



**Estudio de transferencia de calor en estructuras celulares TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) fabricadas mediante estereolitografía**

Andrade Villacis, Brandon Leonardo

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de Integración Curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Ing. Olmedo Salazar José Fernando Msc.

18 de marzo del 2022

## Reporte de Verificación de Contenido



Trabajo de Titulación.pdf

Scanned on: 0:39 January 28, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	345
Words with Minor Changes	134
Paraphrased Words	176
Ommited Words	0



Trabajo de Titulación.pdf  
JOSE FERNANDO  
OLMEDO SALAZAR



Website | Education | Businesses



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de integración curricular, “**Estudio de transferencia de calor en estructuras celulares TPMS (Triplay Periodic Minimal Surface) fabricadas mediante estereolitografía**” fue realizado por el señor **Andrade Villacis, Brandon Leonardo** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

**Sangolquí, 28 de Enero de 2022**

Firma:



.....  
**Ing. Olmedo Salazar, José Fernando**

C. C: 1708186307



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Andrade Villacis, Brandon Leonardo**, con cédula de ciudadanía n° 172505209-4 declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Estudio de transferencia de calor en estructuras celulares TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) fabricadas mediante estereolitografía** 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.

Sangolquí, 28 de Enero de 2022

Firma

**Andrade Villacis, Brandon Leonardo**

C.C.: 172505209 – 4



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo **Andrade Villacis, Brandon Leonardo**, con cédula de ciudadanía n° 172505209 – 4 autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Estudio de transferencia de calor en estructuras celulares TPMS (Triplay Periodic Minimal Surface) fabricadas mediante estereolitografía** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

**Sangolquí, 28 de Enero de 2022**

Firma

**Andrade Villacis, Brandon Leonardo**

C.C.: 172505209 – 4

### **Dedicatoria**

A mis padres Carlos y Carmen, a mi hermano Esteban y a mi abuelita Isabel por su incondicional amor, apoyo y guía en todo lo que duró mi formación académica ya que sin ellos esto no habría sido posible. La culminación de mis estudios universitarios representa un logro más en mi vida y detrás de ello está el esfuerzo de toda mi familia que inculcaron en mí la perseverancia para nunca rendirme ante cualquier adversidad que se presente en el camino y la dedicación necesaria para alcanzar un objetivo o meta propuesta.

**Andrade Villacís, Brandon Leonardo**

## **Agradecimiento**

Agradezco a mi madre Carmen por el ejemplo que ha inculcado en mí para siempre seguir adelante a pesar de las dificultades o adversidades que se presenten a lo largo del camino para mi formación académica.

Agradezco a mi padre Carlos por su ayuda incondicional para con la realización de este proyecto de grado, lo cual me aportó ideas valiosas como guía tanto para mi formación personal como profesional.

Agradezco a mi abuelita Isabel por la incondicional y constante ayuda moral, así como sus consejos que me han servido tanto para mi formación académica como personal y como motivación para seguir adelante por ella.

Agradezco a mi hermano Esteban por su incondicional ayuda y apoyo para la realización de este proyecto.

**Andrade Villacís, Brandon Leonardo**

## Índice de Contenido

Reporte de Verificación de Contenido .....	2
Certificado .....	3
Autoría de Responsabilidad.....	4
Autorización de Publicación.....	5
Dedicatoria .....	6
Agradecimiento .....	7
Índice de Contenido.....	8
Índice de tablas .....	12
Índice de figuras .....	14
Terminología .....	18
Resumen.....	19
Abstract .....	20
Capítulo I.....	21
Generalidades .....	21
Introducción .....	21
Antecedentes.....	22
Justificación e Importancia.....	23
Alcance del Proyecto .....	24
Objetivos.....	25
Objetivo General .....	25
Objetivos Específicos.....	25
Metodología.....	25
Capítulo II.....	26
Marco Teórico .....	26
Superficie Mínima Triple Periódica (TPMS) .....	26
Clasificación.....	27
Schwarz D.....	27
Schwarz P.....	28
Gyroid.....	29
Fabricación .....	30
Estereolitografía.....	31
Fusión selectiva con láser.....	34
Modelado por deposición fundida.....	36



Software ANSYS .....	38
Steady – State thermal.....	40
Definición de material.....	40
Definición temperatura inicial. ....	42
Mallado necesario para el análisis de estado estacionario. ....	42
Condiciones iniciales para el análisis. ....	44
Resultados del análisis térmico de estado estable. ....	44
Fluent.....	45
Modelado CFD.....	46
Mallado necesario para el análisis CFD. ....	47
Condiciones iniciales para el análisis. ....	47
Cálculo de soluciones para el análisis.....	48
Análisis de resultados en Ansys fluent. ....	50
Capítulo III.....	51
Análisis Computacional .....	51
Ensayo de simulación de conducción de calor con un mismo tamaño .....	51
Simulación de conducción de calor en Gyroide en un lado .....	51
Simulación de conducción de calor en Schwarz D en un lado.....	54
Simulación de conducción de calor en Schwarz P en un lado.....	55
Simulación de conducción de calor en Gyroide en dos lados.....	56
Simulación de conducción de calor en Schwarz D en dos lados .....	57
Simulación de conducción de calor en Schwarz P en dos lados .....	58
Resultados ensayo de simulación de conducción de calor .....	59
Ensayo de simulación de conducción de calor en distintos tamaños .....	61
Simulación de conducción de calor en Gyroide en un lado .....	61
Gyroide tamaño intermedio con temperatura en un lado. ....	61
Gyroide tamaño inferior con temperatura en un lado.....	63
Gyroide tamaño superior con temperatura en un lado.....	65
Simulación de conducción de calor en Schwarz D en un lado.....	67
Schwarz D tamaño intermedio con temperatura en un lado. ....	68
Schwarz D tamaño inferior con temperatura en un lado. ....	70
Schwarz D tamaño superior con temperatura en un lado. ....	72
Simulación de conducción de calor en Schwarz P en un lado.....	74
Schwarz P tamaño intermedio con temperatura en un lado.....	74
Schwarz P tamaño inferior con temperatura en un lado. ....	76

Schwarz P tamaño superior con temperatura en un lado. ....	78
Simulación de conducción de calor en Gyroide en dos lados.....	80
Gyroide tamaño intermedio con temperatura en dos lados.....	80
Gyroide tamaño inferior con temperatura en dos lados. ....	81
Gyroide tamaño superior con temperatura en dos lados. ....	82
Simulación de conducción de calor en Schwarz D en dos lados.....	83
Schwarz D tamaño intermedio con temperatura en dos lados.....	83
Schwarz D tamaño inferior con temperatura en dos lados. ....	84
Schwarz D tamaño superior con temperatura en dos lados.....	85
Simulación de conducción de calor en Schwarz P en dos lados.....	86
Schwarz P tamaño intermedio con temperatura en dos lados. ....	86
Schwarz P tamaño inferior con temperatura en dos lados.....	87
Schwarz P tamaño superior con temperatura en dos lados.....	88
Resultados ensayo simulación de conducción de calor en distintos tamaños ..	89
Ensayo de simulación de flujo de calor .....	91
Simulación de flujo de calor en Gyroide .....	91
Simulación de flujo de calor en Gyroide intermedio.....	91
Simulación de flujo de calor en Gyroide inferior.....	97
Simulación de flujo de calor en Gyroide superior.....	99
Simulación de flujo de calor en Schwarz D .....	101
Simulación de flujo de calor en Schwarz D intermedio. ....	101
Simulación de flujo de calor en Schwarz D inferior.....	103
Simulación de flujo de calor en Schwarz D superior. ....	105
Simulación de flujo de calor en Schwarz P.....	107
Simulación de flujo de calor en Schwarz P intermedio. ....	108
Simulación de flujo de calor en Schwarz P inferior. ....	110
Simulación de flujo de calor en Schwarz P superior. ....	112
Resultados ensayo simulación de flujo de calor.....	114
Capítulo IV .....	118
Método y Materiales .....	118
Banco de pruebas.....	119
Materiales utilizados .....	126
Medición de temperatura para fluido de trabajo .....	127
Sensor de temperatura DS18B20.....	128
Medición de presión.....	128

Sensor de presión MPX 5500 Case 867C – 05. ....	129
Medición de velocidad de aire.....	130
Anemómetro Thermo – Anemometer AN 100. ....	130
Control de temperatura .....	131
Control de velocidad de fluido de trabajo .....	133
Fuente de alimentación.....	133
Impresión mediante Estereolitografía.....	134
Curado posterior a impresión mediante Estereolitografía.....	135
Dispositivo de adquisición de datos .....	135
Material adicional utilizado .....	136
Montaje en banco de pruebas.....	137
Impresión estructuras celulares .....	137
Conexión de equipos .....	140
Maqueta de experimentos .....	141
Capítulo V .....	142
Diseño de Experimentos .....	142
Diseño experimental .....	142
Análisis experimental.....	145
Análisis variación de temperatura .....	147
Selección experimento más representativo para Delta T .....	154
Simulación computacional experimento representativo para Delta T .....	157
Comparación resultados para variación de temperatura .....	161
Análisis variación de presión.....	165
Selección experimento más representativo para Delta P .....	169
Simulación computacional experimento representativo para Delta P .....	170
Comparación de resultados para variación de presión.....	173
Capítulo VI .....	185
Conclusiones y Recomendaciones.....	185
Conclusiones .....	185
Recomendaciones .....	187
Bibliografía .....	189
Anexos .....	193

## Índice de tablas

Tabla 1. Herramientas de Mallado en Ansys .....	43
Tabla 2. Características de Ansys Fluent .....	45
Tabla 3. Modelos disponibles en CFD .....	48
Tabla 4. Resultados Gyroide .....	53
Tabla 5. Resultados Schwarz D.....	55
Tabla 6. Resultados Schwarz P.....	56
Tabla 7. Resultados Gyroide .....	57
Tabla 8. Resultados Schwarz D.....	58
Tabla 9. Resultados Schwarz P.....	59
Tabla 10. Resultados Ensayo 1 .....	60
Tabla 11. Resultados Gyroide Intermedio (1T) .....	63
Tabla 12. Resultados Gyroide Inferior (1T).....	65
Tabla 13. Resultados Gyroide Superior (1T).....	67
Tabla 14. Resultados Schwarz D Intermedio (1T) .....	70
Tabla 15. Resultados Gyroide Inferior (1T).....	72
Tabla 16. Resultados Schwarz D Superior (1T).....	74
Tabla 17. Resultados Schwarz P Intermedio (1T).....	76
Tabla 18. Resultados Gyroide Intermedio (2T) .....	81
Tabla 19. Resultados Gyroide Inferior (2T).....	82
Tabla 20. Resultados Gyroide Superior (2T).....	83
Tabla 21. Resultados Schwarz D Intermedio (2T) .....	84
Tabla 22. Resultados Gyroide Inferior (2T).....	85
Tabla 23. Resultados Schwarz D Superior (2T).....	86
Tabla 24. Resultados Schwarz P Intermedio (2T).....	87
Tabla 25. Resultados Ensayo 2.....	89
Tabla 26. Temperatura de Salida de Aire en Gyroide Intermedio .....	97
Tabla 27. Temperatura de Salida de Aire en Gyroide Inferior .....	99
Tabla 28. Temperatura de Salida de Aire en Gyroide Superior.....	101
Tabla 29. Temperatura de Salida de Aire en Schwarz D Intermedio.....	103
Tabla 30. Temperatura de Salida de Aire en Schwarz D inferior.....	105
Tabla 31. Temperatura de Salida de Aire en Schwarz D Superior .....	107
Tabla 32. Temperatura de Salida de Aire en Schwarz P Intermedio.....	110
Tabla 33. Temperatura de Salida de Aire en Schwarz P inferior.....	112
Tabla 34. Temperatura de Salida de Aire en Schwarz P Superior .....	114
Tabla 35. Resultados Ensayo 3.....	114
Tabla 36. Resumen Ensayos Realizados .....	117
Tabla 37. Ponderaciones Matriz de Priorización .....	126
Tabla 38. Ponderación de Criterios .....	126
Tabla 39. Alternativas Sensores de Temperatura.....	127
Tabla 40. Ponderación de Alternativas de Sensor de Temperatura .....	127
Tabla 41. Ficha Técnica Sensor DS18B20 .....	128
Tabla 42. Alternativas Sensores de Presión .....	129
Tabla 43. Ponderación de Alternativas de Sensor de Presión .....	129
Tabla 44. Ficha Técnica Sensor CASE 867C - 05 .....	130
Tabla 45. Ficha Técnica Thermo – Anemometer AN 100 .....	131

Tabla 46. Ficha Técnica Celda Peltier .....	131
Tabla 47. Ficha Técnica Controlador .....	132
Tabla 48. Ficha Técnica Ventiladores.....	133
Tabla 49. Ficha Técnica Fuente de Alimentación .....	134
Tabla 50. Ficha Técnica Impresora .....	134
Tabla 51. Ficha Técnica Dispositivo de Post-Curado.....	135
Tabla 52. Ficha Técnica Arduino Nano.....	136
Tabla 53. Parámetros Método Factorial.....	143
Tabla 54. Cálculo Independencia de Malla .....	157
Tabla 55. Resultados Simulación Experimentos para Delta T .....	162
Tabla 56. Temperatura promedio experimento representativo.....	163
Tabla 57. Resultados Simulación Experimentos para Delta P .....	174
Tabla 58. Caída de presión promedio experimento simulado .....	175

## Índice de figuras

Figura 1. Membranas en Infill de SpaceClaim .....	22
Figura 2. Superficie Mínima Triple Periódica en sistemas biológicos .....	26
Figura 3. Superficie Schwarz D .....	28
Figura 4. Superficie Schwarz P .....	29
Figura 5. Superficie Gyroid .....	30
Figura 6. Impresora 3D Formlabs .....	32
Figura 7. Proceso de fabricación SLA .....	33
Figura 8. Proceso de fabricación SLM .....	35
Figura 9. Impresora de FDM .....	37
Figura 10. Proceso de fabricación FDM .....	38
Figura 11. Análisis de fluidos y reacciones térmicas en ANSYS .....	39
Figura 12. Selección de Material en Steady - State Thermal .....	41
Figura 13. Definición de temperatura inicial para estado estacionario .....	42
Figura 14. Condiciones Iniciales de Temperatura .....	44
Figura 15. Resultados del análisis térmico de estado estable .....	45
Figura 16. Descripción General de Modelado CFD .....	46
Figura 17. Modelos de Ansys Fluent .....	47
Figura 18. Cálculo de Soluciones en Ansys Fluent .....	49
Figura 19. Estructura TPMS Gyroide .....	52
Figura 20. Condiciones Iniciales de la Probeta Gyroide .....	52
Figura 21. Simulación Gyroide temperatura en 1 lado .....	53
Figura 22. Estructura TPMS Schwarz D .....	54
Figura 23. Simulación Schwarz D temperatura en 1 lado .....	54
Figura 24. Estructura TPMS Schwarz P .....	55
Figura 25. Simulación Schwarz P temperatura en 1 lado .....	56
Figura 26. Simulación Gyroide .....	57
Figura 27. Simulación Schwarz D temperatura en 2 lados .....	58
Figura 28. Simulación Schwarz P temperatura en 2 lados .....	59
Figura 29. Parámetros Gyroide Intermedio .....	62
Figura 30. Estructura Gyroide Intermedio .....	62
Figura 31. Simulación Gyroide Intermedio temperatura en 1 lado .....	63
Figura 32. Parámetros Gyroide Inferior .....	64
Figura 33. Estructura Gyroide Inferior .....	64
Figura 34. Simulación Gyroide Inferior temperatura en 1 lado .....	65
Figura 35. Parámetros Gyroide Superior .....	66
Figura 36. Estructura Gyroide Superior .....	66
Figura 37. Simulación Gyroide Superior temperatura en 1 lado .....	67
Figura 38. Estructura TPMS Schwarz D .....	68
Figura 39. Parámetros Schwarz D Intermedio .....	68
Figura 40. Estructura Schwarz D Intermedio .....	69
Figura 41. Simulación Schwarz D Intermedio temperatura en 1 lado .....	69
Figura 42. Parámetros Schwarz D Inferior .....	70
Figura 43. Estructura Schwarz D Inferior .....	71
Figura 44. Simulación Schwarz D Inferior temperatura en 1 lado .....	71

Figura 45. Parámetros Schwarz D Superior .....	72
Figura 46. Estructura Schwarz D Superior.....	73
Figura 47. Simulación Schwarz D Superior temperatura en 1 lado .....	73
Figura 48. Estructura TPMS Schwarz P .....	74
Figura 49. Parámetros Schwarz P Intermedio .....	75
Figura 50. Estructura Schwarz P Intermedio.....	75
Figura 51. Simulación Schwarz P Intermedio temperatura en 1 lado.....	76
Figura 52. Parámetros Schwarz P Inferior .....	77
Figura 53. Estructura Schwarz P Inferior .....	77
Figura 54. Simulación Schwarz P Inferior temperatura en 1 lado.....	78
Figura 55. Parámetros Schwarz P Superior.....	78
Figura 56. Estructura Schwarz P Superior.....	79
Figura 57. Simulación Schwarz P Superior temperatura en 1 lado .....	79
Figura 58. Simulación Gyroide Intermedio temperatura en 2 lados.....	80
Figura 59. Simulación Gyroide Inferior temperatura en 2 lados .....	81
Figura 60. Simulación Gyroide Superior temperatura en 2 lados .....	82
Figura 61. Simulación Schwarz D Intermedio temperatura en 2 lados .....	83
Figura 62. Simulación Schwarz D Inferior temperatura en 2 lados.....	84
Figura 63. Simulación Schwarz D Superior temperatura en 2 lados .....	85
Figura 64. Simulación Schwarz P Intermedio temperatura en 2 lados .....	86
Figura 65. Simulación Schwarz P Inferior temperatura en 2 lados.....	87
Figura 66. Simulación Schwarz P Superior temperatura en 2 lados .....	88
Figura 67. Selección de Modelo CFD .....	92
Figura 68. Selección de Modelo Viscoso CFD.....	92
Figura 69. Velocidad de Entrada del Fluido CFD.....	93
Figura 70. Condición de Aislamiento Térmico en los costados del aire forzado.....	94
Figura 71. Condición de Temperatura en cara superior e inferior de probeta .....	94
Figura 72. Contorno de Temperatura para Gyroide Intermedio .....	95
Figura 73. Representación de Volumen del Fluido en Gyroide Intermedio .....	96
Figura 74. Temperatura de Salida del Aire en Gyroide Intermedio .....	96
Figura 75. Contorno de Temperatura para Gyroide Inferior .....	97
Figura 76. Representación de Volumen del Fluido en Gyroide Inferior .....	98
Figura 77. Temperatura de Salida del Aire en Gyroide Inferior .....	98
Figura 78. Contorno de Temperatura para Gyroide Superior.....	99
Figura 79. Representación de Volumen del Fluido en Gyroide Superior.....	100
Figura 80. Temperatura de Salida del Aire en Gyroide Superior.....	100
Figura 81. Contorno de Temperatura para Schwarz D Intermedio.....	102
Figura 82. Representación de Volumen del Fluido en Schwarz D Intermedio.....	102
Figura 83. Temperatura de Salida del Aire en Schwarz D Intermedio.....	103
Figura 84. Contorno de Temperatura para Schwarz D Inferior .....	104
Figura 85. Representación de Volumen del Fluido en Schwarz D Inferior .....	104
Figura 86. Temperatura de Salida del Aire en Schwarz D Inferior .....	105
Figura 87. Contorno de Temperatura para Schwarz D Superior .....	106
Figura 88. Representación de Volumen del Fluido en Schwarz D Superior .....	106
Figura 89. Temperatura de Salida del Aire en Schwarz D Superior .....	107
Figura 90. Contorno de Temperatura para Schwarz P Intermedio .....	108
Figura 91. Representación de Volumen del Fluido en Schwarz P Intermedio .....	109

Figura 92. Temperatura de Salida del Aire en Schwarz P Intermedio .....	109
Figura 93. Contorno de Temperatura para Schwarz P Inferior.....	110
Figura 94. Representación de Volumen del Fluido en Schwarz P Inferior.....	111
Figura 95. Temperatura de Salida del Aire en Schwarz P Inferior.....	111
Figura 96. Contorno de Temperatura para Schwarz P Superior .....	112
Figura 97. Representación de Volumen del Fluido en Schwarz P Superior .....	113
Figura 98. Temperatura de Salida del Aire en Schwarz P Superior .....	113
Figura 99. Esquema de Experimentos.....	118
Figura 100. Diseño Banco de Pruebas .....	121
Figura 101. Software Formlabs con Banco de Pruebas.....	121
Figura 102. Soportes Incompletos en Pre Form .....	122
Figura 103. Soportes Completos en Pre Form.....	123
Figura 104. Impresión de Banco de Pruebas.....	123
Figura 105. Desmontaje de Impresora.....	124
Figura 106. Limpieza de Banco de Pruebas .....	124
Figura 107. Exposición del Banco de Pruebas a luz UV .....	125
Figura 108. Estructura Banco de Pruebas .....	125
Figura 109. Ensamblaje Banco de Pruebas.....	137
Figura 110. Estructura celular Schwarz P en SpaceClaim .....	138
Figura 111. Estructura Schwarz P en formlabs.....	139
Figura 112. Impresión Schwarz P.....	139
Figura 113. Impresión Schwarz P final con soportes .....	140
Figura 114. Estructura Gyroide Impresa .....	140
Figura 116. Banco de Pruebas Armado.....	141
Figura 117. Creación de Diseño Experimental en Minitab .....	143
Figura 118. Selección Parámetros Método Factorial en Minitab .....	144
Figura 119. Factores y Niveles en Minitab.....	144
Figura 120. Combinación de Experimentos a Realizar de Minitab .....	145
Figura 121. Valor de PWM en función de la Temperatura .....	146
Figura 122. Tabulación de Resultados de Experimentos.....	147
Figura 123. Análisis de Diseño Factorial para Delta T .....	148
Figura 124. Respuesta Diseño Factorial para Delta T .....	148
Figura 125. Diagrama de Pareto para Delta T considerando todos los factores .....	149
Figura 126. Diagrama de Pareto para Delta T considerando factores con efecto significativo.....	150
Figura 127. Análisis de Varianza para Delta T.....	151
Figura 128. Gráficas de Residuos para Delta T .....	152
Figura 129. Resumen de Modelo para Análisis Delta T .....	154
Figura 130. Gráfica Factorial para Delta T .....	154
Figura 131. Gráfica de Efectos Principales para Delta T .....	155
Figura 132. Combinación de Experimentos Representativa para Delta T .....	156
Figura 133. Contorno de Temperatura Experimento Representativo para Delta T.....	158
Figura 134. Representación de Volumen del Fluido para Experimento Representativo para Delta T.....	158
Figura 135. Temperatura de Salida del Aire para Experimento Representativo para Delta T.....	159
Figura 136. Contorno de Temperatura para Disipador de Calor .....	160



Figura 137. Representación de Volumen del Fluido para Disipador de Calor .....	160
Figura 138. Temperatura de Salida del Aire para Disipador de Calor .....	161
Figura 139. Diagrama de Pareto para Delta P considerando todos los factores .....	165
Figura 140. Diagrama de Pareto para Delta P considerando factores con efecto significativo.....	166
Figura 141. Análisis de Varianza para Delta P.....	167
Figura 142. Gráficas de Residuos para Delta P .....	168
Figura 143. Resumen de Modelo para Análisis Delta P .....	169
Figura 144. Gráfica de Efectos Principales para Delta P .....	170
Figura 145. Contorno de Presión para Experimento Representativo para Delta P.....	171
Figura 146. Representación de Volumen del Fluido para Experimento Representativo para Delta P .....	171
Figura 147. Contorno de Presión para Disipador de Calor.....	172
Figura 148. Representación de Volumen del Fluido para Disipador de Calor .....	173
Figura 149. Plantilla de Excel para cálculo de Factor de Fricción .....	183

## Terminología

Símbolo	Parámetro	Unidad
$\omega$	Longitud de la unidad celular	
c	Controla la expansión de la superficie en 3 dimensiones	
$\Delta T$	Variación de temperatura	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{out}}$	Temperatura del aire forzado a la salida de la estructura celular	$^{\circ}\text{C}$
$T_{\text{in}}$	Temperatura del aire forzado a la entrada de la estructura celular	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta P$	Variación de Presión	Pa
$P_{\text{out}}$	Presión del aire forzado a la salida de la estructura celular	Pa
$P_{\text{in}}$	Presión del aire forzado a la entrada de la estructura celular	Pa
$Q_{\text{neto}}$	Cantidad de calor neto (entrada menos salida) del sistema	W
$W_{\text{neto}}$	Trabajo neto producido	W
$dE/dt$	Variación de energía en el sistema a través del tiempo	
$\rho$	Densidad del fluido	$\text{Kg}/\text{m}^3$
e	Energía del fluido de trabajo	
V	Vector de velocidad del fluido	m/s
n	Componente normal de la velocidad del fluido	m/s
$W_{\text{fricción}}$	Trabajo perdido debido a la fricción entre el fluido y la estructura	W
P	Presión del fluido en un punto determinado	Pa
u	Energía interna del fluido de trabajo	
g	Fuerza de Gravedad	m/s
z	Altura del fluido en un punto determinado	M
$m_{\text{in}}$	Flujo másico del fluido a la entrada de la estructura	$\text{Kg}/\text{s}$
$m_{\text{out}}$	Flujo másico del fluido a la salida de la estructura	$\text{Kg}/\text{s}$
A	Sección transversal por la que recorre el fluido	$\text{m}^2$
$Q_{\text{in}}$	Calor de entrada suministrado a la celda Peltier	W
$Q_{\text{out}}$	Calor de salida proporcionado por la celda Peltier	W
$Q_{\text{DC}}$	Calor generado por el disipador de calor	W
$Q_{\text{BP}}$	Calor generado por el banco de pruebas	W
h	Coefficiente de convección del aire	$\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$
$A_t$	Área total de la aleta	$\text{m}^2$
$n_o$	Eficiencia global del disipador de calor	
$L_c$	Longitud corregida de la aleta	m
L	Longitud de la aleta	m
t	Espesor de la aleta	m
$A_f$	Área efectiva de la aleta	$\text{m}^2$
w	Ancho de la aleta	m
N	Número de aletas	
H	Altura del disipador de calor	m
k	Coefficiente de conducción del disipador de calor	$\text{W}/\text{m K}$
$c_v$	Calor específico a volumen constante	$\text{J}/\text{Kg K}$
f	Factor de fricción para tuberías	
Re	Número de Reynolds	
K	Factor de rugosidad absoluta	mm
d	Diámetro interno de la tubería	mm
n	Número de Tubos	

## Resumen

El presente trabajo busca nuevas aplicaciones para estructuras celulares TPMS (Triply Periodic Minimal Surface), enfocado a un análisis de transferencia de calor en las principales estructuras del tipo TPMS con la ayuda del software Ansys, mismas que han sido sometidas a un análisis numérico de transferencia de calor y de mecánica de fluidos CFD (Computational Fluid Dynamics) con el objetivo de determinar cuál estructura presenta mayor cantidad de transferencia de energía. Se realizó un diseño de experimentos (DOE) con diseño factorial de manera paralela con la construcción de un banco de pruebas formado por sensores para la toma de datos de temperatura y presión, ventiladores para generar aire forzado al interior de la estructura porosa y para enfriar una cara de la celda Peltier mediante disipadores de calor, consta de una estructura impresa donde se ubica los equipos y un tubo rectangular para la estructura celular en el centro del mismo con paredes aisladas adiabáticamente en los costados y la cara inferior. Las celdas Peltier se conectan a un microcontrolador que suministra alimentación proporcional para generar las temperaturas de trabajo, el cual, como los sensores, se encuentran conectados a una tarjeta Arduino Nano que procesa y toma los datos a través de una hoja Excel para su posterior análisis en el software Minitab. Una vez validados los resultados se realizó una simulación sobre el comportamiento de un disipador de calor comercial bajo las mismas condiciones, concluyéndose que la estructura celular presenta un comportamiento muy prometedor en el campo de la transferencia de calor, así como una considerable caída de presión debido a su intrincada geometría.

### Palabras clave:

- **TPMS**
- **TRANSFERENCIA DE CALOR**
- **CFD**
- **DISEÑO FACTORIAL**

### **Abstract**

The present work seeks new applications for cellular structures TPMS (Triply Periodic Minimal Surface), focused on an analysis of heat transfer in the main structures of the TPMS type with the help of Ansys software, which have been subjected to a numerical analysis of heat transfer and fluid mechanics CFD (Computational Fluid Dynamics) with the aim of determining which structure presents the greatest amount of energy transfer. A design of experiments (DOE) with factorial design was carried out in parallel with the construction of a test bench made up of sensors for temperature and pressure data collection, fans to generate forced air inside the porous structure and to cool one face of the Peltier cell with the help of heat sinks, consists of a printed structure where the equipment is located and a rectangular tube for the cell structure in the center of it with adiabatically isolated walls on the sides and the lower face. The Peltier cells are connected to a microcontroller that supplies proportional power to generate the working temperatures, which, like the sensors, are connected to an Arduino Nano card that processes and takes the data through an Excel sheet for later analysis. in Minitab software. Once the results were validated, a simulation was carried out on the behavior of a commercial heat sink under the same conditions, concluding that the cellular structure presents a very promising behavior in the field of heat transfer, as well as a considerable pressure drop due to its intricate geometry.

### **Keywords**

- **TPMS**
- **HEAT TRANSFER**
- **CFD**
- **FACTORIAL DESIGN**

## Capítulo I

### Generalidades

#### 1.1. Introducción

En la actualidad se busca la optimización en la mayoría de los procesos de la industria, esto implica tanto optimización en los recursos utilizados como optimización en los procesos constructivos, lo que representa para una empresa reducción en los costos y consecuentemente aumento en las ganancias. Con la evolución de la tecnología en reemplazo de cuerpos sólidos, ahora se busca generar estructuras de baja densidad pero con alta resistencia. Este tipo de estructuras son caracterizadas por su composición porosa.

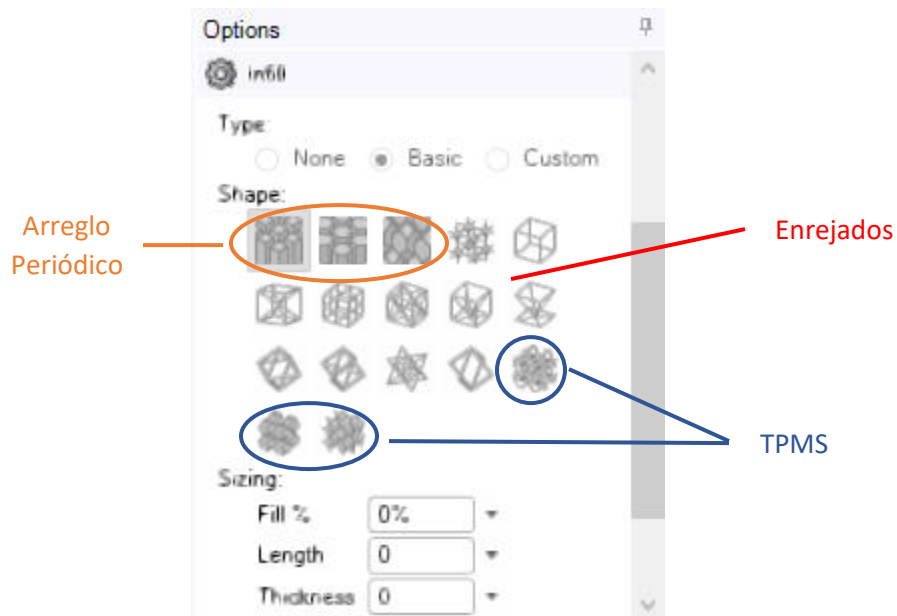
Como un representante de estructuras porosas principalmente se tienen las denominadas Superficie Mínima Triple Periódica (TPMS, por sus siglas en inglés, Triply Periodic Minimal Surface), estas estructuras están conformadas por porosidades que les otorgan intrincadas arquitecturas celulares, en donde su respuesta térmica será de interés en este estudio ya sea que se analicen como entidades o como núcleo en estructuras tipo sándwich. La manufactura aditiva es el proceso de fabricación de este tipo de estructuras enfocado en aplicaciones de transferencia de energía y estudios térmicos, donde se intenta comparar materiales aislantes térmicos en estructuras intrínsecas que favorecen la transferencia de energía debido a que un fluido que atraviese dicha estructura se ve en contacto con las paredes internas de la misma.

Este roce entre el fluido y la estructura interna de una arquitectura celular produce constantes cambios en la dirección del fluido dando paso así a un incremento en la transferencia de energía entre el fluido y la estructura celular mediante convección. Para la generación de estas estructuras se dispone de varios paquetes computacionales de los cuales por disponibilidad se utilizará SpaceClaim de Ansys, para la generación de membranas o cáscaras en cuerpos sólidos, SpaceClaim

disponible en la ventana Opciones con la herramienta Infill de arreglos periódicos, enrejados y estructuras TPMS como se muestra en la Figura 1.

**Figura 1**

*Membranas en Infill de SpaceClaim*



*Nota.* En el gráfico se puede observar la herramienta Infill con todos los arreglos que dispone para la creación de membranas en donde se aprecia que la densidad se controla con parámetros como longitud, espesor y el porcentaje de relleno que se desea.

## 1.2. Antecedentes

Slaughter introdujo por primera vez el concepto de aplicar TPMS a dispositivos de transferencia de calor y masa en 2003. Debido a su diseño liviano y alto rendimiento térmico de TPMS, llamó mucho la atención sobre la construcción de intercambiadores de calor basados en estos materiales. Ejemplos típicos de arquitecturas TPMS utilizadas para este propósito son las superficies Schwarz-P, Schwarz-D, Gyroid y Diamond, cada una con propiedades térmicas únicas, dependiendo de sus parámetros de diseño. Algunos estudios han tenido la intención de analizar y generalizar estos

parámetros utilizando métodos experimentales y computacionales. Dava cuantificó y comparó la permeabilidad del número de diseños de TPMS y mostró como la permeabilidad puede ser 3 veces mayor dependiendo de la arquitectura de TPMS (Attarzadeh, Rovira, & Duwig, 2021).

Se analizaron estas estructuras en varios ámbitos y desde diversos ángulos concluyéndose que la alta resistencia con baja densidad que las estructuras TPMS presentan es el factor principal para la utilización de las mismas en industrias tales como aeroespacial, de la construcción, arquitectónica, deportiva, automotriz, etc. Adicionalmente este estudio gira alrededor de la modelación digital con métodos computacionales y de las tecnologías de manufactura aditiva.

En estos estudios se enfatiza en la dificultad de obtención de este tipo de estructuras siendo la manufactura aditiva (AM, por sus siglas en inglés, Additive Manufacturing), el único método de generación de las mismas, teniéndose un impedimento al mismo tiempo ya que las estructuras se las tiene que fabricar en resina, material que actúa como aislante térmico, por lo que se intenta comparar justamente ese impedimento con la ventaja de las arquitecturas intrincadas que presentan estas estructuras celulares.

### **1.3. Justificación e Importancia**

Para el ámbito de estudio de la transferencia de energía en estructuras celulares TPMS únicamente se han realizado análisis computacionales, y en el presente estudio adicionalmente se pretende prototipar los análisis realizados para ejecutar estudios experimentales con el fin de comparar los resultados obtenidos tanto computacional como experimentalmente. Por lo que este estudio viene a ser pionero en la línea de la experimentación con estructuras celulares TPMS y tiene como objetivo comparar los resultados obtenidos tanto computacional como experimentalmente.

Este estudio busca demostrar la hipótesis respecto a si las estructuras TPMS podrían ejercer un papel significativo como disipadores de calor para aplicaciones electrónicas y al mismo tiempo comparar características opuestas como lo son la fabricación de una estructura en material aislante térmico como una resina, con el flujo de un fluido que puede ser aire forzado a través de una estructura porosa que va a ocasionar el constante cambio de dirección en el fluido, generando turbulencia lo que favorece la transferencia de energía. Adicionalmente al ser una estructura porosa se buscará el tamaño y espesor óptimo para reducir la resistencia térmica del material con el objetivo de favorecer la transmisión de energía a través de la estructura mediante conducción.

#### **1.4. Alcance del Proyecto**

El alcance de este proyecto se centra a un análisis térmico computacional de las estructuras TPMS. El punto de partida del presente análisis es un estudio de transferencia de calor en el programa Ansys sobre todas las estructuras TPMS disponibles en dicho software para determinar la geometría innovadora que presente un mejor desempeño para este análisis térmico.

La siguiente etapa consiste en parametrizar el tamaño de las estructuras que presenten un mejor desempeño para determinar el tamaño óptimo que asegure el mejor comportamiento con respecto a la transferencia de calor y posteriormente el análisis con CFD (Computational Fluid Dynamics) para tener una visión pormenorizada de la interacción del fluido con la estructura.

Finalmente se construirá un prototipo de las estructuras TPMS seleccionadas utilizando la impresora Formlabs de stereolitografía con resinas resistentes al calor y se validará su comportamiento usando celdas del Peltier y la instrumentación adecuada, para de esta manera, comparar los resultados obtenidos con las simulaciones computacionales realizadas.



## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo General**

Analizar el comportamiento de las estructuras TPMS (Triply Periodic Minimal Surface) en aplicaciones de transferencia de calor mediante simulaciones computacionales para de esta manera comparar los resultados con los obtenidos de la impresión de las estructuras

### **1.5.2. Objetivos Específicos**

- Analizar las distintas estructuras TPMS mediante simulación computacional para determinar la estructura TPMS y su tamaño óptimo que mejor comportamiento refleje en el estudio de transferencia de calor en estado estable
- Determinar los tamaños de las estructuras con el análisis de los resultados obtenidos para realizar la construcción del prototipo mediante tecnología aditiva
- Contrastar los resultados obtenidos mediante la recopilación de datos para comparar los análisis efectuados

## **1.6. Metodología**

Se realizarán estudios comparativos entre distintas membranas con la ayuda del Software Ansys, simulando ensayos térmicos para así ubicar las estructuras más eficientes determinando básicamente el tamaño, espesor y porcentaje de relleno óptimo. Los ensayos a simular corresponden a la comparación entre la aplicación de calor en un lado de la estructura celular TPMS con la aplicación de calor en 2 lados opuestos de la estructura celular TPMS, con el fin de determinar si existe una significativa diferencia en la transferencia de energía entre el fluido y la estructura celular aplicando calor en uno o 2 lados y así determinar los ensayos a prototipar y ejecutar para su posterior comparación con los datos recopilados.

## Capítulo II

### Marco Teórico

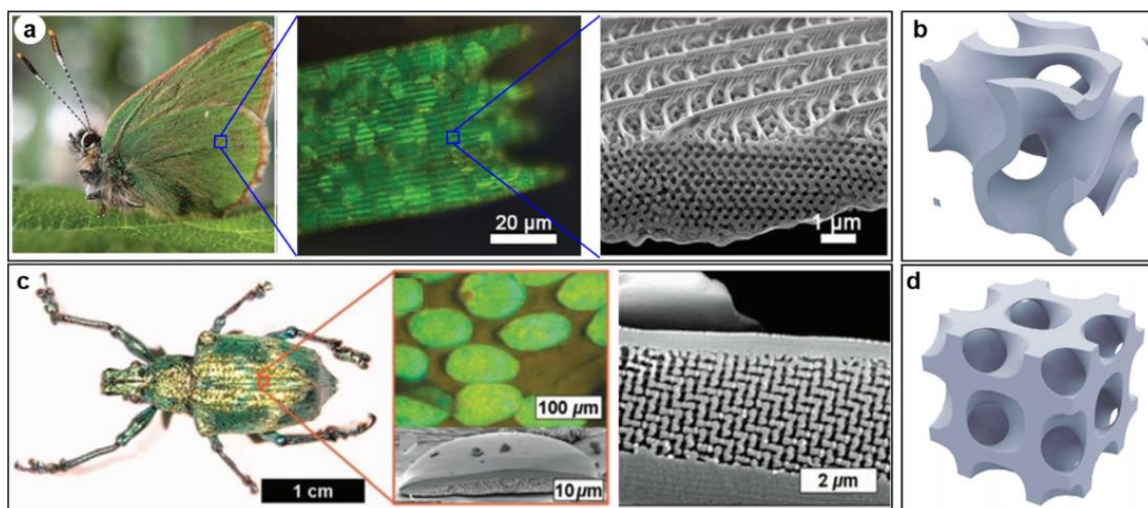
#### 2.1. Superficie Mínima Triple Periódica (TPMS)

La superficie mínima triple periódica (TPMS) se refiere a superficies definidas matemáticamente, infinitas en un espacio tridimensional que minimiza la curvatura media local de la superficie para un límite dado. Este tipo de superficies pueden dividir el espacio en 2 regiones continuas entrelazadas entre sí, y tienen su origen en estructuras naturales como el tejido óseo y alas de una mariposa (Pereira, 2019).

Los organismos biológicos han desarrollado estructuras complejas para ejecutar distintas funciones que faciliten la adaptabilidad de los mismos a los entornos naturales, la superficie mínima triple periódica se ha encontrado en sistemas biológicos como esqueletos y andamios, como se puede observar en la Figura 2, en donde se muestran ejemplos de topologías TPMS tales como la estructura Gyroid y Schwarz-D halladas en las escamas de las alas de las mariposas y del escarabajo *Lamprocyphus augustus*.

#### Figura 2

*Superficie Mínima Triple Periódica en sistemas biológicos*



*Nota.* (a) Fotografía, imagen microscópica óptica de gran aumento e imagen SEM de escamas de alas de mariposa de especies, (b) Modelo de célula de giroide generado

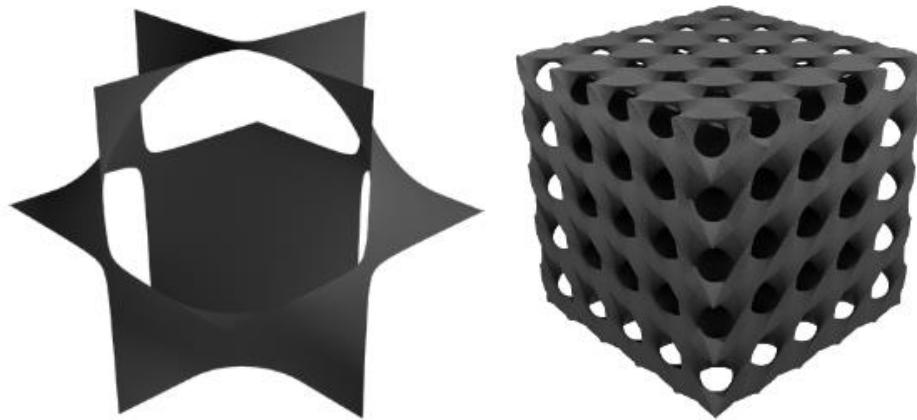
por computadora, (c) Fotografía, imagen microscópica óptica de gran aumento e imagen SEM del picudo *L. augustus*, (d) Modelo celular de Schwarz-D generado por computadora. Adaptado de “Bioinspired heat exchangers based on triply periodic minimal surfaces for supercritical CO<sub>2</sub> cycles” (p. 3), por L. Weihong, Y. Guopeng y, Y. Zhibin, 2020, *ELSEVIER*, 179.

En la Figura 2a se observa una microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés, scanning electron microscopy) de las escamas del ala de una mariposa en cuya costilla se identifica la estructura Gyroid, en la Figura 2b se tienen las estructuras de cristal fotónico con arquitecturas Schwarz-D en las escamas del escarabajo. La superficie mínima tiene curvaturas suaves sin bordes ni esquinas (Weihong, Guopeng, & Zhibin, 2020).

Las arquitecturas entrelazadas tienen propiedades inherentes y carecen de bordes afilados con dinámica de fluidos mejorada. Como sugiere el principio de dinámica de fluidos, un agrandamiento o contracción gradual de una trayectoria de flujo tiene una caída de presión significativamente menor que una contracción o agrandamiento repentino. La topología curva permite un flujo suave a través de los canales y, en teoría, minimiza la caída de presión. Las estructuras interpenetrantes de TPMS dan como resultado un aumento favorable de la turbulencia que causa una mejor transferencia de calor y masa.

### **2.1.1. Clasificación**

**2.1.1.1. Schwarz D.** Esta superficie está formada por 2 laberintos en forma de tubo, mismos que son iguales y se encuentran entrelazados. También se denomina Schwarz Diamante, esto debido a que al modificar la celda unitaria en una estructura de enlace de diamante se da paso a la formación de una familia de superficies mínimas (Schoen, 1970).

**Figura 3***Superficie Schwarz D*

*Nota.* En esta Figura se presenta en la parte izquierda la modelación matemática correspondiente a la estructura celular Schwarz D en la que se puede apreciar la disposición característica a este tipo de superficie, en la parte derecha se puede observar el modelado de esta estructura diseñado desde aproximaciones trigonométricas basadas en TPMS. Adaptado de “Mechanical properties of ceramic structures based on Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) processed by 3D printing” (p. 3), por S. Ocampo, J. Ramírez, y, C. Paucar, 2017, *Journal of Physics: Conference Series*, 935.

Esta superficie es descrita por la ecuación aproximada (1) (Shixiang, Jinxing, & Jiaming, 2019).

$$\begin{aligned} \sin(\omega x) \sin(\omega y) \sin(\omega z) + \sin(\omega x) \cos(\omega y) \cos(\omega z) + \cos(\omega x) \sin(\omega y) \cos(\omega z) \\ + \cos(\omega x) \cos(\omega y) \sin(\omega z) = c \end{aligned} \quad (1)$$

**2.1.1.2. Schwarz P.** Esta superficie se encuentra formada por 2 laberintos en forma de tubo, mismos que son iguales y se encuentran entrelazados. También se denomina Schwarz Primitiva, esto debido a que al modificar la celda unitaria en una caja rectangular cualquiera, se da paso a la formación de una familia de superficies mínimas (Serrano, 2020). Esta superficie tiene como principal aplicación la creación de prototipos

de andamios de tejido, mismos que cuentan con una alta proporción de superficie – volumen y porosidad.

#### Figura 4

##### *Superficie Schwarz P*



*Nota.* En esta Figura se presenta en la parte izquierda la modelación matemática correspondiente a la estructura celular Schwarz P en la que se puede apreciar la disposición característica a este tipo de superficie, en la parte derecha se puede observar el modelado de esta estructura diseñado desde aproximaciones trigonométricas basadas en TPMS. Adaptado de “Mechanical properties of ceramic structures based on Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) processed by 3D printing” (p. 3), por S. Ocampo, J. Ramírez, y, C. Paucar, 2017, *Journal of Physics: Conference Series*, 935.

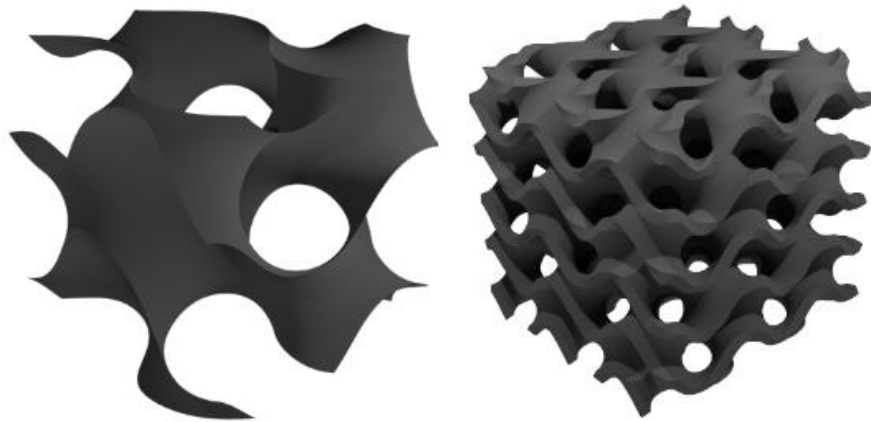
Esta superficie es descrita por la ecuación aproximada (2) (Shixiang, Jinxing, & Jiaming, 2019).

$$\cos(\omega x) + \cos(\omega y) + \cos(\omega z) = c \quad (2)$$

**2.1.1.3. Gyroid.** Se refiere a una superficie que carece de auto intersecciones, debido a que no cuenta con líneas rectas o simetrías planas (Serrano, 2020).

## Figura 5

### Superficie Gyroid



*Nota.* En esta Figura se presenta en la parte izquierda la modelación matemática correspondiente a la estructura celular Gyroide en la que se puede apreciar la disposición característica a este tipo de superficie, en la parte derecha se puede observar el modelado de esta estructura diseñado desde aproximaciones trigonométricas basadas en TPMS. Adaptado de “Mechanical properties of ceramic structures based on Triply Periodic Minimal Surface (TPMS) processed by 3D printing” (p. 3), por S. Ocampo, J. Ramírez, y, C. Paucar, 2017, *Journal of Physics: Conference Series*, 935.

Esta superficie es descrita por la ecuación aproximada (3) (Shixiang, Jinxing, & Jiaming, 2019).

$$\cos(\omega x) \sin(\omega y) + \cos(\omega y) \sin(\omega z) + \cos(\omega z) \sin(\omega x) = c \quad (3)$$

### 2.1.2. Fabricación

Las estructuras TPMS no se pueden fabricar mediante técnicas de fabricación convencional, por lo que se requieren nuevos procesos de fabricación. El advenimiento de la fabricación aditiva permite una ruta para fabricar estructuras TPMS. La manufactura aditiva (AM, por sus siglas en inglés, additive manufacturing) o impresión 3D surgieron como un nuevo método de fabricación desde la década de 1980, pero

generalmente se han limitado a la producción de prototipos. Sin embargo, los beneficios de la impresión 3D para la industria de la fundición se identificaron pronto. La capacidad de fabricar geometrías de piezas complejas mediante la deposición capa por capa en lugar de la fabricación sustractiva tradicional ahora permite la producción de moldes, núcleos y patrones que de otro modo serían imposibles de crear sin la impresión 3D (Lonardo, Thiel, & Rogers, 2018).

Un uso importante de la AM en la industria de la fundición son los moldes de arena impresos en 3D que proporcionan cavidades complejas, buenas precisiones dimensionales, la capacidad de insertar componentes dentro de la fundición y/o molde, y una mayor libertad en el diseño del sistema de suministro de metal. Existen varios métodos para crear piezas fabricadas de forma aditiva, incluida la estereolitografía, la fusión selectiva con láser y el modelado por deposición fundida (Nguyen, Yor, Beck, & et al, 2018).

**2.1.2.1. Estereolitografía.** La estereolitografía (SLA, por sus siglas en inglés, Stereo Litography Apparatus), también denominada fabricación óptica o foto-solidificación, se refiere a un método de fabricación por adición que consiste en la aplicación de resina que se endurece por polimerización o se cura con luz ultravioleta dentro de un tanque y un láser ultravioleta utilizado para la construcción de objetos. La aplicación sucesiva de capas finas e impresas una encima de otra es el proceso de fabricación de objetos tridimensionales. Tiene su principal aplicación en prototipos funcionales, patrones, moldes y herramientas.

**Figura 6***Impresora 3D Formlabs*

*Nota.* Adaptado de *Formlabs Form 3 3D Printer – Basic Package* [Fotografía], por Gesswein, 2017, Pinterest (<https://www.pinterest.com/pin/652740539722800949/>).

El proceso de fabricación SLA se lo ilustra en la Figura 7, el cual consiste en inicialmente obtener el diseño del modelo que se desea fabricar en un formato de archivo (STL u OBJ) mediante la ayuda de cualquier software de diseño asistido por ordenador (CAD, por sus siglas en inglés, Computer aided design), a continuación se da paso al proceso de impresión en donde el rayo láser recorre por la resina líquida conforme al modelo suministrado a la impresora, una vez solidificada la primera capa de material, la plataforma desciende una altura correspondiente al grosor de una capa de impresión, para dar paso a que se solidifique una nueva sección. Se tienen tantos ciclos de impresión como capas sean necesarias para completar el volumen de la pieza (Restrepo, 2017). A continuación, viene el post - acabado que consiste en un lavado de la pieza en alcohol isopropílico con el fin de remover la resina sin curar de la superficie de la misma, dependiendo del material, algunos requieren post - curado para obtener el grado máximo de resistencia y estabilidad. Finalmente se remueven los soportes de las piezas y se lijan las marcas dejadas por los mismos (Formlabs, 2021).



## Figura 7

### Proceso de fabricación SLA



*Nota.* En la Figura se presenta el proceso de fabricación por estereolitografía partiendo desde el pre-procesamiento, el procesamiento como tal y el post-procesamiento.

Adaptado de *SLA: Impresión 3D por estereolitografía* [Fotografía], por Susana Sanchez Restrepo, 2017, EDnatives (<https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/>).

Las ventajas de este método de fabricación son, la isotropía que presentan los diseños ya que tienen resistencia que varía en función de la orientación en la que se trabaja, la impermeabilidad de los modelos impresos que son uniformes al ser creados con rasgos sólidos, la precisión y fiabilidad de la impresión que permite crear modelos fiables y precisos de forma repetitiva ya que cada uno es fabricado bajo condiciones casi idénticas, los detalles precisos que permiten obtener formas y geometrías como canales internos de alta complejidad, partes con vacíos o estructuras tipo panel con el objetivo de ahorrar peso sin reducir su resistencia y el acabado de superficie lisa que presentan los componentes fabricados, siendo esta calidad ideal para aplicaciones que buscan acabados perfectos así como para la reducción de tiempos de post – procesamiento (Formlabs, 2021). De igual manera, de ser posible, elimina trabajos tales

como el ensamblaje, ya que una pieza formada por varios componentes puede ser modelada como una única pieza (Rodríguez, 2021).

