

Este Trabajo Fin de Grado está orientado a la realización de un análisis de la transferencia de calor del radiador de un Citroën Saxo 1.1 SX. Se ha utilizado el programa de modelado 3D, SolidWorks® en versión 2014, y el complemento de Mecánica de Fluidos Computacional, Flow Simulation.

Se parte de un intercambiador funcional, el cual se desensambla para realizar una caracterización del mismo, introducirlo en el software de modelado y, por último, realizar distintas simulaciones sobre los distintos modelos caracterizados que permiten conocer su aptitud ante distintas condiciones de funcionamiento.

También, con este trabajo, se busca comprobar las posibilidades de análisis que ofrece el software, sobre el cual se tiene poca información al respecto. Para ello se realizarán análisis con los distintos tipos de mallado que el programa ofrece y se compararán los resultados obtenidos.



Ángel Paredes Parrilla

Es un Ingeniero Mecánico de Castellar (Jaén). Terminó su grado en el año 2018 con el presente trabajo, en la Escuela de Ingenierías Industriales en la Universidad de Málaga. Este proyecto complementa los conocimientos de modelado y simulación por ordenador durante el grado.



UNIVERSIDAD DE MÁLAGA GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



TRABAJO FIN DE GRADO

**MODELADO Y ANÁLISIS EN SOLIDWORKS –
FLOW SIMULATION DEL INTERCAMBIADOR DE
FLUJO CRUZADO ADAPTADO AL SISTEMA DE
REFRIGERACIÓN DEL MOTOR 1.1I SX DEL
GRUPO PSA**

ÁNGEL PAREDES PARRILLA
2017/2018

TUTOR: MANUEL GONZÁLEZ ARAGÓN



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Ingeniería Mecánica, Térmica y de Fluidos

Máquinas y Motores Térmicos

TRABAJO FIN DE GRADO

**MODELADO Y ANÁLISIS EN SOLIDWORKS – FLOW
SIMULATION DEL INTERCAMBIADOR DE FLUJO CRUZADO
ADAPTADO AL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DEL
MOTOR 1.1i SX DEL GRUPO PSA.**

Grado en

Ingeniería Mecánica

Autor: ÁNGEL PAREDES PARRILLA

Tutor: MANUEL GONZÁLEZ ARAGÓN

MÁLAGA, septiembre de 2.018

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

D. Ángel Paredes Parrilla, con DNI: 15521558-P, estudiante del Grado en Ingeniería Mecánica en la Universidad de Málaga, en el curso 2017 – 2018, autor del presente trabajo, titulado: “Modelado y Análisis en SolidWorks – Flow Simulation del intercambiador de flujo cruzado adaptado al sistema de refrigeración del motor 1.1i del grupo PSA”.

Declara que:

El mismo, es fruto del propio trabajo personal, que no copia ni utiliza ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones diversas (en versión impresa o electrónica) sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía.

Esta declaración se realiza conforme a lo establecido en el artículo 10 apartado 3, del Reglamento de Proyecto/Trabajo de Fin de Grado en la Escuela de Ingenierías Industriales, aprobado en Junta de Escuela el 12/03/2018.

Málaga, a 10 de septiembre de 2018.

Fdo. Ángel Paredes Parrilla

Modelado y Análisis en SolidWorks – Flow Simulation del intercambiador de flujo cruzado adaptado al sistema de refrigeración del motor 1.1i del grupo PSA

Ángel Paredes Parrilla

PALABRAS CLAVE:

SolidWorks® 2014, SolidWorks Flow Simulation ® 2014, Simulación térmica y de fluidos, Modelado 3D, Caracterización térmica, Intercambiador, grupo PSA.

RESUMEN:

El objetivo principal de este trabajo es realizar un análisis de la transferencia de calor del radiador de un Citroën Saxo 1.1 SX. Con este fin se ha utilizado el programa SolidWorks y su complemento Flow Simulation en versión 2014. Se pretende, también, con el presente trabajo, indagar en las posibilidades de análisis que ofrece el mismo, debido a que se tiene poca información al respecto. Para este análisis se ha desmontado el intercambiador en cuestión, modelando cada una de las piezas. Fue necesaria la caracterización de las aletas del mismo mediante el uso de un proyecto de perfiles. Fue el departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación, quien facilitó el uso del instrumento.

Como segunda parte, se han realizado distintas simulaciones del modelo mediante el uso del complemento de análisis de dinámica de fluidos computacional, observando la influencia en la caída de temperatura entre la entrada y la salida del radiador cuando se varían las condiciones de funcionamiento del mismo. Se han llevado a cabo distintas simplificaciones del modelo completo del intercambiador, debido a la falta de recursos informáticos. De esta forma, se ha llegado a conocer la aptitud del sistema ante diferentes situaciones de funcionamiento

Este documento se presenta como Trabajo Fin de Grado de la titulación Grado en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Málaga, englobado el mismo dentro del Doble Grado en Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Mecánica.

Modelling and Analysis in SolidWorks - FlowSimulation of the cross flow exchanger adapted to the cooling system of the 1.1i SX engine of the PSA group.

Ángel Paredes Parrilla

KEY WORDS:

SolidWorks® 2014, SolidWorks Flow Simulation ® 2014, Thermal and Fluid Simulation, 3D Modelling, Thermal characterization, Exchanger, PSA group.

ABSTRACT:

The main objective of this report is to analyze the heat transfer of the Citroën Saxo 1.1 SX exchanger. With this objective SolidWorks and its add-in, Flow Simulation, were used in 2014 version. It is pretended with this project, to investigate the analyze options that are offered by the software, due to the lack of information about it. For this analysis, the exchanger was disassembled, modelling every single part of it. It was necessary the usage of a profile projector to characterize the geometry of the fins. It was the Civil Engineering, Materials and Manufacturing Department who ease the usage of that instrument.

As second part, different simulations of the model are done with the computational fluid dynamics add-in, becoming aware of the influence, in the temperatura gap between the input and the output, of the working conditions. It has been carried out several simplifications of the complete exchanger model owing to the lack of computational resources. In this way, it has been known the system aptitude for different working conditions.

This report is put forward as Bachelor Thesis within the Bachelor of Mechanical Engineering at the University of Málaga, included in the Double Degree of Electric and Mechanical Engineering.

Agradecimientos:

Durante el presente trabajo, sin lugar a duda, ha sido necesaria la ayuda de muchas más de las personas que aparecen reflejadas como autores de las referencias bibliográficas. Por ese motivo, incluyo estas líneas, como reconocimiento a aquellas personas que siempre me han ayudado fueran cuales fuesen los condicionantes.

Mención importante requieren mis padres, Ángel y Consolación, mis abuelos, Antonio y Vicenta, y el resto de la familia. Sin ellos, la realización de este trabajo, que cierra una etapa de mi vida, hubiese sido imposible. Su apoyo siempre ha sido incondicional, y siempre han apostado por mí, aupándome en los momentos de flaqueza.

Mencionar también a todos mis amigos de fatigas universitarias, sin los cuales, las noches de estudio se hubieran hecho, si cabe, aún más duras. Ellos siempre han estado dispuestos a hacer lo que estuviera en su mano por sacar adelante esta titulación.

Agradecer también a mi tutor, D. Manuel González Aragón, su labor de supervisión y de apoyo, tanto en la parte técnica, como en la redacción del trabajo.

Y, por último, pero no por orden de importancia, sino para poder ofrecerle una mención especial, a Fátima. Siempre ha estado ahí, soportando las frustraciones, los enfados, e, incluso, alguna que otra noche de estudio a mi lado, con una sonrisa, apoyándome de forma incondicional, incluso cuando ni yo mismo me sentía con fuerzas. Su entereza, y su afán por descubrir nuevos horizontes, ha sido el motor que ha movido toda esta maquinaria.

A todos y cada uno de los mencionados, muchas gracias por confiar en mí.

“La voluntad obstinada de perseguir una ambición propia es verdaderamente una fuerza que puede hacer superar obstáculos”.

- Enzo Ferrari.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Declaración de Originalidad	III
Resumen:.....	V
Abstract:.....	VI
Agradecimientos:	VII
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	
1. Objeto, motivación y justificación del trabajo	1
1.1. Objeto y alcance del trabajo	1
1.2. Motivación del trabajo	1
1.3. Justificación del trabajo	1
2. Estructura del trabajo	1
3. Diagrama de Gantt.....	2
CAPÍTULO 2: MEMORIA	
1. Conocimientos previos	3
1.1. Conocimientos metrológicos	3
1.1.1. Utilización del calibre o pie de rey.	3
1.1.2. Utilización del micrómetro	4
1.1.3. Utilización del proyector de perfiles.....	4
1.2. Funcionamiento teórico de un MEP de 4T.....	5
1.2.1. Ciclo Otto	6
1.2.2. Elementos constructivos de un motor de gasolina.....	7
1.3. Sistema de refrigeración	9
1.4. Intercambiadores	10
1.4.1. Clasificación.....	10
1.4.2. Intercambiadores de aletas de flujo cruzado compactos	13
1.4.3. Análisis térmico de un intercambiador de flujo cruzado compacto.....	14
2. Desmontaje del intercambiador.....	18
3. Modelado en SolidWorks 2014 SP3.0	23
3.1. Caracterización geométrica de las aletas.....	23
3.2. Modelado de las distintas piezas y ensamblaje	25
4. Simulación térmica y de fluidos	26
4.1. Cálculo del flujo másico de agua de entrada.	26

4.2.	Primer modelo de simulación	28
4.3.	Segundo modelo de simulación	31
4.3.1.	Estudio de convergencia.....	31
4.3.2.	Simulación de un tubo con malla simétrica	36
4.3.3.	Simulación de un tubo con malla periódica	39
4.4.	Tercer modelo de simulación	42
4.4.1.	Dos tubos con malla simétrica.	43
4.4.2.	Dos tubos con malla periódica	46

CAPÍTULO 3: MODELADO EN SOLIDWORKS 2014

1.	Tubo	49
2.	Aleta	53
3.	Módulos de fijación de los tubos	63
4.	Junta de estanqueidad.....	68
5.	Colector de entrada	70
6.	Colector de salida	83
7.	Ensamblaje	92
8.	Materiales y colores de las distintas piezas.....	97
8.1.	Identificación de los materiales	97
9.	Modelos para simulación	99
9.1.	Radiador completo sin aletas	99
9.2.	Tubo con aletas	102
9.3.	Dos tubos con aletas	103

CAPÍTULO 4: SIMULACIÓN EN SOLIDWORKS FLOW SIMULATION

1.	Uso del complemento, SolidWorks Flow Simulation.....	105
1.1.	Análisis interno	105
1.2.	Análisis externo.....	110
1.3.	Uso de configuraciones en el modelo.	110
1.4.	Estudios paramétricos.....	110
1.5.	Especificaciones técnicas de la máquina usada.....	111
2.	Primer modelo de simulación	111
3.	Segundo modelo de simulación	118
3.1.	Tubo con malla simétrica	118
3.1.1.	Simulaciones para el análisis de convergencia	118
3.1.2.	Estudio paramétrico	119
3.2.	Tubo con malla periódica	121

3.2.1. Estudio paramétrico	121
4. Tercer modelo de simulación	121
4.1. Dos tubos con malla simétrica.....	121
4.1.1. Estudio paramétrico	122
4.2. Dos tubos con malla periódica	123
4.2.1. Estudio paramétrico	123

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

1. Análisis de resultados	125
1.1. Comparación de la caída de temperatura entre los modelos de un solo tubo	125
1.2. Comparación de la caída de temperatura entre los modelos de dos tubos....	127
1.3. Comparación de la caída de temperatura entre los modelos de 1 y 2 tubos..	128
1.3.1. Mallados simétricos.....	128
1.3.2. Mallados periódicos.	129
2. Conclusiones	129
2.1. Conclusiones generales	129
2.2. Conclusiones específicas.....	130
2.2.1. Primer modelo de simulación	130
2.2.2. Segundo modelo de simulación	130
2.2.3. Tercer modelo de simulación	130
3. Líneas futuras de trabajo.....	131

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GLOSARIO

ANEXO 1: PRESUPUESTO

1. Recursos informáticos.....	137
2. Recursos humanos	137
3. Materiales e instrumentación.....	137

PLANOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Calibre o pie de rey	3
Figura 2. Micrómetro MITUTOYO digital	4
Figura 3. Proyector de perfiles MITUTOYO PJ 300.....	5
Figura 4. Ciclo de aire estándar Otto ideal	6
Figura 5. Elementos estructurales del motor. (a) Culata. (b) Bloque motor. (c) Envolventes. Cáster.....	7
Figura 6. (a) Sistema de distribución. (b) Tren alternativo.	8
Figura 7. Circuito de refrigeración de un automóvil.....	9
Figura 8. Intercambiadores: (a) de serpentín, (b) de tubo con aletas [2].....	11
Figura 9. Intercambiadores de doble tubo: a) Flujo paralelo; b) Flujo en contracorriente	12
Figura 10. Intercambiador de carcasa y tubo [2].....	12
Figura 11. Intercambiador de placas selladas. [2]	13
Figura 12. Balances de energía en un intercambiador de flujo paralelo.....	16
Figura 13. Frontal del radiador, con cada una de sus partes indicadas.	19
Figura 14. Imágenes laterales y trasera del radiador.	19
Figura 15. Desmontaje de los tanques, el ventilador y la tapa protectora.	20
Figura 16. Tanques de entrada (a,b) y tanques de salida (c,d).....	21
Figura 17. Juntas de estanqueidad desmontadas.	21
Figura 18. Módulo de fijación de los tubos corroído.....	21
Figura 19. Módulo de fijación cortado.....	22
Figura 20. Aletas y tubos accesibles para la medición	22
Figura 21. Seccionado del tanque de salida.	22
Figura 22. Medición del espesor de la aleta.	23
Figura 23. Muestras de la aleta.	24
Figura 24. Muestra de la pantalla del proyector de perfiles en proyección episcópica. ...	24
Figura 25. Croquis de la parte interior de las aletas.....	25
Figura 26. Croquis de la parte exterior de la aleta.	25
Figura 27. Resultado final del modelado.	26
Figura 28. Curva de par (naranja) y potencia (blanco) del Citroën Saxo 1.1 SX [6]	27
Figura 29. Modelo usado para la primera simulación	28
Figura 30. Gráfico de la temperatura y distribución de velocidad del aire en el primer modelo simulado	29
Figura 31. Representación de la temperatura y la velocidad de los fluidos en una sección longitudinal.....	30
Figura 32. Sección de aleta proporcional para las simulaciones.....	31
Figura 33. Tubo con aletas.....	31
Figura 34. Diagrama de flujo para el cálculo de los parámetros p y q.....	34
Figura 35. Tendencia del valor de temperatura de salida en el refinamiento de la malla.	35
Figura 36. Distribución de las metas puntuales de temperatura del agua.....	36
Figura 37. Temperatura del agua en las distintas simulaciones. Temperaturas de entrada de 95°C y 90°C.....	38

Figura 38. Temperatura del agua en las distintas simulaciones. Temperatura de entrada de: 85 °C y 80 °C	38
Figura 39. Distribución de temperatura y velocidad a mitad del tubo. 95 °C y 115 km/h.	39
Figura 40. Distribución de temperatura en una aleta. 95 °C y 115 km/h.	39
Figura 41. Aumento de la transmisión de calor por aumento de la velocidad.	40
Figura 42. Temperatura del agua en las distintas simulaciones. Temperatura de entrada de 95 y 90 °C.	41
Figura 43. Temperatura del agua en las distintas simulaciones. Temperatura de entrada de 85 y 80 °C.	41
Figura 44. Distribución de temperatura y velocidad del aire al paso por el tubo. 95 °C y 115 km/h.	42
Figura 45. Distribución de temperatura en una aleta. 95 °C y 115 km/h.	42
Figura 46. Tercer modelo de simulación.	43
Figura 47. Temperatura del agua en las distintas simulaciones. Temperatura de entrada: 95 y 90 °C.	44
Figura 48. Temperatura del agua en las distintas simulaciones. Temperatura de entrada: 85 y 80°C.	45
Figura 49. Distribución de temperatura y velocidad del aire al paso por el tubo. 95 °C y 115 km/h.	45
Figura 50. Distribución de temperatura en una aleta. 95 °C y 115 km/h.	45
Figura 51, Temperatura del agua en las distintas simulaciones, Temperatura de entrada: 95 y 90 °C	47
Figura 52, Temperatura del agua en las distintas simulaciones, Temperatura de entrada: 85 y 80 °C	47
Figura 53, Distribución de temperatura y velocidad del aire al paso por el tubo, 95 °C y 115 km/h,	48
Figura 54, Distribución de temperatura en una aleta, 95 °C y 115 km/h,	48
Figura 55. Abrir un archivo nuevo	49
Figura 56. Abrir una pieza nueva	49
Figura 57. Ventana inicial de un archivo pieza	50
Figura 58. Generación del croquis en planta	51
Figura 59. Revolución de saliente / base.....	52
Figura 60. Disposición de los agujeros y ancho de la aleta.	53
Figura 61. Croquización de las aperturas próximas a los extremos.....	55
Figura 62. Recortar y extender entidades.	55
Figura 63. Vista general del croquis	56
Figura 64. Croquis de la parte exterior de la aleta.	57
Figura 65. Matriz lineal de los agujeros de las aletas.	57
Figura 66. Disposición de las aletas interiores.	58
Figura 67. Croquis final de la aleta en planta.	59
Figura 68. Operación “Extrusión de la geometría base de la aleta”.	59
Figura 69. Extrusión de las protrusiones de la aleta.	60
Figura 70. Geometría de la aleta pequeña.	61
Figura 71. Aletas generadas	62
Figura 72. Aleta finalizada.....	62
Figura 73. Proceso de modelado de la parte central del módulo fijación	64
Figura 74. Creación del saliente de 5 mm de altura y 1 mm de espesor.	65
Figura 75. Equidistanciar entidades.	66

Figura 76. Extrusiones finales para completar el modelado del módulo de fijación.....	67
Figura 77. Proceso de modelado de la forma base de la junta de estanqueidad	69
Figura 78. Modelización de las guías.	70
Figura 79. Base del colector de entrada.	71
Figura 80. Extrusión de 10 mm de altura.	72
Figura 81. Extrusión por revolución.	72
Figura 82. Croquis, trayectoria y operación barrido.	73
Figura 83. Corte de la cara inclinada.	74
Figura 84. Mordedura en una esquina del colector.	75
Figura 85. Modelización del saliente (a) y realización de un agujero ciego (b).	76
Figura 86. Croquis de los salientes rectangulares.	76
Figura 87. Croquis del corte de la parte inferior.	77
Figura 88. Proceso de protrusión de la boquilla inferior.	78
Figura 89. Redondeo de la arista puntiaguda.	78
Figura 90. Selección del sólido a vaciar.	79
Figura 91. Vaciado del colector con espesor de dos milímetros.	79
Figura 92. Corte base interior.	80
Figura 93. Operación Combinar.	81
Figura 94. Vista superior de los redondeos realizados.	81
Figura 95. Vista inferior de los redondeos realizados.	82
Figura 96. Medición de la distancia de la cara.	82
Figura 97. Generación de la pared interior del colector.	83
Figura 98. Primer paso para la generación de la base recta.	83
Figura 99. Segundo paso para la generación de la base recta.	84
Figura 100. Revolución de la base.	84
Figura 101. Realización del acuerdo entre las dos partes.	85
Figura 102. Extrusión del tubo de salida del fluido.	85
Figura 103. Corte de la base I.	86
Figura 104. Corte de la base II.	86
Figura 105. Vaciado.	87
Figura 106. Redondeos.	87
Figura 107. Pasos necesarios para la realización de la base.	88
Figura 108. Modelización del depósito.	89
Figura 109. Último tramo (a) y cúpula inferior (b).	89
Figura 110. Conexión del tubo interior con el tanque.	90
Figura 111. Tubo de conexión entre la base y el tanque (a) y cúpula superior (b).	91
Figura 112. Modelización de la membrana interior.	92
Figura 113. Introducción de componentes.	93
Figura 114. Relación de coincidencia y concentricidad.	93
Figura 115. Circunferencias a relacionar y fijar.	94
Figura 116. Geometría una vez realizada la simetría de componentes.	94
Figura 117. Matriz de componente lineal de los tubos.	95
Figura 118. Ensamblaje de los colectores de entrada y salida.	95
Figura 119. Ensamblaje de la aleta.	96
Figura 120. Ensamblaje finalizado.	96
Figura 121. Asignación del material.	97
Figura 122. Propiedades del plástico PA66-GF30 a 23 °C.	98
Figura 123. Generación de un material personalizado.	99

Figura 124. Asignación de color. (Apariencia) (a) y resultado final (b).....	99
Figura 125. Modificar elementos mostrados en las configuraciones.....	100
Figura 126. Volumen de control para el aire.....	101
Figura 127. Tapas de definición de las condiciones de contorno para el VC del aire (a) y de agua (b)	101
Figura 128. Importación del tubo.....	102
Figura 129. Tubo con aletas.....	102
Figura 130. Plano de simetría	103
Figura 131. Modelo con la simetría realizada	103
Figura 132. Activación del complemento.....	105
Figura 133. Wizard - Project Name	106
Figura 134. Wizard - Unit System.....	106
Figura 135. Wizard - Analysis Type.....	107
Figura 136. Wizard - Default Fluid.....	107
Figura 137. Wizard - Default Solid.....	108
Figura 138. Wizard - Wall Conditions	108
Figura 139. Wizard - Initial Conditions.....	109
Figura 140. Wizard - Results and Geometry Resolution.....	109
Figura 141. Configuraciones.	110
Figura 142. Estudios paramétricos.....	110
Figura 143. Escenarios del estudio paramétrico.....	111
Figura 144. Fluid Subdomain para el aire.....	112
Figura 145. Fluid Subdomain para el agua.....	112
Figura 146. Environment Pressure.....	113
Figura 147. Condición de velocidad de entrada del aire.....	113
Figura 148. Solid Materials.....	114
Figura 149. Metas globales.....	115
Figura 150. Configuración del EDF Solver	115
Figura 151. Información sobre el modelo	115
Figura 152. Análisis de la convergencia de la solución.	116
Figura 153. Heat transfer rate definido en un gráfico de superficie.....	117
Figura 154. Configuración de un gráfico de corte.....	117
Figura 155. Simetría de la simulación respecto al plano XY.....	118
Figura 156. Metas puntuales.....	119
Figura 157. Parametric Study del tercer paso por tubo.	120
Figura 158. Modelo con malla periódica.....	121
Figura 159. Computational domain con malla simétrica	122
Figura 160. Computational Domain con malla periódica.	123
Figura 161. Comparación entre las distribuciones de velocidad y temperatura del aire en ambos mallados.....	126
Figura 162. Comparación entre las distribuciones de temperatura de las aletas en ambos mallados.	126
Figura 163. Comparación de la distribución de velocidad y temperatura para los dos mallados.	127
Figura 164. Comparación de la distribución de temperatura en una aleta entre los dos mallados.	128

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diagrama de Gantt del trabajo.....	2
Tabla 2. Valores recomendados para la resistencia por ensuciamiento. [2]	15
Tabla 3. Tabla resumen de los estudios de convergencia	32
Tabla 4. Comparación del análisis de convergencia con la extrapolación de Richardson.	35
Tabla 5. Caída de temperatura total del agua. 1 tubo con malla simétrica.....	37
Tabla 6. Potencia extraída en kW por el intercambiador. 1 tubo con malla simétrica.....	37
Tabla 7. Caída de temperatura total del agua. 1 tubo con malla periódica.	40
Tabla 8. Potencia extraída en kW por el intercambiador. 1 tubo con malla periódica. ...	40
Tabla 9. Caída de temperatura total del agua. 2 tubos con malla simétrica.....	43
Tabla 10. Potencia extraída en kW por el intercambiador. 2 tubos con malla simétrica.	44
Tabla 11. Caída de temperatura total del agua. 2 tubos con malla periódica.....	46
Tabla 12. Potencia extraída en kW por el intercambiador. 2 tubos con malla periódica.	46
Tabla 13. Variación porcentual de la caída de temperatura para las dos mallas del modelo de un tubo.....	125
Tabla 14. Variación porcentual de la temperatura media para las distintas mallas del modelo de dos tubos.	127
Tabla 15. Comparación entre los modelos de 1 y 2 tubos con malla simétrica.	128
Tabla 16. Comparación entre los modelos de 1 y 2 tubos con malla periódica.....	129
Tabla 17. Presupuesto del software.	137
Tabla 18. Presupuesto de los recursos humanos.	137
Tabla 19. Presupuesto de los materiales e instrumentos usados.	138

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ec. 1.....	14
Ec. 2.....	14
Ec. 3.....	14
Ec. 4.....	14
Ec. 5.....	15
Ec. 6.....	16
Ec. 7.....	16
Ec. 8.....	16
Ec. 9.....	16
Ec. 10.....	17
Ec. 11.....	17
Ec. 12.....	17
Ec. 13.....	17
Ec. 14.....	17
Ec. 15.....	17
Ec. 16.....	17
Ec. 17.....	17
Ec. 18.....	17
Ec. 19.....	17
Ec. 20.....	18
Ec. 21.....	18
Ec. 22.....	18
Ec. 23.....	18
Ec. 24.....	18
Ec. 25.....	18
Ec. 26.....	27
Ec. 27.....	27
Ec. 28.....	27
Ec. 29.....	32
Ec. 30.....	33
Ec. 31.....	34
Ec. 32.....	35
Ec. 33.....	37

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

1. Objeto, motivación y justificación del trabajo

1.1. Objeto y alcance del trabajo

El objetivo principal de este trabajo es realizar un análisis de la transferencia de calor del radiador de un Citroën Saxo 1.1 SX. Con este fin se ha utilizado el programa SolidWorks en versión 2014, así como el complemento de cálculo Flow Simulation. Se utiliza este software ya que es un apartado del programa SolidWorks sobre el cual se tiene poca información y se desea comprobar las posibilidades de análisis que permite realizar.

El proyecto tiene una primera parte donde se detalla el modelado del radiador, y otra segunda parte donde se realizan diversas simulaciones en dicho modelo, para obtener distintas situaciones de funcionamiento. Así, han sido analizadas las características físicas y geométricas de dicho radiador para así obtener la capacidad de refrigeración que presenta.

1.2. Motivación del trabajo

La motivación principal para realizar este trabajo es la de superar los créditos de la asignatura de Trabajo Fin de Grado y concluir así con los créditos del Grado en Ingeniería Mecánica, englobada esta, en el Doble Grado en Ingeniería Eléctrica y Mecánica. Para ello, se ha de estudiar y analizar el comportamiento térmico del radiador en distintas condiciones y ver cómo afectan éstas al funcionamiento y, posteriormente, verificar los resultados para conocer su aptitud ante diferentes situaciones de funcionamiento.

1.3. Justificación del trabajo

El estudio térmico realizado, nace de la idea de comprobar la eficacia de los radiadores y de comprobar así un caso real. Se busca con este análisis conocer los resultados y tendencias que sigue el fluido de trabajo con las diferentes condiciones de trabajo en las que funciona un intercambiador, para encontrar así las óptimas condiciones de funcionamiento.

2. Estructura del trabajo

El trabajo se ha dividido en 5 capítulos y 2 anexos, en los que se intentan describir de forma detallada todo el trabajo realizado. Se muestra, a continuación, la distribución del trabajo.

- **Capítulo 1:** Este capítulo sirve como introducción, en el cual se explican los objetivos y se justifica la realización del trabajo.
- **Capítulo 2:** Este capítulo recoge todo el proceso seguido, explicando paso a paso las tareas realizadas. Se comienza por la descripción del desmontaje del intercambiador, así como la caracterización geométrica de las piezas. Sigue con un análisis teórico del problema, finalizando con la puesta en marcha de los

- distintos estudios llevados a cabo en el programa, así como el cálculo de las condiciones de contorno necesarias para la simulación.
- **Capítulo 3:** Aquí se expone de forma detallada el proceso seguido para la realización del modelado 3D del intercambiador. Primero, se explica el proceso llevado a cabo en el software para obtener todas y cada una de las piezas de interés. Después, se realiza un ensamblaje del radiador completo. Y, por último, se exponen los distintos modelos simplificados a los cuales se realizarán el análisis computacional.
 - **Capítulo 4:** Este cuarto capítulo se centra en la configuración del complemento Flow Simulation para poder realizar los análisis en cuestión. Se parten de los modelos, y de las condiciones de contorno ya calculadas en el capítulo 2, para realizar un estudio en profundidad.
 - **Capítulo 5:** Por último, se exponen tanto el análisis de resultados como las conclusiones, tanto generales como específicas del análisis realizado. Se dedica un apartado, también a mostrar las distintas líneas de futuros trabajos.
 - **Referencias bibliográficas:** Se expone en este punto la distinta bibliografía y documentos consultados.
 - **Glosario:** Recopilación alfabética de aquellos términos más importantes y menos conocidos.
 - **Anexo 1:** Presupuesto. Muestra el coste que tendría el trabajo realizado.
 - **Planos.** Se muestran los distintos planos de fabricación de todas y cada una de las piezas.

3. Diagrama de Gantt

El diagrama de Gantt, que muestra la distribución temporal de las distintas actividades del proyecto, se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Diagrama de Gantt del trabajo.

	sept.	oct.	nov.	dic.	en.	feb.	mzo.	abr.	my.	jun.	jul.	ag.	sept.
1. Comienzo del proyecto													
Propuesta y análisis de viabilidad	■												
Elección del intercambiador	■												
2. Modelización													
Desmontaje del intercambiador		■	■										
Caracterización de las piezas			■	■									
Modelización del ensamblaje				■									
3. Simulación térmica													
Cálculo variables de entrada				■									
Simulación del primer modelo				■	■								
Simulación del segundo modelo					■	■	■						
Análisis de convergencia					■								
Simulación del tercer modelo							■	■	■				
Análisis de resultados										■			
4. Documentación													
Redacción del documento			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Recopilación de documentación		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Preparación de la defensa													■

Capítulo 2: MEMORIA

1. Conocimientos previos

1.1. Conocimientos metrológicos

1.1.1. Utilización del calibre o pie de rey.

Este instrumento tiene una precisión hasta las décimas de milímetro, por lo que conviene entender su uso, ya que todas las mediciones efectuadas se han realizado con él.

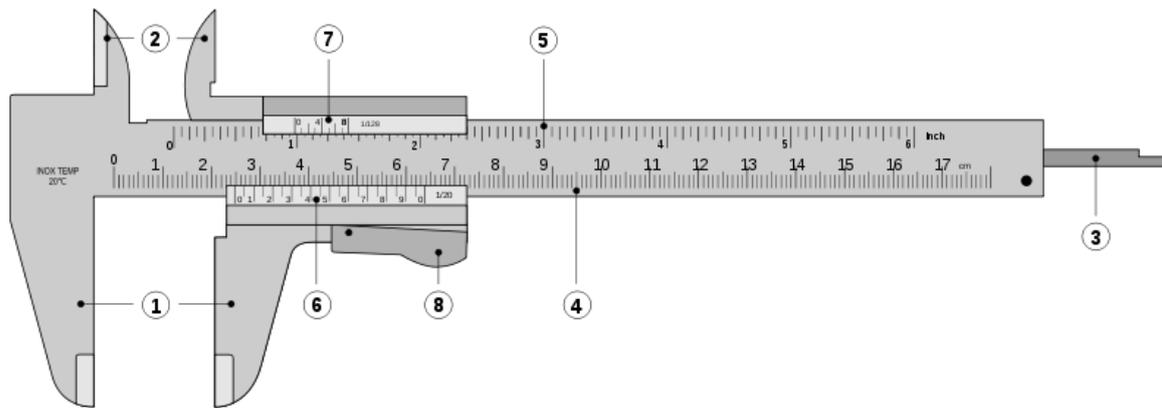


Figura 1. Calibre o pie de rey

Como se puede observar en la Figura 1, el calibre consta de diversos elementos que permiten realizar casi cualquier tipo de medición. Se tiene el elemento 1, con el cual se pueden medir dimensiones externas, espesores, etc. Gracias al elemento 2, se pueden realizar mediciones de dimensiones internas, como el diámetro interno de tubos. El elemento 3 permite medir profundidades de, por ejemplo, un agujero ciego, sólo hay que introducir la guía hasta que ésta toque el fondo.

Este elemento de medición posee una doble escala. La primera, marcada con el número 4 en la Figura 1, permite visualizar la parte entera de la medición, en milímetros. La segunda, marcada con el número 6 en la figura, permite visualizar hasta las décimas de milímetro.

Al realizar una medición, generalmente, el 0 de la escala inferior no coincide exactamente con un número de la escala superior, sino que queda ligeramente desplazado. Se toma como parte entera al número inmediatamente a la izquierda del 0 de la escala inferior, y como parte decimal, aquel número de la escala inferior que quede alineado con una marca de la escala superior. Lo anterior es válido, se mida con el elemento que se mida del calibre.

Por lo general, todo calibre posee también un freno, el elemento 8 de la Figura 1, con el cual se evita que la medición se altere al retirar el calibre de la pieza a medir para su observación.

También, generalmente, un pie de rey ofrece la medición realizada en pulgadas, elementos 5 y 7 de la Figura 1. El funcionamiento de estas escalas es idéntico al de las escalas en milímetros. Por último, cabe destacar, que toda medición que se ha llevado a cabo, lleva consigo un error de apreciación, por lo que, en aquellos elementos más delicados, como son las aletas, por ejemplo, se han realizado múltiples mediciones para reducir y acotar de la forma más amplia posible, el error cometido.

1.1.2. Utilización del micrómetro

Cuando las dimensiones que se han de medir son comparables a los errores que se cometen con el pie de rey, se ha de utilizar un instrumento más preciso, que permita una modelización más exacta.

El uso de este dispositivo es relativamente simple, posee dos palpadores entre los cuales se ha de situar el elemento a medir. Tras esto, se aproxima el tambor móvil. Por último, con el trinquete se realiza una última aproximación la cual aplica 5 N/m^2 , para realizar así una medición precisa. Figura 2.



Figura 2. Micrómetro MITUTOYO digital

Tras este procedimiento el resultado de la medición aparecerá reflejado en la pantalla que posee. Antes de realizar la medida, se han de aproximar totalmente la espiga hacia el tope y asegurarse de que el display refleja una medición de 0.000 mm. De esta forma, se consigue que la medición sea correcta, y más precisa que con el pie de rey.

1.1.3. Utilización del proyector de perfiles

Este dispositivo se asemeja al funcionamiento de un microscopio, de hecho, tiene una lente de 20 aumentos, que permite medir con detalle el objeto en cuestión. El funcionamiento es el siguiente, se ha de colocar la pieza a medir en una base iluminada uniformemente. Esta luz genera una sombra la cual es captada por la lente que aumenta el tamaño de esta para mostrarla en la pantalla, la cual está graduada con una circunferencia goniométrica en su perímetro solidaria a una cruz filar que permite realizar la medición entre dos puntos. Se trabaja en proyección episcópica.

El dispositivo que se puede observar en la Figura 3, es un proyector de perfiles Mitutoyo PJ 300, modelo que ha sido el utilizado para la medición de, en este caso, la geometría de la aleta.



Figura 3. Proyector de perfiles MITUTOYO PJ 300.

Este aparato posee una mesa móvil, y unos comparadores digitales en los dos carros que permiten mover el soporte que sujeta la base de apoyo. Gracias a los dos comparadores, podemos fijar unos ejes coordenados y realizar las mediciones oportunas de los puntos, referenciado siempre dicho origen, fijado previamente en un punto significativo de la proyección, esto es, una esquina, un borde, etc.

Con esta configuración, se puede tomar un carro como eje X, y el otro como eje Y. Fijar un origen de coordenadas, y empezar a medir gracias a los comparadores situados en los carros y a la óptica, que permite visualizar la geometría de la proyección de la pieza en la pantalla.

De esta forma, se puede generar una nube de puntos del objeto a medir y así generar la geometría ajustado líneas, y curvas a los puntos en cuestión.

En la ampliación que se ve en la Figura 3, se puede visualizar los dos comparadores de los que se ha hablado. La pieza a medir se sitúa en la parte circular iluminada de la mesa. De esta forma llegará la proyección en forma de sombra a la lente situada justo encima.

1.2. Funcionamiento teórico de un MEP de 4T

Se va a realizar una descripción teórica del funcionamiento teórico de un motor que sigue el ciclo Otto, esto es, un Motor de Encendido Provocado, o como generalmente se les conoce, motores de gasolina.

Este tipo de motores generan trabajo realizando un ciclo de expansión y compresión de una mezcla de combustible que cede el calor dentro de la cámara de combustión, por lo

que se puede clasificar como motor de combustión interna, y por realizarse los procesos con un mecanismo pistón, biela, manivela, se puede decir que es un motor de combustión interna alternativo.

El ciclo de este tipo de motores es ampliamente conocido: Admisión, Compresión, Explosión y Escape. Se tienen dos carreras para realizar los cuatro tiempos, en la primera, se realiza la admisión y la compresión de la mezcla de combustible, la mezcla se hace explotar a través de un aporte externo de energía (generalmente, en motores modernos, la chispa que salta entre los electrodos de una bujía), y por último se realiza el escape de los gases, completando así la segunda carrera del pistón [1].

1.2.1. Ciclo Otto

Es con este ciclo con el que se caracteriza teóricamente a los motores de combustión interna de encendido provocado, supone una idealización y, por lo tanto, su estudio nos da una referencia de las máximas características que podrá tener cualquier motor que siga dicho ciclo termodinámico, entendiendo características como, rendimiento, calor cedido, calor aportado, etc.

El proceso consta de cuatro procesos termodinámicos ideal, internamente reversibles:

- Proceso 1-2: Compresión isoentrópica, cuando el pistón va desde el punto muerto inferior hasta el punto muerto superior.
- Proceso 2-3: Calentamiento isocórico, el aire absorbe calor a volumen constante. Representa la ignición de la mezcla y una combustión instantánea.
- Proceso 3-4: Expansión isoentrópica, en la cual el gas cede trabajo al motor.
- Proceso 4-1: Enfriamiento isocórico, el aire cede el calor mientras el pistón está en el punto muerto superior. (Escape).

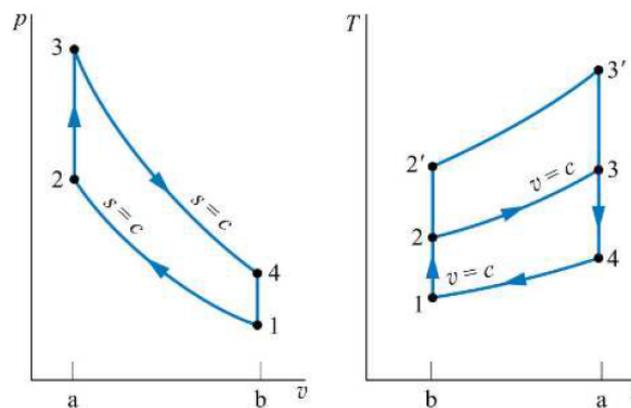


Figura 4. Ciclo de aire estándar Otto ideal

El ciclo Otto de aire estándar presenta de dos procesos de transferencia de calor y otros dos de cesión y absorción de trabajo. (Procesos 2-3 y 4-1, y procesos 1-2 y 3-4, respectivamente). El área interna del ciclo, representa el trabajo neto que cede el motor en su funcionamiento. Figura 4.

El sistema de refrigeración de un motor asegura que la temperatura del punto 1 sea óptima para poder obtener un rendimiento adecuado del motor, tan importante es que, si se

prescindiera del sistema de refrigeración, el motor de cualquier vehículo, se sobrecalentaría y fallaría.

1.2.2. Elementos constructivos de un motor de gasolina.

Los elementos constructivos de los motores de combustión interna alternativos, de forma general, se puede dividir en:

- Elementos estructurales: Bloque motor, culata y envolventes.
- Sistema de distribución.
- Tren alternativo.
- Sistemas auxiliares
- Sistemas de refrigeración y engrase.

Elementos estructurales

Como se ha dicho, se pueden englobar dentro de este punto, tanto a la culata, como el bloque motor, y las envolventes de ambos elementos.

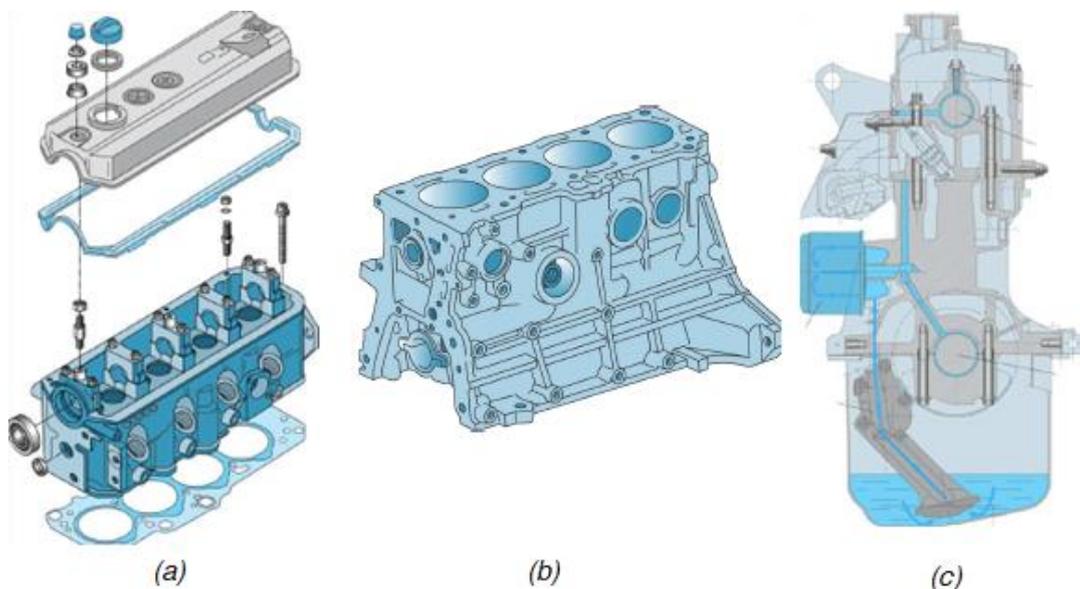


Figura 5. Elementos estructurales del motor. (a) Culata. (b) Bloque motor. (c) Envolventes. Cárter.

La culata, es de los elementos más complejos del motor. Como primera función, tiene la de cerrar al bloque motor por la parte superior. Aloja una gran cantidad de elementos: válvulas, resortes, inyectores, bujías, balancines, árboles de levas, colectores de admisión y de escape... y también tiene muchos orificios y conductos que sirven tanto para el sistema de admisión y escape de gases como para refrigeración. Figura 5.

El bloque motor es el elemento del motor donde van mecanizados los cilindros, sirve como elemento estructural de todo el motor, pues en él, se unen la mayoría de los elementos restantes del motor. Figura 5.

Las envolventes sirven como elementos protectores del motor. La más destacable es el cárter, cierra el motor por la parte inferior y se usa como depósito de aceite para la correcta lubricación de los elementos móviles del motor. Figura 5.

Sistema de distribución.

Es el sistema encargado de regular la salida y la entrada de gases, controlando así la apertura y el cierre de las válvulas de admisión y escape, se compone:

- Árbol de levas y un sistema de transmisión que controla las aperturas y cierres de válvulas.
- Válvulas, guías, asientos y muelles (los cuales cierran las válvulas).
- Empujadores, balancines y sistema de reglaje de las válvulas.

Un mal relaje de este sistema provoca un fallo catastrófico del motor. Figura 6.

Tren alternativo.

Es el conjunto de elementos del motor que transforma el movimiento giratorio en alternativo dentro de un motor. No se compone únicamente del pistón, la biela y la manivela, sino que existen también el cigüeñal y el volante motor, éste último, regulariza el régimen del motor, pudiendo obtenerse del mismo, par y potencia prácticamente continuos, sin ningún salto. Figura 6.

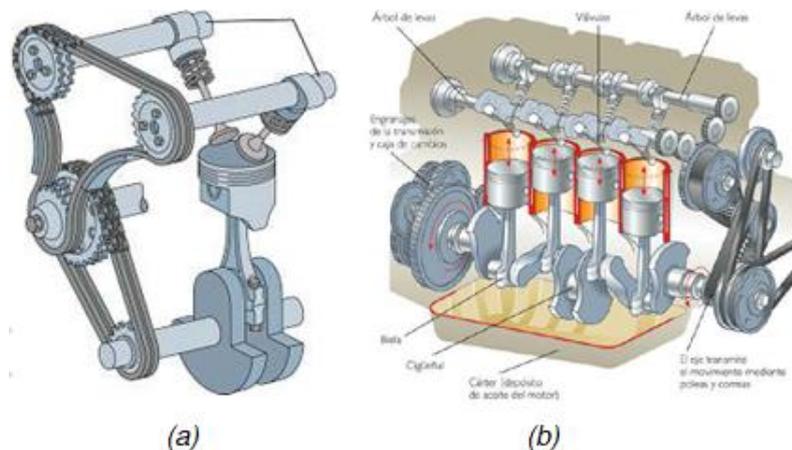


Figura 6. (a) Sistema de distribución. (b) Tren alternativo.

Sistemas auxiliares.

En este punto se pueden englobar todos los elementos que consumen potencia, esto es, la bomba de aceite, la bomba de combustible, el alternador, hasta incluso el sistema electrónico de control. Tienen funciones auxiliares que ayudan al funcionamiento correcto del motor o incluso lo modifican en ciertas circunstancias.

Refrigeración y engrase.

En función del sistema de refrigeración, se hace llegar el aceite a cada una de los elementos internos del motor, ya sea mediante barboteo, o por la pulverización de aceite a presión. El cárter puede actuar únicamente como depósito de aceite de lubricación. El cigüeñal está inmerso en dicho aceite lo que permite que los elementos del tren alternativos estén engrasados de forma correcta, esta parte, no consume demasiada potencia del motor.

