Delta T$  donde se observa la línea vertical roja de umbral que define el límite de significancia, los valores significantes para la transferencia de calor son: la porosidad, el tipo de estructura y el número de Reynolds, por otro lado, las interacciones entre dichos factores no son significantes.

**Figura 47**

*Diagrama de Pareto diferencia de temperatura*

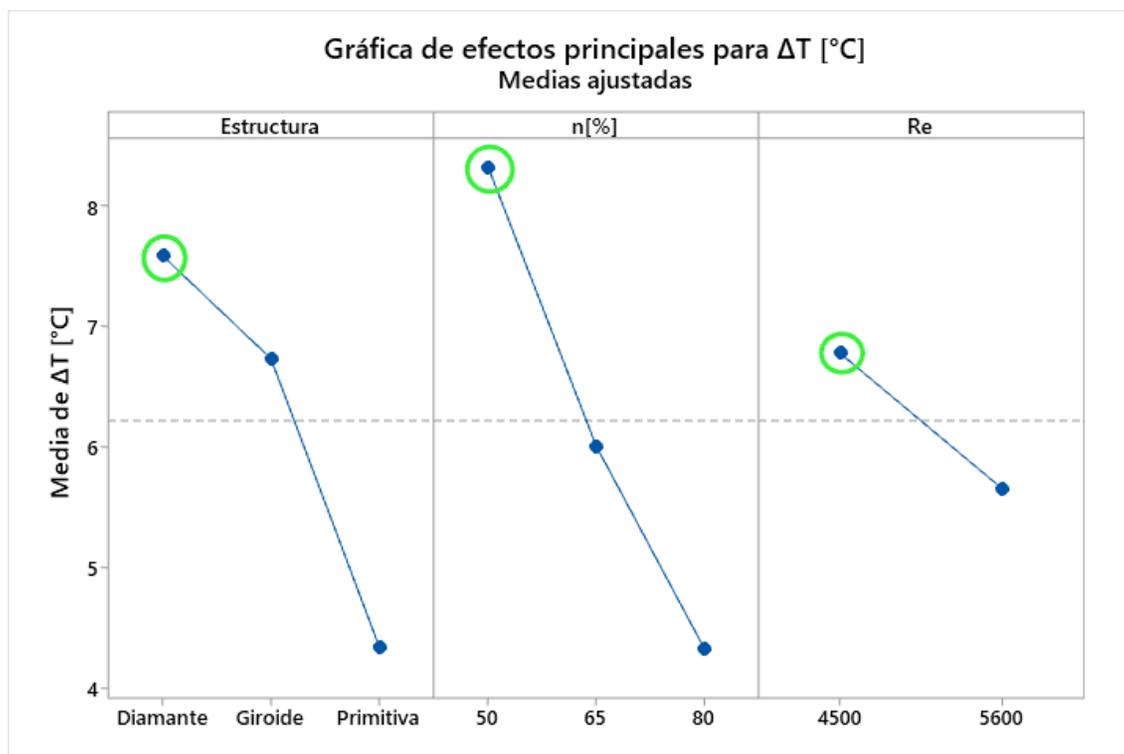


*Nota.* La figura muestra el diagrama de Pareto que nos indica la influencia de los factores en la diferencia de temperatura.

En la figura 48 podemos observar un gráfico de efectos principales para la diferencia de temperatura, si quisiéramos maximizar la diferencia de temperatura en el sistema térmico estudiado se debería elegir una estructura TPMS de tipo diamante, con porosidad de 50% sometido a un número de Reynolds igual a 4500.

**Figura 48**

*Efectos principales de la diferencia de temperatura*



*Nota.* La figura muestra el gráfico de efectos principales para la diferencia de temperatura en función de los factores del diseño experimental, donde se señala la máxima diferencia de temperatura con los círculos verdes.

La estructura TPMS Diamante resulta ser la que genera una diferencia de temperatura mayor, la porosidad se relaciona con el mayor área de contacto entre la estructura y la fuente de calor facilitando la tasa de transferencia, por otro lado el número de Reynolds menor se relaciona con una velocidad de entrada menor, como la transferencia de calor también es

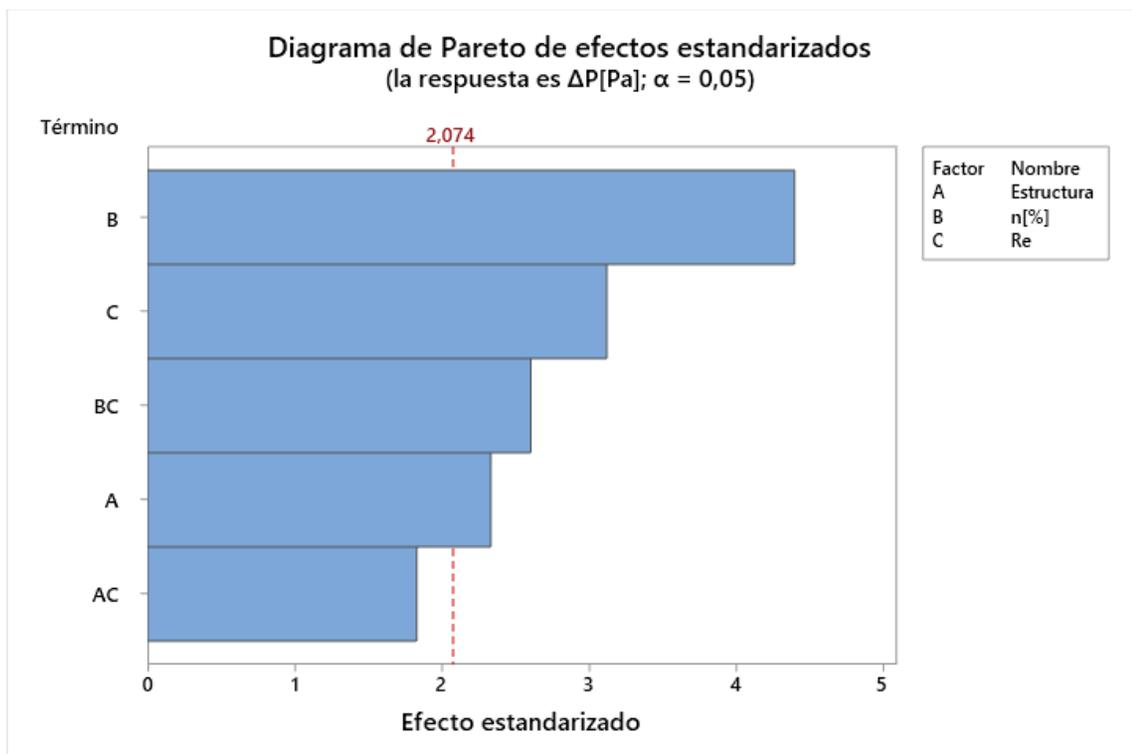
función del tiempo, hace que las partículas del fluido tarden más en recorrer el volumen de control, todo este análisis concuerda con los principios físicos de transferencia de calor resultando en un estudio exitoso de diferencia de temperatura.