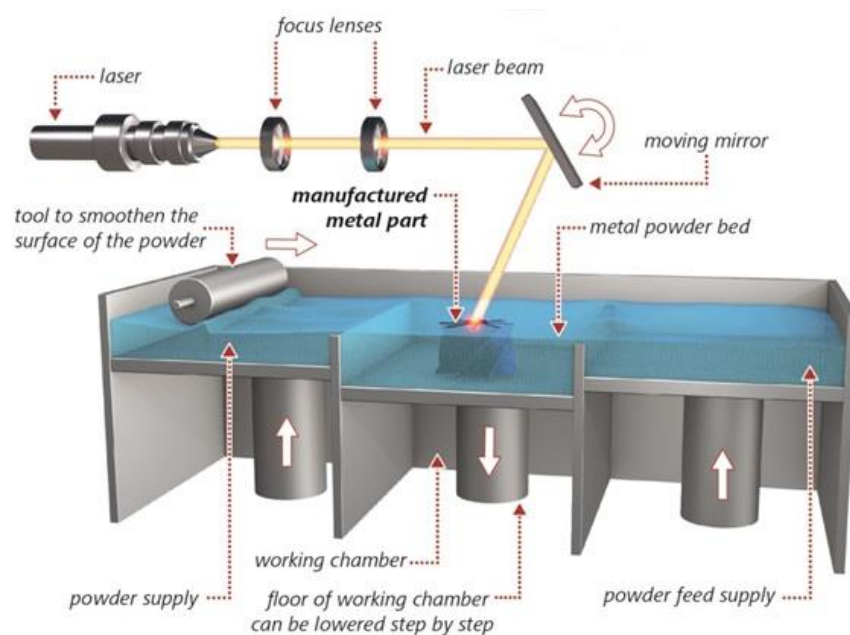
**2.1.2.2. Fusión selectiva con láser.** La fusión selectiva con Láser (SLM, por sus siglas en inglés, Selective Laser Melting), también conocida como fusión directa por láser de metales (DMLM, por sus siglas en inglés, Direct Metal Laser Melting) o fusión en lecho de polvo (PBF, por sus siglas en inglés, Powder Bed Fusion), es una tecnología AM que consiste en el uso de un láser de alta densidad de potencia que funda y fusione polvos metálicos (Zhang, 2021). Este método de fabricación puede generar geometría intrincadas, piezas resistentes al estrés y lotes pequeños.

El proceso se lo ilustra en la Figura 8, mismo que consiste en que primero se llena la cámara de polvo metálico para luego ser esparcido por el sustrato o una placa de construcción en delgadas capas con la ayuda de una cuchilla revestida, a continuación, un láser de fibra óptica de alta potencia (200/300 W) fusiona las partículas metálicas selectivamente para que luego la placa de construcción descienda la altura correspondiente a una capa dando paso a que se agregue otra capa de polvo metálico (Sanchez S. , 2019).

Este proceso de fabricación SLM es realizado dentro de una atmósfera controlada llena de gas inerte (nitrógeno o argón, con mínimo contenido de oxígeno) (Murphy, 2019). Una vez finalizada la impresión, se debe esperar que la impresora se enfríe para proceder a retirar el polvo no fusionado y la pieza de la placa de construcción para finalmente retirar los soportes que refuerzan los ángulos y las partes que quedan en voladizo con el fin de evitar su distorsión por el mismo motivo de la temperatura de trabajo (Pazmiño, 2020).

## Figura 8

### Proceso de fabricación SLM

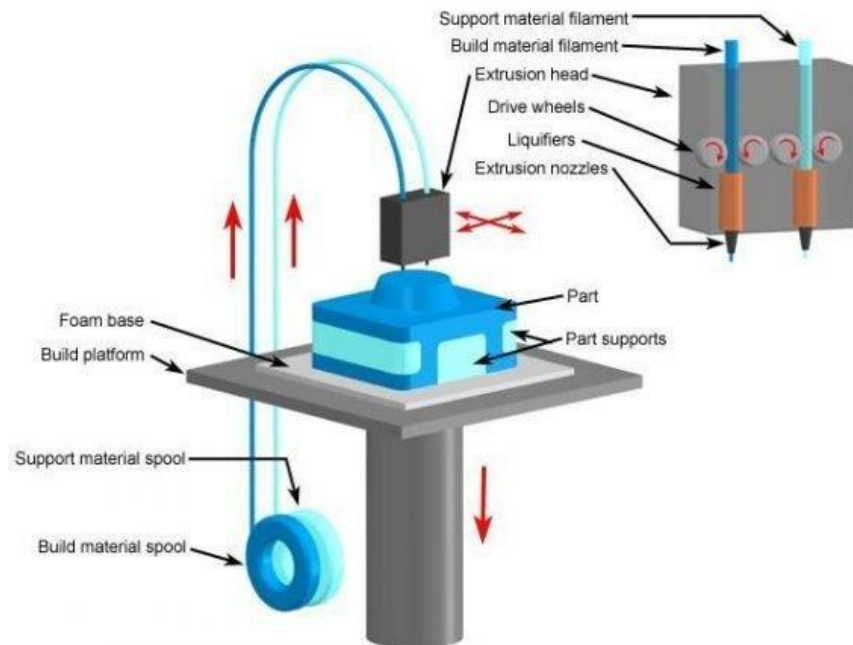


*Nota.* En la Figura se presenta los componentes que forman la impresora SLM así como el proceso de fabricación de las piezas. Adaptado de *Fusión selectiva por láser* [Fotografía], por Leinenbach Christian, Empa (<https://www.empa.ch/web/coating-competence-center/selective-laser-melting>).

Este tipo de tecnología AM presenta como ventajas la amplia disponibilidad de metales a utilizar, su capacidad de realizar formas o características internas que con la fabricación tradicional serían imposibles de obtener, los tiempos de entrega se ven reducidos considerablemente y permiten la producción de varias piezas al mismo tiempo (Murphy, 2019). Tiene su aplicación principal en industrias como la aeroespacial para accesorios, piezas como rotores o impulsores, en campos de la ingeniería mecánica y química por su alta resistencia a presión de gas y calor con alto rendimiento y bajo costo (Sculpteo, 2017).

**2.1.2.3. Modelado por deposición fundida.** El modelado por deposición fundida (FDM, por sus siglas en inglés, Fused Deposition Modeling), también conocido como fabricación como filamento fundido (FFF, por sus siglas en inglés, Fused Filament Fabrication), es una tecnología AM perteneciente a la familia de extrusión de materiales, en donde el filamento termoplástico se alimenta desde un carrete a través de un cabezal que se encuentra a temperatura controlada generalmente 200°C dependiendo del material, para fundir el material y a continuación se extruye mediante una boquilla con la cual también se guía con precisión los materiales en una capa tras capa ultrafina para producir elementos estructurales capa por capa de acuerdo al modelo CAD solicitado fabricar (Bayu, Imaduddin, & Ariawan, 2021).

Estas capas depositadas tendrán soportes como en cualquier pieza creada por impresión 3D y el cabezal extrusor consta de 2 boquillas, una para la creación de la pieza capa por capa y otra para la creación de los soportes que puede ser o no del mismo material de la pieza, adicionalmente está compuesta por una placa de impresión, una bobina de filamento y un cabezal de extrusión como se observa en la Figura 9 (Sanchez S. , 2017). Las piezas finales son resistentes, duraderas y dimensionalmente estables (Rosero, 2019), adicionalmente el proceso es anisotrópico por la diferencia entre capas que se genera en el proceso de impresión (Chilcañan, 2020).

**Figura 9***Impresora de FDM*

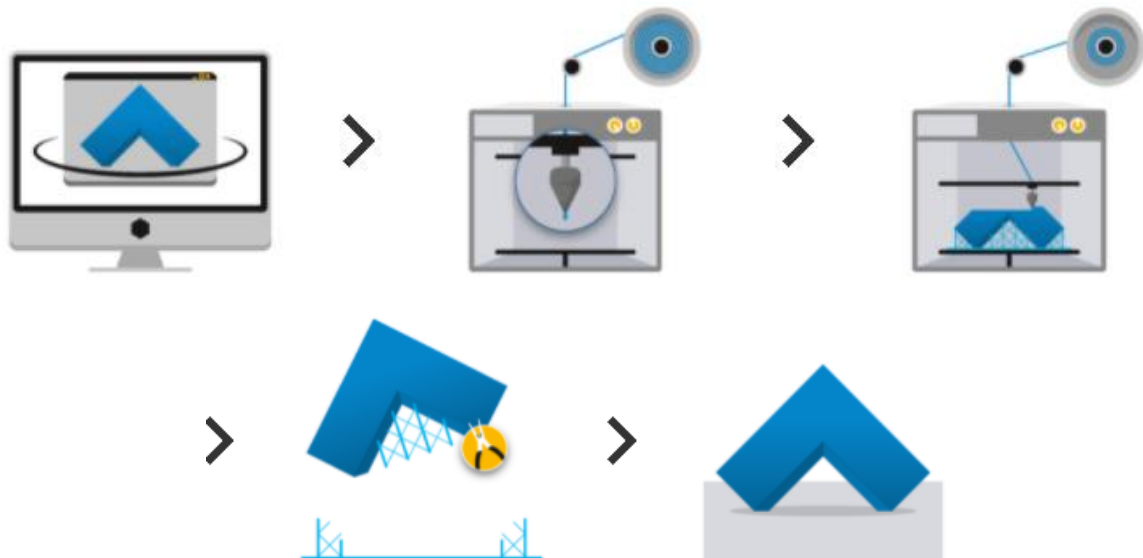
*Nota.* Se presentan los componentes de esta impresora así como las partes que conforman el cabezal extrusor. Adaptado de *FDM Modelado por Deposición Fundida* [Fotografía], por José Chilcañan, 2020, Innovación y Tecnología (<https://www.innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/fdm-modelado-por-deposicion-fundida/>).

El proceso se lo ilustra en la Figura 10 y consiste en que inicialmente se carga un carrete con filamento termoplástico en la impresora para que sea alimentado al cabezal de extrusión cuando la boquilla ha alcanzado la temperatura de fusión para el material de trabajo para que en la boquilla el material se funda, con la ayuda de motores a pasos o servomotores el cabezal se desplaza en un sistema de 3 ejes, el material extruido en forma de hebras delgadas se deposita por capas en lugares acorde al modelo CAD donde se enfría y solidifica posteriormente, al finalizar una capa la plataforma de construcción se desplaza verticalmente una altura correspondiente al

espesor de una capa para repetir el ciclo de impresión hasta que la pieza se complete (Bournias, 2020).

### Figura 10

*Proceso de fabricación FDM*



*Nota.* En la Figura se presenta el proceso de modelado por deposición fundida partiendo desde el pre-procesamiento, el procesamiento como tal y el post-procesamiento. Adaptado de *Modelado por deposición fundida (FDM)* [Fotografía], por Juan Romero, 2020, Materialise (<https://www.materialise.com/es/manufacturing/tecnologia-de-impresion-3d/modelado-por-deposicion-fundida>).

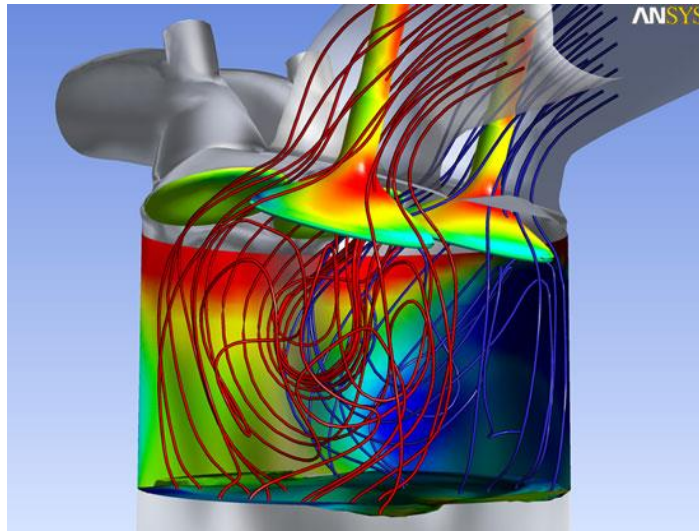
## 2.2. Software ANSYS

Ansys es un conjunto de programas de Ingeniería asistida por computador (CAE, por sus siglas en inglés, Computer – Aided Engineering), es el principal representante de software para ingeniería avanzada dirigido al diseño, análisis, simulación y post – procesado de piezas por elementos finitos (FEA, por sus siglas en inglés, Finite Element Analysis) (Ramos, 2021). Dentro de las etapas de procesamiento consta de mallado o meshing, simulación y post – procesado. El programa ofrece un paquete de software

completo que abarca todo el rango de la física, proporcionando acceso a cualquier campo de simulación de ingeniería que requiera del diseño y simulación de un proceso (Ansys, 2021), como se ilustra en la Figura 11, simula elementos bajo fenómenos físicos estudiados en ingeniería y diseño mecánico, además es capaz de simular y analizar cargas térmicas, de fluidos, vibraciones o aplicación puntuales que se desee analizar el comportamiento y respuesta de un elemento (Hexagon, 2020).

### **Figura 11**

*Análisis de fluidos y reacciones térmicas en ANSYS*



*Nota.* Se representa la simulación de uno de los módulos de Ansys como lo es Fluyente, que es un programa CFD aplicable a una amplia gama de modelado y simulación de fluidos con turbulencia, y sus reacciones térmicas. Adaptado de ANSYS [Fotografía], por Hexagon, 2020, 3DCadPortal (<https://www.3dcadportal.com/ansys.html>).

De todos los amplios campos que Ansys permite simular se analizará la transferencia de calor y energía en estado estable y el análisis de fluidos con transferencia de energía, que son los campos de ingeniería a utilizar en el presente estudio, mismos que se detallan a continuación.

### **2.2.1. Steady – State thermal**

Ansys proporciona herramientas muy amplias para realizar análisis térmicos a nivel de ingeniería. Para el uso de este módulo de Ansys se deben definir ciertas condiciones de contorno, obtener una estructura de malla adecuada y optimizada y definir las condiciones térmicas y del material a estudiar con las características térmicas del caso. El análisis térmico en estado estable, es decir, en condiciones de estado estacionario, se refiere a que las condiciones de frontera y cargas no varían con el paso del tiempo, si bien es cierto la mayoría de eventos físicos en la vida real no se dan en estado estable, con los supuestos de ingeniería adecuados es posible realizar análisis de ingeniería teóricos en condiciones de estado estacionario que sirven para obtener condiciones primarias para análisis adicionales como estructurales estáticos o térmicos transitorios ya que Ansys permite vincular todos estos análisis entre sí. Para la realización de un análisis en estado estable es necesario seguir los siguientes pasos (MechanicalBase, 2021).

**2.2.1.1. Definición de material.** Para la ejecución de un análisis térmico en estado estable en Ansys se selecciona el material para la geometría de análisis. Existen muchos materiales predeterminados disponibles en la biblioteca de Ansys para asignarle a un cuerpo como se observa en la Figura 12A. De igual manera se pueden cambiar las propiedades de un material como se observa en la Figura 12B y finalmente se puede agregar un material especial que no se encuentra en la biblioteca como se observa en la Figura 12C. La propiedad del material a definir en un análisis térmico de estado estacionario en la conductividad térmica.



Figura 12

## Selección de Material en Steady - State Thermal

The screenshot shows the ANSYS Workbench interface. The 'Engineering Data Sources' table is highlighted with a red box, showing columns for Data Source, Location, and Description. The 'Outline of Thermal Materials' table is highlighted with a blue box, showing columns for Contents of Thermal Materials, Add, Source, and Description. A graph of Thermal Conductivity vs. Temperature is also visible, showing a constant value of 0.026 W m<sup>-1</sup> C<sup>-1</sup>.

Data Source	Location	Description
1		Samples for curve fitting.
7	Magnetic B-H Curves	B-H Curve samples specific for use in a magnetic analysis.
8	Thermal Materials	Material samples specific for use in a thermal analysis.
9	Fluid Properties	Material samples specific for use in a fluid analysis.

Contents of Thermal Materials	Add	Source	Description
3		Thermal_Materials	Thermal Properties for Air
4		Thermal_Materials	
5		Thermal_Materials	
6		Thermal_Materials	
7		Thermal_Materials	

Property	Value	Unit
2	0,026	W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>

The screenshot shows the ANSYS Workbench interface. The 'Outline of Schematic A2: Engineering Data' table is highlighted with a purple box, showing columns for Contents of Engineering Data, Add, Source, and Description. The 'Properties of Outline Row 4: NUEVO' table is highlighted with a purple box, showing columns for Property, Value, and Unit. A graph of Thermal Conductivity vs. Temperature is also visible, showing a constant value of 0.026 W m<sup>-1</sup> C<sup>-1</sup>.

Contents of Engineering Data	Add	Source	Description
3		NUEVO	
4		General_Materials	Structural Steel

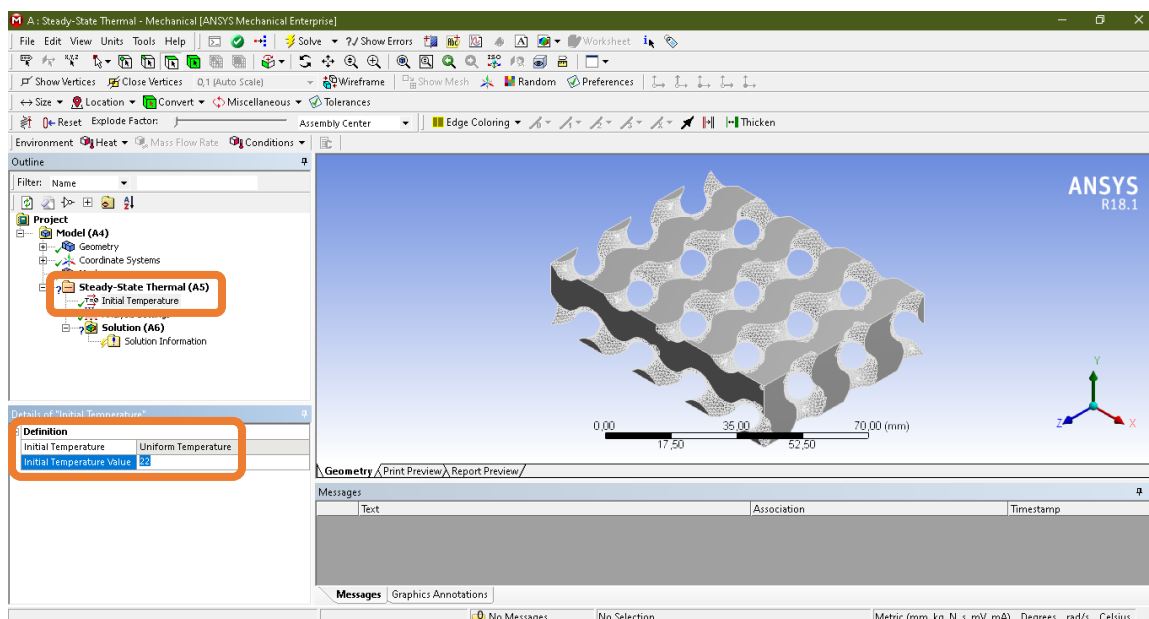
Property	Value	Unit
3		W m <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>

Nota. En la Figura se presenta los 3 métodos existentes para definir un material para análisis térmico en condiciones de estado estacionario.

**2.2.1.2. Definición temperatura inicial.** Para continuar con el análisis térmico, el solucionador de Ansys requiere como una condición de frontera el definir la temperatura inicial de trabajo como se observa en la Figura 13, que en condiciones de estado estacionario se trata de la temperatura ambiente.

**Figura 13**

*Definición de temperatura inicial para estado estacionario*



*Nota.* Se representa donde se puede establecer la temperatura inicial de trabajo para un análisis térmico de estado estacionario.

**2.2.1.3. Mallado necesario para el análisis de estado estacionario.** La cantidad adecuada de densidad de malla es muy importante. Para las secciones de geometría donde los resultados son importantes, es necesario aumentar la densidad de la malla, pero siempre teniendo en consideración la capacidad computacional debido a que una malla excesivamente densa generará problemas en la solución del análisis, por ende, la optimización de la estructura de malla es muy importante. A continuación, se detallan en la Tabla 1 las opciones de malla más importante disponibles en Ansys Mesher:

**Tabla 1***Herramientas de Mallado en Ansys*

<b>Herramientas de Mallado en Ansys</b>	
<b>Opción de Malla</b>	<b>Descripción</b>
Relevancia	Forma más básica de aumentar número de nodos y elementos de malla en sus geometrías, a mayor relevancia la malla aumenta
Suavizado	Opción muy importante para optimizar la calidad del elemento como baja, media y alta
Malla Métrica	Herramienta para ver calidad del elemento, factor de deformación, relación jacobiana, etc.
Tamaño de elemento	Permite optimizar el tamaño del elemento de la estructura de malla de acuerdo a la capacidad computacional, a menor tamaño la malla es más fina
Verificación de forma	Se tiene como opción de verificación: estándar mecánica, agresivo mecánica, no lineal mecánica, electromagnetismo, CFD y explícita
Nodo del lado medio de elementos	Permite agregar nodos en el lado medio de los lados del elemento
En función de tamaño de malla	Se define el tamaño en función de la forma de la pieza para la estructura de malla, se tiene: curvatura, proximidad y uniforme
Anulación automática basada en malla	Esta opción trata la anulación de las estructuras de malla en geometrías sucias
Semilla de tamaño inicial	Se puede seleccionar una de las semillas iniciales de acuerdo con la determinación de la prioridad de mallado
Transición de malla	Se refiere a la tasa de crecimiento entre las diferentes estructuras de malla
Span Angle Center	La estructura de malla de las regiones de curvatura de la geometría será más fina, se tiene: grueso, medio y fino
Inflación de malla	Permite crear estructuras de malla con varios valores para varias opciones, se ajusta la inflación del tamaño de las capas de malla a partir de una superficie, se tiene: espesor total, espesor de la primera capa, transición suave, primera relación de aspecto, última relación de aspecto
Malla en forma de tetraedro	Dependiendo de la geometría los elementos tetraedros pueden ser más apropiados y su forma es un parámetro muy importante en el mallado
Malla en forma de hexágonos	Dependiendo de la geometría los elementos hexagonales pueden ser más uniformes y su forma es un parámetro muy importante en el mallado
Cuerpos mapeables	Se puede usar esta opción para ver cuerpos mapeables en su ensamblaje o geometrías de ser necesario hacer un mapeo de malla

*Nota.* Adaptado de *Important ANSYS Meshing Options And Tools* [Tabla], por

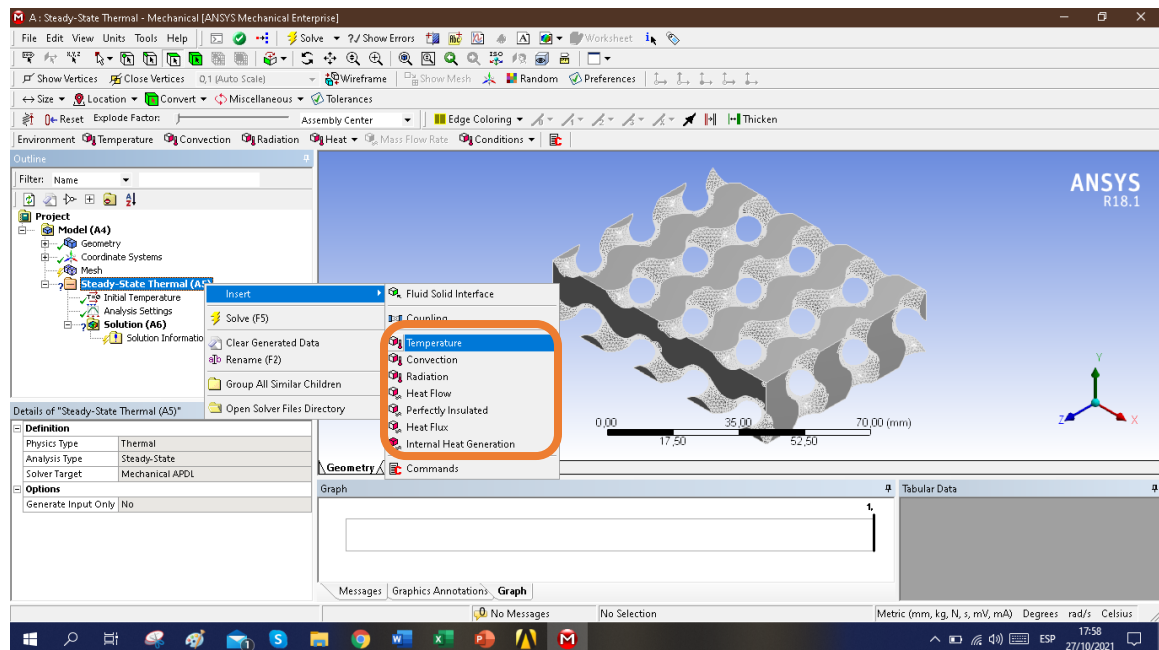
MechanicalBase, 2021, MechanicalBase (<https://mechanicalbase.com/important-ansys-meshing-options-and-tools/>).

#### 2.2.1.4. Condiciones iniciales para el análisis. Como se observa en la

Figura 14, el programa Ansys permite establecer condiciones iniciales tales como Temperatura, Convección, Radiación, Flujo de Calor, Perfectamente Aislado y Generación de Calor. Estableciendo cualquiera de estas condiciones iniciales, se selecciona y aplica a una parte de la geometría que se desee.

**Figura 14**

#### *Condiciones Iniciales de Temperatura*



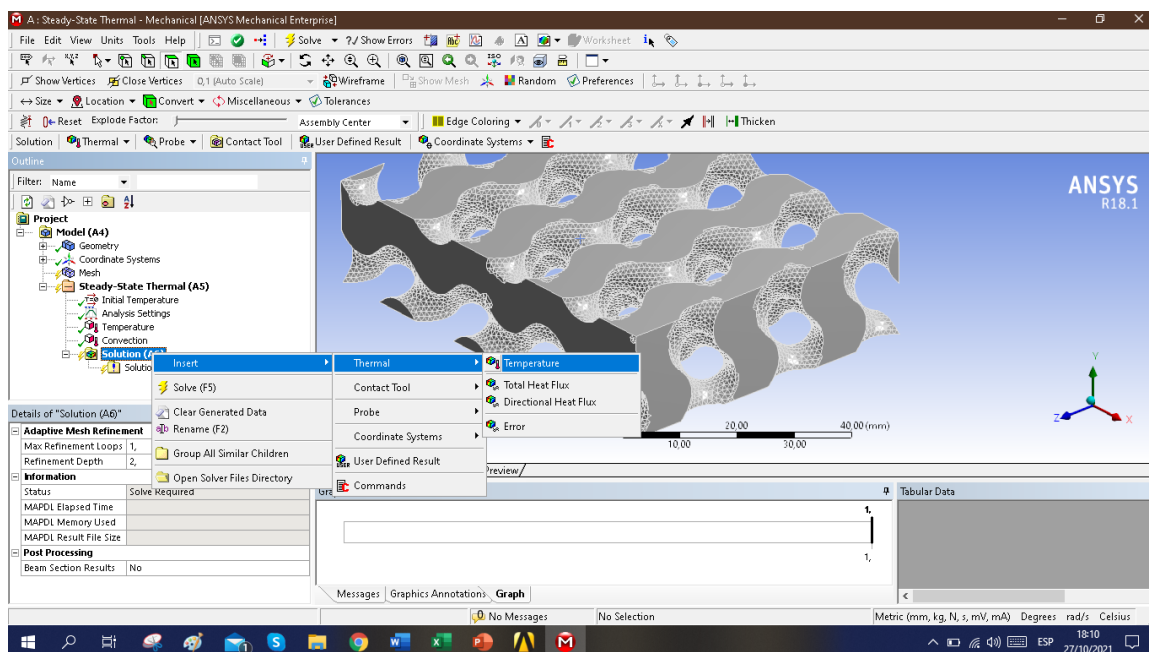
*Nota.* Se presentan las opciones de condiciones de temperatura que el programa Ansys permite insertar dentro del análisis térmico en condición estable.

#### 2.2.1.5. Resultados del análisis térmico de estado estable. En la

Figura 15 se presentan todas las posibles soluciones disponibles para analizar en el análisis térmico de estado estable, se puede observar resultados de temperatura, flujo de calor total y direccional como gradientes, etc. Al dar clic en Resolver se iniciará la solución y se presentarán los resultados solicitados.

Figura 15

## Resultados del análisis térmico de estado estable



*Nota.* Se presenta el método de obtener los resultados para un análisis térmico y todas sus posibles soluciones.

### 2.2.2. Fluent

El software Ansys Fluent contiene las amplias capacidades de modelado físico necesarias para modelar el flujo, la turbulencia, la transferencia de calor y las reacciones para aplicaciones industriales que van desde el flujo de aire sobre el ala de un avión hasta la combustión en un horno, entre otra amplia variedad de aplicaciones que este software es capaz de simular (Ozen, 2021).

Tabla 2

#### Características de Ansys Fluent

Características de Ansys Fluent	
Característica	Descripción
Mallas, procesamiento numérico y paralelo	Resultados rápidos y precisos, flexibilidad de malla, escalabilidad paralela superior, etc.
Turbulencia y acústica	Amplitud incomparable de modelos de turbulencia y herramientas de modelado acústico

Características de Ansys Fluent	
Característica	Descripción
Flujo de Reacción	Vastas capacidades que satisfacen los diversos desafíos de modelar procesos de combustión complejos
Post – procesamiento y exportación de datos	Generación de gráficos, animaciones e informe representativos y transfiera datos a otras aplicaciones
Malla dinámica y móvil	Enfoque innovador para simular condiciones de flujo dentro y alrededor de objetos en movimiento
Transferencia de calor, cambio de fase y radiación	Conjunto completo de opciones para convección, conducción, radiación, etc.
Multifase	Provee información con una gama completa de capacidades para modelar flujo complejos
Herramientas personalizadas	Funciones definidas por el usuario, consultoría global y módulos complementarios para aplicaciones especiales

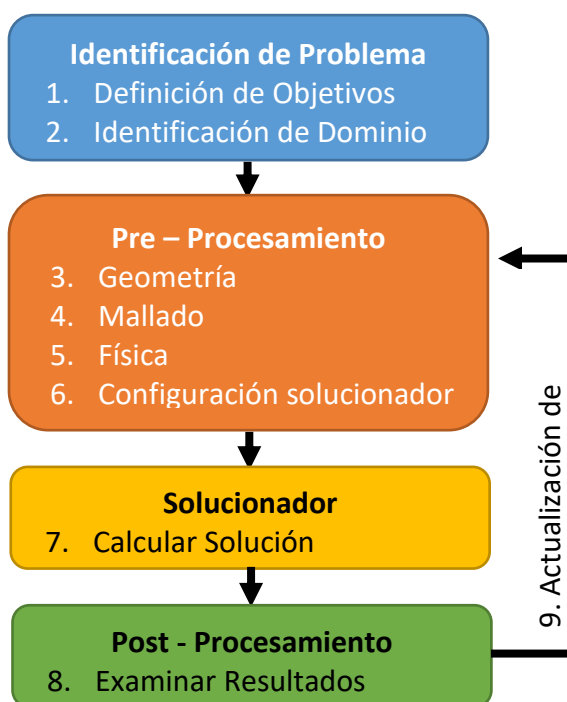
Nota. Adaptado de *Ansys Fluent Flow Modeling Software* [Tabla], 2021, Ozen

(<https://www.ozeninc.com/products/fluid-dynamics/ansys-fluent/>).

**2.2.2.1. Modelado CFD.** El procedimiento a seguir para la realización de un análisis dinámico de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés, Computational Fluid Dynamics), se lo expresa de manera general en la Figura 16.

**Figura 16**

*Descripción General de Modelado CFD*



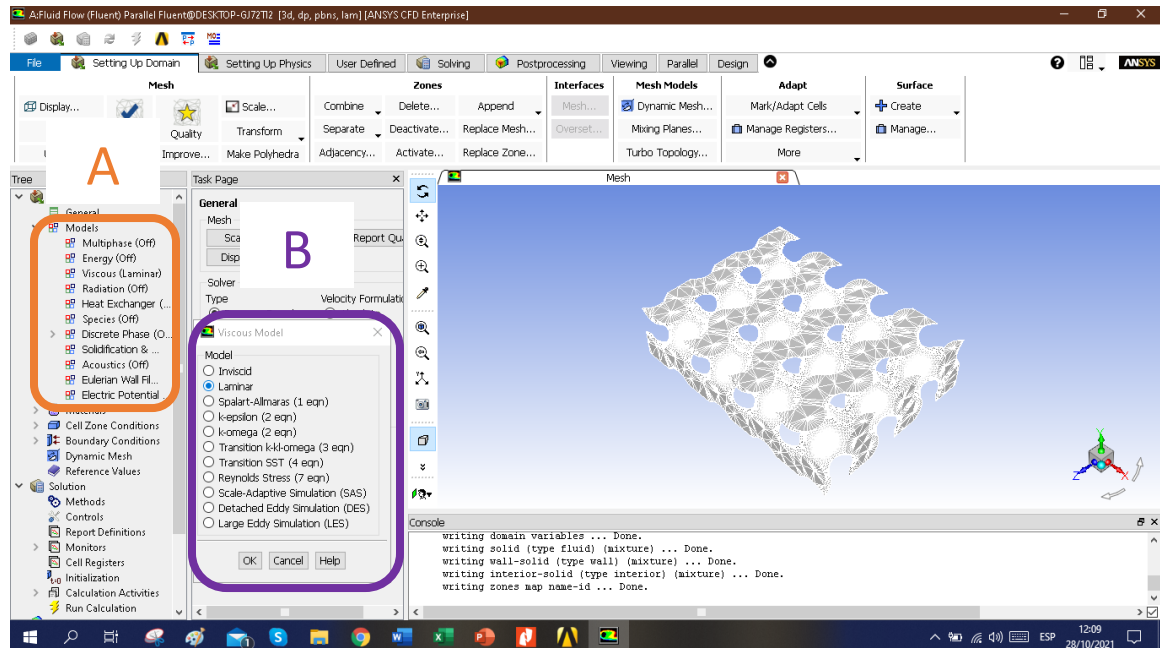
*Nota.* Adaptado de *Introduction to CFD Methodology* [Fotografía], por Ansys, 2010, iMechanical ([https://imechanica.org/files/fluent\\_13.0\\_lecture02-intro-to-cfd.pdf](https://imechanica.org/files/fluent_13.0_lecture02-intro-to-cfd.pdf)).

**2.2.2.2. Mallado necesario para el análisis CFD.** En lo que corresponde al aspecto de mallado para el análisis de Ansys Fluent la interfaz es la misma trabajada para el análisis térmico en estado estacionario y las condiciones de trabajo se mantienen similares.

**2.2.2.3. Condiciones iniciales para el análisis.** Como se observa en la Figura 17A Ansys Fluent tiene como condición inicial el establecer el tipo de Modelo que se va a analizar, esto se refiere al tipo de análisis y los fenómenos físicos que se deben estudiar y tomar en cuenta a la hora de calcular las soluciones del análisis, en la Tabla 3 se detallan los componentes de cada modelo.

**Figura 17**

*Modelos de Ansys Fluent*



*Nota.* Se presenta todas las opciones de Modelo que Ansys dispone para incluir en su análisis.

**Tabla 3***Modelos disponibles en CFD*

<b>Modelos de Ansys Fluent</b>	
<b>Modelo</b>	<b>Caso de Estudio</b>
Multiphase	Euleriana, Mezcla, Volumen de Líquido, Corriente Húmeda
Energy	Ecuación de Energía
Viscous	No viscoso, Laminar, Spalart–Allmaras, k–epsilon, k–omega, Transición k-kl-omega, Transición SST, Esfuerzo de Reynolds, Simulación Adaptable a Escala, Simulación de Remolinos Independientes, Simulación de Remolinos Grandes
Radiation	Ordenadas Discretas, Transferencia Discreta, Rosseland, Superficie a Superficie
Heat Exchanger	Modelo de Celda Dual, Grupo de Modelo Macro, Modelo Macro no Agrupado
Species	Transporte de Composición PDF, Combustión no Premezclada, Combustión Parcialmente Premezclada, Combustión Premezclada, Transporte de Especies
Discrete Phase	Numéricos, Paralelo, Modelos Físicos, Seguimiento
Solidification and Melting	Difusión Trasera, Solidificación / Fusión
Acoustics	Ffowcs-Williams & Hawkings, Ecuación de Onda
Electric Potential	Ecuación de Potencial

*Nota.* Adaptado de *An Introduction to ANSYS Fluent 2021* (p. 16), por John E. Matsson, 2021, SDC Publications.

Adicionalmente en la parte de los modelos de Ansys Fluent se debe establecer el tipo de fluido de trabajo como se observa en la Figura 17B y su condición de trabajo que se debe simular, todo esto con el fin de establecer las condiciones de frontera del estudio para obtener los resultados más reales posibles.

**2.2.2.4. Cálculo de soluciones para el análisis.** Para que el software Ansys Fluent empiece a resolver el problema que se le está solicitando simular, inicialmente es necesario inicializar los resultados, como se puede observar en la Figura 18A existen 2 métodos de inicialización, el método de inicialización Híbrida resuelve la ecuación de Laplace para producir un campo de velocidades que se ajuste al dominio como conjetura inicial y todas las demás variables se ajustan a los valores promedio del

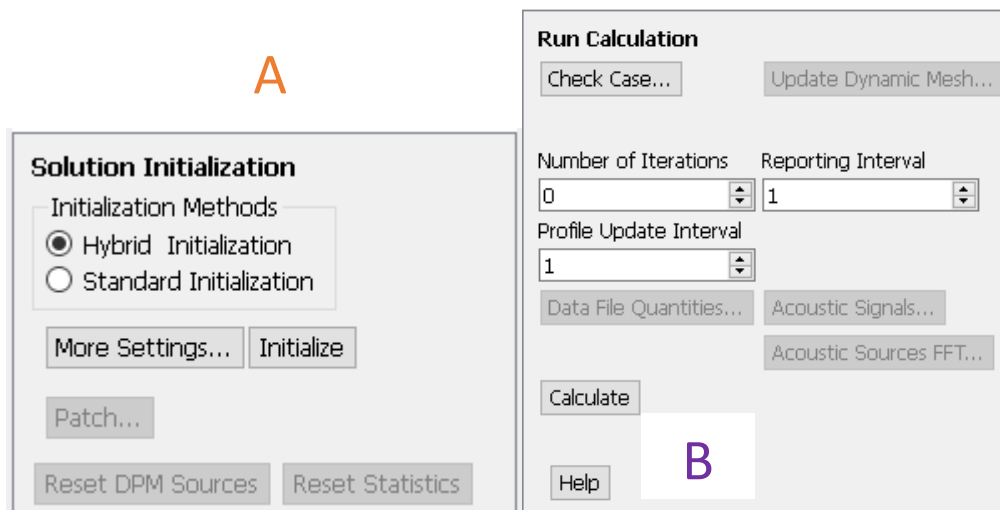


dominio, esto quiere decir que esta inicialización resuelve una serie de iteraciones de un sistema de ecuaciones para estimar las variables de flujo más óptimas por lo que consumo menor tiempo. Mientras que la inicialización Estándar solicita al operador especificar todas las variables directamente como aproximaciones iniciales, por lo que esta inicialización requiere más tiempo y se basa en suposiciones.

Una vez realizada la inicialización del proceso, es necesario solicitarle al software que empiece a calcular los resultados como se observa en la Figura 18B, en esta sección únicamente es necesario indicar el límite máximo de iteraciones que el operador desea que el software calcule hasta encontrar una solución que básicamente se halla cuando el software resolviendo un sistema de ecuaciones llega a una convergencia de resultados.

### Figura 18

*Cálculo de Soluciones en Ansys Fluent*



*Nota.* Se representa los 2 pasos necesarios para que el software Ansys Fluent empiece a calcular las soluciones hasta encontrar el punto de convergencia que indica que la simulación ha sido resuelta.

#### **2.2.2.5. Análisis de resultados en Ansys fluent.** Posterior a la

finalización de los cálculos de la simulación solicitada al software corresponde la etapa de post – procesamiento en donde se debe analizar los resultados obtenidos, observar que las condiciones de frontera establecidas generen resultados reales y apegados a la realidad. Para el análisis de los resultados obtenidos Ansys Fluent presenta opciones tales como:

- **Contour:** Se refiere a la generación de un plano en cualquier eje que se desee generar el mismo y mediante el cual se puede representar la variable que se necesita analizar mediante un código de colores que viene acompañado de una barra de colores que indica los valores referenciales a cada color.
- **Streamline:** Se refiere a la simulación de flujo del fluido de trabajo dentro del contorno de estudio o dentro de la pieza modelada para de esta manera observar la dirección del mismo. De igual manera viene acompañado de un código de color que representa visualmente la variable que se desea representar y analizar.
- **Probe:** Se refiere a la medición de la variable que se desee analizar en puntos en específico que pueden estar situados sobre un Contour o sobre un eje de la pieza modelada.

## Capítulo III

### Análisis Computacional

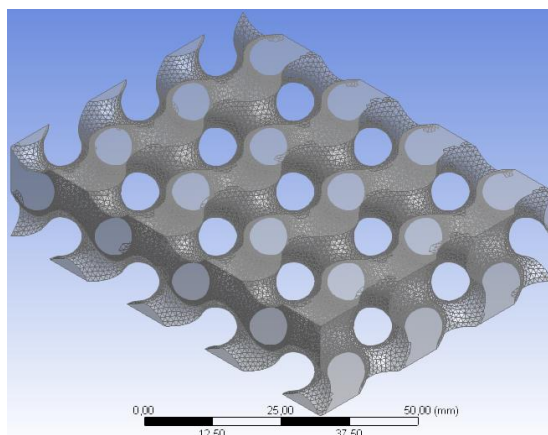
Se efectuarán distintos ensayos digitales de probetas con diferentes estructuras de celulares de relleno con el objetivo de determinar la estructura TPMS más óptima que proporcione la conducción de calor a través de su propia estructura. Para lo cual se realizarán diversas simulaciones con la ayuda del software Ansys. Las estructuras TPMS se han modelado en 2 versiones; la superficie que se utilizará para estudiar el comportamiento de la estructura simulando el sólido que se analizaría experimentalmente y la parte llena que se utilizará para estudiar el comportamiento del fluido y su respuesta al atravesar la estructura celular. Las propiedades de la probeta a utilizar corresponden al material del Polietileno, del cual la propiedad a utilizar en el ensayo realizado es la conductividad térmica con un valor de  $0,28 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ .

#### **3.1. Ensayo de simulación de conducción de calor con un mismo tamaño**

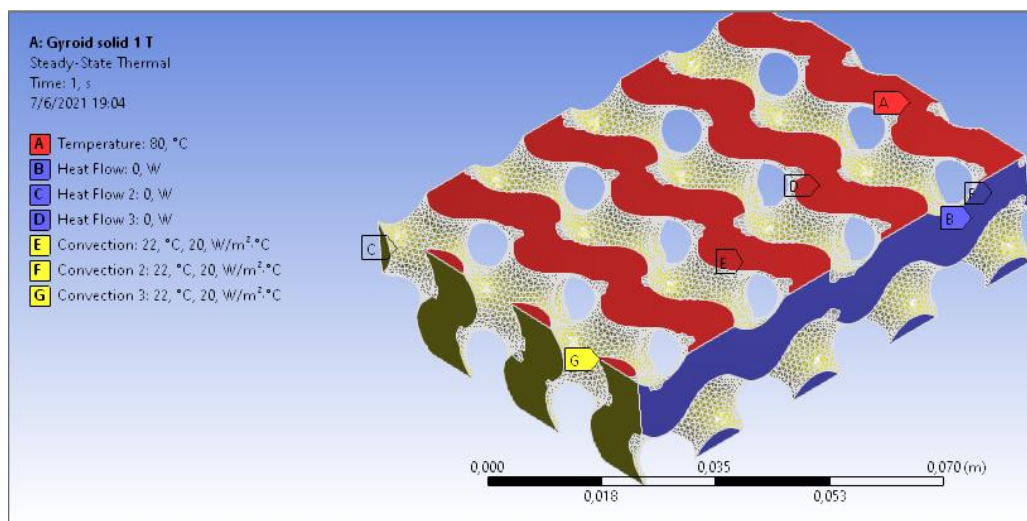
El presente ensayo describe un análisis comparativo de las varias arquitecturas que se proponen estudiar para cumplir su papel como disipadores de calor. Estas arquitecturas son derivadas del software SpaceClaim de Ansys. Este ensayo consiste de 2 partes, inicialmente se aplicará en la cara superior de la probeta una temperatura de  $80^\circ\text{C}$ , en una segunda instancia se aplicará en la cara superior y en la cara inferior de la probeta una temperatura de  $80^\circ\text{C}$ , esto con el fin de determinar si existe una gran diferencia en la transferencia de energía a través de la probeta aplicando temperatura en uno o ambos lados de la misma.

##### **3.1.1. Simulación de conducción de calor en Gyroide en un lado**

La probeta corresponde a una estructura celular TPMS de tipo Gyroide como se muestra en la Figura 19.

**Figura 19***Estructura TPMS Gyroide*

La probeta se encuentra perfectamente aislada en la parte inferior y en los costados, mientras que en la parte delantera y trasera se tiene convección al ambiente a 20°C, así como en la parte interna de la estructura, tal como se muestra en la Figura 20. Estas condiciones iniciales serán aplicadas a todas las probetas utilizadas en este ensayo por igual.

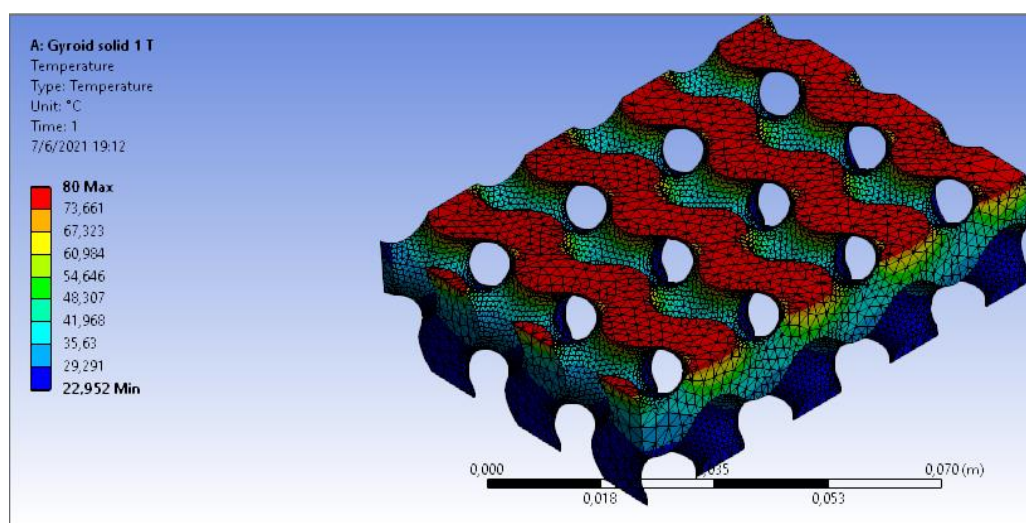
**Figura 20***Condiciones Iniciales de la Probeta Gyroide*

Las dimensiones de la probeta son de 5 x 0,5 mm de espesor en el espacio vacío, a partir de la cual se obtiene la probeta que se presenta en la Figura 21 y sobre la

cual se procede a aplicar las condiciones iniciales antes mencionadas, de igual manera se mantendrán las mismas dimensiones para todas las probetas utilizadas en este ensayo ya que inicialmente es de interés determinar que estructura presenta un mejor desempeño analizadas todas bajo las mismas condiciones.

**Figura 21**

*Simulación Gyroide temperatura en 1 lado*



En la Tabla 4 se presenta los resultados obtenidos del análisis computacional realizado en la probeta Gyroide en donde es de interés analizar el mínimo valor de la temperatura que la probeta alcanza en cualquier punto de su cuerpo luego de haberse aplicado 80°C en la cara superior y de que se generen las respectivas pérdidas (por convección) en la transferencia de energía por conducción que es la de importancia de estudio en este ensayo.

**Tabla 4**

*Resultados Gyroide*

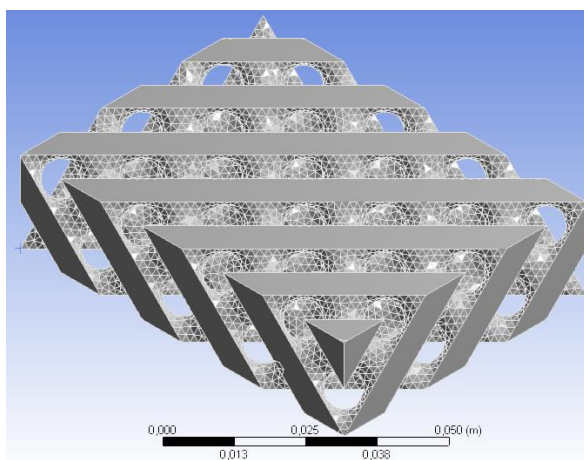
Temperatura	Temperatura Mínima
80 °C	22.952 °C

### 3.1.2. Simulación de conducción de calor en Schwarz D en un lado

La probeta corresponde a una estructura celular TPMS de tipo Schwarz D como se muestra en la Figura 22.

**Figura 22**

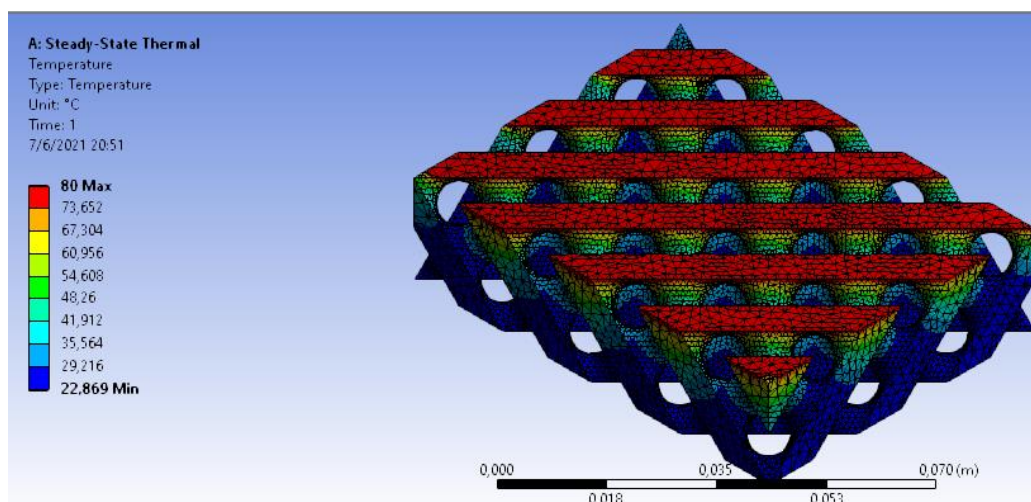
*Estructura TPMS Schwarz D*



Con lo mencionado anteriormente se tienen las condiciones iniciales y las dimensiones de estudio por lo que se procede a realizar el análisis computacional con la probeta correspondiente como se muestra en la Figura 23.

**Figura 23**

*Simulación Schwarz D temperatura en 1 lado*



En la Tabla 5 se presenta los resultados obtenidos del análisis computacional realizado en la probeta Schwarz D en donde el criterio de estudio se mantiene igual al mencionado en el análisis de la estructura Gyroide.

**Tabla 5**

*Resultados Schwarz D*

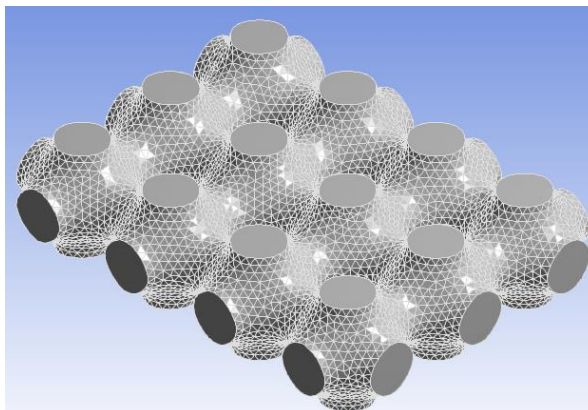
Temperatura	Temperatura Mínima
80 °C	22.869 °C

### **3.1.3. Simulación de conducción de calor en Schwarz P en un lado**

La probeta corresponde a una estructura celular TPMS de tipo Schwarz P como se muestra en la Figura 24.

**Figura 24**

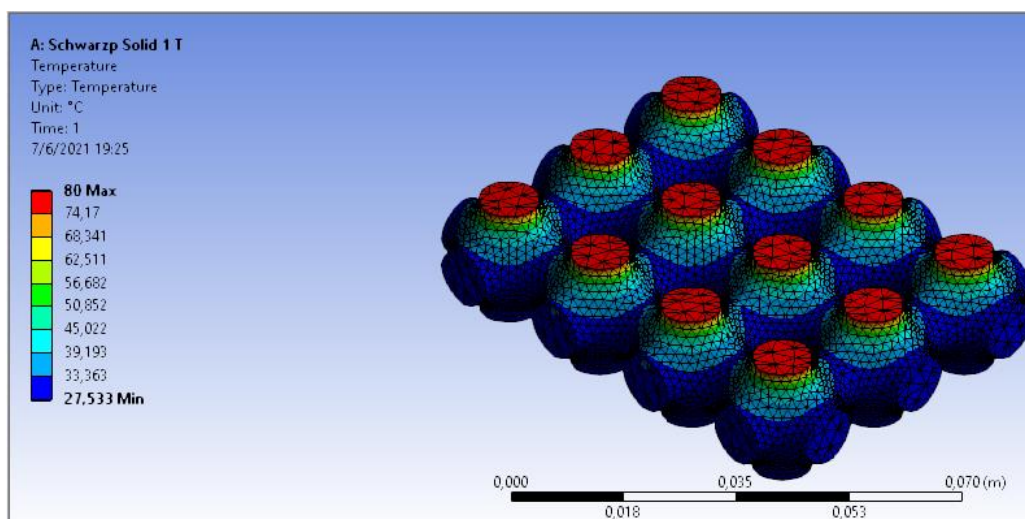
*Estructura TPMS Schwarz P*



Con lo mencionado anteriormente se tienen las condiciones iniciales y las dimensiones de estudio por lo que se procede a realizar el análisis computacional con la probeta correspondiente como se muestra en la Figura 25.

**Figura 25**

*Simulación Schwarz P temperatura en 1 lado*



En la Tabla 6 se presenta los resultados obtenidos del análisis computacional realizado en la probeta Schwarz P en donde el criterio de estudio se mantiene igual al mencionado en el análisis de la estructura Gyroide.