Por otro lado, se encuentra el sistema de refrigeración del motor. Este sistema ayuda a que la temperatura del motor no sobrepase un determinado valor a partir del cual su funcionamiento y durabilidad se verían comprometidos. Pero no todo son ventajas, sino que también, este sistema, hace que el proceso de combustión sea menos adiabático, generando pérdidas de calor y disminuyendo la potencia y el rendimiento.

El radiador sobre el cual se ha realizado el estudio, forma parte del sistema de refrigeración del motor, por lo cual, es vital un correcto diseño del mismo para que el motor funcione de una forma correcta.

1.3. Sistema de refrigeración

En la figura 7, se puede observar el circuito de refrigeración de un automóvil, este circuito tiene por objeto garantizar la durabilidad de los materiales que componen el motor, además de garantizar la durabilidad de los aceites que contiene en su interior. El sistema de refrigeración acota los valores de temperatura de trabajo a valores asumibles por los distintos elementos del motor, evacuando la energía, en forma de calor que pudieran dañar las distintas partes metálicas.

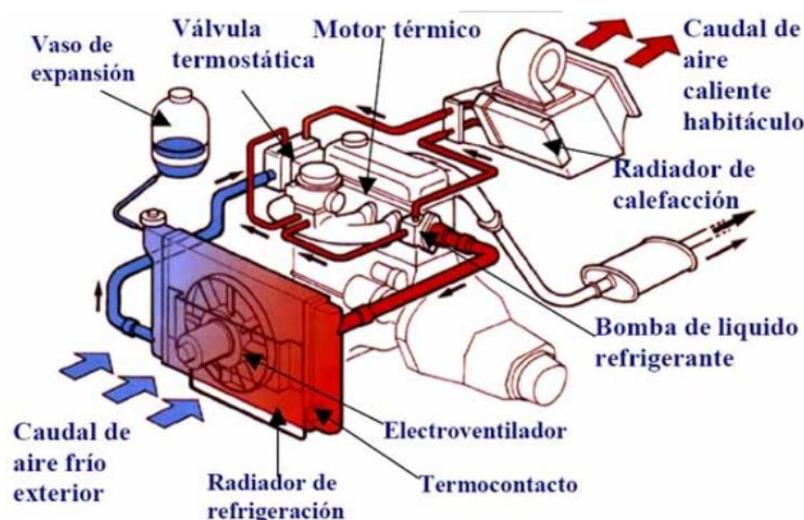


Figura 7. Circuito de refrigeración de un automóvil

Este sistema de refrigeración es del tipo: “por líquido”, el cual es habitualmente usado en los motores de los automóviles, empleándose como fluido caloportador, agua y líquidos (generalmente agua con un aditivo anticongelante). El sistema no es más que un intermediario entre el ambiente y el motor, pues será, en última instancia, a donde desembocará el flujo de calor.

El mecanismo de transmisión dominante es el de convección, pues el radiador no es más que un intercambiador de aletas de flujo cruzado.

En la Figura 7, se tiene un sistema genérico, su funcionamiento es el siguiente: el fluido caloportador es impulsado por una bomba, este líquido pasa a través de la culata y el bloque motor calentándose y enfriando a ambos elementos; tras eso pasa a través de la válvula termostática, que sirve como sistema de control de temperatura, esta válvula regula también los flujos de agua que van a la bomba de agua (si está fría) o al radiador

(si la temperatura del agua es más alta). El mencionado radiador, generalmente, es de flujo cruzado, dispone de un ventilador accionado eléctricamente cuando las temperaturas del fluido que cruza el intercambiador son demasiado altas. Como último elemento, se tiene el vaso de expansión, que sirve de depósito de relleno, para que el circuito esté siempre lleno de líquido, y para aumentar la presión del fluido, elevando así el punto de ebullición.

En el caso de los intercambiadores de flujo cruzado, el líquido caloportador que circula por el interior del refrigerador suele experimentar una bajada de su temperatura del orden de los 6 a 12 °C.

1.4. Intercambiadores

Como se ha visto en los puntos anteriores, el sistema de refrigeración necesita de un intercambiador el cual permita la cesión de calor al aire por parte del fluido caloportador. En este punto se va a realizar un análisis teórico de este elemento. Este análisis va a abarcar desde los tipos de intercambiadores, hasta la modelización teórica de los mismos.

1.4.1. Clasificación

Atendiendo a la forma de transmisión de calor, y en la forma geométrica del elemento que permite separar los fluidos en el caso de transmisión directa [2]:

1. Transmisión indirecta: dos fluidos y un medio sólido que no separa.
 - a. Regenerador.
2. Transmisión directa: dos fluidos separados por un elemento.
 - a. Intercambiadores de tubos.
 - i. De tubo liso.
 1. Zig-zag.
 2. Haces tubulares.
 3. Serpentin.
 - ii. De tubo con aletas.
 - iii. De doble tubo.
 1. Sencillo.
 2. Corrugado.
 - iv. Multitubulares.
 - b. Intercambiadores de placas.
 - i. Placas selladas.
 - ii. Placas soldadas.

Transmisión directa

Regeneradores

Tanto el fluido caliente como el frío discurren a lo largo del dispositivo, cediendo calor el uno al otro de forma alternativa. El medio sólido ha de conseguir que la mezcla entre estos dos elementos sea la menor posible.

El medio sólido recibe y libera la energía térmica de forma alternativa. Es muy importante su forma. Como aplicación práctica, se puede destacar su uso en los motores Stirling.

Transmisión directa. Intercambiadores de tubo.

Intercambiadores de tubo liso

Son los más sencillos, solo tienen una pared lisa cilíndrica que sirve de separador entre los dos fluidos. Un fluido circula dentro del conducto y el otro circula por fuera. La longitud de estos tubos ha de ser muy grande para, de esta forma, conseguir una buena superficie en la que se produzca la transferencia de calor.

Una variante de este tipo, son los intercambiadores de haces tubulares, en los cuales los tubos paralelos van soldados en sus extremos a unos colectores de diámetro mayor.

Intercambiadores de serpentín

Como se puede ver en la Figura 8, este tipo de intercambiadores está compuesto por un tubo liso arrollado en espiral y una carcasa contenedora. De esta manera se evita el uso de codos y colectores. Son eficientes para el almacenamiento de líquidos que se han de enfriar o calentar.

Intercambiadores de tubo con aletas

En la Figura 8, se puede apreciar la configuración de este tipo de intercambiadores. Son de flujo cruzado, y los tubos están dispuestos según un serpentín plano, acoplados en una o varias capas. La misión de las aletas es, la de aumentar la cantidad de calor transmitida entre los dos flujos, ya que la superficie de contacto aumenta.

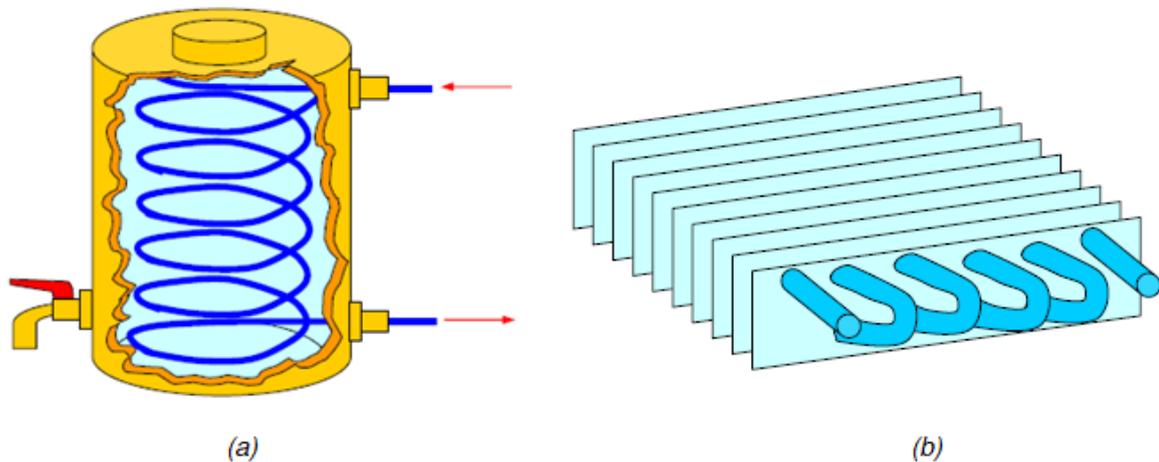


Figura 8. Intercambiadores: (a) de serpentín, (b) de tubo con aletas [2]

Intercambiadores de doble tubo

Es el intercambiador más sencillo, está constituido por dos tubos de diferente diámetro, montados coaxialmente. Por el tubo interno circula uno de los fluidos, mientras el otro circula por el espacio anular.

Como se puede ver en la Figura 9, existen dos configuraciones de este tipo de intercambiadores, en el caso a), se puede observar que tanto el fluido que circula por el tubo interior, como el fluido que circula por el espacio anular, discurren en la misma dirección. En esta configuración, se dice que el flujo es paralelo. En cambio, si discurre

uno en dirección contraria al otro, se dice que el flujo es a contracorriente, tal y como se puede ver en la parte b) de la misma figura.

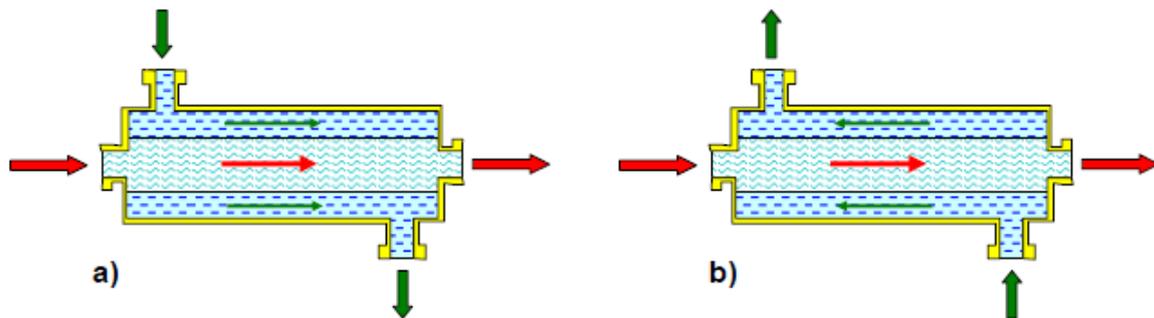


Figura 9. Intercambiadores de doble tubo: a) Flujo paralelo; b) Flujo en contracorriente

Intercambiadores multitubulares

El principio de funcionamiento es el mismo que en el caso anterior, pero en este tipo de intercambiador existe más de un tubo en el interior de la carcasa.

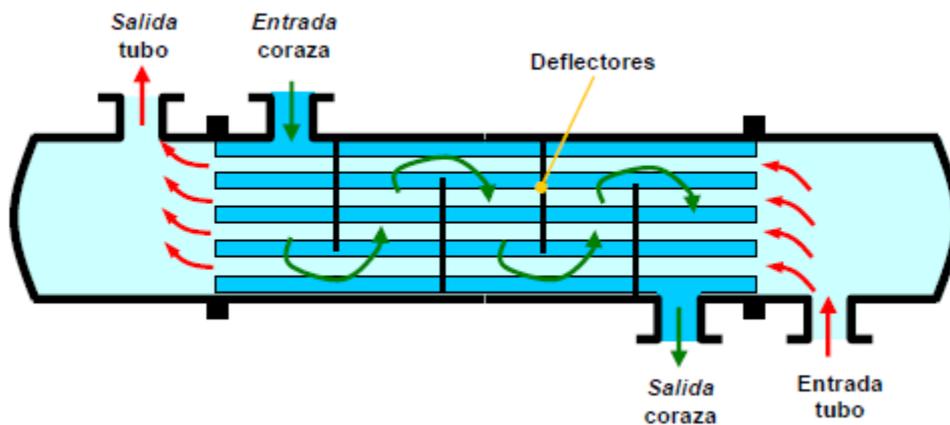


Figura 10. Intercambiador de carcasa y tubo [2]

Como se puede ver en la Figura 10, en este tipo de intercambiador existen varios pasos de tubo por un solo paso por carcasa. Para aumentar la transferencia de calor, o lo que es lo mismo, el coeficiente de convección, se instalan una serie de deflectores al paso por carcasa. Estos deflectores también sirven como apoyo de los tubos interiores, para que no pierdan su posición.

Transmisión directa. Intercambiadores de placas.

Intercambiadores de placas selladas.

En este tipo de intercambiadores, las placas están unidas mecánicamente mediante una corruga, es decir, las placas están estampadas corrugadas y montadas sobre un bastidor. Al estar, también, comprimidas entre sí, forman un bloque. Estas placas constituyen una única pared maciza, la cual está mojada por los dos fluidos.

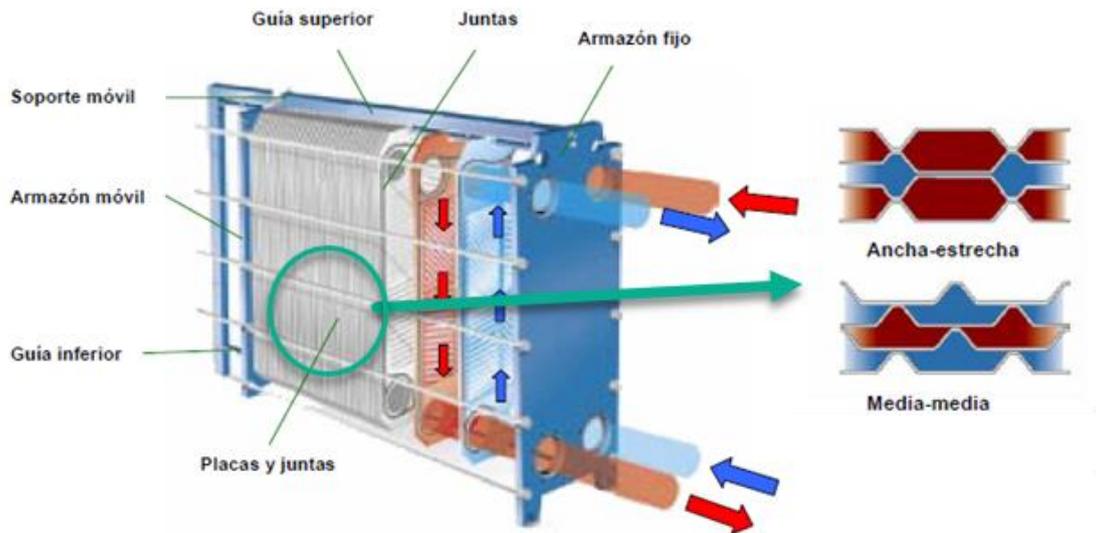


Figura 11. Intercambiador de placas selladas. [2]

En la Figura 11, se puede observar uno de estos intercambiadores, el funcionamiento es el siguiente, por el tubo inferior derecho entra el fluido frío, que circula por placas alternas, de forma que este asciende por el intercambiador. Por el tubo superior izquierdo entra el fluido caliente el cual discurre por las placas alternas por las que no circula el fluido frío, de forma que este desciende por el intercambiador.

Las placas por las que circula el fluido caliente quedan pegadas a aquellas por las que circula el fluido frío, de forma que se produce la transferencia de calor entre ambos fluidos. La corruga y el estampado de las placas permiten que la superficie de contacto aumente, aumentando así la transferencia de calor entre fluidos.

Intercambiadores de placas soldadas

El principio de funcionamiento es el mismo que en el caso anterior. Cada circuito está completamente aislado, y al estar soldados permiten el funcionamiento a elevadas temperaturas y presiones.

1.4.2. Intercambiadores de aletas de flujo cruzado compactos

Dentro de los intercambiadores de aletas, se puede destacar aquellos en los que un flujo discurre perpendicularmente al otro. Este tipo de intercambiadores se llaman de flujo cruzado, y es precisamente el tipo de intercambiador en el que se centra la temática de este trabajo. Además, se puede decir que este tipo de intercambiador es compacto, ya que la relación superficie volumen es significativamente grande.

Se dice, que un intercambiador es compacto cuando la relación área volumen es mayor de $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Este parámetro es notado con la letra griega β .

En el caso que ocupa este trabajo, y obteniendo los datos del software, se tiene que el área de transferencia de calor del intercambiador es de $5,597 \text{ m}^2$, y que el volumen del intercambiador es de $649,588 \text{ cm}^3$. Por lo que, la relación área/volumen queda:

$$\beta = \frac{5,597 \text{ m}^2}{649,588 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 8.617 \text{ m}^2/\text{m}^3 \quad \text{Ec. 1}$$

Se confirma que el intercambiador de flujo cruzado es compacto. Esto es lo normal en automoción, pues interesa que los intercambiadores sean efectivos y ocupen poco espacio.

1.4.3. Análisis térmico de un intercambiador de flujo cruzado compacto.

Para realizar un análisis térmico del intercambiador en cuestión es necesario primero realizar un análisis general de la transferencia de calor en intercambiadores para luego, una vez definidos los parámetros más representativos, pasar a un análisis más especializado del intercambiador de flujo cruzado.

Coeficiente global de transmisión de calor (U)

Este coeficiente mide la cantidad de calor que es capaz, un intercambiador, de transferir desde el fluido más caliente al fluido más frío. Para los intercambiadores tubulares, sin aletas, se puede definir la siguiente ecuación [3]:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

- U : coeficiente global de transmisión de calor [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$].
- A : área de contacto (m^2).
- h : coeficiente de convección [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$].
- D : diámetro del tubo (m).
- k : conductividad térmica del material del tubo [$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$].
- L : longitud del tubo (m).

Los subíndices i y o se refieren a las superficies interna y externa del tubo que se pueden exponer al fluido caliente o al frío.

Por otro lado, también se ha de notar que el cálculo del producto UA no requiere la designación de subíndice pues el producto es idéntico tanto para la superficie interior como exterior del intercambiador. Pero no pasa lo mismo si se menciona aisladamente el parámetro U de transmisión de calor, pues cobra valores distintos en un lado que, en otro, como se demuestra a continuación:

$$U_i \cdot A_i = U_o \cdot A_o \quad \text{Ec. 3}$$

Se tiene que el área interna y el área externa nunca podrán ser iguales, pues todos los tubos tienen un espesor determinado, por lo tanto:

$$U_i \neq U_o \quad \text{Ec. 4}$$

Factor de ensuciamiento

Las expresiones anteriores del coeficiente global de transferencia de calor, son válidas para tubos limpios y sin aletas. Pero la primera condición no se cumple para toda la vida en funcionamiento del intercambiador. Tras un tiempo de uso, la acumulación de incrustaciones o depósitos en el interior de los tubos puede afectar, y afecta, al valor de este coeficiente global de transferencia.

Este fenómeno se cuantifica por el denominado factor de ensuciamiento (R_F), el cual es determinado experimentalmente, y no es más que dos resistencias térmicas a adicionar a la expresión, quedando:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{Fi}}{A_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{R_{Fo}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde el subíndice i representa la pared interior y el subíndice o representa la pared exterior del tubo donde se está estudiando este parámetro. En la tabla siguiente se puede ver los distintos valores del factor de ensuciamiento en función del fluido que se considere:

Tabla 2. Valores recomendados para la resistencia por ensuciamiento. [2]

Fluido	Rf [W/(m ² ·K)]	Fluido	Rf [W/(m ² ·K)]
Aceite combustible	0.005	Vapor (sin aceite)	0.0005
Aceite para transformadores	0.001	Vapor (con aceite)	0.001
Aceites vegetales	0.003	Vapores refrigerantes (con aceite)	0.002
Gasóleo ligero	0.002	Aire comprimido	0.002
Gasóleo pesado	0.003	Gas ácido	0.001
Asfalto	0.005	Vapores solventes	0.001
Gasolina	0.001	Agua marina	0.0005-0.001
Keroseno	0.001	Agua salada	0.001-0.003
Soluciones cáusticas	0.002	Agua de torre de enfriamiento (tratada)	0.001-0.002
Líquidos refrigerantes	0.001	Agua de torre de enfriamiento (sin tratar)	0.002-0.005
Fluido hidráulico	0.001	Agua de río	0.001-0.004
Sales fundidas	0.0005	Agua destilada o condensada en ciclo cerrado	0.0005
Gas de escape de un motor	0.01	Agua tratada de alimentación para calderas	0.0005-0.001

En función de esta tabla, se puede determinar que la resistencia exterior a considerar es de 0.002 W(m²·K) para el caso del aire, pues el aire comprimido es el más parecido y 0.0005 W(m²·K) para el caso del agua, pues se considera que el agua ha de estar destilada cuando se añade al circuito de refrigeración del motor.

Diferencia media de temperatura en los intercambiadores de calor

Método de la variación de temperatura logarítmica media.

Para obtener una expresión que relacione la cantidad de calor cedida por un flujo caliente hacia el flujo frío con la variación de temperaturas que se produce, es necesario recurrir a una extensión de la ley de Newton de enfriamiento, usando el coeficiente de transferencia global U [4].

En la Figura 12, se pueden observar los parámetros que definen la distribución de temperaturas en un intercambiador de flujo paralelo:

- T_c : Temperatura local del flujo caliente.
- T_f : Temperatura local del flujo frío.
- q : Calor transferido entre fluidos.
- A : Área de contacto entre los tubos por los que discurre los flujos.

Los subíndices i , o representan las variables a la entrada y salida de la conducción, respectivamente.

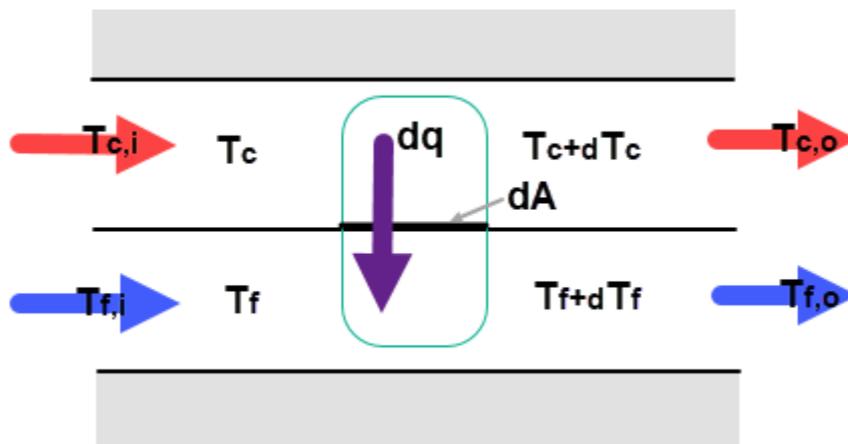


Figura 12. Balances de energía en un intercambiador de flujo paralelo

Del balance de energía de forma diferencial se tiene:

$$dq = -\dot{m}_c \cdot c_{p_c} \cdot dT_c = \dot{m}_f \cdot c_{p_f} \cdot dT_f \quad \text{Ec. 6}$$

Expresando lo mismo en función del coeficiente global de transferencia de calor se tiene:

$$dq = U \cdot dA \cdot (T_c - T_f) = U \cdot dA \cdot \Delta T \quad \text{Ec. 7}$$

Se define también, la diferencia local entre temperaturas como sigue:

$$\Delta T = T_c - T_f \quad \text{Ec. 8}$$

Derivando la ecuación Ec. 8, se tiene:

$$d(\Delta T) = dT_c - dT_f \quad \text{Ec. 9}$$

Despejando de la ecuación Ec. 6 y sustituyendo en la ecuación Ec. 9:

$$dT_c = \frac{-dq}{\dot{m}_c \cdot C_{p_c}}; \quad dT_f = \frac{-dq}{\dot{m}_f \cdot C_{p_f}};$$

$$d(\Delta T) = -\left(\frac{1}{\dot{m}_c \cdot C_{p_c}} + \frac{1}{\dot{m}_f \cdot C_{p_f}}\right) \cdot dq \quad \text{Ec. 10}$$

De la ecuación Ec. 7, se sustituye el valor de dq en la ecuación Ec. 10, obteniéndose lo que sigue:

$$\frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -\left(\frac{1}{\dot{m}_c \cdot C_{p_c}} + \frac{1}{\dot{m}_f \cdot C_{p_f}}\right) \cdot U \cdot dA \quad \text{Ec. 11}$$

Integrando lo anterior entre el estado 1 y 2, se tiene:

$$\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) = -\left(\frac{1}{\dot{m}_c \cdot C_{p_c}} + \frac{1}{\dot{m}_f \cdot C_{p_f}}\right) \cdot U \cdot A \quad \text{Ec. 12}$$

Donde:

$$\Delta T_1 = T_{c,i} - T_{f,i} \quad \text{Ec. 13}$$

$$\Delta T_2 = T_{c,o} - T_{f,o} \quad \text{Ec. 14}$$

Del balance global de calor se tiene que:

$$q = \dot{m}_c \cdot c_{p_c} \cdot (T_{c,i} - T_{c,o}) = \dot{m}_f \cdot c_{p_f} \cdot (T_{f,o} - T_{f,i}) \quad \text{Ec. 15}$$

Sustituyendo la ecuación Ec. 15, en la ecuación Ec. 12, y ordenando se obtiene:

$$\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right) = ((T_{c,o} - T_{f,o}) - (T_{c,i} - T_{f,i})) \cdot \frac{U \cdot A}{q} \quad \text{Ec. 16}$$

Y, reordenando, y sustituyendo las ecuaciones Ec. 13 y Ec. 14, se tiene la expresión buscada:

$$q = UA \cdot \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2/\Delta T_1)} \quad \text{Ec. 17}$$

Si el análisis se realiza en *contraflujo*, la única diferencia tendría que ver con la definición de las temperaturas de entrada y de salida, en cuyo caso serían:

$$\Delta T_1 = T_{c,i} - T_{f,o} \quad \text{Ec. 18}$$

$$\Delta T_2 = T_{c,o} - T_{f,i} \quad \text{Ec. 19}$$

Notar, que estas ecuaciones han de ser corregidas si se está analizando intercambiadores de carcasa y tubo o intercambiadores de flujo cruzado. La forma de realizar esto, es mediante la multiplicación de la variación de temperatura logarítmica media, por un factor F , de corrección. Así, la ecuación Ec. 17, queda:

$$q = UA \cdot F \cdot \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} \quad \text{Ec. 20}$$

Método de la eficiencia

Cuando la temperatura del fluido a la salida del intercambiador es desconocida, el método anterior requiere un proceso iterativo. En este tipo de situaciones, es recomendable usar el método que a continuación se explica. [5]

Se ha de definir la *efectividad de transferencia de calor*, como el cociente entre el calor que intercambia y el máximo que podría intercambiar:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{MÁX}} \quad \text{Ec. 21}$$

El valor del máximo calor que puede transferir un intercambiador se refiere al que intercambia cuando el área de contacto es infinita. La única variable que interviene, entonces es la capacidad calorífica. Aplicando balance de energía se tiene que será el fluido de menor capacidad calorífica el que presente mayor salto térmico. Siguiendo este razonamiento, se puede escribir:

$$Q_{MÁX} = C_{MÍN} \cdot \Delta T_{MÁX} \quad \text{Ec. 22}$$

Se puede demostrar, por otro lado, que el parámetro *efectividad* puede expresarse mediante una función de dos variables: el llamado *número de unidades de transferencia* y el *cociente entre las capacidades caloríficas* de los dos fluidos (ecuación Ec. 23)

$$\varepsilon = f\left(N_{ut}; \frac{C_{MÍN}}{C_{MÁX}}\right) \quad \text{Ec. 23}$$

El número de unidades de transferencia (N_{ut}) es una variable adimensional definida tal y como sigue:

$$N_{ut} = \frac{UA}{C_{MÍN}} \quad \text{Ec. 24}$$

Se tiene la siguiente relación para la efectividad. [5].

$$\varepsilon = \frac{N_{ut}}{\frac{N_{ut}}{1 - e^{-N_{ut}}} + \frac{N_{ut} \cdot \frac{C_{min}}{C_{máx}}}{1 - e^{-N_{ut} \cdot \frac{C_{min}}{C_{máx}}}} - 1} \quad \text{Ec. 25}$$

2. Desmontaje del intercambiador

En este apartado se describe paso a paso el procedimiento seguido para desmontar todas y cada una de las piezas de las que consta el intercambiador en cuestión. En las siguientes figuras se muestran las condiciones iniciales del radiador de agua. Aunque parezca deteriorado, para el objeto que se persigue no reviste gravedad.

En la Figura 13, se puede observar una imagen frontal del radiador, en ella se observan el ventilador, el propio intercambiador y los tanques por donde entra y sale el fluido portador del calor, en este caso, agua.

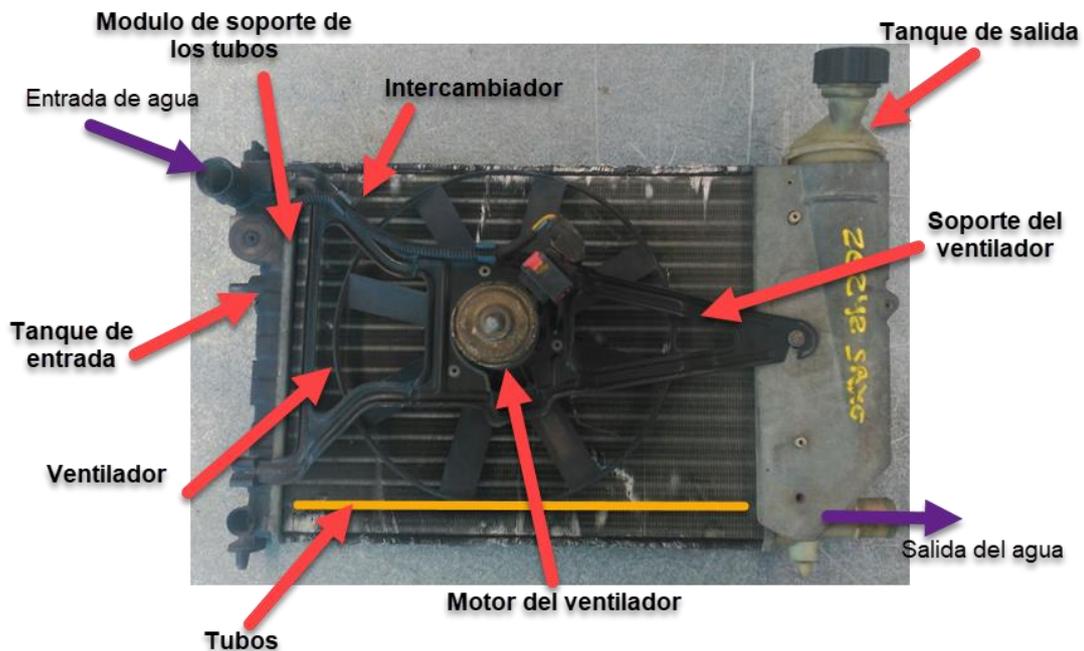


Figura 13. Frontal del radiador, con cada una de sus partes indicadas.



Figura 14. Imágenes laterales y trasera del radiador.

La Figura 14, corresponde con la parte trasera por la que discurre el aire de salida tras haber pasado por el radiador y haber absorbido cierta cantidad de calor proveniente del agua que discurre a través de los tubos del intercambiador. En la misma figura, a cada uno de los lados de la imagen central, se pueden apreciar los dos tanques por los que discurre el agua a la salida y a la entrada, son la conexión con el resto del circuito de refrigeración.

El primer paso para desmontar el radiador será quitar el ventilador y la estructura que lo porta, para lo cual, únicamente hay que desatornillar el tornillo que une la tapa protectora, el tanque de salida y la estructura que soporta el ventilador.

Tras esto, se procede al desmontaje de los tanques de entrada y de salida. Para esto, hay que levantar todas y cada una de las pestañas que rodean a los mismos y tirar de ellos. El proceso se ve reflejado en la Figura 15.

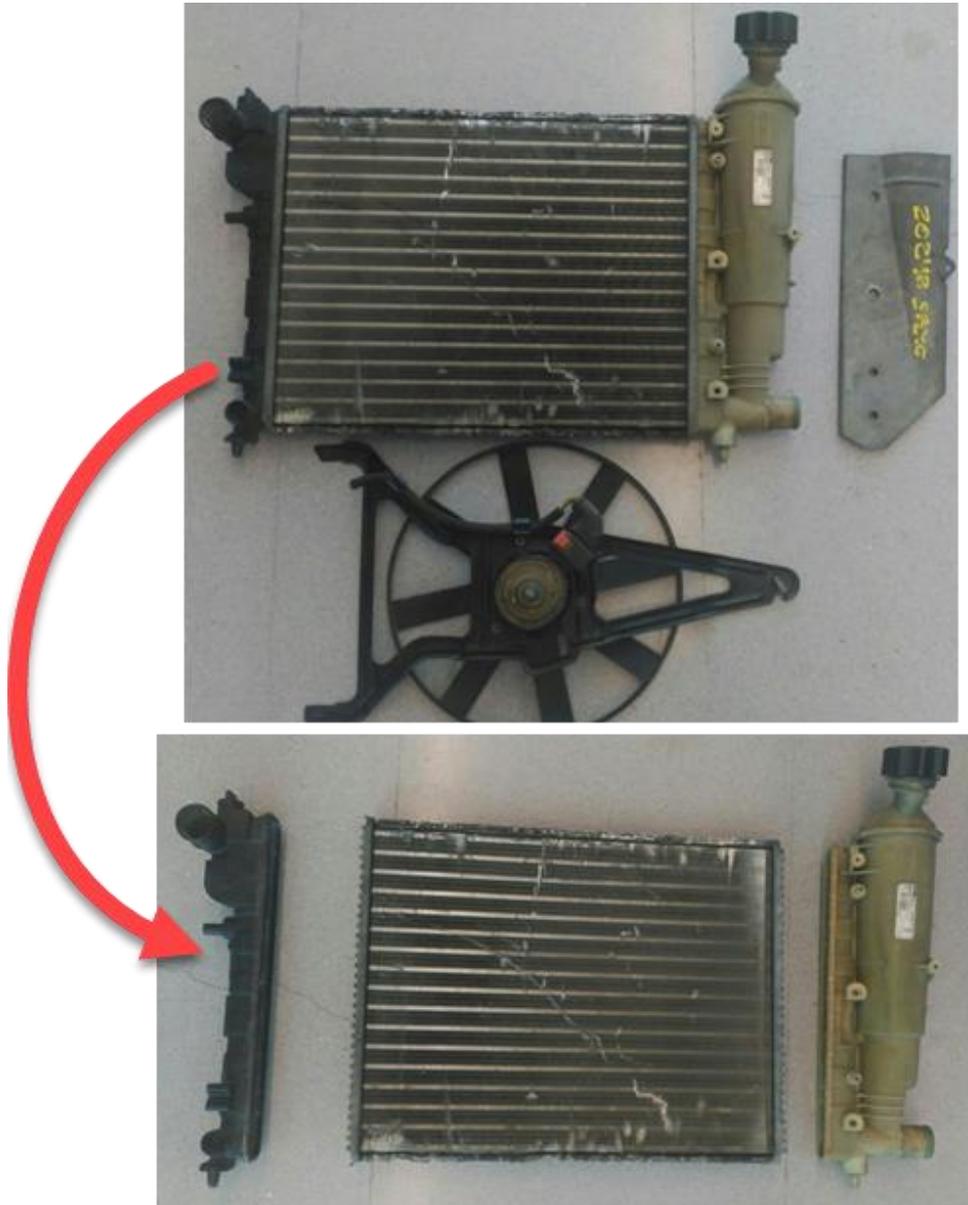


Figura 15. Desmontaje de los tanques, el ventilador y la tapa protectora.

Los tanques hacen de acumuladores del líquido caloportador. Se encargan de que por el circuito del intercambiador nunca falte el susodicho líquido. Así, por lo tanto, será imprescindible que el circuito de refrigeración esté completamente lleno de agua para que el radiador cumpla su función. Los tanques desmontados se ven en la Figura 16.

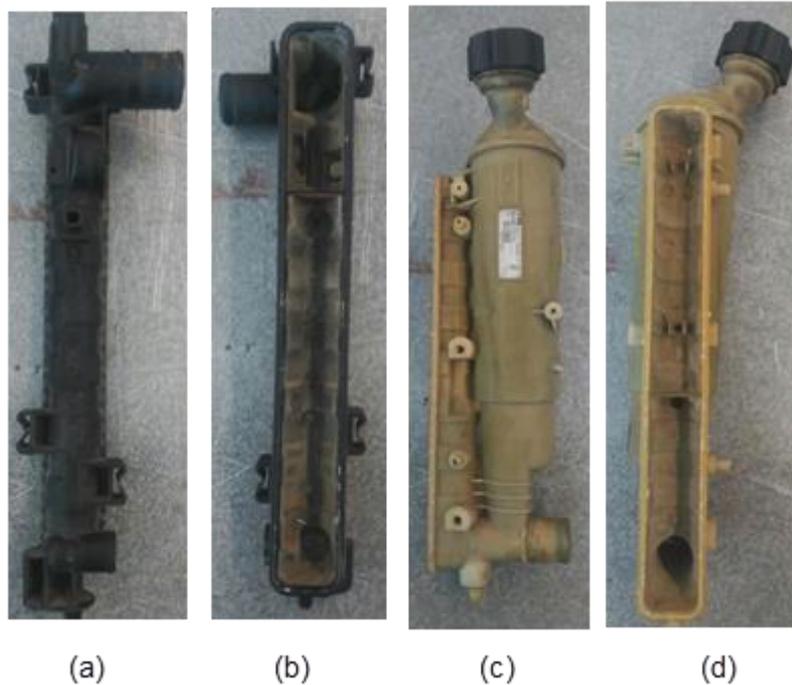


Figura 16. Tanques de entrada (a,b) y tanques de salida (c,d).

Lo siguiente en el proceso de desmontaje es retirar las juntas de estanqueidad que sellan el flujo de agua entre los tanques y los tubos del intercambiador. La extracción de estas partes fue un poco más compleja, y una de las juntas, que tenía una pequeña fisura, al estirar, rompió. Las juntas de estanqueidad se pueden ver en la Figura 17.



Figura 17. Juntas de estanqueidad desmontadas.

Estas juntas estaban adheridas al intercambiador, ya que, tanto la entrada y la salida estaban corroídas como se puede apreciar en la Figura 18.



Figura 18. Módulo de fijación de los tubos corroído.

El siguiente paso es quitar el módulo de fijación. Para esto será necesario realizar dos cortes en el mismo y cortar todas las protrusiones que fijaban los tubos. Figura 19.

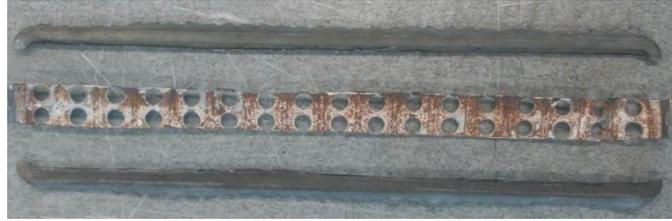


Figura 19. Módulo de fijación cortado.

Tras retirar las partes del módulo de fijación, queda al descubierto las aletas, tal y como se ve en la Figura 20.



Figura 20. Aletas y tubos accesibles para la medición

Por último, en el desmontaje del radiador de agua, queda saber cómo es por dentro el tanque de salida. Para esto, será necesario practicarle una serie de incisiones con las cuales hacer accesible para su medición la geometría del interior de esta pieza. En el caso del tanque de entrada, no es necesaria esta operación, pues su geometría es mucho más simple y se puede medir todo sin tener que realizar corte o sección alguna.

Las secciones que se realizaron en el tanque de salida, se hicieron a lo largo de una serie de líneas que indicaban por donde se había unido las diferentes partes del tanque en su fabricación. Cortando estas uniones se obtienen las partes tal y como salieron de fábrica, lo que facilita su modelado en gran medida.

Como se puede observar en la Figura 21, se realizó el corte con la sierra por la unión entre la tapa y el cuerpo del tanque. También se hubo de realizar un seccionado longitudinal. Esto reveló un elemento intermedio situado en la mitad del tanque que impedía la libre circulación de agua por el interior.



Figura 21. Seccionado del tanque de salida.

3. Modelado en SolidWorks 2014 SP3.0

3.1. Caracterización geométrica de las aletas

Debido a la complejidad geométrica de las aletas, será necesario realizar un estudio metrológico con un micrómetro y un proyector de perfiles para poder caracterizar la geometría de las aletas.

En primera instancia, se midió el espesor de la aleta, extrayendo parte de una de estas y midiendo con el micrómetro en varias zonas, tal y como se ve en la Figura 22.



Figura 22. Medición del espesor de la aleta.

Realizadas estas medidas, se toma 0,065 mm como espesor de aleta finalmente, pues la segunda medición es la más fiable.

Tras esto, se corta, mediante el uso de un cúter de precisión, una pequeña parte representativa de la geometría de la pieza. Se toman dos muestras, una perteneciente a la parte más exterior de la aleta, y otra de la parte interior. Figura 23.

En colaboración con el Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación, se modelizaron las dos muestras mediante el uso de un proyector perfiles. Este instrumento nos da una nube de puntos, los cuales, si los unimos, obtenemos la geometría de las muestras.

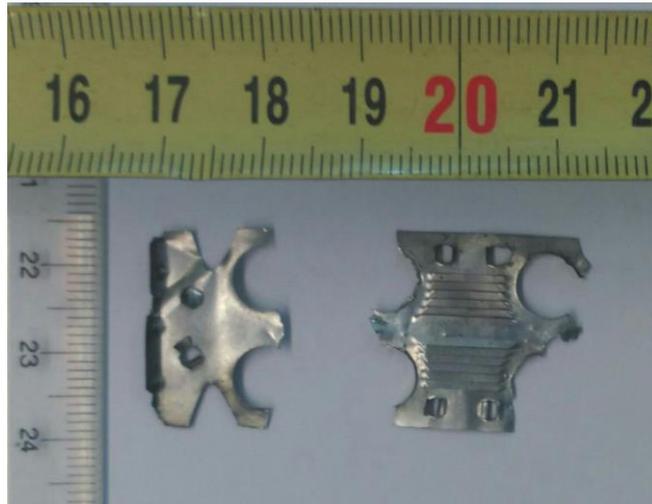


Figura 23. Muestras de la aleta.

Mediante las herramientas pertinentes y, tal y como se explica en el capítulo 3, se van introduciendo los puntos obtenidos del proyector en el software de modelado. Tal y como se puede ver en la Figura 24, se utiliza el equipo en su proyección episcópica.

Este proyector tiene una cruz filar para hacer puntería, la cual se ubica gracias a los carros y los comparadores que tiene instalados. Fijando un sistema de referencia cualquiera se pueden obtener las coordenadas de los puntos que se necesiten con los valores de los comparadores.



Figura 24. Muestra de la pantalla del proyector de perfiles en proyección episcópica.

En el software de modelado se van introduciendo los puntos, de forma que se pueden definir circunferencias introduciendo 3 puntos de la misma, y líneas con 2 puntos. Se caracteriza, de esta manera, tanto la parte más interior, la que está entre los tubos, como la parte exterior. Los resultados de las caracterizaciones se pueden observar en la Figura 25 y en la Figura 26.

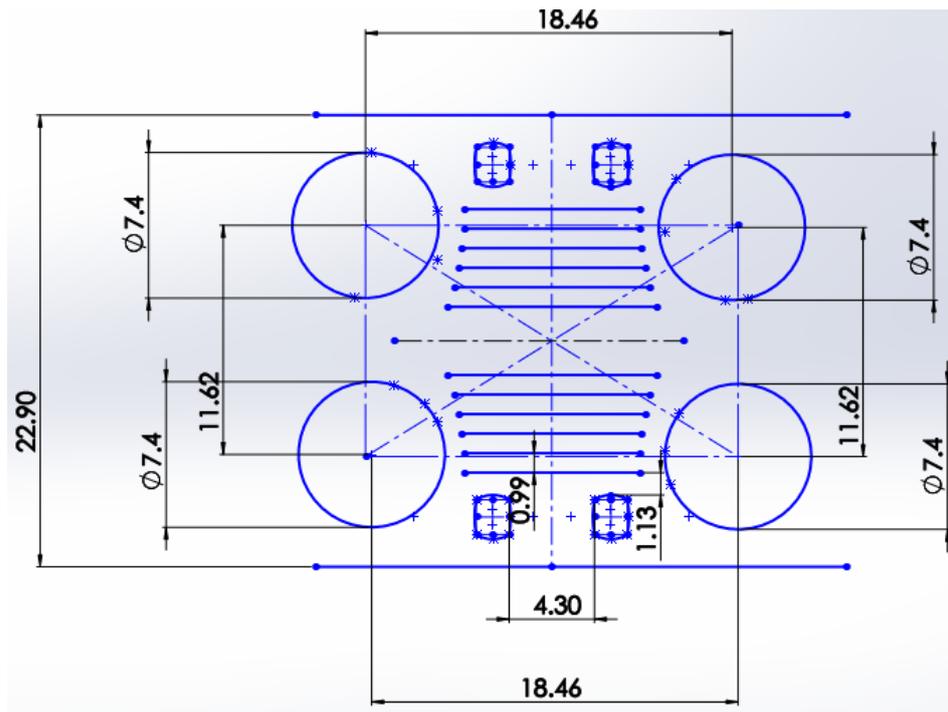


Figura 25. Croquis de la parte interior de las aletas.

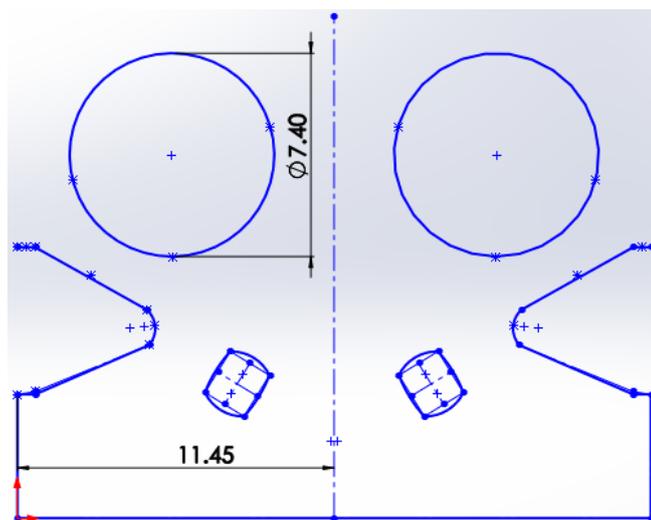


Figura 26. Croquis de la parte exterior de la aleta.