### **Caída de Presión**

La figura 49 muestra el diagrama de Pareto para la caída de presión  $\Delta P$  donde las variables significativas son: la porosidad, el número de Reynolds, la combinación de ambos y finalmente el tipo de estructura.

### **Figura 49**

*Diagrama de Pareto caída de presión*

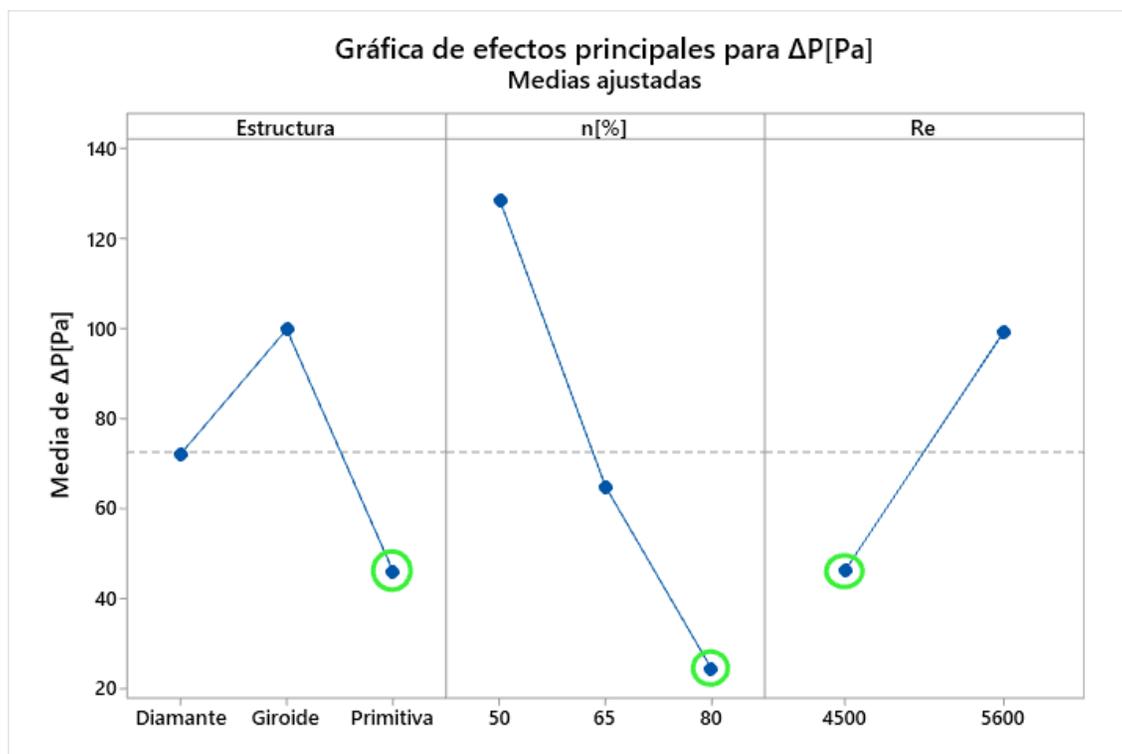


*Nota.* La figura muestra el diagrama de Pareto que nos indica la influencia de los factores en la caída de presión.

En la figura 50 podemos observar un gráfico de efectos principales para la caída de presión, si quisiéramos minimizar la caída de presión en el sistema térmico estudiado se debería elegir una estructura TPMS de tipo primitiva, con porosidad de 80% sometido a un número de Reynolds igual a 4500.

**Figura 50**

*Efectos principales de la caída de presión*



*Nota.* La figura muestra el gráfico de efectos principales para la caída de presión en función de los factores del diseño experimental, donde se señala la mínima caída de presión con los círculos verdes.