**Tabla 6**

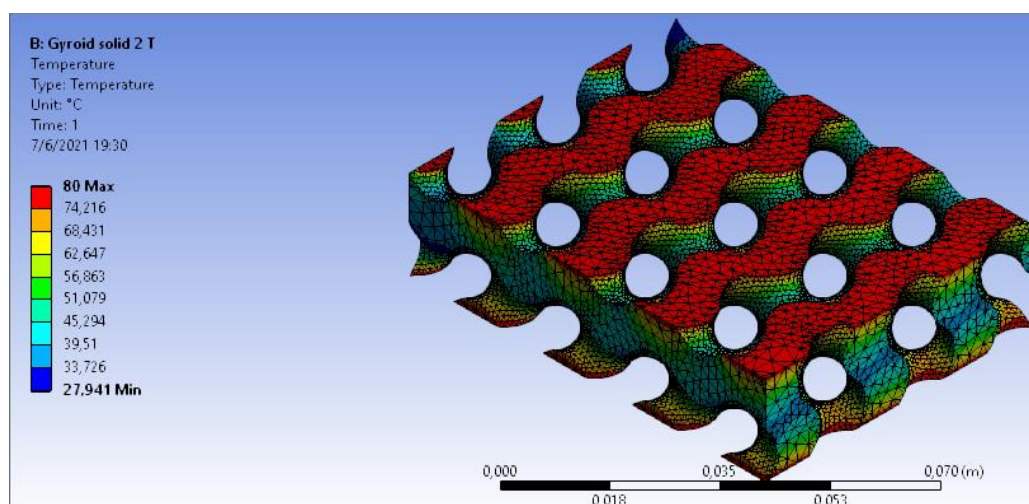
*Resultados Schwarz P*

Temperatura	Temperatura Mínima
80 °C	27.533 °C

### **3.1.4. Simulación de conducción de calor en Gyroide en dos lados**

La probeta a utilizar es la misma de la Figura 19, las condiciones iniciales con las que se va a trabajar son similares a las de la Figura 20 con la diferencia que en vez de que la cara inferior de la probeta se encuentre perfectamente aislada, esta se encontrará expuesta a una temperatura de 80°C de la misma manera que la cara superior. De esta manera, se procede a realizar el análisis computacional como se muestra en la Figura 26.



**Figura 26***Simulación Gyroide*

En la Tabla 7 se presenta los resultados obtenidos del análisis computacional realizado en la probeta Gyroide en donde es de interés analizar el mínimo valor de la temperatura que la probeta alcanza en cualquier punto de su cuerpo luego de haberse aplicado 80°C en la cara superior e inferior y de que se generen las respectivas pérdidas (por convección) en la transferencia de energía por conducción que es la de importancia de estudio en este ensayo.

**Tabla 7***Resultados Gyroide*

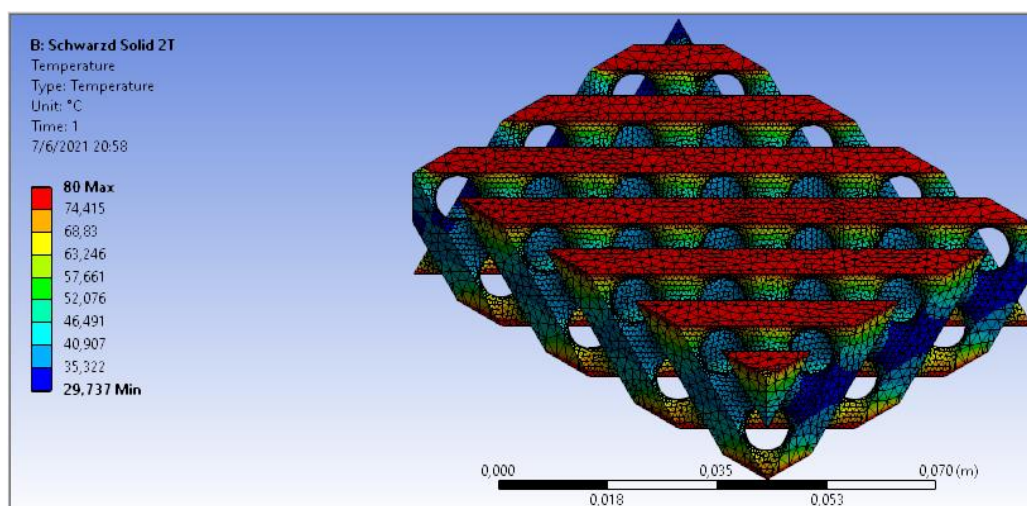
Temperatura	Temperatura Mínima
80 °C	27.941 °C

### **3.1.5. Simulación de conducción de calor en Schwarz D en dos lados**

La probeta a utilizar es la misma de la Figura 22, las condiciones iniciales a aplicar son las mismas mencionadas en el punto 3.1.4 para la probeta de Gyroide con aplicación de temperatura en la cara superior e inferior. De esta manera, se procede a realizar el análisis computacional como se muestra en la Figura 27.

**Figura 27**

*Simulación Schwarz D temperatura en 2 lados*



En la Tabla 8 se presenta los resultados obtenidos del análisis computacional realizado en la probeta Schwarz D en donde el criterio de estudio se mantiene igual al mencionado en el análisis de la estructura Gyroide con aplicación de temperatura en 2 lados.

**Tabla 8**

*Resultados Schwarz D*

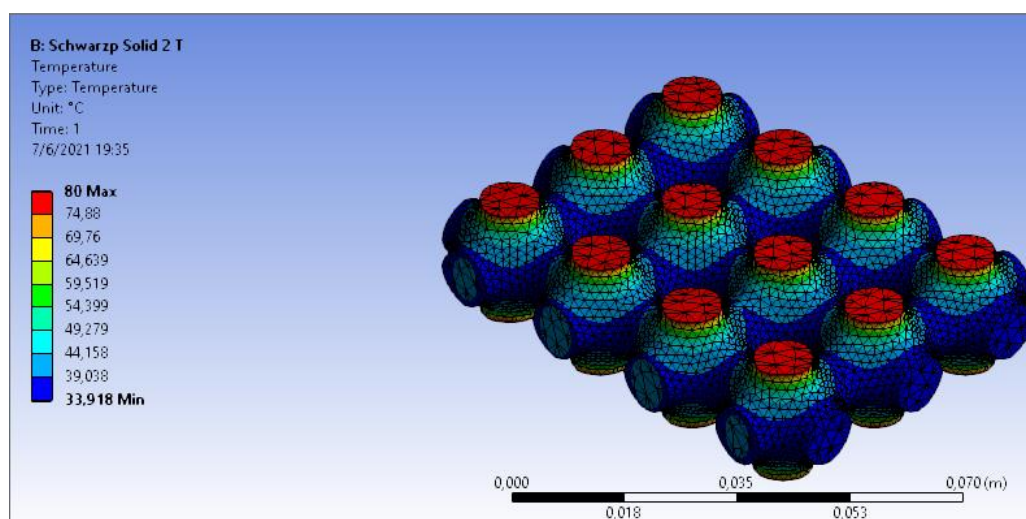
Temperatura	Temperatura Mínima
80 °C	29.737 °C

### **3.1.6. Simulación de conducción de calor en Schwarz P en dos lados**

La probeta a utilizar es la misma de la Figura 24, las condiciones iniciales a aplicar son las mismas mencionadas en el punto 3.1.4 para la probeta de Gyroide con aplicación de temperatura en la cara superior e inferior. De esta manera, se procede a realizar el análisis computacional como se muestra en la Figura 28.

**Figura 28**

*Simulación Schwarz P temperatura en 2 lados*



En la Tabla 9 se presenta los resultados obtenidos del análisis computacional realizado en la probeta Schwarz P en donde el criterio de estudio se mantiene igual al mencionado en el análisis de la estructura Gyroide con aplicación de temperatura en 2 lados.

**Tabla 9**

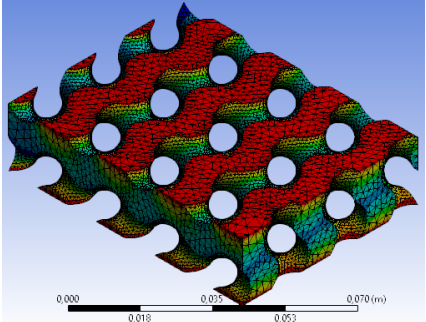
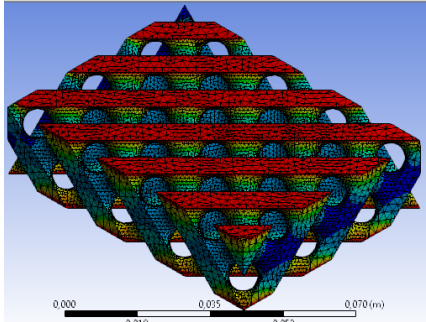
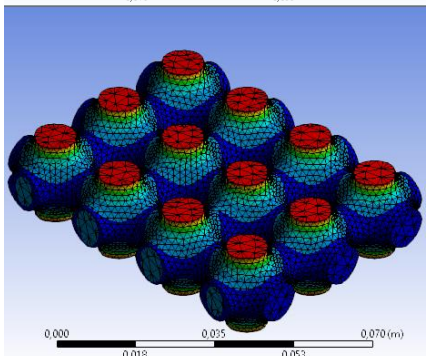
*Resultados Schwarz P*

Temperatura	Temperatura Mínima
80°C	33.918 °C

### 3.2. Resultados ensayo de simulación de conducción de calor

En la Tabla 10 se presentan los resultados tabulados del ensayo realizado previamente en el punto 3.1 a manera de resumen.

**Tabla 10***Resultados Ensayo 1*

Estructura	Topología	Temperatura 1 lado [°C]	Temperatura 2 lados [°C]
Gyroide		22.952	27.941
Schwarz D		22.869	29.737
Schwarz P		27.533	33.918

*Nota.* En la tabla se presentan resultados resumidos de la Tabla 4 a 9.

Analizando los resultados obtenidos en la Tabla 10 se concluye que la estructura celular TPMS Schwarz P es la probeta más óptima para simular el papel de disipadores de calor a través de la misma debido a que presenta la menor pérdida en transferencia de energía por conducción al ser un material aislante térmico.

### **3.3. Ensayo de simulación de conducción de calor en distintos tamaños**

El siguiente ensayo describe un análisis comparativo de las varias arquitecturas que se proponen estudiar para cumplir su papel como disipadores de calor esta vez enfocado a determinar el tamaño de las porosidades óptimo que favorezca en mayor cantidad la transferencia de energía o calor. Este ensayo consiste de 2 partes, inicialmente se aplicará en la cara superior de la probeta una temperatura de 80°C, en una segunda instancia se aplicará en la cara superior y en la cara inferior de la probeta una temperatura de 80°C, esto con el fin de determinar si existe una gran diferencia en la transferencia de energía a través de la probeta aplicando temperatura en uno o ambos lados de la misma.

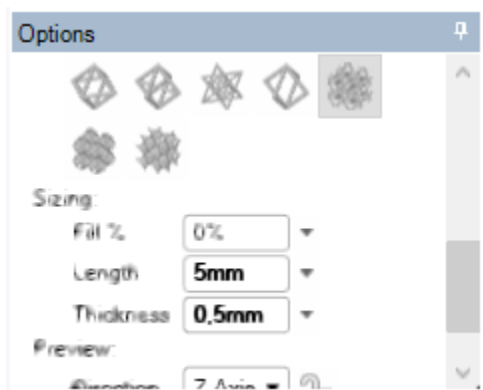
#### **3.3.1. Simulación de conducción de calor en Gyroide en un lado**

La probeta corresponde a una estructura celular TPMS de tipo Gyroide como se muestra en la Figura 19. La probeta se encuentra perfectamente aislada en la parte inferior y en los costados, mientras que en la delantera y trasera se tiene convección al ambiente a 20°C, así como en la parte interna de la estructura, tal como se muestra en la Figura 20. Estas condiciones iniciales serán aplicadas a todas las probetas utilizadas en este ensayo por igual.

**3.3.1.1. Gyroide tamaño intermedio con temperatura en un lado.** Las dimensiones de la probeta son de 5 x 0,5 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 29.

## Figura 29

### Parámetros Gyroide Intermedio

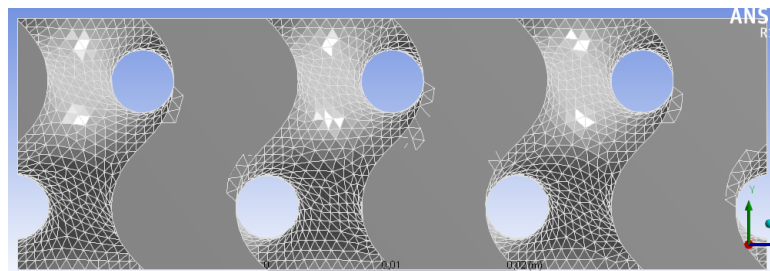


*Nota.* Se presentan los parámetros de diseño para la estructura TPMS Gyroide para su respectiva generación en el software SpaceClaim de Ansys.

A partir de estas dimensiones se obtiene la probeta que se presenta en la Figura 30 y sobre la cual se procede a aplicar las condiciones iniciales antes mencionadas.

## Figura 30

### Estructura Gyroide Intermedio

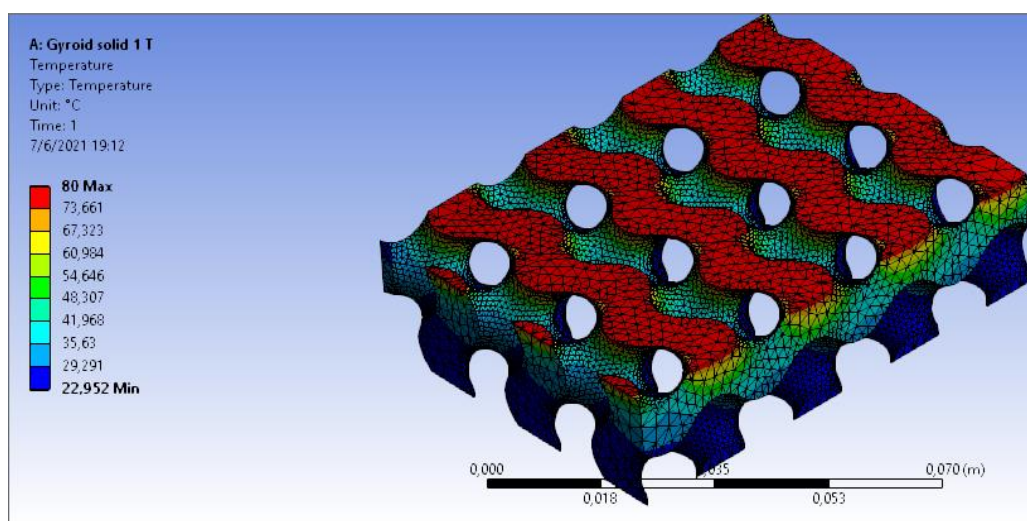


*Nota.* El criterio de diseño para la construcción de la estructura se basó en tener 5 espacios vacíos en la cara lateral de la probeta en base al cual se seleccionan los parámetros de diseño.

Con la probeta generada se procede a inicializar la simulación computacional obteniéndose los resultados que se presentan en la Figura 31.

**Figura 31**

*Simulación Gyroide Intermedio temperatura en 1 lado*



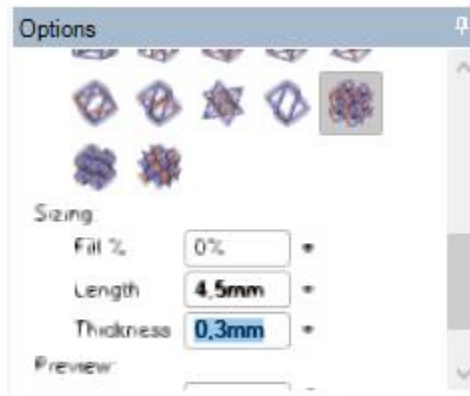
En la Tabla 11 se presenta los resultados obtenidos del análisis computacional realizado en la probeta Gyroide en donde es de interés analizar el mínimo valor de la temperatura que la probeta alcanza en cualquier punto de su cuerpo luego de haberse aplicado 80°C en la cara superior y de que se generen las respectivas pérdidas (por convección) en la transferencia de energía por conducción que es la de importancia de estudio en este ensayo.

**Tabla 11**

*Resultados Gyroide Intermedio (1T)*

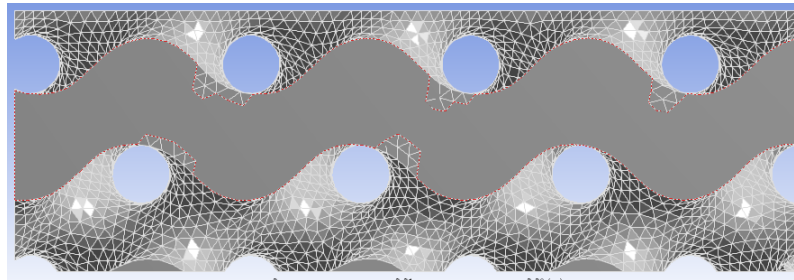
Temperatura	Temperatura Mínima
80 °C	22.952 °C

**3.3.1.2. Gyroide tamaño inferior con temperatura en un lado.** Las dimensiones de la probeta son de 4,5 x 0,3 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 32.

**Figura 32***Parámetros Gyroide Inferior*

*Nota.* Se presentan los parámetros de diseño para la estructura TPMS Gyroide para su respectiva generación en el software SpaceClaim de Ansys.

A partir de estas dimensiones se obtiene la probeta que se presenta en la Figura 33 y sobre la cual se procede a aplicar las condiciones iniciales antes mencionadas.

**Figura 33***Estructura Gyroide Inferior*

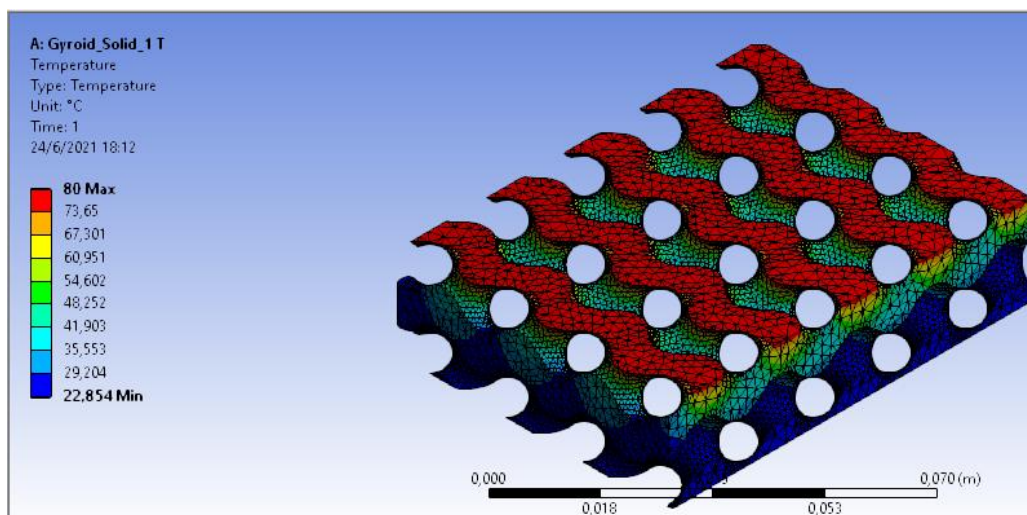
*Nota.* El criterio de diseño para la construcción de la estructura se basó en tener 6 espacios vacíos en la cara lateral de la probeta en base al cual se seleccionan los parámetros de diseño.

Con la probeta generada se procede a inicializar la simulación computacional obteniéndose los resultados que se presentan en la Figura 34.



**Figura 34**

*Simulación Gyroide Inferior temperatura en 1 lado*



En la Tabla 12 se presenta los resultados obtenidos del análisis computacional realizado en la probeta Gyroide en donde el criterio de estudio se mantiene igual al mencionado en el análisis de la estructura Gyroide con aplicación de temperatura en 1 lado.

**Tabla 12**

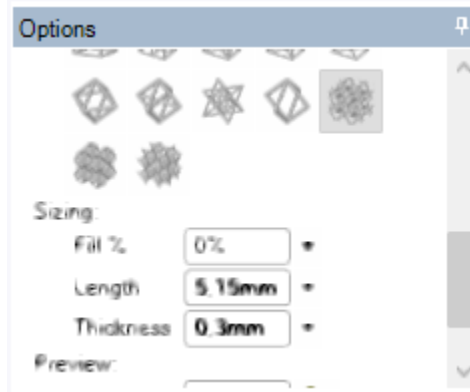
*Resultados Gyroide Inferior (1T)*

Temperatura	Temperatura Mínima
80 °C	22.854 °C

**3.3.1.3. Gyroide tamaño superior con temperatura en un lado.** Las dimensiones de la probeta son de 5,15 x 0,3 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 35.

### Figura 35

#### Parámetros Gyroide Superior

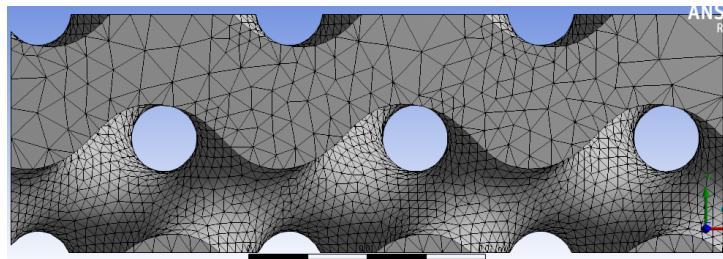


*Nota.* Se presentan los parámetros de diseño para la estructura TPMS Gyroide para su respectiva generación en el software SpaceClaim de Ansys.

A partir de estas dimensiones se obtiene la probeta que se presenta en la Figura 36 y sobre la cual se procede a aplicar las condiciones iniciales antes mencionadas.

### Figura 36

#### Estructura Gyroide Superior

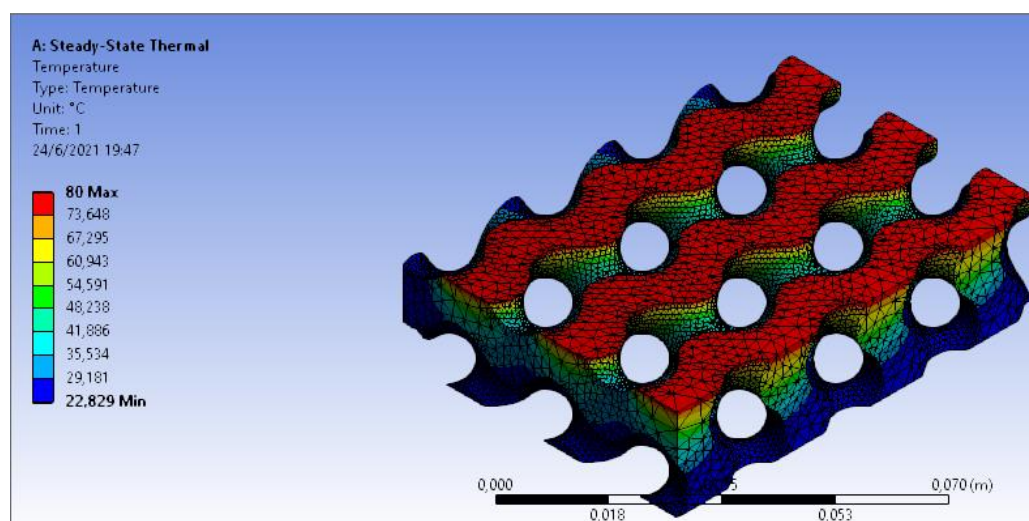


*Nota.* El criterio de diseño para la construcción de la estructura se basó en tener 3 espacios vacíos en la cara lateral de la probeta en base al cual se seleccionan los parámetros de diseño.

Con la probeta generada se procede a inicializar la simulación computacional obteniéndose los resultados que se presentan en la Figura 37.

**Figura 37**

*Simulación Gyroide Superior temperatura en 1 lado*



En la Tabla 13 se presenta los resultados obtenidos del análisis computacional realizado en la probeta Gyroide en donde el criterio de estudio se mantiene igual al mencionado en el análisis de la estructura Gyroide con aplicación de temperatura en 1 lado.

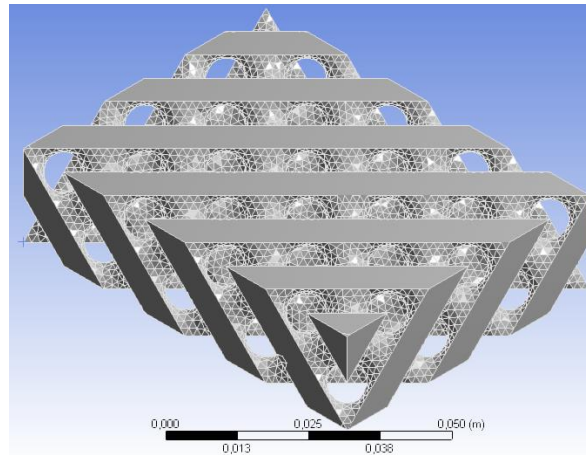
**Tabla 13**

*Resultados Gyroide Superior (1T)*

Temperatura	Temperatura Mínima
80 °C	22.829 °C

### **3.3.2. Simulación de conducción de calor en Schwarz D en un lado**

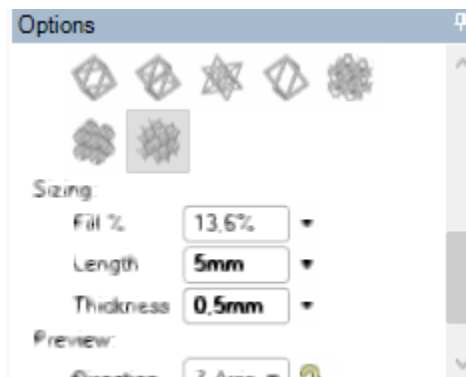
La probeta corresponde a una estructura celular TPMS de tipo Schwarz D como se muestra en la Figura 38.

**Figura 38***Estructura TPMS Schwarz D*

Las condiciones iniciales de estudio para el análisis computacional son similares a las aplicadas en la Figura 30 para la probeta del Gyroide.

### 3.3.2.1. Schwarz D tamaño intermedio con temperatura en un lado.

Las dimensiones de la probeta son de 5 x 0,5 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 39.

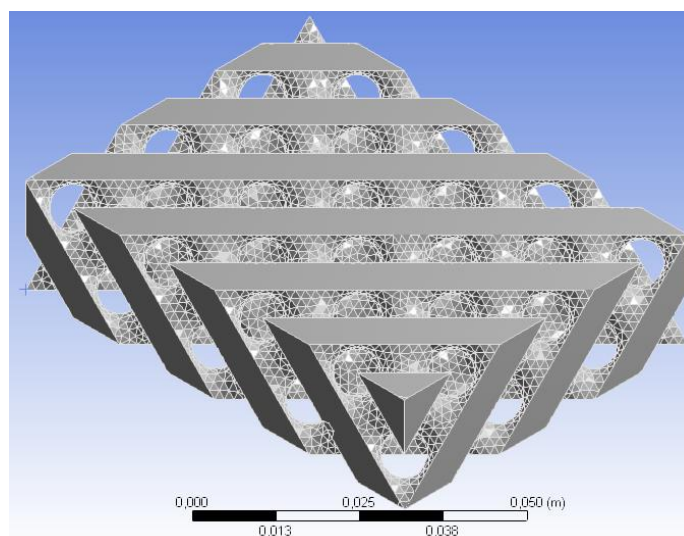
**Figura 39***Parámetros Schwarz D Intermedio*

*Nota.* Se presentan los parámetros de diseño para la estructura TPMS Schwarz D para su respectiva generación en el software SpaceClaim de Ansys.

A partir de estas dimensiones se obtiene la probeta que se presenta en la Figura 40 y sobre la cual se procede a aplicar las condiciones iniciales antes mencionadas.

**Figura 40**

*Estructura Schwarz D Intermedio*

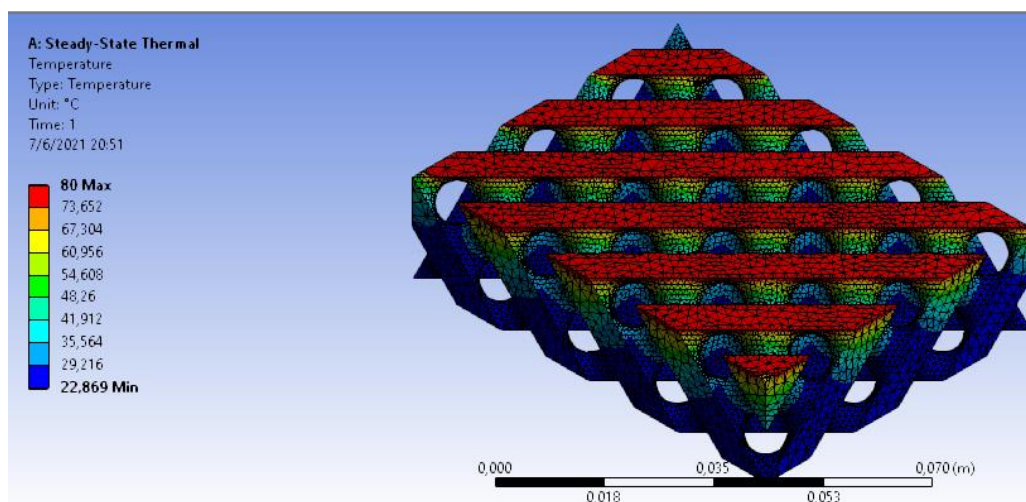


*Nota.* El criterio de diseño para la construcción de la estructura se basó en mantener tamaños similares entre las estructuras de estudio por lo que se mantendrán los mismos parámetros de diseño que en la probeta Gyroide.

Con la probeta generada se procede a inicializar la simulación computacional obteniéndose los resultados que se presentan en la Figura 41.

**Figura 41**

*Simulación Schwarz D Intermedio temperatura en 1 lado*



En la Tabla 14 se presenta los resultados obtenidos del análisis computacional realizado en la probeta Schwarz D en donde es de interés analizar el mínimo valor de la temperatura que la probeta alcanza en cualquier punto de su cuerpo luego de haberse aplicado 80°C en la cara superior y de que se generen las respectivas pérdidas (por convección) en la transferencia de energía por conducción que es la de importancia de estudio en este ensayo.

**Tabla 14**

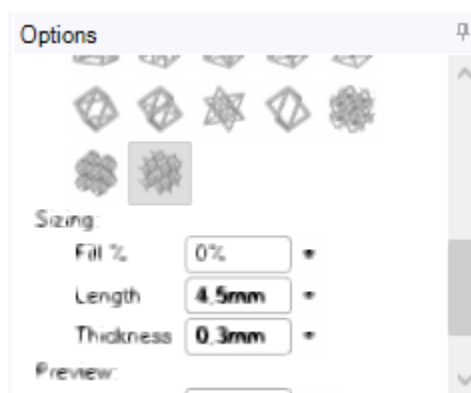
*Resultados Schwarz D Intermedio (1T)*

Temperatura	Temperatura Mínima
80 °C	22.869 °C

**3.3.2.2. Schwarz D tamaño inferior con temperatura en un lado.** Las dimensiones de la probeta son de 4,5 x 0,3 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 42.

**Figura 42**

*Parámetros Schwarz D Inferior*

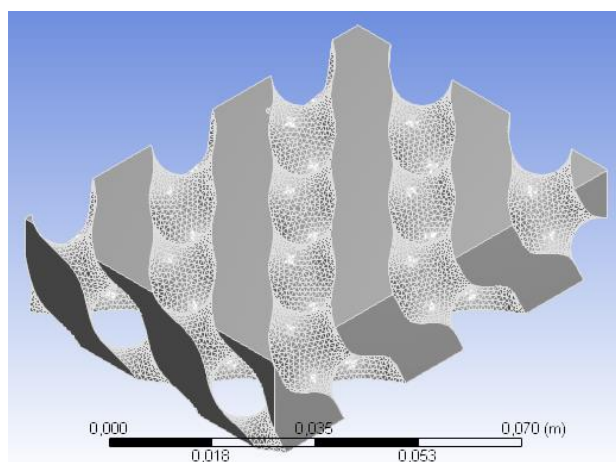


*Nota.* Se presentan los parámetros de diseño para la estructura TPMS Schwarz D para su respectiva generación en el software SpaceClaim de Ansys.

A partir de estas dimensiones se obtiene la probeta que se presenta en la Figura 43 y sobre la cual se procede a aplicar las condiciones iniciales antes mencionadas.

**Figura 43**

*Estructura Schwarz D Inferior*

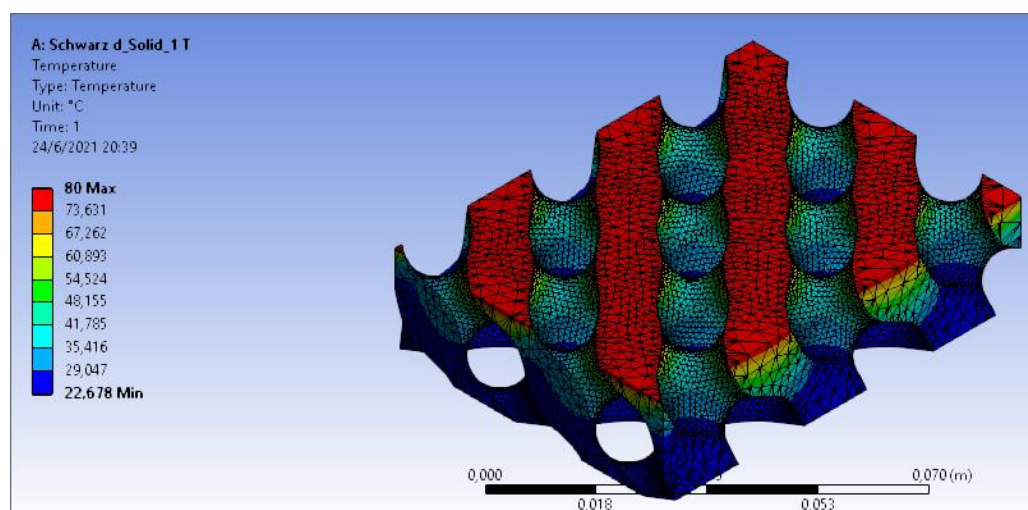


*Nota.* El criterio de diseño para la construcción de la estructura se basó en tener parámetros de diseño similares para todas las probetas analizadas.

Con la probeta generada se procede a inicializar la simulación computacional obteniéndose los resultados que se presentan en la Figura 44.

**Figura 44**

*Simulación Schwarz D Inferior temperatura en 1 lado*



En la Tabla 15 se presenta los resultados obtenidos del análisis computacional realizado en la probeta Schwarz D en donde el criterio de estudio se mantiene igual al

mencionado en el análisis de la estructura Gyroide con aplicación de temperatura en 1 lado.

### Tabla 15

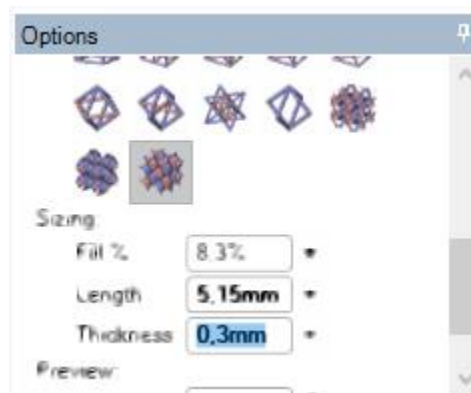
*Resultados Gyroide Inferior (1T)*

Temperatura	Temperatura Mínima
80 °C	22.678 °C

**3.3.2.3. Schwarz D tamaño superior con temperatura en un lado.** Las dimensiones de la probeta son de 5,15 x 0,3 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 45.

### Figura 45

*Parámetros Schwarz D Superior*



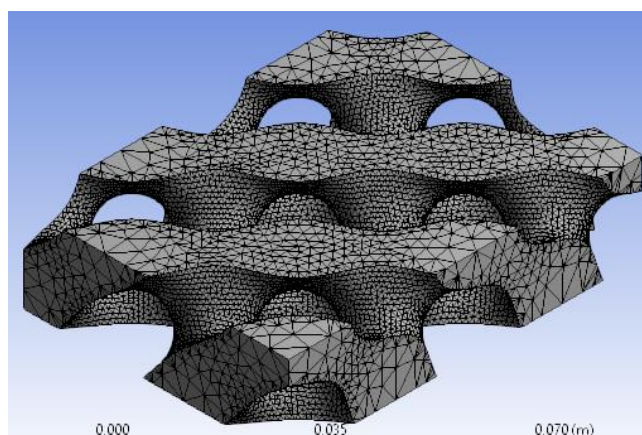
*Nota.* Se presentan los parámetros de diseño para la estructura TPMS Schwarz D para su respectiva generación en el software SpaceClaim de Ansys.

A partir de estas dimensiones se obtiene la probeta que se presenta en la Figura 46 y sobre la cual se procede a aplicar las condiciones iniciales antes mencionadas.



**Figura 46**

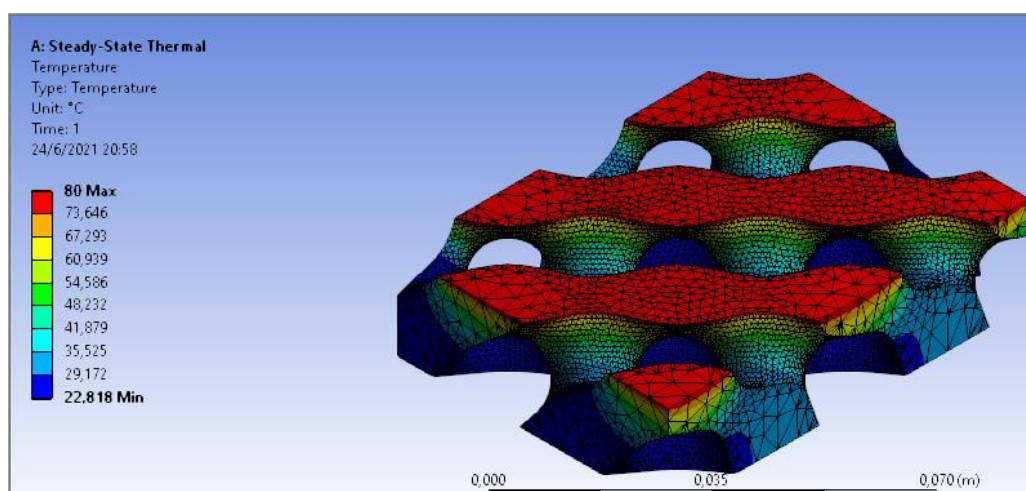
*Estructura Schwarz D Superior*



Con la probeta generada se procede a inicializar la simulación computacional obteniéndose los resultados que se presentan en la Figura 47.

**Figura 47**

*Simulación Schwarz D Superior temperatura en 1 lado*



En la Tabla 16 se presenta los resultados obtenidos del análisis computacional realizado en la probeta Schwarz D en donde el criterio de estudio se mantiene igual al mencionado en el análisis de la estructura Gyroide con aplicación de temperatura en 1 lado.

**Tabla 16**

*Resultados Schwarz D Superior (1T)*

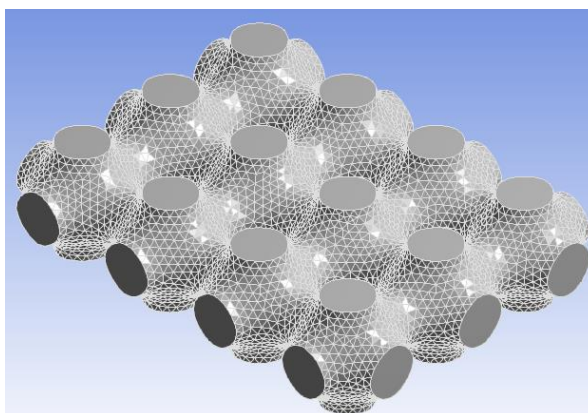
Temperatura	Temperatura Mínima
80 °C	22.818 °C

### **3.3.3. Simulación de conducción de calor en Schwarz P en un lado**

La probeta corresponde a una estructura celular TPMS de tipo Schwarz P como se muestra en la Figura 48.

**Figura 48**

*Estructura TPMS Schwarz P*



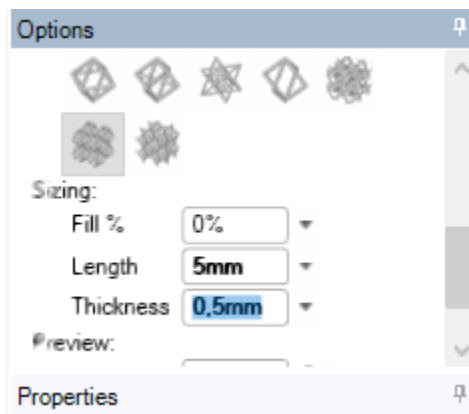
Las condiciones iniciales de estudio para el análisis computacional son similares a las aplicadas en la Figura 30 para la probeta del Gyroide.

#### **3.3.3.1. Schwarz P tamaño intermedio con temperatura en un lado.**

Las dimensiones de la probeta son de 5 x 0,5 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 49.

### Figura 49

#### *Parámetros Schwarz P Intermedio*

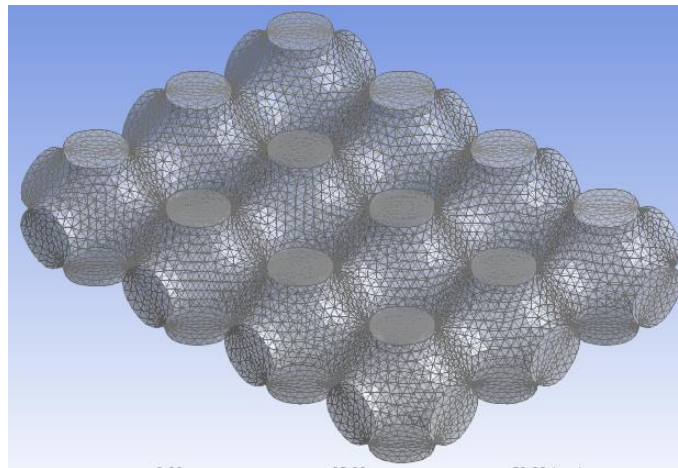


*Nota.* Se presentan los parámetros de diseño para la estructura TPMS Schwarz P para su respectiva generación en el software SpaceClaim de Ansys.

A partir de estas dimensiones se obtiene la probeta que se presenta en la Figura 50 y sobre la cual se procede a aplicar las condiciones iniciales antes mencionadas.

### Figura 50

#### *Estructura Schwarz P Intermedio*

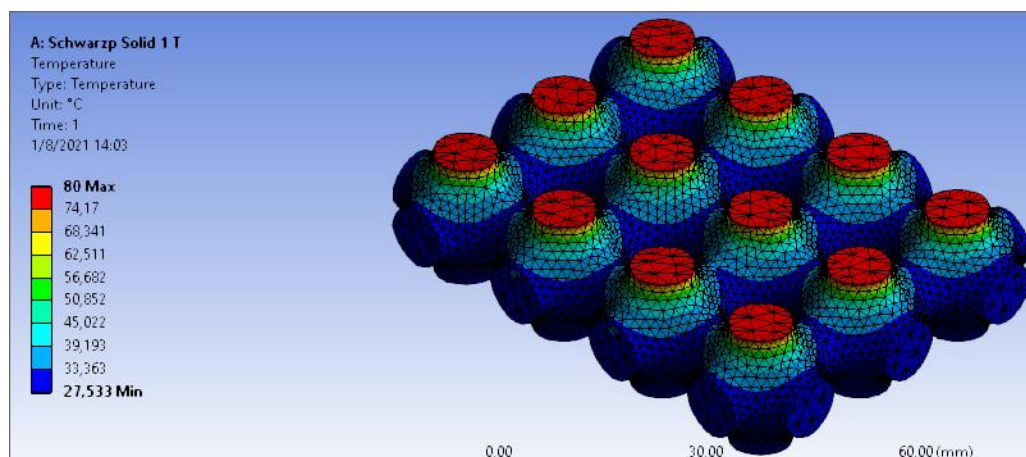


*Nota.* El criterio de diseño para la construcción de la estructura se basó en mantener tamaños similares entre las estructuras de estudio por lo que se mantendrán los mismos parámetros de diseño que en la probeta Gyroide.

Con la probeta generada se procede a inicializar la simulación computacional obteniéndose los resultados que se presentan en la Figura 51.

**Figura 51**

*Simulación Schwarz P Intermedio temperatura en 1 lado*



En la Tabla 17 se presenta los resultados obtenidos del análisis computacional realizado en la probeta Schwarz P en donde es de interés analizar el mínimo valor de la temperatura que la probeta alcanza en cualquier punto de su cuerpo luego de haberse aplicado 80°C en la cara superior y de que se generen las respectivas pérdidas (por convección) en la transferencia de energía por conducción que es la de importancia de estudio en este ensayo.

**Tabla 17**

*Resultados Schwarz P Intermedio (1T)*

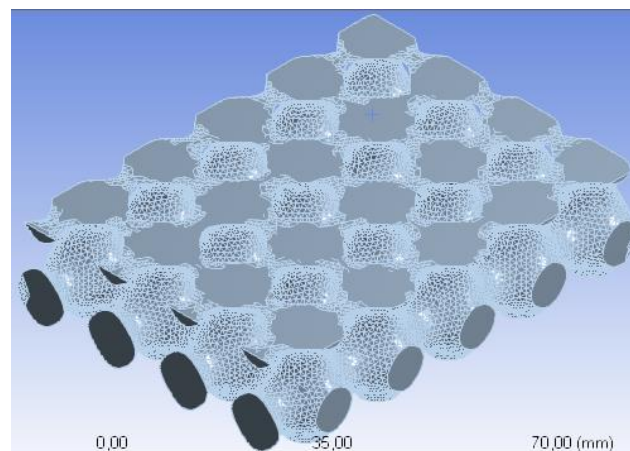
Temperatura	Temperatura Mínima
80 °C	27.533 °C

**3.3.3.2. Schwarz P tamaño inferior con temperatura en un lado.** Las dimensiones de la probeta son de 4,5 x 0,3 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 52.

**Figura 52***Parámetros Schwarz P Inferior*

*Nota.* Se presentan los parámetros de diseño para la estructura TPMS Schwarz P para su respectiva generación en el software SpaceClaim de Ansys.

A partir de estas dimensiones se obtiene la probeta que se presenta en la Figura 53 y sobre la cual se procede a aplicar las condiciones iniciales antes mencionadas.

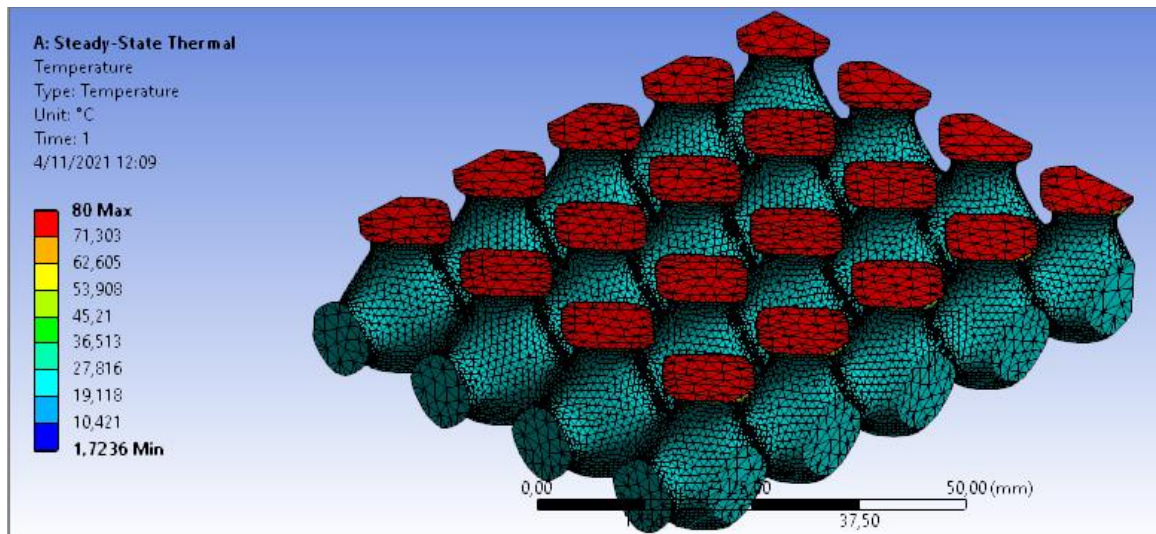
**Figura 53***Estructura Schwarz P Inferior*

*Nota.* El criterio de diseño para la construcción de la estructura se basó en tener parámetros de diseño similares para todas las probetas analizadas.

Con la probeta generada se procede a inicializar la simulación computacional obteniéndose los resultados que se presentan en la Figura 54.

**Figura 54**

*Simulación Schwarz P Inferior temperatura en 1 lado*

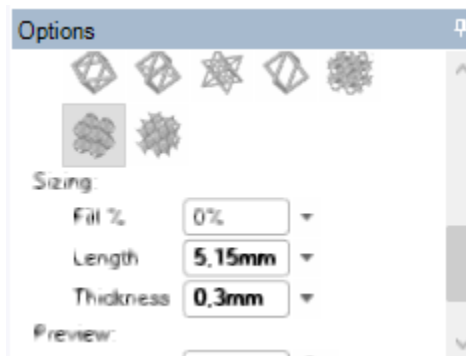


*Nota.* En la simulación presentada existe un error con el software debido a que indica que la mínima temperatura del cuerpo es de 1,7236 °C lo que indica que el cuerpo se enfría debajo de la temperatura ambiente de 20°C cuando lo que se está haciendo es calentar el cuerpo por lo que este resultado se descarta del estudio.

**3.3.3.3. Schwarz P tamaño superior con temperatura en un lado.** Las dimensiones de la probeta son de 5,15 x 0,3 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 55.

**Figura 55**

*Parámetros Schwarz P Superior*

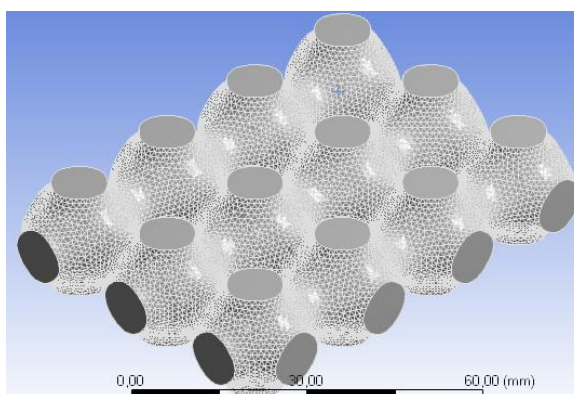


*Nota.* Se presentan los parámetros de diseño para la estructura TPMS Schwarz P para su respectiva generación en el software SpaceClaim de Ansys.

A partir de estas dimensiones se obtiene la probeta que se presenta en la Figura 56 y sobre la cual se procede a aplicar las condiciones iniciales antes mencionadas.

### Figura 56

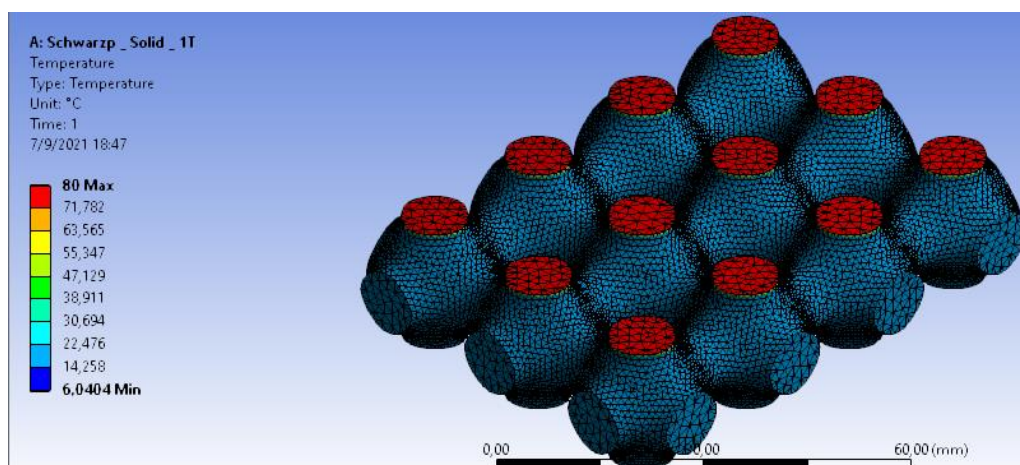
*Estructura Schwarz P Superior*



Con la probeta generada se procede a inicializar la simulación computacional obteniéndose los resultados que se presentan en la Figura 57.

### Figura 57

*Simulación Schwarz P Superior temperatura en 1 lado*



*Nota.* En la simulación presentada existe un error con el software debido a que indica que la mínima temperatura del cuerpo es de 6,0404 °C lo que indica que el cuerpo se

enfriá debajo de la temperatura ambiente de 20°C cuando lo que se está haciendo es calentar el cuerpo por lo que este resultado se descarta del estudio.

### 3.3.4. Simulación de conducción de calor en Gyroide en dos lados

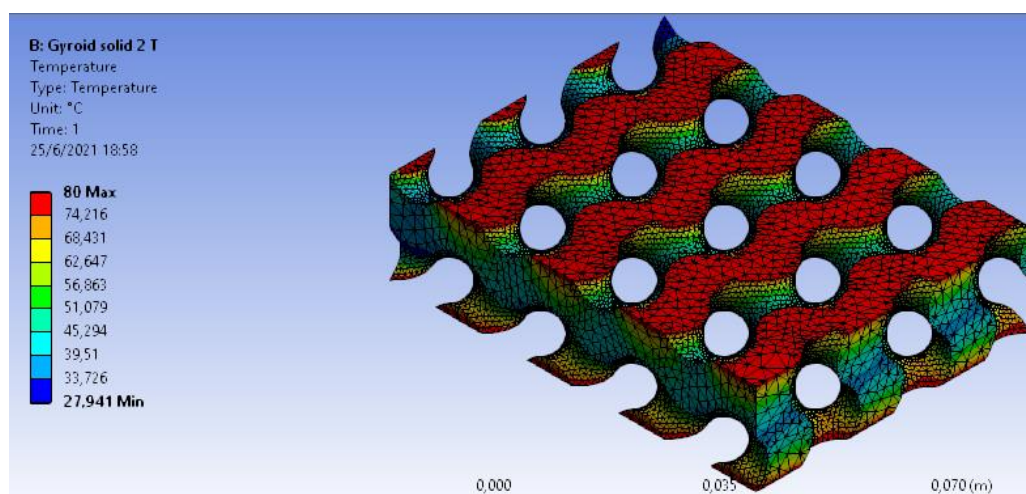
Las condiciones iniciales para el análisis computacional son las mismas trabajadas anteriormente con la diferencia que la cara inferior de la probeta ahora estará sometida a una temperatura de 80°C de igual manera que la cara superior.