De la Figura 25, se ha de comentar que las líneas definen una pequeña apertura en las aletas. Se representa de esa manera pues es lo que se apreciaba en el proyector, ya que los agujeros son de tamaño muy reducido. La función mecánica de estos es aumentar la superficie de contacto con el flujo de aire y la de generar más turbulencia, lo que aumenta el coeficiente de convección.

3.2. Modelado de las distintas piezas y ensamblaje

Como se ha visto en el punto 2., se ha realizado un despiece completo de la geometría del intercambiador. Pero esto no quiere decir que todas las piezas se vayan a modelar en el software, debido a que algunas de ellas no son necesarias para llevar a cabo la simulación (ventilador, soporte y motor del mismo, tapa de protección y el cableado).

Lo demás se ha modelado tal y como se desarrolla en el capítulo 3. En este punto únicamente se muestra un resultado del modelo final completo Figura 27.



Figura 27. Resultado final del modelado.

4. Simulación térmica y de fluidos

4.1. Cálculo del flujo másico de agua de entrada.

Para comenzar la simulación, se ha de partir de unas condiciones de contorno iniciales, las cuales han sido calculadas a partir de condiciones ideales.

Se ha de calcular el caudal másico de agua de entrada en el radiador, como valor que se mantendrá constante a lo largo de las distintas simulaciones. Para ello, se toma como caída de temperatura entre la entrada y la salida $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. El calor a evacuar por unidad de tiempo se toma igual a la potencia a régimen de par máximo, debido a que será la condición de normal funcionamiento del motor.

Por otro lado, se sabe, que para que el radiador funcione correctamente, el valor de la velocidad media del agua por su interior ha de estar comprendida entre $0,5$ y 3 m/s . Con el límite inferior se asegura una transferencia de calor continua, mientras que el límite superior asegura que no exista excesivo ruido al pasar el agua por las tuberías. Se comprueba que el valor de velocidad esté en este rango.

La curva de par y potencia del vehículo que monta el intercambiador se representa en la Figura 28.

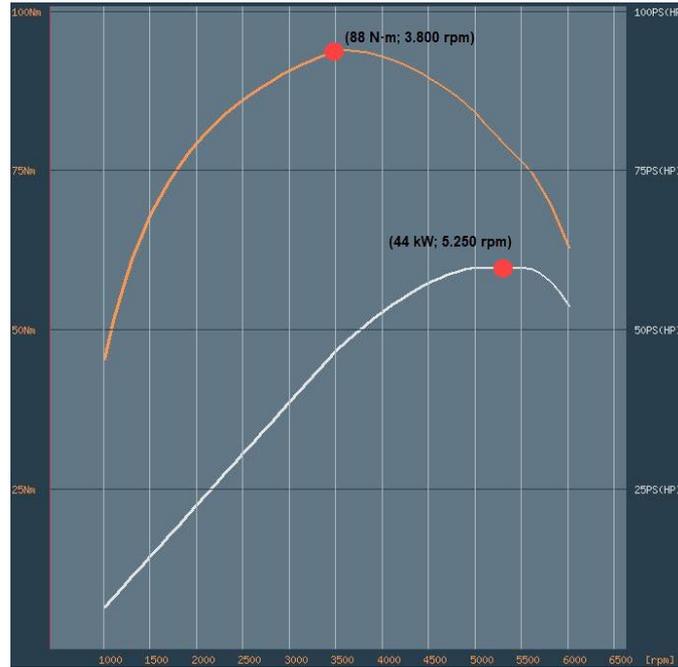


Figura 28. Curva de par (naranja) y potencia (blanco) del Citroën Saxo 1.1 SX [6]

De la curva de par y potencia se extrae que el par máximo es 88 N·m y se da a un régimen de 3.800 rpm. La potencia a intercambiar será:

$$\dot{Q} = N_{M_{MÁX}} = T \cdot \omega = 88 \text{ Nm} \cdot \frac{3800 \cdot 2\pi}{60} \text{ rad/s} = 35 \text{ kW} \quad \text{Ec. 26}$$

Se tiene que el calor específico del agua (c_p) es 4186 J/kg·K, con ese dato y sabiendo que el salto de temperatura (ΔT) son 10 °C, (valor convencional de este valor proporcionado por los fabricantes), se calcula el gasto másico (\dot{m}):

$$\dot{m} = \frac{N_{M_{MÁX}}}{c_p \cdot \Delta T} = \frac{35000 \text{ W}}{4186 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 10 \text{ K}} = 0,8361 \text{ kg/s} \quad \text{Ec. 27}$$

Se tiene, también, que la mayor velocidad del agua se dará en el primer paso por tubo, pues es donde menor número de tubos hay, concretamente, 10. Para calcular la velocidad de paso a través de los mismos se ha de hacer con un flujo másico diez veces inferior el calculado. También se sabe que el diámetro interior de los tubos por los que discurre el agua es de 6,4 mm. Así:

$$\frac{\dot{m}_{tubo}}{\rho} = S \cdot v; \quad \frac{\dot{m}_{tubo}}{\rho} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot v; \quad v = \frac{4\dot{m}_{tubo}}{\rho \pi D^2} \quad \text{Ec. 28}$$

$$v = \frac{4\dot{m}_{tubo}}{\rho \pi D^2} = \frac{4 \cdot 0,08361 \text{ kg/s}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \pi \cdot (6,4 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2} = 2,6 \text{ m/s}$$

En este primer paso, la velocidad del agua, en su paso por los tubos está comprendida entre el intervalo antes definido.

La menor velocidad del agua se dará en los siguientes pasos por tubo, pues el número de tubos aumenta a 12. Así:

$$v = \frac{4\dot{m}_{tubo}}{\rho\pi D^2} = \frac{4 \cdot \frac{0,8361 \frac{kg}{s}}{12}}{1000 \frac{kg}{m^3} \cdot \pi \cdot (6,4 \cdot 10^{-3}m)^2} = 2,17 \text{ m/s}$$

Como se ha comprobado, en cualquier caso, la velocidad media del agua a su paso por los tubos está comprendida en el intervalo definido (de 0,5 hasta 3 m/s). Así, se da por bueno el valor de flujo másico de entrada para las simulaciones.

4.2. Primer modelo de simulación

En este modelo se han suprimido las aletas del modelo, como primera aproximación al problema, pues no se tiene el equipo suficientemente potente para poder arrancar la simulación con el modelo completo, el modelo simulado se puede apreciar en la Figura 29.

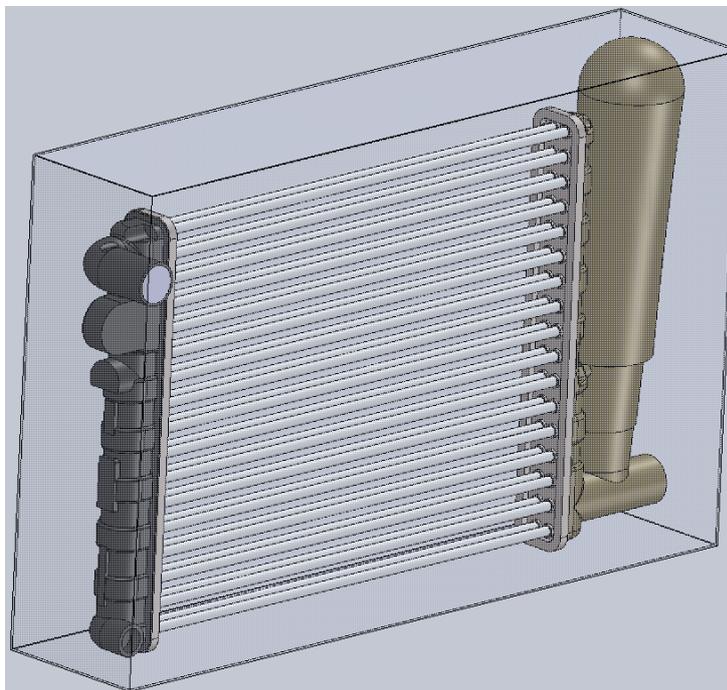


Figura 29. Modelo usado para la primera simulación

Para las condiciones de contorno, se va a fijar una velocidad del vehículo igual a 90 km/h para la primera simulación, la temperatura de entrada del agua al intercambiador de 90 °C, valor habitual de tarado de los termocontactos. Usando el valor de caudal calculado en el apartado anterior, las condiciones de contorno usadas son las siguientes:

- Condiciones iniciales del aire: $p = 101325 \text{ Pa}$; $T = 298,2 \text{ K}$. Velocidad: 90 km/h.
- Condiciones iniciales del agua: $p = 101325 \text{ Pa}$; $T = 363,2 \text{ K}$. Flujo de 0,83612 kg/s.
- Presión atmosférica tanto a la salida del intercambiador como el VC del aire.

Siguiendo los pasos descritos en el capítulo 4, se configura la simulación. Tras tener todas las condiciones de contorno configuradas, se corre la simulación. Ese primer estudio ocupó un total de 150.625 nodos, siendo necesarias un total de 297 iteraciones y un tiempo de cálculo de 1 hora 16 min y 57 segundos.

Realizando un corte transversal en la sección media del modelo, se extrae un gráfico de la distribución de temperaturas del programa. Como se puede ver en la Figura 30, efectivamente, la transferencia de calor se ha realizado. El gráfico de colores representa la temperatura del aire a lo largo de toda la sección seleccionada, mientras que, las flechas superpuestas, representan la velocidad del fluido a su paso por el intercambiador.

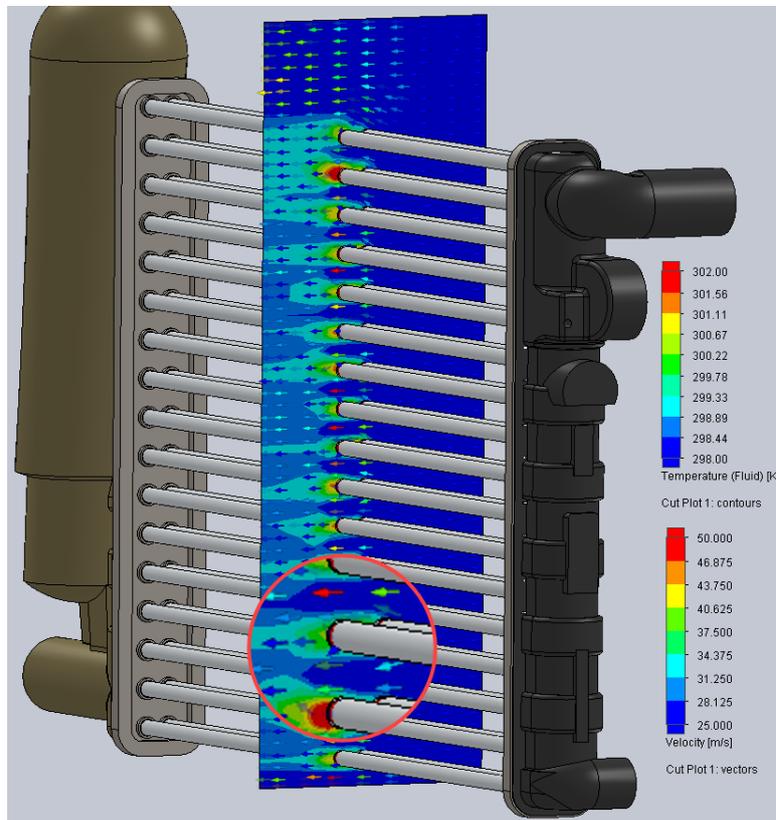


Figura 30. Gráfico de la temperatura y distribución de velocidad del aire en el primer modelo simulado

Como se puede ver en las leyendas de colores, la variación de temperatura no es muy significativa, pues el aire solo se calienta dos grados, mientras que la velocidad del fluido sí aumenta al disminuir la sección de paso. En el detalle ampliado, se hace más evidente lo expuesto. Realizando otro gráfico como el anterior, pero cortando a lo largo de la sección longitudinal, se puede apreciar la variación de la velocidad y temperatura del agua a su paso por el intercambiador.

En la Figura 31, se puede observar la distribución de temperatura a lo largo del intercambiador. En las zonas que han sido magnificadas se pueden observar los cambios de dirección del agua, lo que evidencia de la existencia de tres pasos por tubo del agua en su recorrido por el intercambiador. La caída de temperatura es de 0,9 K tal y como se aprecia en la misma figura. La diferencia entre los distintos colores es muy pequeña para poder visualizar esta pequeña diferencia de temperatura. Por otro lado, como se ha explicado en el capítulo 4, se ha obtenido la potencia evacuada por todos los tubos. Esta potencia es igual a 0,164 W, lo que significa que, la transferencia de calor es insignificante pues prácticamente es nula en relación a la potencia que teóricamente debería evacuar, y que la simplificación realizada al eliminar del modelo todas las aletas hace que la simulación no se ajuste a la realidad.

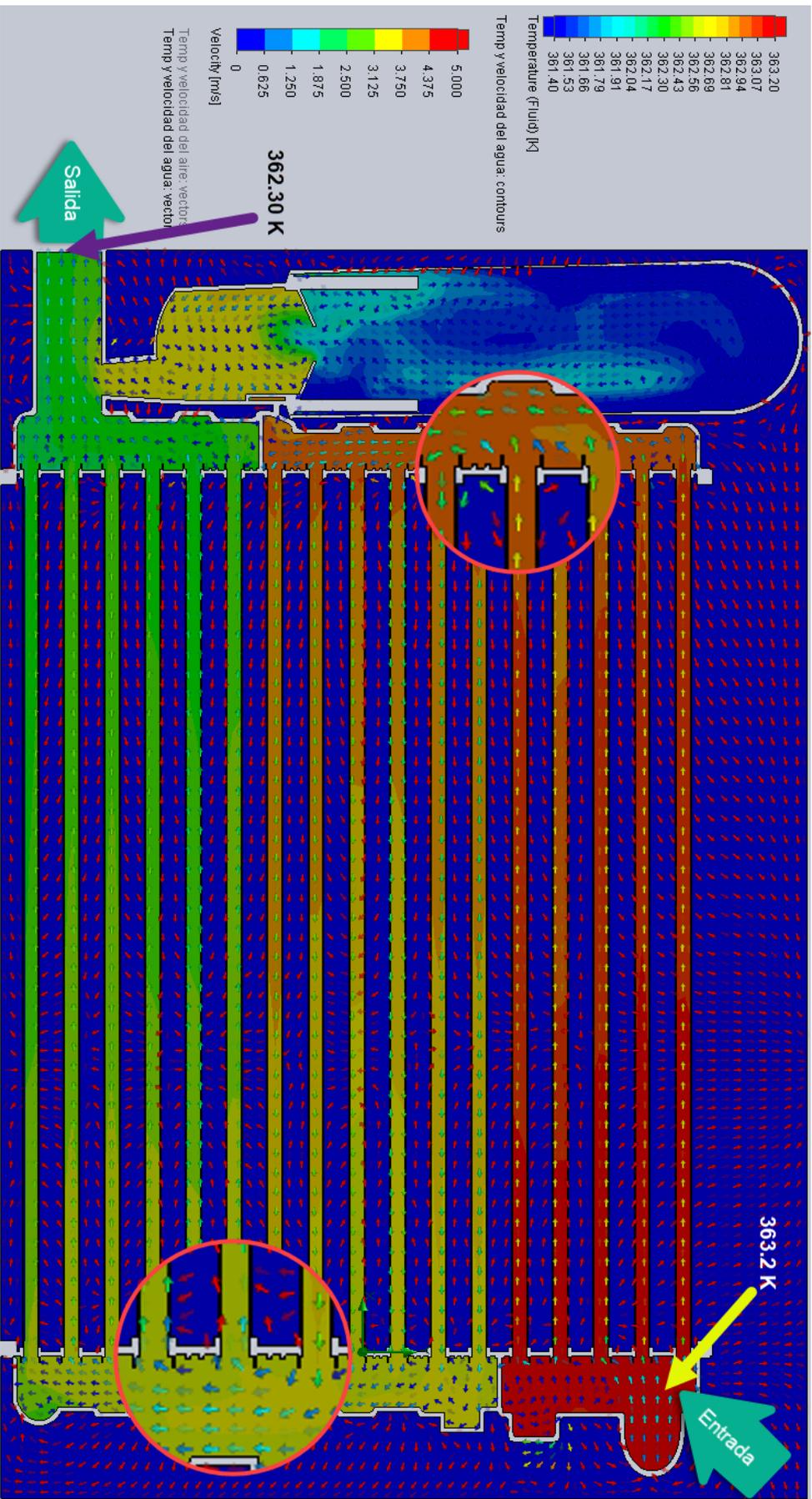


Figura 31. Representación de la temperatura y la velocidad de los fluidos en una sección longitudinal

4.3. Segundo modelo de simulación

La simplificación realizada al eliminar las aletas no se ajusta a la realidad. Es por ello, por lo que, es necesario incluirlas en la simulación. A nivel computacional, no se tienen los recursos necesarios para hacer funcionar el modelo completo con todas las aletas, así que se opta por la realización de un modelo con un solo tubo y con las aletas.

En cuanto las aletas, se han simplificado, y se consideran planas en este modelo, tal y como se explica en los capítulos 3 y 4. El tamaño de la aleta se puede ver en la Figura 32, se ha considerado el área proporcional que le corresponde a cada tubo por separado.

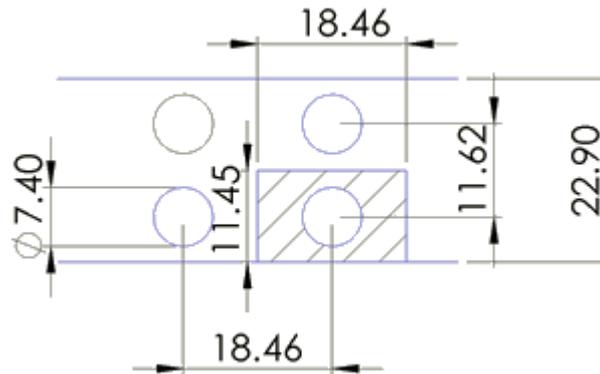


Figura 32. Sección de aleta proporcional para las simulaciones

El modelo a simular se ve en la Figura 33:

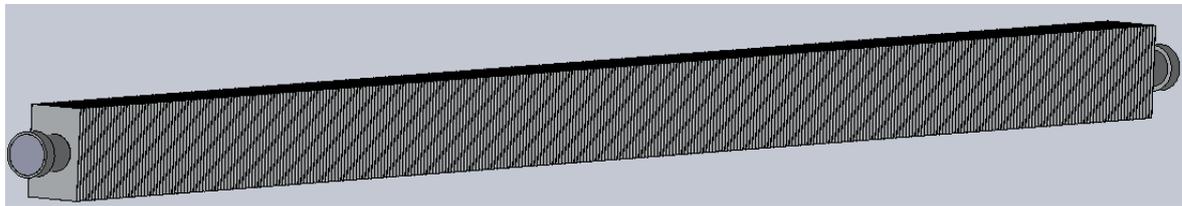


Figura 33. Tubo con aletas

Se han de realizar tres pasos por tubo del fluido que circula en su interior, así que es necesario la realización de tres simulaciones para la obtención de un equivalente del modelo completo.

4.3.1. Estudio de convergencia

En este punto se va a desarrollar el estudio de convergencia necesario para la validación del nivel de malla generada por el software. Debido a las limitaciones de cálculo, solo se va a realizar estudio de convergencia para este modelo, ya que en los demás no se puede llegar a niveles de malla altos que den fiabilidad a los resultados que se obtengan. En cualquier caso, como los modelos comparten, como se verá, grandes similitudes, el análisis realizado en este punto se puede extrapolar a los demás. Para este estudio, se usan las siguientes condiciones de contorno:

- Condiciones iniciales del aire: $p = 101325 \text{ Pa}$; $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Velocidad: 100 km/h.
- Condiciones iniciales del agua: $p = 101325 \text{ Pa}$; $T = 95 \text{ }^\circ\text{C}$. Caudal: 0,083612 kg/s.
- Presión atmosférica tanto a la salida del intercambiador como el VC del aire.

Se generan 4 estudios distintos que comparten las anteriores condiciones de contorno, pero con niveles de mallas distintos, los cuales aumentan progresivamente desde un nivel 2 hasta un nivel 5. Las mallas son simétricas, tal y como se puede ver en el capítulo 4.

Para la evaluación de este estudio de convergencia se tendrá en cuenta únicamente la temperatura de salida, pues es, la determinación del valor de este parámetro, la que se centra como objetivo fundamental este trabajo.

Tras la simulación de los 4 estudios, se extrae la Tabla 3, a modo de resumen.

Tabla 3. Tabla resumen de los estudios de convergencia

	Nº celdas	t(h)	T _{OUT} (°C)	ΔT (°C)	e(%)
Nivel 2	17.016	0 h 4 min	92,177	2,823	-3,90%
Nivel 3	79.177	0 h 15 min	92,283	2,717	1,81%
Nivel 4	189.016	0h 30 min	92,233	2,767	-0,14%
Nivel 5	616.226	2 h 30 min	92,237	2,763	-

Como norma general en este tipo de estudios, se desechan aquellas mallas cuya diferencia relativa con respecto a la malla de orden superior sea mayor al 3%. Por esta razón, para el estudio de convergencia se desecha la malla de nivel 2, utilizándose exclusivamente las mallas de nivel 3, 4 y 5.

Con el fin que se persigue, se hace uso del GCI (Grid Convergence Index) y de la aproximación de Richardson, El primer parámetro proporciona el error de la solución que proporcionan los dos mallados más finos que se estén analizando, respecto a la solución que se obtendría en un mallado con infinitos grados de libertad, es decir, con infinitas celdas, El segundo parámetro, aproxima, aritméticamente, la solución exacta que se obtendría con el modelo irrealizable de infinitas celdas, [7].

Para la evaluación de estos parámetros se tienen en cuenta las mallas de mayor nivel, tal y como se ha dicho anteriormente.

Sea h_i el parámetro característico de la malla de nivel i , éste se ha de calcular dividiendo el volumen total del dominio computacional definido en el programa entre el número total de nodos.

El dominio computacional queda definido por 6 planos que definen un paralelepípedo, se pueden definir en coordenadas cartesianas:

$$\begin{aligned} x_{\min} &= -0,01 \text{ m}; & y_{\min} &= -0,06 \text{ m}; & z_{\min} &= 0 \text{ m} \\ x_{\max} &= 0,4 \text{ m}; & y_{\max} &= 0,06 \text{ m}; & z_{\max} &= 0,009 \text{ m} \end{aligned}$$

El volumen se calcula como:

$$\begin{aligned} V &= \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = (x_{\max} - x_{\min}) \cdot (y_{\max} - y_{\min}) \cdot (z_{\max} - z_{\min}) & \text{Ec. 29} \\ V &= 0,4428 \text{ l} = 442.800 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

Así, el parámetro característico h_i para cada malla será:

$$h_3 = 1,775 \text{ mm}^3; \quad h_4 = 1,328 \text{ mm}^3; \quad h_5 = 0,896 \text{ mm}^3$$

Se define la relación entre el tamaño de un mallado y el siguiente como r_{ij} :

$$r_{34} = 0,748; \quad r_{45} = 0,674$$

Por otro lado, f_i es el valor de temperatura de salida obtenida como solución para la malla i :

$$f_3 = 365,283 \text{ K}; \quad f_4 = 365,233 \text{ K}; \quad f_5 = 365,237 \text{ K}$$

Y sus relaciones como f_{ij} :

$$f_{34} = -0,05 \quad f_{45} = 0,004$$

Por otro lado, se define p como el orden de precisión del esquema numérico usado y se evalúa como:

$$p = \frac{\left| \ln \left| \frac{f_{45}}{f_{34}} \right| + q(p) \right|}{\ln(r_{34})}; \quad q(p) = \ln \left(\frac{r_{34}^p - s}{r_{45}^p - s} \right); \quad s = \text{signo} \left(\frac{f_{45}}{f_{34}} \right) \quad \text{Ec. 30}$$

Este proceso es iterativo, debido a que el valor de $r_{34} \neq r_{45}$. Por lo tanto, se ha de seguir el diagrama de flujo que aparece en la Figura 34 para su cálculo:

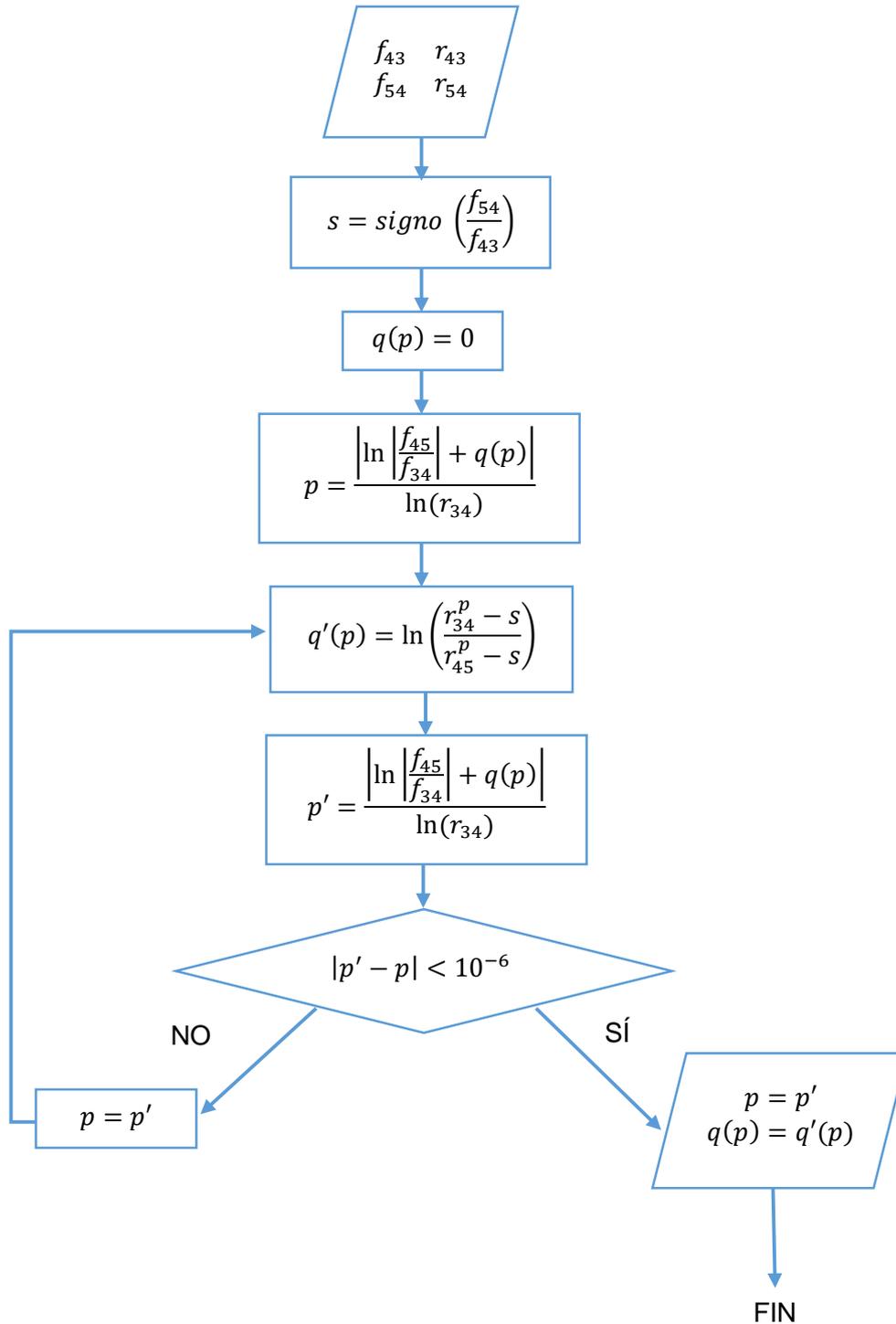


Figura 34. Diagrama de flujo para el cálculo de los parámetros p y q .

De esta manera se obtiene los valores de p y de $q(p)$:

$$p = -13,4868; \quad q(p) = -1,3861$$

El GCI tiene la siguiente formulación:

$$GCI_{45} = \frac{F_s}{r_{45}^p - 1} \cdot \left| \frac{f_5 - f_4}{f_4} \right| \quad \text{Ec. 31}$$

Donde F_s es un factor de seguridad que suele ser 3. Cuanto menor sea el valor de este parámetro, mejor será la solución, pues el error es menor. En este caso, el valor de GCI es $1,63 \cdot 10^{-7}$, muy próximo a cero, lo que refleja una buena solución.

La aproximación de Richardson se calcula como:

$$f_{exacta} \approx f_1 + \frac{f_1 - f_2}{r_{45}^p - 1} \quad \text{Ec. 32}$$

Obteniéndose un valor de temperatura para la aproximación de 92,233 °C. En la Figura 35, se puede ver una representación de los datos obtenidos, también expuestos en la Tabla 4.

Tabla 4. Comparación del análisis de convergencia con la extrapolación de Richardson.

	Nº celdas	t(h)	T _{OUT} (°C)	ΔT (°C)	e(%)	e _{Richardson} (%)
Nivel 2	17.016	0 h 4 min	92,177	2,823	-3,90%	-2,02%
Nivel 3	79.177	0 h 15 min	92,283	2,717	1,81%	1,81%
Nivel 4	189.016	0h 30 min	92,233	2,767	-0,14%	0,00%
Nivel 5	616.226	2 h 30 min	92,237	2,763	0,15%	0,15%
Richardson	-	-	92,233	2,767	-	-

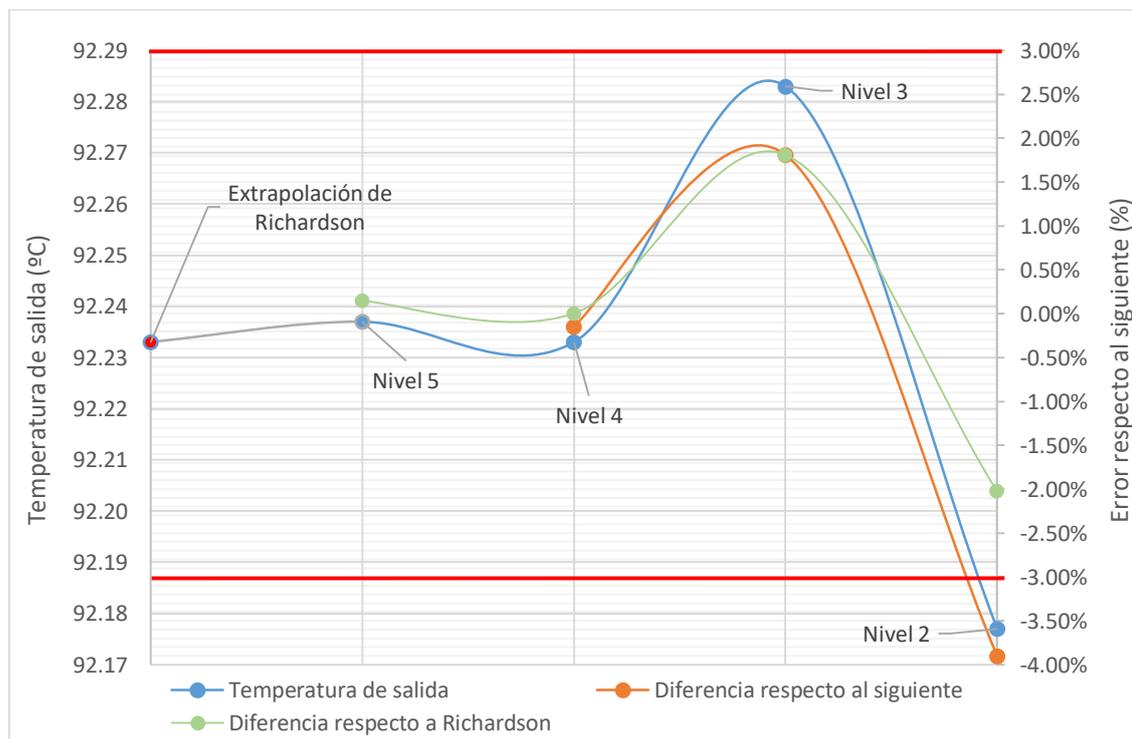


Figura 35. Tendencia del valor de temperatura de salida en el refinamiento de la malla.

En azul se pueden ver los datos de temperatura de salida del agua en grados centígrados, mostrados sus valores en la escala principal de la izquierda. Por otro lado, en naranja, se tiene una representación de la diferencia porcentual entre el valor de temperatura de la malla respecto a la de siguiente nivel (o respecto a la aproximación de Richardson en el caso del nivel 5). En verde, se ve la diferencia porcentual entre una malla y la

aproximación de Richardson. Las bandas rojas representan el criterio usado para la discriminación por error de las mallas.

Tras todo el análisis, se puede extraer que la malla más óptima, desde el punto de vista del coste computacional, es la de nivel 3. Esta malla tiene un error porcentual inferior al 3%, tanto cuando se compara con la de nivel 4 como cuando se compara con el valor de la aproximación de Richardson. Por lo tanto, será este el nivel de malla que se usará a lo largo de todas las simulaciones.

4.3.2. Simulación de un tubo con malla simétrica

Para las simulaciones de los modelos restantes, se han realizado los denominados estudios paramétricos. Estos estudios no son más que una concatenación de distintas simulaciones, en las cuales se varían uno o más parámetros de entrada, obteniéndose distintos resultados.

Esta herramienta permite analizar el comportamiento del radiador ante distintas condiciones de contorno. En este caso se va a analizar la variación de la temperatura del agua al paso por los distintos tubos del radiador, así como la caída de temperatura total. Todo esto se realiza variando tanto la temperatura de entrada del agua, como la velocidad del aire que cruza el radiador.

La temperatura de entrada del modelo varía desde los 95 °C, hasta los 80 °C, en pasos de 5 °C (95, 90, 85 y 80 °C). Por otro lado, la velocidad del aire que cruza el radiador varía desde los 115 km/h hasta los 25 km/h, en pasos de 15 km/h (115, 100, 85, 70, 55, 40 y 25 km/h). Es decir, se estudian todas las combinaciones posibles de los valores comentados. Esto da lugar a un total de 28 combinaciones distintas.

Se disponen a lo largo del eje de los tubos, distintos “Point Goals”, distanciados 10 mm, donde se evaluará la temperatura del agua. Lo que da como resultado una distribución como la que sigue en la Figura 36:

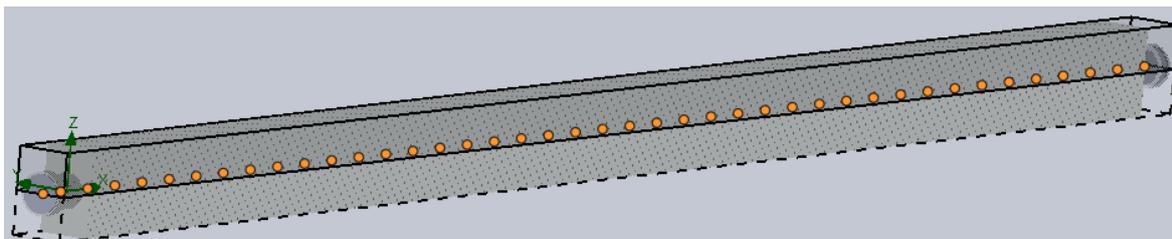


Figura 36. Distribución de las metas puntuales de temperatura del agua

Se han de realizar tres pasos por tubo para obtener la caída de temperatura que experimenta el agua a su paso por el radiador. Se tomará como condiciones de entrada del segundo paso, las condiciones de salida del primer paso y como condiciones de entrada del tercer paso, las de salida del segundo.

Por lo tanto, se han de realizar, también, tres estudios paramétricos, uno para cada uno de los pasos. Este modelo, como se vio, tiene un total de 79.177 celdas, tardando cada simulación un total de 15 min. El número total de simulaciones fueron 84, y el tiempo de cálculo fue 21 horas aproximadamente.

Tras esto, se trataron los datos obtenidos, calculándose la caída de temperatura en cada una de las distintas combinaciones, y realizándose distintas gráficas de la variación de temperatura frente a la longitud recorrida por el agua. En la Tabla 5 se exponen los datos de caída de temperatura.

Tabla 5. Caída de temperatura total del agua. 1 tubo con malla simétrica.

Velocidad del aire (km/h)	Temperatura de entrada del fluido (°C)			
	95	90	85	80
115	10,03	9,30	8,57	7,85
100	9,06	8,41	7,75	7,10
85	8,56	7,94	7,33	6,71
70	8,03	7,46	6,88	6,30
55	7,44	6,91	6,37	5,84
40	6,76	6,27	5,79	5,30
25	5,98	5,55	5,12	4,69

Se calcula también la potencia evacuada en cada caso aplicando la ecuación Ec. 33 .

$$N_{extraída} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad \text{Ec. 33}$$

Donde \dot{m} es el flujo másico de entrada de agua, con valor 0,8361 kg/s y c_p es el calor específico del agua, con valor 4,186 kJ/(kg·K). Teniendo en cuenta esto, se obtiene la potencia extraída en kW. Tabla 6.

Tabla 6. Potencia extraída en kW por el intercambiador. 1 tubo con malla simétrica.

Velocidad del aire (km/h)	Temperatura de entrada del fluido (°C)			
	95	90	85	80
115	35,09	32,54	30,00	27,47
100	31,70	29,43	27,14	24,84
85	29,95	27,80	25,65	23,50
70	28,11	26,10	24,07	22,04
55	26,05	24,18	22,31	20,44
40	23,65	21,96	20,27	18,57
25	20,92	19,41	17,91	16,40

En las siguientes gráficas se representa la temperatura del agua a su paso por el radiador. Se han realizado 4 gráficas, una para cada temperatura de entrada del agua, en las que se aprecian la temperatura del agua para cada una de las velocidades del aire. Figura 37 y Figura 38.

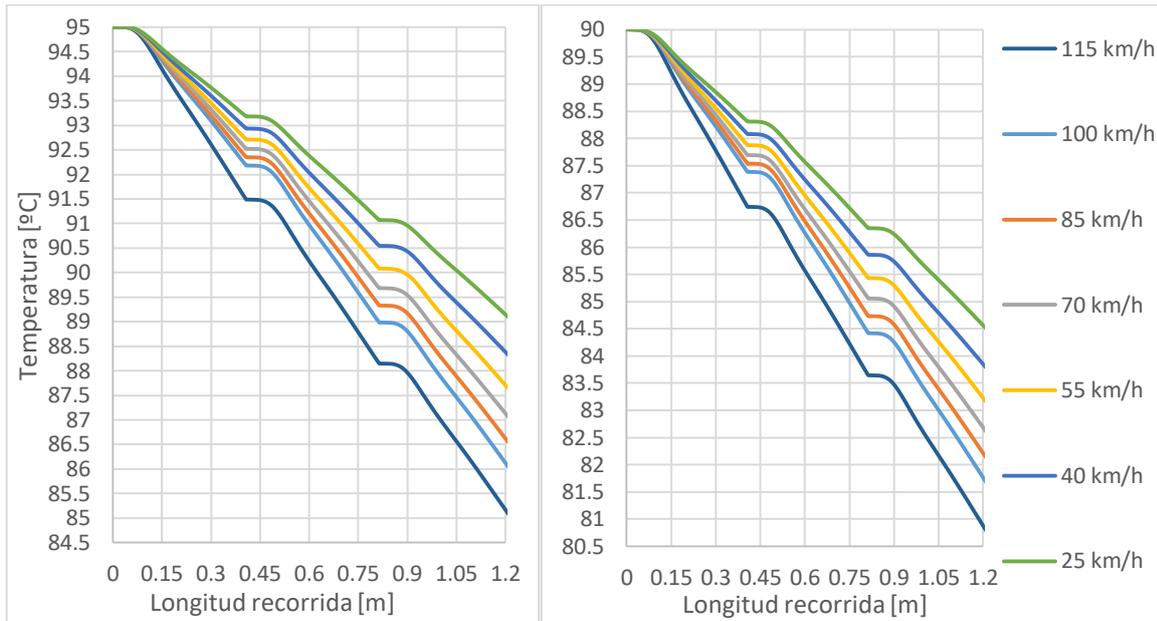


Figura 37. Temperatura del agua en las distintas simulaciones. Temperaturas de entrada de 95°C y 90°C

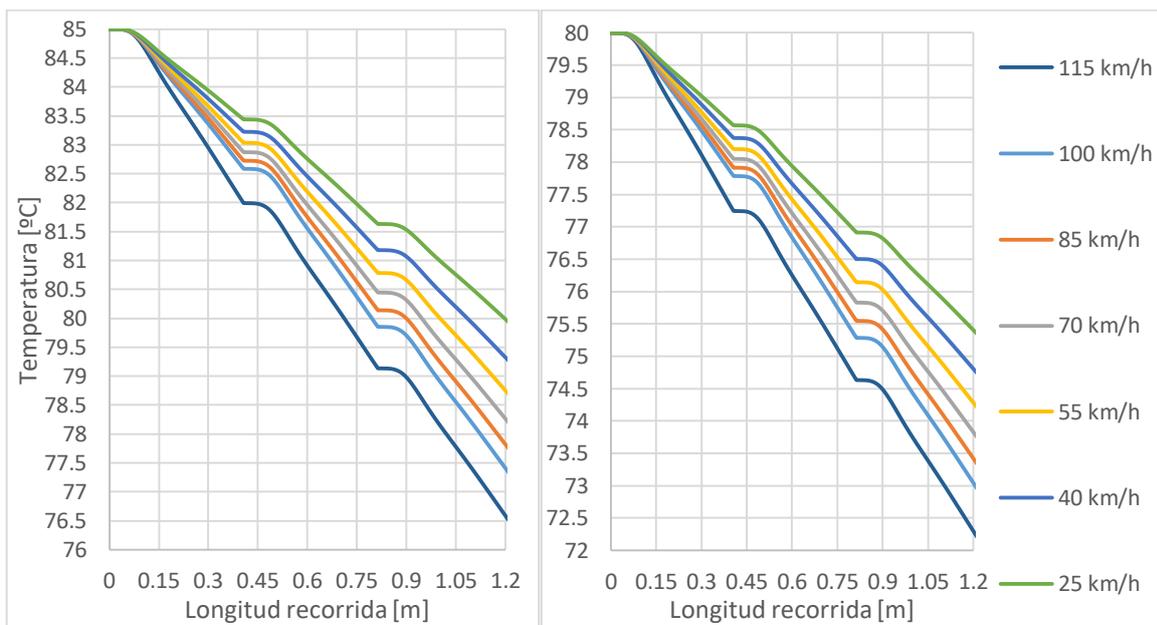


Figura 38. Temperatura del agua en las distintas simulaciones. Temperatura de entrada de: 85 °C y 80 °C

Para el caso con mayor temperatura de entrada del agua y velocidad del aire (95 °C y 115 km/h, respectivamente), se obtiene, a mitad de la longitud del tubo, en un corte perpendicular al flujo de agua, la distribución de temperatura (colores) y velocidad (vectores) del aire que se ve en la Figura 39.

Se puede ver que en la parte en la que la velocidad del aire es menor (flechas de menor longitud) la temperatura del mismo aumenta, esto es debido a que el tiempo de contacto con el tubo es mayor, y por lo tanto también lo es la transferencia de calor. También se representa tanto la temperatura del agua que circula por el interior, y del tubo. Tanto una, como la otra, están por encima de 80 °C, como se puede ver.

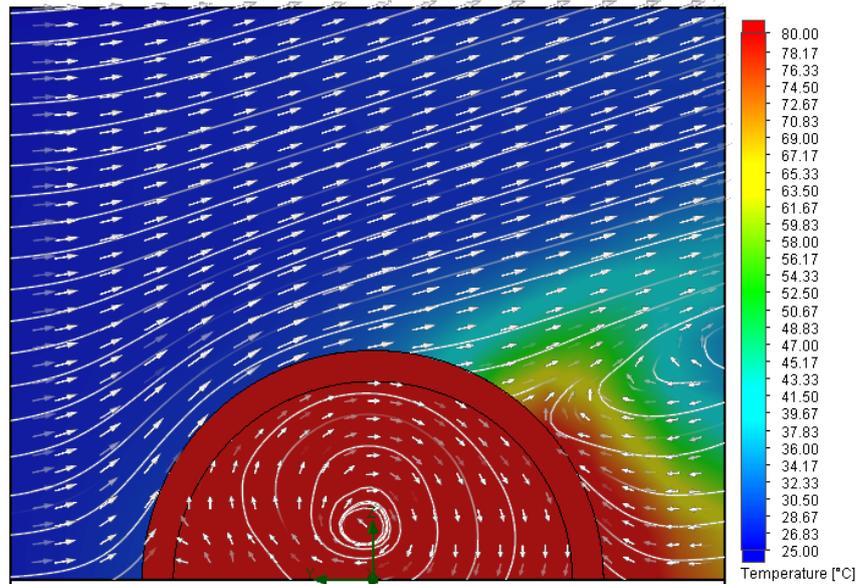


Figura 39. Distribución de temperatura y velocidad a mitad del tubo. 95 °C y 115 km/h.

En la Figura 40 se muestra una distribución de temperatura de una aleta que se encuentra a mitad del tubo. Se puede observar que la distribución de temperatura del sólido guarda relación con la de la del flujo de aire, coincidiendo que en las zonas donde la velocidad del aire es mayor, menor es la temperatura a la que se encuentra la aleta.