La estructura TPMS Primitiva posee una geometría característica que no representa una gran restricción al flujo, una porosidad alta como 80% hace que el fluido tenga mucho menos restricción para recorrer el volumen de control, por otro lado, un número de Reynolds bajo se relaciona directamente con una velocidad de entrada baja, la cual influye directamente en una

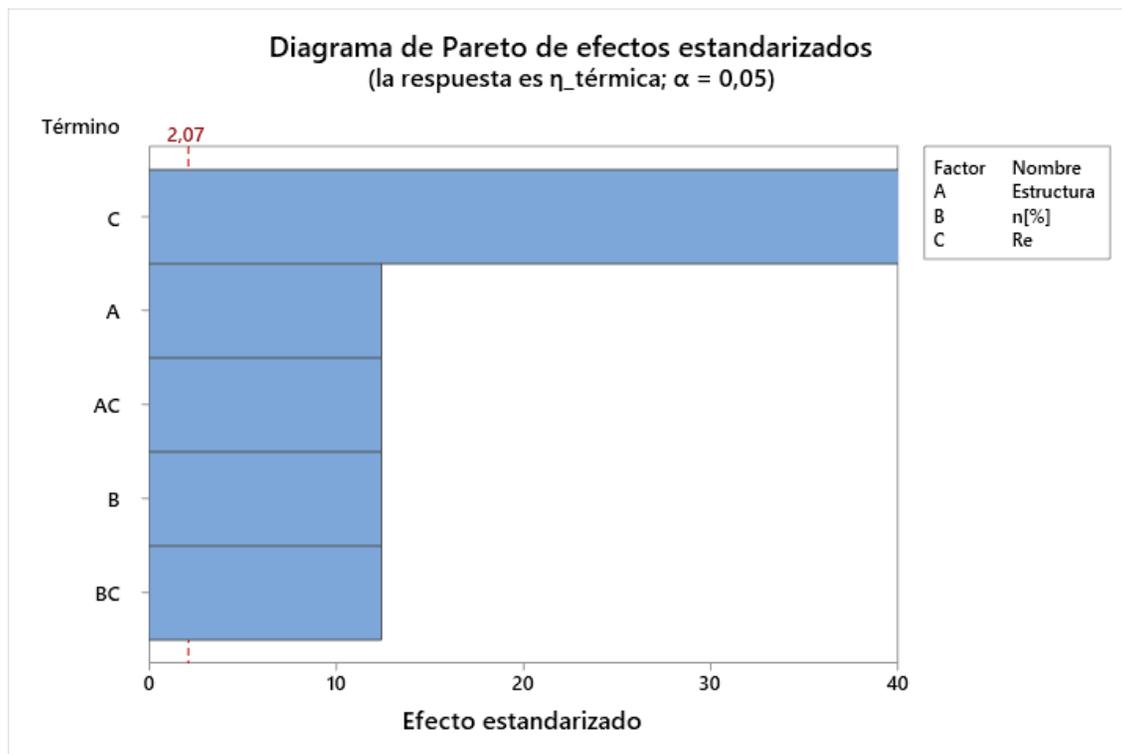
caída de presión baja como se menciona en (Incropera & DeWitt, 1999),(p.442) a mayor velocidad de fluido, mayor caída de presión en una tubería. Los resultados resultan ser muy coherentes y coincidentes con la teoría básica de dinámica de fluidos resultando en un estudio exitoso de caída de presión.

### **Rendimiento**

La figura 51 muestra el diagrama de Pareto para el rendimiento térmico  $\mu_{\text{térmico}}$  donde las variables significativas son: el número de Reynolds, el tipo de estructura, la interacción entre ambas, la porosidad y la interacción porosidad-número de Reynolds. Apreciando que todas las variables son significativas se puede afirmar que los factores elegidos para en el diseño experimental fueron adecuados para la aplicación.

**Figura 51**

*Diagrama de Pareto rendimiento térmico*

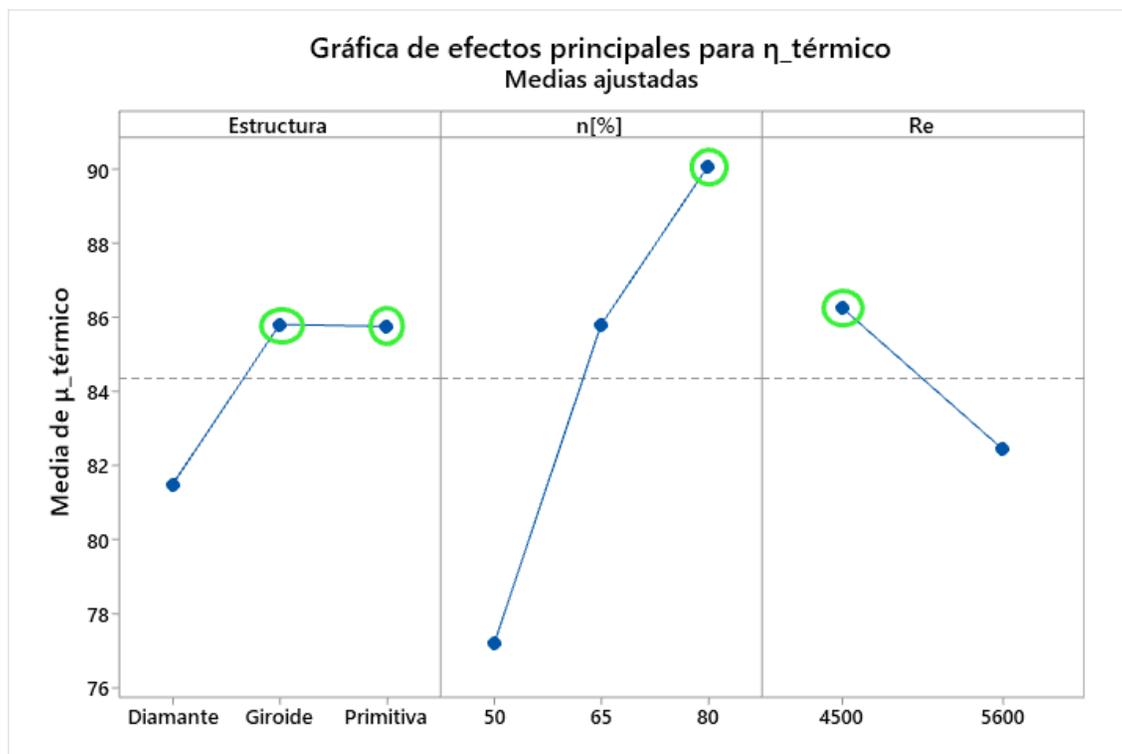


*Nota.* La figura muestra el diagrama de Pareto que nos indica la influencia de los factores en el rendimiento térmico.