#### 3.3.4.1. Gyroide tamaño intermedio con temperatura en dos lados.

Las dimensiones de la probeta son de 5 x 0,5 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 29. A partir de estas dimensiones se obtiene la misma probeta de la Figura 30 y sobre la cual se procede a aplicar las condiciones iniciales antes mencionadas para dar paso a que se inicie la simulación computacional obteniéndose los resultados que se presentan en la Figura 58.

### Figura 58

*Simulación Gyroide Intermedio temperatura en 2 lados*



En la Tabla 18 se presenta los resultados obtenidos del análisis computacional realizado en la probeta Gyroide en donde es de interés analizar el mínimo valor de la temperatura que la probeta alcanza en cualquier punto de su cuerpo luego de haberse aplicado 80°C en la cara superior e inferior y de que se generen las respectivas



pérdidas (por convección) en la transferencia de energía por conducción que es la de importancia de estudio en este ensayo.

**Tabla 18**

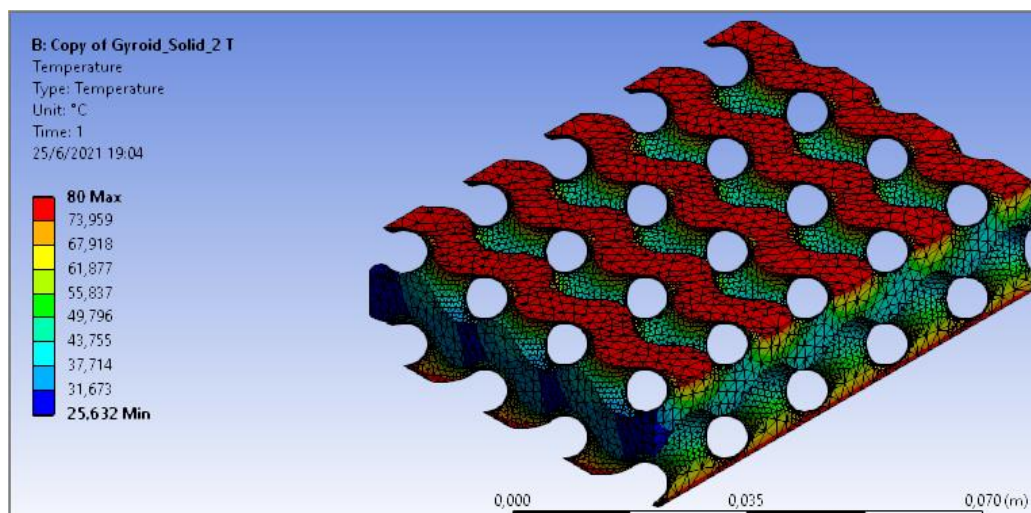
*Resultados Gyroide Intermedio (2T)*

Temperatura	Temperatura Mínima
80 °C	27.941 °C

**3.3.4.2. Gyroide tamaño inferior con temperatura en dos lados.** Las dimensiones de la probeta son de 4,5 x 0,3 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 32. A partir de estas dimensiones se obtiene la misma probeta de la Figura 33 y sobre la cual se procede a aplicar las condiciones iniciales antes mencionadas para dar paso a que se inicialice la simulación computacional obteniéndose los resultados que se presentan en la Figura 59.

**Figura 59**

*Simulación Gyroide Inferior temperatura en 2 lados*



En la Tabla 19 se presenta los resultados obtenidos del análisis computacional realizado en la probeta Gyroide en donde el criterio de estudio se mantiene igual al mencionado en el análisis de la estructura Gyroide con aplicación de temperatura en 2 lados.

**Tabla 19**

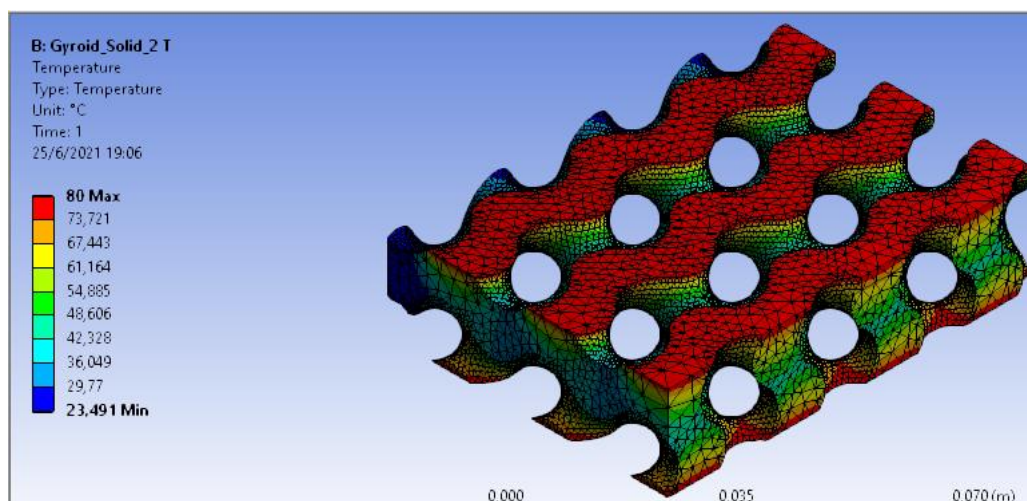
*Resultados Gyroide Inferior (2T)*

Temperatura	Temperatura Mínima
80 °C	25.632 °C

**3.3.4.3. Gyroide tamaño superior con temperatura en dos lados.** Las dimensiones de la probeta son de 5,15 x 0,3 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 35. A partir de estas dimensiones se obtiene la misma probeta de la Figura 36 y sobre la cual se procede a aplicar las condiciones iniciales antes mencionadas para dar paso a que se inicialice la simulación computacional obteniéndose los resultados que se presentan en la Figura 60.

**Figura 60**

*Simulación Gyroide Superior temperatura en 2 lados*



En la Tabla 20 se presenta los resultados obtenidos del análisis computacional realizado en la probeta Gyroide en donde el criterio de estudio se mantiene igual al mencionado en el análisis de la estructura Gyroide con aplicación de temperatura en 2 lados.

**Tabla 20**

*Resultados Gyroide Superior (2T)*

Temperatura	Temperatura Mínima
80 °C	23.491 °C

### **3.3.5. Simulación de conducción de calor en Schwarz D en dos lados**

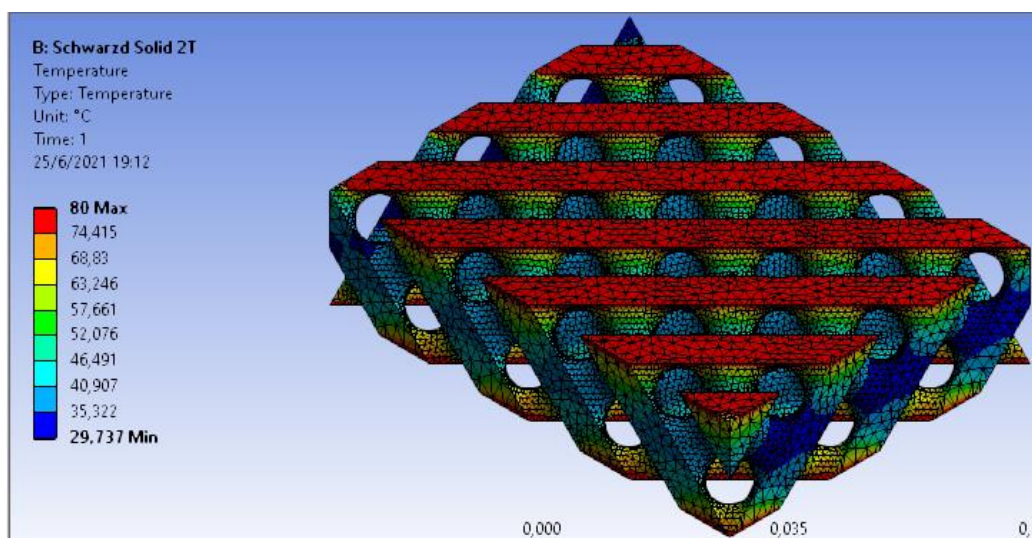
La probeta corresponde a una estructura celular TPMS de tipo Schwarz D como se muestra en la Figura 48. Las condiciones iniciales se mantienen similar a las aplicadas en el punto 3.3.4 para la probeta Gyroide.

#### **3.3.5.1. Schwarz D tamaño intermedio con temperatura en dos lados.**

Las dimensiones de la probeta son de 5 x 0,5 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 39. A partir de estas dimensiones se obtiene la misma probeta de la Figura 40 y sobre la cual se procede a aplicar las condiciones iniciales antes mencionadas para dar paso a que se inicialice la simulación computacional obteniéndose los resultados que se presentan en la Figura 61.

**Figura 61**

*Simulación Schwarz D Intermedio temperatura en 2 lados*



En la Tabla 21 se presenta los resultados obtenidos del análisis computacional realizado en la probeta Schwarz D en donde es de interés analizar el mínimo valor de la temperatura que la probeta alcanza en cualquier punto de su cuerpo luego de haberse aplicado 80°C en la cara superior e inferior y de que se generen las respectivas pérdidas (por convección) en la transferencia de energía por conducción que es la de importancia de estudio en este ensayo.

**Tabla 21**

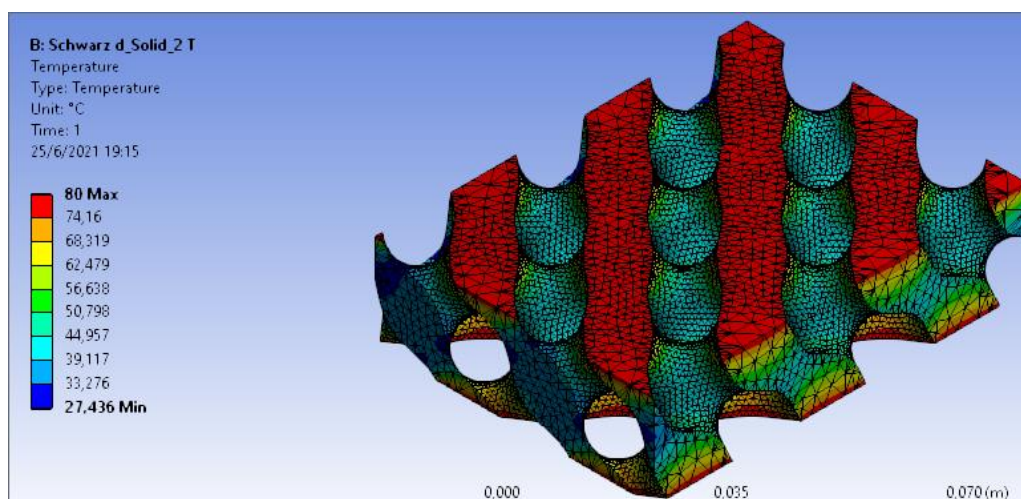
*Resultados Schwarz D Intermedio (2T)*

Temperatura	Temperatura Mínima
80 °C	29.737 °C

**3.3.5.2. Schwarz D tamaño inferior con temperatura en dos lados.** Las dimensiones de la probeta son de 4,5 x 0,3 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 42. A partir de estas dimensiones se obtiene la misma probeta de la Figura 43 y sobre la cual se procede a aplicar las condiciones iniciales antes mencionadas para dar paso a que se inicialice la simulación computacional obteniéndose los resultados que se presentan en la Figura 62.

**Figura 62**

*Simulación Schwarz D Inferior temperatura en 2 lados*



En la Tabla 22 se presenta los resultados obtenidos del análisis computacional realizado en la probeta Schwarz D en donde el criterio de estudio se mantiene igual al mencionado en el análisis de la estructura Gyroide con aplicación de temperatura en 2 lados.

**Tabla 22**

*Resultados Gyroide Inferior (2T)*

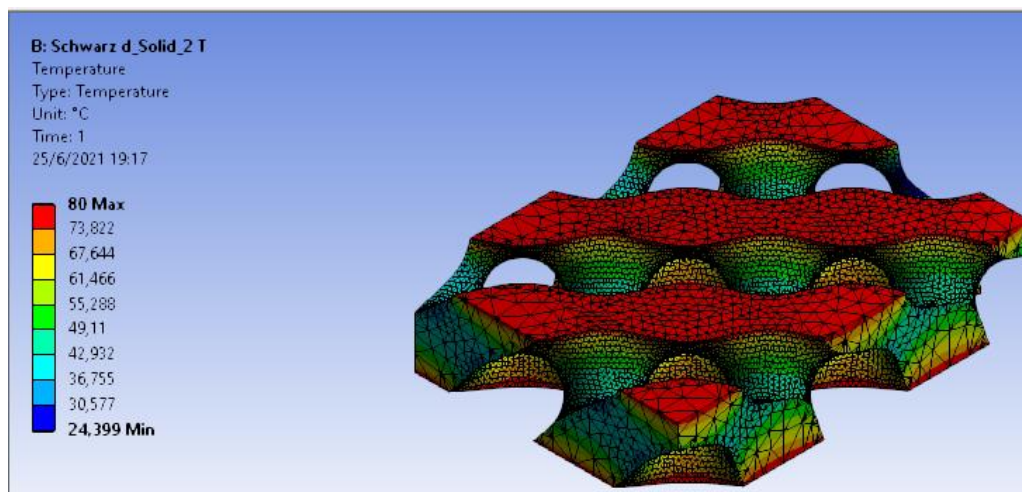
Temperatura	Temperatura Mínima
80 °C	27.436 °C

### 3.3.5.3. Schwarz D tamaño superior con temperatura en dos lados.

Las dimensiones de la probeta son de 5,15 x 0,3 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 45. A partir de estas dimensiones se obtiene la misma probeta de la Figura 46 y sobre la cual se procede a aplicar las condiciones iniciales antes mencionadas para dar paso a que se inicialice la simulación computacional obteniéndose los resultados que se presentan en la Figura 63.

**Figura 63**

*Simulación Schwarz D Superior temperatura en 2 lados*



En la Tabla 23 se presenta los resultados obtenidos del análisis computacional realizado en la probeta Schwarz D en donde el criterio de estudio se mantiene igual al

mencionado en el análisis de la estructura Gyroide con aplicación de temperatura en 2 lados.

**Tabla 23**

*Resultados Schwarz D Superior (2T)*

Temperatura	Temperatura Mínima
80 °C	24.399 °C

### 3.3.6. Simulación de conducción de calor en Schwarz P en dos lados

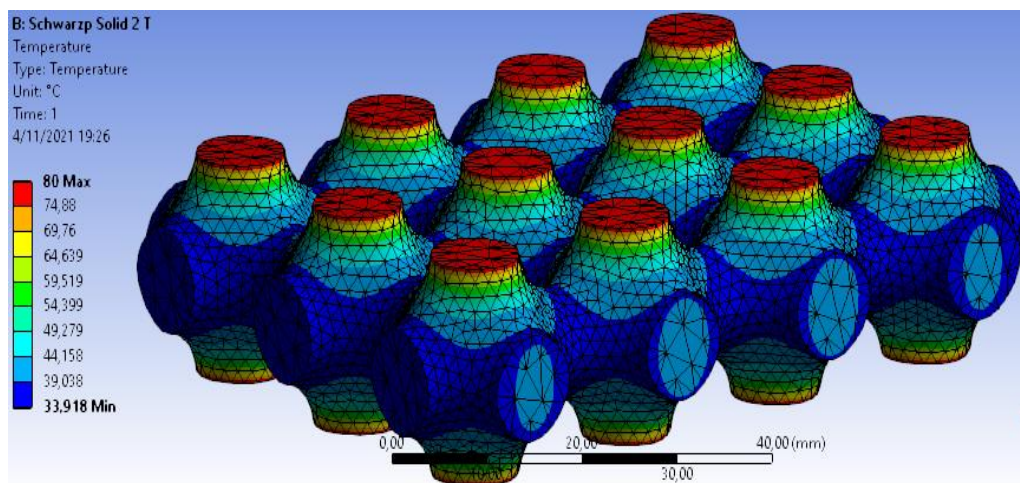
La probeta corresponde a una estructura celular TPMS de tipo Schwarz P como se muestra en la Figura 48. Las condiciones iniciales se mantienen similar a las aplicadas en el punto 3.3.4 para la probeta Gyroide.

#### 3.3.6.1. Schwarz P tamaño intermedio con temperatura en dos lados.

Las dimensiones de la probeta son de 5 x 0,5 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 49. A partir de estas dimensiones se obtiene la probeta que se presenta en la Figura 50 y sobre la cual se procede a aplicar las condiciones iniciales antes mencionadas para dar paso a que se inicialice la simulación computacional obteniéndose los resultados que se presentan en la Figura 64.

**Figura 64**

*Simulación Schwarz P Intermedio temperatura en 2 lados*



En la Tabla 24 se presenta los resultados obtenidos del análisis computacional realizado en la probeta Schwarz P en donde es de interés analizar el mínimo valor de la temperatura que la probeta alcanza en cualquier punto de su cuerpo luego de haberse aplicado 80°C en la cara superior e inferior y de que se generen las respectivas pérdidas (por convección) en la transferencia de energía por conducción que es la de importancia de estudio en este ensayo.

**Tabla 24**

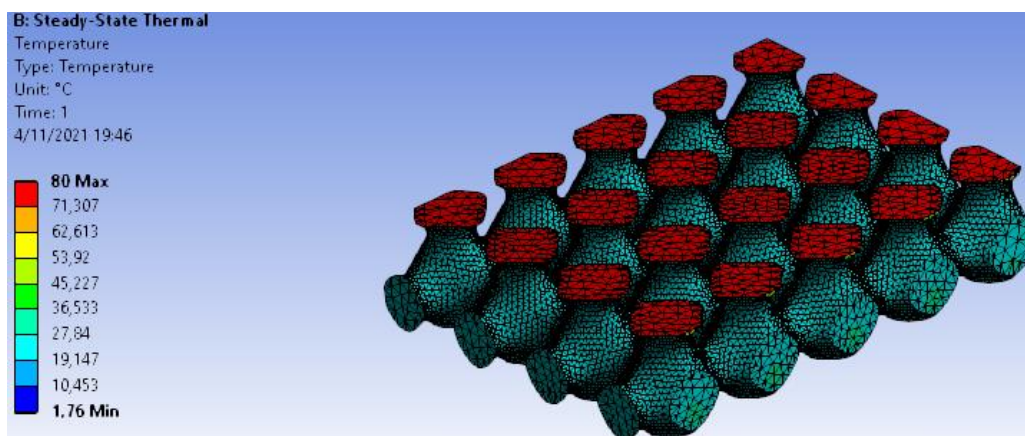
*Resultados Schwarz P Intermedio (2T)*

Temperatura	Temperatura Mínima
80 °C	33.918 °C

**3.3.6.2. Schwarz P tamaño inferior con temperatura en dos lados.** Las dimensiones de la probeta son de 4,5 x 0,3 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 52. A partir de estas dimensiones se obtiene la probeta que se presenta en la Figura 53 y sobre la cual se procede a aplicar las condiciones iniciales antes mencionadas para dar paso a que se inicialice la simulación computacional obteniéndose los resultados que se presentan en la Figura 65.

**Figura 65**

*Simulación Schwarz P Inferior temperatura en 2 lados*



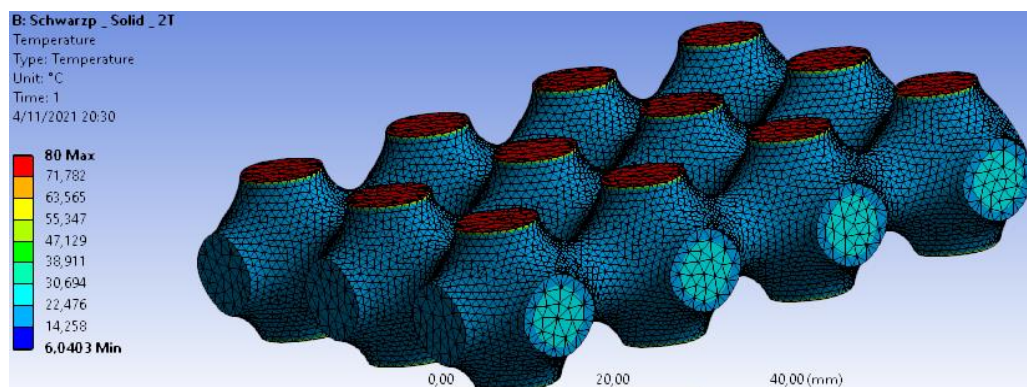
*Nota.* En la simulación presentada existe un error con el software debido a que indica que la mínima temperatura del cuerpo es de 1,76 °C lo que indica que el cuerpo se enfría debajo de la temperatura ambiente de 20°C cuando lo que se está haciendo es calentar el cuerpo por lo que este resultado se descarta del estudio.

### 3.3.6.3. Schwarz P tamaño superior con temperatura en dos lados.

Las dimensiones de la probeta son de 5,15 x 0,3 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 55. A partir de estas dimensiones se obtiene la probeta que se presenta en la Figura 56 y sobre la cual se procede a aplicar las condiciones iniciales antes mencionadas para dar paso a que se inicialice la simulación computacional obteniéndose los resultados que se presentan en la Figura 66.

#### Figura 66

*Simulación Schwarz P Superior temperatura en 2 lados*



*Nota.* En la simulación presentada existe un error con el software debido a que indica que la mínima temperatura del cuerpo es de 6,0403 °C lo que indica que el cuerpo se enfría debajo de la temperatura ambiente de 20°C cuando lo que se está haciendo es calentar el cuerpo por lo que este resultado se descarta del estudio.

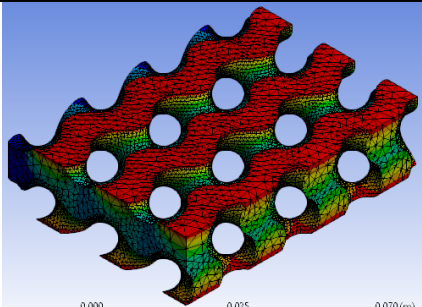
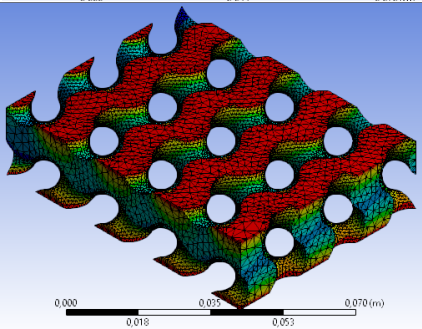
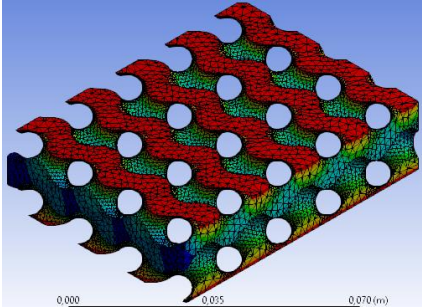


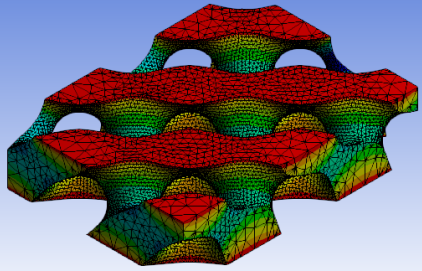
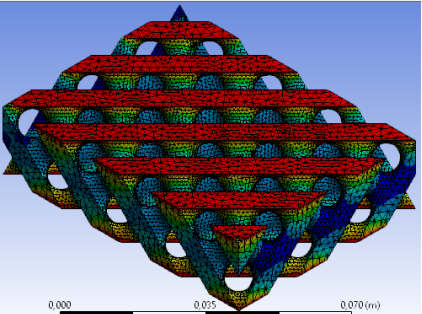
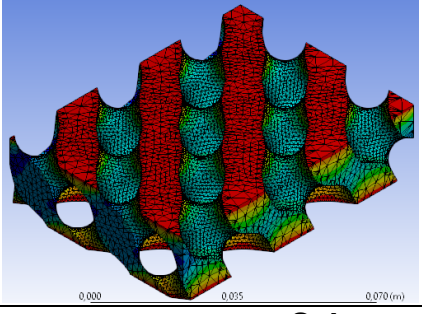
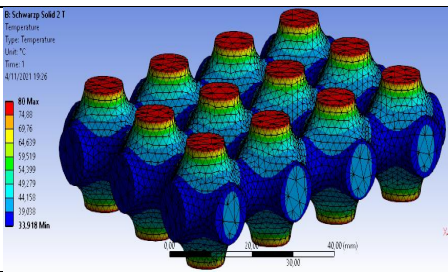
### 3.4. Resultados ensayo simulación de conducción de calor en distintos tamaños

En la Tabla 25 se presentan los resultados tabulados del ensayo realizado previamente en el punto 3.3 a manera de resumen.

**Tabla 25**

*Resultados Ensayo 2*

Tamaño	Estructura	Temperatura 1 lado [°C]	Temperatura 2 lados [°C]
<b>Giroide</b>			
5,15x0,3		22,829	23,491
5x0,5		22.952	27.941
4,5x0,3		22.854	25,632
<b>Schwarz D</b>			

Tamaño	Estructura	Temperatura 1 lado [°C]	Temperatura 2 lados [°C]
5,15x0,3		22,818	24,399
5x0,5		22,869	29,737
4,5x0,3		22,678	27,436
<b>Schwarz P</b>			
5x0,5		27.533	33.918

*Nota.* En la tabla se presentan resultados resumidos de la Tabla 11 a 24.

Analizando la Tabla 25 se puede observar que no existe una variación significativa para los diferentes tamaños de porosidad que se han simulado en los análisis realizados. Sin embargo, se puede observar que existe una menor resistencia a la transferencia de calor por conducción para la estructura Schwarz P con el tamaño de porosidad de 5 x 0,5 mm para todas las estructuras celulares.

Adicionalmente se concluye que no existe mayor diferencia entre la mínima temperatura alcanzada en el cuerpo de la probeta aplicando temperatura en una o ambas caras de la probeta, por lo que no se justificaría el aplicar ambas temperaturas para su posterior análisis experimental.

### **3.5. Ensayo de simulación de flujo de calor**

El presente ensayo describe un análisis comparativo del comportamiento del fluido que va a atravesar las varias arquitecturas que se proponen estudiar para cumplir su papel como disipadores de calor. Estas arquitecturas son derivadas del software SpaceClaim de Ansys. Este ensayo se lo realizará aplicando la temperatura de 80°C únicamente a la cara superior e inferior debido a facilidad para el análisis de datos en el post – procesamiento ya que se tomarán datos de temperatura en la parte media de la probeta para determinar la variación en la cantidad de energía del fluido con la menor cantidad de errores.

#### **3.5.1. Simulación de flujo de calor en Gyroide**

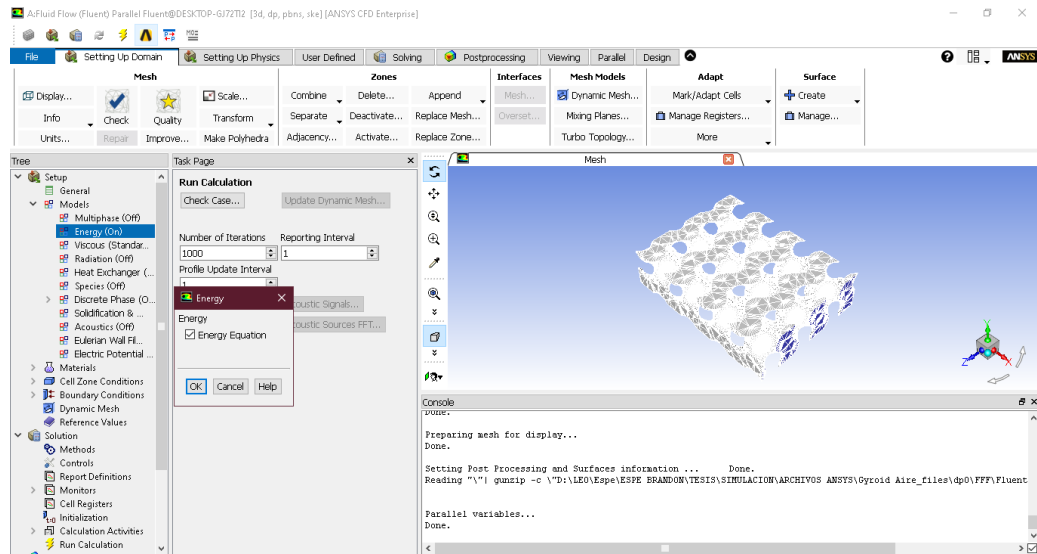
La probeta corresponde a la parte llena de una estructura celular TPMS de tipo Gyroide como se muestra en la Figura 19. La probeta se encuentra perfectamente aislada en los costados, mientras que en la parte delantera y trasera se tiene convección al ambiente a 20°C, así como en la parte interna de la estructura, tal como se muestra en la Figura 20. Estas condiciones iniciales serán aplicadas a todas las probetas utilizadas en este ensayo por igual.

**3.5.1.1. Simulación de flujo de calor en Gyroide intermedio.** Las dimensiones de la probeta son de 5 x 0,5 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 29. A partir de estas dimensiones se obtiene la probeta que se presenta en la Figura 30. A continuación se procede con la configuración del análisis CFD en donde inicialmente se establecerá el tipo de modelo a realizar, que para este

caso se requiere activar las ecuaciones de energía como se muestra en la Figura 67 y que permite realizar análisis térmicos como la transferencia de calor.

**Figura 67**

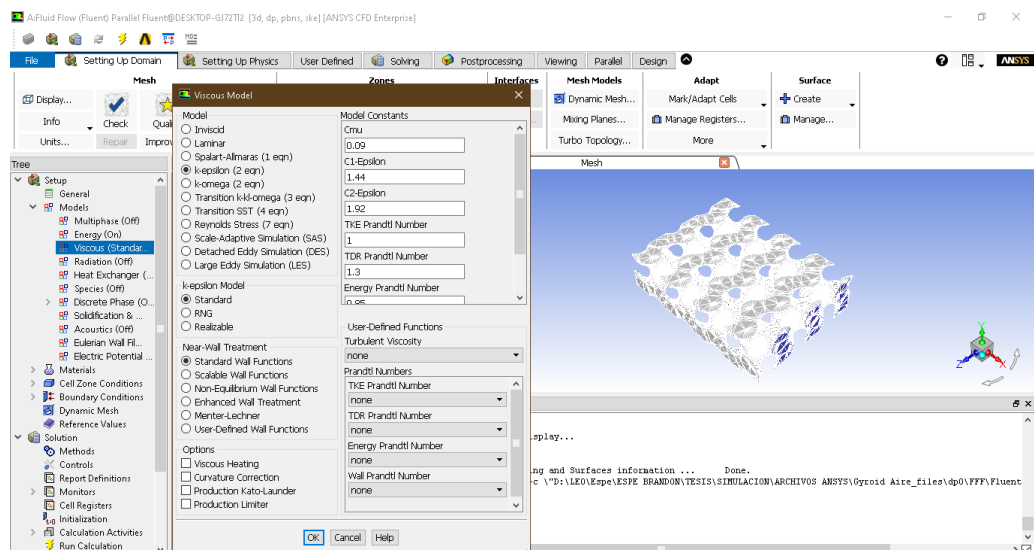
*Selección de Modelo CFD*



A continuación, es necesario seleccionar el tipo de fluido a analizar como se muestra en la Figura 68 en donde se seleccionará k-epsilon como el tipo de modelo viscoso a utilizar en el análisis computacional que se realizará.

**Figura 68**

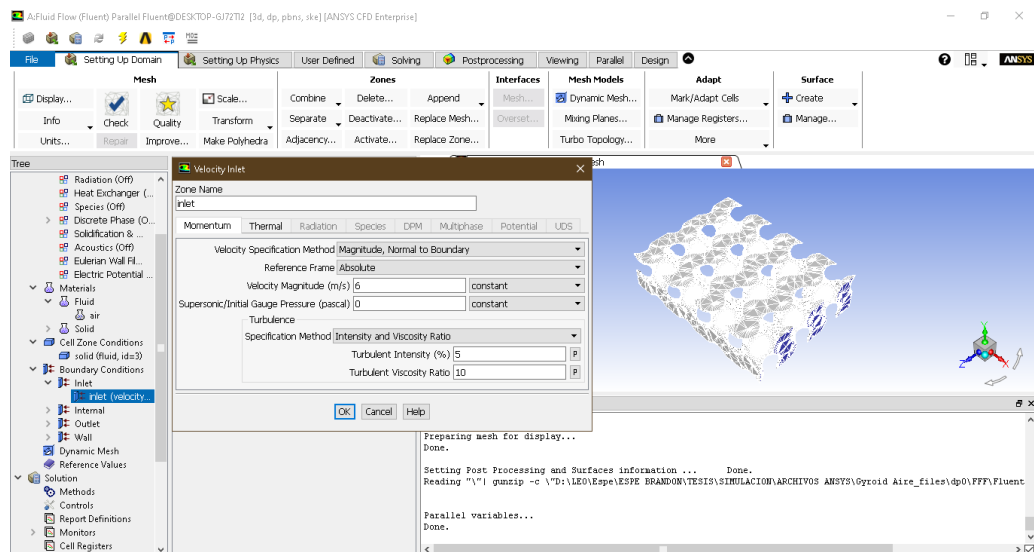
*Selección de Modelo Viscoso CFD*



El paso siguiente es aplicar las condiciones de frontera de las probetas como se ha realizado en los ensayos anteriormente realizados. Como en este caso la probeta de estudio no es la estructura TPMS si no una simulación del fluido que atravesaría la misma inicialmente como se muestra en la Figura 69 se aplicará la velocidad del fluido que en este caso es aire forzada con una velocidad de 6 m/s.

**Figura 69**

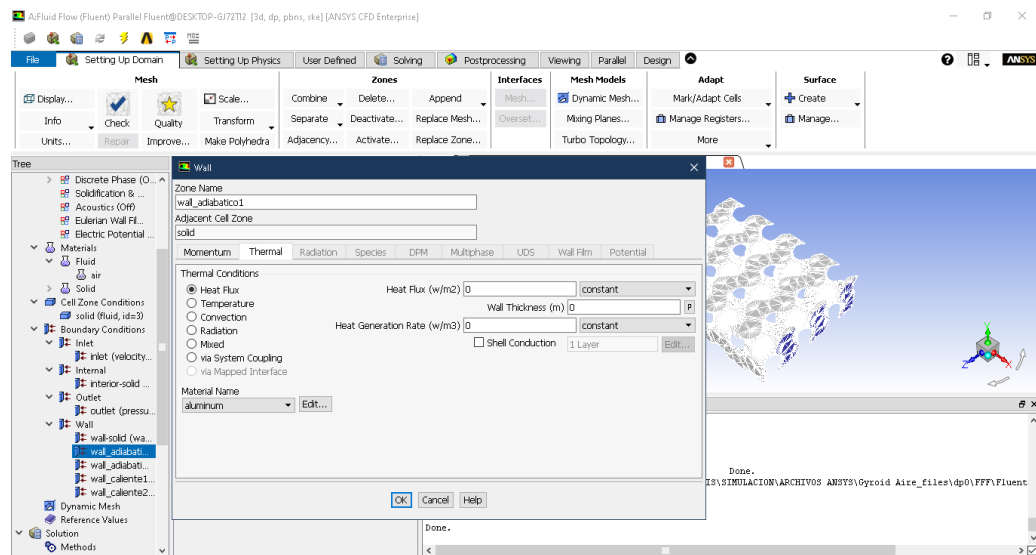
*Velocidad de Entrada del Fluido CFD*



Posteriormente es necesario indicar que los costados del aire forzado estarán sometidos a paredes perfectamente aisladas lo que de otra manera para que el programa entienda se indica que en los costados de la probeta el flujo de calor es igual a 0 como se muestra en la Figura 70.

Figura 70

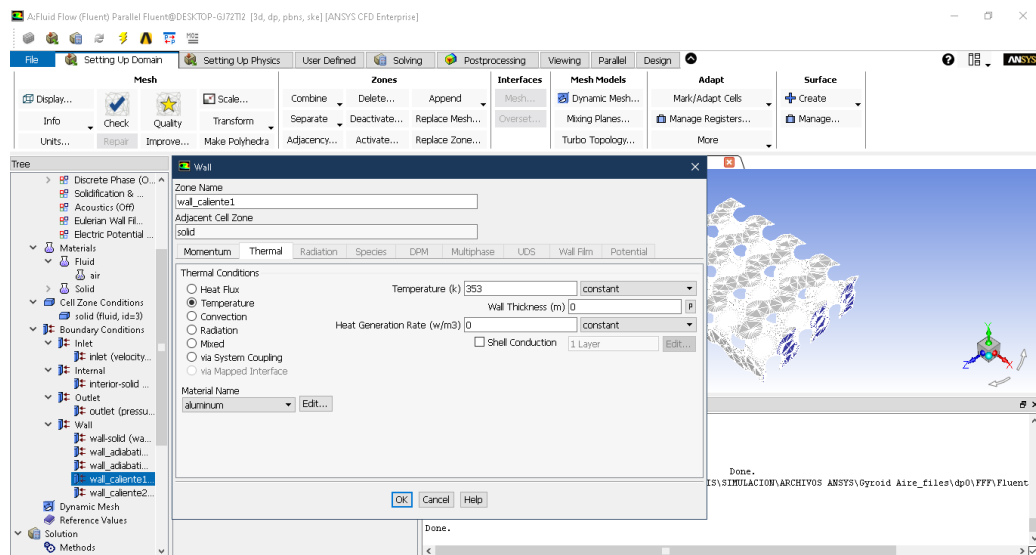
*Condición de Aislamiento Térmico en los costados del aire forzado*



Finalmente se requiere establecer la temperatura de 80°C en la cara superior e inferior de la probeta simulada de la misma manera como se realizó los ensayos anteriores tal como se muestra en la Figura 71.

Figura 71

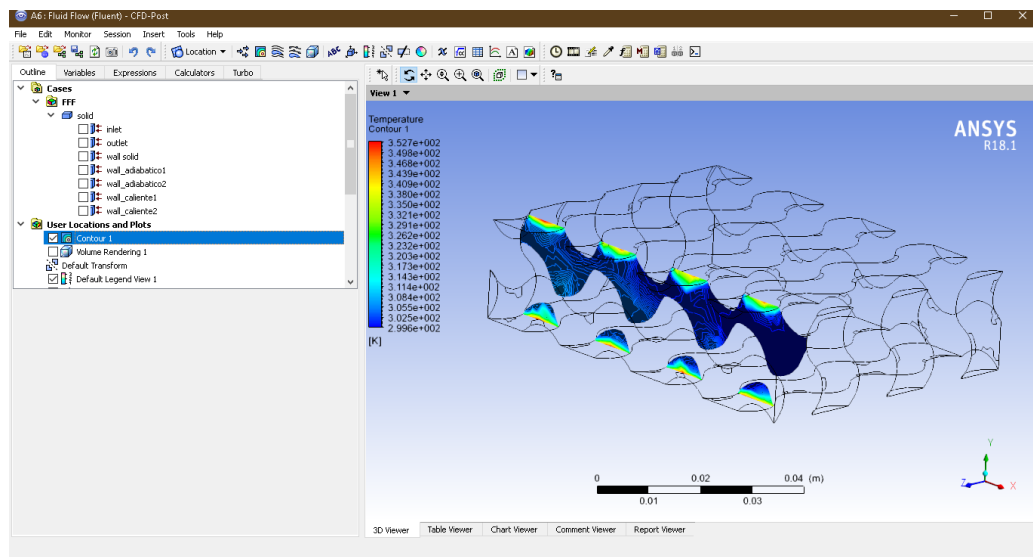
*Condición de Temperatura en cara superior e inferior de probeta*



Una vez inicializado y culminado el análisis computacional se procede con el post – procesamiento en donde viene el análisis de los resultados obtenidos por la simulación. Para este caso de estudio se analizará un contorno de temperatura en toda la longitud de la probeta para visualizar las variaciones que el fluido sufre al atravesar los canales internos de la misma como se muestra en la Figura 72.

**Figura 72**

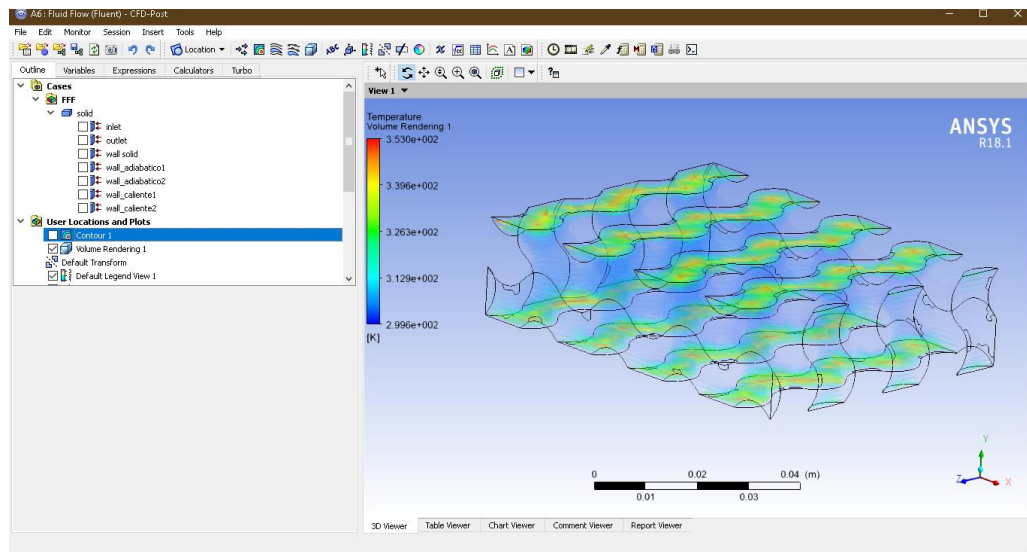
*Contorno de Temperatura para Gyroide Intermedio*



Adicionalmente el software permite observar la representación de volumen del fluido simulado de manera conjunta con una visualización de colores en base a una escala de colores como se observa en la Figura 73, misma que representa la variación de temperatura que el fluido sufre en contacto con las condiciones de frontera aplicadas.

**Figura 73**

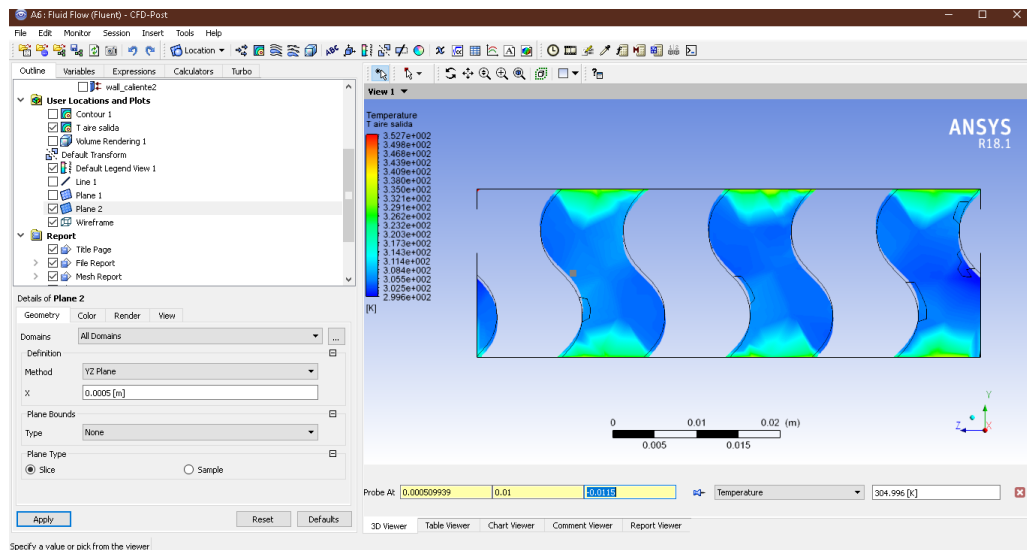
*Representación de Volumen del Fluido en Gyroide Intermedio*



Finalmente, en esta sección de post – procesamiento se realizará un plano en la sección transversal de la probeta al final de la misma en donde se representa la salida del fluido. Este plano se lo realiza con el final de realizar distintas tomas de temperatura en la altura media de la probeta para determinar la temperatura del fluido a la salida como se muestra en la Figura 74.

**Figura 74**

*Temperatura de Salida del Aire en Gyroide Intermedio*





A continuación, se detalla en la Tabla 26 la toma de temperatura a la salida del aire forzado en 5 puntos distintos a lo largo de la sección transversal de la probeta.

**Tabla 26**

*Temperatura de Salida de Aire en Gyroide Intermedio*

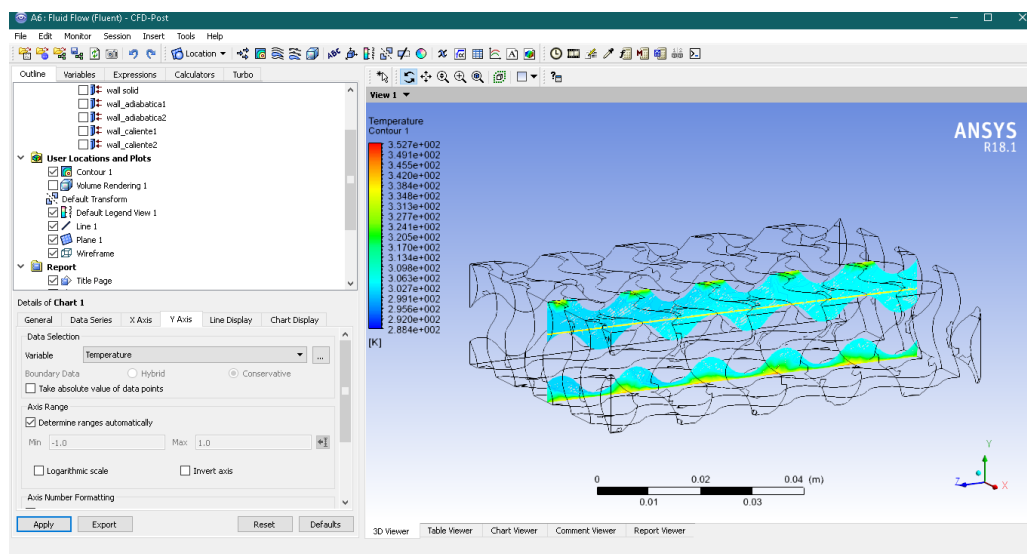
Nro.	T [°C]
1	31.996
2	31.21
3	30.692
4	30.958
5	30.138
Prom	30.998

### 3.5.1.2. Simulación de flujo de calor en Gyroide inferior. Las

dimensiones de la probeta son de 4,5 x 0,3 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 32. A partir de estas dimensiones se obtiene la probeta que se presenta en la Figura 33. A continuación se procede con la configuración del análisis CFD en donde se realizarán los mismos pasos mencionados desde la Figura 67 a 71. Posteriormente, para el post – procesamiento de la misma manera se obtendrá el contorno de temperaturas para el aire forzado como se muestra en la Figura 75.

**Figura 75**

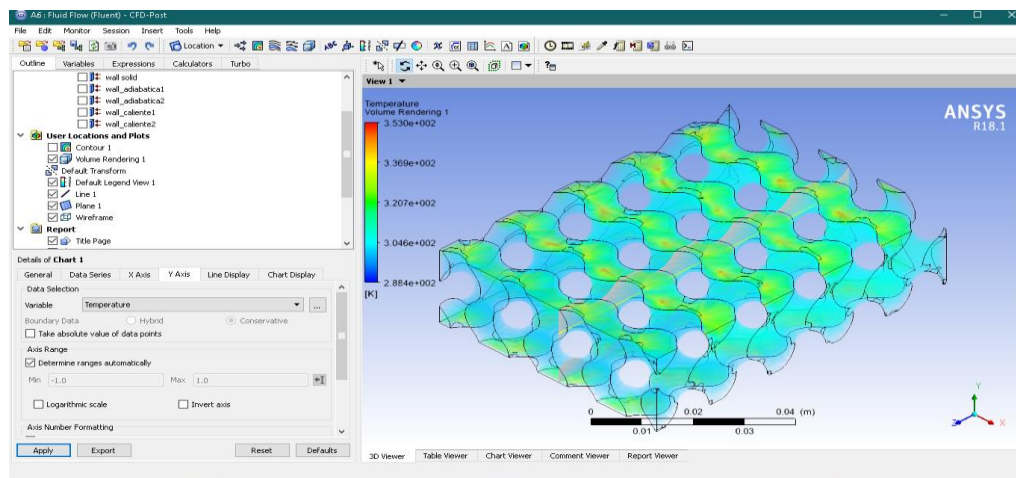
*Contorno de Temperatura para Gyroide Inferior*



Adicionalmente se obtendrá la representación de volumen del fluido simulado de manera conjunta con una visualización de colores en base a una escala de colores como se observa en la Figura 76.

**Figura 76**

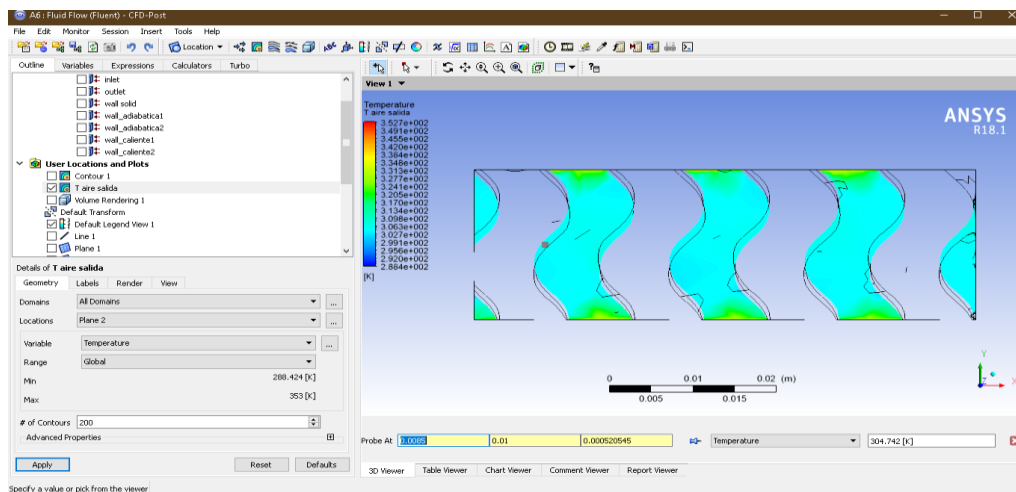
*Representación de Volumen del Fluido en Gyroide Inferior*



Finalmente, se realizará el plano en la sección transversal de la probeta al final de la misma en donde se representa la salida del fluido para realizar la toma de temperatura en la altura media de la probeta para determinar la temperatura del fluido a la salida como se muestra en la Figura 77.

**Figura 77**

*Temperatura de Salida del Aire en Gyroide Inferior*



A continuación, se detalla en la Tabla 27 la toma de temperatura a la salida del aire forzado en 5 puntos distintos a lo largo de la sección transversal de la probeta.

**Tabla 27**

*Temperatura de Salida de Aire en Gyroide Inferior*

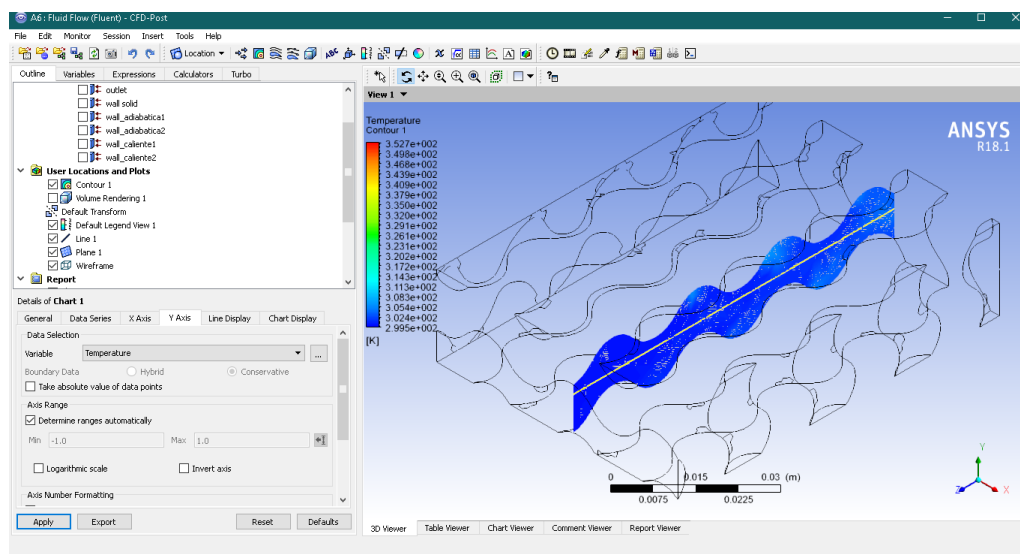
Nro.	T [°C]
1	31.742
2	33.438
3	31.703
4	33.071
5	32.641
Prom	32.519

### 3.5.1.3. Simulación de flujo de calor en Gyroide superior. Las

dimensiones de la probeta son de 5,15 x 0,3 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 35. A partir de estas dimensiones se obtiene la probeta que se presenta en la Figura 36. A continuación se procede con la configuración del análisis CFD en donde se realizarán los mismos pasos mencionados desde la Figura 67 a 71. Posteriormente, para el post – procesamiento de la misma manera se obtendrá el contorno de temperaturas para el aire forzado como se muestra en la Figura 78.