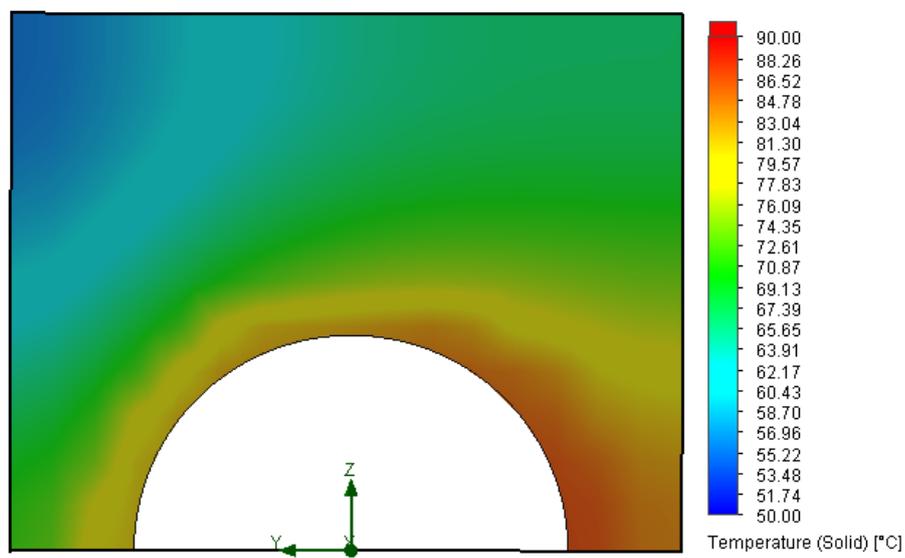


Figura 40. Distribución de temperatura en una aleta. 95 °C y 115 km/h.

4.3.3. Simulación de un tubo con malla periódica

La única diferencia de esta segunda simulación del modelo es, la malla. Esta será periódica, con esto se tiene en cuenta que existen varios tubos en el radiador, por lo que la transferencia de calor será superior, al tener en sus cercanías elementos que reducen la sección de paso, y, por lo tanto, aumenta la velocidad del aire, lo que hace aumentar el coeficiente de convección y por tanto la diferencia de temperatura al ser el calor evacuado similar. Figura 41.

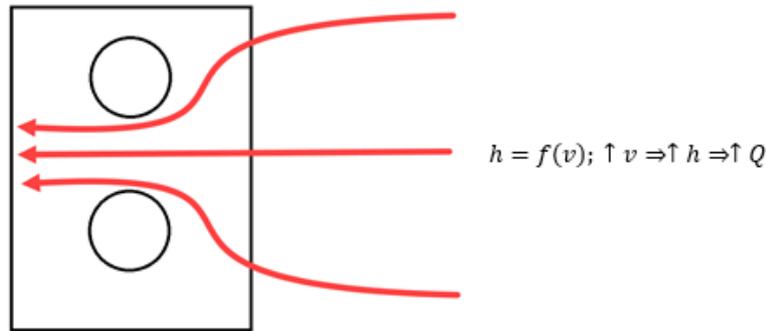


Figura 41. Aumento de la transmisión de calor por aumento de la velocidad.

Tanto las condiciones de contorno, como los intervalos analizados son los mismos. Aunque el número de celdas a simular ha aumentado, así como el tiempo de simulación siendo 201.670 celdas y un tiempo total de 45 min por simulación. Por lo tanto, el tiempo total computacional fue de 2 días y 19 horas, aproximadamente.

En la siguiente tabla se pueden ver las caídas de temperatura totales para cada una de las combinaciones estudiadas, es visible lo que se dijo con anterioridad, las caídas de temperatura son inferiores en el caso simétrico:

Tabla 7. Caída de temperatura total del agua. 1 tubo con malla periódica.

Velocidad del aire (km/h)	Temperatura de entrada del fluido (°C)			
	95	90	85	80
115	9,93	9,21	8,53	7,80
100	9,38	8,60	8,06	7,38
85	8,86	8,19	7,57	6,95
70	8,31	7,66	7,08	6,50
55	7,70	7,12	6,56	6,04
40	7,04	6,51	6,02	5,52
25	6,34	5,87	5,41	4,97

De la misma forma que en la simulación anterior, se obtiene la potencia extraída por el radiador en kW, los valores se aprecian en la Tabla 8.

Tabla 8. Potencia extraída en kW por el intercambiador. 1 tubo con malla periódica.

Velocidad del aire (km/h)	Temperatura de entrada del fluido (°C)			
	95	90	85	80
115	34,77	32,25	29,85	27,31
100	32,81	30,10	28,19	25,85
85	31,01	28,65	26,48	24,33
70	29,07	26,81	24,77	22,74
55	26,96	24,92	22,94	21,13
40	24,66	22,80	21,07	19,33
25	22,19	20,54	18,95	17,39

A continuación, se representa la temperatura del agua a su paso por el radiador, igual que en el apartado anterior, una para cada una de las condiciones de temperatura de entrada. Figura 42 y Figura 43.

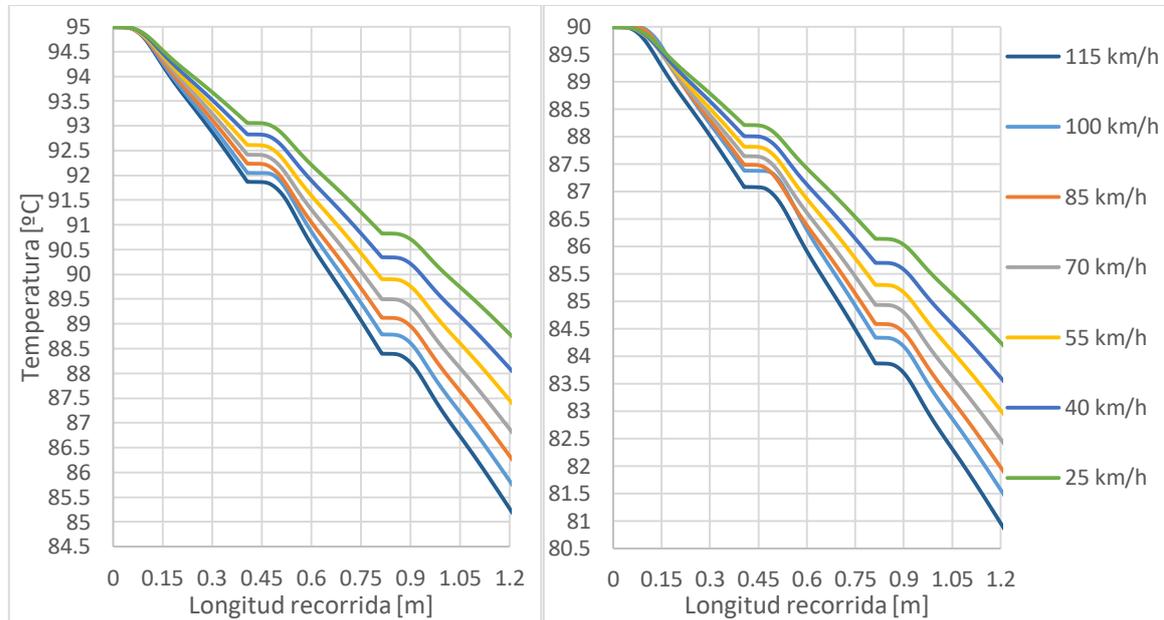


Figura 42. Temperatura del agua en las distintas simulaciones. Temperatura de entrada de 95 y 90 °C.

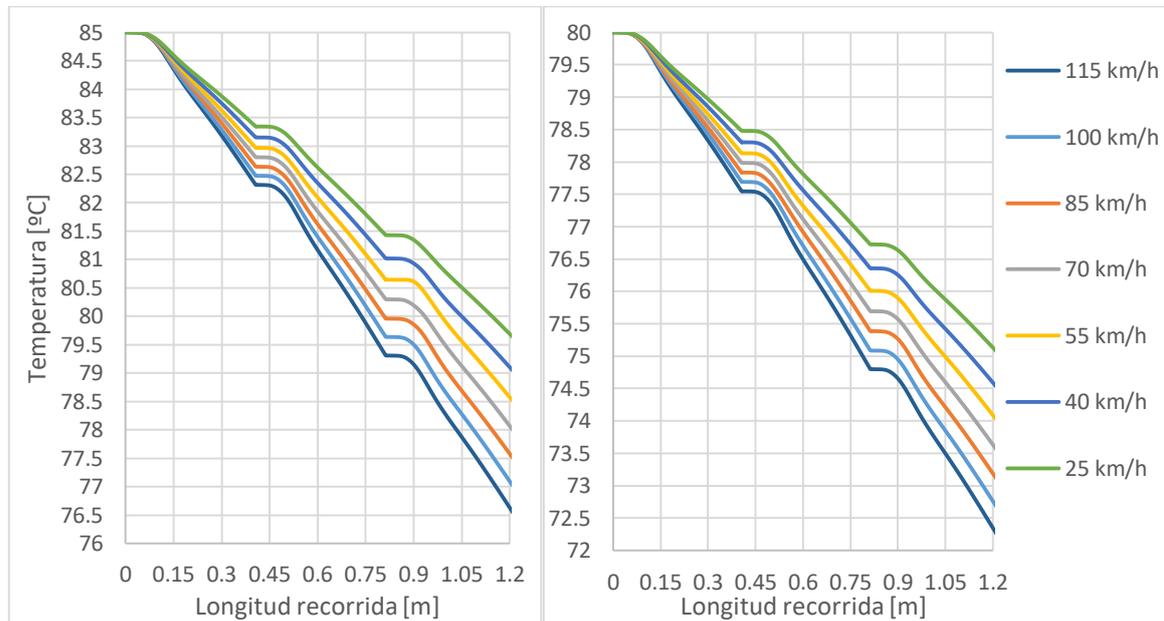


Figura 43. Temperatura del agua en las distintas simulaciones. Temperatura de entrada de 85 y 80 °C.

Para el caso con mayor temperatura de entrada del agua y velocidad del aire (95 °C y 115 km/h, respectivamente), se obtiene, a mitad de la longitud del tubo, en un corte perpendicular al flujo de agua, igual que para el caso anterior, la distribución de temperatura (colores) y velocidad (vectores) del aire, visible en la Figura 44.

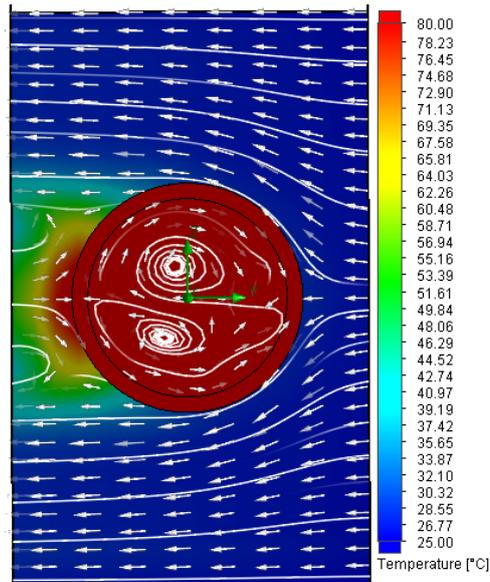


Figura 44. Distribución de temperatura y velocidad del aire al paso por el tubo. 95 °C y 115 km/h.

En la Figura 45 se puede ver la distribución de temperatura de la misma aleta que se ha mostrado en el caso anterior. Como se puede ver, en las cercanías de las esquinas izquierdas superior e inferior, la temperatura es inferior respecto al caso anterior. Esto se produce debido a lo siguiente: al considerar que encima del tubo a estudiar existe otro, el área de paso disminuye, aumentando la velocidad, la Figura 41 muestra un esquemático explicativo de la situación.

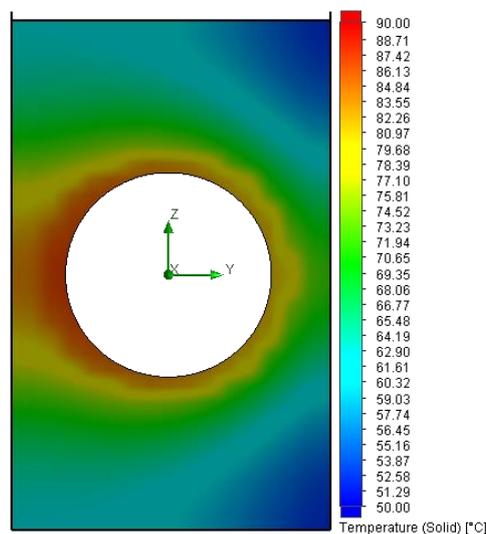


Figura 45. Distribución de temperatura en una aleta. 95 °C y 115 km/h.

4.4. Tercer modelo de simulación

En este tercer modelo se simula un modelo el cual tiene dos tubos dispuestos paralelamente. Esta es el modelo más próximo a las condiciones reales que se ha podido llegar debido a las limitaciones de cálculo que se han tenido. Y precisamente por esas mismas limitaciones no se ha realizado un análisis de convergencia del modelo. Como es similar al caso anterior, se adopta una malla de nivel 3 como la óptima para realizar los cálculos.

Así, igual que en el segundo modelo, se realizarán dos mallas, una simétrica respecto al plano XY, y otra periódica, la cual tenga en cuenta que el tubo no está aislado, sino que tiene, tanto encima, como debajo otros tubos. Una imagen del modelo simulado es la visible en la Figura 46:

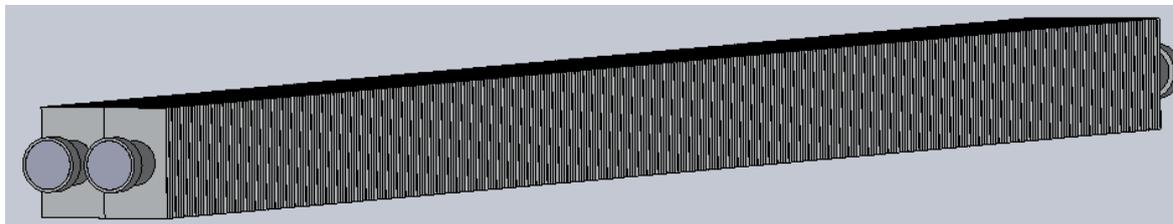


Figura 46. Tercer modelo de simulación.

Los estudios a realizar, mantienen las mismas variables y los mismos valores de entrada. Igual que en el segundo modelo, se han de simular tres pasos por tubo. La temperatura de entrada de los tubos será la misma, debido a que se considera que el fluido se mezcla de forma homogénea en los colectores laterales. Por lo tanto, la temperatura de entrada del segundo paso se toma como la media de las temperaturas de salida de los dos tubos del primer paso, y la del tercer paso como la media de las temperaturas de salida de los dos tubos del segundo paso.

Los valores de temperatura se toman de la misma forma que en el segundo modelo, es decir, en el eje del tubo, tanto para el tubo de la izquierda como el de la derecha.

4.4.1. Dos tubos con malla simétrica.

Para este modelo, el número de celdas fueron 104.582 y el tiempo total de cálculo fue de 30 min. El tiempo total de simulación del estudio paramétrico fue, aproximadamente 1 día y 18 horas. Para calcular la temperatura del agua a su paso por los tubos, se toma la temperatura media de puntos paralelos. Es decir, solamente se ha de hacer la media de la temperatura del agua en los tubos, para obtener una representación de la temperatura media del agua a lo largo de paso por el radiador.

Con los valores medios de temperatura, se calcula, igual que en el resto de las simulaciones, la caída de temperatura entre la entrada y la salida, así como la temperatura media del agua a lo largo del paso por el radiador. En cuanto a lo primero, se pueden ver dichas caídas de temperatura en la Tabla 9.

Tabla 9. Caída de temperatura total del agua. 2 tubos con malla simétrica.

Velocidad del aire (km/h)	Temperatura de entrada del fluido (°C)			
	95	90	85	80
115	7,72	7,17	6,61	6,06
100	7,27	6,75	6,23	5,70
85	6,85	6,36	5,87	5,38
70	6,32	5,89	5,46	5,01
55	5,60	5,24	4,87	4,47
40	4,63	4,30	3,98	3,65
25	4,20	3,90	3,59	3,29

De la misma forma que en la simulación anterior, se obtiene la potencia extraída por el radiador en kW, los valores se aprecian en la Tabla 10.

Tabla 10. Potencia extraída en kW por el intercambiador. 2 tubos con malla simétrica.

Velocidad del aire (km/h)	Temperatura de entrada del fluido (°C)			
	95	90	85	80
115	27,02	25,08	23,15	21,20
100	25,46	23,61	21,79	19,96
85	23,98	22,27	20,54	18,82
70	22,13	20,62	19,11	17,53
55	19,61	18,35	17,04	15,65
40	16,20	15,06	13,93	12,78
25	14,69	13,64	12,57	11,51

La temperatura media del agua a lo largo del radiador se puede ver en las siguientes gráficas. Se representa la temperatura a su paso por el radiador para cada una de las distintas temperaturas de entrada del agua. En la Figura 47 se representan los valores de la temperatura para los casos de 95 y 90 °C de temperatura de entrada, mientras que en la Figura 48, se hace lo mismo para los valores de 85 y 80 °C.

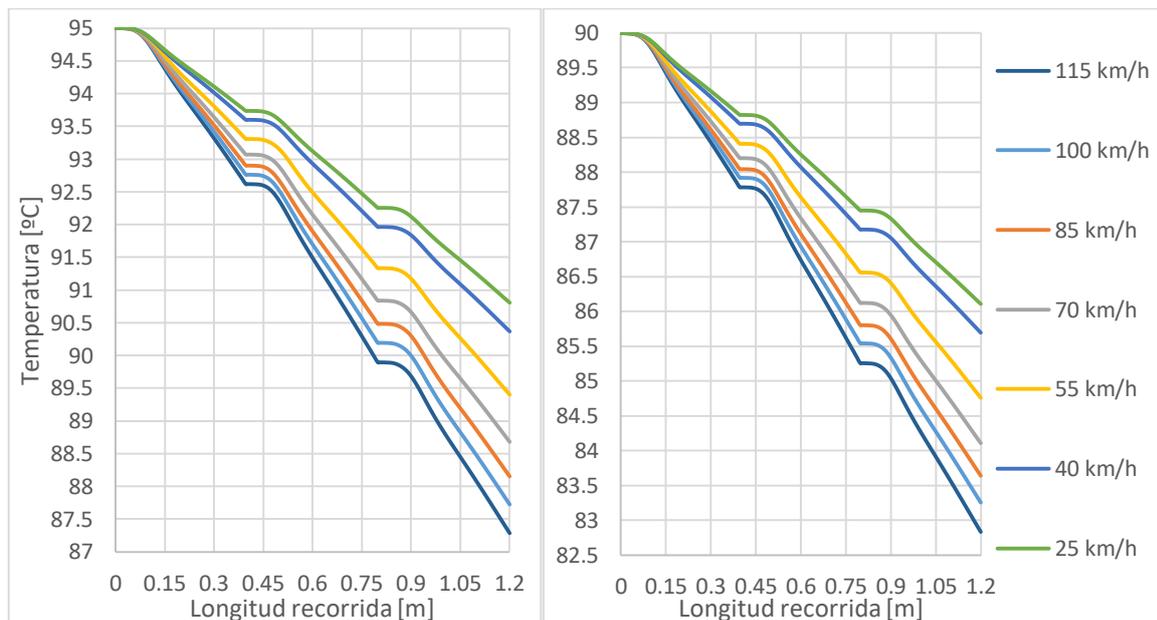


Figura 47. Temperatura del agua en las distintas simulaciones. Temperatura de entrada: 95 y 90 °C.

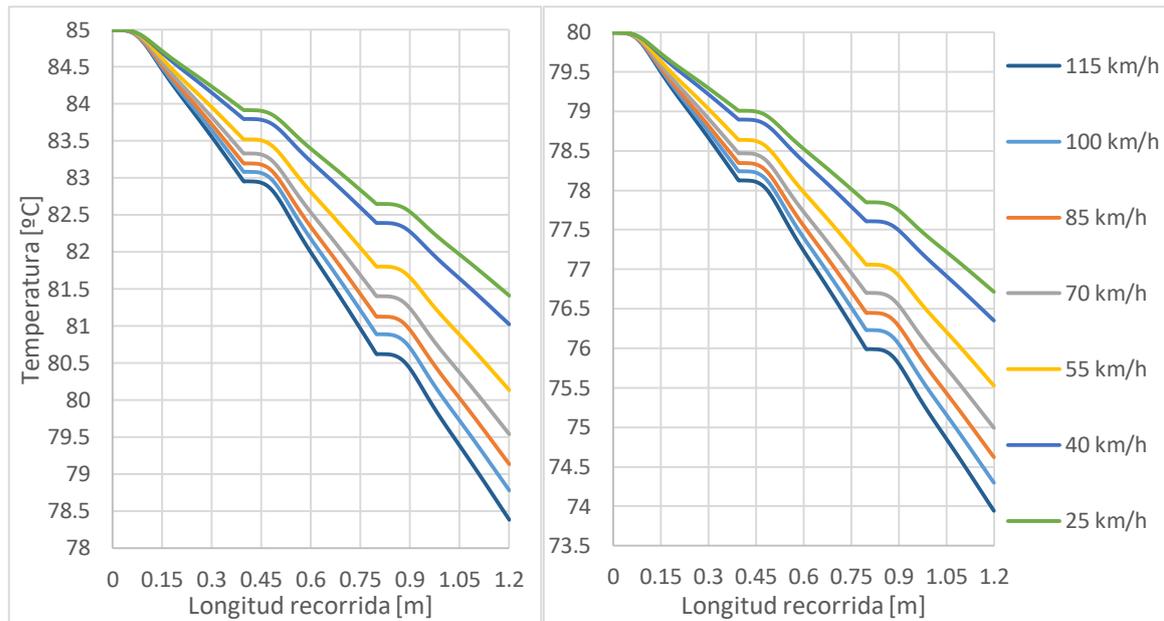


Figura 48. Temperatura del agua en las distintas simulaciones. Temperatura de entrada: 85 y 80 °C.

Igual que en las simulaciones anteriores, se representa la distribución de temperatura y velocidad en un plano perpendicular a los tubos y la distribución de temperatura en una de las aletas.

Como se observa las temperaturas son inferiores, todo esto es debido a la influencia del segundo tubo, que reduce la velocidad de paso del aire y empeora la transferencia de calor, por lo que, las temperaturas sufren menos variación de temperatura a su paso por los tubos.

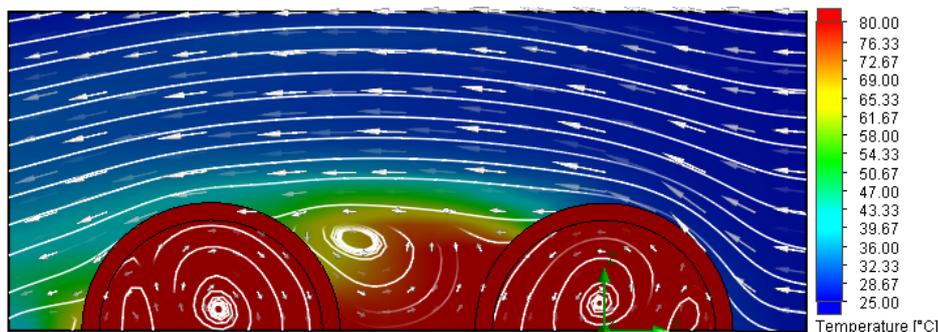


Figura 49. Distribución de temperatura y velocidad del aire al paso por el tubo. 95 °C y 115 km/h.

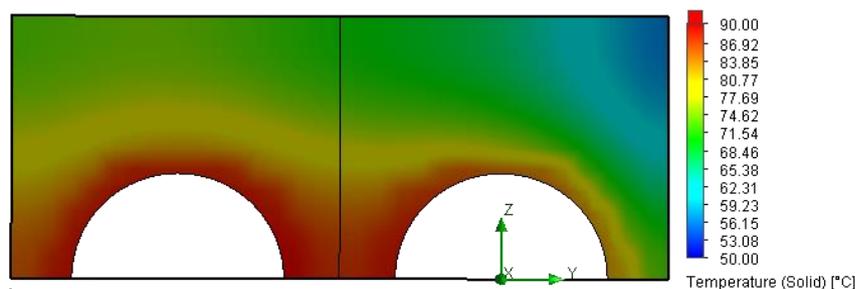


Figura 50. Distribución de temperatura en una aleta. 95 °C y 115 km/h.

4.4.2. Dos tubos con malla periódica

La única diferencia de esta segunda simulación del modelo es, la malla. Esta será periódica, con esto se tiene en cuenta que existen varios tubos en el radiador, por lo que, el modelo es más cercano a la realidad. Tanto las condiciones de contorno, como los intervalos analizados son los mismos. Aunque el número de celdas a simular ha aumentado, así como el tiempo de simulación siendo 403.963 celdas y un tiempo total de 2 horas por simulación. Por lo tanto, el tiempo total computacional fue de 7 días y 6 horas, aproximadamente. Debido a que este es el modelo más próximo a la realidad que se ha podido simular, es el que más ha tardado en simular. En la Tabla 11 se pueden ver las caídas de temperatura totales para cada una de las combinaciones estudiadas.

Tabla 11. Caída de temperatura total del agua. 2 tubos con malla periódica.

Velocidad del aire (km/h)	Temperatura de entrada del fluido (°C)			
	95	90	85	80
115	8,12	7,53	6,95	6,37
100	7,53	6,99	6,45	5,91
85	7,03	6,53	6,03	5,51
70	6,61	6,14	5,66	5,18
55	6,23	5,78	5,33	4,88
40	5,78	5,36	4,95	4,54
25	5,20	4,83	4,45	4,08

De la misma forma que en la simulación anterior, se obtiene la potencia extraída por el radiador en kW, los valores se aprecian en la Tabla 12.

Tabla 12. Potencia extraída en kW por el intercambiador. 2 tubos con malla periódica.

Velocidad del aire (km/h)	Temperatura de entrada del fluido (°C)			
	95	90	85	80
115	28,41	26,37	24,34	22,30
100	26,37	24,45	22,59	20,70
85	24,60	22,85	21,09	19,30
70	23,15	21,49	19,83	18,14
55	21,81	20,23	18,65	17,09
40	20,23	18,77	17,33	15,88
25	18,20	16,90	15,59	14,27

Igual que para el caso anterior, la temperatura media del agua a su paso por el radiador para las distintas velocidades del aire y temperatura de entrada se pueden observar en las Figura 51 y Figura 52, una para cada temperatura de entrada del agua analizada.

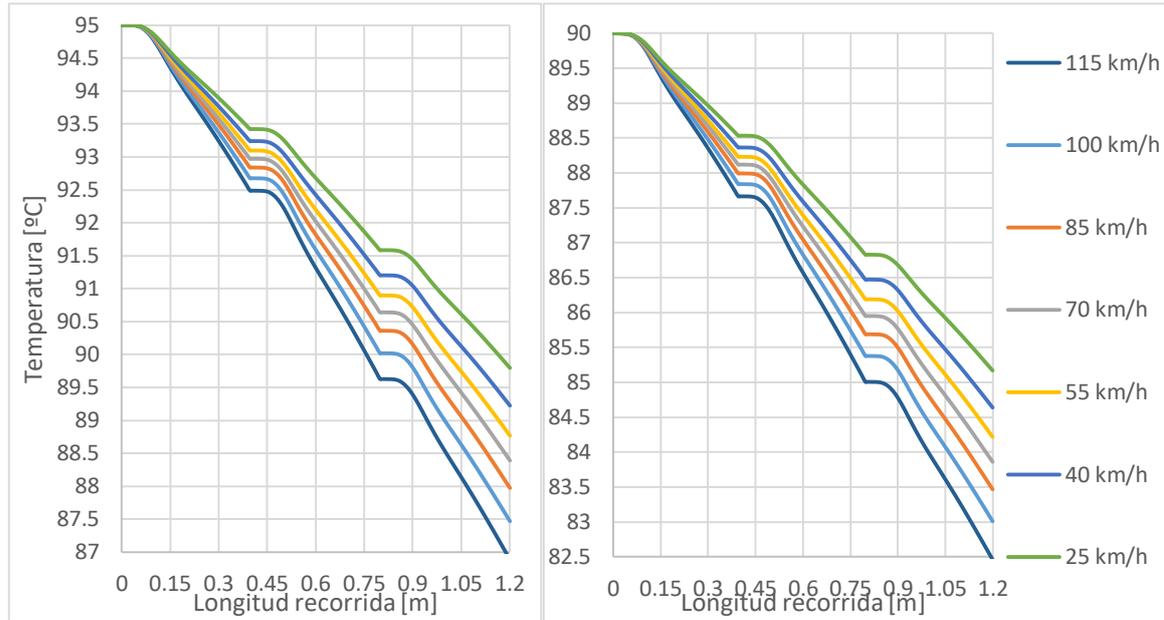


Figura 51, Temperatura del agua en las distintas simulaciones, Temperatura de entrada: 95 y 90 °C

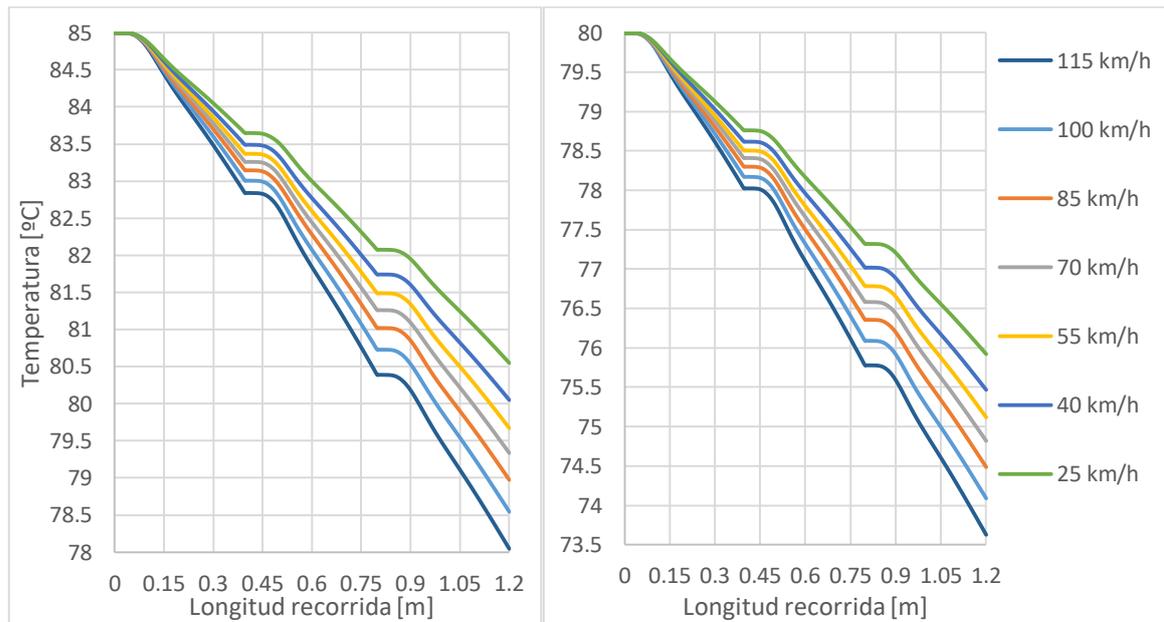


Figura 52, Temperatura del agua en las distintas simulaciones, Temperatura de entrada: 85 y 80 °C

Como se ha hecho a lo largo del documento, se muestran ahora dos imágenes, la primera muestra la distribución de temperatura y velocidad en una sección transversal media del modelo, y la segunda muestra la distribución de temperatura en una aleta dispuestas en las cercanías de esa sección media.

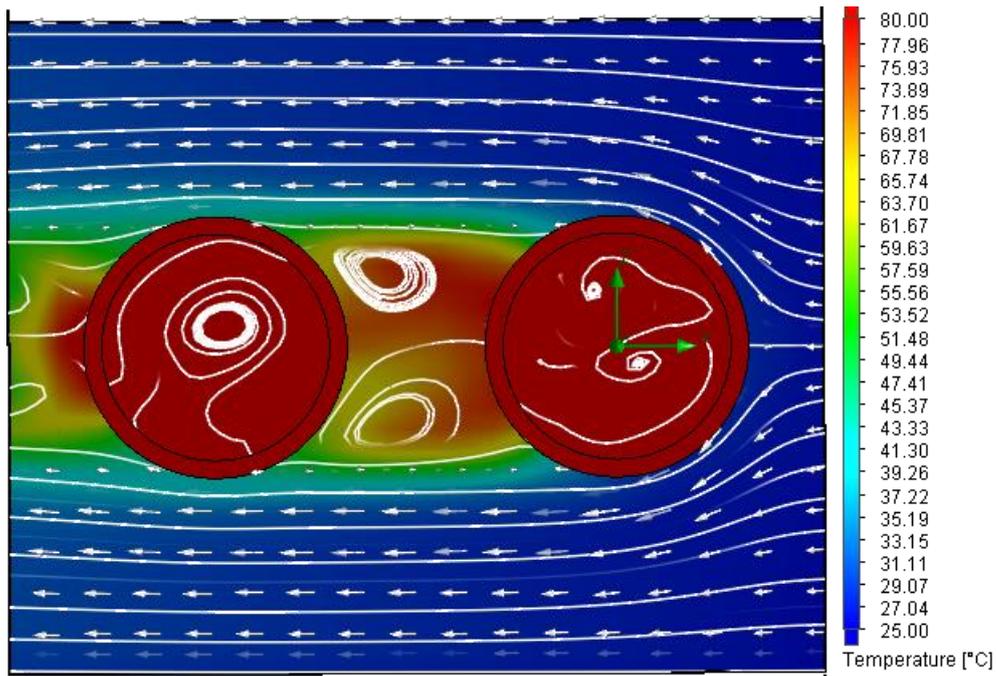


Figura 53, Distribución de temperatura y velocidad del aire al paso por el tubo, 95 °C y 115 km/h,

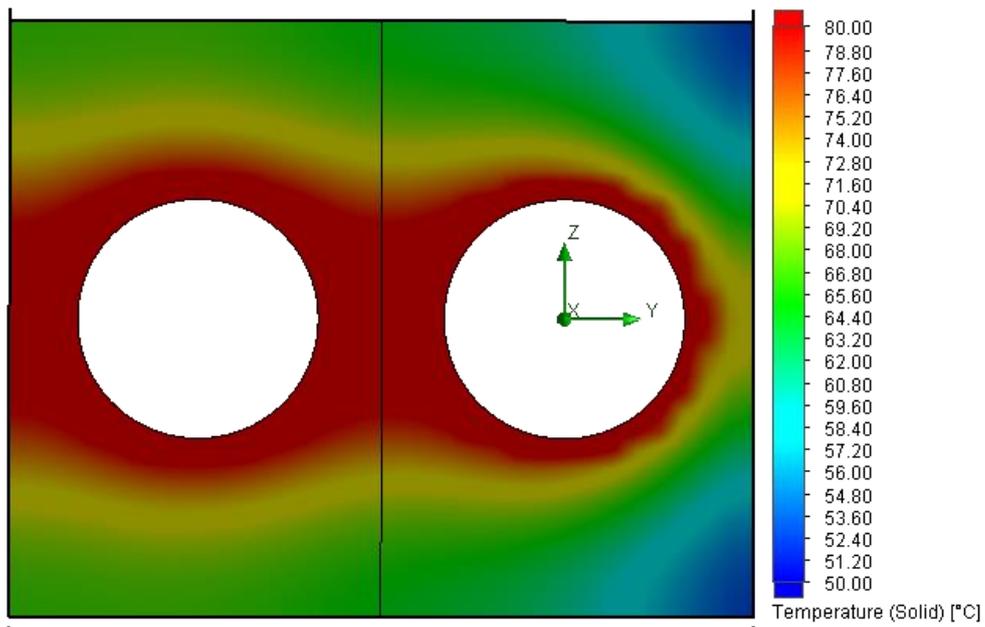


Figura 54, Distribución de temperatura en una aleta, 95 °C y 115 km/h,

Capítulo 3: MODELADO EN SOLIDWORKS 2014

En este apartado se va a explicar detalladamente, el proceso seguido para realizar con el software usado cada una de las piezas que conforman el radiador del que trata el estudio. Para llevar de la realidad al ordenador cada elemento, serán necesarios unos instrumentos de medida que nos permitan realizar las mediciones oportunas. Se han utilizado dos elementos de medición realmente básicos, uno es el llamado “pie de rey” o “calibre” y el segundo es una cinta para medir retráctil.

El calibre será utilizado para las mediciones en las que son necesarias una mayor exactitud, como es el caso del espesor y calibre de los tubos, o el espesor de las aletas que conforman el intercambiador.

En cambio, el metro, será utilizado para mediciones menos precisas y en las que tratamos con dimensiones mayores.

1. Tubo

Realizadas las mediciones correspondientes, se procede al modelado 3D de la pieza en cuestión. Para ello, se parte de un archivo pieza nuevo en el software como se detalla.

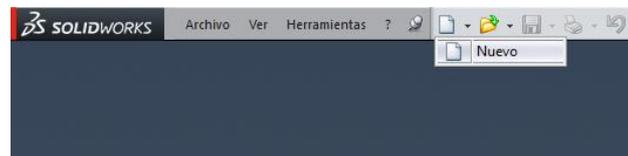


Figura 55. Abrir un archivo nuevo

Para abrir un archivo nuevo, se ha de pinchar en la cinta superior en el icono que se muestra en la Figura 55 y posteriormente en “Nuevo”. Aparece entonces el cuadro de diálogo de la Figura 56.

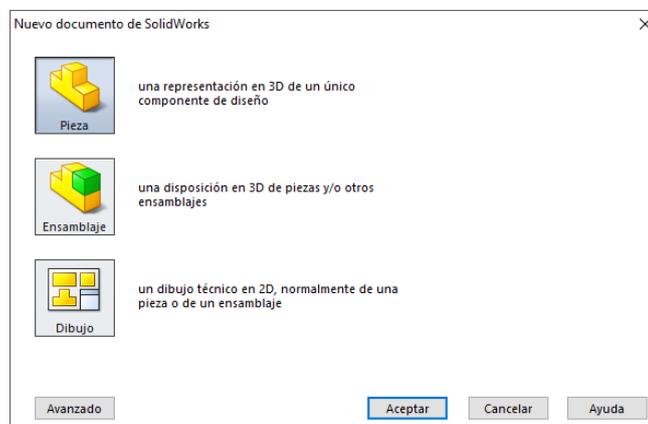


Figura 56. Abrir una pieza nueva

En este cuadro de diálogo nos aparecen 3 opciones. La primera permite generar un archivo pieza, en el cual modelar un componente. La segunda permite, una vez generadas varias piezas de un elemento, unir las y formar un único ensamblaje. Por último, la tercera opción, permite generar planos de taller, normalmente de una pieza o un ensamblaje, ya creados o por crear.

En el caso del que se trata en este apartado, se ha de clicar en la casilla pieza, para poder comenzar a modelar el tubo. Aparece entonces lo expuesto en la Figura 57.

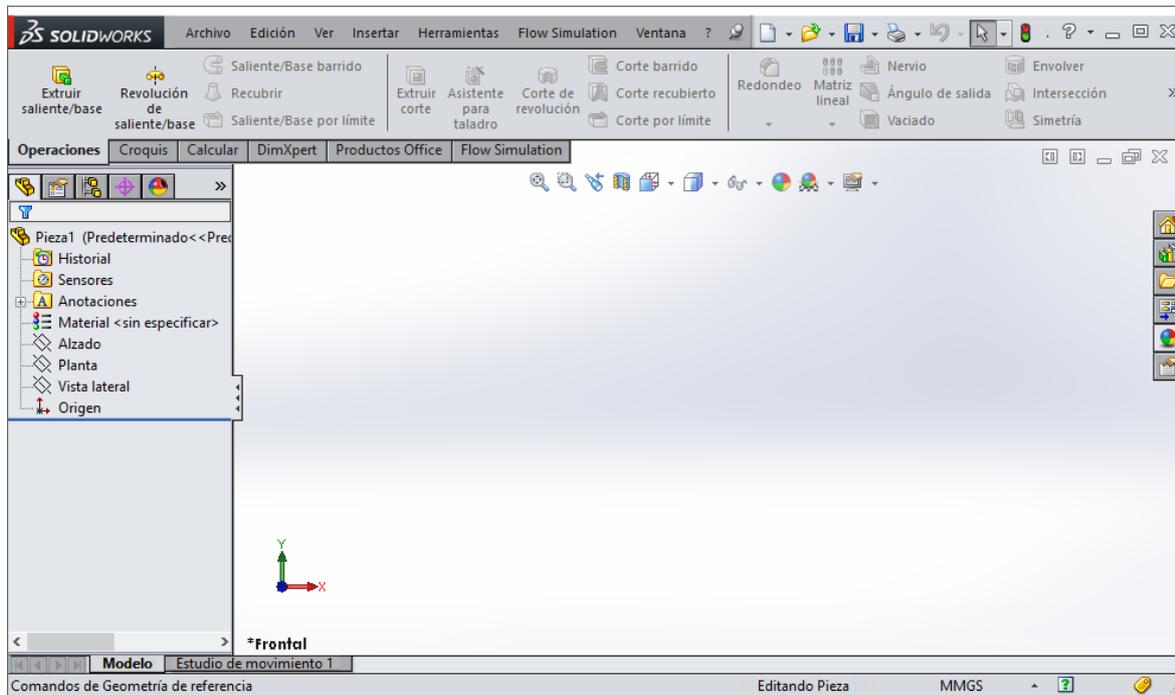


Figura 57. Ventana inicial de un archivo pieza

En esta ventana se puede observar varias pestañas en la cinta superior. Se van a detallar las pestañas que se han usado a lo largo de toda la modelización de la geometría.

La primera, “Operaciones”, permite generar volúmenes y geometrías de diverso tipo a partir de croquis de geometría cerrada, por lo general. La segunda, “Croquis”, permite realizar dibujos de las geometrías necesarias para poder generar el modelo 3D. La última, “Flow Simulation” permitirá simular y estudiar la geometría creada.

Para generar la geometría tubo, se va a realizar un croquis del perfil longitudinal, para después, revolucionarlo y así obtener el modelo 3D. Para ello, en la pestaña “Croquis”, se selecciona la opción “Croquis”, tras esto se selecciona el plano “Planta” para plasmar el dibujo. Figura 58.

Al clicar sobre el plano “Planta”, automáticamente, el programa mostrará una vista normal a éste, lo que permite generar un croquis de manera más clara y concisa.

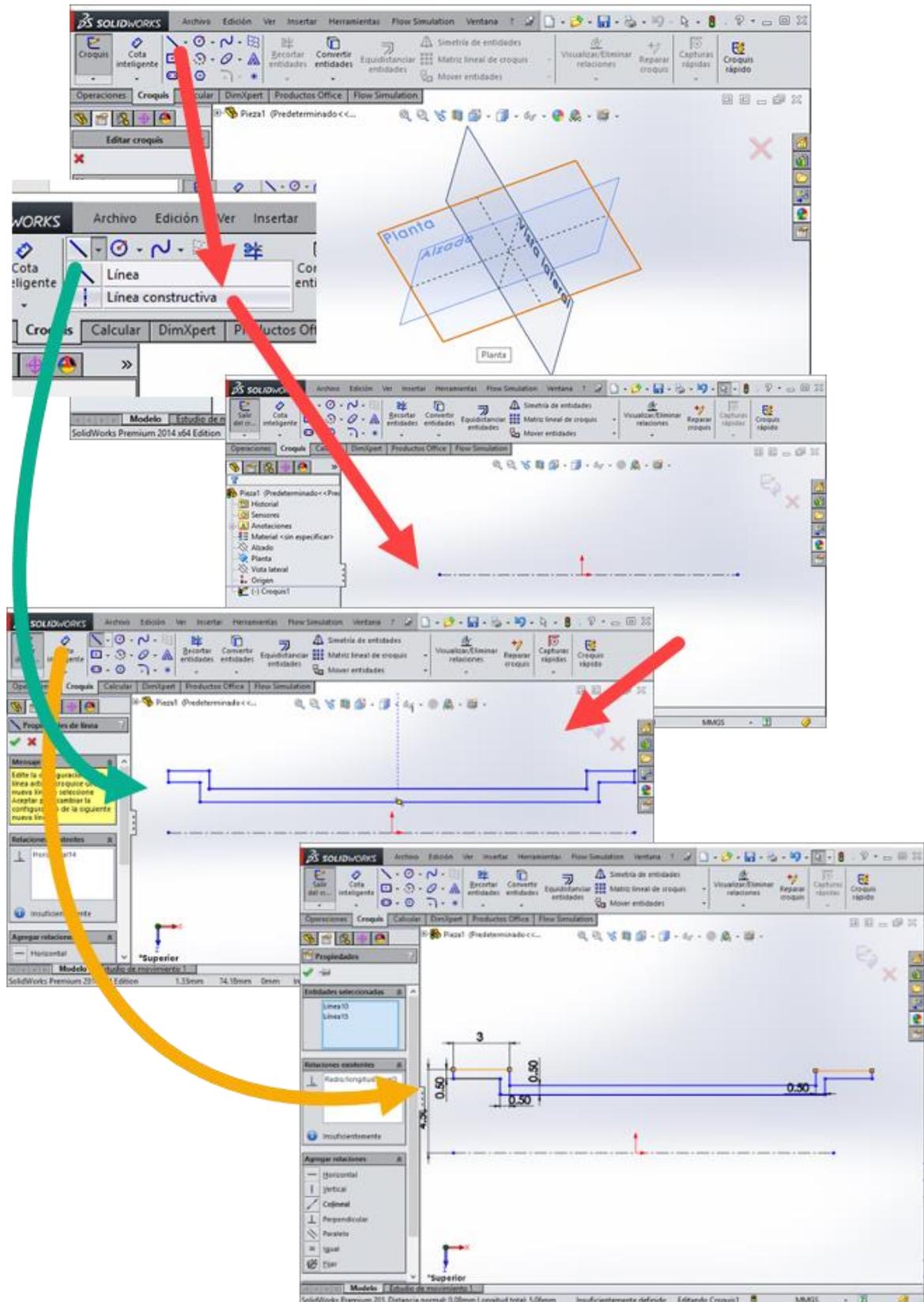


Figura 58. Generación del croquis en planta

Con la opción línea constructiva se genera el eje longitudinal del tubo. Para ello, generamos una línea horizontal, la longitud de esta línea no es importante, pues sólo es

una referencia constructiva que permite generar el resto de la geometría. Mediante la herramienta “Línea” seleccionable en la cinta superior, Figura 58, se realiza una geometría preliminar de la sección longitudinal del tubo. Esta geometría, posteriormente será acotada para obtener el modelo correcto y preciso.