En la figura 52 podemos observar un gráfico de efectos principales del rendimiento térmico de los intercambiadores de calor, si quisiéramos maximizarlo en el sistema térmico estudiado se debería elegir una estructura TPMS de tipo giroide o primitiva, con porosidad de 80% sometido a un número de Reynolds igual a 4500. En la figura 53 se aprecia la gráfica de interacciones donde se observa que las interacciones Estructura – Reynolds y Porosidad Reynolds tienen una clara influencia en el rendimiento térmico.

### Figura 52

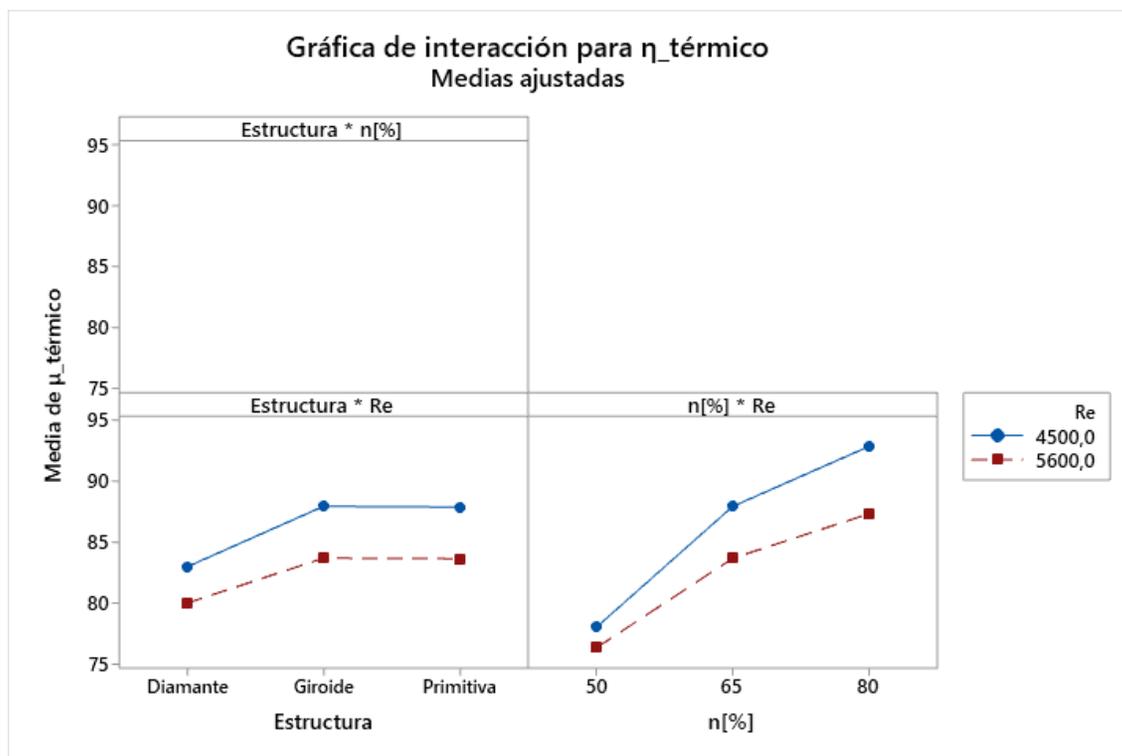
*Efectos principales del rendimiento térmico*



*Nota.* La figura muestra el gráfico de efectos principales para el rendimiento térmico de los intercambiadores de calor en función de los factores del diseño experimental, donde se señala el máximo valor con los círculos verdes.

Figura 53

Gráfico de interacción de factores en rendimiento térmico



*Nota.* La figura muestra el gráfico de interacción de factores para el rendimiento térmico de los intercambiadores de calor. La interacción estructura – porosidad no se puede obtener debido a que en las estructuras TPMS Diamantes, no se cuenta con los tres niveles de porosidad a diferencia de otras estructuras.

La estructura TPMS Primitiva o Giroide posee una geometría característica que no representa una gran restricción al flujo, una porosidad alta como 80% hace que el fluido tenga mucho más espacio para recorrer el volumen de control con una transferencia de calor adecuada, por otro lado, un número de Reynolds bajo se relaciona directamente con una velocidad de entrada baja, la cual influye directamente en una caída de presión baja como se menciona en (Incropera & DeWitt, 1999), (p.442) a mayor velocidad de fluido, mayor caída de presión en una tubería y a su vez logra que el fluido tarde más en recorrer el volumen de

control. Es necesario recordar que este enfoque realizado contempla la energía térmica y la energía de flujo, un intercambiador de calor que tenga la máxima diferencia de temperatura del fluido no necesariamente es la más eficiente ya que penaliza mucho la energía de flujo. En la figura 51 se aprecia claramente la tendencia que tienen los intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS denotando el número de Reynolds menos con un rendimiento térmico mayor.