**Figura 78**

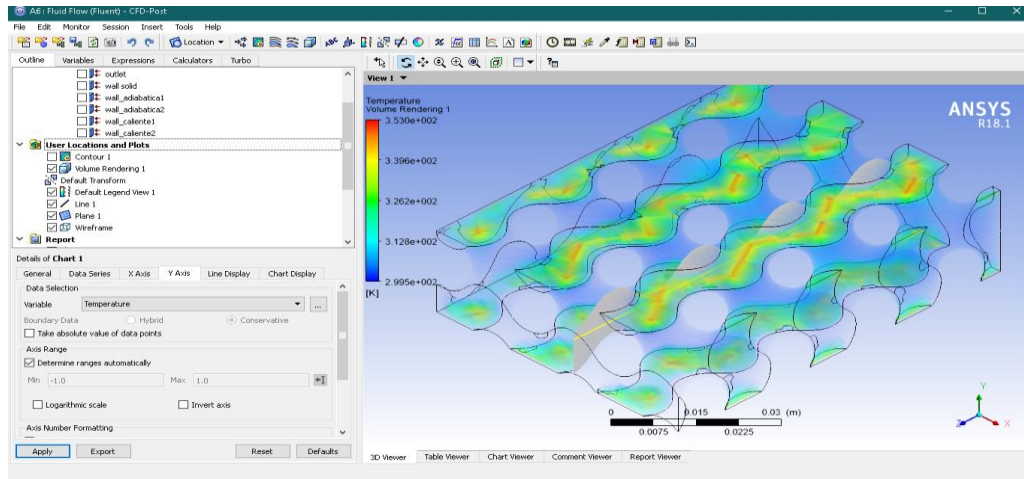
*Contorno de Temperatura para Gyroide Superior*



Adicionalmente se obtendrá la representación de volumen del fluido simulado de manera conjunta con una visualización de colores en base a una escala de colores como se observa en la Figura 79.

**Figura 79**

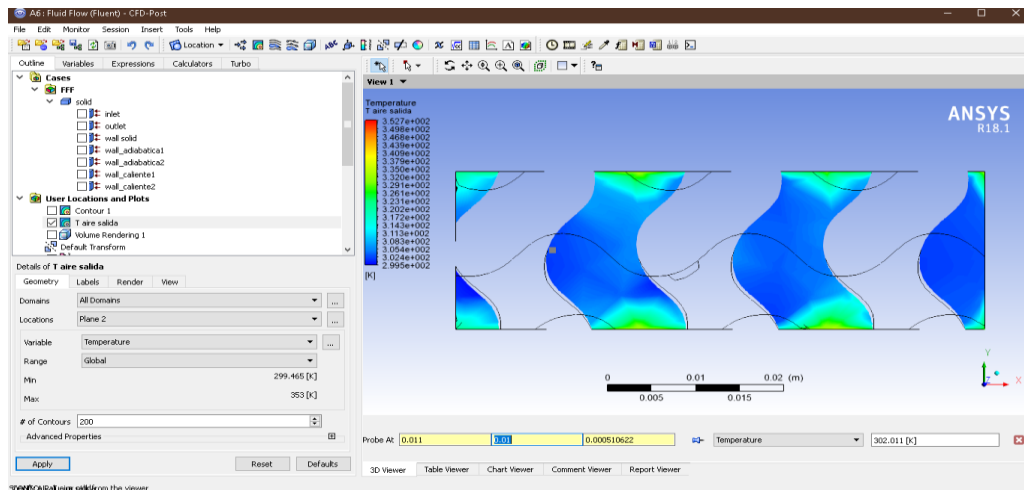
*Representación de Volumen del Fluido en Gyroide Superior*



Finalmente, se realizará el plano en la sección transversal de la probeta al final de la misma en donde se representa la salida del fluido para realizar la toma de temperatura en la altura media de la probeta para determinar la temperatura del fluido a la salida como se muestra en la Figura 80.

**Figura 80**

*Temperatura de Salida del Aire en Gyroide Superior*



A continuación, se detalla en la Tabla 28 la toma de temperatura a la salida del aire forzado en 5 puntos distintos a lo largo de la sección transversal de la probeta.

**Tabla 28**

*Temperatura de Salida de Aire en Gyroide Superior*

<b>Nro.</b>	<b>T [°C]</b>
1	29.01
2	32.078
3	31.414
4	31.166
5	29.21
Prom	30.575

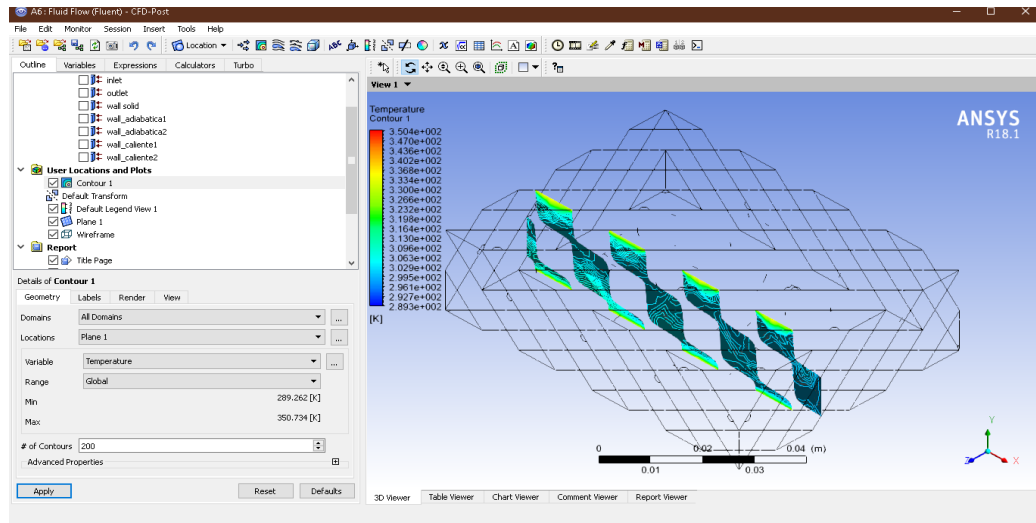
### **3.5.2. Simulación de flujo de calor en Schwarz D**

La probeta corresponde la parte llena de una estructura celular TPMS de tipo Schwarz D como se muestra en la Figura 22. Las condiciones de frontera a aplicar son las mismas mencionadas en el punto 3.5.1 para la probeta de Gyroide.

**3.5.2.1. Simulación de flujo de calor en Schwarz D intermedio.** Las dimensiones de la probeta son de 5 x 0,5 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 39. A partir de estas dimensiones se obtiene la probeta que se presenta en la Figura 40. A continuación se procede con la configuración del análisis CFD en donde se realizarán los mismos pasos mencionados desde la Figura 67 a 71. Posteriormente, para el post – procesamiento de la misma manera se obtendrá el contorno de temperaturas para el aire forzado como se muestra en la Figura 81.

Figura 81

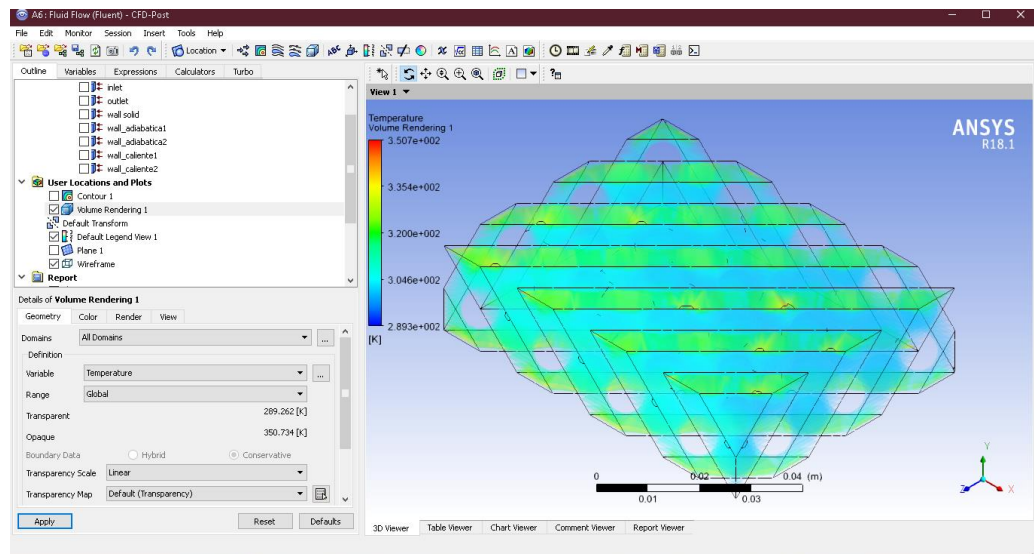
### Contorno de Temperatura para Schwarz D Intermedio



Adicionalmente se obtendrá la representación de volumen del fluido simulado de manera conjunta con una visualización de colores en base a una escala de colores como se observa en la Figura 82.

Figura 82

### Representación de Volumen del Fluido en Schwarz D Intermedio

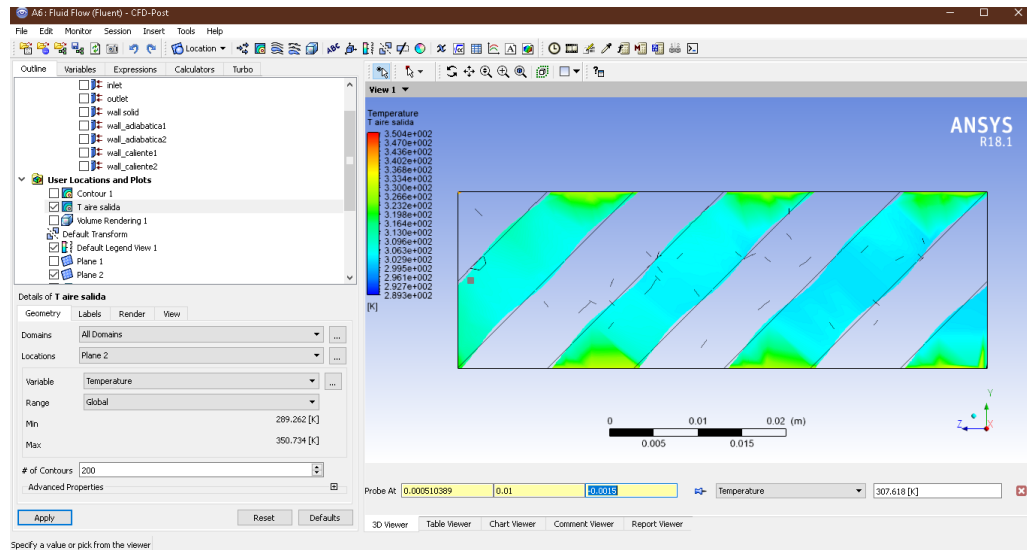


Finalmente, se realizará el plano en la sección transversal de la probeta al final de la misma en donde se representa la salida del fluido para realizar la toma de

temperatura en la altura media de la probeta para determinar la temperatura del fluido a la salida como se muestra en la Figura 83.

**Figura 83**

*Temperatura de Salida del Aire en Schwarz D Intermedio*



A continuación, se detalla en la Tabla 29 la toma de temperatura a la salida del aire forzado en 5 puntos distintos a lo largo de la sección transversal de la probeta.

**Tabla 29**

*Temperatura de Salida de Aire en Schwarz D Intermedio*

Nro.	T [°C]
1	34.618
2	33.125
3	30.575
4	30.942
5	29.284
Prom	31.708

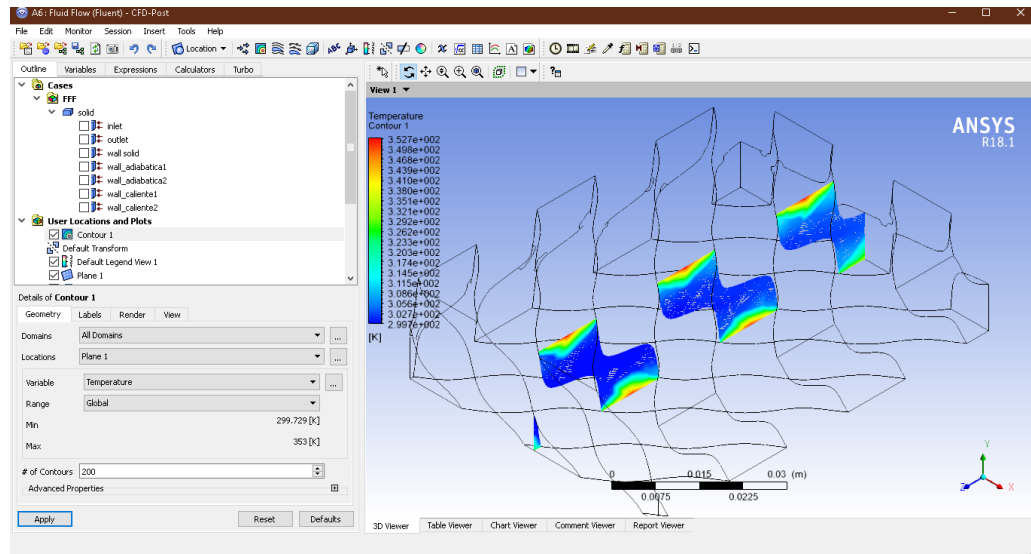
### 3.5.2.2. Simulación de flujo de calor en Schwarz D inferior. Las

dimensiones de la probeta son de 4,5 x 0,3 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 42. A partir de estas dimensiones se obtiene la probeta que se presenta en la Figura 43. A continuación se procede con la configuración del análisis CFD en donde se realizarán los mismos pasos mencionados desde la Figura 67 a 71.

Posteriormente, para el post – procesamiento de la misma manera se obtendrá el contorno de temperaturas para el aire forzado como se muestra en la Figura 84.

**Figura 84**

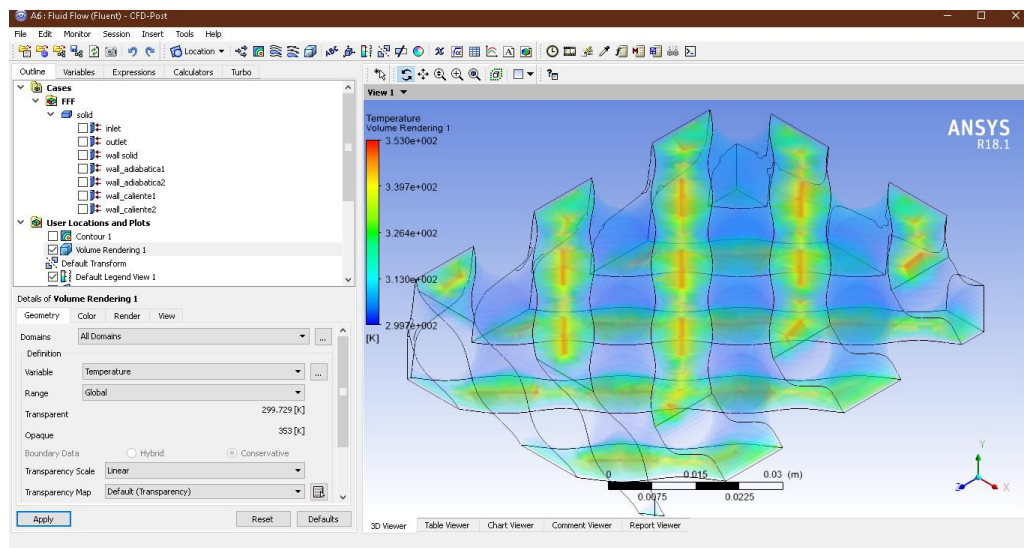
*Contorno de Temperatura para Schwarz D Inferior*



Adicionalmente se obtendrá la representación de volumen del fluido simulado de manera conjunta con una visualización de colores en base a una escala de colores como se observa en la Figura 85.

**Figura 85**

*Representación de Volumen del Fluido en Schwarz D Inferior*

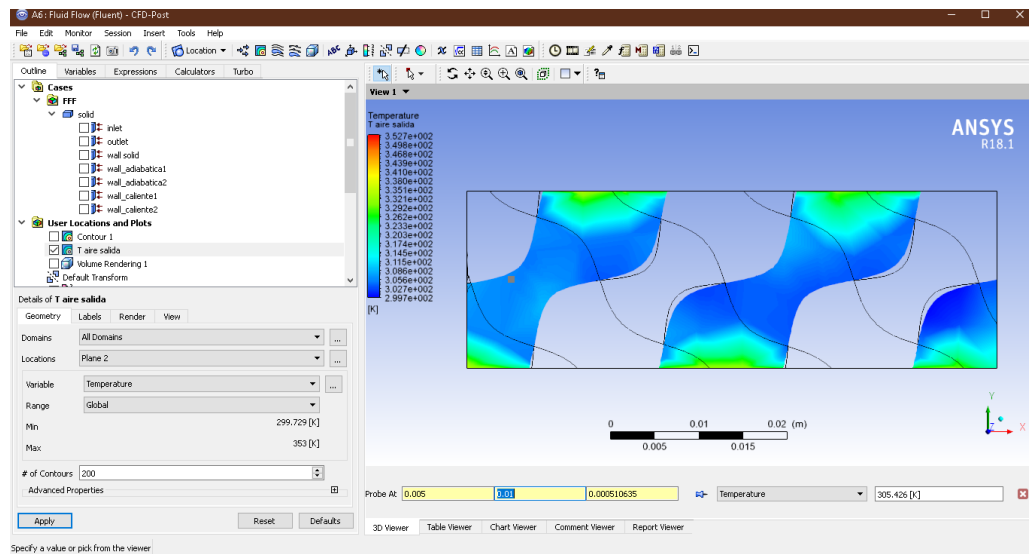




Finalmente, se realizará el plano en la sección transversal de la probeta al final de la misma en donde se representa la salida del fluido para realizar la toma de temperatura en la altura media de la probeta para determinar la temperatura del fluido a la salida como se muestra en la Figura 86.

**Figura 86**

*Temperatura de Salida del Aire en Schwarz D Inferior*



A continuación, se detalla en la Tabla 30 la toma de temperatura a la salida del aire forzado en 5 puntos distintos a lo largo de la sección transversal de la probeta.

**Tabla 30**

*Temperatura de Salida de Aire en Schwarz D inferior*

<b>Nro.</b>	<b>T [°C]</b>
1	32.426
2	31.653
3	31.149
4	30.412
5	30.098
Prom	31.147

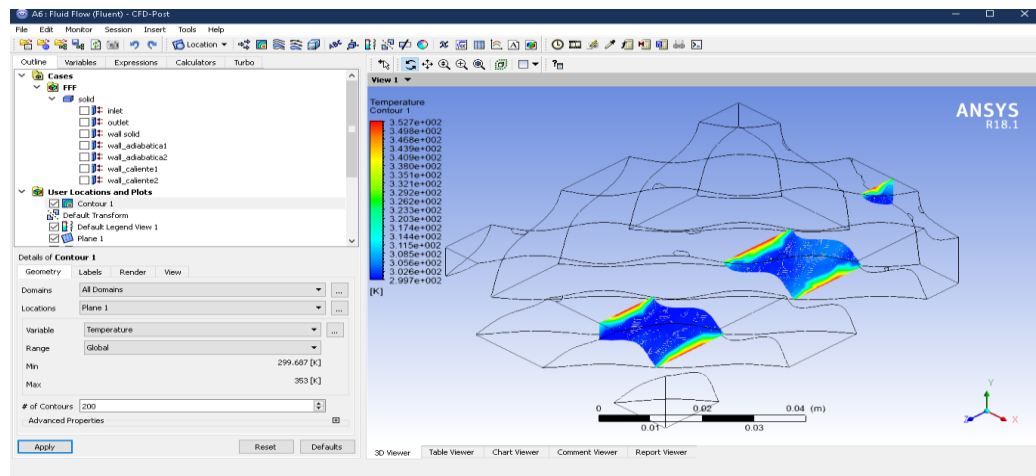
### 3.5.2.3. Simulación de flujo de calor en Schwarz D superior. Las

dimensiones de la probeta son de 5,15 x 0,3 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 45. A partir de estas dimensiones se obtiene la probeta que se

presenta en la Figura 46. A continuación se procede con la configuración del análisis CFD en donde se realizarán los mismos pasos mencionados desde la Figura 67 a 71. Posteriormente, para el post – procesamiento de la misma manera se obtendrá el contorno de temperaturas para el aire forzado como se muestra en la Figura 87.

**Figura 87**

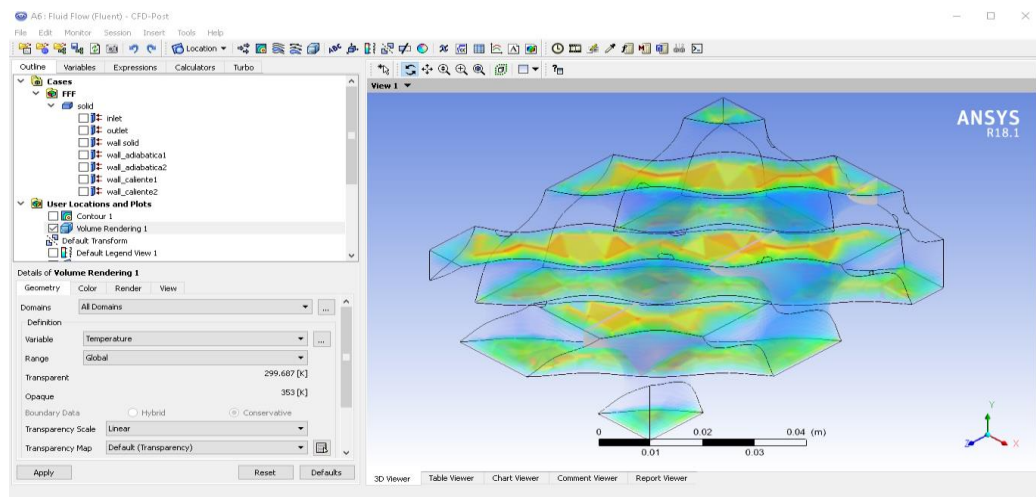
*Contorno de Temperatura para Schwarz D Superior*



Adicionalmente se obtendrá la representación de volumen del fluido simulado de manera conjunta con una visualización de colores en base a una escala de colores como se observa en la Figura 88.

**Figura 88**

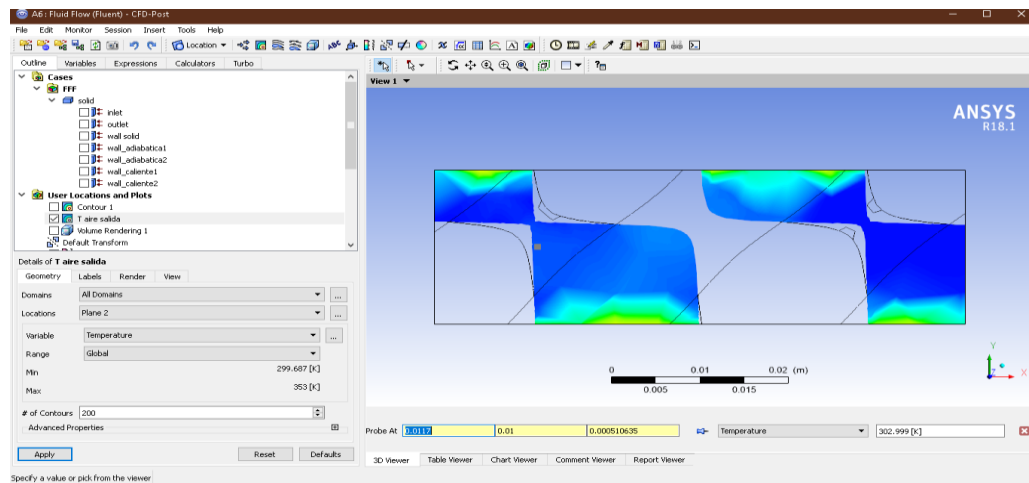
*Representación de Volumen del Fluido en Schwarz D Superior*



Finalmente, se realizará el plano en la sección transversal de la probeta al final de la misma en donde se representa la salida del fluido para realizar la toma de temperatura en la altura media de la probeta para determinar la temperatura del fluido a la salida como se muestra en la Figura 89.

**Figura 89**

*Temperatura de Salida del Aire en Schwarz D Superior*



A continuación, se detalla en la Tabla 31 la toma de temperatura a la salida del aire forzado en 5 puntos distintos a lo largo de la sección transversal de la probeta.

**Tabla 31**

*Temperatura de Salida de Aire en Schwarz D Superior*

Nro.	T [°C]
1	29.999
2	30.478
3	31.769
4	27
5	26.999
Prom	29.249

### 3.5.3. Simulación de flujo de calor en Schwarz P

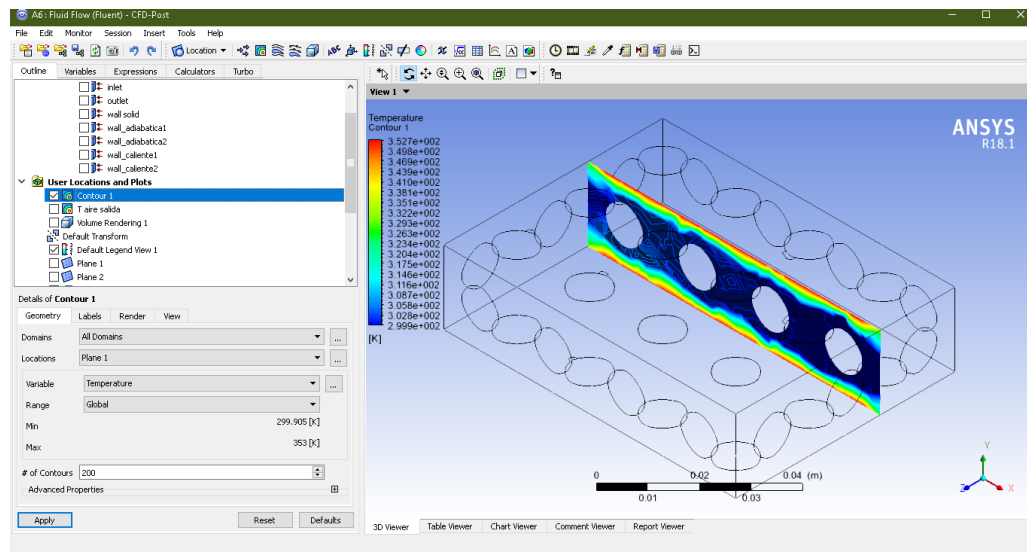
La probeta corresponde a una estructura celular TPMS de tipo Schwarz P como se muestra en la Figura 24. Las condiciones de frontera a aplicar son las mismas mencionadas en el punto 3.5.1 para la probeta de Gyroide.

### 3.5.3.1. Simulación de flujo de calor en Schwarz P intermedio. Las

dimensiones de la probeta son de 5 x 0,5 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 49. A partir de estas dimensiones se obtiene la probeta que se presenta en la Figura 50. A continuación se procede con la configuración del análisis CFD en donde se realizarán los mismos pasos mencionados desde la Figura 67 a 71. Posteriormente, para el post – procesamiento de la misma manera se obtendrá el contorno de temperaturas para el aire forzado como se muestra en la Figura 90.

**Figura 90**

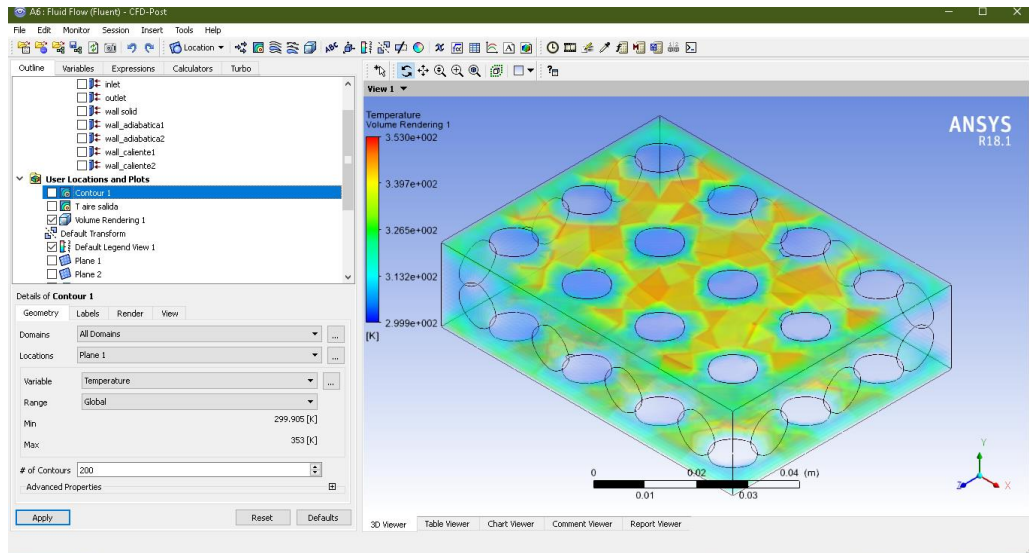
*Contorno de Temperatura para Schwarz P Intermedio*



Adicionalmente se obtendrá la representación de volumen del fluido simulado de manera conjunta con una visualización de colores en base a una escala de colores como se observa en la Figura 91.

**Figura 91**

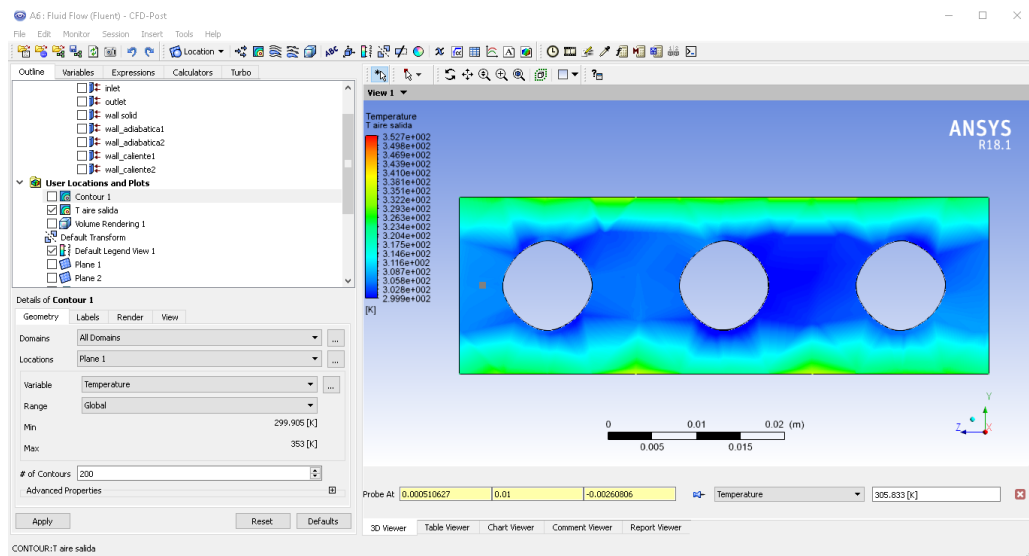
*Representación de Volumen del Fluido en Schwarz P Intermedio*



Finalmente, se realizará el plano en la sección transversal de la probeta al final de la misma en donde se representa la salida del fluido para realizar la toma de temperatura en la altura media de la probeta para determinar la temperatura del fluido a la salida como se muestra en la Figura 92.

**Figura 92**

*Temperatura de Salida del Aire en Schwarz P Intermedio*



A continuación, se detalla en la Tabla 32 la toma de temperatura a la salida del aire forzado en 5 puntos distintos a lo largo de la sección transversal de la probeta.

**Tabla 32**

*Temperatura de Salida de Aire en Schwarz P Intermedio*

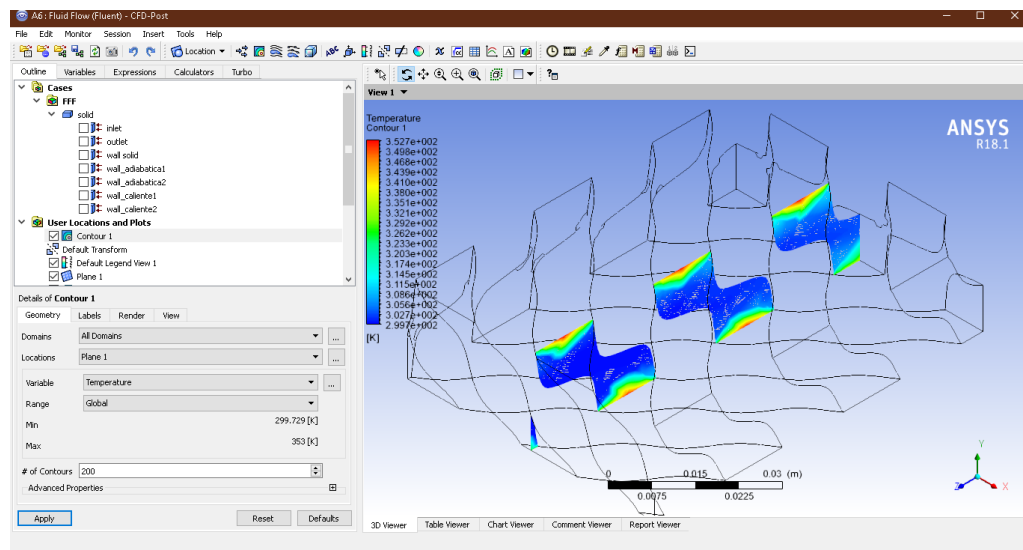
Nro.	T [°C]
1	32.833
2	31.718
3	31.363
4	27.561
5	31.885
Prom	31.072

### 3.5.3.2. Simulación de flujo de calor en Schwarz P inferior. Las

dimensiones de la probeta son de 4,5 x 0,3 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 52. A partir de estas dimensiones se obtiene la probeta que se presenta en la Figura 53. A continuación se procede con la configuración del análisis CFD en donde se realizarán los mismos pasos mencionados desde la Figura 67 a 71. Posteriormente, para el post – procesamiento de la misma manera se obtendrá el contorno de temperaturas para el aire forzado como se muestra en la Figura 93.

**Figura 93**

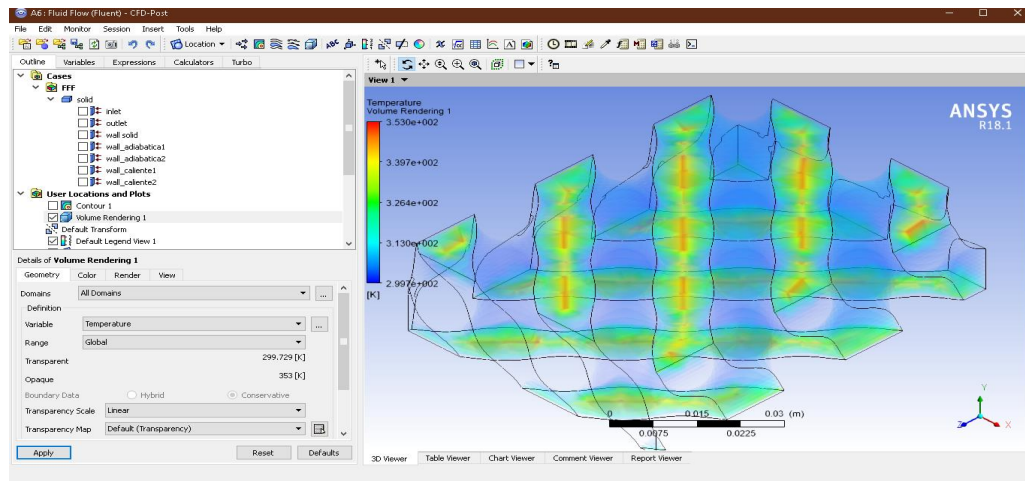
*Contorno de Temperatura para Schwarz P Inferior*



Adicionalmente se obtendrá la representación de volumen del fluido simulado de manera conjunta con una visualización de colores en base a una escala de colores como se observa en la Figura 94.

**Figura 94**

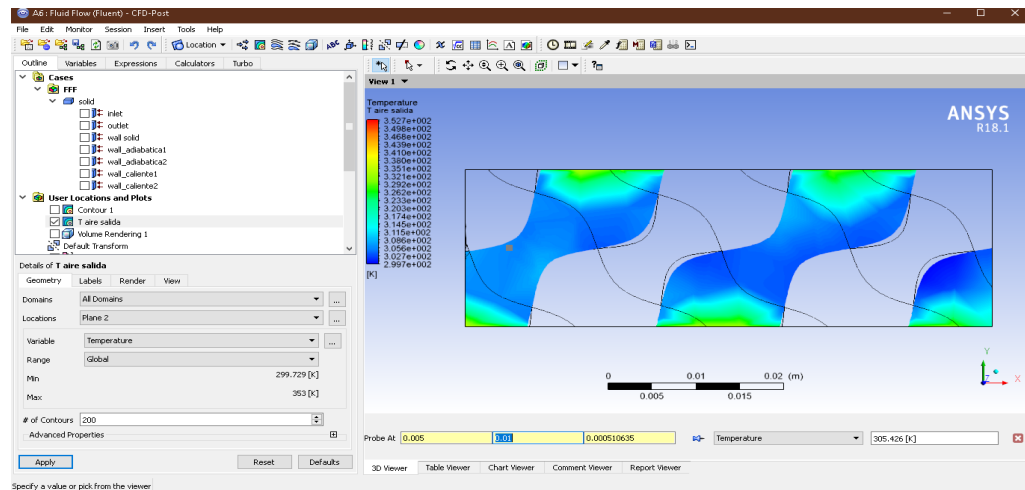
*Representación de Volumen del Fluido en Schwarz P Inferior*



Finalmente, se realizará el plano en la sección transversal de la probeta al final de la misma en donde se representa la salida del fluido para realizar la toma de temperatura en la altura media de la probeta para determinar la temperatura del fluido a la salida como se muestra en la Figura 95.

**Figura 95**

*Temperatura de Salida del Aire en Schwarz P Inferior*



A continuación, se detalla en la Tabla 33 la toma de temperatura a la salida del aire forzado en 5 puntos distintos a lo largo de la sección transversal de la probeta.

**Tabla 33**

*Temperatura de Salida de Aire en Schwarz P inferior*

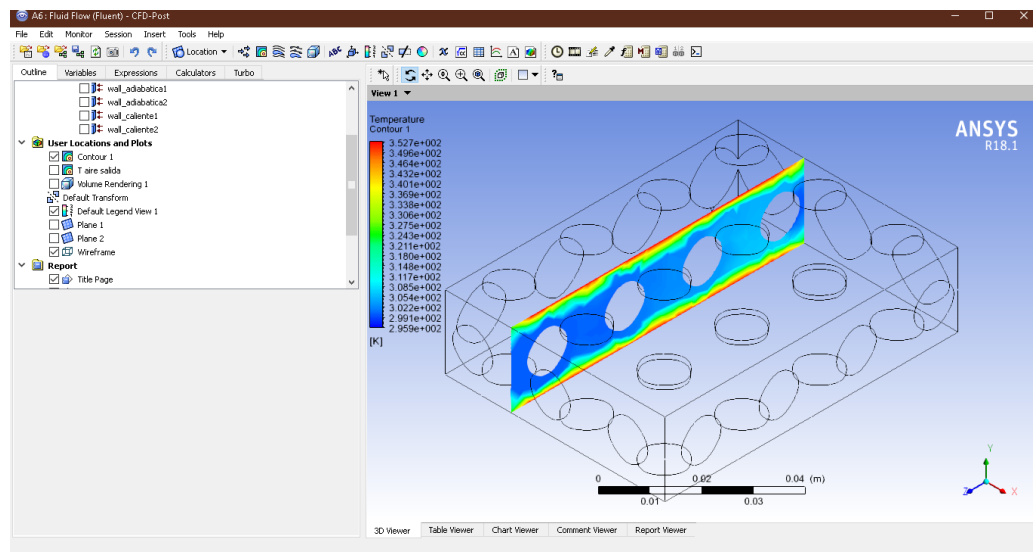
Nro.	T [°C]
1	32.426
2	31.653
3	31.149
4	30.412
5	30.098
Prom	31.147

### 3.5.3.3. Simulación de flujo de calor en Schwarz P superior. Las

dimensiones de la probeta son de 5,15 x 0,3 mm de espesor en el espacio vacío como se muestra en la Figura 55. A partir de estas dimensiones se obtiene la probeta que se presenta en la Figura 56. A continuación se procede con la configuración del análisis CFD en donde se realizarán los mismos pasos mencionados desde la Figura 67 a 71. Posteriormente, para el post – procesamiento de la misma manera se obtendrá el contorno de temperaturas para el aire forzado como se muestra en la Figura 96.

**Figura 96**

*Contorno de Temperatura para Schwarz P Superior*

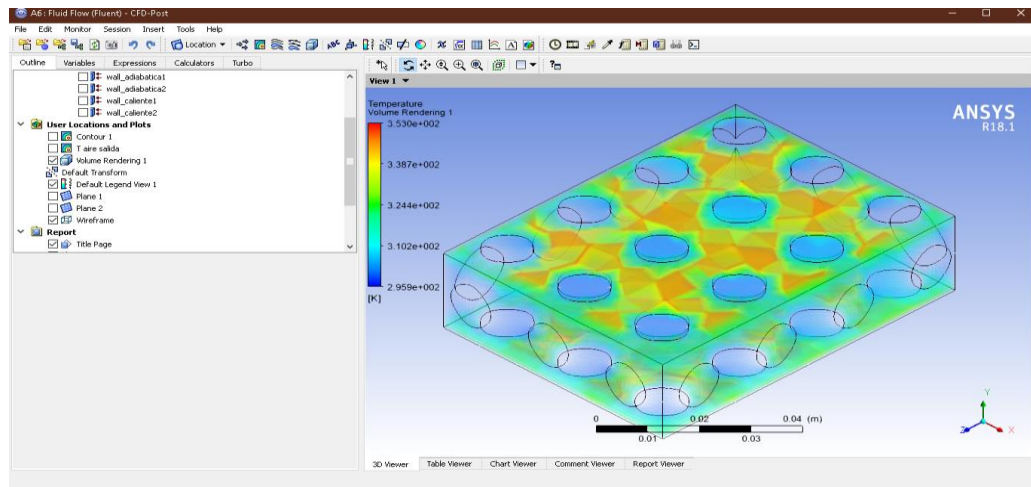




Adicionalmente se obtendrá la representación de volumen del fluido simulado de manera conjunta con una visualización de colores en base a una escala de colores como se observa en la Figura 97.

**Figura 97**

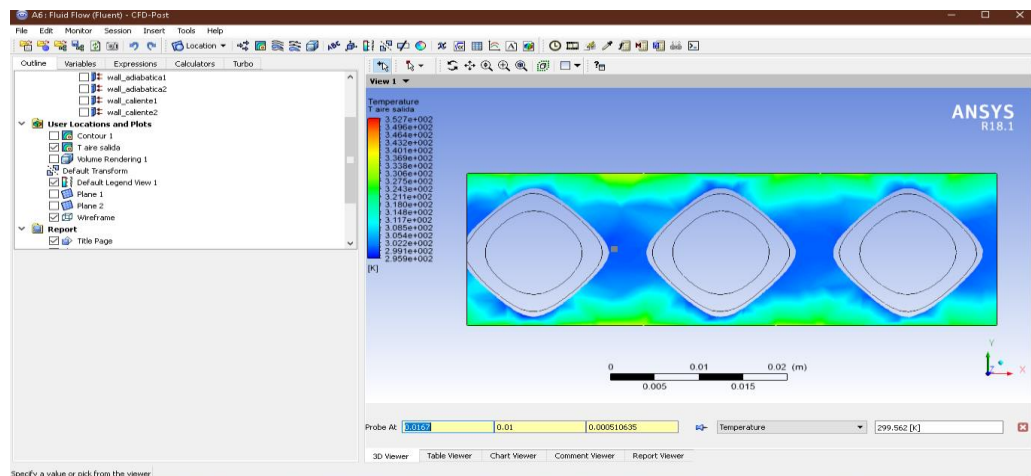
*Representación de Volumen del Fluido en Schwarz P Superior*



Finalmente, se realizará el plano en la sección transversal de la probeta al final de la misma en donde se representa la salida del fluido para realizar la toma de temperatura en la altura media de la probeta para determinar la temperatura del fluido a la salida como se muestra en la Figura 98.

**Figura 98**

*Temperatura de Salida del Aire en Schwarz P Superior*



A continuación, se detalla en la Tabla 34 la toma de temperatura a la salida del aire forzado en 5 puntos distintos a lo largo de la sección transversal de la probeta.

**Tabla 34**

*Temperatura de Salida de Aire en Schwarz P Superior*

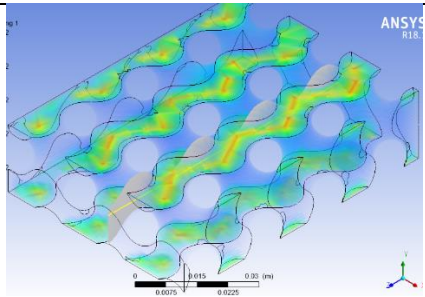
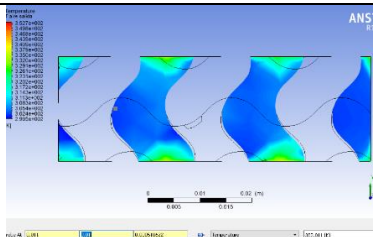
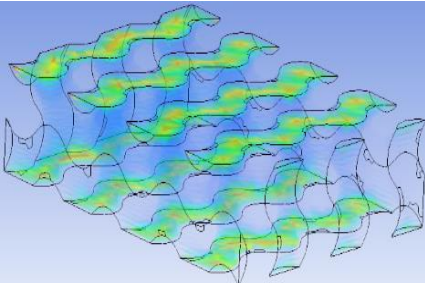
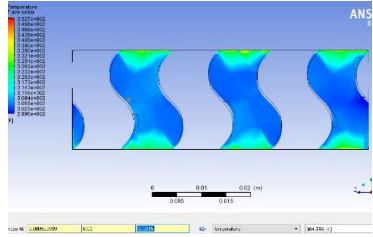
Nro.	T [°C]
1	26.562
2	26.918
3	26.999
4	26.999
5	26.999
Prom	26.895

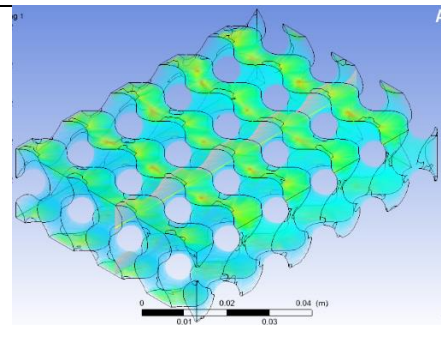
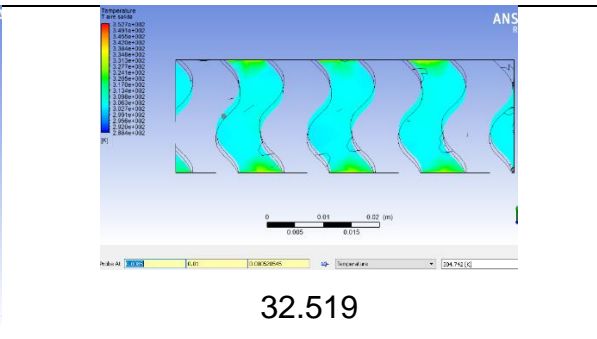
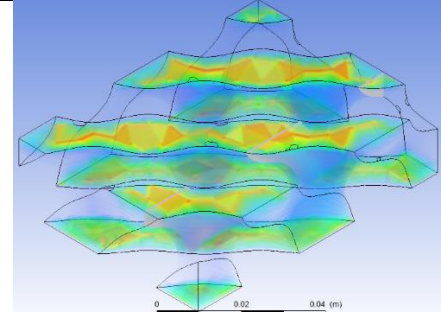
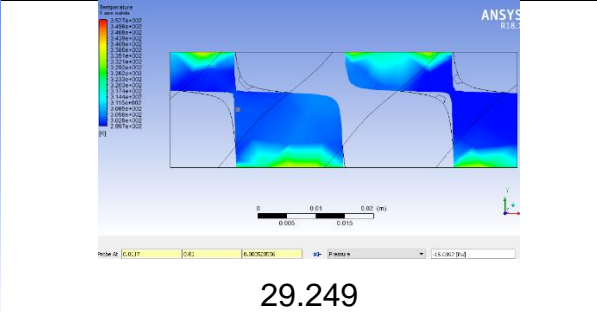
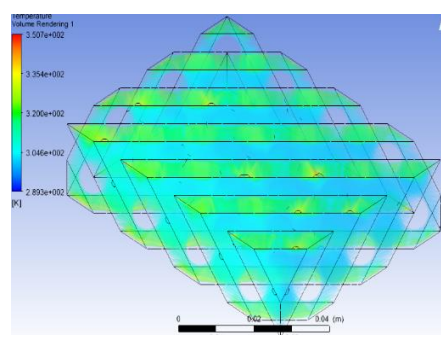
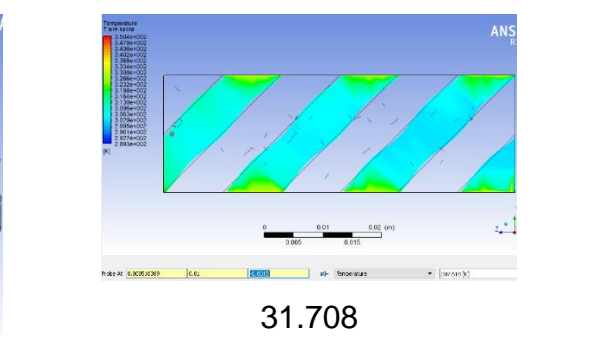
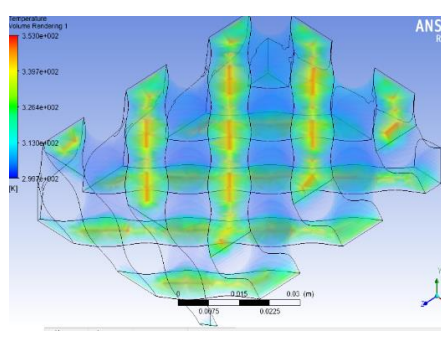
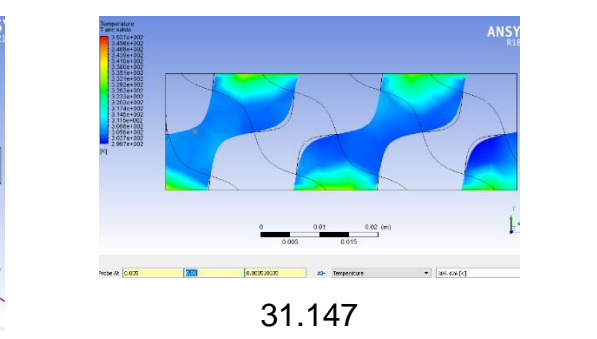
### 3.6. Resultados ensayo simulación de flujo de calor

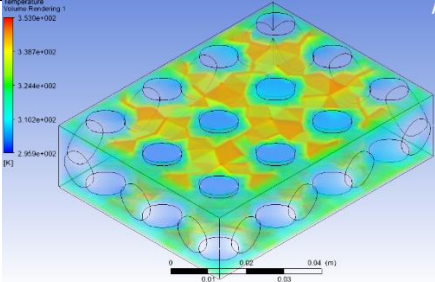
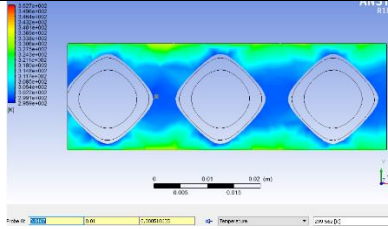
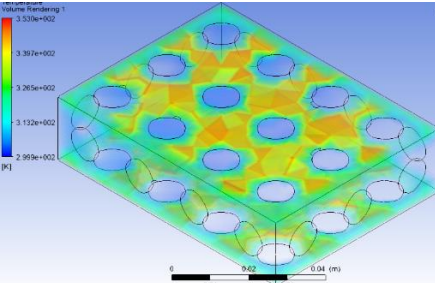
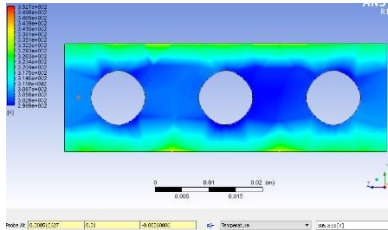
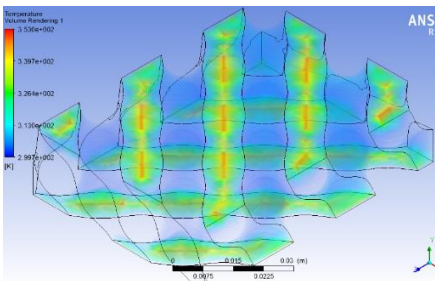
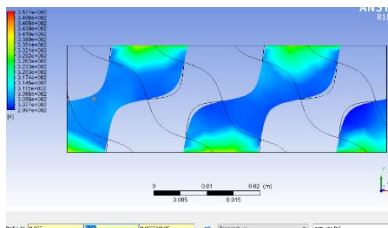
En la Tabla 35 se presentan los resultados tabulados del ensayo realizado previamente en el punto 3.5 a manera de resumen.

**Tabla 35**

*Resultados Ensayo 3*

Tamaño	Volumen Renderizado	Temperatura de aire a la Salida [°C]
<b>Giroide</b>		
5,15x0,3		 30.575
5x0,5		 30.998

Tamaño	Volumen Renderizado	Temperatura de aire a la Salida [°C]
4,5x0,3		 <p style="text-align: center;"><b>32.519</b></p>
<b>Schwarz D</b>		
5,15x0,3		 <p style="text-align: center;"><b>29.249</b></p>
5x0,5		 <p style="text-align: center;"><b>31.708</b></p>
4,5x0,3		 <p style="text-align: center;"><b>31.147</b></p>
<b>Schwarz P</b>		

Tamaño	Volumen Renderizado	Temperatura de aire a la Salida [°C]
5,15x0,3		 26.895
5x0,5		 31.072
4,5x0,3		 31.147

*Nota.* En la tabla se presentan resultados resumidos de la Tabla 26 a 34.

Analizando la Tabla 35 se tiene que la temperatura más alta es la que indica que ha existido una mayor cantidad de transferencia de energía entre el fluido de trabajo y la estructura celular TPMS, por lo que analizando cada una de las estructuras estudiadas se tiene que, para el Gyroide, el tamaño más óptimo es el de 4,5 x 0,3 con una temperatura del aire a la salida de la estructura de 32,519 °C. Para el Schwarz D, el tamaño óptimo es el de 5 x 0,5, con una temperatura de salida para el aire de 31,708°C. Finalmente para el Schwarz P, el tamaño óptimo es el de 4,5 x 0,3, con una temperatura de salida para el aire de 31,147°C. A continuación, a manera de resumen del presente capítulo se presenta la Tabla 36 en donde se resumen los resultados de los ensayos realizados.