Como se puede observar la geometría dibujada es un mero esbozo de la geometría real. Mediante la herramienta “Cota inteligente” situada en la cinta superior, se generan las mediciones de forma concisa y precisa. Con esta herramienta únicamente hay que clicar entre los dos puntos donde se quiera posicionar la cota para que esta aparezca, o si lo que se quiere es determinar la longitud de una línea, únicamente hay que clicar sobre ella para poder acotarla, de igual forma ocurre con las circunferencias.

Otras herramientas de gran utilidad son las llamadas “Relaciones”. Estas herramientas permiten identificar similitudes, simetrías, relaciones de perpendicularidad, paralelismo, coincidencia, entre varios elementos geométricos. Para añadir o eliminar una de estas relaciones, basta con seleccionar los elementos que se quieren relacionar y en la cinta derecha aparecerá la opción “Agregar relaciones” en la cual se mostrará las relaciones disponibles. Un ejemplo de esto se puede ver en la Figura 58, en la que se pretendía que las líneas seleccionadas fuesen iguales. En esta, únicamente falta acotar el largo total del tubo, que son 410 mm, como esta medida en relación con las demás es gigantesca, no se puede mostrar en una figura de forma clara la totalidad del croquis una vez acotado.

Tras terminar de acotar este croquis, pulsando el icono a la izquierda de la cruz en la esquina superior derecha de la ventana de trabajo, se sale del croquis, quedando este guardado en el documento. Se procede ahora a revolucionar este croquis alrededor del eje primeramente croquizado como una línea constructiva. Para ello, en la pestaña “Operaciones” de la cinta superior, se selecciona “Revolución de saliente/base”. Figura 59

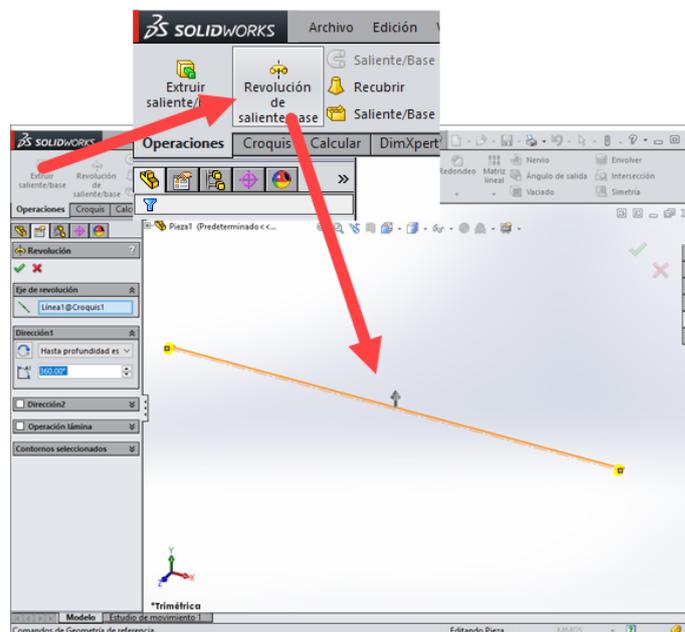


Figura 59. Revolución de saliente / base

Al tratarse de una geometría simple, el programa detecta automáticamente tanto el eje de revolución, como el croquis que se ha dibujado. De todas formas, en esta operación, se

pueden seleccionar y modificar sus opciones en la cinta lateral izquierda, donde se puede seleccionar desde el eje de revolución, como la dirección de revolucionado, etc.

Cualquier forma geométrica de revolución se puede generar con esta herramienta, siempre de la misma forma; generando el croquis junto con el eje de revolución, seleccionando el recién dibujado croquis y seleccionando la operación “Revolución de saliente/base” en la pestaña “Operaciones”.

Con este paso queda finalizado el modelado de los tubos. Únicamente queda salvar el archivo en la cinta superior.

2. Aleta

En este punto se recoge el procedimiento seguido para la generación de la geometría en cuestión. Sin duda, este elemento será con el que se necesita mayor precisión en las mediciones, por este motivo, se ha utilizado, únicamente el proyector de perfiles y el micrómetro digital para la caracterización de la pieza.

Del proyector de perfiles se obtienen los puntos significativos para la caracterización de la geometría. Se realizan dos croquis, a partir de la obtención de todos los puntos significativos. Para el caso de las aletas de menor tamaño situadas en la parte más interior, se ha generado un archivo pieza nuevo, y dentro de éste, se genera un croquis en planta.

Para realizar la nube de puntos será necesario la utilización de la herramienta “Punto”, situada en la pestaña “Croquis” de la cinta superior.

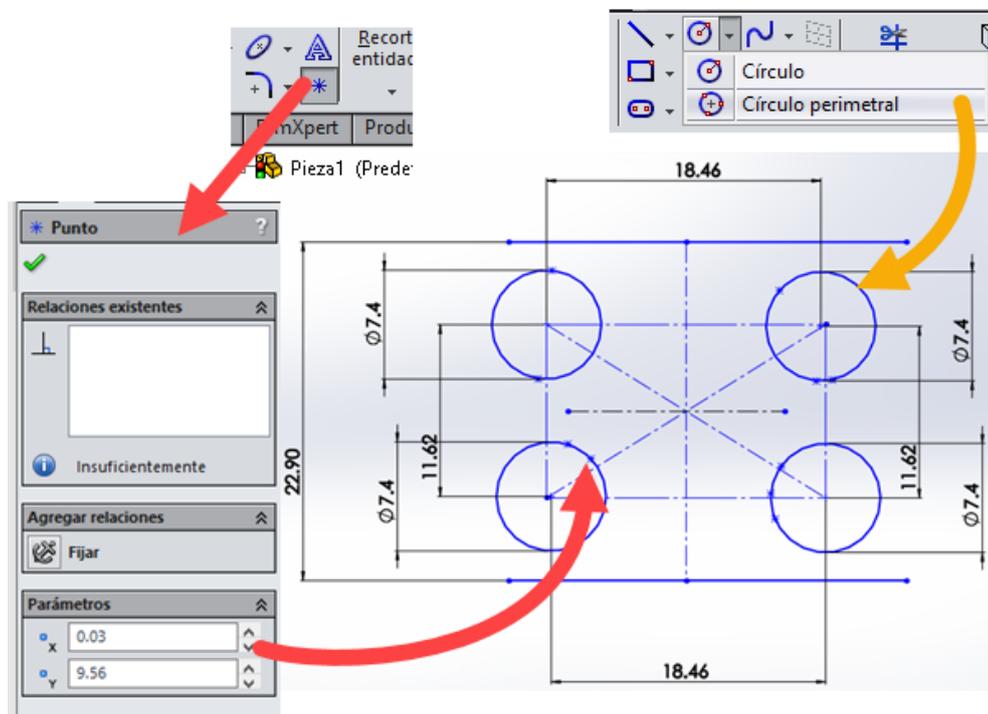


Figura 60. Disposición de los agujeros y ancho de la aleta.

Una vez seleccionada la herramienta, únicamente será necesario pinchar en un punto arbitrario del plano, y mediante la ventana lateral izquierda, se pueden modificar las coordenadas del dicho punto y sus relaciones.

En primera instancia se va a medir, mediante el proyector de perfiles, y generar el croquis mediante el software, de la parte interna de la aleta, mediante la muestra visible en la Figura 23. Para generar las circunferencias se tomarán tres puntos significativos de cada una de ellas y se ajustará una circunferencia mediante la herramienta “Círculo perimetral”.

Una vez situados los tres puntos, solo se han de seleccionar uno por uno y se ajustará la circunferencia. Para el caso de las líneas rectas, es más sencillo, pues para su definición sólo es necesario dos puntos, y mediante la herramienta “Línea”, se puede seleccionar cada uno de estos y generar así la línea medida.

Tomando un origen de coordenadas cualquiera, se toman 3 puntos de cada una de las 4 circunferencias y mediante la herramienta “Círculo perimetral” de la Figura 60, se generan las circunferencias. Como es notable en la muestra tomada, hay una circunferencia mucho más definida que las demás, por este motivo, será la que se tomará de referencia para la obtención del diámetro.

Generados los 3 puntos y ajustada una circunferencia a ellos, se obtiene un valor del diámetro de 7,4 mm, coincidente con el valor obtenido con el pie de rey en el caso del tubo. Tras esto, se mide la distancia entre circunferencias, y el ancho de la aleta, esta geometría se ha reflejado en el croquis inferior de la Figura 60.

Como se puede ver, se ha tomado un valor de 18,46 mm para el espaciado en la longitud mayor y un ancho de 11,62 mm en la longitud menor, centrado todo esto respecto a los bordes exteriores de las aletas, los cuales distan 22,90 mm entre sí.

Tras esto, se procede a medir las aperturas próximas a los extremos, primero se mide la posición de los 4 puntos que sitúan las esquinas de la apertura, para luego tomar un punto significativo de cada lado y ajustar el arco con la herramienta “Arco 3 puntos”. Figura 61. Esta opción funciona de la misma manera que “Círculo perimetral”. Así, se genera la geometría visible en la parte superior de la misma figura.

Estas aperturas estarán centradas respecto a las circunferencias anteriormente generadas. Como se han medido las dos mejores muestras, los dos agujeros restantes situadas en la parte superior serán obtenidas mediante la herramienta “Simetría”.

Se seleccionan las entidades sobre las cuales se quiere realizar la simetría, para después seleccionar una línea de referencia que pueda tomarse como eje de simetría. En este caso, será usada para este fin la línea discontinua negra visible en la Figura 61.

Únicamente queda por definir de esta geometría, el espaciado de las aletas pequeñas que hay entre círculo y círculo. En el proyector de perfiles se pueden llegar a apreciar unas pequeñas aperturas con forma de línea que sitúan el principio y el final de cada una de las aletas. Como se puede ver en la Figura 61, en la cual también es apreciable la circunferencia con la que se ha conseguido determinar el diámetro de 7,4 mm comentado con anterioridad.

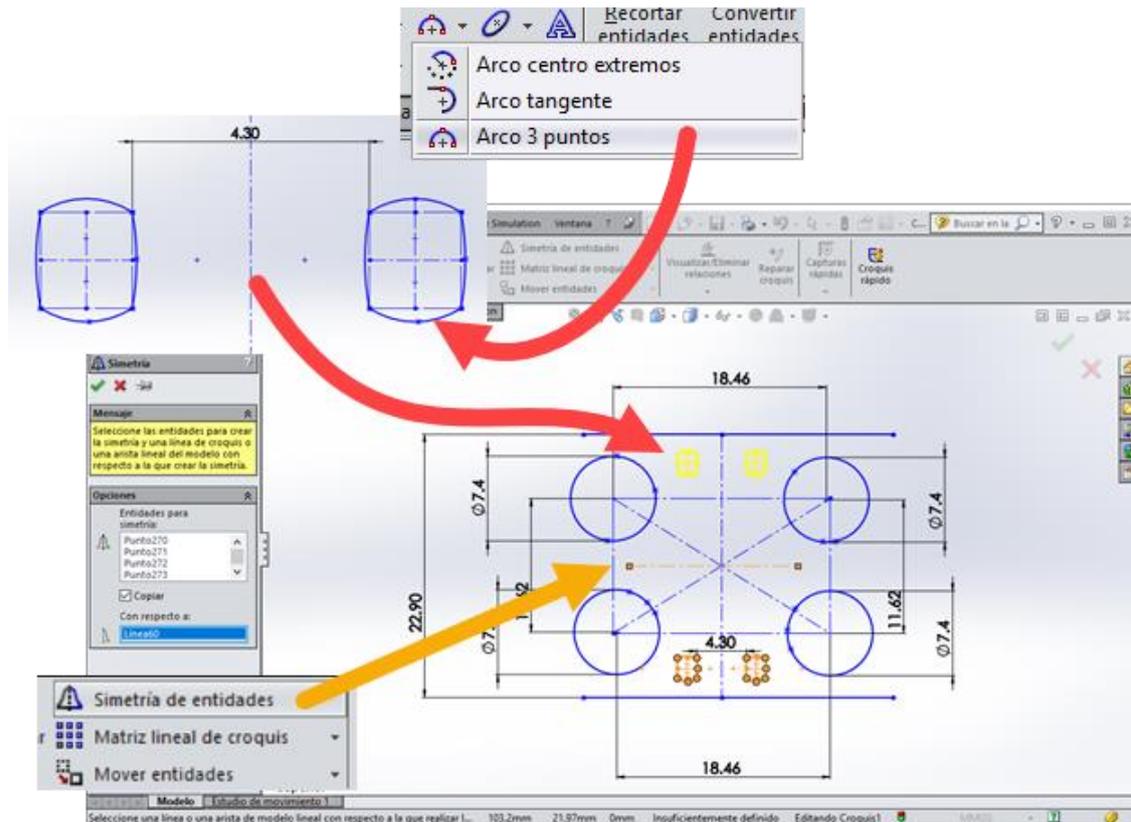


Figura 61. Croquización de las aperturas próximas a los extremos.

Se ajusta una circunferencia con los puntos extremos de las líneas para así tener una geometría concreta que modelar posteriormente. Para esto, únicamente se necesitan 3 puntos, y se tienen 6, por lo que habrá líneas que habrá que modificar su longitud para que lleguen hasta la circunferencia ajustada. Para ello, se ha utilizado las herramientas “Extender entidades” y “Recortar entidades”, Figura 62.

Si se quiere recortar una parte se ha de usar la segunda herramienta nombrada, y seleccionar la parte que se quiere eliminar. Si, por el contrario, lo que se pretende es extender una longitud, se ha de seleccionar la parte que se quiere extender, usando la primera herramienta nombrada. Al situar el ratón encima aparecerá el resultado de la operación en color mostaza en el caso de la extensión y de color morado en el caso del recorte.

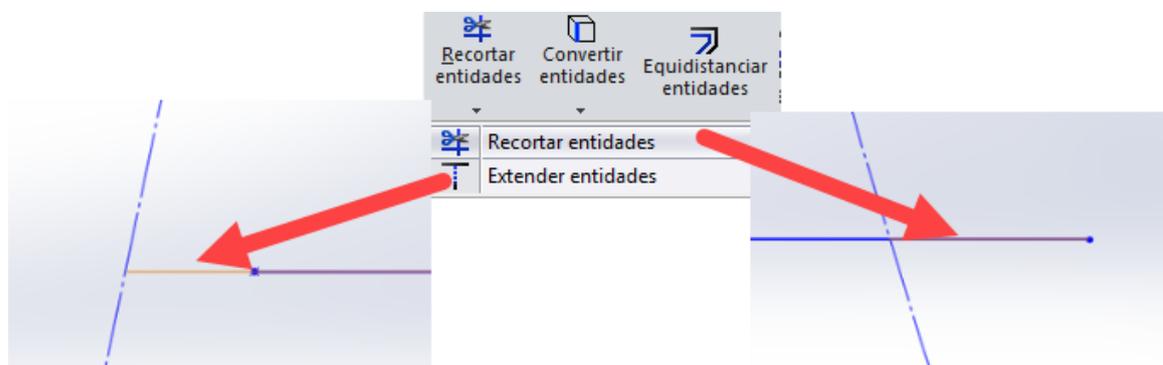


Figura 62. Recortar y extender entidades.

De esta forma se genera la geometría que delimita las aletas existentes dentro de la mayor. Una vez extendidas, recortadas las 6 líneas, se procede a situar el conjunto de manera centrada en el croquis, para esto, se utiliza la herramienta “Mover entidades”. Se ha de seleccionar los elementos a mover y un punto base, que, en este caso, será el punto medio de una de las 6 líneas.

Se sitúa de esta forma centradas las 6 líneas respecto a las circunferencias, espaciadas estas líneas 0,99 mm. y a una distancia de 1,13 mm de las aperturas generadas con anterioridad. Se realiza una simetría de estas 6 líneas, respecto a la misma línea que en la realizada anteriormente, y se obtiene el croquis completo que es visible en la Figura 63.

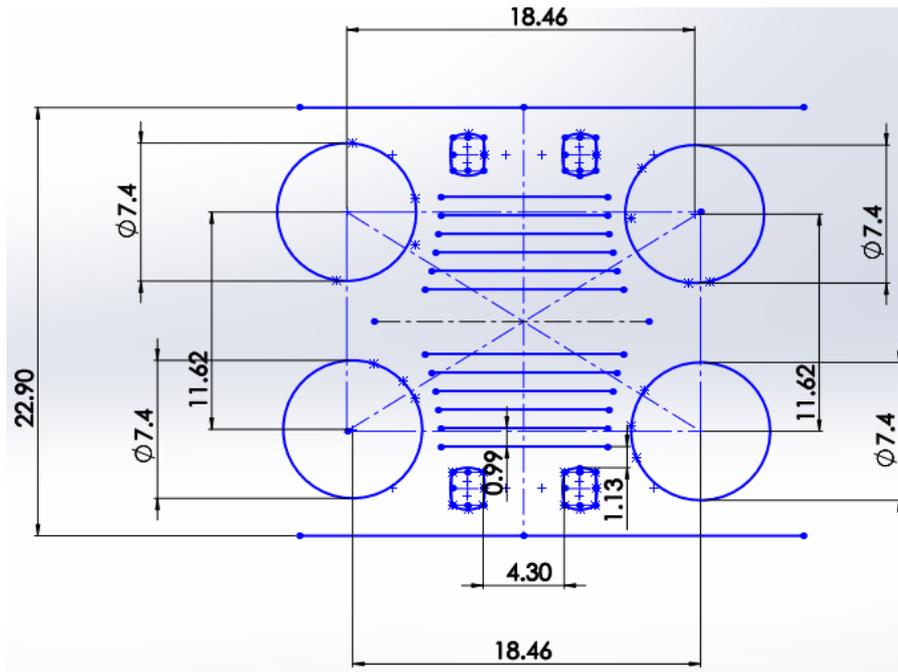


Figura 63. Vista general del croquis

Una vez terminado esto, se sale del croquis y se guarda bajo el nombre “Croquis parte aleta interior”. Este croquis será el que se usará después para generar el resto de la geometría, pues no será más que copiarlo longitudinalmente un número determinado de instancias.

Se procede ahora a realizar el croquis de la parte exterior de la aleta, para la medición de este elemento se usará también el proyector de perfiles. Partiendo de que el origen de coordenadas se situará en una esquina, se van moviendo los carros que representan al eje X y al eje Y, y gracias a los comparadores instalados, se irá brindando las coordenadas de los demás puntos significativos, para luego únicamente ajustar la geometría.

Se sitúan dos puntos que representan el ancho de la aleta, y se va a realizar una simetría. Primero se sitúa una circunferencia con tres puntos significativos que servirá para situar la geometría en el croquis completo que se realizará posteriormente. Tras esto, se realiza la V con el vértice redondeado, idealizando la geometría tal y como se ve en la Figura 64. Tras esto, únicamente queda realizar una simetría respecto a la línea discontinua dibujada.

Para situar la ventana tal y como se ve, únicamente se hubo de situar dos esquinas, para, copiar desde el archivo anterior la geometría y situarlo en su posición.

Realizando la simetría, la geometría queda completa y lista para ser guardada. Será salvada bajo el nombre “Croquis parte aleta exterior”. Para la realización del croquis en planta completo de la aleta se habrá de recurrir otra vez a estos dos croquis generados

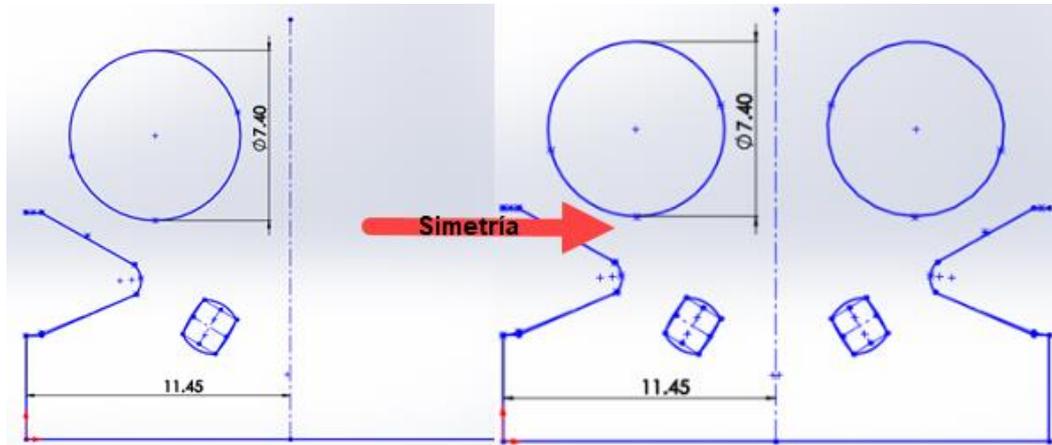


Figura 64. Croquis de la parte exterior de la aleta.

Se comienza, en este punto, a generar el archivo donde se va a realizar la aleta completa. Para ello, se abre un archivo pieza en blanco, y se comienza a editar un croquis en planta.

Se han de realizar las circunferencias que representan los agujeros de la aleta. Como se ve en la Figura 65, se parte de una distancia de 18,46 mm entre circunferencias en su longitud mayor y 11,62 mm en la longitud menor. Se tratan de 34 circunferencias, para este fin se va a utilizar la herramienta “Matriz lineal de croquis”.

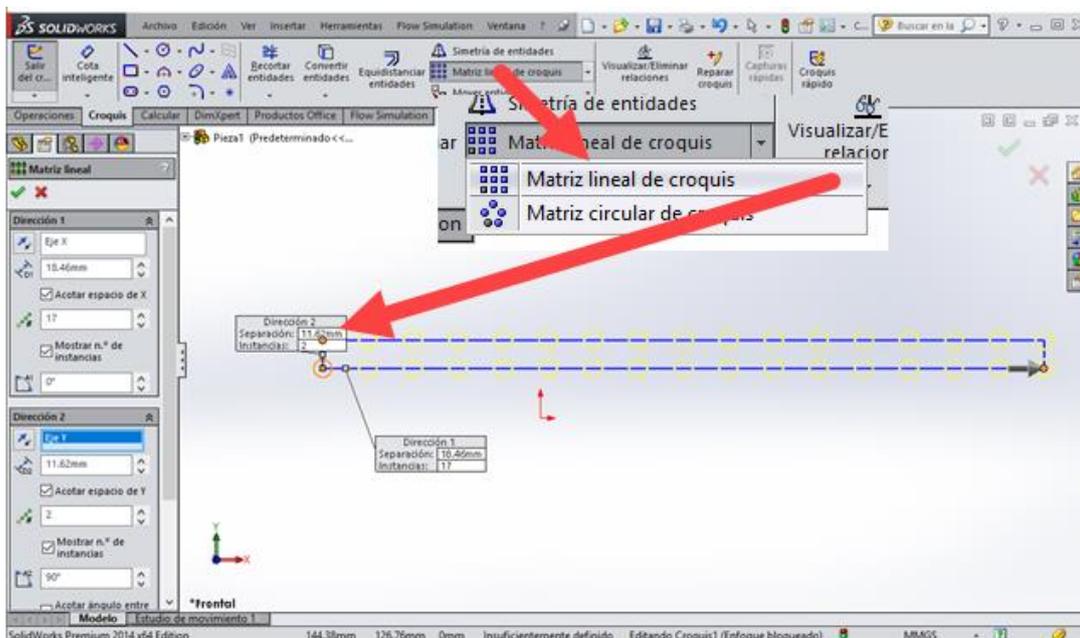


Figura 65. Matriz lineal de los agujeros de las aletas.

Se copian los dos croquis generados, los de la Figura 63 y la Figura 64. Para copiarlos y situarlos en su lugar correspondiente, únicamente es necesario abrir los dos archivos con

los croquis, seleccionarlos y hacer uso del atajo “Ctrl+C” que permite copiar sin elegir ningún punto base. Tras esto, mediante la herramienta “Mover entidades”. Se sitúan en su lugar pertinente seleccionando como punto base un centro de una de las circunferencias.

Mediante la herramienta que se ha utilizado para la ubicación de las circunferencias de 7,4 mm de diámetro, se utiliza para copiar los agujeros próximos al borde de la aleta. Esta vez el número de instancias serán 16, y estarán distanciadas una distancia de 18,46 mm. También, según el croquis de la Figura 25, se han de dibujar dos líneas paralelas que delimitan el borde exterior de la aleta, centradas y distanciadas entre sí 22,90 mm.

En cuanto a las líneas que sitúan las aletas que existen entre las circunferencias, hay que realizar una pequeña modificación antes de realizar la matriz lineal. En la medición con el proyector de perfiles solamente se ven reflejadas las aperturas entre aleta y aleta, por lo tanto, será necesario añadir una línea más, igualmente distanciada en la parte más cercana al borde exterior. Figura 66.

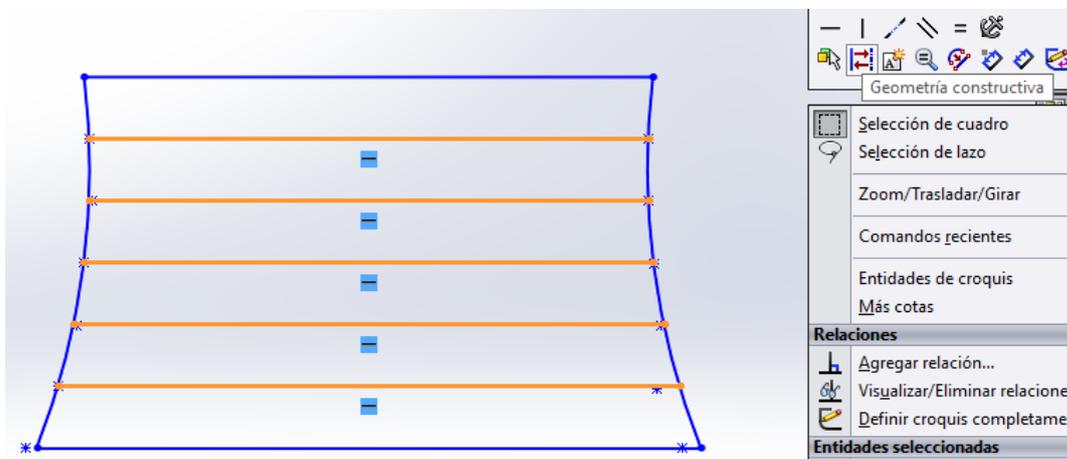


Figura 66. Disposición de las aletas interiores.

También es visible en la figura anterior la opción “Geometría constructiva”, con esta opción se pueden seleccionar un número finito de entidades en un croquis, pulsar el botón derecho, para así, marcarlas como geometría auxiliar, de esta forma, de cara a realizar una operación, estas no sean tenidas en cuenta para la realización de la misma.

Una vez realizado esto, tanto en el agujero superior, como en el inferior, se puede proceder a generar la matriz lineal con 16 instancias en el Eje X distanciadas 18,46 mm. Así, de esta manera queda generado completamente el croquis. Figura 67.

Tras esto, se ha de extrudir la forma base a partir del croquis, para ello se va a recurrir a la operación “Extrudir base/saliente”. Se ha de seleccionar la parte interior de la geometría generada, y en la cinta lateral introducir el valor de 0,065 mm como espesor de chapa. Figura 68.

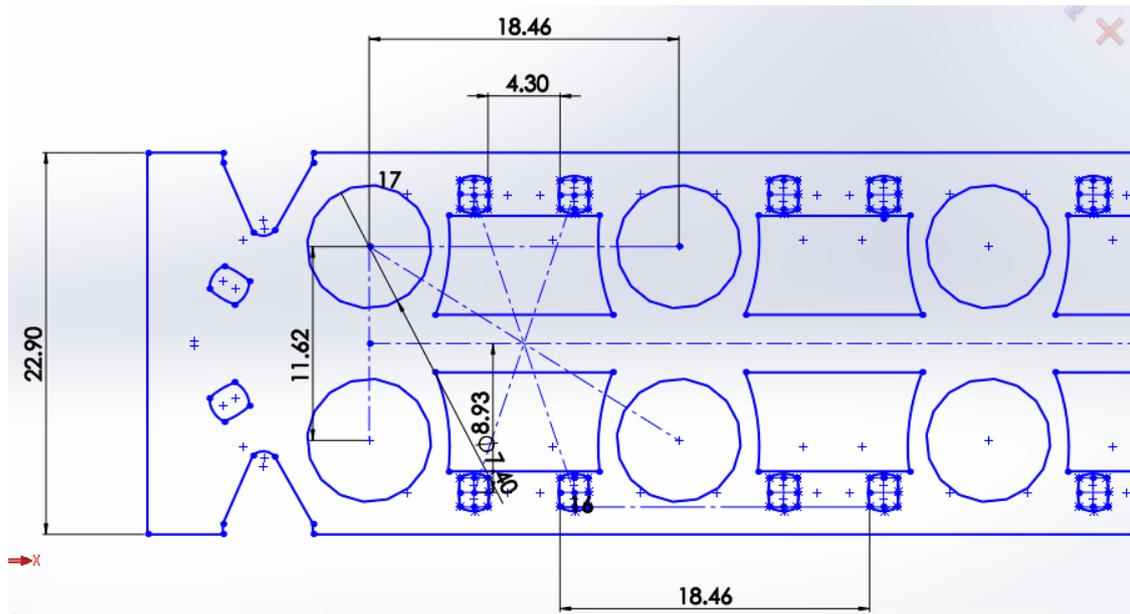


Figura 67. Croquis final de la aleta en planta.

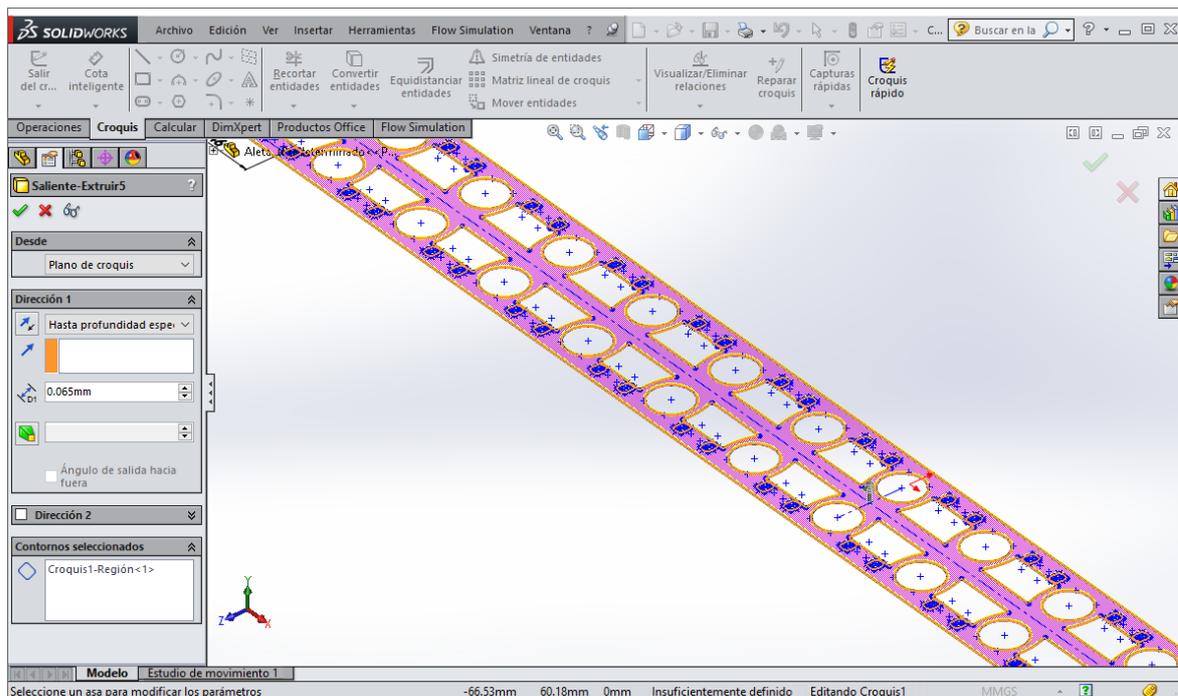


Figura 68. Operación “Extrusión de la geometría base de la aleta”.

A continuación, se han de generar las pequeñas protusiones en forma de pared, tanto en los agujeros por donde pasarán los tubos, como en los agujeros con forma rectangular que están pegados al borde de la aleta. Con este fin, se va a utilizar la operación “Extrudir saliente/base”. Las protusiones de los círculos por donde discurrirán los tubos serán de espesor igual a la chapa, y de 0,335 mm de altura respecto a la cara superior de la aleta. Mientras que, por el contrario, las protusiones de los agujeros cercanos al borde serán de 1,046 mm respecto a la misma referencia.

La primera medida fue obtenida mediante el micrómetro digital, en cambio la segunda ha sido obtenida matemáticamente, ya que cada aleta toca con la posterior. Y debido a que las aletas están distanciadas entre sí una distancia igual a 1,111 mm, la altura de las protrusiones mencionadas será obtenida restando el espesor de la aleta a este valor.

Para la realización de lo anterior, será necesario dos herramientas, “Convertir entidades” y “Equidistanciar entidades”, ambas visibles en la Figura 69.

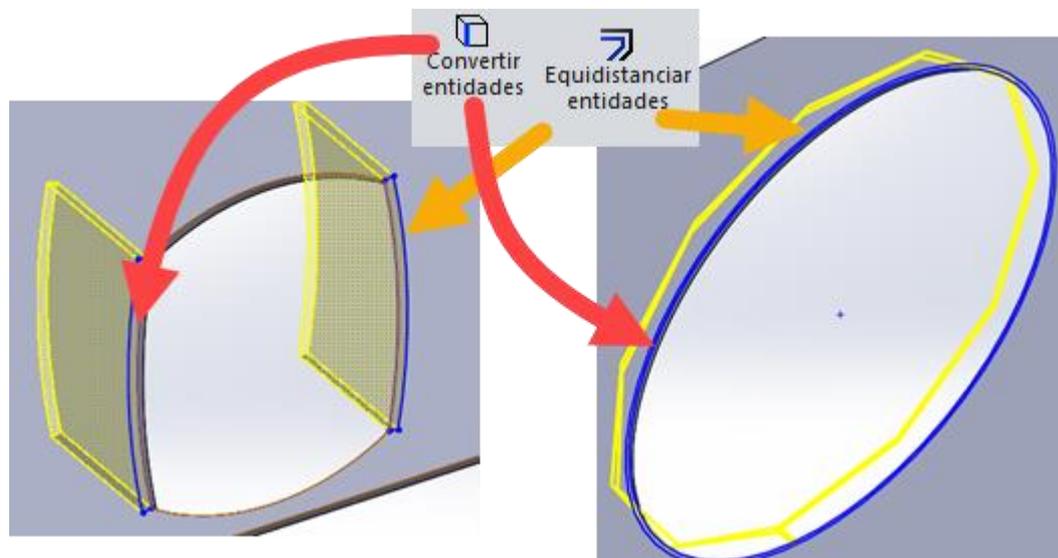


Figura 69. Extrusión de las protrusiones de la aleta.

La primera herramienta permite generar un croquis a partir de un contorno o de una cara de una geometría ya modelizada. Solo se ha de seleccionar el contorno que se quiere convertir. La segunda herramienta, permite realizar un contorno paralelo a la geometría seleccionada a una determinada distancia que se introduce en la cinta lateral izquierda.

Teniendo en cuenta lo anterior, se selecciona el contorno interior del agujero y se le realiza una equidistancia a 0,065 mm, cerrando estas dos curvas mediante dos líneas rectas como se aprecia en la Figura 69, y repitiendo esto mediante una matriz lineal a lo largo de todos los agujeros, se tiene lo que es visible en la citada imagen, una protrusión de 1,046 mm de altura.

Para la realización de las protrusiones de 0,335 mm de altura en cada uno de los agujeros se utilizarán las dos herramientas mencionadas, primero se seleccionará el contorno del agujero y posteriormente se realizará uno concéntrico a este a 0,065 mm de distancia. Tras esto, se ha de realizar una matriz lineal que sitúe estas circunferencias a lo largo de toda la aleta.

Así se habrá de configurar la herramienta con parámetros idénticos a los introducidos en la Figura 65. Tras esto, se sale del croquis y se le otorga la altura citada.

Así, únicamente queda la realización de las pequeñas aletas que hay entre los tubos. Se habrán de realizar de forma individual en uno de los huecos generados. Para, tras esto, realizar una nueva matriz lineal y así situarlas a lo largo de toda la aleta.

La altura de estas aletas fue medida por el micrómetro digital, obteniéndose un valor de 0,4 mm de altura. También se observó que las aletas estaban fabricadas mediante un proceso de mandrilado. Así que estas tendrán una pequeña inclinación, suponiendo el

ángulo de vaciado de unos 30°, aproximadamente. Estando estas igualmente espaciadas una distancia de 0,99 mm, y siendo un total de 6 aletas.

Para la realización de estas 6 aletas, se deberán llevar a cabo croquis 2D y 3D, los cuales definan completamente la aleta, esto es, todas sus aristas y caras, para tras esto, utilizar la operación “Recubrir”. Para la generación de los planos auxiliares de referencia, se habrá de utilizar la siguiente operación: “Geometría de referencia > Plano”.

Así, se tomarán sucesivos planos distanciados 0,99 mm, donde se realizarán los croquis de la geometría. Mientras que será entre estos planos donde se realizará el croquis en 3 dimensiones.

Para cada operación serán necesarios: dos croquis en dos planos distanciados 0,99 mm y un croquis 3D, que defina las aristas necesarias. Así, el primer croquis será un rectángulo que ajuste dimensiones al hueco disponible, mientras que el segundo será la forma final de la aleta en su máxima altura. Todo ello visible en la Figura 70.

Queda generar el croquis en tres dimensiones entre los dos planos, para ello, se utilizarán las herramientas de croquización usadas hasta el momento, para generar la geometría que es visible en la parte inferior de la Figura 70.

Con esto, quedan definida la geometría de la aleta, y únicamente queda recurrir a la operación “Recubrir” para generarla. Se seleccionan los dos croquis planos, y se pulsa sobre la herramienta, se han de seleccionar como curvas guía todas las aristas dibujadas en el croquis 3D. Quedando así modelada en tres dimensiones. Figura 70.

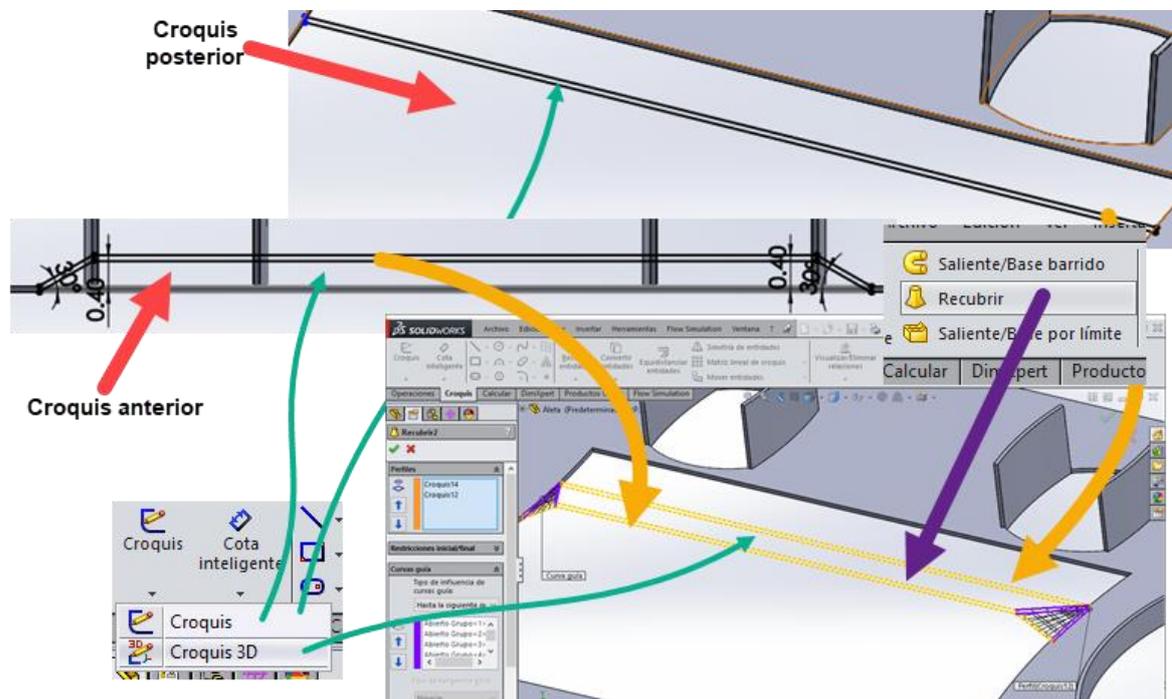


Figura 70. Geometría de la aleta pequeña.

Se ha de realizar el mismo procedimiento repitiendo la geometría de los croquis en cinco ocasiones más, ya que las dimensiones varían. Y utilizando la operación recubrir ese mismo número de ocasiones, de esta manera, queda lo visible en la Figura 71.

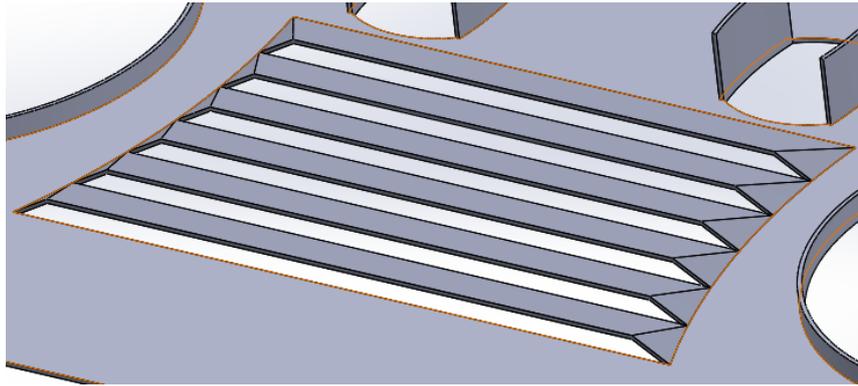


Figura 71. Aletas generadas

La disposición de estas aletas es simétrica respecto al plano medio de la aleta. Por lo que se habrá de definir, en primera instancia, este plano. Se han de seleccionar los dos planos que definen los bordes y seleccionar la opción “Plano medio”.

En la cinta “Operaciones” existe una herramienta llamada “Simetría” que permite realizar lo descrito con anterioridad.

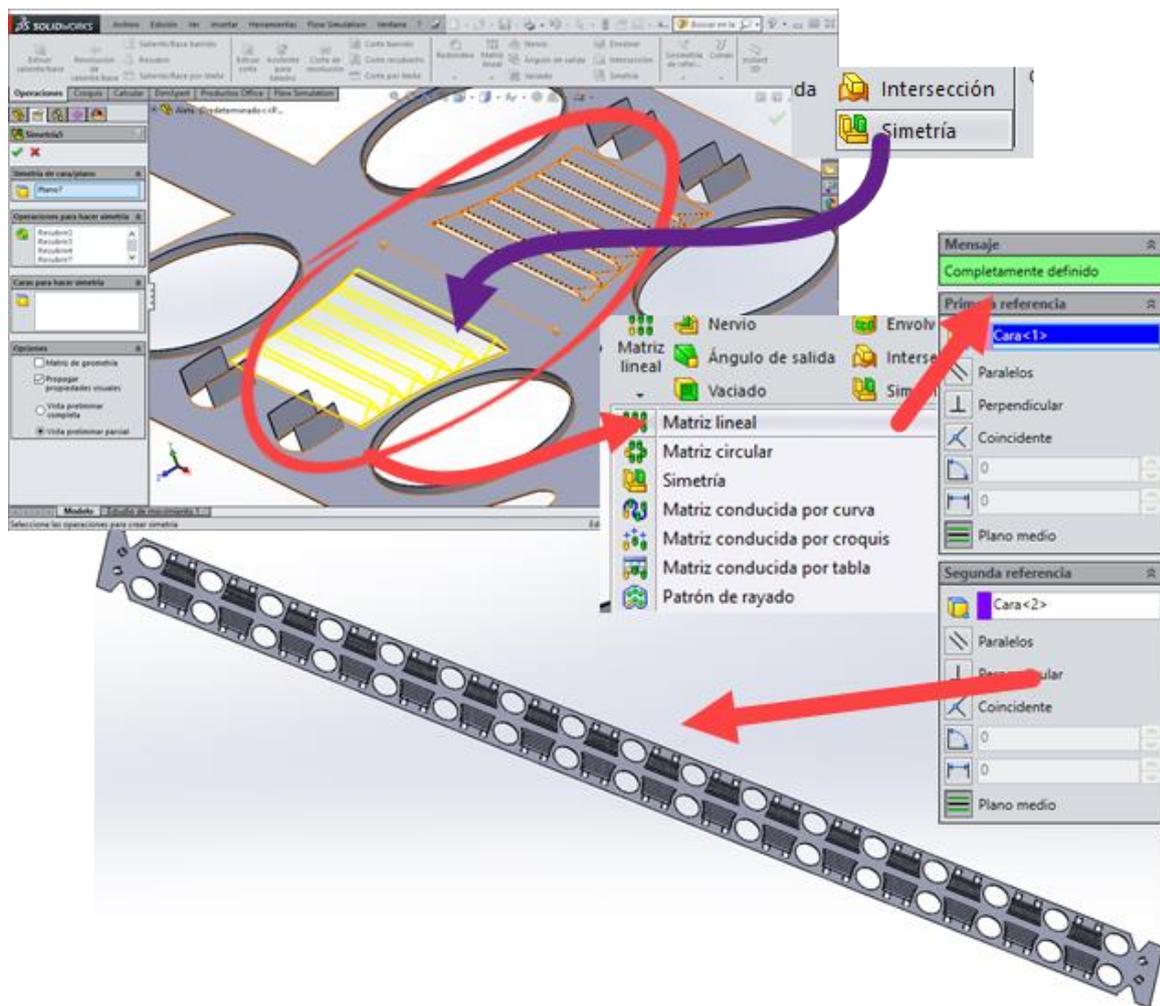


Figura 72. Aleta finalizada.