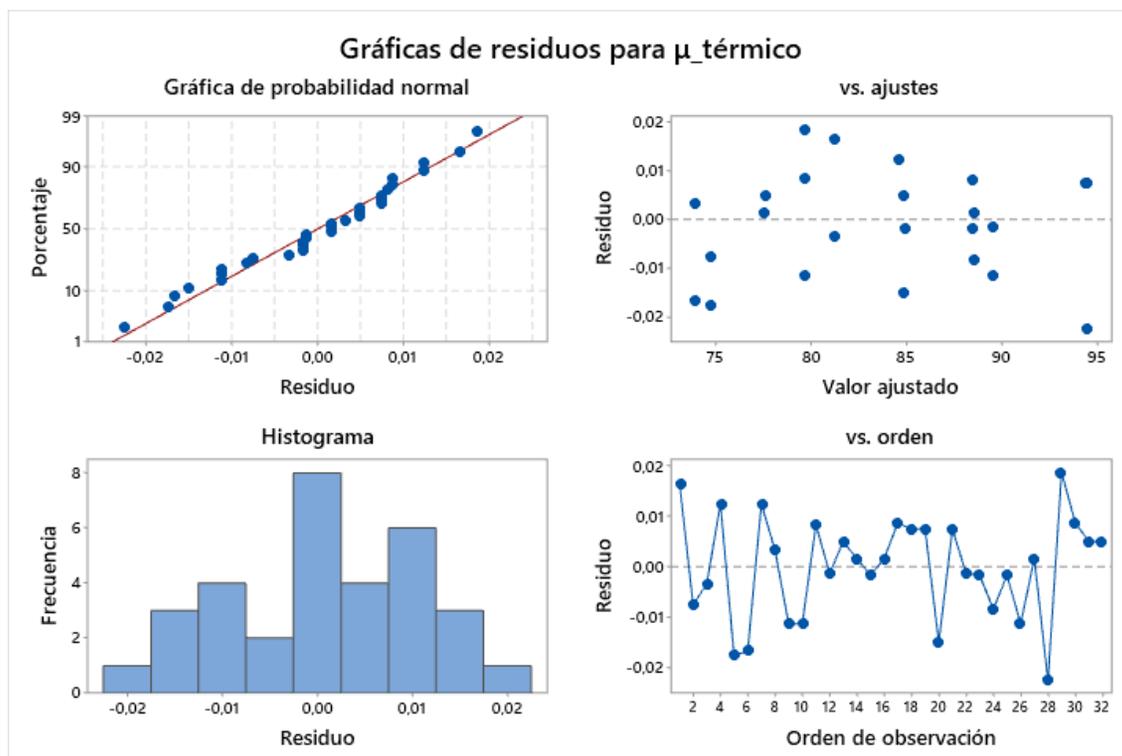
### **Análisis general y validación**

Como se estudió en el análisis experimental, los resultados son muy coherentes y coincidentes con los principios termodinámicos que gobiernan el fenómeno estudiado, sin embargo, es necesario también recurrir a parámetros estadísticos que nos aseguren que dicho análisis experimental es válido.

La figura 54 muestra las distintas gráficas de residuos para el rendimiento térmico de los intercambiadores de calor. Esta gráfica es una gran herramienta estadística ya que se utiliza para determinar si se cumplen los llamados supuestos de los mínimos cuadrados ordinarios, si se cumplen entonces se producirán estimaciones de coeficientes sin sesgo con una varianza mínima.

Figura 54

Gráfico de residuos para rendimiento térmico



*Nota.* La figura refleja los gráficos de residuos para el rendimiento térmico de intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS.

La gráfica de probabilidad normal nos ayuda a comprobar que los resultados tabulados se ajustan o coinciden en la denominada línea de normalidad (línea roja), esto nos permite afirmar que los valores del rendimiento térmico tienen una notable distribución normal.

La gráfica de residuos vs valor ajustado muestra que los residuos también llamados errores no presentan patrones ni tendencias, además de encontrarse dentro de una banda de tal manera que no se formen embudos por lo que se puede afirmar que las varianzas son iguales, es decir, existe una homogeneidad.

El histograma debe apoyar a la gráfica de probabilidad normal formando una campana característica de la distribución normal de errores.

La gráfica de residuos vs orden de observación refleja que los errores no presentan ningún tipo de patrón o tendencia y que los experimentos fueron distribuidos de manera aleatoria lo que implica que son independientes y no correlacionados.

La tabla 31 muestra un parámetro estadístico muy importante denominado R-cuadrado, el cual es una medida estadística que nos indica que tan cerca se encuentran las variables de respuesta tabuladas a una línea de regresión ajustada. Este valor se encuentra entre 0% y 100%, donde un valor muy bajo significa que el modelo no justifica la variabilidad de las variables de salida haciendo énfasis en su media, por otro lado, un valor de 100 % indica lo contrario, que el modelo si justifica la variabilidad de los datos de salida haciendo énfasis en su media, afirmando que dichas variaciones en los datos pueden ser explicadas por el modelo utilizado. Para el objeto de estudio se puede apreciar muy buenos valores de R-cuadrado en la diferencia de temperatura y rendimiento térmico, no obstante, la caída de presión presenta un valor ligeramente menor pero que no compromete significativamente la validación del diseño experimental ya que dicha variable de respuesta mostró ligeras fluctuaciones en las mediciones de los experimentos las cuales tuvieron que ser promediadas para obtener la máxima estabilidad posible. Ver tabla 31.