**Tabla 36***Resumen Ensayos Realizados*

<b>Estructura</b>	<b>Porosidad</b>	<b>Ensayo 1</b>	<b>Ensayo 2</b>	<b>Ensayo 3</b>
Schwarz P	5,15 x 0,3			26.895
	5 x 0,5	33.918	33.918	31.072
	4,5 x 0,3			31.147
Schwarz D	5,15 x 0,3		24.399	29.249
	5 x 0,5	29.737	29.737	31.708
	4,5 x 0,3		27.436	31.147
Gyroide	5,15 x 0,3		23.491	30.575
	5 x 0,5	27.941	27.941	30.998
	4,5 x 0,3		25.632	32.519

*Nota.* Se presentan los resultados de todos los ensayos realizados tabulados de manera conjunta para que se facilite la decisión y selección de las estructuras más óptimas para funcionar como disipadores de calor.

Observando los datos de la Tabla 36 finalmente se concluye que la estructura celular TPMS más óptima que favorece la transferencia de energía entre la estructura y el fluido de trabajo a una velocidad de 6 m/s en 2 de 3 ensayos realizados corresponde a la estructura Schwarz P, en el tercer ensayo se observa que la estructura Gyroide es la más óptima para el estudio, ambas estructuras se las selecciona con una porosidad de 4,5 x 0,3 mm. Dichas estructuras representan los resultados de los ensayos realizados y se analizará posteriormente de manera experimental en las estructuras mencionadas.

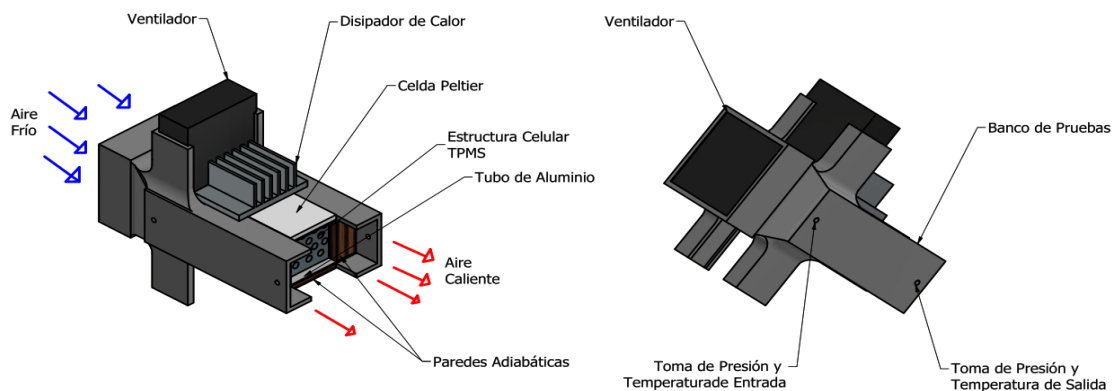
## Capítulo IV

### Método y Materiales

Para la realización del presente estudio se requiere tener en consideración ciertos parámetros de diseño para la ejecución de los análisis, mismos que servirán para idealizar el procedimiento y el método a utilizar para la toma de datos. En la Figura 99 se presenta un esquema que representa el modelo a aplicar para los experimentos y en base al cual se procederá a realizar los diseños correspondientes y en función de los materiales seleccionados. El método de experimentación consiste en generar aire forzado a la entrada de un ducto con una temperatura baja, mismo que tendrá que atravesar una estructura celular ubicada en el centro de un tubo de aluminio el cual tiene 3 de sus 4 caras laterales aisladas adiabáticamente, mientras que la cara restante estará sometida a un flujo de calor proporcionada por una celda Peltier, esta última requiere enfriarse de un lado para generar calor al otro lado efectivamente por lo que en la cara opuesta de la celda Peltier se encuentran disipadores de calor que están enfriados con la ayuda de un segundo ventilador. Se realizarán toma de datos de presión y temperatura del aire antes y después de la estructura TPMS con el motivo de determinar la variación que el aire sufre en estas dos variables para determinar la efectividad de la estructura celular.

**Figura 99**

*Esquema de Experimentos*



#### 4.1. Banco de pruebas

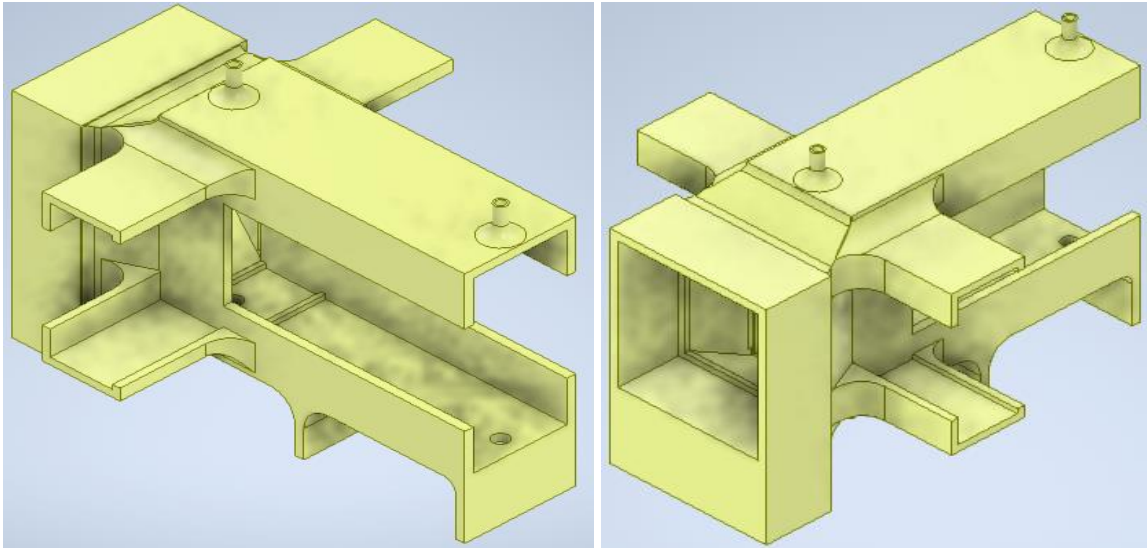
El diseño del banco de pruebas servirá como soporte para los equipos mencionados anteriormente y con ayuda de los cuales se realizarán los experimentos necesarios, por otra mano, debe cumplir ciertos requisitos mínimos que servirán como pautas para el diseño del mismo tales como:

- Las dimensiones máximas de impresión son de 145 x 145 x 185 mm.
- Se requiere de una estructura tipo ducto sobre la cual se tenga a la entrada un ventilador para generar el aire forzado que debe llegar hasta el tubo de aluminio, mismo que se encontrará al final del ducto relleno en los costados internos con papel corcho para simular las paredes adiabáticas mencionadas en los análisis computacionales y en el centro la estructura celular TPMS.
- Es necesario que las celdas Peltier estén en contacto directo con el tubo para generar la energía necesaria para calentar la estructura celular en su interior. Adicionalmente los disipadores de calor estarán colocados en la cara opuesta de la celda para facilitar a que las mismas se enfríen, por lo que se requiere colocar un ventilador continuo a los disipadores de calor que de paso a que la celda Peltier trabaje bajo óptimas condiciones lo que permitirá obtener altas temperaturas generadas por la celda.
- Hay que tener en cuenta que se requiere un espacio adicional en la longitud a los externos del tubo de aluminio en la estructura del banco de prueba en donde colocar los sensores de temperatura y presión para realizar mediciones tanto a la entrada como a la salida de la estructura celular.

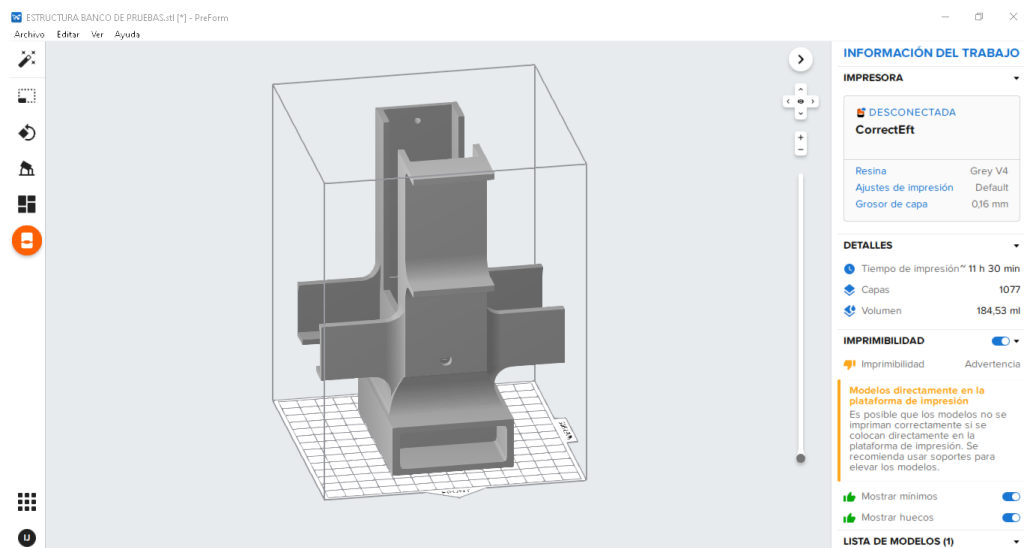
- Como medio de conexión entre el ventilador para el aire forzado y el tubo de rectangular de aluminio es requisito realizar una tobera que sirve de unión entre ambos objetos ya que el ventilador tiene forma cuadrada y el tubo es rectangular.
- Se debe recordar que los sensores de temperatura poseen cables de longitud considerablemente larga, y para evitar que se doblen y sufran posibles averías en los cables se debe colocar a una altura considerable los mismos respecto al lado en el que vayan a estar ubicados.
- Se deben realizar soportes sobre los cuales se sienta el banco de pruebas para que de igual manera se vea atractivo estéticamente.
- Es fundamental tener en cuenta que se deben evitar esquinas a 90° o aristas vivas, por lo que se deben realizar redondeos en donde sea posible y necesario.
- Finalmente, se requiere tener en cuenta la principal característica del banco de pruebas y es que debe ser desmontable todo para realizar los cambios en la estructura de análisis.

Teniendo en mente las consideraciones antes mencionadas como parámetros de diseño, se procede a realizar un diseño que cumpla todos y cada uno de los requisitos mencionados presentándose el siguiente diseño para el banco de pruebas como el que se muestra en la Figura 100 realizado con la ayuda del software Inventor y para el cual se presentan vistas isométricas lateral de ambos lados y sus respectivas medidas se encuentran en el Anexo 1.



**Figura 100***Diseño Banco de Pruebas*

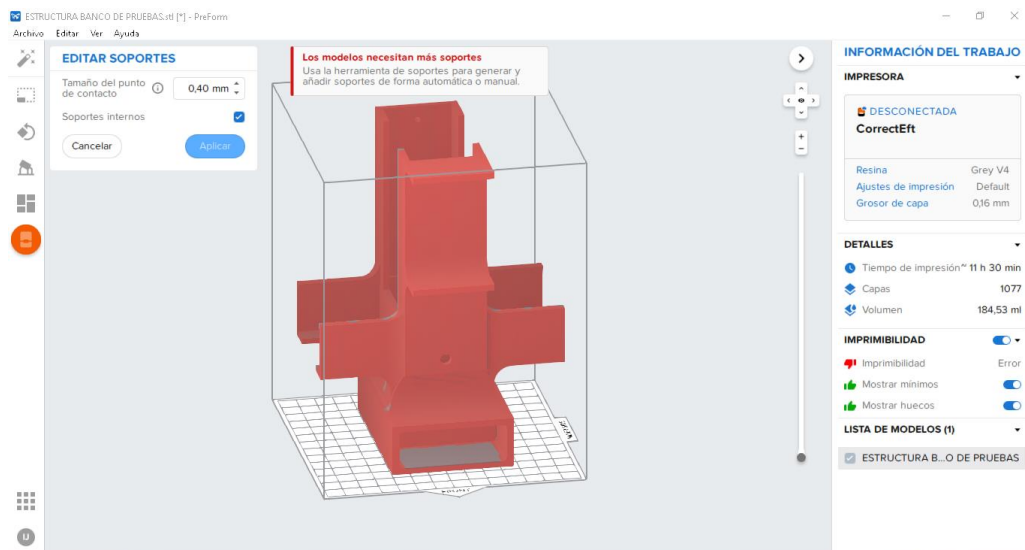
A continuación, se procede a exportar el diseño del banco de pruebas en formato STL para que la impresora Formlabs de estereolitografía pueda reconocer el archivo en su software propio Pre Form con el cual cuenta la impresora, en donde una vez ubicado adecuadamente el diseño dentro del espacio de impresión se tiene lo que se muestra en la Figura 101.

**Figura 101***Software Formlabs con Banco de Pruebas*

Posteriormente, se requieren ubicar soportes en la estructura para que esta sea imprimible, es decir, el software, como se muestra en la Figura 102, al calcular la imprimibilidad del diseño nos mostrará en rojo todo el diseño debido a que no existe ningún soporte generado en nuestra estructura por lo que la impresora no tendrá de donde agarrar el diseño por lo que no puede imprimir.

**Figura 102**

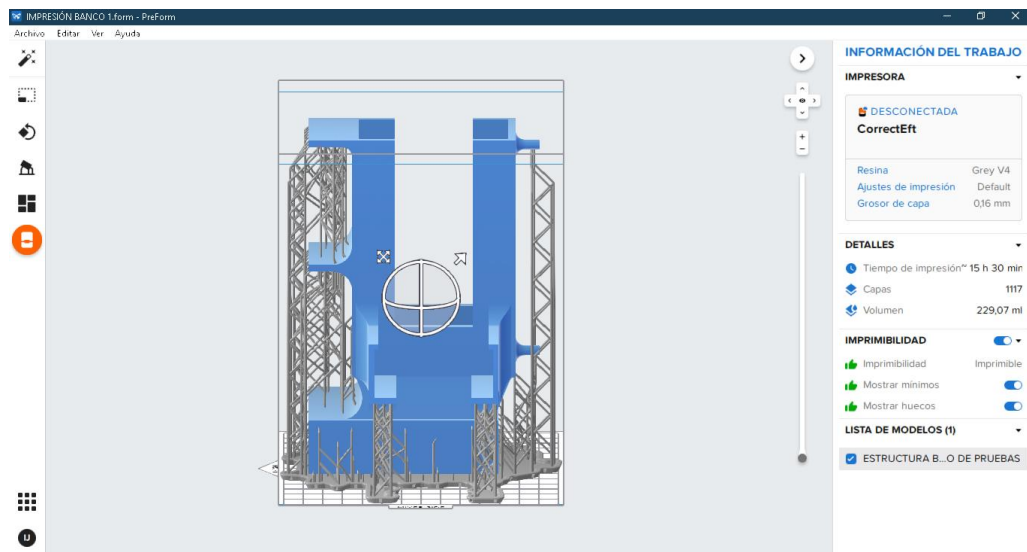
*Soportes Incompletos en Pre Form*



Los soportes el usuario los puede ir ubicando en puntos estratégicos que sirven de anclaje para que la estructura no se caiga, no salga caída en las estructuras que tienen en voladizo, etc. A medida que el usuario va colocando soportes en todos los puntos o zonas rojas que el programa nos indique, automáticamente el programa recalcula la imprimibilidad del diseño, y el proceso es un ciclo hasta llegar al punto que no existan zonas rojas en el diseño lo que indica que se tiene un 100% de imprimibilidad, tal como se ilustra en la Figura 103.

## Figura 103

### *Soportes Completos en Pre Form*



Una vez finalizada la impresión se observará el banco de pruebas como se muestra en la Figura 104.

## Figura 104

### *Impresión de Banco de Pruebas*



A continuación, es necesario desmontar la impresión de manera conjunta con la placa de impresión como se muestra en la Figura 105, para posteriormente con la ayuda de una espátula despegar el banco de pruebas de la placa.

### **Figura 105**

*Desmontaje de Impresora*



Posteriormente se da inicio al proceso de Post – curado, en donde inicialmente se debe limpiar la impresión con alcohol industrial y agua oxigenada, con la ayuda de pipetas y los envases con los que cuenta la impresora para el proceso de limpieza como se muestra en la Figura 106.

### **Figura 106**

*Limpieza de Banco de Pruebas*



Luego se debe dejar secar completamente la estructura al aire libre sin que esta sea expuesta a la luz solar. Posteriormente, se da paso al curado de la impresión con la ayuda de la luz Led UV con la que cuentan los equipos mencionados en el capítulo anterior como se muestra en la Figura 107. Se dejará expuesto el banco de pruebas a la luz UV un total de 1 hora por cada cara de la estructura.

### **Figura 107**

*Exposición del Banco de Pruebas a luz UV*



Finalmente, se procede a retirar los soportes del banco de pruebas con mucho cuidado y con la ayuda de pinzas para realizar el menor daño posible a la estructura. De ser necesario se puede lijar en los puntos de unión de los soportes con la estructura para evitar que estos queden sobresaliendo en la superficie del banco de pruebas quedando finalmente la estructura que se observa en la Figura 108.

### **Figura 108**

*Estructura Banco de Pruebas*



## 4.2. Materiales utilizados

Para la selección de los instrumentos de medición a utilizar se toma en consideración la opinión de algunos participantes del grupo de investigación para tomar en cuenta las distintas consideraciones desde distintos puntos de vista por parte de todos los involucrados. Para determinar la opción idónea entre algunos instrumentos en los que se presente algunas alternativas, se utilizará una matriz de priorización en donde se tienen las ponderaciones que se presentan en la Tabla 37.

**Tabla 37**

*Ponderaciones Matriz de Priorización*

Valor	Descripción
10	Mucho Mejor
5	Mejor
1	Igual
1/5	Peor
1/10	Mucho Peor

A continuación, es necesario determinar los criterios en base a los cuáles se realizarán la selección de los instrumentos para los que sea necesario la aplicación de la matriz de priorización. Los criterios bajo los que se evaluarán las alternativas son: Calidad, Disponibilidad, Rango, Facilidad de Montaje, Costo. En base a los criterios presentados se realizará una matriz de comparación entre criterios como se muestra en la Tabla 38.

**Tabla 38**

*Ponderación de Criterios*



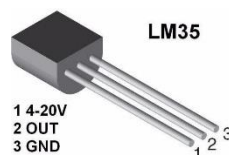
Criterio	Señal de Salida	Alimentación	Rango de Lectura	Precisión	Costo	Total	Peso
Señal de Salida	-	10	1	5	5	21	0.39
Alimentación	1/10	-	5	5	1/5	10.3	0.19
Rango de Lectura	1	1/5	-	1/5	5	6.4	0.12
Precisión	1/5	1/5	5	-	5	10.4	0.19
Costo	1/5	5	1/5	1/5	-	5.6	0.11
<b>Total</b>	17	2.3	1.5	10.3	26	53.7	1

#### 4.2.1. Medición de temperatura para fluido de trabajo

La temperatura del aire forzado se estima mediante las simulaciones computacionales realizadas que fluctuará entre 20 y 40 °C, dependiendo de la estructura celular TPMS y su respectiva porosidad que se analicen. En la Tabla 39 se detallan algunos sensores de temperatura utilizables para el proceso a estudiar.

**Tabla 39**

*Alternativas Sensores de Temperatura*

Característica	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Marca	BAUMER	MAXIM	TGS
Modelo	Pt 100	DS18B20	LM 35
Señal de Salida	Analógico	Digital	Analógico
Alimentación	-	3.0 – 5.5 V	4 – 20 V
Rango	-40 a 100 °C	-55 a 125 °C	-55 a 150 °C
Resolución	-	9 a 12 bits	-
Precisión	± 0.3 °C	± 0.5 °C	± 0.5 °C
Resistencia	1000 Ω a 0°C	4,7 K Ω	-
Ilustración			

*Nota.* La información ha sido tomada de (Danfoss, 2019), (MAXIM, 2008), (National, 2000).

Posteriormente se requiere realizar una matriz de ponderación que compare las alternativas presentadas anteriormente con el fin de asignar un peso a cada una para determinar la opción más óptima para el estudio como se muestra en la Tabla 40.

**Tabla 40**

*Ponderación de Alternativas de Sensor de Temperatura*

Criterio	Puntaje	Pt 100	DS18B20	LM 35
Señal de Salida	0.39	10	10	10
Alimentación	0.19	1	10	5
Rango de Lectura	0.12	5	5	10
Precisión	0.19	10	5	5
Costo	0.11	1	5	5
<b>Total</b>	10	6.7	7.9	7.55

#### 4.2.1.1. Sensor de temperatura DS18B20. Consta del integrado

DS18B20 transmitiendo la información de manera directa a digital haciendo uso del protocolo One Wire, lo que quiere decir que la transferencia de datos es mediante un cable y es posible porque todos los dispositivos tienen código único de 64 bits. Las características del sensor se presentan en la Tabla 41.

**Tabla 41**

*Ficha Técnica Sensor DS18B20*

<b>Sensor DS18B20</b>	
Marca	MAXIM
Modelo	DS18B20
Longitud de Cable	1 (m)
Recubrimiento	Cubrimiento Metálico
Transmisión de Datos	Mediante 1 pin de puerto
Código de Serie	Único código de 64 bits
Fuente de Poder	Fuente de 3.0 a 5.5 V
Rango	-55 a 125 °C
Resolución	9 a 12 bits
Precisión	± 0.5°C desde -10 a 85 °C
Interfaz	1 – Wire



*Nota.* Adaptado de DS18B20 Programmable Resolution I-Wire Digital Thermometer, por Maxim, 2008, <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/DS18B20.pdf>.

#### 4.2.2. Medición de presión

La presión del aire medida antes y después de la estructura celular TPMS, depende netamente de la velocidad de giro del ventilador, misma que estará controlada por el voltaje de salida de la fuente de alimentación. La presión será menor para una menor velocidad del ventilador y viceversa. En la Tabla 42 se presentan las alternativas aplicables para el estudio en lo que concierne a medición de presión.



**Tabla 42***Alternativas Sensores de Presión*

<b>Característica</b>	<b>Alternativa 1</b>	<b>Alternativa 2</b>
Marca	MPX5500	Messtech
Modelo	CASE 867C-05	GM - 100
Señal de Salida	Analógico	Analógico
Alimentación	4,75 – 5,25 v	10 - 35 V
Rango	0 – 500 kPa	0 – 800 kPa
Sensibilidad	9 mV/kPa	-
Precisión	± 2,5	± 0,5
Ilustración		

*Nota.* La información ha sido tomada de (NXP, 2009), (messtech, 2017).

Posteriormente se requiere realizar una matriz de ponderación que compare las alternativas presentadas anteriormente con el fin de asignar un peso a cada una para determinar la opción más óptima para el estudio como se muestra en la Tabla 43.

**Tabla 43***Ponderación de Alternativas de Sensor de Presión*

<b>Criterio</b>	<b>Puntaje</b>	<b>MPX5500</b>	<b>Messtech</b>
Señal de Salida	0.39	10	10
Alimentación	0.19	10	1
Rango de Lectura	0.12	5	10
Precisión	0.19	1	10
Costo	0.11	10	1/10
<b>Total</b>	10	7.69	7.201

**4.2.2.1. Sensor de presión MPX 5500 Case 867C – 05.** El sensor de presión es un transductor piezorresistivo de la serie MPX 5500 de silicio monolítico de última generación diseñado para una amplia gama de aplicaciones, pero particularmente aquellas que emplean microcontroladores con entradas analógicas o digitales. Proporciona una señal de salida analógica precisa y de alto nivel, misma que es proporcional a la presión aplicada, sus características se presentan en la Tabla 44.

**Tabla 44***Ficha Técnica Sensor CASE 867C - 05*

<b>Sensor CASE 867C - 05</b>	
Marca	MPX5500
Modelo	CASE 867C - 05
Rango	0 – 500 kPa
Voltaje de Alimentación	4,75 – 5,25 V
Corriente de Alimentación	7 – 10 mA
Compensación de Presión Cero	0,088 – 0,313 V
Alcance de Escala Completa	4,5 V
Precisión	± 2,5
Sensibilidad	9 mV/kPa
Tiempo de Respuesta	1.0 ms
Tiempo de Calentamiento	20 ms

*Nota.* Adaptado de NXP, Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperatura Compensated and Calibrated, 2009, <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPX5500.pdf>.

#### **4.2.3. Medición de velocidad de aire**

Así como se mencionó para la medición de presión, la velocidad del aire está en función de la velocidad del ventilador de la cámara interna del banco de pruebas. Para la medición de la velocidad del ventilador se utilizará un instrumento de medición con el que cuenta la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en el laboratorio de Energías. Dicho instrumento de medición es el anemómetro.

##### **4.2.3.1. Anemómetro Thermo – Anemometer AN 100.** El

termoanemómetro AN100 CFM/CMM puede mostrar la velocidad del aire más la temperatura ambiente. Las dimensiones de área fáciles de configurar se almacenan en la memoria interna del medidor para el próximo encendido. Las características adicionales incluyen: un promedio de 20 puntos para el flujo de aire y una precisión de velocidad del 3% a través de una rueda de paletas con rodamiento de bolas de 72 mm, da baja fricción en un cable de 120 cm. Cuenta con batería de 9 V, funda protectora de goma y estuche. Sus características técnicas se presentan en la Tabla 45.

**Tabla 45**

*Ficha Técnica Thermo – Anemometer AN 100*

<b>Thermo – Anemometer AN 100</b>	
Marca	Extech
Modelo	AN 100
Rango Velocidad Aire	0,40 – 30 m/s
Resolución Velocidad Aire	0,01 m/s
Precisión Básica Velocidad Aire	± 3 %m/s
Rango Temperatura Aire	-10 – 60 °C
Resolución Temperatura Aire	0,1 °C
Precisión Básica Temperatura Aire	± 3 °C
Rango Flujo Aire	0 – 9999 (m3/min)
Resolución Flujo Aire	0,1

*Nota.* Adaptado de Extech Instruments, Termo – Anemómetro PCM/MCM, 2018,  
[http://www.extech.com/products/resources/AN100\\_UM-es.pdf](http://www.extech.com/products/resources/AN100_UM-es.pdf).

#### **4.2.4. Control de temperatura**

Para realizar el aumento de la temperatura a las que estarán sometidas las estructuras celulares TPMS se utilizarán celdas Peltier que transforman energía eléctrica en energía térmica ayudando de esta manera a generar la energía necesaria para obtener un calentamiento en la estructura. Las características técnicas se detallan en la Tabla 46.

**Tabla 46**

*Ficha Técnica Celda Peltier*

<b>Celda Peltier TEC1-12706</b>	
Marca	Thermoelectric Cooler
Modelo	TEC1-12706
Temperatura Lado Caliente	25 – 50 °C
Potencia Máxima	50 – 57 W
Delta T Máximo	66 – 75 °C
Corriente Máxima	6,4 A
Voltaje Máximo	14,4 – 16,4 V
Resistencia del Módulo	1,98 – 2,30 Ω
Máxima Temperatura de Operación	138 °C

*Nota.* Adaptado de Hebei I. T., TEC1 – 12706, 2016,

<https://peltiermodules.com/peltier.datasheet/TEC1-12706.pdf>.

La Celda Peltier es un dispositivo semiconductor que genera una diferencia de temperatura entre sus caras para actuar como enfriador o calentador, es un elemento de estado sólido basado en el efecto Peltier (propiedad termoeléctrica que consiste la obtención de un diferencial de temperatura mediante el suministro de voltaje eléctrico), esto se logra al hacer pasar corriente entre 2 junturas de Peltier en donde la corriente genera transferencia de calor entre ambas junturas y su funcionamiento consiste en que una juntura se calienta en tanto que la otra se calienta y viceversa.

Es por ello que la celda Peltier requiere una buena disipación de calor para que la celda llegue a una temperatura alta. Es fundamental considerar que este control de temperatura no es el más óptimo para determinar la cantidad de energía a la que se está sometiendo la estructura celular TPMS, es por ello que, se va a utilizar un controlador electrónico, mediante el cual se racionará el voltaje que se entrega a la celda Peltier para con ello regular la temperatura a la que se va a exponer la estructura celular. Las características del controlador a ser utilizado para el control de temperatura se describen en la Tabla 47.

**Tabla 47**

*Ficha Técnica Controlador*

<b>Celda Peltier TEC1-12706</b>	
Marca	IdeaFormer
Modelo	Bed Mosfet V1
Material	Cerámico
Voltaje de Operación	12 – 24 V
Corriente Máximo	30 A
Tipo de Control	PID

*Nota.* Adaptado de Cmprodemaq, Bed Mosfet V1 Cama Impresora 3d 12-24v 30a, 2021, [https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-501976853-bed-mosfet-v1-cama-impresora-3d-12-24v-30a-cmprodemaq-\\_JM?searchVariation=173764601121#searchVariation=173764601121&position=3&search\\_layout=stack&type=item&tracking\\_id=fe832fd5-5129-4462-b896-77fd67bfdddf](https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-501976853-bed-mosfet-v1-cama-impresora-3d-12-24v-30a-cmprodemaq-_JM?searchVariation=173764601121#searchVariation=173764601121&position=3&search_layout=stack&type=item&tracking_id=fe832fd5-5129-4462-b896-77fd67bfdddf).

#### 4.2.5. Control de velocidad de fluido de trabajo

Para el presente estudio, el fluido de trabajo es aire forzado, por lo tanto, para la generación de la respectiva velocidad del fluido se utilizarán ventiladores cuyas características se presentan en la Tabla 48.

**Tabla 48**

*Ficha Técnica Ventiladores*

<b>Ventilador Nidec TA225DC</b>	
Mar ca	Nidec TA225DC
Modelo	B 34605 – 57
Flujo de Aire	32 CFM
Voltaje de Operación Nominal	12 V
Rango de Voltaje de Operación	10,2 – 13,8 V
Corriente	580 mA
Potencia	6,96 W
Presión	43,0 Dba
Velocidad Ventilador	6,800 rpm
Cojinete	Bola
Temperatura de Operación	-10 °C – 70 °C

*Nota.* Adaptado de Nidec, TA225DC Series – Electrical and Mechanical Characteristics, 2021,

<https://www.datasheetarchive.com/pdf/download.php?id=1751beff37876cc4b3507a258f7ad15913b71c&type=P&term=B34605>.

Adicionalmente para realizar un control de la velocidad que generan dichos ventiladores se utilizará únicamente una variación del voltaje de entrada, esto se lo logrará con la ayuda de una fuente de alimentación la cual tiene salidas de 12 V y 5 V que son los voltajes con los que se alimentará los ventiladores y a través de los cuáles se logrará una variación en la velocidad de trabajo de los mismos.

#### 4.2.6. Fuente de alimentación

Para energizar los equipos detallados anteriormente se utilizará una fuente de alimentación cuyas características se detallan en la Tabla 49.

**Tabla 49***Ficha Técnica Fuente de Alimentación*

<b>Fuente de Alimentación Altek pc</b>				
Mar ca	Altek			
Modelo	ATX – 750/200 W			
Voltaje de Operación	110 V AC			
Corriente de Operación	3 A			
Frecuencia de Operación	50 Hz			
Tipo de Corriente de Salida	DC			
Salidas	+5V	30A	-5V	/
	+12V	38 A	-12V	0,5A
	+3,3V	27A	+5VSB	2,3A

**4.2.7. Impresión mediante Estereolitografía**

El equipo a utilizar para las impresiones que se van a realizar corresponde al mostrado en la Figura 6. Sus características técnicas se muestran en la Tabla 50.

**Tabla 50***Ficha Técnica Impresora*

<b>Impresora mediante Estereolitografía</b>	
Fabricante	Formlabs
Procedencia	Estados Unidos
Material Consumible	Resina
Tipo de Llenado	Automático
Tecnología de Impresión	Estereolitografía de Fuerza Baja (LFS)
Diámetro de Punto Láser	85 micras
Montado	Plug and Play
Dimensiones	405 x 375 x 530
Peso	17,5 Kg
Espesor de Capa	25 – 300 micras
Resolución	25 micras
Volumen Máximo de Impresión	145 x 145 x 185
Temperatura de Trabajo Interna	Auto calefacción hasta 35°C
Especificación Láser	Láser de clase 1, 405 nm de longitud de onda de, 250 mW de potencia.
Archivos de Entrada	STL, OBJ, FORM
Software	Preform
Conectividad	Wi – Fi, Ethernet, Cable USB 2.0
Sistema Operativo	Windows 7, Mac OS x 10.10., OpenGL 2.1
Especificaciones de Alimentación	100 – 240 V CA / 2,5 A / 50-60 Hz 220 W
Otros	Pantalla de Control, Aplicación Móvil, Cámara Cerrada

*Nota.* Adaptado de Formlabs, Especificaciones técnicas de las impresoras 3D de estereolitografía de Formlabs, 2021, <https://formlabs.com/es/3d-printers/form-3/tech-specs/>.

#### **4.2.8. Curado posterior a impresión mediante Estereolitografía**

Una vez realizadas las impresiones respectivas mediante la Impresora Formlabs, se procederá a realizar el respectivo curado luego de haber realizado la respectiva limpieza. El proceso de post-curado se realiza mediante la aplicación de luz UV, para lo cual se han utilizado los dispositivos cuyas características se muestran en la Tabla 51.

**Tabla 51**

*Ficha Técnica Dispositivo de Post-Curado*

<b>Lámpara de Luz Led UV</b>	
Marca	SUN
Modelo	UVLED Nail Lamp 9C
Especificaciones de Alimentación	100 – 240V / 50-60 Hz / 0,5 A
Potencia	24 W
Dimensiones	210 x 120 x 80
Batería	Banco de poder recargable
Fuente de Alimentación	USB
Resolución	25 micras
Fuente de Iluminación	Doble foco LED de 365 + 405 nm
Número de focos	15
Vida Útil	50,000 H

#### **4.2.9. Dispositivo de adquisición de datos**

Se empleará un Arduino Nano para la adquisición de datos con su respectivo software propio sobre el cuál se creará el código de programación que ayude a la recopilación de datos, así como para enviar las señales de encendido y control para las celdas Peltier y de igual manera para tabular las lecturas de los sensores tanto de presión como de temperatura. Las características del Arduino se presentan en la Tabla 52.

**Tabla 52***Ficha Técnica Arduino Nano*

<b>Lámpara de Luz Led UV</b>	
Microcontrolador	ATmega328
Arquitectura	AVR
Voltaje de Operación	5V
Memoria	Flash, 32 KB
SRAM	2 KB
Velocidad de Reloj	16 MHz
Pines	8 pines analógicos de entrada 22 pines digitales (6 son PWM)
Corriente CC	40 mA (pines de E/S)
Voltaje de Entrada	7 – 12 V
Salida	PWM 6
Consumo de Energía	19 mA
Tamaño	18 x 45 mm
Peso	7 g

*Nota.* Adaptado de Arduino, Arduino Nano, <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>.

Para la visualización de los datos adquiridos por el Arduino Nano se realizará mediante la creación de una hoja Excel en la cual se registrarán las lecturas de los sensores.

#### **4.2.10. Material adicional utilizado**

Se detallan otros materiales utilizados para el desarrollo del presente estudio

- Tubo de Aluminio rectangular de 3 pulg x 1 ½ pulg x 3 1/8 pulg, con espesor de pared de 1,25 mm
- Kit de la Celda Peltier del cual se utilizará el disipador de calor de menor tamaño para ayudar a enfriar la Celda.
- Resistencias de 4,7 KOhms
- Protoboard
- Borneras
- Papel Corcho, servirá para cumplir el papel de pared adiabática
- Resina

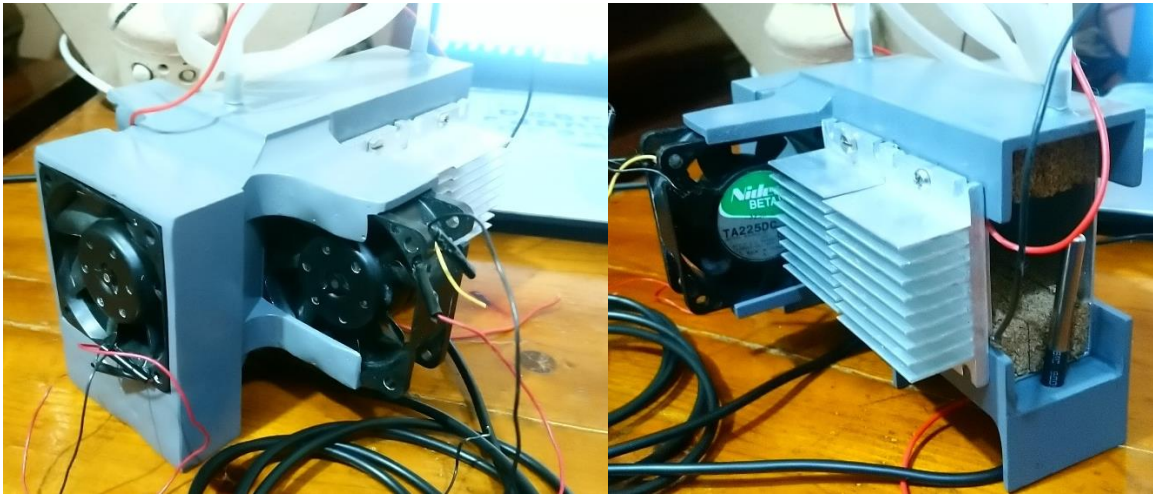


#### 4.3. Montaje en banco de pruebas

Una vez obtenida la estructura del banco de pruebas final, se inicia el montaje de los equipos detallados para dar forma al ensamble como se muestra en la Figura 109.

#### Figura 109

*Ensamblaje Banco de Pruebas*



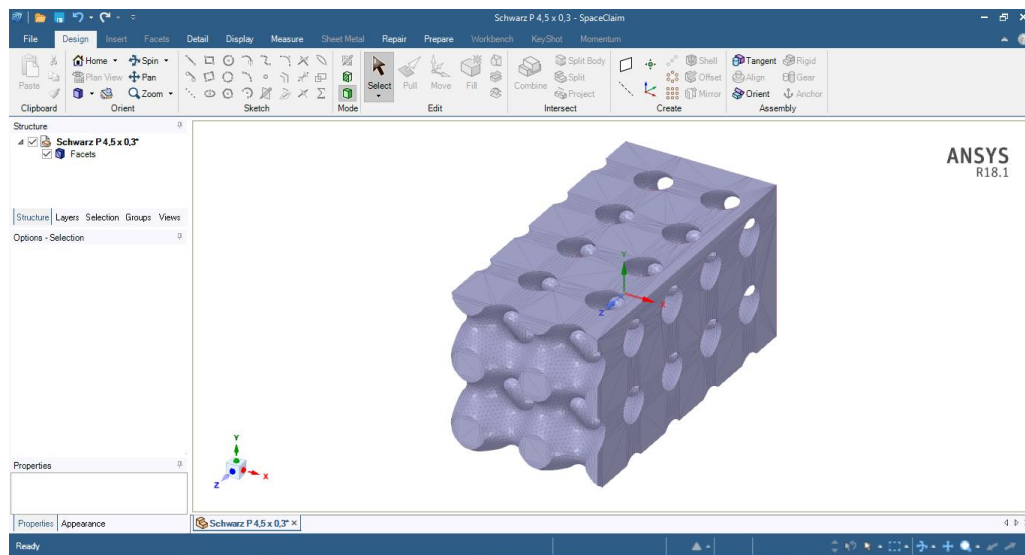
#### 4.4. Impresión estructuras celulares

Adicionalmente se requiere prototipar la estructura celular que se encontrará al interior del tubo de aluminio, entre las paredes adiabáticas simuladas con papel corcho, esta estructura será la que permitirá generar los cambios de dirección en el flujo de aire forzado y estará sometida a temperatura alta de 40 o 50 °C en uno de sus extremos por parte de la Celda Peltier. El estudio como se ha mencionado anteriormente, consiste en hacer que el aire forzado atraviese la estructura que estará sometida a calor y mediante conducción este calor atravesará la estructura para de esta manera al momento del choque entre el aire y la estructura se genere un intercambio de calor mediante convección generando un aumento de temperatura en el fluido de trabajo a la salida de la estructura.

Con ayuda de software Ansys se diseñarán las estructuras celulares a utilizarse, como se observó en la Tabla 36, las estructura que mejor desempeño presentaron para la transferencia de calor en los diferentes ensayos simulados fueron las estructura Schwarz P y Gyroide con un tamaño de porosidad de 4,5 x 0,3 mm, por lo tanto, se procede a diseñar estas estructuras con la ayuda de la herramienta SpaceClaim como se muestra en la Figura 110.

**Figura 110**

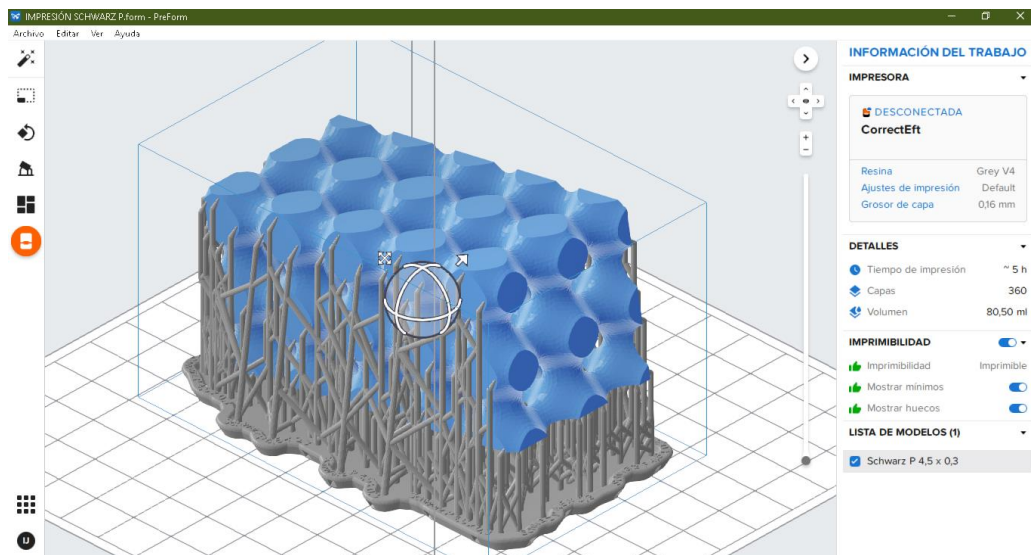
*Estructura celular Schwarz P en SpaceClaim*



A continuación, se procede a guardar el archivo en formato STL para poder importarlo en el programa formlabs para proceder a la impresión del mismo, es necesario actuar de la misma manera que con el banco de pruebas ya que inicialmente no se puede imprimir el archivo por la ausencia de soportes en el mismo por lo que se procede a generar los soportes necesarios para que la estructura sea imprimible tal como se muestra en la Figura 111.

**Figura 111**

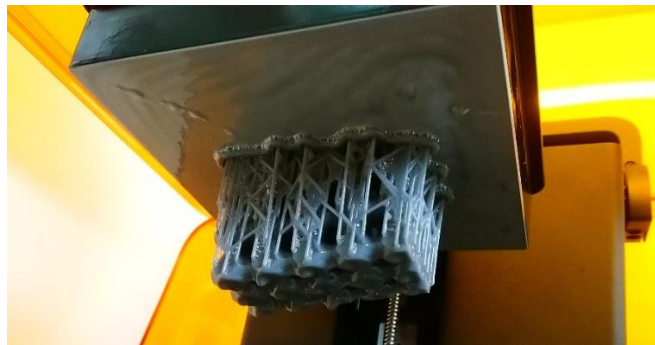
*Estructura Schwarz P en formalbs*



Posteriormente se procede a la impresión de la estructura celular con el mismo procedimiento detallado para el banco de pruebas obteniéndose el resultado final que se ilustra en la Figura 112.

**Figura 112**

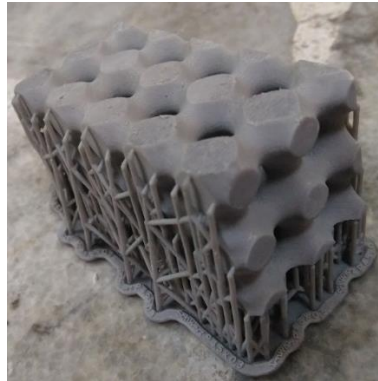
*Impresión Schwarz P*



Luego, se debe realizar el mismo procedimiento de post – curado detallado anteriormente, mismo que consiste en la limpieza de la impresión con alcohol y con agua oxigenada para finalmente una vez que se encuentre la impresión seca proceder con el curado con la luz ultravioleta para que queda la impresión como se muestra en la Figura 113.

**Figura 113**

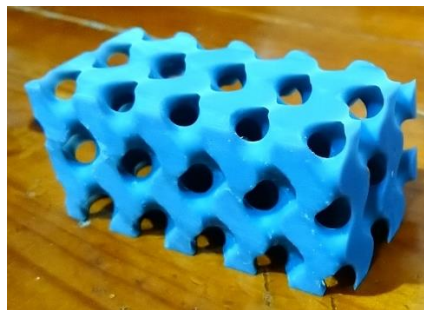
*Impresión Schwarz P final con soportes*



Finalmente, una vez terminado el curado con luz UV se procede a retirar los soportes ya que la estructura ya se encuentra endurecida y lista para su utilización. Este procedimiento se lo repite para la impresión de la estructura celular Gyroide obteniéndose un resultado final como el que se observa en la Figura 114.

**Figura 114**

*Estructura Gyroide Impresa*

**4.5. Conexión de equipos**

En lo que corresponde a la conexión de sensores para con el dispositivo de adquisición de datos se adjunta en el Anexo 2 el código de programación generado en la plataforma Arduino que servirá para la toma de datos de los sensores de temperatura en intervalos de tiempos, adicionalmente servirá para enviar la señal al microcontrolador y con el que se regulará la cantidad de voltaje con la que se alimenta la celda Peltier.



## Capítulo V

### Diseño de Experimentos

Para el desarrollo del estudio es fundamental definir un método experimental a seguir, mismo que servirá como guía para indicar los experimentos a realizar y su orden. De igual manera para los análisis experimentales es necesario diseñar y fabricar una estructura base sobre la cual se realizarán los experimentos a manera de banco de pruebas.

#### 5.1. Diseño experimental

Para el diseño de experimentos (DOE, por sus siglas en inglés, Design Of Experiments) en el presente estudio se utilizará el método de diseño Factorial como guía para la realización de los análisis experimentales, este método se lo aplicará con la ayuda del software Minitab, que es un software estadístico que permite examinar datos tanto para descubrir tendencias como para encontrar y predecir patrones, para de esta manera una vez realizados los experimentos y tabulados los respectivos resultados, el método experimental analizará dichos resultados y arrojará los experimentos más significativos para el estudio, para con estos experimentos representativos realizar una simulación computacional para su posterior comparación y análisis de resultados.

Para la aplicación del método Factorial es requisito establecer ciertos parámetros tales como, los factores que pueden variarse a la hora de la realización del experimento, los niveles sobre los que cada uno de los factores va a poder variar y el número de réplicas a realizar el experimento. Este último parámetro sirve como base para establecer cierta confiabilidad y veracidad a la hora de analizar los resultados de los experimentos y determinar el caso de estudio más representativo. Los cuales se describen a detalle en la Tabla 53.

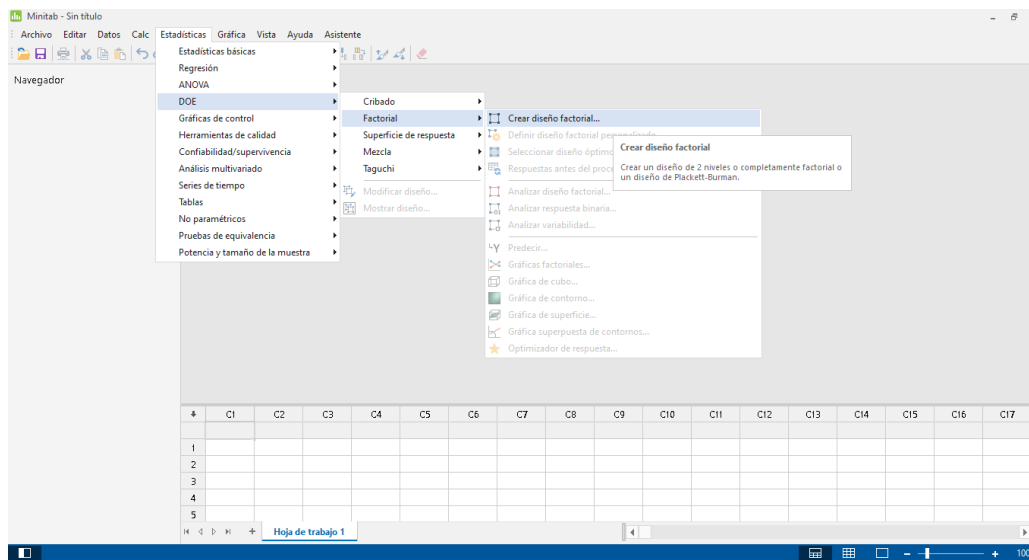
**Tabla 53***Parámetros Método Factorial*

<b>Método Factorial</b>	
<b>Factores</b>	<b>Niveles</b>
Velocidad Cámara Interna	2,6 o 6 m/s
Temperatura Celda Peltier	40 o 50 °C
Estructura TPMS	Schwarz P o Gyroide

Análiticamente, el proceso de cálculo del número de experimentos a realizar bajo el método Factorial se lo representa por la ecuación 4.

$$\# \text{ Experimentos} = (2^{\text{Factores}}) * \text{réplicas} \quad (4)$$

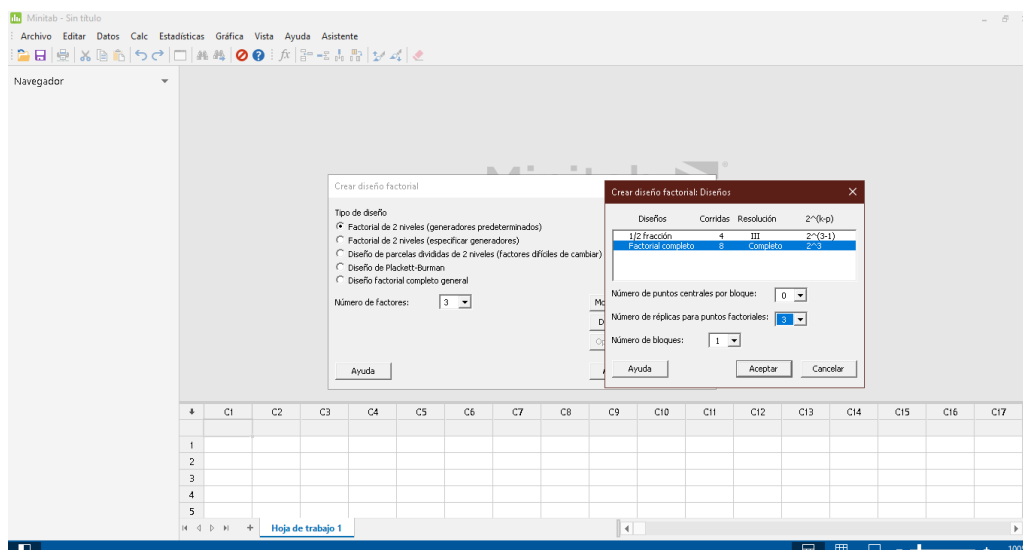
Resolviendo analíticamente el método Factorial, si tenemos 3 factores, y 3 réplicas, el número de experimentos a realizar sería 24 experimentos. A continuación, se hará uso del software Minitab para dar inicio al diseño experimental planteado para el presente estudio como se muestra en la Figura 117.

**Figura 116***Creación de Diseño Experimental en Minitab*

Una vez especificados los parámetros de la Tabla 53, se procede a seleccionar los datos como se muestra en la Figura 118.

Figura 117

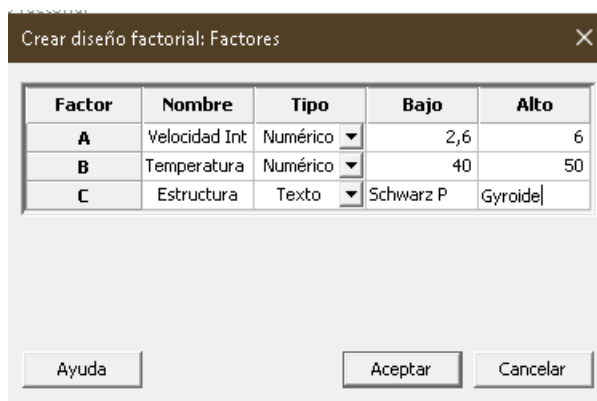
## Selección Parámetros Método Factorial en Minitab



A continuación, con la opción Factores se ingresan tanto los factores como sus respectivos Niveles como se muestra en la Figura 119, para su correspondiente generación de las combinaciones de los experimentos a realizar.

Figura 118

## Factores y Niveles en Minitab



Una vez que se acepte las configuraciones ingresadas en el software, automáticamente generará aleatoriamente una serie de combinaciones que corresponden a los casos de estudio a analizar en el parte experimental tal como se



muestra en la Figura 120, donde se ilustran los 24 experimentos a realizar siendo las combinaciones a estudiar las presentadas por filas en las columnas C5, C6 y C7-T.

### Figura 119

#### *Combinación de Experimentos a Realizar de Minitab*

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7-T	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15
	OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	Velocidad Interna	Temperatura Peltier	Estructura								
1	21	1	1	1	2,6	40	Gyroide								
2	10	2	1	1	6,0	40	Schwarz P								
3	22	3	1	1	6,0	40	Gyroide								
4	8	4	1	1	6,0	50	Gyroide								
5	15	5	1	1	2,6	50	Gyroide								
6	18	6	1	1	6,0	40	Schwarz P								
7	7	7	1	1	2,6	50	Gyroide								
8	14	8	1	1	6,0	40	Gyroide								
9	13	9	1	1	2,6	40	Gyroide								
10	11	10	1	1	2,6	50	Schwarz P								
11	24	11	1	1	6,0	50	Gyroide								
12	3	12	1	1	2,6	50	Schwarz P								
13	4	13	1	1	6,0	50	Schwarz P								
14	2	14	1	1	6,0	40	Schwarz P								
15	16	15	1	1	6,0	50	Gyroide								
16	20	16	1	1	6,0	50	Schwarz P								
17	6	17	1	1	6,0	40	Gyroide								
18	9	18	1	1	2,6	40	Schwarz P								
19	17	19	1	1	2,6	40	Schwarz P								
20	23	20	1	1	2,6	50	Gyroide								
21	19	21	1	1	2,6	50	Schwarz P								
22	12	22	1	1	6,0	50	Schwarz P								
23	1	23	1	1	2,6	40	Schwarz P								
24	5	24	1	1	2,6	40	Gyroide								

Con esto se puede dar paso a la siguiente fase que es la correspondiente a la inicialización de los análisis experimentales que se llevarán a cabo en el banco de pruebas diseñado y sobre el cuál se extraerán los datos para su posterior registro y análisis.