Se habrán de seleccionar todas las operaciones “Recubrir” con las que se han realizado las 6 aletas, y tomar de plano de simetría el plano medio generado. Para así obtener lo visible en la Figura 72.

En última instancia, para generar el resto de las aletas, en cada uno de los huecos, será necesario recurrir a la operación “Matriz lineal”, disponible en la pestaña “Operaciones” de la cinta superior. El funcionamiento es idéntico al de la matriz lineal de entidades de croquis, ya que consiste en seleccionar las operaciones que se han de repetir e introducir mediante la barra de herramientas de la izquierda, el número de instancias y a la distancia que están separadas cada una de ellas.

Así, seleccionando las operaciones “Recubrir” necesarias para generar las 6 aletas, y la operación “Simetría” necesaria para definir éstas en la parte inferior. Seleccionando como dirección una arista longitudinal de la aleta y repitiendo esto en 16 instancias con una separación de 18,46 mm, se obtiene lo visible en la Figura 72, la geometría final de la aleta.

3. Módulos de fijación de los tubos

Estos módulos, junto con la junta de estanqueidad, fijan la posición de los tubos. De la misma forma que para la pieza anterior, se genera un archivo pieza nuevo, y en el plano “Planta” se comienza un nuevo croquis.

En la cinta, justo debajo del comando línea, se tienen las herramientas que permiten la croquización de un rectángulo o paralelogramo según sean los datos de los que se dispone.

Mediante el pie de rey y la cinta métrica, se tomaron las mediciones del ancho y el largo de la parte central, por lo que para realizar el croquis se usó la herramienta “Rectángulo de centro”. Primero se debe indicar el centro del rectángulo para, posteriormente, indicar la posición de una de las esquinas. Tras esto, el rectángulo será debidamente acotado con la herramienta “Cota inteligente”, que aparece en la misma cinta. En este caso, se le dieron unas dimensiones de 310 x 34 mm.

También se tiene que los bordes están redondeados, para reflejar esto en el croquis, se acude a la herramienta “Redondeo de croquis”. Con esta herramienta, se ha de indicar el radio de acuerdo en las esquinas en la cinta izquierda y seleccionar las dos líneas que conforman cada una de las esquinas para plasmar el redondeo mencionado. En este caso, se midió que el radio de acuerdo existente entre esquinas es de 7 mm.

Una vez realizado esto, se han de situar los agujeros por donde pasan los tubos del intercambiador. Estos agujeros son pasantes y de diámetro mayor que el calibre del tubo, 8,2 mm. Será la junta de goma lo que sellará y posicionará definitivamente los tubos en su posición, por esto, los diámetros de estos agujeros son de un diámetro mayor.

Solamente es necesario situar correctamente la primera circunferencia, pues las demás serán generadas con una matriz lineal, lo que permitirá ahorrar y simplificar el trabajo en la herramienta 3D.

Todos los agujeros se encuentran distanciados 18,46 mm en la dirección de mayor número de repeticiones y a 11,46 mm en la dirección de menor número de repeticiones.

Estos círculos serán generados mediante la herramienta “Matriz lineal de croquis” de la misma manera y con la misma configuración que para el caso de las aletas, salvo que el diámetro de los círculos será de 8,2 mm. Estarán centrados respecto al rectángulo que delimita el borde de la parte central del colector. Con este fin, se unirán los centros de las circunferencias más alejadas y mediante la herramienta “Mover entidades” seleccionando como punto base el punto de corte de ambas líneas, para mover esto al centro del rectángulo anteriormente generado.

Para no llevar a confusión al programa, será necesario que toda línea auxiliar sea denotada como tal. Con este fin, se selecciona las líneas que han servido para situar la matriz de círculos, y se pulsa botón derecho > “Geometría constructiva”.

Tras esto, queda totalmente definido el croquis de la parte central, ahora se ha de salir de este y, en la pestaña “Operaciones”, seleccionar la herramienta “Extrudir base/saliente. Otorgándole la dimensión altura de 1 mm de grosor. Figura 73.

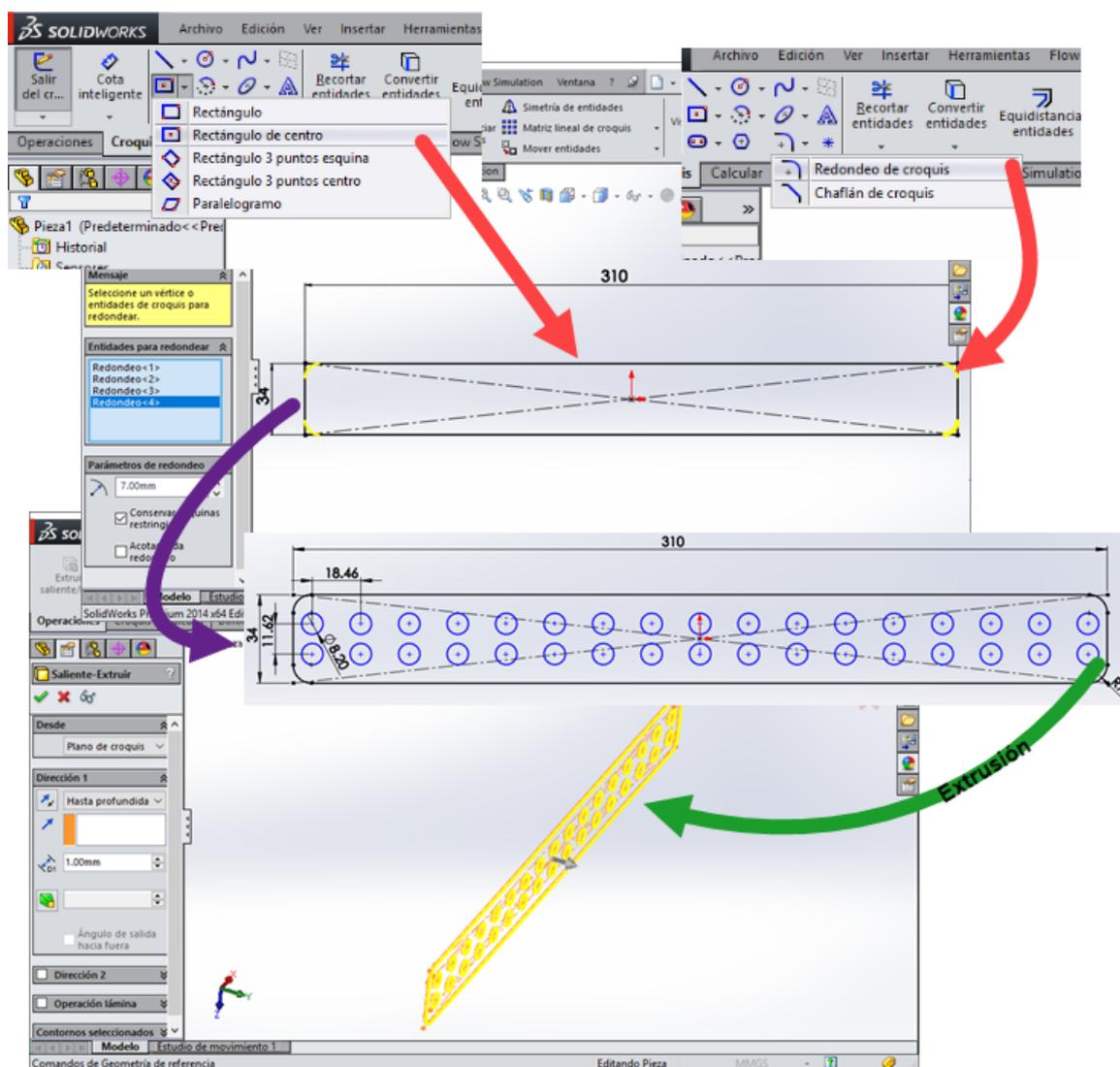


Figura 73. Proceso de modelado de la parte central del módulo fijación

En la cinta lateral izquierda, en la opción Dirección 1, se selecciona “Hasta la profundidad especificada” y en la casilla siguiente se le introduce el espesor de la chapa, en este caso,

1 mm. Se presiona posteriormente el icono verde de la esquina superior derecha para concluir la operación.

Presionando la barra espaciadora, el software nos permite visualizar cada una de las posibles vistas. Para el siguiente paso será necesario seleccionar una vista posterior o trasera. Se selecciona la operación “Extrudir base/saliente” pues lo que se va a realizar, va a ser la extrusión del saliente que conecta esta parte central con la base inferior. Tendrá espesor 1 mm y una altura de 5 mm.

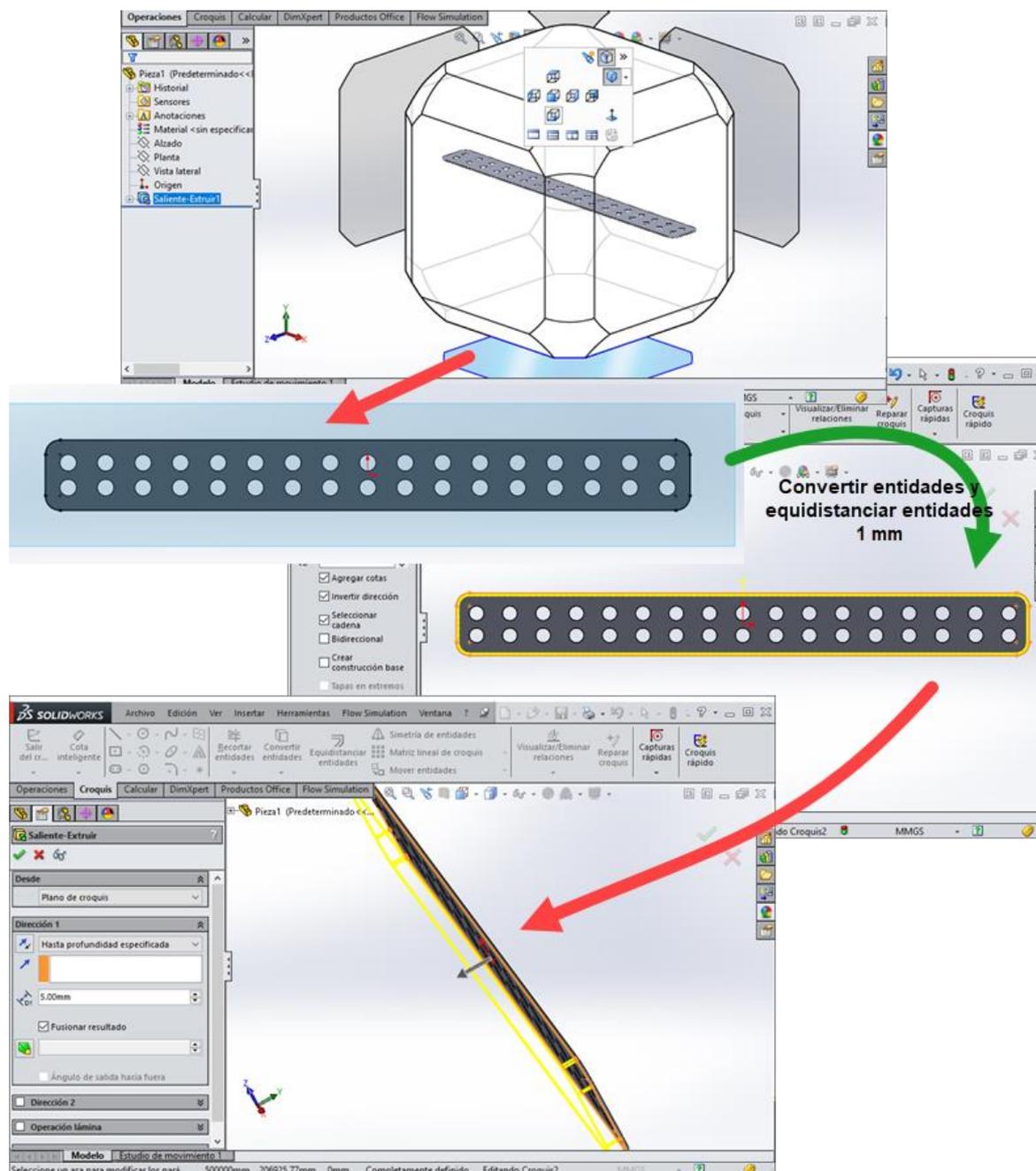


Figura 74. Creación del saliente de 5 mm de altura y 1 mm de espesor.

Este saliente será extruido alrededor de todo el contorno de la pieza, por lo que, para realizar el croquis de una manera más rápida, se utiliza la herramienta “Convertir entidades” en la cinta superior, en la pestaña “Croquis”.

Esta herramienta únicamente ofrece una proyección sobre el plano en el que se está croquizando de los elementos que se seleccionen. Así, situándose en un croquis tras haberse seleccionado la operación “Extrudir base/saliente” y la cara inferior de la parte central, se utiliza, ahora, la herramienta mencionada y se selecciona línea por línea el contorno de la dicha base.

Tras esto, se habrá generado el croquis, y ahora se selecciona las líneas generadas con un cuadro de izquierda a derecha. Figura 74.

Ahora, mediante la herramienta “Equidistanciar entidades” se realiza una copia del croquis realizado a 1 mm de distancia hacia el interior, para ello, será necesario seleccionar “Invertir dirección”. Saliendo del croquis, solo habrá que darle los dichos 5 mm de altura a lo dibujado.

Este mismo proceso se lleva a cabo para obtener la base inferior. Pero ahora se selecciona la pequeña superficie que se puede observar en la Figura 75. Mediante la operación “Extrudir saliente/base” se realiza un croquis sobre esta cara inferior generada con la última operación.

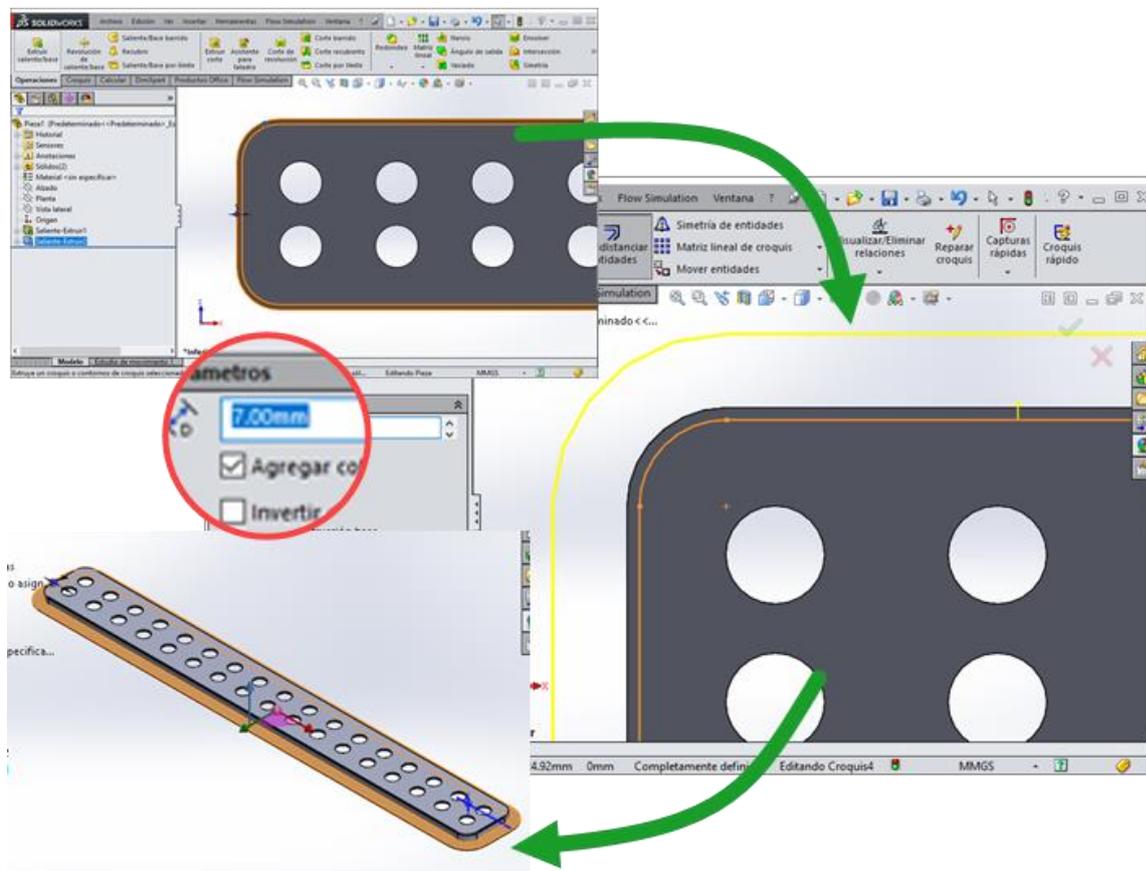


Figura 75. Equidistanciar entidades.

Con la herramienta “Convertir Entidades”, se selecciona el filo interior del saliente anteriormente generado, para ahora, mediante la herramienta “Equidistanciar entidades” generar una copia del croquis, concéntrico a este, a una distancia de 7 mm. Figura 75.

Por último, se ha de elevar en la dirección positiva Y 1 mm, para darle el espesor de la chapa. En el plano seleccionado en la primera imagen de la Figura 76 será donde,

mediante el proceso seguido con las dos últimas operaciones, donde se genera el último saliente, de 1 mm de espesor y 6 mm de altura.

Esta vez será el contorno exterior el que se seleccionará con la herramienta “Convertir entidades” para luego, mediante “Equidistanciar entidades” se copie dicho contorno 1 mm hacia dentro y por último se extrudirá hasta una altura de 6 mm.

Así, una vez otorgada la altura de 6 mm a dicho croquis, queda una única operación. Se ha de realizar las protrusiones en la parte anterior de los agujeros, éstas, aseguran una buena fijación entre tubo, goma y módulo.

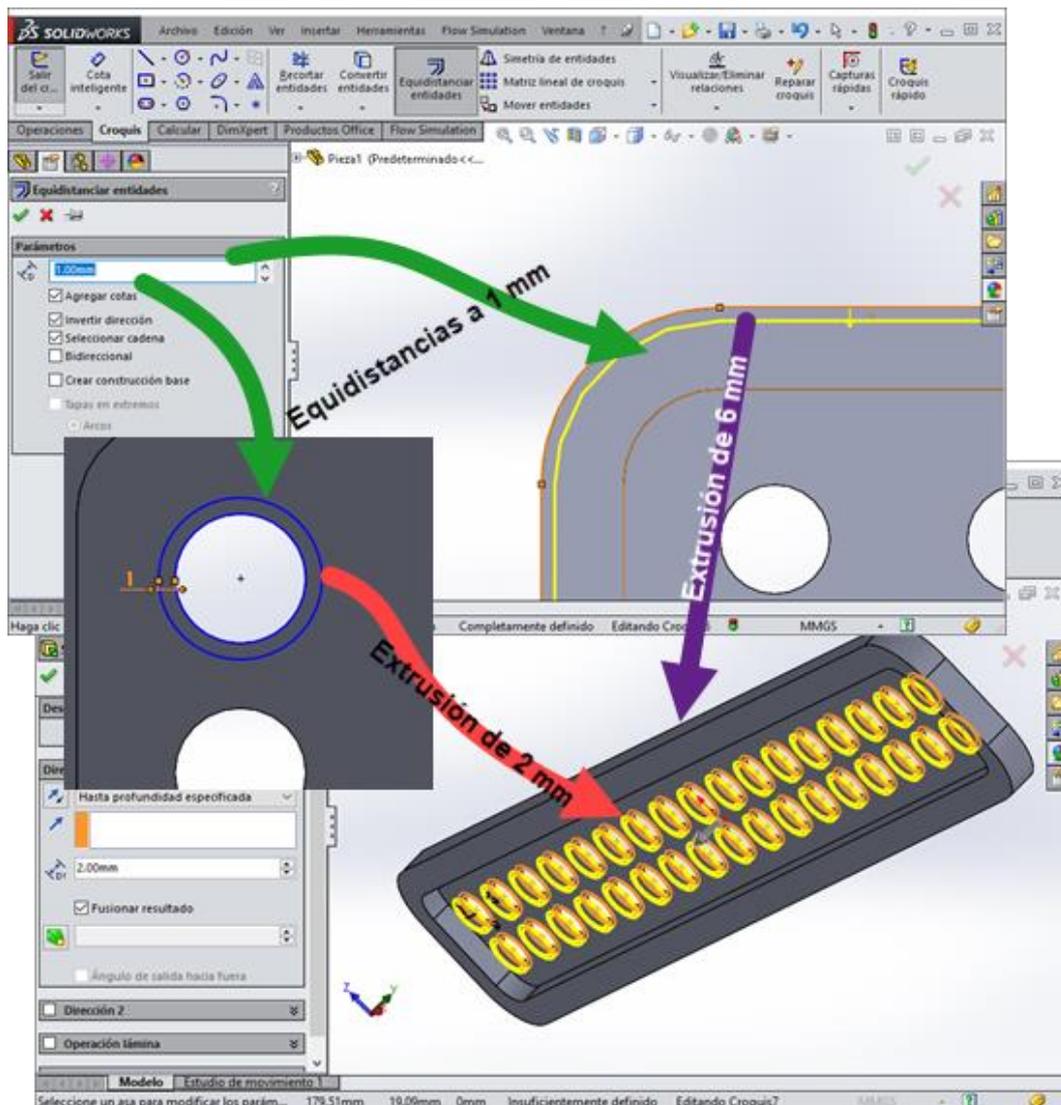


Figura 76. Extrusiones finales para completar el modelado del módulo de fijación.

Para ello, se realiza un croquis en la parte posterior de la parte central del módulo, y se realiza dos circunferencias concéntricas al agujero realizado. Una con el mismo diámetro y la segunda distanciada un 1 mm de la anterior.

Seleccionando ambas circunferencias, se realiza una matriz lineal, para repetir esta configuración en cada uno de los agujeros. Por lo tanto, las opciones seleccionadas y los datos introducidos son los mismos que los incorporados en la Figura 65.

Extruidos las protrusiones de 2 mm de altura, queda totalmente definida la geometría de los módulos de entrada y de salida. Se salva la pieza con el nombre de “Modulo_E-S” en el mismo directorio donde anteriormente se habían salvados las demás piezas.

4. Junta de estanqueidad

Esta junta está presente entre los módulos de fijación de los tubos Sella el flujo del líquido caloportador para que no existan fugas al paso del dicho líquido desde los colectores al circuito con los tubos. Está fabricada en un material plástico que ajusta perfectamente.

Se modela con un espesor de 0,8 mm. Tendrá una forma similar al colector, de hecho, la parte central seguirá las mismas dimensiones que esta, para que el ajuste en el ensamblaje sea preciso y correcto.

Se genera un nuevo archivo pieza. Se parte de un croquis en planta, en el cual se genera el mismo croquis de la Figura 73, con la diferencia de que el borde exterior estará equidistanciado de este 0,8 mm hacia el exterior.

Se realiza, tras esto, la extrusión de este croquis con una altura acotada a 0,8 mm, que es el espesor de la junta. Así queda definida la parte central.

Tras esto, se procede a la realización de las protrusiones que poseen los agujeros, de 3 mm de altura medido desde la cara posterior y de 0,8 mm de espesor. Estas protrusiones serán las que fijen por completo los tubos a los colectores de entrada y de salida.

Se procede, en este punto a realizar las paredes de la junta de estanqueidad, de manera que encaje en los colectores. Se ha tomado de referencia el modelo de estas para realizar los siguientes pasos.

Se realiza un saliente de 0,8 mm de espesor y 5 mm de altura en el contorno exterior del sólido creado, mediante la herramienta “Extrudir saliente/base”.

Como en los casos anteriores, se realiza esta operación con la herramienta “Convertir entidades”, usada para seleccionar el contorno exterior de la cara posterior, y “Equidistanciar entidades”, para una vez generado el contorno, generar uno idéntico a 0,8 mm hacia el interior, concéntrico al contorno generado con la herramienta anterior. Saliendo del croquis, solo habrá de indicarse la altura de esta pared, 5 mm.

Se genera ahora la base inferior, partiendo del plano que se indica en la Figura 77, mediante la herramienta “Extrudir saliente/base”. En este caso, se extrude en la dirección positiva del eje Y, una altura de 0,8 mm, coincidente con el espesor de la junta. El croquis del que se parte, se genera con las mismas herramientas que el croquis anterior. La base mide 5 mm de ancho total.

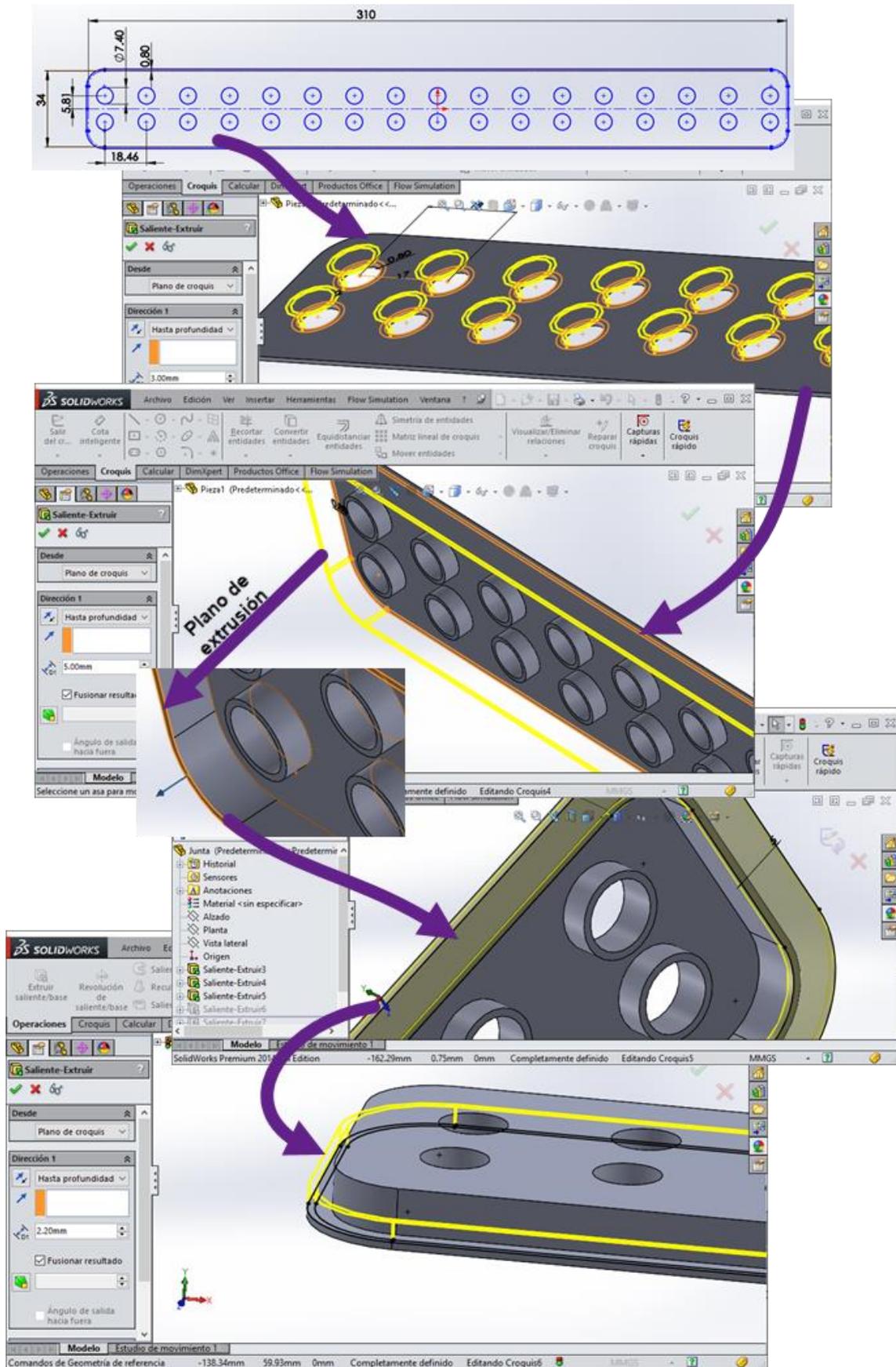


Figura 77. Proceso de modelado de la forma base de la junta de estanqueidad

El siguiente paso en la modelización de este elemento es la generación del borde exterior de 3 mm de altura. Para esto, se sigue el mismo procedimiento que el seguido hasta ahora. Primero, se selecciona el plano de extrusión, para, con las herramientas “Convertir entidades” y “Equidistanciar entidades”, generar la pared. Tras esto, se sale del croquis y se le da la dimensión altura, esta vez 2,2 mm, para que el total medido desde la base inferior sea de 3 mm.

Lo último en modelizar en esta pieza son las guías que tienen en la parte superior, que sirven para hacer de tope con los colectores, que dirigen el flujo de agua por los tubos. Así con la operación, “Extrudir saliente/base”, en el plano superior de la junta. Se trata de dos pequeños salientes entre los agujeros como se ve en la Figura 78.

A este croquis se le ha de realizar una matriz lineal, ya que existen 8 instancias de las guías entre los agujeros centrales. Por último, se realiza la protrusión del croquis, el cual tiene una altura de 1 mm, quedando lo mostrado en la parte final de la Figura 78.

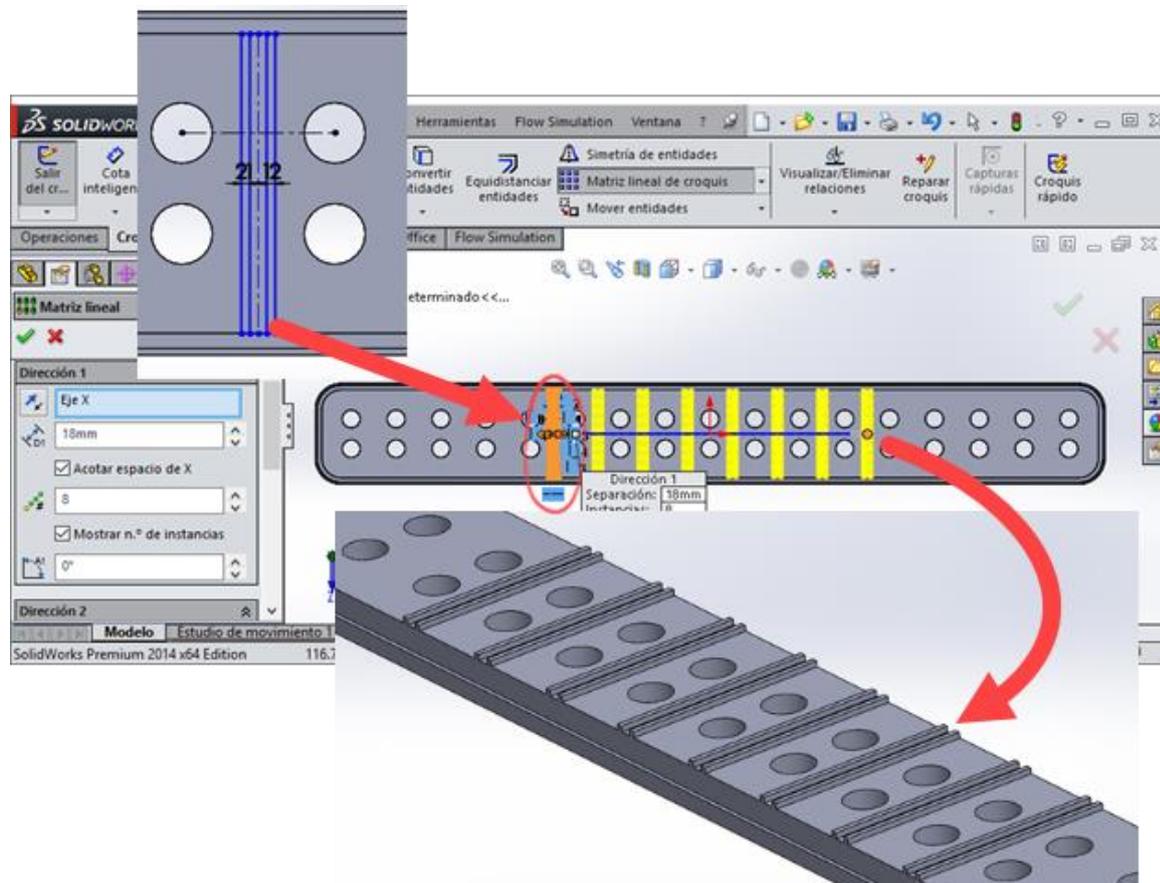


Figura 78. Modelización de las guías.

Se ha de guardar la pieza creada en el mismo directorio que el resto, bajo el nombre “Junta.SLDPRT”.

5. Colector de entrada

Este colector recoge el agua que llega de los tubos y la redirige hacia la trayectoria siguiente que le corresponde. Durante el recorrido del agua, ésta realiza 3 pasos por carcasa antes de salir al exterior.

Partiendo de un archivo pieza nuevo, se va a extrudir un saliente en planta, con el croquis que es visible en la Figura 79. Se le otorga una altura de 6 mm.

Una vez generado, se realiza un corte en la base inferior, para que ajuste con el módulo de entrada y con la junta. Para esto, se va a recurrir a la herramienta “Corte barrido”, que permite realizar un corte a un sólido a lo largo de una curva. Se ha de realizar un croquis en el plano “Vista lateral” de la geometría con la que se va a realizar el corte. Una vez hecho esto, se selecciona como curva guía el perímetro exterior de la pieza protrusionada anteriormente, como se puede ver en la Figura 79.

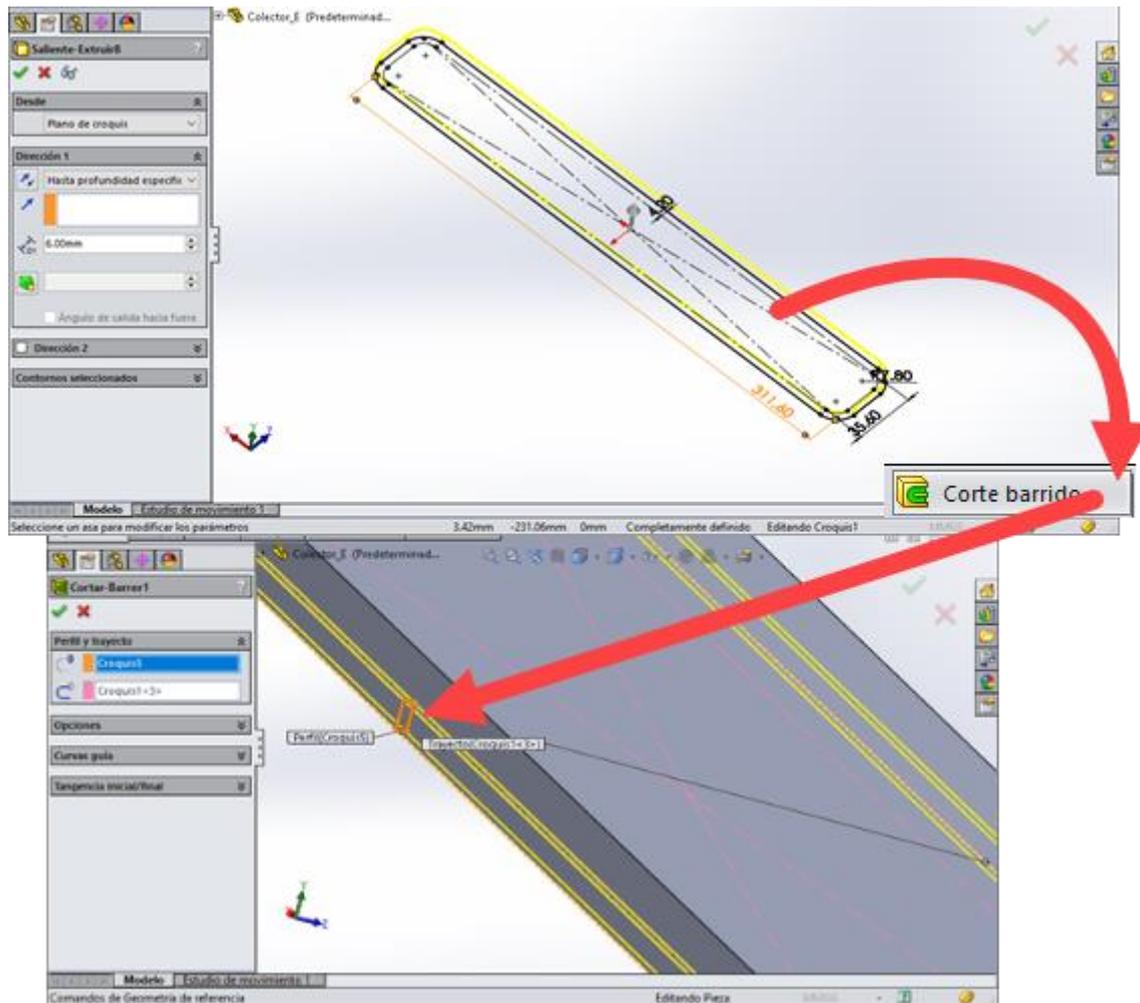


Figura 79. Base del colector de entrada.

Siguiendo la forma del colector, se realiza, en la cara superior del sólido generado, un saliente de 10 mm de altura. Tendrá la misma forma que el contorno, pero estará equidistante de este 4,20 mm. Figura 80.

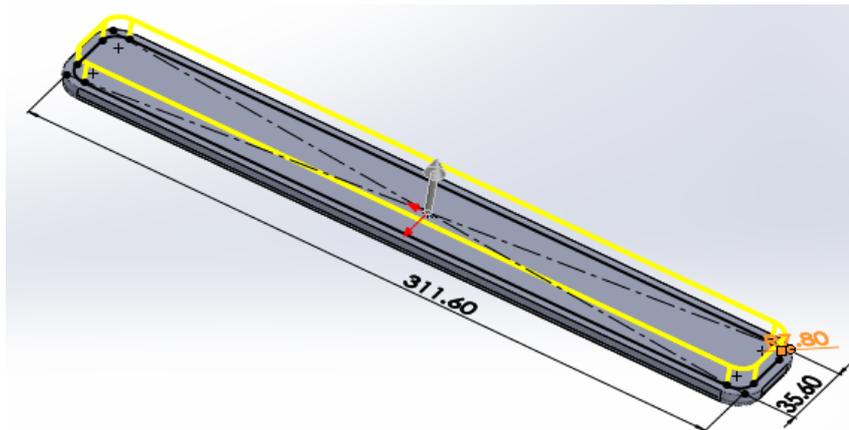


Figura 80. Extrusión de 10 mm de altura.

El siguiente paso será realizar, mediante una operación de “Extrusión por revolución”, la geometría superior. Para ello, se parte croquizando en el plano superior del elemento generado. El eje de revolución será la línea recta visible en la Figura 81 que equidista de las dos aristas mayores de la cara superior.

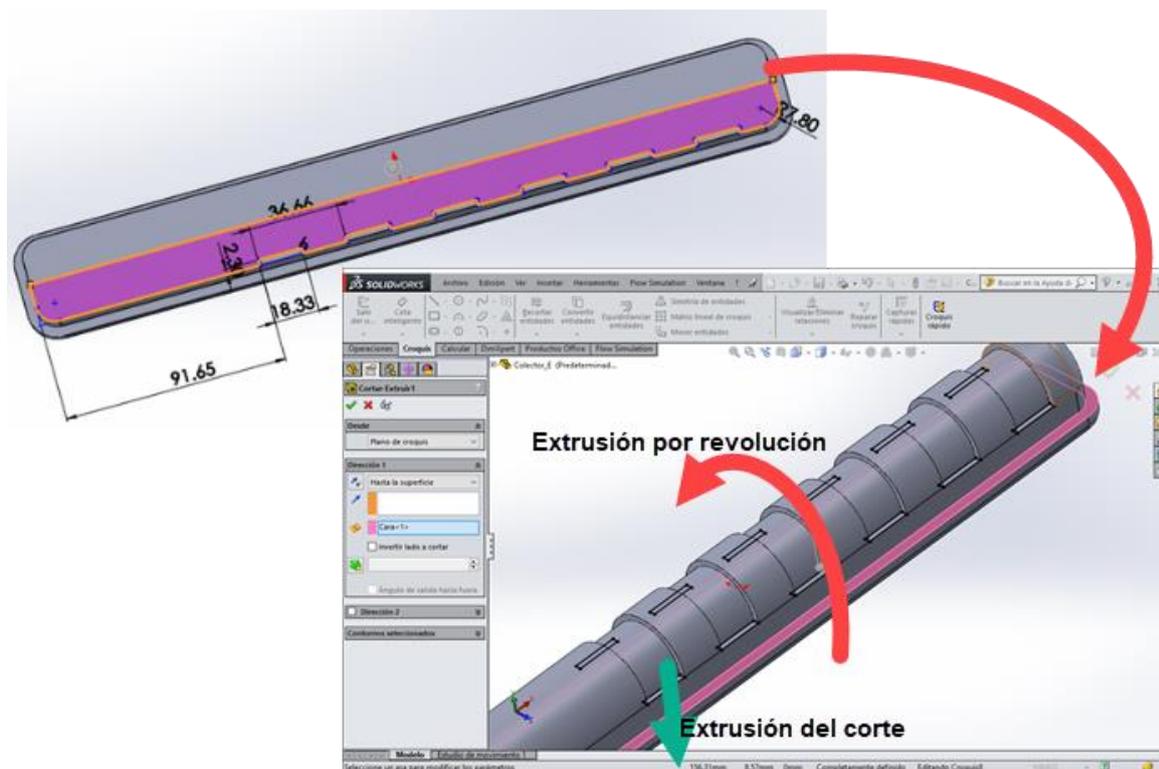


Figura 81. Extrusión por revolución.

El siguiente paso será cortar lo sobrante de la protrusión realizada en primera instancia, para esto, se va a utilizar la herramienta “Extrudir corte”. Se realiza el croquis en la misma cara que se ha realizado el croquis anterior, se utiliza la herramienta “Convertir entidades” para realizar el mismo. El corte se extrude hasta la cara inferior. Para esto, se ha de seleccionar la opción “Hasta la superficie” en cinta lateral y posteriormente seleccionar la cara que es visible en la Figura 81.

Lo siguiente es realizar la entrada por donde, inicialmente, va a discurrir el fluido. Esto se va a realizar mediante una operación “Barrido”, la dinámica es equivalente a la realizada para el caso del corte. Primero se ha de definir el perfil a barrer y dotar a este, de una curva guía por donde avance.

Se habrá de definir en este caso, tanto la geometría para barrer, así como la curva guía. Para lo primero se ha de definir un plano de referencia que esté a 83 mm de la cara posterior, para eso se utiliza la herramienta que se puede hallar en la pestaña “Operaciones” de la cinta superior “Geometría de referencia > Plano”. En este plano se sitúa la circunferencia según las mediciones realizadas.

Perpendicularmente a este plano y pasando por el punto central de la circunferencia, se ha de realizar el croquis de la curva guía. Se genera un plano paralelo a “Vista Lateral” que pase por el dicho punto, y se realiza el croquis de la Figura 82. El radio de curvatura se elige de 18 mm, para poder realizar posteriormente el vaciado de forma correcta. Tras esto, se seleccionan los dos croquis para lo que han sido dibujados, y se completa la operación pertinente. Visible también en la Figura 82.

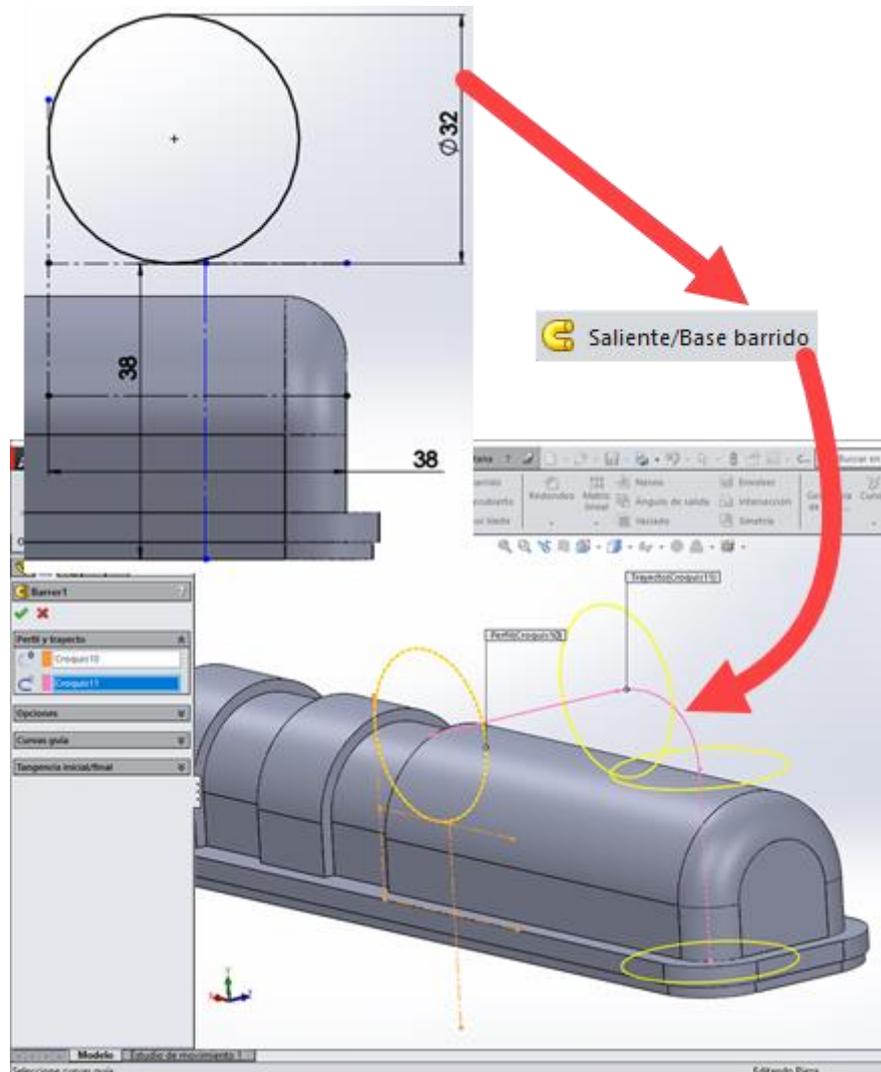


Figura 82. Croquis, trayectoria y operación barrido.