### Tabla 31

*Valor R-cuadrado para las variables de respuesta*

Variable de salida	R-cuadrado [%]
$\Delta T$	95.59
$\Delta P$	74.85
$\mu_{\text{térmico}}$	$\approx 100$

*Nota.* La tabla muestra los valores R-cuadrado obtenidos para cada variable de salida.

Se presenta la figura 55 donde se aprecia un análisis de varianza para rendimiento térmico de los intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS, donde la última columna con los Valores P son de gran interés, dichos valores los calcula el software Minitab internamente, si dichos valores son menores al valor de significancia de 0.05, el cual corresponde a un nivel de confianza del 95%, entonces la variable de respuesta es significativa para el experimento, por otra parte, si el valor P es mayor al valor de significancia de 0.05, dicha variable de respuesta no es significativa.

### Figura 55

*Análisis de varianza para rendimiento térmico*

#### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	1283,76	142,640	959413,31	0,000
Lineal	5	1253,30	250,661	1685974,51	0,000
Estructura	2	98,37	49,186	330832,59	0,000
n[%]	2	840,68	420,341	2827261,54	0,000
Re	1	104,90	104,905	705602,39	0,000
Interacciones de 2 términos	4	25,28	6,321	42516,97	0,000
Estructura*Re	2	2,11	1,056	7105,70	0,000
n[%]*Re	2	18,61	9,306	62591,77	0,000
Error	22	0,00	0,000		
Falta de ajuste	6	0,00	0,000	2,96	0,039
Error puro	16	0,00	0,000		
Total	31	1283,76			

*Nota.* La figura presenta el análisis de varianza para rendimiento térmico generado en el software Minitab.

Finalmente, al validar el diseño experimental realizado y analizar las gráficas de residuos, es correcto afirmar que las variables de salida tabuladas y calculadas con las variables físicas medidas en los experimentos tienen un comportamiento de distribución

normal, también al estar aleatorizadas las corridas, se genera la denominada burla de ruido del sistema que podría acumularse de experimentos anteriores denotando un experimento de calidad que se rige por los siguientes puntos:

- **Adecuación del modelo.** El modelo captura de manera efectiva las relaciones entre los factores y patrones presentes en los datos.
- **Ausencia de sesgos.** La distribución normal de los residuos sugiere que no existe grandes variaciones entre las observaciones reales y las predicciones del modelo.
- **Precisión de las estimaciones.** Las inferencias estadísticas como el nivel de confianza son válidos y acertados.
- **Reproducibilidad.** Es más probable que los resultados del experimento sean reproducibles y generalizables a otros campos de estudio de contextos similares.

## Capítulo V: Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro

### Conclusiones

Se investigó las variables empleadas para la validación del diseño experimental utilizando balance energético general en un volumen de control para el posterior cálculo del rendimiento térmico de intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS siendo estas la temperatura, presión y velocidad del fluido.

Se diseñó, construyó y desarrolló una plataforma IoT utilizando instrumentación mecatrónica para un eficiente monitoreo in-situ y evaluación del rendimiento térmico de intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS, cumpliendo correctamente con los objetivos establecidos, logrando registrar las variables físicas del proceso en una hoja de datos en Google Sheets accesible desde cualquier lugar o dispositivo con acceso a internet y dando un alcance significativo al tratamiento y análisis de los datos experimentales mediante ciencia de datos.

Se diseñó y fabricó intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS de aluminio por el método de cera perdida, resultando en un éxito del 89%. Dichas probetas fueron diseñadas con diferentes características topológicas que resultaron ser variables de entrada significativas ante el estudio del rendimiento térmico respaldando diversos estudios computacionales presentes en la bibliografía.

Se realizó la evaluación de intercambiadores de calor compactos con núcleo TPMS utilizando la plataforma de evaluación, aplicando diseño experimental factorial, en sus tres variables de salida más importantes: diferencia de temperatura, caída de presión y rendimiento térmico, concluyendo en que la selección de la estructura TPMS depende de las necesidades específicas de la aplicación la cual nos indica la variable de salida que debemos priorizar ya que la estructura TPMS que generan más diferencia de temperatura no aseguran una caída de presión o restricción de flujo mínima, ocasionando una disminución de la eficiencia térmica.

Se desarrolló y validó el diseño experimental planteado con herramientas estadísticas que nos ayudan a determinar de manera práctica, gráfica y sencilla las variables de entrada más significativas al rendimiento térmico de intercambiadoras de calor con núcleo TPMS, además de un correcto control del orden de corridas aleatorizadas que aseguran un experimento válido gracias a su comportamiento de distribución normal proyectados en las gráficas de residuos.

### **Recomendaciones y trabajo futuro**

La fuente de calor utilizada en los experimentos presenta algunas limitaciones como la máxima temperatura en su cara caliente la cual obligó a decrementar la potencia eléctrica suministrada para que se mantenga constante en todos los experimentos, para ello, se recomienda utilizar una fuente de calor con resistencias térmicas las cuales no presentan esta limitación y de la cual se podrían apreciar variables de salida que abarquen mucho más rango en el campo de reproducibilidad de experimentos con contextos similares.

Se recomienda volver a fabricar la probeta fallida reportada, la cual nos dará mayor información de la incidencia de la interacción de los factores del diseño experimental, específicamente la relación Estructura-Porosidad, además dicha probetas podría incrementar el alcance del estudio si se usa con un diseño experimental Taguchi, muy utilizado en ingeniería robusta que ofrece la gran ventaja de reducir las corridas de experimentación reduciendo tiempo y costos sin penalizar la validez del estudio.

Se recomienda intentar evaluar el rendimiento térmico con estructuras TPMS diferentes a las estudiadas, incluyendo la variación de sus características topológicas más importantes como: generación en coordenadas cilíndricas, orientación del núcleo y número de celdas de unidad.