## 5.2. Análisis experimental

Para dar inicio a la etapa de los análisis experimentales se requiere determinar la cantidad de energía que se aplicará con la ayuda de la celda Peltier pero una vez realizado el montaje de los equipos, por lo que inicialmente se procede a medir la temperatura a la que alcanza la pared superior interna del tubo de aluminio que se encuentra en la cara de la celda Peltier que calienta, el proceso de medición se lo realiza con los sensores de temperatura y la programación de Arduino mediante la cual es posible enviar señales digitales PWM que están dentro del rango 0 – 255 con el fin de sacar una curva en la cual se pueda determinar que temperatura se está

suministrando a la estructura celular a un determinado voltaje, mismo que corresponde a una salida PWM. La tabulación de datos de la temperatura registrada, así como la generación de la curva mencionada para la celda Peltier se presentan en el Anexo 3.

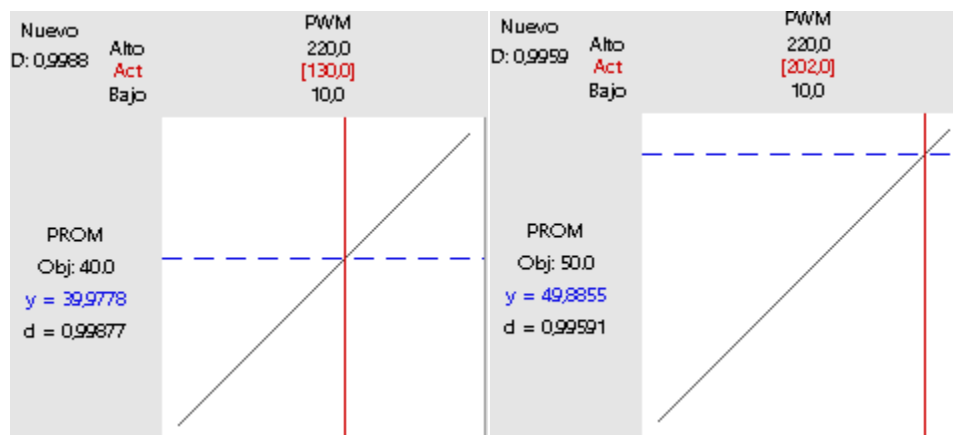
Una vez registradas las mediciones presentadas, se procede a analizar las mediciones con la ayuda del Software Minitab con el fin de obtener una ecuación que represente la curva de la temperatura generada por la celda Peltier con distintos voltajes suministrados obteniéndose la siguiente ecuación de regresión 5.

$$\text{Temperatura} = 22,0890 + 0,137606 * \text{PWM} \quad (5)$$

Con la ecuación 5 se procede a despejar que valor de PWM es necesario ingresar en la programación de Arduino para obtener las temperaturas de trabajo mencionadas anteriormente obteniéndose los siguientes resultados presentados en la Figura 121.

**Figura 120**

*Valor de PWM en función de la Temperatura*



A continuación, se procede a realizar las experimentaciones con sus respectivas combinaciones como se mencionó anteriormente obteniéndose los resultados presentados en la Figura 122 en lo que concierne tanto a la variación de la temperatura del fluido de trabajo, así como a la variación de presión generada. Es necesario recalcar que para la realización de los experimentos se espero un tiempo de 15 minutos para

comenzar la toma de datos, esto debido a que se observó que posterior a este lapso de tiempo las mediciones se estabilizaban para realizar la toma de datos durante 5 minutos en donde las mediciones fueron tabuladas cada segundo. Por lo que para proceder a presentar los resultados se sacó un promedio de las mediciones para cada sensor como se muestra en el Anexo 4.

## Figura 121

### Tabulación de Resultados de Experimentos

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7-T	C8	C9	C10	C11	C12
	OrdenEst	OrdenCarrida	PtCentral	Bloques	Velocidad Interna [m/s]	Temperatura Peltier [°C]	Estructura	Sensor 1 [°C]	Sensor 2 [°C]	Delta T [°C]	Delta P [cmH2O]	Delta P [Pa]
1	21	1	1	1	2,6	40	Gyroide	22,50	29,93	7,43	1,23	120,87
2	10	2	1	1	6,0	40	Schwarz P	23,48	24,93	1,44	1,97	193,29
3	22	3	1	1	6,0	40	Gyroide	23,15	27,37	4,22	1,98	193,80
4	8	4	1	1	6,0	50	Gyroide	23,50	29,28	5,78	1,97	192,94
5	15	5	1	1	2,6	50	Gyroide	23,38	33,13	9,75	1,21	118,56
6	18	6	1	1	6,0	40	Schwarz P	23,43	25,69	2,26	1,98	194,54
7	7	7	1	1	2,6	50	Gyroide	23,27	32,67	9,40	1,19	117,01
8	14	8	1	1	6,0	40	Gyroide	23,05	27,33	4,29	1,97	193,01
9	13	9	1	1	2,6	40	Gyroide	22,74	29,59	6,85	1,19	116,31
10	11	10	1	1	2,6	50	Schwarz P	22,93	26,56	3,63	1,20	117,71
11	24	11	1	1	6,0	50	Gyroide	23,00	28,96	5,96	1,93	189,71
12	3	12	1	1	2,6	50	Schwarz P	23,00	27,08	4,08	1,17	115,02
13	4	13	1	1	6,0	50	Schwarz P	23,01	25,98	2,97	1,98	193,89
14	2	14	1	1	6,0	40	Schwarz P	22,83	25,09	2,25	1,98	194,20
15	16	15	1	1	6,0	50	Gyroide	22,78	28,59	5,81	1,94	190,20
16	20	16	1	1	6,0	50	Schwarz P	23,10	26,17	3,07	1,95	191,11
17	6	17	1	1	6,0	40	Gyroide	22,83	27,16	4,33	1,97	192,86
18	9	18	1	1	2,6	40	Schwarz P	22,35	25,83	3,48	1,19	116,63
19	17	19	1	1	2,6	40	Schwarz P	22,11	25,56	3,46	1,19	116,63
20	23	20	1	1	2,6	50	Gyroide	22,83	32,30	9,48	1,18	115,99
21	19	21	1	1	2,6	50	Schwarz P	22,92	28,36	5,44	1,19	116,74
22	12	22	1	1	6,0	50	Schwarz P	23,17	26,68	3,50	1,96	191,81
23	1	23	1	1	2,6	40	Schwarz P	22,40	26,14	3,75	1,18	115,51
24	5	24	1	1	2,6	40	Gyroide	22,32	29,43	7,11	1,17	115,18

Posteriormente se van a analizar los resultados en el mismo software Minitab debido a que se realizará un análisis de todos los resultados obtenidos para cada combinación en lo que corresponde a la variación de la temperatura y el software ayudará a determinar la combinación de experimento que más relevancia presenta para el estudio realizado, se procederá de igual manera para la variable de la variación de presión.

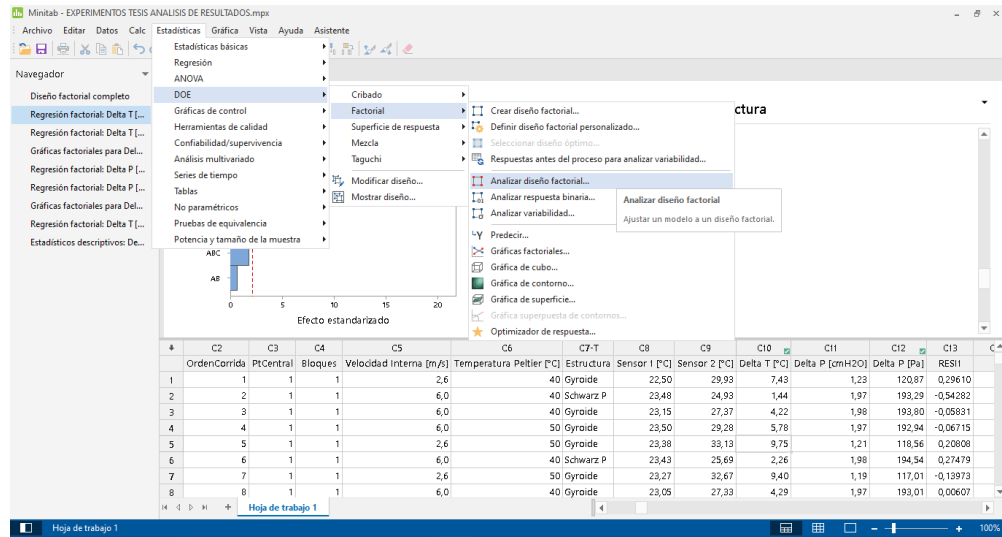
### 5.2.1. Análisis variación de temperatura

El análisis correspondiente a la variación de temperatura para los experimentos realizados se lo realiza con la ayuda del software Minitab. Usando los resultados presentados en la Figura 122 se procede a realizar un Análisis de Diseño Factorial en

donde la variable de estudio será la Columna C10 correspondiente al Delta T, este proceso se ilustra en la Figura 123.

**Figura 122**

*Análisis de Diseño Factorial para Delta T*



A continuación, se procede a seleccionar la respuesta del análisis que se desea obtener, para este caso será Delta T como se ilustra en la Figura 124. Adicionalmente se tiene que el análisis se está realizando con un nivel de confianza para todos los intervalos del 95 %, lo que nos indica que en un nuevo experimento que se realice el 95% de los resultados o los datos tabulados se encontrarán dentro de los resultados ya tabulados de tal manera que se tiene una predicción para futuros ensayos.

**Figura 123**

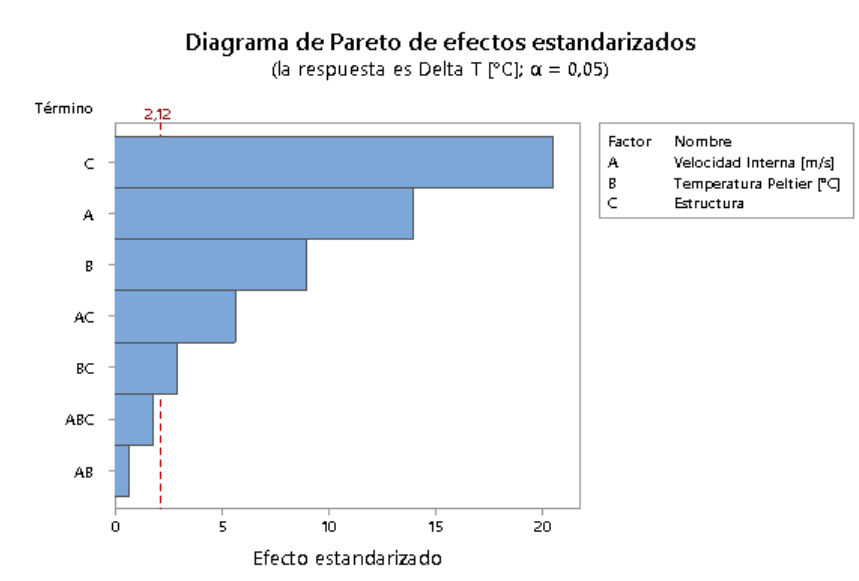
*Respuesta Diseño Factorial para Delta T*



Una vez realizado el análisis, el software presenta inicialmente como resultado un diagrama de Pareto de efectos estandarizados como se ilustra en la Figura 125. Este diagrama representa el efecto significativo de los factores establecidos a la hora de realizar los experimentos con sus respectivos niveles. Por lo tanto, este diagrama tiene como función el determinar que factores son los determinantes e influyentes sobre la variable de salida que en este caso es la variación de la temperatura. Estas gráficas se presentan en el Anexo 5.

### Figura 124

*Diagrama de Pareto para Delta T considerando todos los factores*



Analizando la Figura 126 se observa la línea roja que indica un umbral de separación entre los factores que si son influyentes sobre la variable de estudio y los factores que no lo son. Se tiene por tanto que los factores a la izquierda del umbral no tienen un efecto significativo para la variable de salida, mientras que los factores a la derecha del umbral si tienen una significancia considerable sobre la variable Delta T.

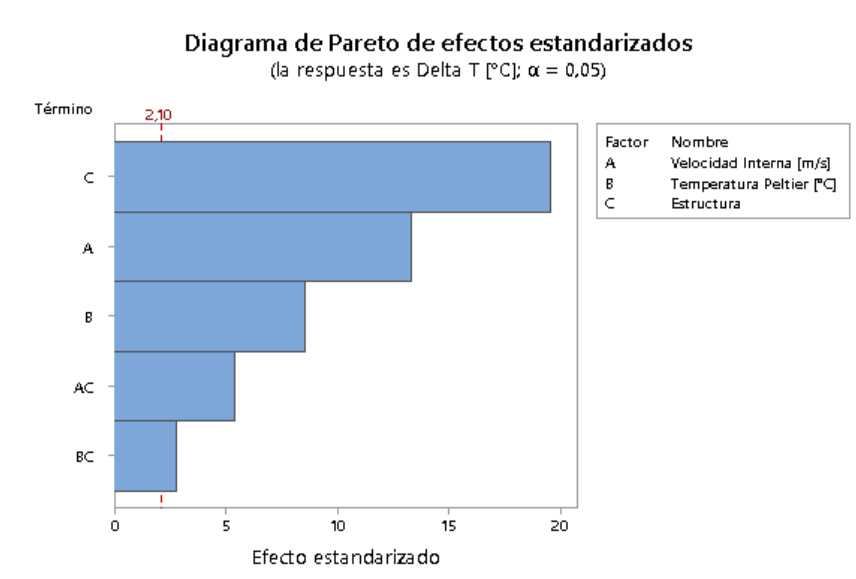
Se observa que el factor que mayor influencia tiene sobre la variable de salida en la Figura 126 es el factor correspondiente la Estructura, lo que significa que el intercambiar entre la estructura Gyroide y la estructura Schwarz P representa un cambio

mayormente significativo en lo correspondiente a la transferencia de energía entre el fluido y la estructura utilizada. A continuación, se tienen que el siguiente factor con una significancia considerable corresponde a la Velocidad de la Cámara Interna, es decir, la velocidad del aire forzado tiene una influencia considerable sobre la cantidad de energía transferida por convección. Finalmente se tiene que el factor correspondiente a la Temperatura Peltier también tiene una determinada influencia sobre la variación de temperatura a la entrada y a la salida del fluido de trabajo.

Es necesario tomar en cuenta en la Figura 126 que existen 2 factores que se encuentran a la izquierda del umbral en el diagrama de Pareto, por lo tanto se tiene que los factores ABC y AB, que representa nada más y nada menos que combinaciones entre los factores de estudio, no tienen un efecto significativo sobre la variable de estudio correspondiente en este caso a la variación de la temperatura por lo que se procede a excluir del análisis a estos factores como se muestra en la Figura 126 con el fin de realizar un análisis de los resultados más exacto. Las gráficas se encuentran en el Anexo 6.

### Figura 125

*Diagrama de Pareto para Delta T considerando factores con efecto significativo*



De manera paralela al análisis visual realizado anteriormente se presenta el cuadro de la Figura 127, en donde es de interés la última columna correspondiente al valor P que representa un dato estadístico conocido como valor p – value en donde el análisis a realizar corresponde que todos los factores con un valor P superior al valor  $\alpha$  de 0,05 no cuentan con un efecto significativo para la variable de salida y por lo tanto deben ser excluidos del análisis para obtener un análisis de resultados de calidad. En este caso se observa que los factores Velocidad Interna \* Temperatura Peltier y Velocidad Interna \* Temperatura Peltier \* Estructura cuentan con valores P de 0.495 y 0.088 respectivamente, mismos que son superiores al valor  $\alpha$  por lo que se dice que ambos factores no tienen un efecto significativo sobre la variación de temperatura. Mientras que los demás factores con un valor P inferior al valor  $\alpha$  si cuentan un efecto significativo para la variable de salida del análisis realizado.

### Figura 126

#### *Análisis de Varianza para Delta T*

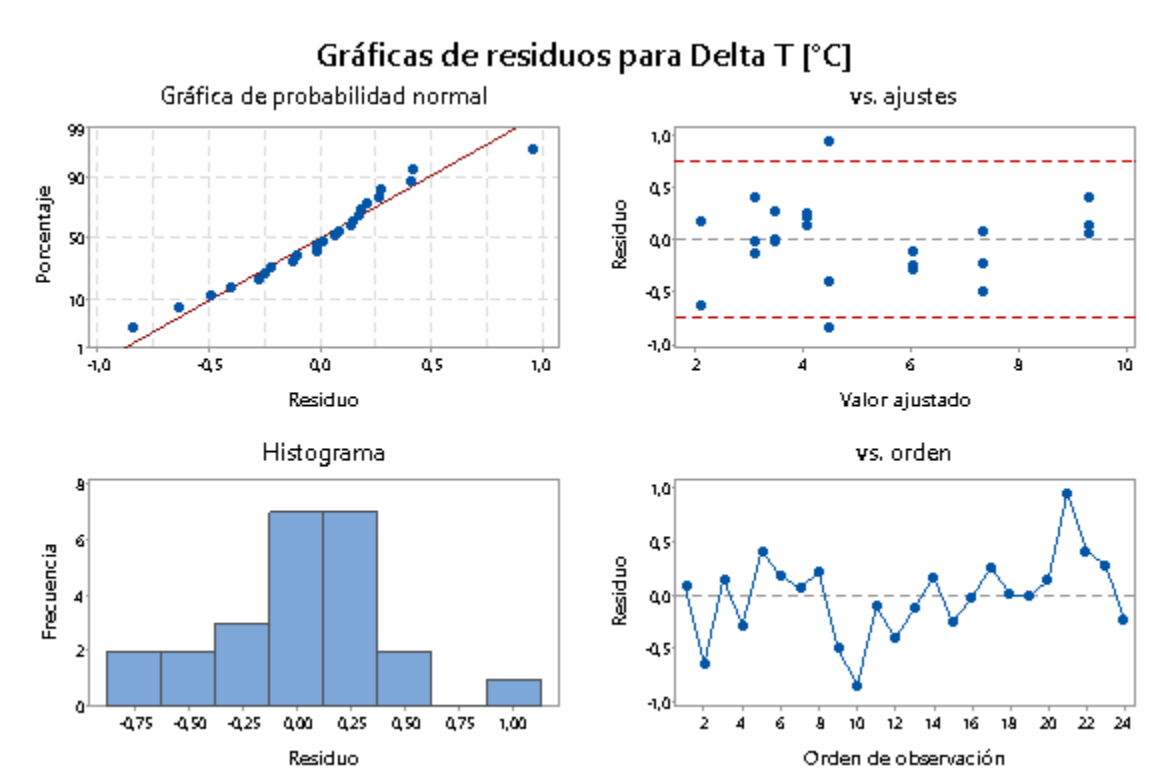
#### Análisis de Varianza

Fuente	Valor F	Valor p
Modelo	105,59	0,000
Lineal	231,63	0,000
Velocidad Interna [m/s]	194,52	0,000
Temperatura Peltier [°C]	80,54	0,000
Estructura	419,83	0,000
Interacciones de 2 términos	13,65	0,000
Velocidad Interna [m/s]*Temperatura Peltier [°C]	0,49	0,495
Velocidad Interna [m/s]*Estructura	31,77	0,000
Temperatura Peltier [°C]*Estructura	8,68	0,009
Interacciones de 3 términos	3,29	0,088
Velocidad Interna [m/s]*Temperatura Peltier [°C]*Estructura	3,29	0,088
Error		
Total		

Una vez realizado de nuevo el análisis de diseño factorial tomando en cuenta únicamente los factores que si tienen un efecto significativo para la variable de salida, se procede a analizar los gráficos que el software Minitab nos presenta como resultado del análisis en una segunda instancia como los que se muestran en la Figura 128.

**Figura 127**

*Gráficas de Residuos para Delta T*



Analizando la Figura 128, en primera instancia se tiene la gráfica de probabilidad normal, que representa e indica la normalidad de los resultados tabulados correspondiente a los experimentos realizados. Se puede observar que los puntos que representan residuos de los resultados tabulados se encuentran cercanos a la línea roja, por lo que se deduce que los residuos tienden a seguir una distribución normal. Los residuos representan una desviación de la variación de Temperatura medida para cada réplica de un experimento con respecto al promedio de todas las réplicas para la misma combinación de experimento.

Posteriormente se tiene el gráfico correspondiente a los ajustes, en este gráfico al tener una serie de datos lo que se busca es que la mayoría de los puntos se encuentren dentro de una banda, buscando de manera primordial que no se formen embudos con los puntos graficados en donde la mayoría de los datos estarán fuera de



la banda. Observando la gráfica presentada se observa que la mayoría de los datos efectivamente se encuentra dentro de la banda delimitada con líneas rojas horizontales sin la formación de ningún patrón lo que representa una igualdad de varianzas.

A continuación, se tiene el siguiente gráfico correspondiente a un Histograma, en donde se busca que los resultados formen una campana en donde lo más importante es observar una distribución central tal como se observa.

Finalmente, en la gráfica de Orden se busca que los puntos no sigan ningún tipo de patrón ni tendencias. Como se observa los puntos presentados no siguen ningún tipo de tendencia, curva o patrón, lo que principalmente corrobora la aleatoriedad de los experimentos realizados dando un considerable grado de calidad al estudio realizado.

Analizando todas las gráficas de residuos de manera conjunta, se analiza la calidad de los resultados tabulados para el estudio realizado, en donde un experimento de calidad consta inicialmente de una distribución normal ya que al estar realizado las réplicas de manera aleatorio y a pesar de ello presentar normalidad en los residuos, se dice que el experimento es confiable. A continuación, consta de cierta aleatorización en el gráfico de ajustes en donde se busca que los datos se encuentren dentro de una banda de manera aleatorio sin la presencia de patrones. Posteriormente se analiza un Histograma en donde se busca de manera imperativa la formación de una distribución central que no tienda a acumularse en los extremos, sino que se simule una campana de Gauss con distribución central. Finalmente debe constar una total aleatoriedad en el gráfico de orden en donde es fundamental que no se forme ningún tipo de patrón o tendencia ascendentes o descendentes.

Adicionalmente en el análisis de resultado como resumen del modelo se presenta la Figura 129 en donde es de interés observar el valor de R cuadrado que corresponde a un factor de ajuste similar a un modelo de regresión con un valor de

97.38% lo que es bueno ya que al presentar un valor cercano a 100% indica que el ajuste es bastante apegado a los valores reales para un ajuste realizado.

**Figura 128**

*Resumen de Modelo para Análisis Delta T*

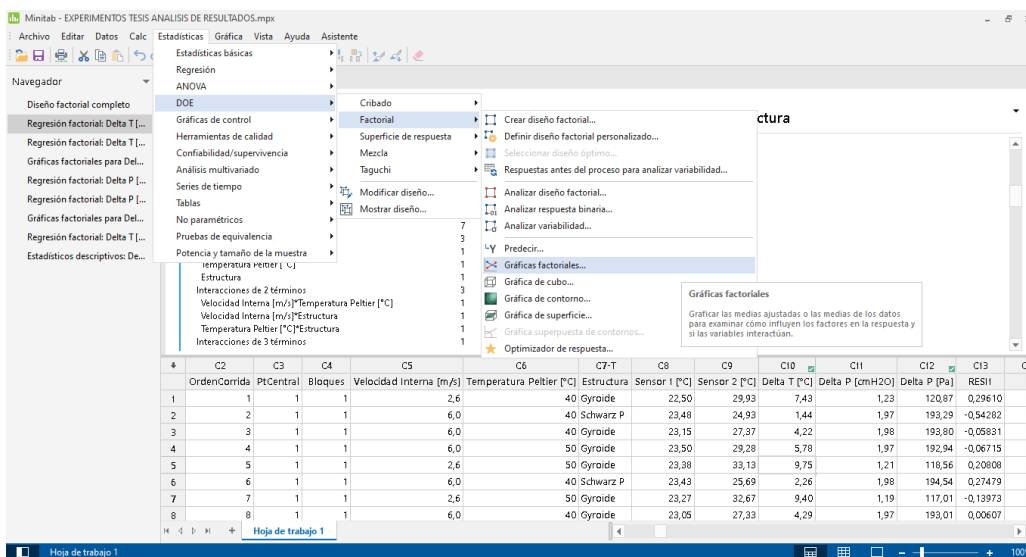
Resumen del modelo			
	R-cuad.	R-cuad.	
	S	R-cuad. (ajustado)	(pred)
	0,429111	97,38%	96,65% 95,34%

**5.2.2. Selección experimento más representativo para Delta T**

Una vez finalizado el análisis de diseño factorial se procede a realizar una gráfica factorial para la variable de estudio que corresponde a la variación de temperatura como se muestra en la Figura 130. Dicha gráfica servirá para analizar cada uno de los niveles de cada factor tomado en cuenta para el experimento con el fin de determinar los puntos máximos y mínimos de cada uno para así determinar la combinación de niveles que mayor transferencia de energía presentó dentro de los experimentos realizados.

**Figura 129**

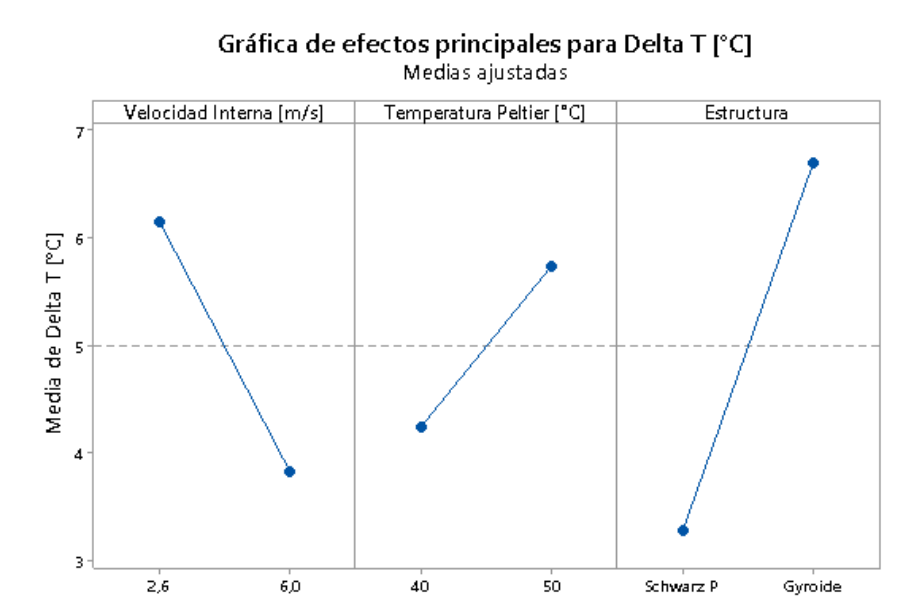
*Gráfica Factorial para Delta T*



A continuación, se presentan 2 gráficas en donde la primera representa el análisis cuando las combinaciones no han tenido un efecto significativo para la variación de temperatura como se muestra en la Figura 131 con los archivos de respaldo del Anexo 7.

### Figura 130

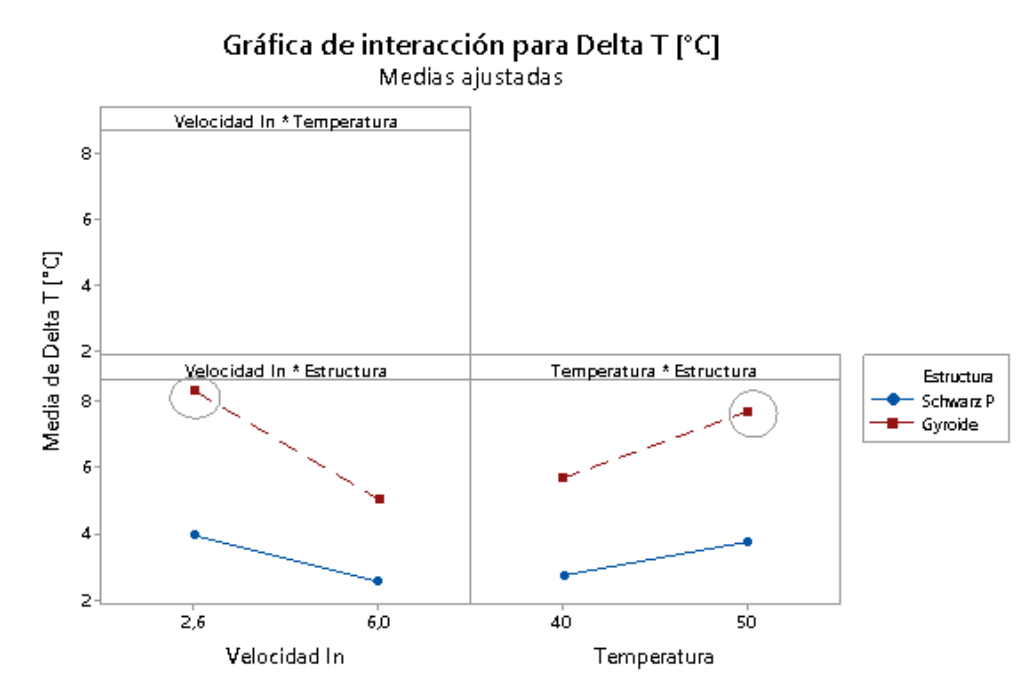
*Gráfica de Efectos Principales para Delta T*



La segunda gráfica que se genera en el software Minitab corresponde al análisis de las interacciones entre los factores o las combinaciones de los experimentos realizados como se muestra en la Figura 132. Esta gráfica será de interés para el presente estudio debido a que en el análisis de los factores que cuentan con efecto significativo si existen combinaciones que cuenta con un efecto de significancia por lo que no se analizará la gráfica anterior.

**Figura 131**

*Combinación de Experimentos Representativa para Delta T*



Analizando la Figura 132 se puede observar que se tienen las combinaciones de factores que se consideraron ya que cuentan con un efecto significativo como lo son la Velocidad Interna \* Estructura y la Temperatura \* Estructura. Estas combinaciones se analizarán con el objetivo de la tesis como lo es la maximización de la transferencia de calor. Por lo tanto, inicialmente la Estructura que mejor transferencia presenta se puede observar que es Gyroide, ya que cuenta con una significancia mayor para ambas combinaciones puesto que su línea roja se encuentra por encima de la línea azul para Schwarz P. A continuación se procede a ubicar los puntos más altos para la línea roja mediante los círculos negros que se observan en los extremos superiores de ambas líneas, esto con el objetivo de buscar la máxima transferencia de energía. Finalmente, en el gráfico de la parte inferior izquierda se observa que el punto más alto se encuentra en la Velocidad Interna con un valor de 2,6 m/s y en el gráfico de la parte inferior derecha se observa que el punto más alto se encuentra en la Temperatura de 50 °C.

Por lo tanto, se concluye que el experimento más representativo que presenta la máxima transferencia de energía para el estudio realizado corresponde a la estructura Gyroide, con una velocidad de cámara interna de 2,6 m/s sometida a una carga térmica en una de sus caras de 50 °C.

### **5.2.3. Simulación computacional experimento representativo para Delta T**

Para la ejecución de la simulación computacional del experimento representativo para la variación de temperatura inicialmente es necesario realizar un cálculo de independencia de malla, para lo cual se presenta en la Tabla 54 los diferentes tipos de malla empleados con el fin de determinar el adecuado que será la que no representa una variación superior a  $10^{-6}$  con respecto a su medición anterior.

**Tabla 54**

*Cálculo Independencia de Malla*

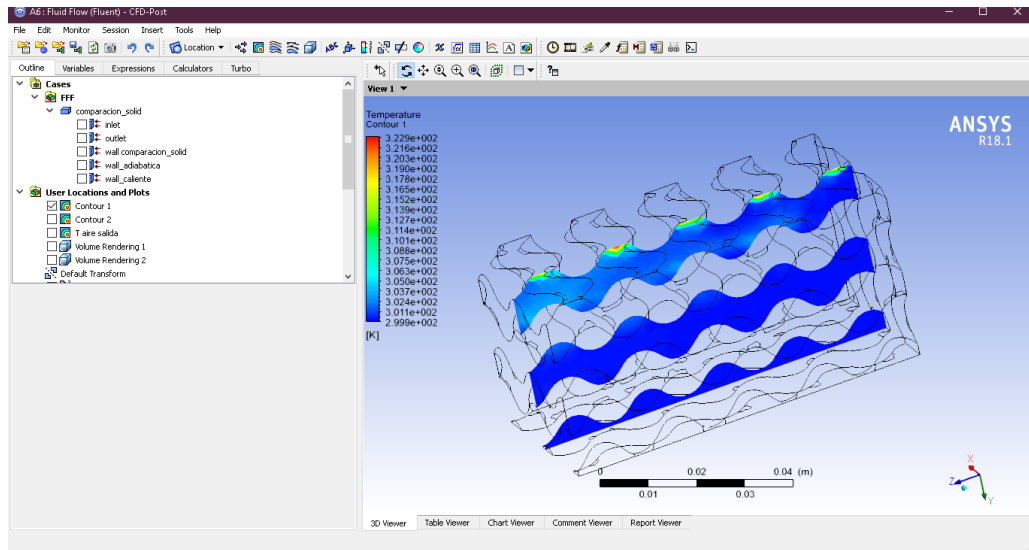
<b>Mallado</b>	<b>Nodos</b>	<b>Elementos</b>	<b>Resultado (°C)</b>	<b>Variación</b>
Grueso	29539	87123	31,71	
Mediano	35132	121662	31,719	$2,8382 \times 10^{-4}$
Fino	52729	223599	31.72	$3.1526 \times 10^{-5}$

Es necesario mencionar que todas las mediciones de temperatura se realizaron en las mismas coordenadas para todos los tamaños de malla ensayados, observándose en la Tabla 54 que la medición más exacta posible a obtener consta de 3 decimales y la menor variación posible a obtener corresponde a 1 milésima por lo que se concluye que no es posible generar una variación menor a la presentada entre el mallado mediano y el fino determinándose de esta manera que el mallado Mediano será el utilizado para los ensayos presentados a continuación.

Se presenta a continuación en la Figura 133 los resultados obtenidos para la simulación computacional realizada con los parámetros seleccionados para la representación que mejor transferencia de calor presenta.

**Figura 132**

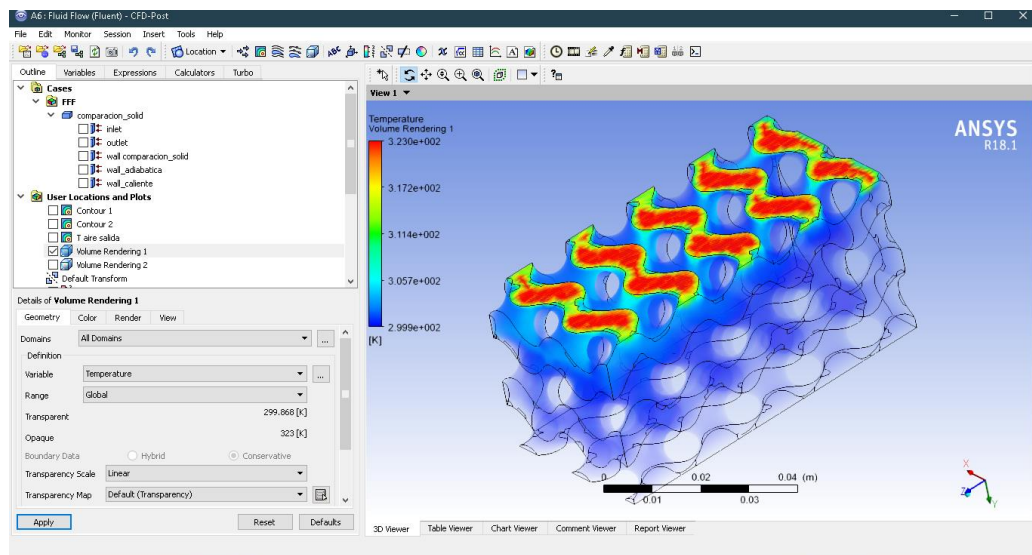
*Contorno de Temperatura para Experimento Representativo para Delta T*



Adicionalmente se obtendrá la representación de volumen del fluido simulado de manera conjunta con una visualización de colores en base a una escala de colores como se observa en la Figura 134.

**Figura 133**

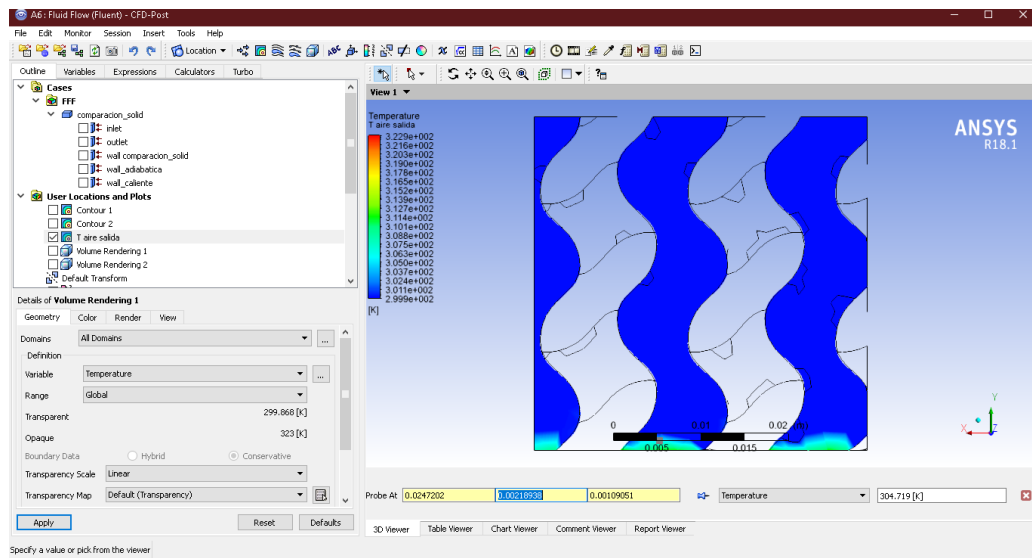
*Representación de Volumen del Fluido para Experimento Representativo para Delta T*



Adicionalmente, se realizará un plano en la sección transversal de la probeta al final de la misma en donde se representa la salida del fluido para realizar la toma de temperatura en la altura media de la probeta para determinar la temperatura del fluido a la salida con un valor de  $31,71\text{ }^{\circ}\text{C}$  como se muestra en la Figura 135.

**Figura 134**

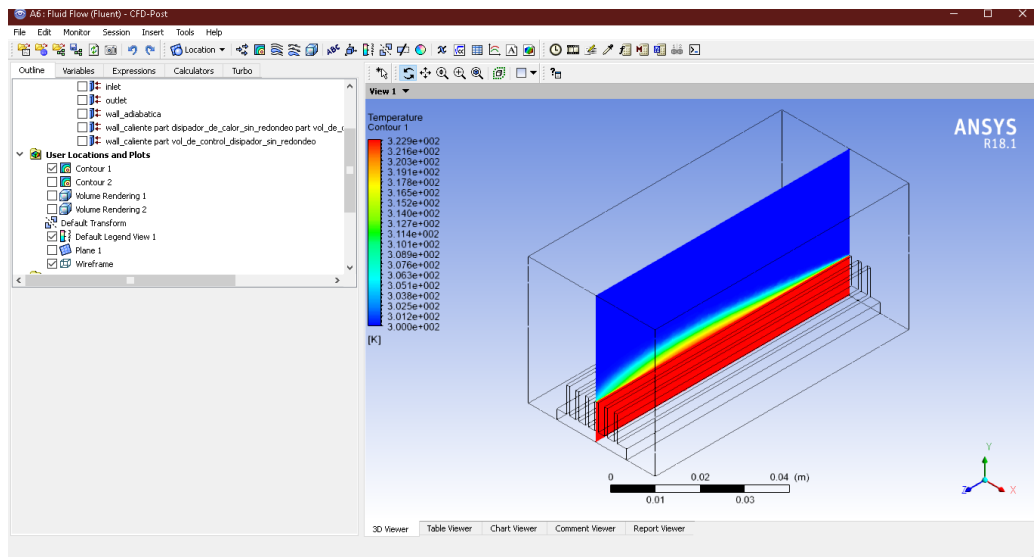
*Temperatura de Salida del Aire para Experimento Representativo para Delta T*



A continuación, para comprobar la hipótesis del presente estudio que corresponde al reemplazo de disipadores de calor para aplicación electrónica con las estructuras celulares, se procederá a realizar la simulación computacional para un disipador de calor sometido a los mismos parámetros de diseño correspondientes al experimento más representativo con el fin de obtener una comparación. Por lo que a continuación se presenta en la figura 136 el contorno de temperatura para el disipador de calor.

**Figura 135**

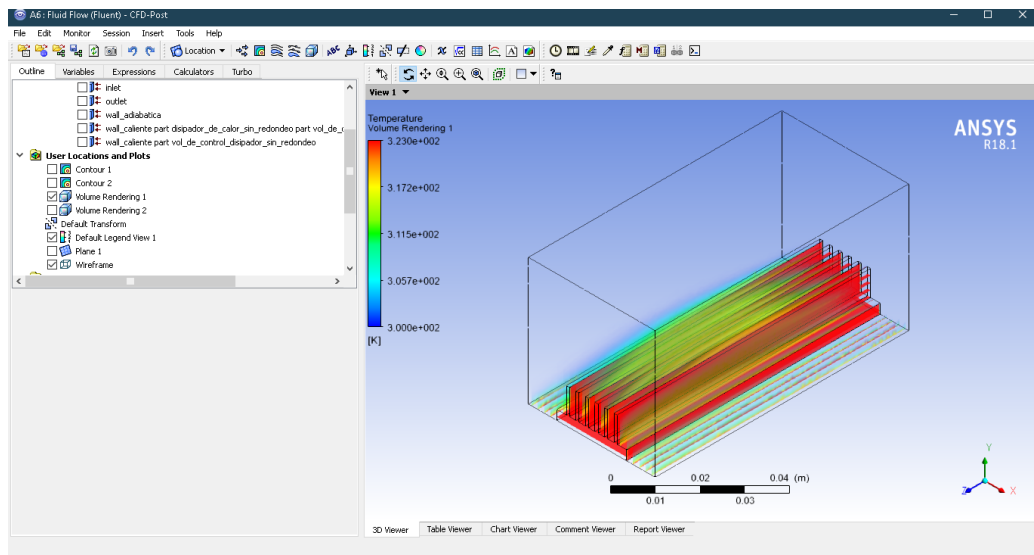
*Contorno de Temperatura para Disipador de Calor*



Adicionalmente se obtendrá la representación de volumen del fluido simulado de manera conjunta con una visualización de colores en base a una escala de colores como se observa en la Figura 137.

**Figura 136**

*Representación de Volumen del Fluido para Disipador de Calor*

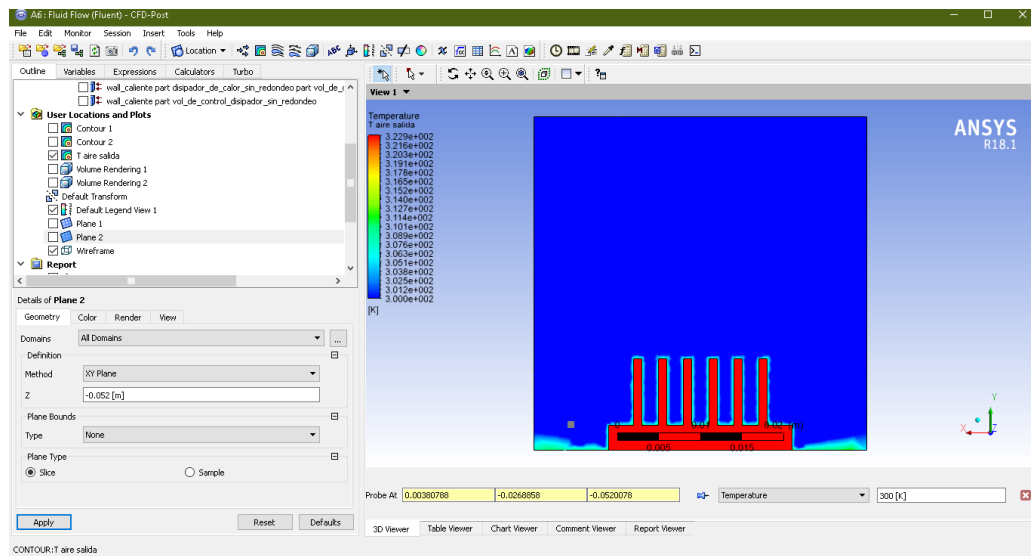




Adicionalmente, se realizará un plano en la sección transversal de la probeta al final de la misma en donde se representa la salida del fluido para realizar la toma de temperatura en la altura media de la probeta para determinar la temperatura del fluido a la salida con un valor de 27 °C como se muestra en la Figura 138.

**Figura 137**

*Temperatura de Salida del Aire para Disipador de Calor*

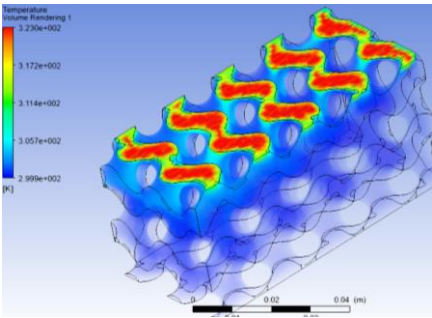
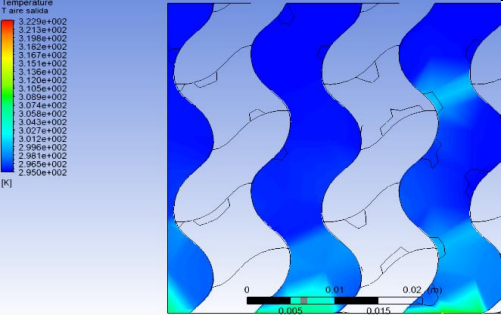
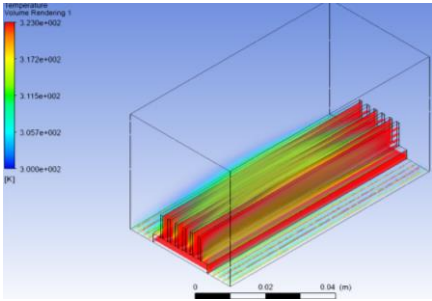
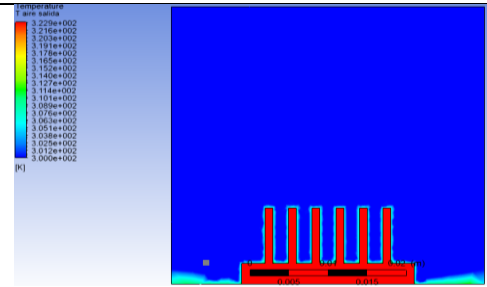


#### **5.2.4. Comparación resultados para variación de temperatura**

A continuación, se presenta en la Tabla 55 un resumen de los análisis realizados simulando el experimento más representativo para el estudio en lo que corresponde al análisis de la variación de la temperatura.

Tabla 55

Resultados Simulación Experimentos para Delta T

Tamaño	Volumen Renderizado	Temperatura de aire a la Salida [°C]
<b>Giroide</b>		
4,5x0,3		 31.719
<b>Disipador de Calor</b>		
		 27

En una primera instancia se volvió a realizar los análisis computacionales realizados en el capítulo 3 pero esta vez aplicando las condiciones de frontera del ensayo más representativo hallado mediante el diseño factorial.

Se puede observar en la Tabla 54 que la representación computacional del ensayo experimental más representativo presentó una temperatura del aire a la salida de la estructura porosa de 31,71 °C, con una temperatura ambiente de 22 °C por lo que se tiene una variación de temperatura obtenida con la ecuación 6.

$$\Delta T = |T_{out} - T_{in}| \quad (6)$$

Consecuentemente se procede a calcular la variación de la temperatura presentada para la simulación computacional

$$\Delta T = |T_{out} - T_{in}|$$

$$\Delta T = |31,719 \text{ }^\circ\text{C} - 22 \text{ }^\circ\text{C}|$$

$$\Delta T = 9,719 \text{ }^\circ\text{C}$$

Para realizar una comparación entre el ensayo experimental y el computacional es necesario determinar la temperatura promedio de las réplicas realizadas para el experimento más representativo como se presenta en la Tabla 56.

**Tabla 56**

*Temperatura promedio experimento representativo*

<b>Réplica</b>	<b><math>\Delta T</math> [°C]</b>
1	9,75
2	9,40
3	9,48
Prom	9,54

Una vez determinada la temperatura promedio del ensayo experimental más representativo se procede a calcular el error presentado en la medición de la temperatura con la ecuación 7.

$$Error = \frac{|valor\ teórico - valor\ experimental|}{valor\ experimental} * 100\% \quad (7)$$

$$Error = \frac{|9,719 \text{ }^\circ\text{C} - 9,54 \text{ }^\circ\text{C}|}{9,54 \text{ }^\circ\text{C}} * 100\%$$

$$Error = 1,88 \%$$

Se observa que existe un error del 1,88 % entre la medición de temperatura en la simulación computacional y la medición experimental de los ensayos realizados, que si bien es un error bajo, se debe a diversos factores como lo son la variación de la temperatura ambiente a la hora de la realización de los ensayos, de igual manera se tiene un cierto factor de discrepancia entre las mediciones repetidas de los sensores puesto a que se trata de equipos electrónicos que pueden sufrir cierta variación de

lectura por interferencia, fallo en la computadora que da alimentación que genere corte de suministro de energía, entre otros.

A continuación, se procede a realizar una comparación con la simulación computacional presentada para el disipador de calor, en donde es necesario recalcar que se ha simulado el disipador de calor en dimensiones estándar o comerciales, con el fin de obtener medidas apegadas a la realidad debido a que no existen disipadores de calor con las medidas de la estructura porosa ensayada. Este disipador de calor se lo a simulado dentro de un volumen de control con las medidas de la estructura porosa, y este volumen de control representa el espacio en el que se encuentra el fluido de trabajo.

Se puede observar en la Tabla 54 que la representación computacional del disipador de calor bajo las mismas condiciones de frontera que el ensayo experimental más representativo presentó una temperatura del aire a la salida de la estructura porosa de 27 °C, con una temperatura ambiente de 22 °C por lo que se tiene una variación de temperatura obtenida con la ecuación 6.

$$\Delta T = |T_{out} - T_{in}|$$

$$\Delta T = |27\text{ }^{\circ}\text{C} - 22\text{ }^{\circ}\text{C}|$$

$$\Delta T = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$$

La comparación entre la estructura porosa y el disipador de calor se reduce a una comparación entre la variación de temperatura obtenida para cada uno, como se puede observar para la estructura porosa se tuvo un delta de temperatura de 9,71 °C mientras que para el disipador de calor se tuvo un delta de temperatura de 5 °C que si bien es cierto es menor se debe a factores como lo son, la diferencia de tamaño, ya que la estructura porosa al ocupar todo el volumen de control obliga al fluido de trabajo a cambiar de dirección constantemente debido a su intrincada figura lo que favorece en gran manera a la transferencia de energía, mientras que el disipador de calor, al estar

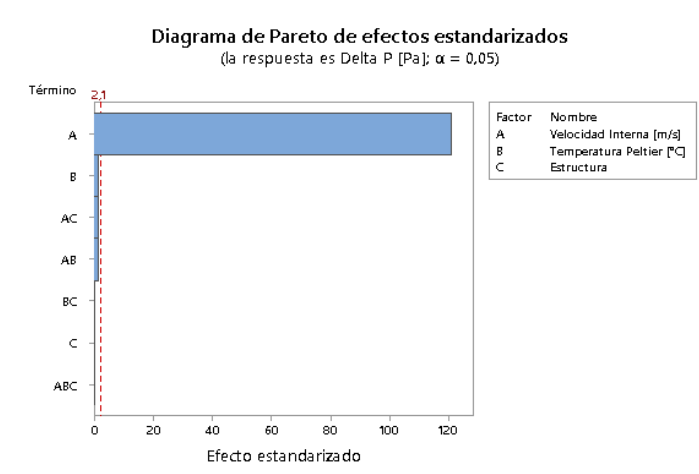
limitado a medidas comerciales se tiene un espacio vacío entre el volumen de control y el dissipador lo que hace que el aire en ese espacio hueco no esté en contacto con el dissipador por lo que no existe intercambio de calor adecuado y justamente aquí se tiene una limitación para los dissipadores de calor que no se tiene esa facilidad de diseño en una determinada medida requerida, mientras que la estructura porosa tiene una infinidad de diseño.

### 5.2.5. Análisis variación de presión

El procedimiento a seguir para realizar el análisis de diseño factorial para la variable de estudio que en este caso es la presión es un procedimiento similar al aplicado para el análisis de la variación de la temperatura. En donde una vez realizado el análisis, el software presenta inicialmente como resultado un diagrama de Pareto de efectos estandarizados como se ilustra en la Figura 139. Los archivos se presentan en el Anexo 8.

**Figura 138**

*Diagrama de Pareto para Delta P considerando todos los factores*



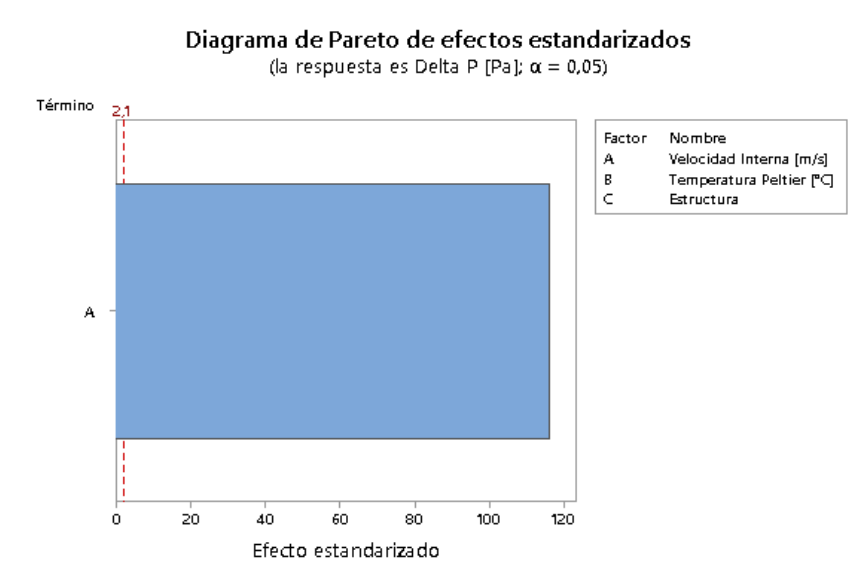
Analizando la Figura 139 se observa la línea roja que indica el umbral de separación entre los factores que si son influyentes sobre la variable de estudio y los factores que no lo son. Se observa que el único factor que presenta influencia sobre la variable de salida es el factor correspondiente a la Velocidad Interna, lo que significa

que el intercambiar el voltaje de alimentación para el ventilador que genera el aire forzado al interior del ducto es el único factor que genera un cambio mayormente significativo en lo correspondiente a la caída de presión que el fluido de trabajo sufre al atravesar la estructura porosa.