Para realizar el saliente que existe al lado de este tubo de entrada del fluido caloportador, se va a recurrir a la operación “Extrudir saliente/base”. Con las medidas realizadas, se modeliza tal y como es visible en la Figura 83. Se realiza una extrusión de 10 mm de profundidad de este elemento. Puesto que una de sus caras está inclinada, se le realiza a este mismo elemento recién extrudido un corte para alcanzar la geometría correcta. Para esto, se utiliza la herramienta “Extrudir corte”. Se va a dibujar en una cara lateral y se va a poner como límite la opuesta, configuración visible en la Figura 83.

A continuación, se realiza el saliente posterior que tiene el colector junto a la cara que está inclinada. Este saliente será tangente a la cara pintada de color rosa en la Figura 83, y tendrá un ancho de 23 mm. El saliente comienza en la cara plana generada con la extrusión de la Figura 80.

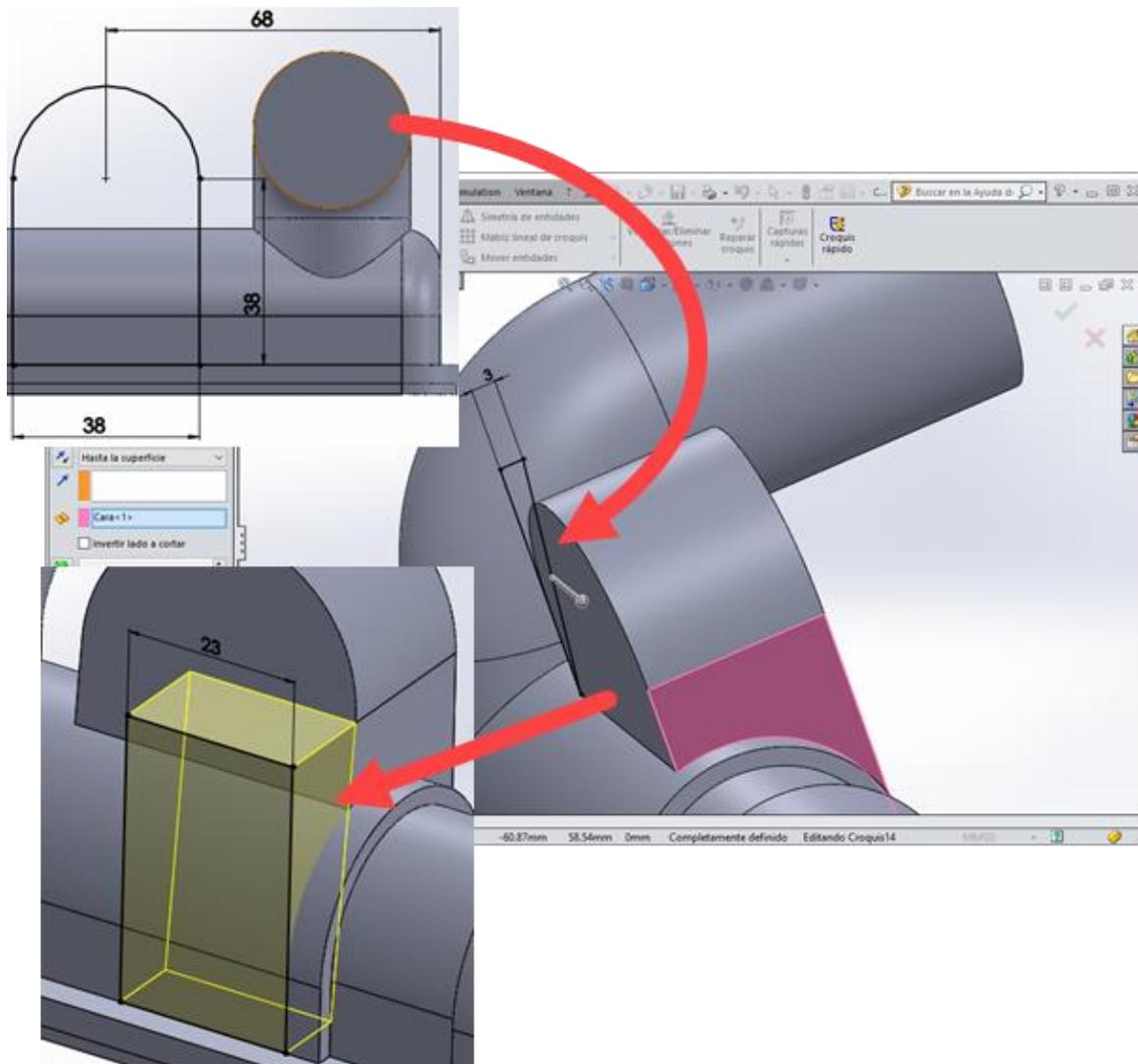


Figura 83. Corte de la cara inclinada.

Para llevar a cabo la mordedura existente en una de las esquinas, se va a utilizar la herramienta “Extrudir corte”. La geometría del dicho corte se puede observar en la Figura 84. Así como las opciones con las que se ha configurado la operación en esta ocasión.

El plano escogido para dibujar el croquis no es donde realmente comienza el corte, sino que está a 6 mm de distancia. Por este motivo, en la cinta lateral, en el cuadro por título

“Desde”, se selecciona “Equidistancia” y se le introduce el citado valor. Este corte será realizado desde ese plano paralelo, hasta el final de la geometría, es la razón por la que se selecciona en el cuadro “Dirección 1”, la opción “Por todo”. Con esta configuración, queda lo que es visible en la Figura 84.

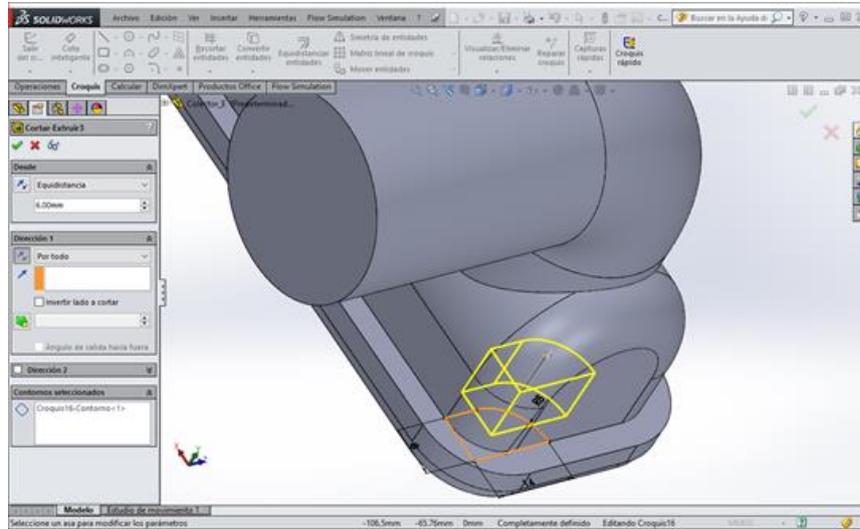


Figura 84. Mordedura en una esquina del colector.

Se sigue con las distintas protrusiones que tiene la pieza a lo largo de la geometría, mediante la operación “Extrudir saliente/base”, se realiza el siguiente croquis en la cara inferior de la geometría generada hasta el momento, aunque dicho croquis se dibuja desde una vista superior por facilidad para tomar las referencias desde las cuales se ha medido.

La altura de dicho saliente es de 40 mm referido a la cara inferior de la pieza. Por ello, al igual que en la mordedura anterior, se recurre a la opción “Equidistancia” con dicho valor y se extrude en dirección Y negativa, hasta el plano inferior. Se le dota a esta extrusión un ángulo de vaciado de $1,5^\circ$ hacia fuera, debido a que la base inferior tiene unas dimensiones mayores que la que tiene en su mayor cota. Figura 85 (a).

Se realiza ahora el agujero existente en el saliente generado en la Figura 83. Se realiza mediante la operación “Extrudir corte”, con las dimensiones que se pueden observar en la Figura 85 (b). Se trata de un agujero ciego de 4 mm de diámetro y 15 mm de profundidad, el cual está situado a 8,5 mm de un borde y 3,5 mm del otro.

Tras esto, se realizan los salientes rectangulares que faltan a lo largo del colector. Con este fin, se usa la herramienta “Extrudir saliente/base”. Se dibuja el croquis en la cara inferior de la geometría generada, pero situándose en una vista superior para poder localizar fácilmente las referencias geométricas. Figura 86.

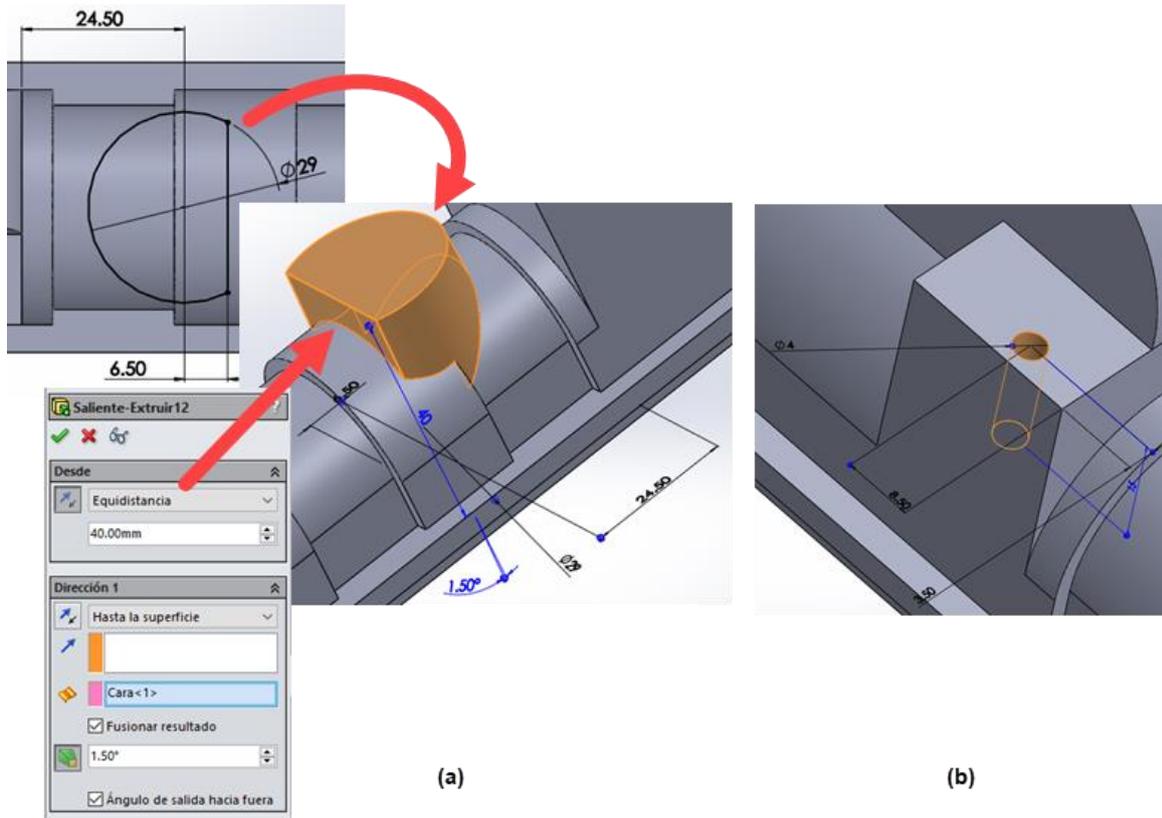


Figura 85. Modelización del saliente (a) y realización de un agujero ciego (b).

Estos salientes tienen un ángulo de vaciado estimado en 2 °, por lo que la configuración de la operación una vez realizado el croquis es la representada en la Figura 86.

Se tiene que la distancia desde la cara superior de los salientes, hasta la cara inferior del colector es de 34 mm, por lo que, en la opción “Equidistancia”, será este valor el que se ha de introducir. Siendo la cara inferior, donde se ha dibujado el croquis, la cara límite de extrusión. Obteniéndose lo visible en la Figura 86.

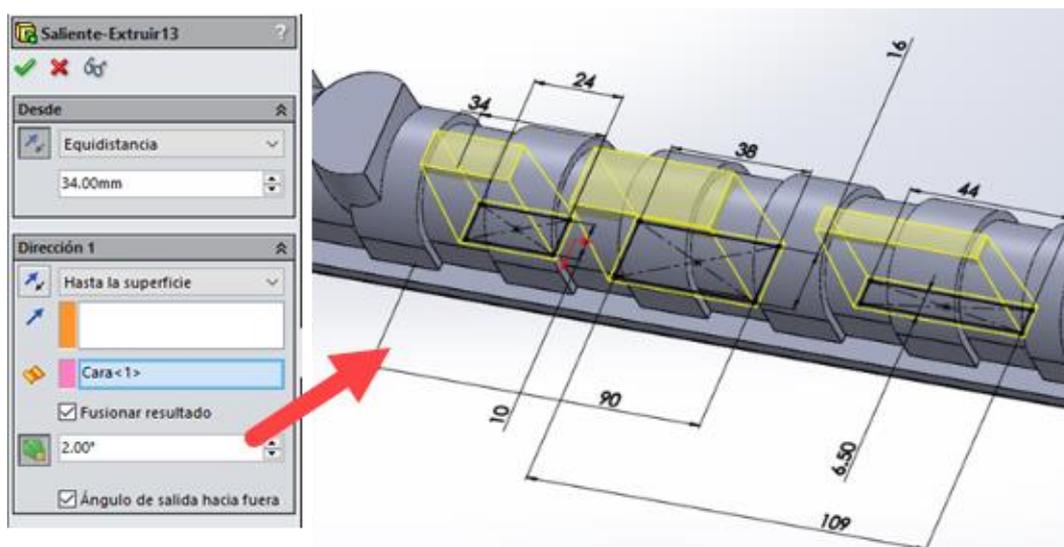


Figura 86. Croquis de los salientes rectangulares.

Se procede a realizar un pequeño corte en la base inferior del colector. Con este corte se persigue el ajuste con la junta en la mayor medida posible. Se realiza, por tanto, un croquis con la geometría del perímetro exterior de la cara superior de la junta, para extrudir, dicho corte a una profundidad de 5,20 mm. Figura 87.



Figura 87. Croquis del corte de la parte inferior.

Siguiendo la línea de las protuberancias, se va a realizar la siguiente, en dos partes. La primera, barriendo la parte que se va a vaciar, y la segunda, extrudiendo la parte que no se va a vaciar.

Así, se realiza una circunferencia de radio 12 mm tangente a las caras del final del colector, y dibujado en el plano que se puede ver en la Figura 88. Tras esto, se genera un plano perpendicular al croquis que pase por el centro de la circunferencia para generar así la curva guía que aparece. La altura de la línea recta es igual a la altura de la protuberancia de la Figura 80, 10 mm de altura.

Tras esto, mediante la operación “Barrido”, se genera la geometría que es visible en la parte superior de la Figura 88. Esta primera parte es la que será objeto de ser vaciada.

Antes de realizar la segunda parte de la que se hablaba con anterioridad, para poder realizar de forma correcta la operación “Vaciado”, será necesario dividir la geometría hasta ahora generada, en dos partes; una, objeto de dicha operación; otra, permanecerá invariable. Así, se recurre a la operación “Partir”. Disponible en “Insertar > Operaciones > Partir”.

Se ha de seleccionar la cara o plano por la que se quiere dividir el sólido, y darle a “Cortar Pieza”. De esta manera, quedan dos sólidos en un mismo archivo pieza. Será la parte superior, la que quede vaciada, mientras que la inferior, la que hace de base, permanece invariable.

Antes de realizar este vaciado, se termina la segunda parte del saliente que se empezó antes de la operación “Partir”. Para ello, se realiza una extrusión de un perfil circular de 24 mm de diámetro y 19,60 mm de altura en la cara circular libre del barrido anterior.

En esta segunda parte se realiza, también, la extrusión de un corte de 10 mm de profundidad, concretamente, de un perfil circular de 18 mm de diámetro. Quedando lo visible en la parte final del proceso que se muestra en la Figura 88.

La última operación a realizar antes de realizar el vaciado de la geometría, es redondear un borde con un radio de acuerdo inferior al espesor de vaciado. Esto es, la mordedura de la Figura 84.

La dinámica de esta herramienta es simple, se ha de indicar el radio de acuerdo y seleccionar la arista a redondear. Esto es visible en la Figura 89, donde se realiza el redondeo que se desea con un radio de acuerdo de 2 mm.

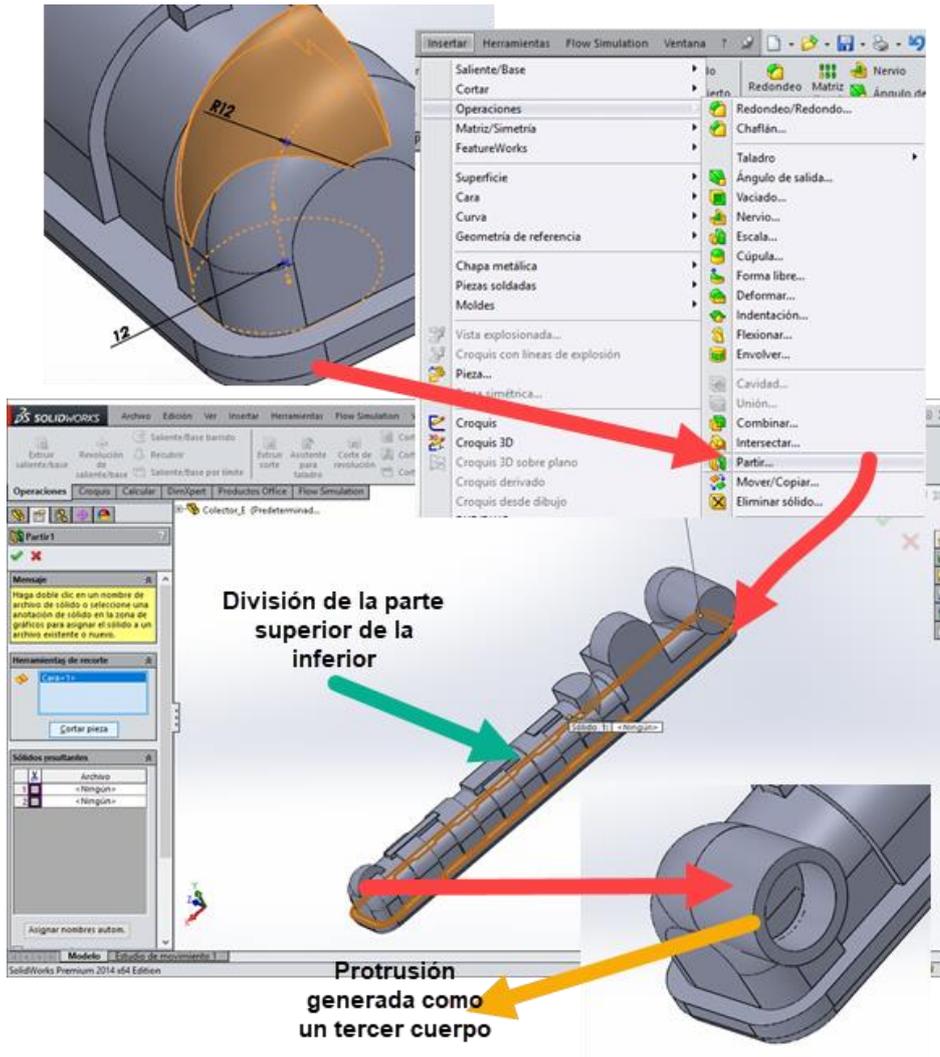


Figura 88. Proceso de protrusión de la boquilla inferior.

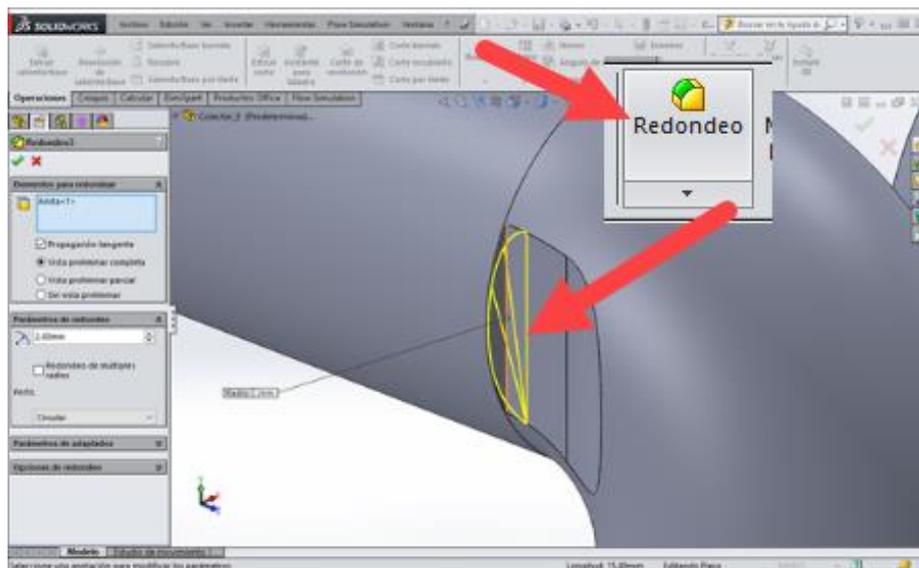


Figura 89. Redondeo de la arista puntiaguda.

Ahora sí, la pieza está preparada para realizar la operación “Vaciado”. En primera instancia, se ha de seleccionar el sólido el cual va a ser objeto de la operación. Figura 90.

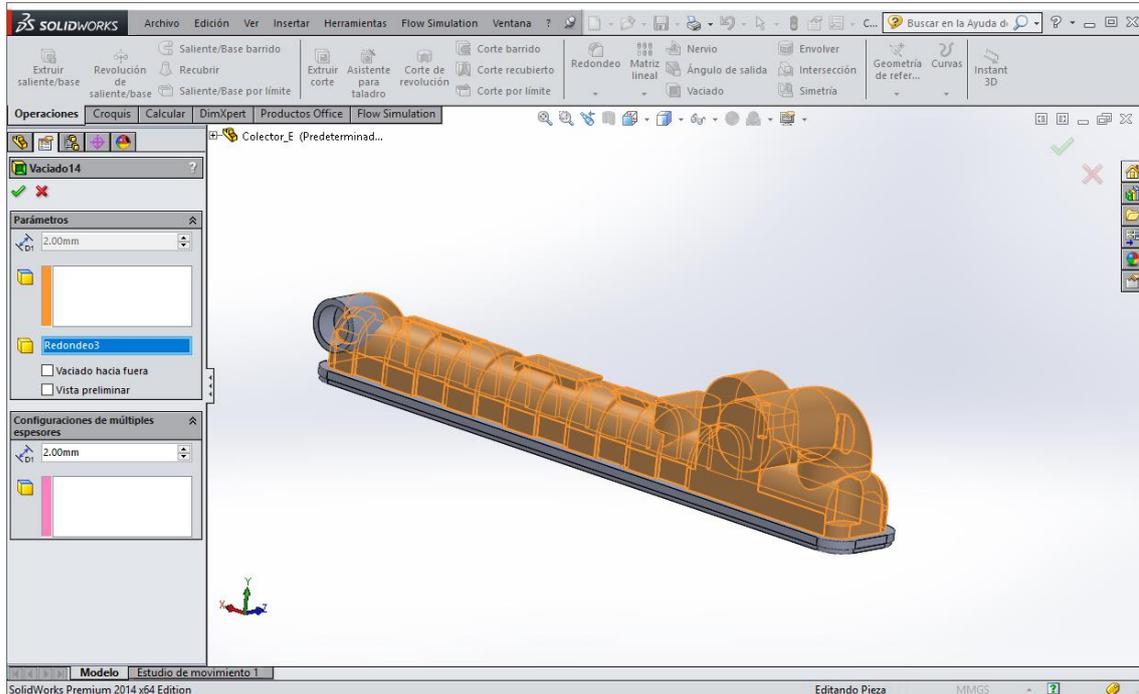


Figura 90. Selección del sólido a vaciar.

Tras esto, se ha de seleccionar la cara que van a quedar abiertas, en este caso, será la cara circular visible en la Figura 91. Por último, se ha de introducir el valor del espesor de vaciado, que en este caso será de 2 mm.

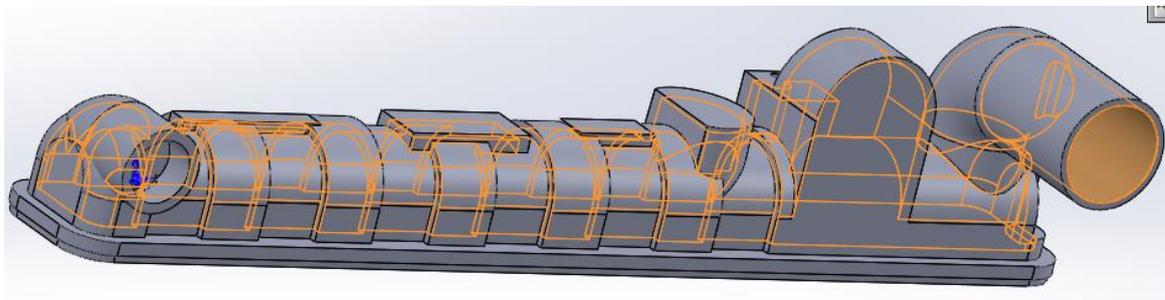


Figura 91. Vaciado del colector con espesor de dos milímetros.

La cara inferior se ha de quedar, también, abierta, pero con este fin, para tener un control más preciso, se realiza la extrusión de un corte. Para poder hacer el croquis de dicho corte, primero se ha de ser capaz de tener una vista del interior de la pieza. Para esto, se va a recurrir a una vista de sección realizando la misma por el plano medio de la pieza en su longitud mayor.

Mediante la herramienta, “Convertir entidades”, se realiza el croquis del corte. Solo se ha de seleccionar la cara inferior del vaciado, para que esta herramienta genere un croquis del perímetro de la geometría. Así, se tiene la extrusión del corte que es visible en la Figura 92.

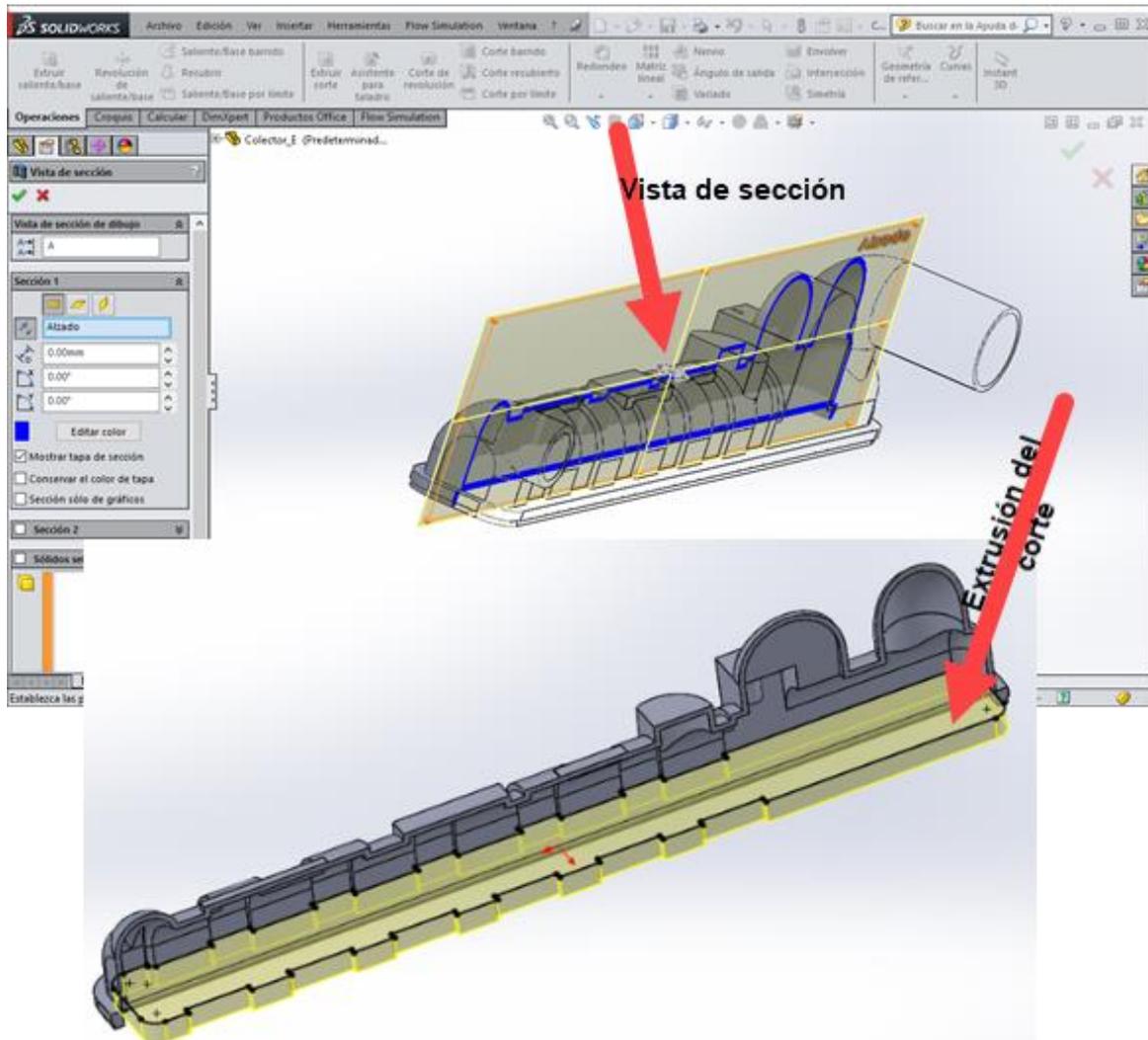


Figura 92. Corte base interior.

Se ha volver a combinar los sólidos que han sido generados hasta el momento, ya que se utilizó la herramienta “Partir” para poder realizar el vaciado. La operación “Combinar”, se puede hallar en el mismo submenú en el que se encuentra la operación “Partir”. “Insertar > Operaciones > Combinar”. Únicamente se ha de seleccionar todos los sólidos existentes y pulsar sobre el icono verde de la esquina superior derecha. Figura 93.

Quedando así el sólido como uno y único. Lo siguiente en el proceso es realizar el redondeo de las aristas susceptibles a ello. Para medir en el colector el radio de acuerdo, se realiza lo siguiente, se mide entre dos caras paralelas en su parte plana, y después, se vuelve a medir entre esas mismas caras en su parte redondeada, dando una diferencia de 4 mm, lo que da un radio de redondeo de 2 mm.

Por imposibilidad con los medios disponibles de medir el radio de acuerdo de cada una de las aristas redondeadas, se tomará este valor como uniforme a lo largo de todo el sólido.

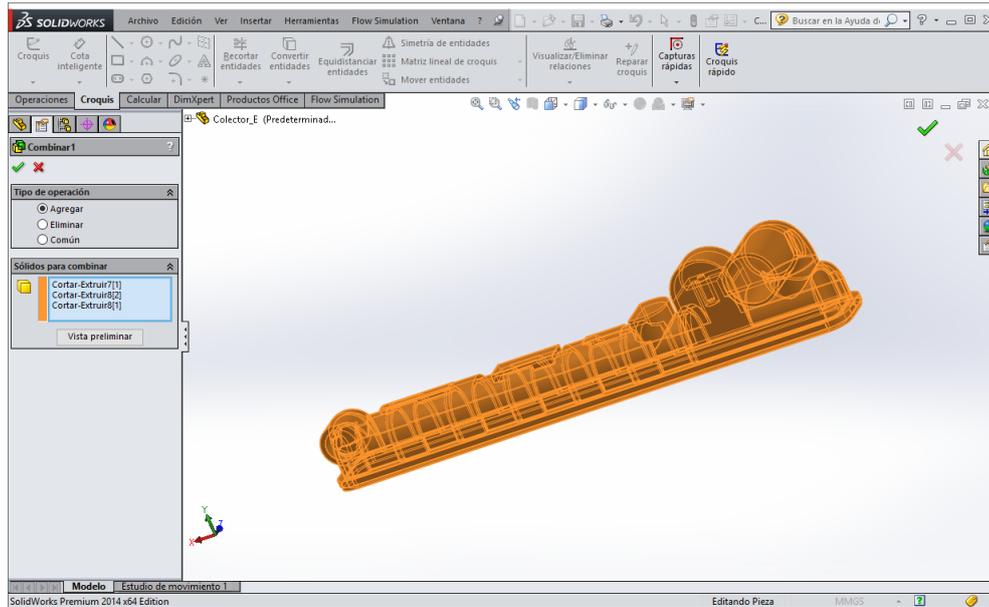


Figura 93. Operación Combinar.

Con el colector como referencia, se seleccionan aquellas aristas que han de ser redondeadas. Como el número de aristas es grande, el software calcula la solución a esta geometría mediante un módulo denominado “FeatureXManager”. Así, este módulo es capaz de agrupar en redondeos con geometría similar aquellas aristas que sean susceptibles a ello. Ofreciendo así la solución final a la operación “Redondeo”.

Por este motivo, en la lista de operaciones aparece un número grande de operaciones distintas, cuando en realidad sólo se ha realizado una. En la Figura 94 y Figura 95 aparecen diversas vistas en las que se puede apreciar los redondeos realizados.

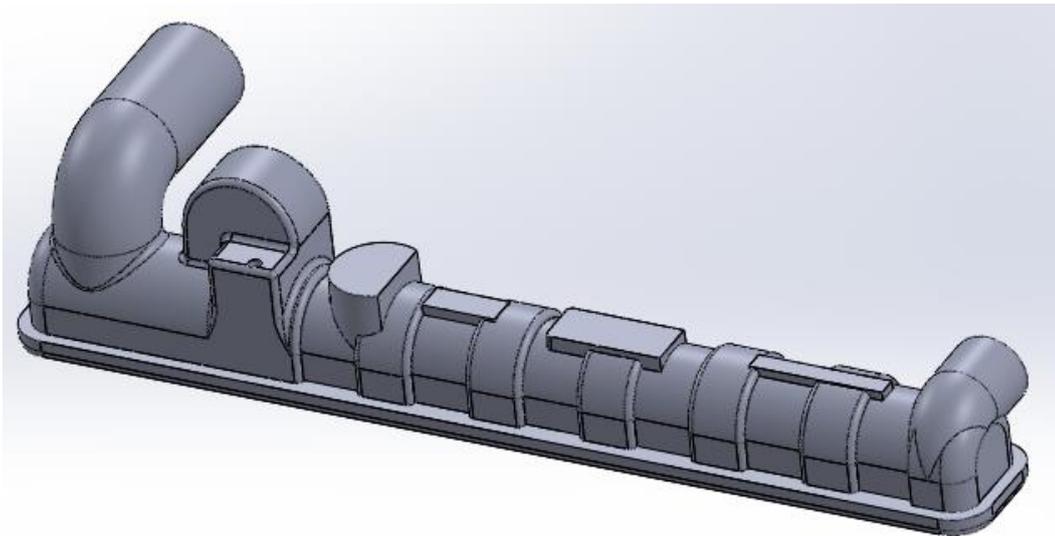


Figura 94. Vista superior de los redondeos realizados.

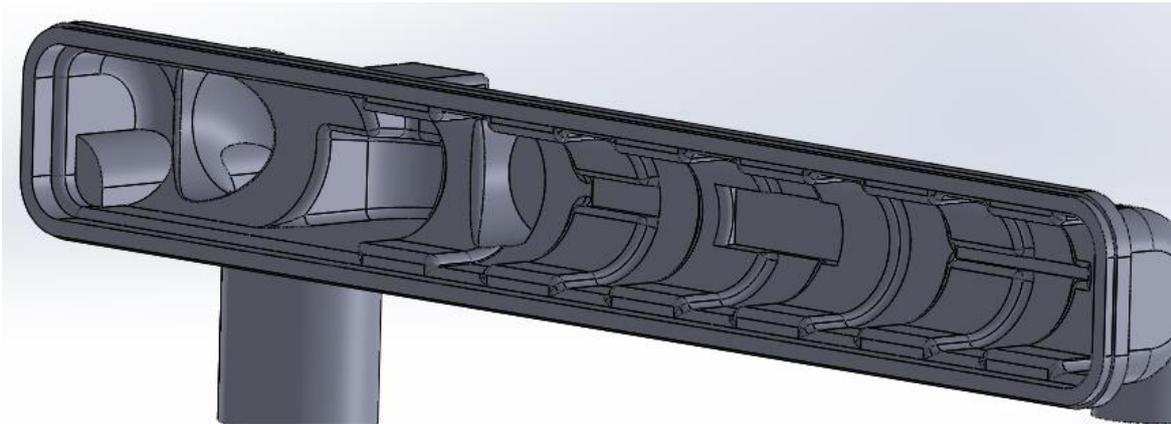


Figura 95. Vista inferior de los redondeos realizados.

Como operación final para el modelado del colector, queda generar una pared existente en el interior del mismo, que redirige el flujo de entrada. Para la ubicación de esta pared, se recurre a la geometría de la junta, pues dicha pared, tiene que introducirse en la primera guía de la junta de la Figura 78.

Así, se ha de abrir el archivo “Junta.SLDPRT” y utilizando la herramienta “Medir” de la pestaña “Calcular” de la cinta superior para hallar esta distancia. Figura 96.

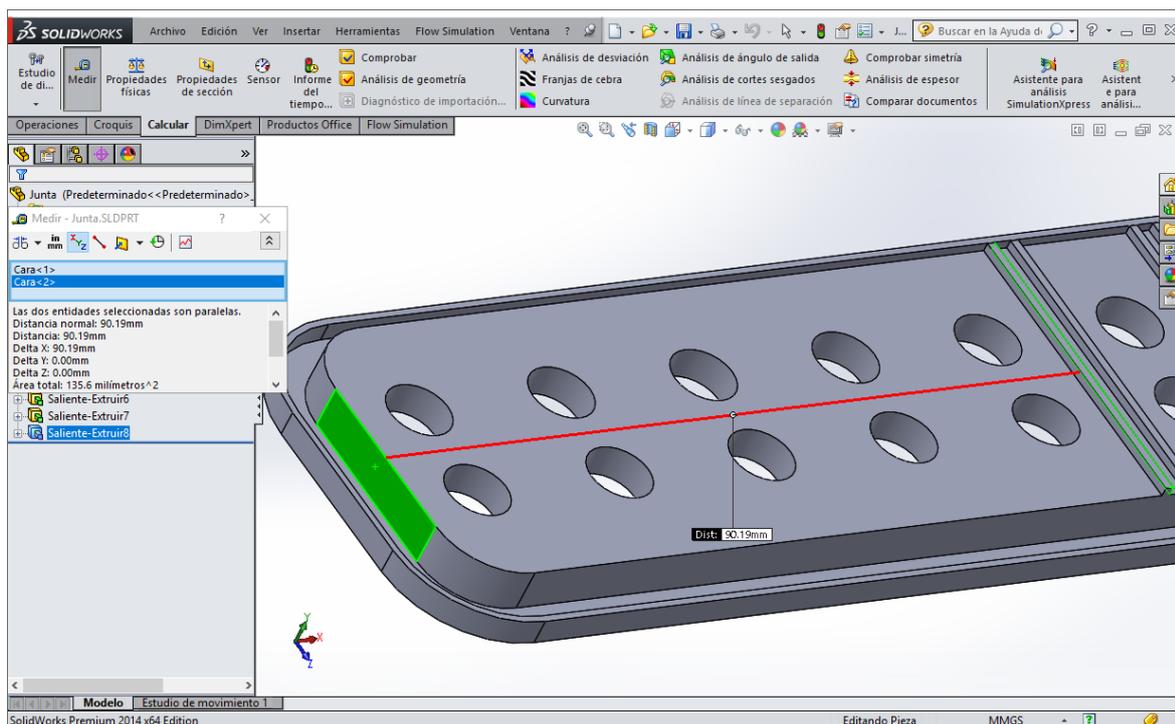


Figura 96. Medición de la distancia de la cara.

La herramienta arroja un valor de 90,19 mm. Por lo que se habrá de generar un plano paralelo a “Vista lateral” que diste ese valor de la cara coincidente con la cara de referencia de medición visible en la Figura 96.

Tras esto, y mediante la herramienta “Convertir Entidades” se genera el croquis de la cara a extrudir. Y se extrude esta con un espesor de 2 mm. Figura 97.

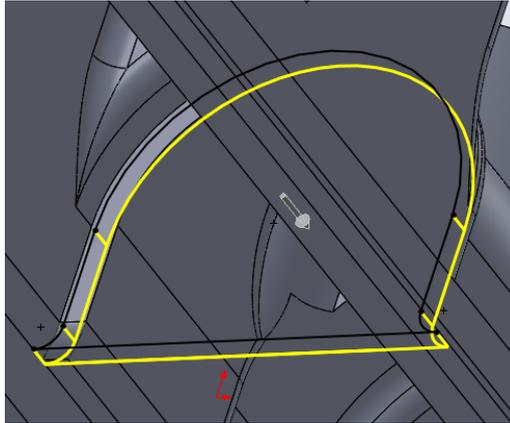


Figura 97. Generación de la pared interior del colector.

De esta forma queda generado completamente el colector de entrada. Se guarda dicha pieza en el directorio donde están las demás piezas bajo el nombre “Colector_E.SLDPRT”.

6. Colector de salida

Este colector, al igual que el de entrada, recoge el agua que llega de los tubos y la redirige hacia la trayectoria siguiente que le corresponde.

En primera instancia, se va a realizar la parte de la pieza que requieren de un vaciado. Así, se genera primero la parte que es recta. Realizando un croquis de la geometría pertinente, se le dota de una altura de 10 mm, todo esto, usando la operación “Extrudir base / saliente”. Figura 98.

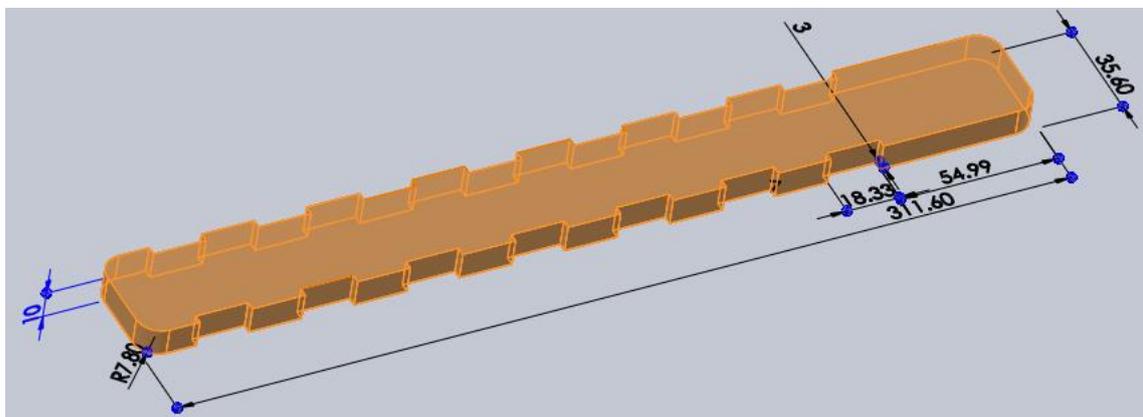


Figura 98. Primer paso para la generación de la base recta.

A la pieza generada, se le va a realizar un corte para rebajar una de las partes. Ya que consta de dos alturas. Desde la cara superior de la geometría realizada, se cortan 5 mm de espesor, tal y como se ve en la Figura 99, quedando así conformada la parte recta.