Se recomienda realizar análisis computacionales para complementar los estudios realizados, dichos análisis representan un reto debido a que el diseño de las estructuras TPMS nos abastecen un archivo de malla el cual debe ser procesado con distintas herramientas para luego ser incorporado al software que se planifica utilizar.

Se recomienda reemplazar con sensores las variables físicas medidas externamente con instrumentos (temperaturas externas, velocidad del fluido) a la plataforma de evaluación con el objetivo de optimizar el tiempo de ejecución de los experimentos.

Se recomienda proyectar los estudios realizados al rendimiento térmico de intercambiadores de calor con núcleo TPMS basados en dos corrientes de fluido (agua, aceite, aire) abriendo paso también a simulaciones computacionales más complejas que brinden resultados de alto impacto en la comunidad científica.

Se recomienda dar soporte al manual de usuario el cual fue realizado en la plataforma *Kaggle: Machine Learning and Data Science Community* ya que esta recopila las variables físicas medidas en la plataforma, utilizando lenguaje de programación Python abre muchas posibilidades al análisis estadístico de los experimentos incrementando el alcance de la ciencia de datos orientada al sistema térmico estudiado.

## Bibliografía

- Afshar, M., Anaraki, A. P., Montazerian, H., & Kadkhodapour, J. (2016). Additive manufacturing and mechanical characterization of graded porosity scaffolds designed based on triply periodic minimal surface architectures. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 62, 481-494. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.05.027>
- Andrade Villacis, B. L. (2022). *Estudio de transferencia de calor en estructuras celulares TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) fabricadas mediante estereolitografía* [Bachelor Thesis, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería Mecánica]. <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/29208>
- Anemometro Termometro BENETECH GM816*. (s. f.). Sirio Importaciones. Recuperado 26 de julio de 2023, de <https://www.sirioimportaciones.cl/web/medidores-digitales/420-anemometro-termometro-benotech-gm816.html>
- ANYCUBIC: Innovative & Affordable Desktop 3D Printer Manufacturer*. (s. f.). ANYCUBIC-US. Recuperado 23 de agosto de 2023, de <https://www.anycubic.com/>
- Attarzadeh, R., Rovira, M., & Duwig, C. (2021). Design analysis of the “Schwartz D” based heat exchanger: A numerical study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 177, 121415. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121415>
- Benedetti, M., Du Plessis, A., Ritchie, R. O., Dallago, M., Razavi, N., & Berto, F. (2021). Architected cellular materials: A review on their mechanical properties towards fatigue-tolerant design and fabrication. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 144, 100606. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2021.100606>
- Castable Wax Resin*. (2018). Formlabs. <https://formlabs.com/es/store/materials/castable-wax-resin/>
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Termodinámica* (8ª ed). McGraw Hill.

Creality. (s. f.). *CREALITY - Official Website, Leading 3D Printer Supplier & Manufacturer.*

Recuperado 23 de agosto de 2023, de <https://www.creality.com/>

Dávila, B. (2023). *Manual de usuario Plataforma de Evaluacion IoT.*

<https://kaggle.com/code/lbrandonl/manual-de-usuario-plataforma-de-evaluacion-iot>

*DHT11 Datasheet.* (s. f.). Recuperado 25 de julio de 2023, de

<https://html.alldatasheet.com/html-pdf/1132088/ETC2/DHT11/109/1/DHT11.html>

*DS18B20 datasheet.* (s. f.). Recuperado 25 de julio de 2023, de

<https://html.alldatasheet.com/html-pdf/58557/DALLAS/DS18B20/181/1/DS18B20.html>

*ESP32 Datasheet.* (2019). [https://html.alldatasheet.com/html-](https://html.alldatasheet.com/html-pdf/1148023/ESPRESSIF/ESP32/564/1/ESP32.html)

[pdf/1148023/ESPRESSIF/ESP32/564/1/ESP32.html](https://html.alldatasheet.com/html-pdf/1148023/ESPRESSIF/ESP32/564/1/ESP32.html)

Fuente de poder ATX INS P4-800W. (s. f.). *TECNIT.* Recuperado 26 de julio de 2023, de

<https://tecnit.com.ec/producto/fuente-de-poder-atx-ins-p4-800w-de-800w-conectores-sata-ide-38a/>

Gawronska, E., & Dyja, R. (2021). A Numerical Study of Geometry's Impact on the Thermal and Mechanical Properties of Periodic Surface Structures. *Materials*, 14(2), 427.

<https://doi.org/10.3390/ma14020427>

*High Temp Resin.* (2018). Formlabs. <https://formlabs.com/es/store/materials/high-temp-resin/>

*Impresión 3D: Resina de fotopolímero frente a filamento | Liqcreate.* (s. f.). Recuperado 31 de

julio de 2023, de <https://www.liqcreate.com/es/art%C3%ADculos-de-apoyo/resina-de-impresi%C3%B3n-3d-vs-filamento/>

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor.* Pearson Educación.