Es necesario tomar en cuenta en la Figura 139 que todos los factores de estudio aplicados en el análisis, a excepción de la Velocidad Interna, no tienen un efecto significativo sobre la variación de presión que el aire sufre al atravesar la estructura porosa por lo que se procede a excluir del análisis a estos factores como se muestra en la Figura 140 con el fin de realizar un análisis de los resultados más exacto, con los archivos que se muestra en el Anexo 9.

### Figura 139

*Diagrama de Pareto para Delta P considerando factores con efecto significativo*



De manera paralela al análisis visual realizado anteriormente se presenta el cuadro de la Figura 141, en donde el análisis a realizar corresponde que todos los factores con un valor P superior al valor  $\alpha$  de 0,05 no cuentan con un efecto significativo para la variable de estudio y por lo tanto deben ser excluidos del análisis para obtener un análisis de resultados de calidad. En este caso se observa que los factores

Temperatura Peltier, Estructura, Velocidad Interna \* Temperatura Peltier, Velocidad Interna \* Estructura, Temperatura Peltier \* Estructura y Velocidad Interna \* Temperatura Peltier \* Estructura cuentan con valores P superiores al valor  $\alpha$  por lo que se dice que estos factores no tienen un efecto significativo sobre la variación de presión.

### Figura 140

#### *Análisis de Varianza para Delta P*

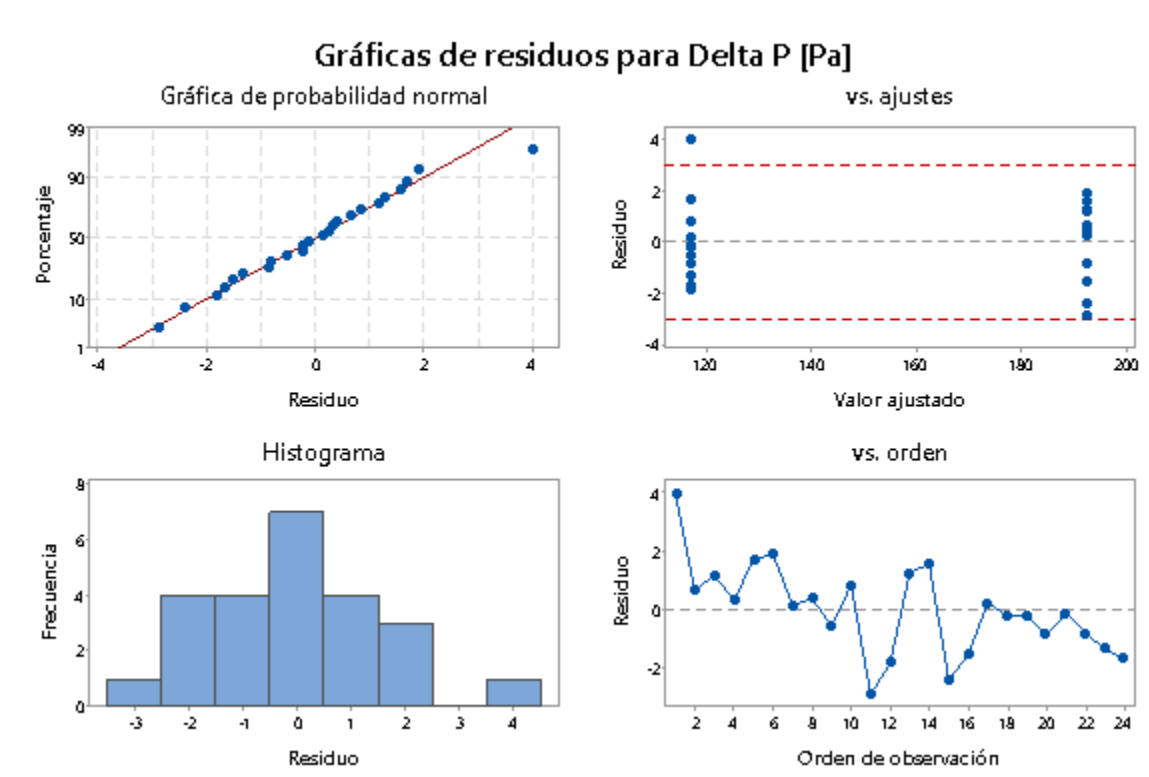
#### Análisis de Varianza

Fuente	Valor F	Valor p
Modelo	2091,35	0,000
Lineal	4878,06	0,000
Velocidad Interna [m/s]	14631,57	0,000
Temperatura Peltier [°C]	2,61	0,126
Estructura	0,01	0,934
Interacciones de 2 términos	1,75	0,198
Velocidad Interna [m/s]*Temperatura Peltier [°C]	2,52	0,132
Velocidad Interna [m/s]*Estructura	2,55	0,130
Temperatura Peltier [°C]*Estructura	0,17	0,685
Interacciones de 3 términos	0,00	0,989
Velocidad Interna [m/s]*Temperatura Peltier [°C]*Estructura	0,00	0,989
Error		
Total		

Una vez realizado de nuevo el análisis de diseño factorial tomando en cuenta únicamente los factores que si tienen un efecto significativo para la variable de salida, se procede a analizar los gráficos que el software Minitab nos presenta como resultado del análisis en una segunda instancia como los que se muestran en la Figura 142.

**Figura 141**

*Gráficas de Residuos para Delta P*



Analizando la Figura 142, en primera instancia se tiene la gráfica de probabilidad normal, en donde se observa que casi la totalidad de los puntos que representan residuos de los resultados tabulados se encuentran cercanos a la línea roja, por lo que se deduce que los residuos tienden a seguir una distribución normal. Los residuos representan una desviación de la variación de Presión medida para cada réplica de un experimento con respecto al promedio de todas las réplicas para la misma combinación de experimento.

Posteriormente se tiene el gráfico correspondiente a los ajustes, en donde se observa que la mayoría de los datos efectivamente se encuentra dentro de la banda delimitada con líneas rojas horizontales sin la formación de ningún patrón lo que representa una igualdad de varianzas. A continuación, se tiene el siguiente gráfico



correspondiente a un Histograma, en donde se busca una distribución central tal como se observa.

Finalmente, en la gráfica de Orden se busca que los puntos no sigan ningún tipo de patrón ni tendencias. Como se observa los puntos presentados no siguen ningún tipo de tendencia, curva o patrón, lo que principalmente corrobora la aleatoriedad de los experimentos realizados dando un considerable grado de calidad al estudio realizado.

Adicionalmente en el análisis de resultado como resumen del modelo se presenta la Figura 143 en donde es de interés observar el valor de R cuadrado que corresponde a un factor de ajuste similar a un modelo de regresión con un valor de 99.84% lo que es bueno ya que al presentar un valor cercano a 100% indica que el ajuste es bastante apegado a los valores reales para un ajuste realizado.

### Figura 142

*Resumen de Modelo para Análisis Delta P*

#### Resumen del modelo

	S	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
	1,59777	99,84%	99,83%

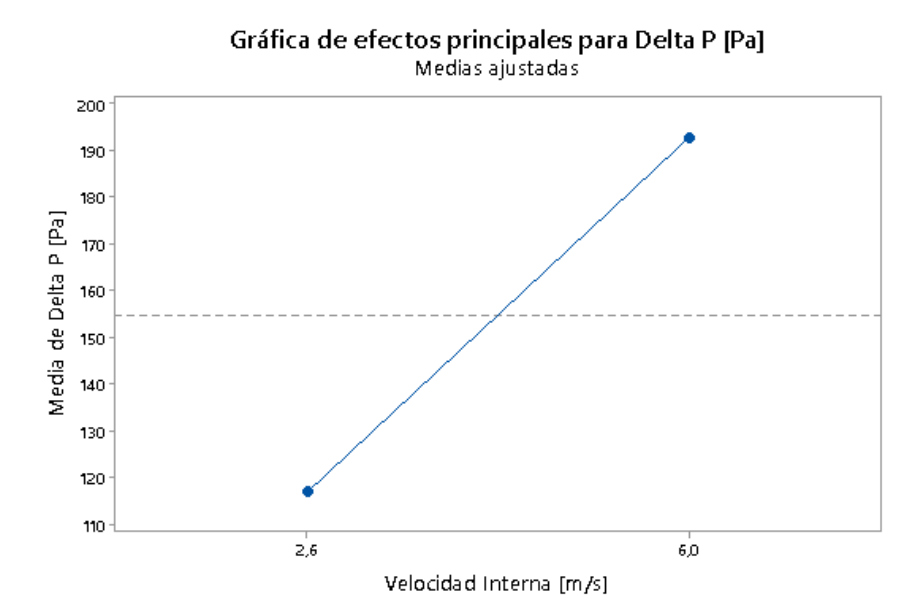
#### 5.2.6. Selección experimento más representativo para Delta P

Una vez finalizado el análisis de diseño factorial para la variación de la presión, se procede a realizar una gráfica factorial que servirá para analizar cada uno de los niveles de cada factor tomado en cuenta para el experimento con el fin de determinar los puntos máximos y mínimos de cada uno y así determinar la combinación de niveles que mayor caída de presión presentó dentro de los experimentos realizados. En la Figura 144 se presenta la única gráfica que genera el software Minitab en este caso debido a que no existen combinaciones o interacciones que analizar ya que se

eliminaron del análisis al no presentar un efecto significativo sobre la variable de estudio. Se muestran los archivos en el Anexo 10.

### Figura 143

*Gráfica de Efectos Principales para Delta P*



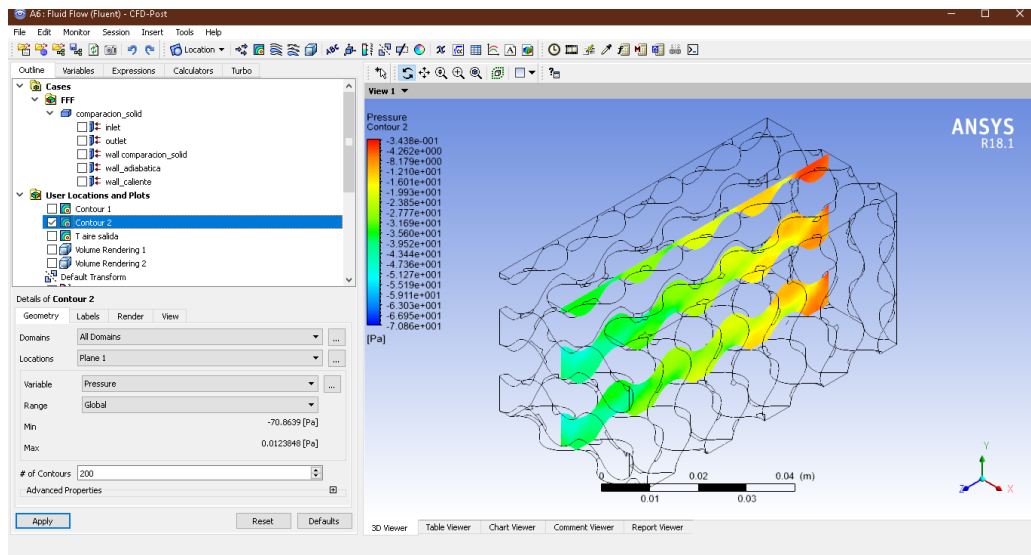
Analizando la Figura 144 se observa que el nivel correspondiente a este factor que maximiza la variación de presión que el aire sufre al atravesar la estructura celular corresponde a la alimentación de 12 V para el ventilador que genera el aire forzado traduciéndose esta alimentación en una velocidad resultante de 6 m/s.

#### **5.2.7. Simulación computacional experimento representativo para Delta P**

Se presenta a continuación en la Figura 145 los resultados obtenidos para la simulación computacional realizada bajo las condiciones del experimento más representativo para Delta T con la diferencia de que la velocidad interna corresponde a un valor de 6 m/s.

Figura 144

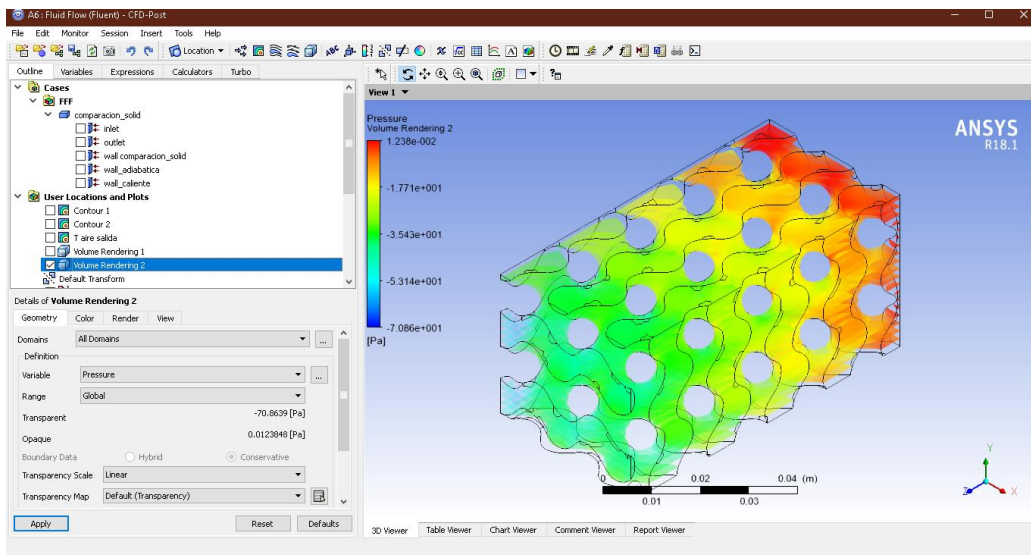
Contorno de Presión para Experimento Representativo para Delta P



Adicionalmente se obtendrá la representación de volumen del fluido simulado de manera conjunta con una visualización de colores en base a una escala de colores como se observa en la Figura 146.

Figura 145

Representación de Volumen del Fluido para Experimento Representativo para Delta P

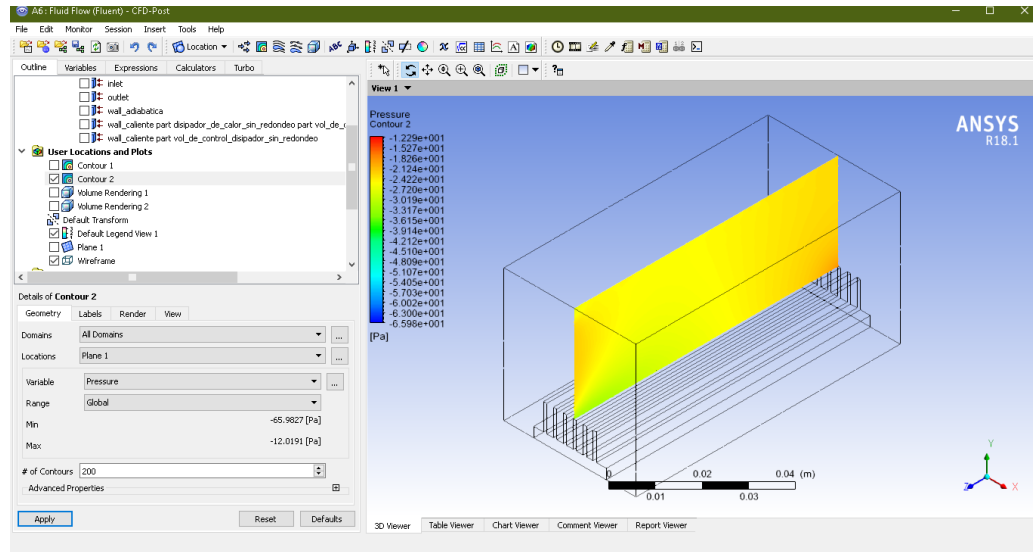


Adicionalmente, se realizará la toma de presión a la entrada y a la salida de la estructura celular para determinar la caída de presión que el aire forzado sufre al atravesar la estructura porosa, obteniéndose un valor a la entrada de 209.767 Pa y un valor de salida de 23.0414 Pa.

A continuación, para comprobar la hipótesis del presente estudio que corresponde al reemplazo de disipadores de calor para aplicación electrónica con las estructuras celulares, se procederá a realizar la simulación computacional para un disipador de calor sometido a los mismos parámetros de diseño correspondientes al experimento más representativo con el fin de obtener una comparación. Por lo que a continuación se presenta en la figura 147 el contorno de presión para el disipador de calor.

**Figura 146**

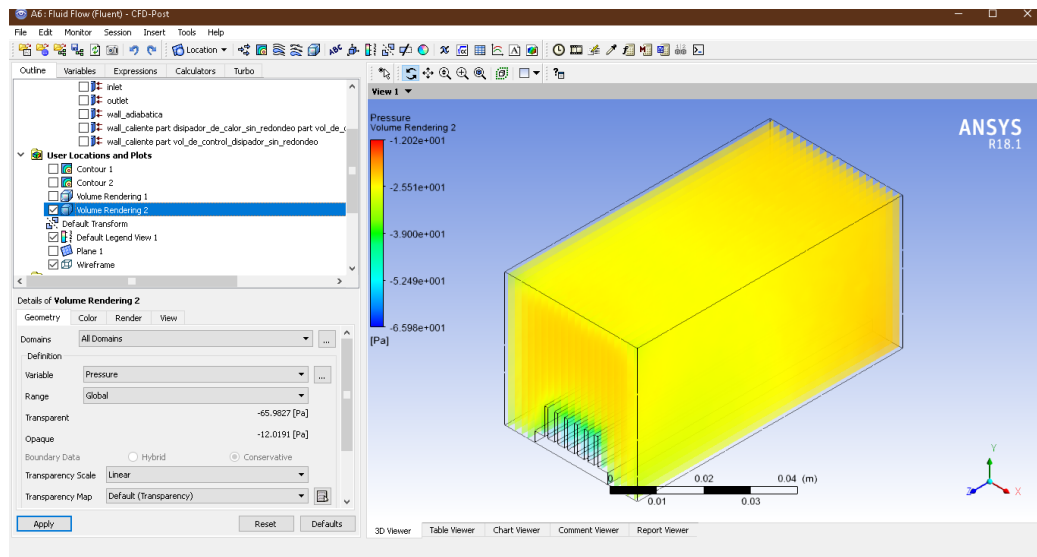
*Contorno de Presión para Disipador de Calor*



Adicionalmente se obtendrá la representación de volumen del fluido simulado de manera conjunta con una visualización de colores en base a una escala de colores como se observa en la Figura 146.

**Figura 147**

*Representación de Volumen del Fluido para Disipador de Calor*



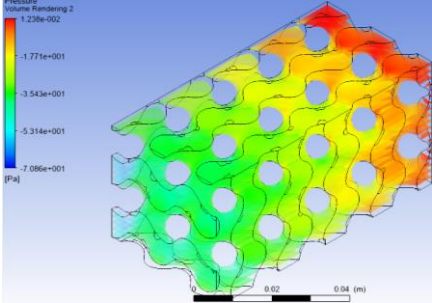
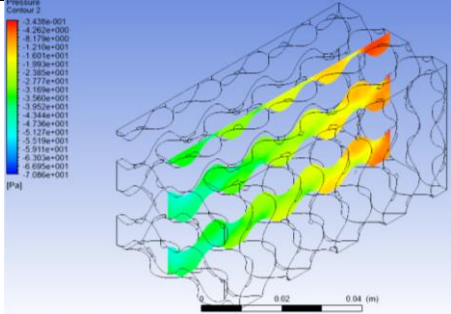
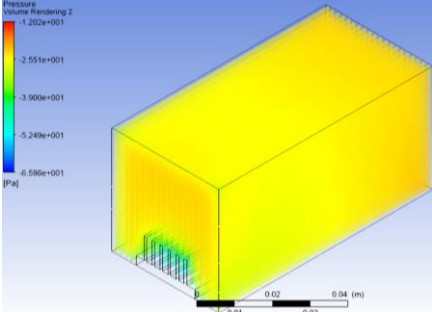
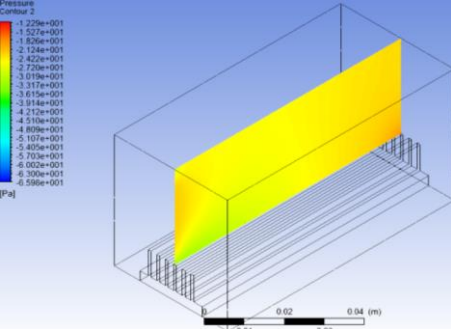
Adicionalmente, se realizará la toma de presión a la entrada y a la salida del disipador de calor para determinar la caída de presión que el aire forzado sufre al atravesar la estructura del disipador, obteniéndose un valor a la entrada de 31.6233 Pa y un valor de salida de 19.2685 Pa.

**5.2.8. Comparación de resultados para variación de presión**

A continuación, se presenta en la Tabla 57 un resumen de los análisis realizados simulando el experimento más representativo para el estudio en lo que corresponde al análisis de la variación de la presión.

Tabla 57

Resultados Simulación Experimentos para Delta P

Tamaño	Volumen Renderizado	Presión In / Presión Out [Pa]
<b>Giroide</b>		
4,5x0,3		
		209.767 / 23.0414
<b>Disipador de Calor</b>		
		
		31.6233 / 19.2685

En una primera instancia se volvió a realizar los análisis computacionales realizados en el capítulo 3 con la diferencia de que como para la presión no existe una combinación específica, se ha simulado el experimento más representativo para la temperatura, con sus condiciones de frontera respectiva pero con la diferencia de que como se observa para la variación de la presión el nivel de factor con mayor efecto significativo corresponde a la velocidad interna de 6 m/s.

Se puede observar en la Tabla 56 que la representación computacional del ensayo experimental más representativo presentó una presión a la entrada de la

estructura de 209.767 Pa y una presión a la salida de la estructura de 23.0414 Pa, por lo que se tiene una variación de presión obtenida con la ecuación 6.

$$\Delta P = |P_{out} - P_{in}|$$

$$\Delta P = |23.0414 Pa - 209.767 Pa|$$

$$\Delta P = 186.7256 Pa$$

Para realizar una comparación entre el ensayo experimental y el computacional es necesario determinar la caída de presión promedio de las réplicas realizadas para el experimento simulado como se presenta en la Tabla 58.

**Tabla 58**

*Caída de presión promedio experimento simulado*

Réplica	$\Delta P$ [Pa]
1	192,94
2	189,71
3	190,20
Prom	190.95

Una vez determinada la variación de presión promedio del ensayo experimental simulado se procede a calcular el error presentado en la medición de la temperatura con la ecuación 7.

$$Error = \frac{|valor\ teórico - valor\ experimental|}{valor\ experimental} * 100\%$$

$$Error = \frac{|186.7256 Pa - 190.95 Pa|}{190.95 Pa} * 100\%$$

$$Error = 2,21 \%$$

Se observa que existe un error del 2,21 % entre la medición de caída de presión en la simulación computacional y la medición experimental de los ensayos realizados, que si bien es un error bajo, se debe a diversos factores como lo son pérdidas del fluido de trabajo por espacios de área mínima entre la unión de equipos que dan forma al volumen de control, de igual manera se tiene un cierto factor de discrepancia entre las

mediciones repetidas de los sensores puesto a que se trata de equipos electrónicos que pueden sufrir cierta variación de lectura por interferencia, fallo en la computadora que da alimentación que genere corte de suministro de energía, entre otros.

Se puede observar en la Tabla 54 que la representación computacional del disipador de calor bajo las mismas condiciones de frontera que el ensayo experimental simulado presentó una presión a la entrada del disipador de calor de 31.6233 Pa y una presión a la salida del disipador de calor de 19.2685 Pa por lo que se tiene una variación de presión obtenida con la ecuación 6.

$$\Delta P = |P_{out} - P_{in}|$$

$$\Delta P = |19.2685 \text{ Pa} - 31.6233 \text{ Pa}|$$

$$\Delta P = 12.36 \text{ Pa}$$

La comparación entre la estructura porosa y el disipador de calor se reduce a una comparación entre la variación de presión obtenida para cada uno, como se puede observar para la estructura porosa se tuvo un delta de presión de 186.67 Pa mientras que para el disipador de calor se tuvo un delta de presión de 12.36 Pa en donde se puede observar una diferencia considerablemente grande entre ambas mediciones de presión que principalmente se debe justamente a la característica principal de las estructuras porosas y es que cuentan con una forma intrínseca que favorece de manera abismal la variación de presión al obligar al fluido a cambiar de dirección de manera constante mientras que las aletas del disipador de calor no generan ningún cambio en la dirección del fluido por lo que la variación de presión del aire es casi nula.

Consecuentemente para obtener una referencia de la variación de presión obtenida mediante los ensayos experimentales se procederá a realizar un balance de energía utilizando la ecuación 8 que representa la ecuación de conservación de energía.



$$\dot{Q}_{neto} - \dot{W}_{neto} = \frac{dE}{dt} \Big|_{sistema} \quad (8)$$

Adicionalmente se hará uso de la ecuación 9 que representa el Teorema de Transporte de Reynolds.

$$\frac{dE}{dt} \Big|_{sistema} = \frac{d}{dt} \iiint_{V_C} \rho e \, dV + \iint_{S_C} \rho e \vec{V} \cdot \vec{n} \, dA \quad (9)$$

De la ecuación 8 se tiene que el único trabajo neto existente en el ensayo es el trabajo de potencia debido a la presión y por tanto, se procede a igualar las ecuaciones de energía y el teorema obteniéndose la ecuación 10.

$$\dot{Q}_{neto} - \dot{W}_{presión} - \dot{W}_{fricción} = \frac{d}{dt} \iiint_{V_C} \rho e \, dV + \iint_{S_C} \rho e \vec{V} \cdot \vec{n} \, dA \quad (10)$$

A continuación, se procede a utilizar el siguiente sistema de ecuaciones como igualdades para los términos utilizados.

$$\begin{cases} \dot{W}_{presión} = \iint_{S_C} P \vec{V} \cdot \vec{n} \, dA \\ e = u + \frac{v^2}{2} + gz \end{cases}$$

Consecuentemente se reemplaza el sistema de ecuaciones presentado en la ecuación 10.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{neto} - \dot{W}_{fricción} - \iint_{S_C} P \vec{V} \cdot \vec{n} \, dA &= \frac{d}{dt} \iiint_{V_C} \rho e \, dV + \iint_{S_C} \rho e \vec{V} \cdot \vec{n} \, dA \\ \dot{Q}_{neto} - \dot{W}_{fricción} &= \frac{d}{dt} \iiint_{V_C} \rho e \, dV + \iint_{S_C} \rho \left[ \frac{P}{\rho} + e \right] \vec{V} \cdot \vec{n} \, dA \end{aligned}$$

Es necesario considerar que como los estudios realizados y los experimentos simulados se desarrollaron en estado estable, por tanto el análisis es estacionario, lo que significa que todo lo que entra sale, por lo que la triple integral del volumen de control se anula, adicionalmente, se tendrá en cuenta que el calor neto del sistema está formado por el calor que ingresa que corresponde al calor generado por la celda Peltier

y el calor que sale que está representado por las pérdidas generadas tanto por la energía que el banco de pruebas emite al ambiente como por la energía absorbida por el disipador de calor y finalmente se tiene el trabajo perdido debido a la fricción que el flujo del aire forzado sufre al entrar en contacto con la estructura celular, quedando finalmente la ecuación 11.

$$\dot{Q}_{neto} - \dot{W}_{fricción} = \iint_{SC} \rho \left[ \frac{P}{\rho} + u + \frac{v^2}{2} + gz \right] \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (11)$$

Resolviendo la ecuación 11 se presenta finalmente la ecuación 12 que será la que se utilizará para el cálculo de la referencia para la caída de presión obtenida.

$$\dot{Q}_{neto} - \dot{W}_{fricción} = \left[ \frac{P_2}{\rho} + u_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right] \dot{m}_{out} - \left[ \frac{P_1}{\rho} + u_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right] \dot{m}_{in} \quad (12)$$

A continuación, es necesario establecer ciertos parámetros para la resolución de la ecuación.

- Al tener la variación de temperatura para los experimentos realizados de 9,54 °C, se determina que al no presentar un delta de temperatura mayor a 10 °C no amerita calcular propiedades para el aire a diferentes temperaturas por lo que se tomará una temperatura media para el cálculo de dichas propiedades, lo que implica que la densidad del fluido es constante.
- Tomando en consideración una densidad para el fluido de trabajo constante se tiene que el flujo másico de entrada es igual al flujo másico de salida que estarán representados por un flujo másico de manera general ya que se encuentra en función del caudal y de la densidad que al ser constante tendrán el mismo valor.
- La ecuación planteada se está acomodando a un análisis aplicable para el estudio realizado con las estructuras celulares trabajadas por lo que se

deben anular los términos de diferencia de altura como  $z_1$  y  $z_2$  debido a que no existe tal variación de altura. Adicionalmente las pérdidas por fricción representan las pérdidas mayores y menores en una tubería.

Una vez establecidas las consideraciones a realizar para el desarrollo de la ecuación 12 se procede a reescribirla con el fin de determinar las incógnitas a despejar obteniéndose la ecuación 13 con la que se trabajará.

$$\dot{Q}_{neto} - \dot{W}_{fricción} = \left[ \frac{P_2 - P_1}{\rho} \right] \dot{m} + \left[ \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \right] \dot{m} + c_v * \dot{m} * \Delta T$$

$$\dot{W}_{fricción} = \dot{Q}_{neto} - \left[ \frac{\Delta P}{\rho} \right] \dot{m} - \left[ \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \right] \dot{m} - c_v * \dot{m} * \Delta T \quad (13)$$

Finalmente se procede a realizar el cálculo del flujo másico mediante la ecuación 14 utilizando el libro de Fundamentos de Transferencia de Calor de Incropera 7ma edición, tabla A.4, para la determinación de las propiedades del aire a temperatura media de 26.77 °C.

$$\dot{m} = \rho * V * A \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (14)$$

$$\dot{m} = 1.1625 \frac{kg}{m^3} * 6 \frac{m}{s} * (0.036 m * 0.040 m)$$

$$\dot{m} = 0.010044 \frac{kg}{s}$$

A continuación, se realizará el cálculo del calor neto que está compuesto por el calor de entrada que corresponde a la potencia entregada a la celda Peltier y el calor de salida representado por las pérdidas generadas tanto por el disipador de calor como por las pérdidas de calor que las paredes de la estructura del banco de pruebas generan hacia el medio ambiente.

$$\dot{Q}_{neto} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out}$$

$$\dot{Q}_{in} = V_{in} * I_{in} = 9,59 V * 0,87A = 8.343 W$$

$$\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{DC} + \dot{Q}_{BP}$$

El cálculo de las pérdidas generadas por el disipador de calor se obtiene mediante la ecuación 15.

$$\dot{Q}_{DC} = h * A_t * n_o * \Delta T \quad (15)$$

$$L_c = L + \frac{t}{2} = 21 \text{ mm} + \frac{1 \text{ mm}}{2} = 21,5 \text{ mm} = 0,0215 \text{ m}$$

$$A_f = 2 * w * L_c = 2 * 0,001 \text{ m} * 0,0215 \text{ m} = 4,3 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$A_t = N * A_f + w * (H - N * t)$$

$$A_t = 9 * 4,3 * 10^{-5} \text{ m}^2 + 0,044 \text{ m} * (0,060 \text{ m} - 9 * 0,001 \text{ m}) = 2,631 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$m = \sqrt{\frac{h(2w + 2t)}{k * w * t}} = \sqrt{\frac{15 \frac{W}{m^2 K} (2 * 0,044 \text{ m} + 2 * 0,001 \text{ m})}{177 \frac{W}{m K} * 0,044 \text{ m} * 0,001 \text{ m}}} = 13,166 \frac{1}{m}$$

El área de la base del disipador de calor se encuentra a 31 °C, por lo que se determinan las propiedades para el disipador de calor de aleación de aluminio 2024 – T6 a temperatura media de 26,5 °C ≈ 27 °C.

$$n_o = 1 - \frac{N * A_f}{A_t} \left[ 1 - \frac{\tanh(m * L_c)}{m * L_c} \right]$$

$$n_o = 1 - \frac{9 * 4,3 * 10^{-5} \text{ m}^2}{2,631 * 10^{-3} \text{ m}^2} \left[ 1 - \frac{\tanh\left(13,166 \frac{1}{m} * 0,0215 \text{ m}\right)}{13,166 \frac{1}{m} * 0,0215 \text{ m}} \right] = 0,9962$$

$$\dot{Q}_{DC} = h * A_t * n_o * \Delta T = 15 \frac{W}{m^2 K} * 2,631 * 10^{-3} \text{ m}^2 * 0,9962 * (31 - 22)K$$

$$\dot{Q}_{DC} = 0,354 \text{ W}$$

Se tiene por tanto que, la potencia de calor pérdida debido al disipador de calor representa un 4,24 % de la potencia de entrada que ingresa a la celda Peltier.

$$Q_{BP} = \sum_{i=1}^n h * A_i * \Delta T$$

$$Q_{BP1} = 15 \frac{W}{m^2 K} * [5804,626 * 10^{-6} m^2 * (27,5 - 22) K] = 0,479 W$$

$$Q_{BP2} = 15 \frac{W}{m^2 K} * [5252,501 * 10^{-6} m^2 * (37,6 - 22) K] = 1,229 W$$

$$Q_{BP3} = 15 \frac{W}{m^2 K} * [5869,806 * 10^{-6} m^2 * (37,6 - 22) K] = 1,374 W$$

$$Q_{BP4} = 15 \frac{W}{m^2 K} * [5804,626 * 10^{-6} m^2 * (29,3 - 22) K] = 0,636 W$$

$$Q_{BP} = Q_{BP1} + Q_{BP2} + Q_{BP3} + Q_{BP4} = 3,718 W$$

Se tiene por tanto que, la potencia de calor pérdida debido al disipador de calor representa un 44,56 % de la potencia de entrada que ingresa a la celda Peltier. Por lo que de manera general se tiene un 48,8 % de pérdidas generadas tanto por pérdidas de calor al ambiente por parte de la estructura del banco de pruebas como por pérdidas generadas por la potencia cedida del disipador de calor al ambiente.

$$\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{DC} + \dot{Q}_{BP} = 0,354 W + 3,718 W = 4,072 W$$

$$\dot{Q}_{neto} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out} = 8,343 W - 4,072 W = 4,271 W$$

Se procede ahora a resolver la ecuación 13.

$$\dot{W}_{fricción} = \dot{Q}_{neto} - \dot{m} \left[ \left( \frac{\Delta P}{\rho} \right) - \left( \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \right) - c_v * \Delta T \right]$$

$$\dot{W}_{fr} = 4,271 W - 0,010044 \frac{kg}{s} \left[ \left( \frac{190,95 \frac{kg}{m^3}}{1,1625 \frac{kg}{m^3}} \right) - \left( \frac{0,6^2 - 6^2}{2} \right) \frac{m^2}{s^2} - (1,007 - 8,314) \frac{KJ}{Kg K} * 9,54 K \right]$$

$$\dot{W}_{fricción} = 4,271 W - 0,010044 \frac{kg}{s} \left[ 164,258 \frac{m^2}{s^2} + 17,82 \frac{m^2}{s^2} + 69,709 \frac{m^2}{s^2} \right]$$

$$\dot{W}_{fricción} = 4,271 W - 1,6498 W - 0,179 W - 0,7002 W$$

$$\dot{W}_{fricción} = 4,271 W - 2,529 W$$

$$\dot{W}_{fricción} = 1,742 W$$

Se tiene por tanto que, la potencia pérdida debido a la fricción de flujo del fluido de trabajo en este caso aire forzado al entrar en contacto con las paredes internas de la

estructura celular corresponde a un 20,88 % de la potencia de entrada que ingresa a la celda Peltier.

Una vez calculadas las pérdidas, como se mencionó que éstas representan las pérdidas mayores y menores en una tubería, se procederá a realizar el cálculo de una potencia de pérdidas en una tubería de aluminio que se asemeja a la potencia de pérdidas por fricción calculada con el fin de establecer una similitud que esta estructura celular presente mediante la ecuación 16.

$$\dot{W}_{fricción} = f * \frac{n * L}{D} * \frac{V^2}{2} * \dot{m} \quad (16)$$

Para continuar con el cálculo es necesario inicialmente determinar el número de Reynolds del fluido por lo que se procede a calcular con la ecuación 17, teniendo en consideración que se evaluará un tubo de cobre con diámetro interno de  $\frac{3}{4}$  in con longitud de 6 metros.

$$Re = \frac{\rho * V * Di}{\mu} \quad (17)$$

$$Re = \frac{1.1625 \frac{kg}{m^3} * 6 \frac{m}{s} * 0.01905 m}{184.485 * 10^{-7} \frac{Kg}{m s}}$$

$$Re = 7202.415 \quad \text{flujo turbulento}$$

Para el tubo mencionado anteriormente se tiene un factor de rugosidad absoluta K de 0,015 mm por lo que se procede a calcular el factor K/d con el fin de hacer uso del diagrama de Moody para determinar el factor de fricción como se muestra en la Figura 149.

$$\frac{K}{d} = \frac{0,015 mm}{19.05 mm} = 0,000787$$

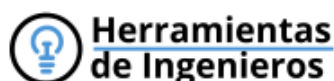
Para determinar el factor de fricción se empleará la ecuación 18 que corresponde a la ecuación de Colebrook – White.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3,7 D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (18)$$

La ecuación de Colebrook – White es una ecuación implícita ‘por lo que para su resolución se empleará el método de aproximaciones. Para ello se utilizará una plantilla en Excel del grupo Herramientas de Ingenieros como se muestra en la Figura 149.

**Figura 148**

*Plantilla de Excel para cálculo de Factor de Fricción*



<b>Tramo</b>	
--------------	--

Parámetros de diseño			
Fluido		-	Aire
Caudal		m <sup>3</sup> /h	31,104
Material tubería		-	Cobre
Diámetro interior		mm	19,05
Presión inicial		bar rel	1
Temperatura		°C	26,77

Características del circuito			
Rugosidad absoluta	k	mm	0,015
Rugosidad relativa	k/D		0,000787402
Longitud	L	m	6

#### Características del fluido

Densidad	ρ	kg/m <sup>3</sup>	1,162
Viscosidad dinámica	μ	Pa.s	1,84E-05
Viscosidad cinemática	ν	m <sup>2</sup> /s	1,58E-05

Calcular

#### Características del flujo

Velocidad	v	m/s	6,00
Número de Reynolds	Re	-	7219,13
Régimen	-	-	TURBULENTO
Factor de fricción	f	-	0,0347
Pérdida de carga unitaria		mbar/m	0,3815
Pérdidas de carga lineales		mbar	2,29
Pérdidas de carga singulares		mbar	0,00
Pérdidas de carga totales		mbar	2,29

Analizando la Figura 149, se observa que se tiene un factor de fricción de 0,0347 por lo que se procede a calcular el calor generado por pérdidas que el tubo presentaría con la ecuación 16.

$$\dot{W}_{fricción} = f * \frac{n * L}{D} * \frac{V^2}{2} * \dot{m}$$

$$\dot{W}_{fricción} = 0,0347 * \frac{4 * 6 \text{ m}}{0,01905 \text{ m}} * \frac{6^2 \text{ m}^2}{2 \text{ s}^2} * \left( 1.1625 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 6 \frac{\text{m}}{\text{s}} * \frac{\pi}{4} * 0.01905^2 \text{ m}^2 \right)$$

$$\dot{W}_{fricción} = 1,564 \text{ W}$$

Se puede observar que la caída de presión generada por la estructura celular equivale aproximadamente a la caída de presión generada por 4 tubos de cobre de diámetro interno de  $\frac{3}{4}$  in con una longitud de 6 m.



## Capítulo VI

### Conclusiones y Recomendaciones

#### 6.1. Conclusiones

- Los resultados tabulados para las simulaciones, presentados en la Tabla 36 demuestran que la estructura celular TPMS más óptima que favorece la transferencia de energía entre la estructura y el fluido de trabajo a una velocidad de 6 m/s en 2 de 3 ensayos realizados, corresponde a la estructura Schwarz P, en el tercer ensayo se observa que la estructura Gyroide es la más óptima para el estudio, por lo que ambas estructuras se las selecciona con una porosidad de 4,5 x 0,3 mm para los análisis experimentales.
- Los experimentos ensayados presentan un nivel de confianza del 95 % ya que, analizando todas las gráficas de residuos de manera conjunta, constan inicialmente de una distribución normal por la aleatoriedad de la realización de las combinaciones para los experimentos por lo que se dice que el experimento es confiable. A continuación, consta de aleatorización en el gráfico de ajustes en donde se grafican los puntos sin la presencia de patrones. Posteriormente se analiza un histograma de forma una distribución central. Finalmente consta de aleatoriedad en el gráfico de orden sin que se forme ningún tipo de patrón o tendencia ascendente o descendente.
- Para el análisis de las variables de estudio como lo son la variación de la temperatura y la variación de la presión se analizaron únicamente los factores que cuentan con un efecto significativo sobre la variable de estudio, en donde para el delta de temperatura se presenta la combinación más significativa correspondiente a la estructura Gyroide, con una velocidad de cámara interna de 2,6 m/s sometida a una carga térmica en una de sus caras laterales de 50

°C. Mientras que para el delta de presión se tienen que la mayor caída de presión se tiene con la velocidad de cámara interna de 6 m/s.

- Para realizar una comparación para la hipótesis presentada en este estudio se simuló el comportamiento de un dissipador de calor de dimensiones comerciales en donde la variación de temperatura de la estructura porosa tuvo un delta de temperatura de 9,719 °C mientras que el dissipador de calor tuvo 5 °C y para la variación de presión la estructura porosa tuvo un delta de presión de 186.66 Pa mientras que el dissipador de calor 12.36 Pa. Por lo que se concluye que para ambas variables de estudio se tuvo un comportamiento más eficiente para con la estructura celular TPMS.
- La alta caída de presión generada por la estructura celular se representó en tuberías en donde la caída de presión generada por la estructura celular equivale aproximadamente a la caída de presión generada por 4 tubos de cobre de diámetro interno de  $\frac{3}{4}$  in con una longitud de 6 m. Por lo que es necesario tomar en cuenta este valor ya que será fundamental para la selección entre una estructura celular y un dissipador de calor en función de la aplicación si requiere o no una caída de presión mínima.
- Se observó que en la realización del experimento existen pérdidas del 69,68%, mismas que se encuentran representadas por un 4,24% de pérdidas generadas por el dissipador de calor, un 44,56% de pérdidas ocasionadas por la estructura del banco de pruebas y finalmente un 20,88% de pérdidas debido a la fricción de flujo. Por lo que es necesario realizar un mejor aislamiento para reducir la cantidad de calor perdida hacia el ambiente por las paredes del banco de pruebas y de esta manera aumentar el calor ganado por el aire al interior de la estructura porosa que en el presente estudio corresponde al 8,39%.

- El presente estudio es un análisis preliminar para futuros trabajos que consisten en realizar un cambio de material a la estructura del banco de pruebas por una resina resistente a altas temperaturas como la resina High Temp que resiste 238°C con el propósito de someter la estructura celular a mayores temperaturas para mejorar la transferencia de calor. Adicionalmente se reemplazará el material de la estructura celular por una resina que se disuelva con metal derretido para así poder generar la estructura con aluminio fundido lo que incrementará considerablemente la cantidad de energía transferida al utilizar materiales conductores de calor.

## **6.2. Recomendaciones**

- Se recomienda trabajar con una variedad más amplia de estructuras celulares TPMS existentes como lo son las estructuras Lidinoid, Noevius, Split P, entre otras, con el fin de ensayar todas las opciones existentes para de esta manera determinar la estructura que favorece en mayor cantidad a la transferencia de energía entre la estructura porosa y el fluido de trabajo debido a que cada estructura cuenta con una porosidad interna intrínseca característica de cada una.
- Para la generación de las estructuras celulares se debe establecer una mayor cantidad de parámetros de diseño con el fin de obtener un mayor control sobre la fabricación de las mismas lo que servirá para caracterizar las estructuras TPMS mediante la parametrización de variables como área, relación área – volumen, tamaño del poro, espesor, etc.
- Al momento de la realización de los experimentos se observó que se requiere de un determinado tiempo, en este caso 15 minutos, para que los sensores indiquen que las lecturas de temperatura se han estabilizado como se puede

observar en los datos tabulados, por lo que, se sugiere analizar el estado transitorio para los ensayos realizados en el presente estudio.

- Debido a la alta pérdida de calor generada por las paredes del banco de pruebas hacia el ambiente por convección es necesario realizar un mejor aislamiento entre el tubo de aluminio y las paredes internas del banco de pruebas con el fin de reducir el calor emitido por conducción y de esta manera aumentar el calor ganado por el aire forzado que circula al interior de la estructura.

## Bibliografía

- Ansys. (2021). *Producto Ansys*. Recuperado el 27 de Octubre de 2021, de <https://www.ansys.com/products#t=ProductsTab&sort=relevancy&layout=card>
- Arduino. (s.f.). *Arduino Nano*. Recuperado el 24 de Noviembre de 2021, de <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>
- 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, 2.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121415>
- Bayu, R., Imaduddin, F., & Ariawan, D. (Abril de 2021). *Una revisión sobre la impresión 3D del modelado de deposición fundida (FDM): procesamiento de filamentos, materiales y parámetros de impresión*. Recuperado el 26 de Octubre de 2021, de Gruyter Open Acces: <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/eng-2021-0063/html>
- Bournias, A. (2020). *Introducción a la impresión 3D FDM*. Recuperado el 26 de Octubre de 2021, de <https://www.hubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing/#what>
- Chilcañan, J. (2020). *FDM Modelado por Deposición Fundida*. Recuperado el 26 de Octubre de 2021, de <https://www.innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/fdm-modelado-por-deposicion-fundida/>
- Cmprodemaq. (2021). *Bed Mosfet V1 Cama Impresora 3d 12-24v 30a*. Recuperado el 24 de Noviembre de 2021, de [https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-501976853-bed-mosfet-v1-cama-impresora-3d-12-24v-30a-cmprodemaq-\\_JM?searchVariation=173764601121#searchVariation=173764601121&position=3&search\\_layout=stack&type=item&tracking\\_id=fe832fd5-5129-4462-b896-77fd67bfddd](https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-501976853-bed-mosfet-v1-cama-impresora-3d-12-24v-30a-cmprodemaq-_JM?searchVariation=173764601121#searchVariation=173764601121&position=3&search_layout=stack&type=item&tracking_id=fe832fd5-5129-4462-b896-77fd67bfddd)
- Danfoss. (2019). *Temperature sensor AKS 12*.
- Extech Instruments. (Junio de 2018). *Termo - Anemómetro PCM/MCM*. Recuperado el 21 de Noviembre de 2021, de [http://www.extech.com/products/resources/AN100\\_UM-es.pdf](http://www.extech.com/products/resources/AN100_UM-es.pdf)
- Formlabs. (2021). *Especificaciones técnicas de las impresoras 3D de estereolitografía de Formlabs*. Recuperado el 24 de Noviembre de 2021, de <https://formlabs.com/es/3d-printers/form-3/tech-specs/>

- Formlabs. (2021). *Guía definitiva sobre impresión 3D por estereolitografía (SLA)*. Recuperado el 25 de Octubre de 2021, de <https://formlabs.com/es/blog/guia-definitiva-estereolitografia-sla-impresion-3d/>
- Hebei I. T. (2016). *TEC1 - 12706*. Recuperado el 24 de Noviembre de 2021, de <https://peltiermodules.com/peltier.datasheet/TEC1-12706.pdf>
- Hexagon. (2020). *ANSYS*. Recuperado el 27 de Octubre de 2021, de 3DCadPortal: <https://www.3dcadportal.com/ansys.html>
- iMechanical. (December de 2010). *Introduction to ANSYS Fluent*. Recuperado el 28 de Octubre de 2021, de Ansys: [https://imechanica.org/files/fluent\\_13.0\\_lecture02-intro-to-cfd.pdf](https://imechanica.org/files/fluent_13.0_lecture02-intro-to-cfd.pdf)
- Lonardo, R., Thiel, J., & Rogers, K. (2018). 3D Printed Smart Molds for Sand Casting. *International Journal of Metalcasting*, 12(4), 785-786.  
doi:<https://doi.org/10.1007/s40962-018-0211-x>
- Matsson, J. (2021). *An Introduction to ANSYS Fluent 2021*. Estados Unidos: SDC Publications. Recuperado el 28 de Octubre de 2021, de [https://books.google.com.ec/books?id=h700EAAAQBAJ&dq=models+of+ansys+fluent+16+%2B+multiphase+energy+viscous+radiation&source=gbs\\_navlinks\\_s](https://books.google.com.ec/books?id=h700EAAAQBAJ&dq=models+of+ansys+fluent+16+%2B+multiphase+energy+viscous+radiation&source=gbs_navlinks_s)
- MAXIM. (2008). *DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*. Obtenido de <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/DS18B20.pdf>
- MechanicalBas. (2021). *Opciones y herramientas importantes de mallado ANSYS*. Recuperado el 27 de Octubre de 2021, de <https://mechanicalbase.com/important-ansys-meshing-options-and-tools/>
- MechanicalBase. (2021). *Steady State Thermal Analysis in ANSYS Mechanical*. Recuperado el 27 de Octubre de 2021, de <https://mechanicalbase.com/steady-state-thermal-analysis-in-ansys-mechanical/>
- messtech. (2017). *Transmisor de Presión para Bajas Presiones Sistema Hidroneumático*. Recuperado el 21 de Noviembre de 2021, de [https://www.rpmecatronica.com/system/storage/download/RP.Mecatronica\\_GM-100\\_Transmisor.Presion.pdf.TsSmYJS51YJzVgP16Tv2awoel3U0ovMM](https://www.rpmecatronica.com/system/storage/download/RP.Mecatronica_GM-100_Transmisor.Presion.pdf.TsSmYJS51YJzVgP16Tv2awoel3U0ovMM)
- Murphy, J. (Marzo de 2019). *Fusión selectiva por láser (SLM): explicación simple de la impresión 3D*. Recuperado el 25 de Octubre de 2021, de <https://all3dp.com/2/selective-laser-melting-slm-3d-printing-simply-explained/>
- National, S. (2000). *LM35 Precision Centigrade Temperatura Sensors*. Obtenido de <https://cdn.electronilab.co/wp-content/uploads/2014/05/lm35.pdf>

- Nguyen, D., Yor, P., Beck, V., & et al. (2018). Triply periodic minimal surface heat exchangers for supercritical CO<sub>2</sub> cycles. *14th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*, 1-2.
- Nidec. (2021). *TA225DC Series - Electrical and Mechanical Characteristics*. Recuperado el 24 de Noviembre de 2021, de <https://www.datasheetarchive.com/pdf/download.php?id=1751beff37876cc4b3507a258f7ad15913b71c&type=P&term=B34605>
- NXP. (Septiembre de 2009). *Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditions, Temperature Compensated and Calibrated*. Recuperado el 21 de Noviembre de 2021, de <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPX5500.pdf>
- Ozen. (2021). *Ansys Fluent Flow Modeling Software*. Recuperado el 27 de Octubre de 2021, de <https://www.ozeninc.com/products/fluid-dynamics/ansys-fluent/>
- Pazmiño, K. (2020). *Fusión selectiva por láser (SLM)*. Recuperado el 25 de Octubre de 2021, de <https://comprarimpresoras-3d.com/tipo/slm/>
- Pereira, A. (20 de Julio de 2019). Laminar flow and heat transfer in triply periodic minimal surfaces. *[Tesis de Maestría]*. Técnico Lisboa, Lisboa, Portugal. Obtenido de <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt>
- Ramos, V. (2021). *Ansys*. Recuperado el 27 de Octubre de 2021, de Seys: <https://seystic.com/distribucion/software/ansys/>
- Restrepo, S. (9 de Noviembre de 2017). *SLA: Impresión 3d por estereolitografía*. Obtenido de <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/>
- Rodríguez, D. (2021). *Caracterización numérica y experimental de vigas sándwich con núcleos de material celular*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí.
- Rosero, C. (2019). *FDM*. Recuperado el 26 de Octubre de 2021, de <https://www.stratasys.com/fdm-technology>
- Sanchez, S. (Octubre de 2017). *FDM o modelado por deposición fundida*. Recuperado el 26 de Octubre de 2021, de 3Dnatives: <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/>
- Sanchez, S. (Septiembre de 2019). *Guía completa: Fusión láser de lecho de polvo*. Recuperado el 25 de Octubre de 2021, de <https://www.3dnatives.com/es/sinterizado-directo-de-metal-por-laser-les-explicamos-todo/#!>

- Schoen, A. (1970). *Infinite Periodic Minimal Surfaces Without Self-Intersections*. Washington, D. C.: National Aeronautics and Space Administration.
- Sculpteo. (2017). *Impresión 3D con tecnología SLM*. Recuperado el 25 de Octubre de 2021, de <https://www.sculpteo.com/es/materiales/slm-materiales/>
- Serrano, D. (2020). Caracterización y análisis del fenómeno de absorción de energía en materiales celulares de PLS con estructuras estocásticas de celda abierta y con estructuras TPMS. [Tesis de Ingeniería]. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.
- Shixiang, Y., Jinxing, S., & Jiaming, B. (2019). Investigation of functionally graded TPMS structures fabricated by additive manufacturing. *Materials and Design*, 182, 2. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108021>
- Weihong, L., Guopeng, Y., & Zhibin, Y. (2020). Bioinspired heat exchangers based on triply periodic minimal surfaces for supercritical CO2 cycles. 179, 3. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115686>
- Zhang, B. (Octubre de 2021). *Selective laser melting*. Recuperado el 25 de Octubre de 2021, de [https://en.wikipedia.org/wiki/Selective\\_laser\\_melting](https://en.wikipedia.org/wiki/Selective_laser_melting)



## Anexos