*LM35 Datasheet.* (2011). [https://html.alldatasheet.com/html-](https://html.alldatasheet.com/html-pdf/517588/TI1/LM35/51/1/LM35.html)

[pdf/517588/TI1/LM35/51/1/LM35.html](https://html.alldatasheet.com/html-pdf/517588/TI1/LM35/51/1/LM35.html)

- Martínez-Vega, J. P., Luviano-Ortiz, J. L., & Cano-Banda, F. (2018). PROPUESTA DE UN NUEVO DISIPADOR DE CALOR EN LÁMPARAS LED. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 4(1), Article 1.
- Minitab. (s. f.). *Herramientas estadísticas, de análisis de datos y de mejora de procesos* | Minitab. Recuperado 23 de agosto de 2023, de <https://www.minitab.com/es-mx/>
- Módulo controlador de motores L298N. (s. f.). Recuperado 26 de julio de 2023, de <https://www.prometec.net/l298n/>
- Montgomery, D. C. (2020). *Design and analysis of experiments* (Tenth edition). Wiley.
- MPS20N0040D-S Datasheet. (s. f.). Recuperado 26 de julio de 2023, de <https://html.alldatasheet.es/html-pdf/1134997/ETC2/MPS20N0040D-S/117/1/MPS20N0040D-S.html>
- MPX5010DP Datasheet. (s. f.). Recuperado 26 de julio de 2023, de <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/5185/MOTOROLA/MPX5010DP/260/1/MPX5010DP.html>
- MPX5700 Datasheet. (s. f.). Recuperado 26 de julio de 2023, de <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/5185/MOTOROLA/MPX5700/258/1/MPX5700.html>
- Pagac, M., Hajnys, J., Ma, Q.-P., Jancar, L., Jansa, J., Stefek, P., & Mesicek, J. (2021). A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing. *Polymers*, 13(4), 598. <https://doi.org/10.3390/polym13040598>
- Pollak, A., Hilarowicz, A., Walczak, M., & Gąsiorek, D. (2020). A Framework of Action for Implementation of Industry 4.0. An Empirically Based Research. *Sustainability*, 12(14), 5789. <https://doi.org/10.3390/su12145789>
- PROSKIT MT-1280 User Manual. (2012). <https://www.manualslib.com/manual/877771/Proskit-Mt-1280.html#product-MT-1280>

- Puebla Montero, C. J. (2023). *Monitoreo de la fabricación de los intercambiadores compactos usando el método de fundición por cera perdida* [BachelorThesis, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería Mecatrónica.].  
<http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/36137>
- Restrepo, S., Ocampo, S., Ramírez, J. A., Paucar, C., & García, C. (2017). Mechanical properties of ceramic structures based on Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) processed by 3D printing. *Journal of Physics: Conference Series*, 935, 012036.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/935/1/012036>
- Schoen, A. H. (1970). *Infinite periodic minimal surfaces without self-intersections* (C-98).  
<https://ntrs.nasa.gov/citations/19700020472>
- Şevik, S., & Özdilli, Ö. (2021). Experimental and numerical analysis of the splay impact on the performance of splayed cross-cut fin heat sink. *International Journal of Thermal Sciences*, 170, 107101. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107101>
- Shi, Z., Xie, Y., Xue, W., Chen, Y., Fu, L., & Xu, X. (2020). Smart factory in Industry 4.0. *Systems Research and Behavioral Science*, 37(4), 607-617.  
<https://doi.org/10.1002/sres.2704>
- Shin, J., Kim, S., Jeong, D., Lee, H. G., Lee, D., Lim, J. Y., & Kim, J. (2012). Finite Element Analysis of Schwarz P Surface Pore Geometries for Tissue-Engineered Scaffolds. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2012/694194>
- Sullivan, C., & Kaszynski, A. (2019). PyVista: 3D plotting and mesh analysis through a streamlined interface for the Visualization Toolkit (VTK). *Journal of Open Source Software*, 4(37), 1450. <https://doi.org/10.21105/joss.01450>
- Sunada, T. (2013). *Topological crystallography: With a view towards discrete geometric analysis*. Springer.
- Trujillo Freire, I. A. (2023). *Establecimiento de los dominios físicos a partir de estructuras TPMS matemáticamente definidas para obtener intercambiadores de calor compactos*

- reconfigurables* [BachelorThesis, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería Mecatrónica.]. <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/36130>
- Universidad Industrial de Santander, Colombia, Meneses-Prado, L. P., Díaz-Pinilla, L. I., Universidad Industrial de Santander, Colombia, González, G., & Universidad Industrial de Santander, Colombia. (2018). Dinámica de fluidos computacional en el análisis de intercambiadores de calor de coraza y tubos. *Revista UIS Ingenierías*, 18(2), 237-244. <https://doi.org/10.18273/revuin.v18n2-2019022>
- Veintimilla Bautista, F. (2023). *Fabricación de intercambiadores compactos usando el método de fundición por cera perdida* [BachelorThesis, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería Mecatrónica.]. <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/36139>
- Velásquez Santos, C. O., & Ramírez Echavarría, J. L. (2012). *Fundamentos de circuitos eléctricos*. Instituto Tecnológico Metropolitano.
- Velazquez, C. (2013). *Monitoreo y evaluación del desempeño de los intercambiadores de calor en el tren de precalentamiento de una planta hidrosulfuradora de naftas en la refinería Ing. Antonio Dovalí Jaime*. [Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutierrez]. <http://repositorio.digital.tuxtla.tecnm.mx/xmlui/handle/123456789/715>.
- Vilarrubí, M., Riera, S., Ibañez, M., Omri, M., Laguna, G., Fréchette, L., & Barrau, J. (2018). Experimental and numerical study of micro-pin-fin heat sinks with variable density for increased temperature uniformity. *International Journal of Thermal Sciences*, 132, 424-434. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.06.019>
- Walker, J. M., Bodamer, E., Kleinfehn, A., Luo, Y., Becker, M., & Dean, D. (2017). Design and mechanical characterization of solid and highly porous 3D printed poly(propylene fumarate) scaffolds. *Progress in Additive Manufacturing*, 2(1-2), 99-108. <https://doi.org/10.1007/s40964-017-0021-3>

## Apéndices