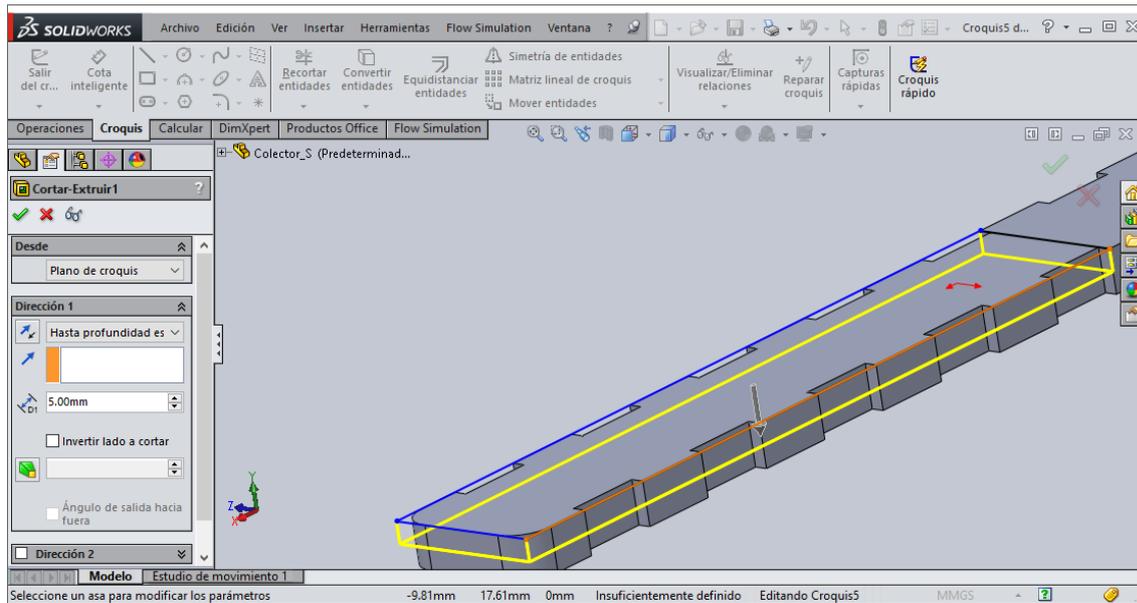


Figura 99. Segundo paso para la generación de la base recta.

Con la herramienta de croquización “Convertir entidades” se realiza ahora un croquis para generar una revolución para obtener la parte circular, tal y como se hizo en el colector de entrada. Figura 100. Esto, se realiza mediante la operación “Revolución de saliente/base”.

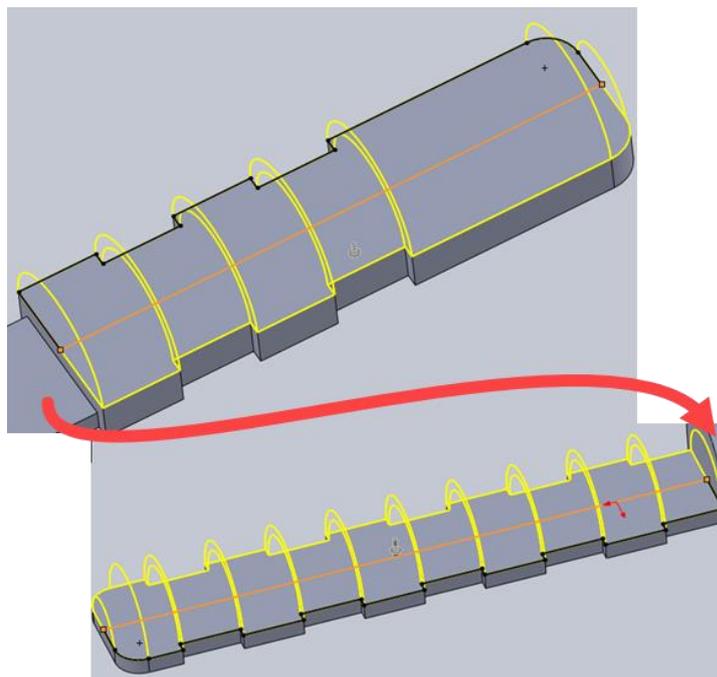


Figura 100. Revolución de la base.

Se ha de achaflanar la unión de las dos revoluciones, para ello, se utiliza la operación “Corte recubierto”. Esta herramienta tiene la misma operativa que la herramienta “Recubrir”, solo que elimina material en vez de añadirlo. Se genera un plano a 7 mm tal y como se ve en la Figura 101.

El perfil de la parte más baja está a 5 mm por debajo del perfil de la parte más alta. Se sube el croquis de los cortes para que las transiciones de las superficies sean suaves. La

curva guía está marcada por dos puntos azules los cuales están unidos mediante una línea que referencian la curvatura del corte.

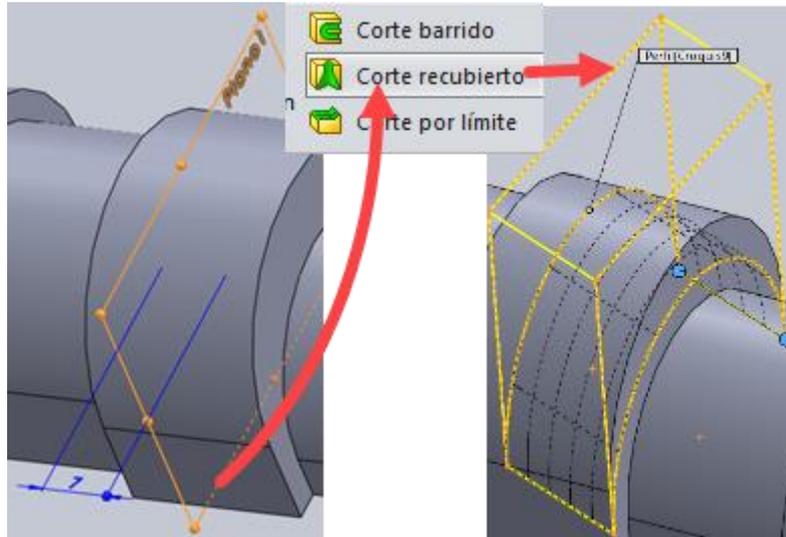


Figura 101. Realización del acuerdo entre las dos partes.

Tras esto, se procede a extrudir el tubo de salida. En principio se va a realizar de forma maciza. Este tubo tiene un diámetro de 35,60 mm, estando su centro a 17,80 mm respecto de la parte exterior. Este tubo está extrudido desde la base inferior, y tiene una altura de 100 mm. Figura 102.

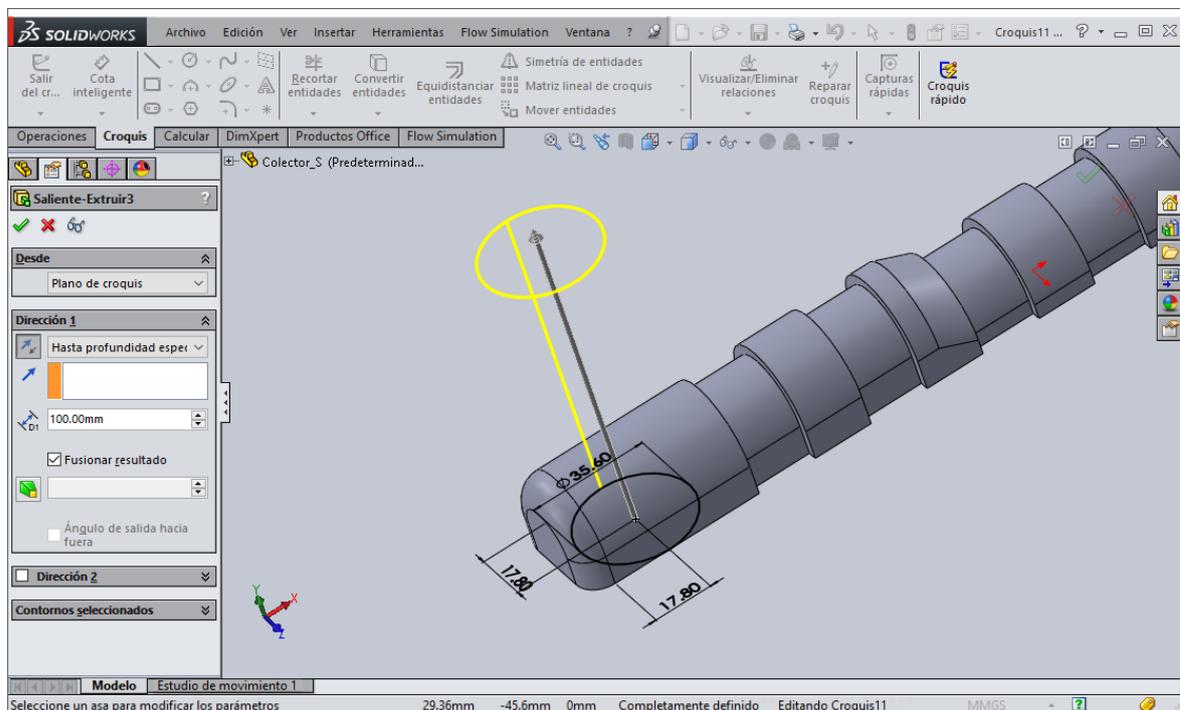


Figura 102. Extrusión del tubo de salida del fluido.

Tras la extrusión del tubo, se ha de realizar los dos cortes que tiene la geometría generada. El primero se encuentra, donde comienza el chaflán realizado en la Figura 101, tiene una profundidad de 8 mm, 44 mm de longitud, y a 10 mm de altura la base. Esto se va a realizar con la herramienta “Corte barrido”, tal y como se ve en la Figura 103.

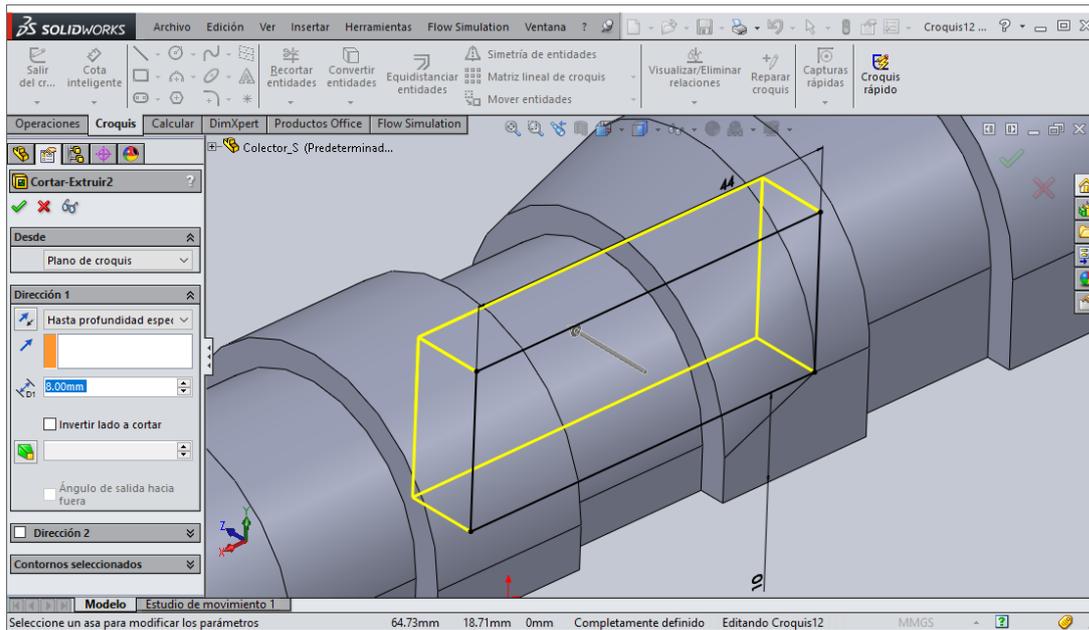


Figura 103. Corte de la base I.

Para realizar el segundo, se hará mediante un corte por extrusión también, configurando esta operación mediante “Equidistancia” a 6 mm. El croquis del corte se realiza en la base de la geometría generada. Figura 104.

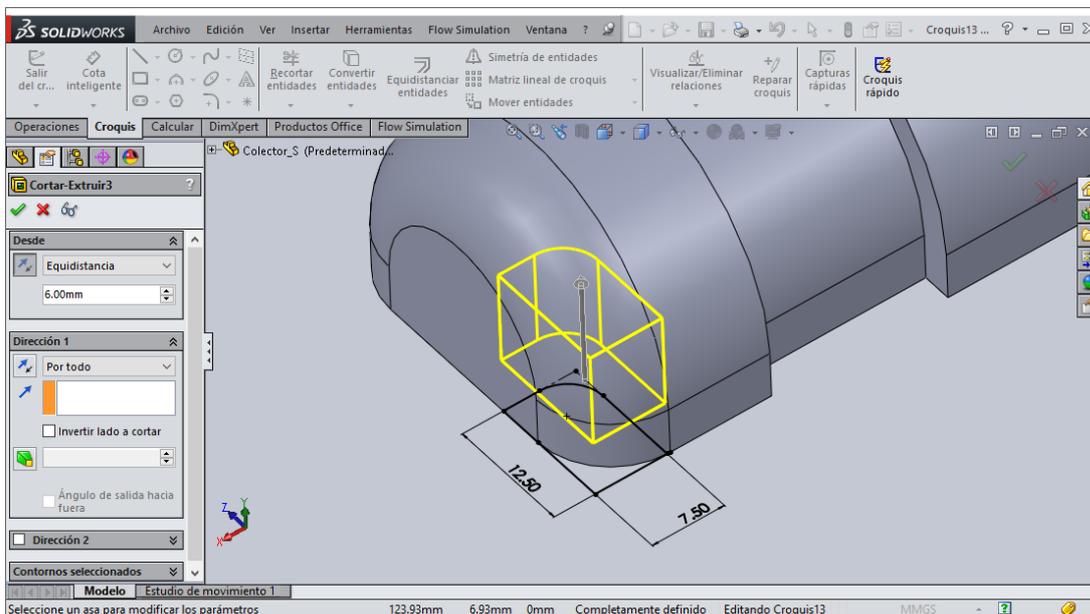


Figura 104. Corte de la base II.

Para poder realizar el vaciado de la pieza, se han de redondear, con un radio de 2 mm, las aristas de la geometría generada tanto en la Figura 103, como en la Figura 104.

Se realiza, a continuación, el vaciado de la pieza. Como en el caso del colector de entrada, el valor del espesor será de 2 mm, por lo que no puede haber ninguna superficie que tenga menos de este radio de curvatura. Se ha de seleccionar las dos caras que se quieren que se queden al descubierto. Figura 105.

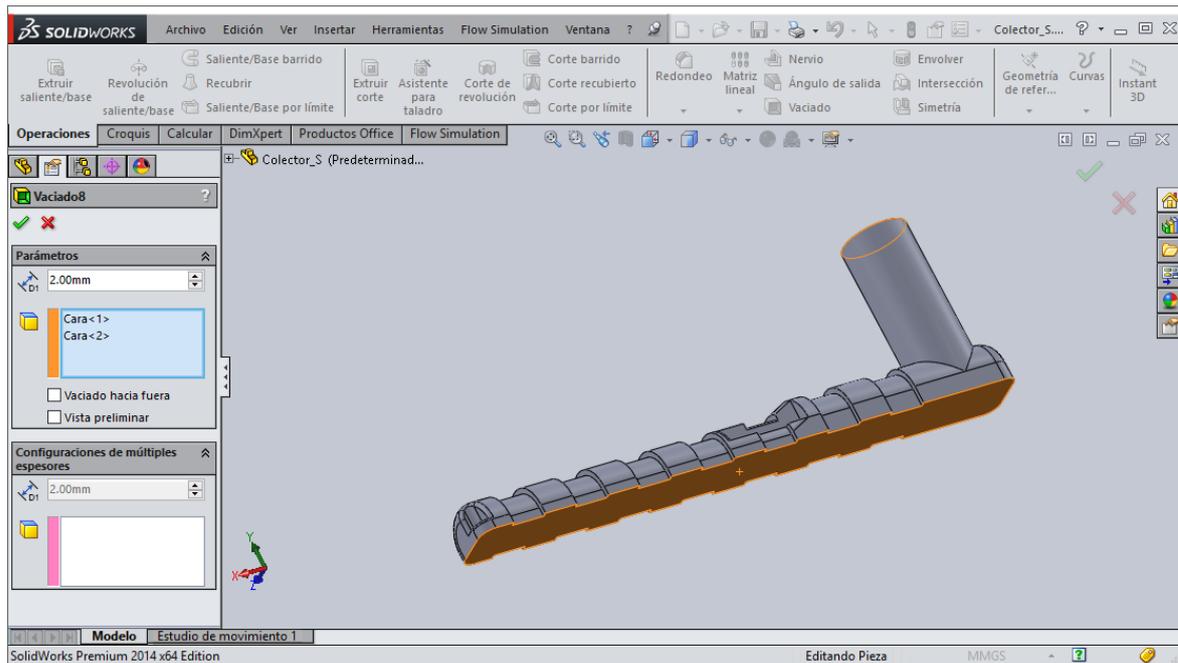


Figura 105. Vaciado.

Tras esto, se generan los redondeos de todas las aristas pertinentes, con la figura física al lado se van seleccionando los bordes redondeados. Los radios de redondeo son de 2 mm. Figura 106.

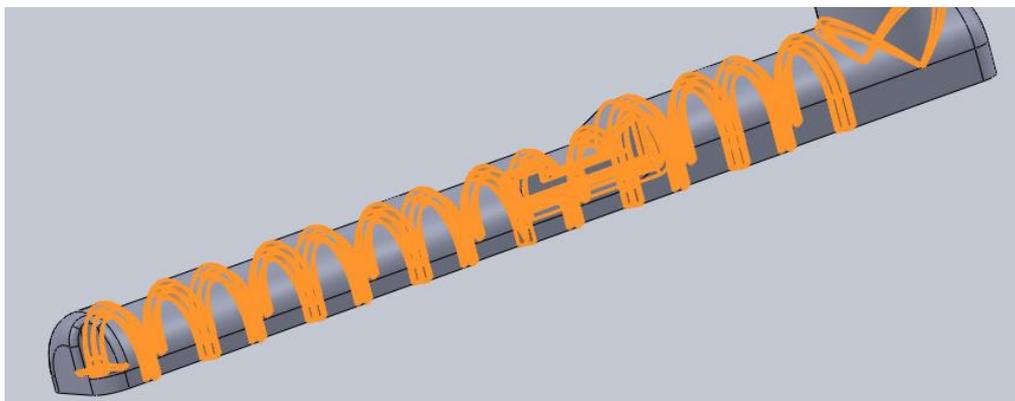


Figura 106. Redondeos.

En este punto, se genera la base donde se unirá este colector con el módulo de entrada. Se realiza una operación de extrusión con las dimensiones que son visibles en la Figura 107. Esta parte, tendrá un espesor de 0,80 mm. El croquis está realizado en la base inferior de la geometría que estaba definida, los 0,80 mm están dados como dimensión altura.

El segundo paso para la generación de la base es generar las paredes. Para ello, se realiza un croquis en el plano inferior utilizando la herramienta “Convertir entidades”. Esta operación de extrusión tiene una altura de 5,20 mm, que sumados a los 0,80 mm de la operación anterior da como resultado los 6,00 mm de altura de los que está dotada la base.

Como último paso, se ha de realizar un corte barrido a lo largo de todo el perímetro de la base, para que no existan interferencias entre la base y la junta de estanqueidad. Figura 107.

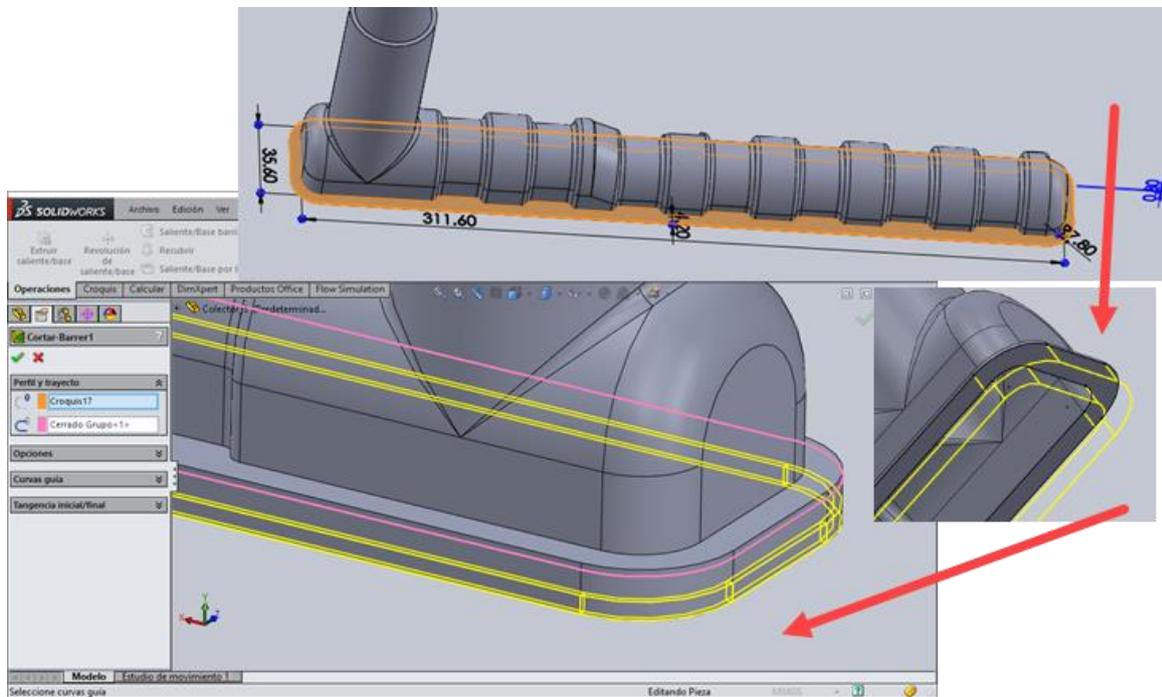


Figura 107. Pasos necesarios para la realización de la base.

Para la modelización del depósito, se han de situar los planos donde se van a realizar todos los croquis. Uno coincidente con el plano que define la parte superior de la base (Figura 108 (a)), y el otro coincidente con el plano que define una de las caras de la Figura 103, (Figura 108 (b)).

Así, mediante una operación de “Barrido”, se pueden unir los dos croquis y obtener la primera de las partes de la geometría que se va a generar. Mediante la operación opuesta, se corta el interior del tanque, quedando así un hueco, tal y como se puede ver en la Figura 108.

Con este mismo procedimiento, se realiza el siguiente tramo, el cual conecta, el primer tramo, de mayor diámetro, con el segundo que tiene menor diámetro. Por último, se realiza el último de los tramos, también se sigue el procedimiento de operaciones que hasta ahora se ha seguido. Primero generando la parte exterior y luego vaciando el interior. Figura 109.

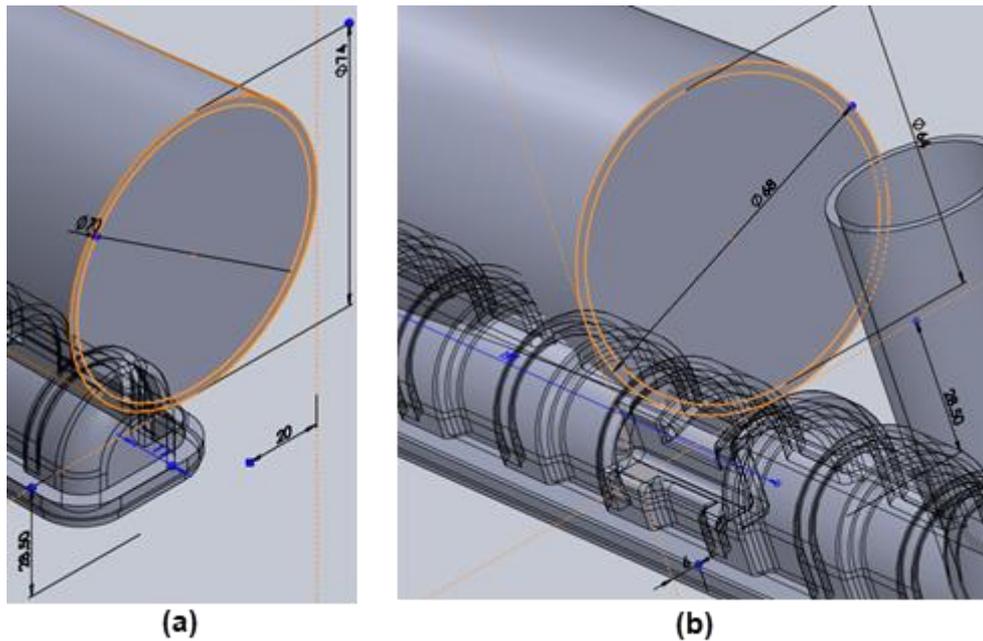


Figura 108. Modelización del depósito.

Todas las circunferencias generadas en los croquis necesarios para la definición de los tramos, han de estar alineadas. Así, se puede definir el eje del tanque, el cual se usará ahora para generar la parte inferior del último tramo, la cual tiene forma de cúpula. Figura 109.

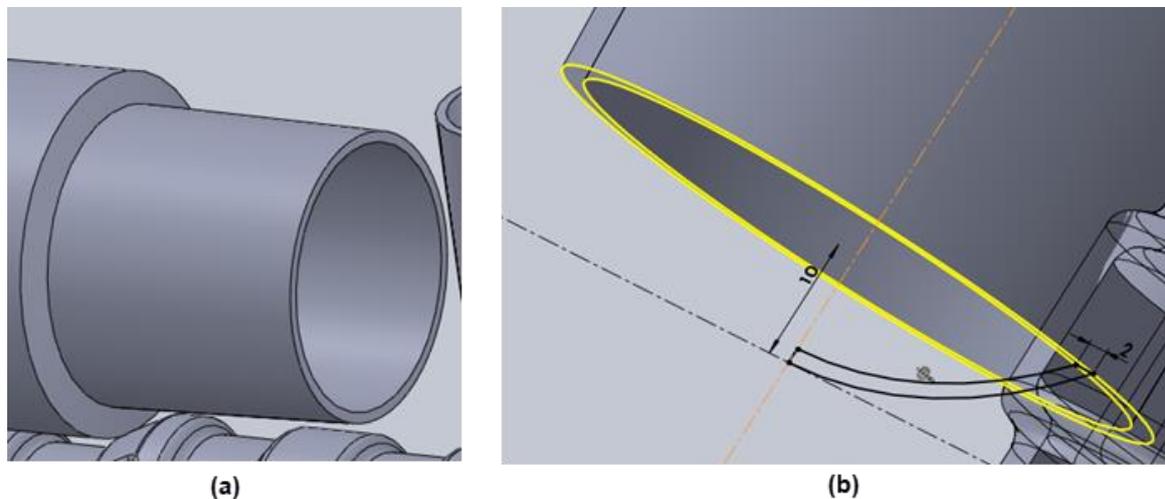


Figura 109. Último tramo (a) y cúpula inferior (b).

Tras esto, se ha de realizar la conexión del tanque con el cilindro de salida generado en la Figura 102. Esta operación de extrusión tiene distintos parámetros de configuración tal y como se puede ver en la Figura 110. Se parte de un croquis que ha sido dibujado en un plano que es tangente a la parte superior del cilindro de salida. Se han de definir dos direcciones de extrusión. La primera que conecte esta parte tangente con el cilindro (en rosa en la Figura 110), y la segunda que sea capaz de conectar el croquis a cúpula recién generada.

Así, se ha de elegir la opción “Hasta la superficie” y seleccionar las superficies que se han mencionado. La segunda dirección tendrá un ángulo de vaciado de $3,7^\circ$, de forma que el croquis termine siendo tangente al cilindro de la Figura 102.

Por último, se ha de vaciar el interior de esta unión, para ello, se recurre a la operación “Extrudir corte”, la cual se configura con valores idénticos al caso anterior, aunque en vez de seleccionar el contorno exterior, se selecciona el interior para que, así, de esta forma quede hueco.

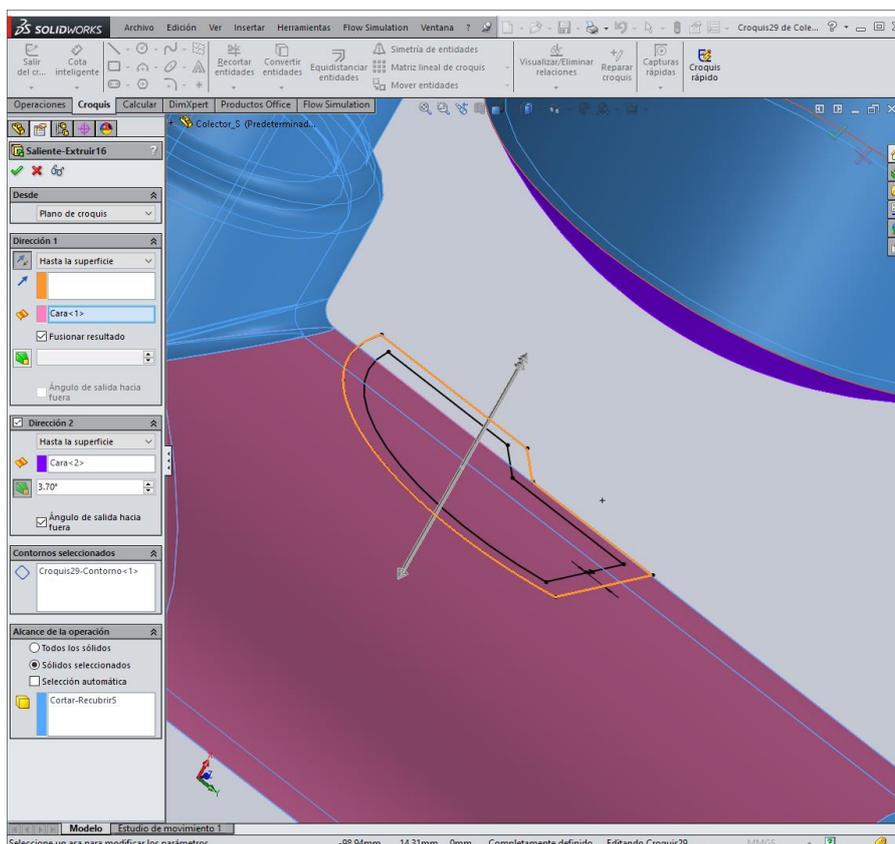


Figura 110. Conexión del tubo interior con el tanque.

Se realiza una pequeña protrusión cercano al cambio de sección del tanque. Esta protrusión conecta la base inferior con la parte de menor diámetro del tanque. La operación se ha de configurar de la misma manera que se ha configurado la operación que aparece en la Figura 110. Primero se hace el contorno exterior y después se extrude un corte que elimine el contenido del interior, quedando un agujero hueco que conecte las dos partes.

Tras la operación, si se realiza un corte por un plano que corte la protrusión en cuestión, se aprecia lo mostrado en la Figura 111 (a).

Se cierra el tanque mediante una cúpula en la parte superior, para ello, igual que en la Figura 109, se utiliza la operación “Revolución de saliente/base”.

Se realiza la cúpula con el mismo diámetro que el del cilindro más grande. De esta manera, y seleccionando como eje de giro, el eje del tanque, se tiene lo visible en la Figura 111 (b).

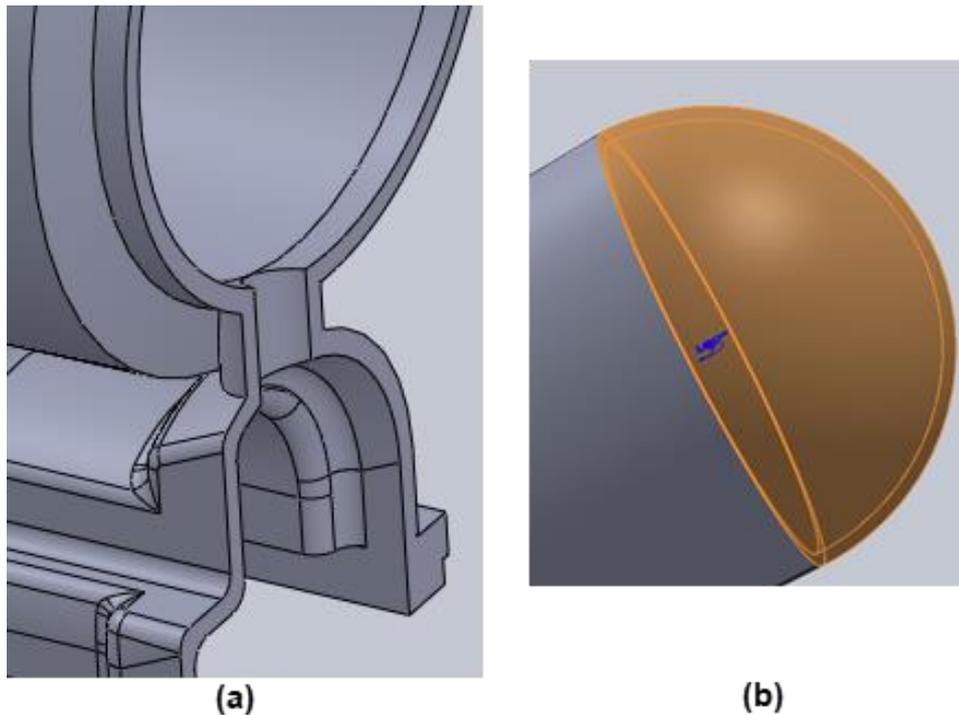


Figura 111. Tubo de conexión entre la base y el tanque (a) y cúpula superior (b).

Mediante otra operación de revolución, se realiza la membrana que se encuentra en el cambio de sección en el interior del tanque. A esta membrana, se le ha de practicar cuatro operaciones adicionales para llevarla hasta su forma final.

La primera será la realización de un corte en la parte superior. Este corte se realiza mediante la operación “Extrudir corte”, para ello será necesario la generación de un plano el cual contenga a la circunferencia superior de la membrana.

Mediante una operación de extrusión, se realizan las dos varillas que se observan en la Figura 112. Tienen un diámetro de 6 mm y una altura de 46 mm medida desde el plano tangente que se ha utilizado antes para la realización del corte, ya que es en este plano donde se ha dibujado el croquis.

Lo siguiente es la generación de las dos láminas que tienen las varillas. Se croquizan dos secciones, una en el plano tangente ya utilizado y otra en la parte superior de las varillas generadas. Serán dos rectángulos de 6x1,5 mm en el caso más pequeño, mientras que en el caso más grande llegarán hasta el agujero.

Para terminar con este elemento interior, solo se han de realizar las paredes que tiene este elemento en su parte inferior, las cuales redirigen el flujo de agua que pasa desde el colector al tanque. Figura 112.

De esta forma, queda generado completamente el colector de salida. Se salva el archivo contenedor de la pieza bajo el nombre “Colector_S.SLDPRT” en el mismo directorio que las demás piezas que se han modelado en este capítulo.

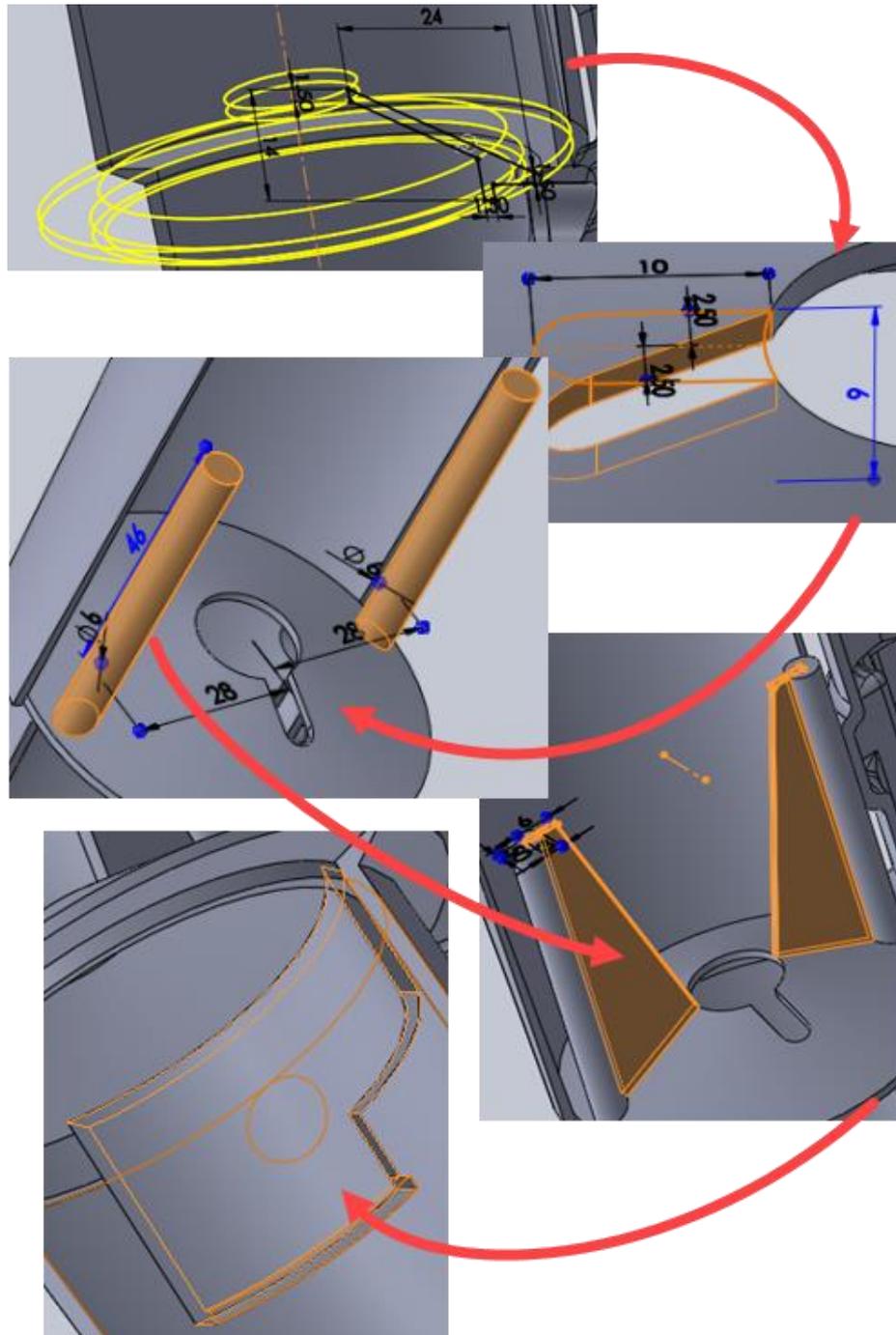


Figura 112. Modelización de la membrana interior.

7. Ensamblaje

Para generar un archivo ensamblaje, se procede igual que para abrir una nueva pieza, en Archivo>Nuevo>Ensamblaje. Una vez generado el archivo *.SLDASM se han de introducir cada uno de los componentes del radiador. Para ello, se utiliza la herramienta “Insertar componentes” disponible en la cinta superior.

Se introduce, la primera pieza por donde se va a comenzar a montar el ensamblaje. Figura 113.

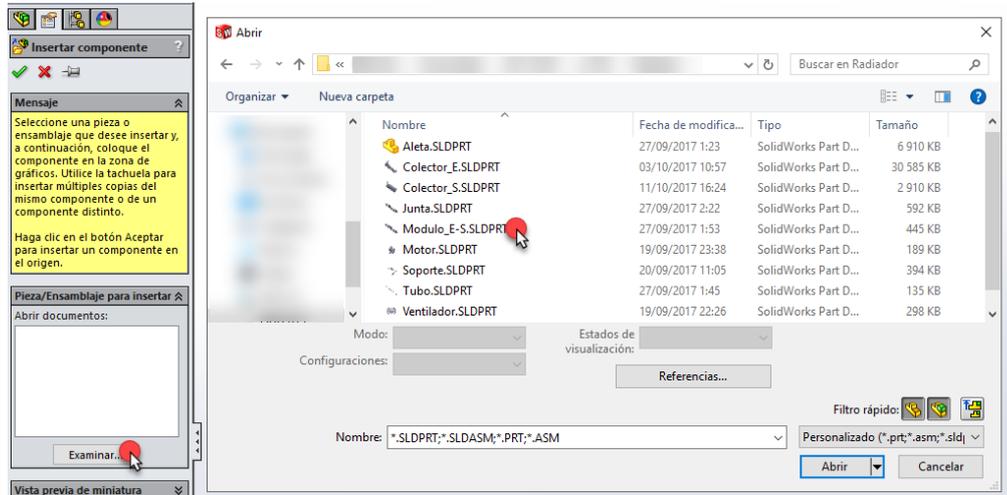


Figura 113. Introducción de componentes.

Se comienza por la pieza “Modulo_E-S.SLDPRT”. Se trata de establecer relaciones entre las distintas piezas. De la misma manera, se introduce también la junta que garantiza el sellado y la posición de los tubos.

Se procede ahora a generar las relaciones entre los elementos. Para ello, se utiliza la herramienta “Relación de posición” de la cinta superior. Esta herramienta establece relaciones entre los planos, puntos, objetos... que se seleccionen. Así, se selecciona tanto la cara posterior del módulo como la anterior de la junta, para generar una relación de coincidencia. Tras esto, se realiza lo mismo con dos circunferencias que deberían ser coincidentes. Figura 114. Se realiza lo mismo con dos agujeros que han de ser concéntricos, quedando junta y módulo de fijación unidos.

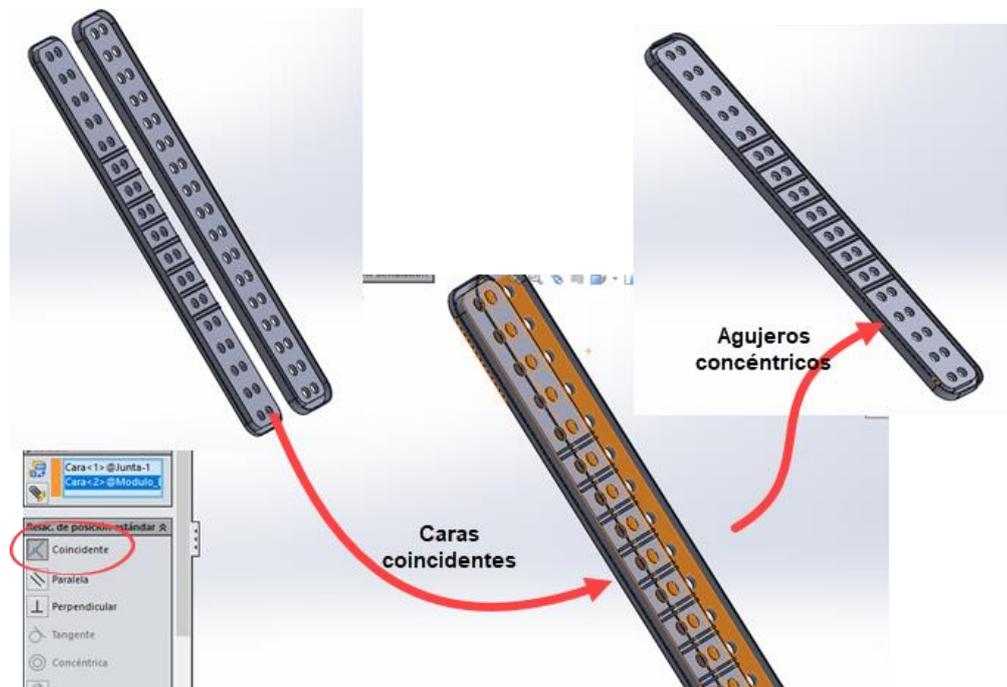


Figura 114. Relación de coincidencia y concetricidad.

Tras esto, se hace coincidir el origen del módulo con el origen de coordenadas del ensamblaje y se fijan las piezas. Esto es, seleccionar las partes en cuestión y pulsar “Botón derecho > Fijar” para que esas piezas no se puedan desplazar.

Se introduce ahora el primer tubo. Se genera una relación de posición entre las dos aristas que se ven en la Figura 115.

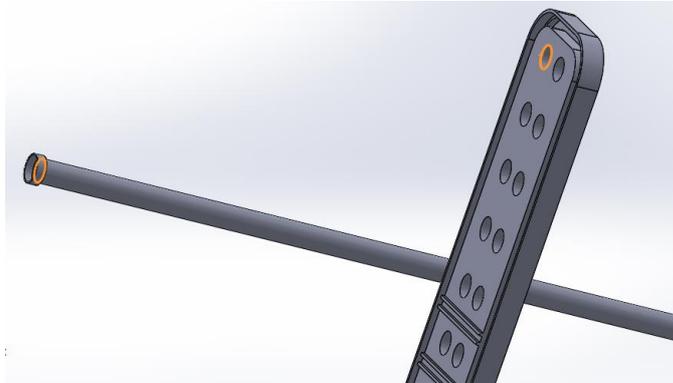


Figura 115. Circunferencias a relacionar y fijar.

Se introduce ahora un plano auxiliar para la realización de una simetría de componentes. Para ello, en la cinta superior, en la pestaña de “Ensamblaje”, se selecciona “Geometría de referencia > Plano”.

De la misma forma que para el caso de una única pieza, se genera un plano medio entre las caras más alejadas del tubo ya introducido. Para realizar una simetría del módulo y de la junta, se utiliza la herramienta “Simetría de componentes”. Se han de seleccionar previamente los elementos objeto de esta simetría. Mediante esta serie de pasos, se obtiene lo visible en la Figura 116.

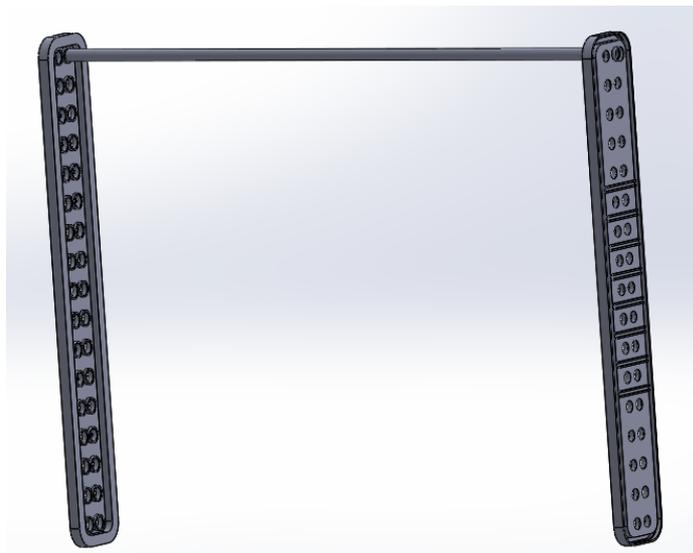


Figura 116. Geometría una vez realizada la simetría de componentes.

La herramienta “Matriz de componente lineal” va a ser usada para generar la matriz de tubos. Se configura igual que para el caso de pieza. Tras su uso, se obtiene lo visible en la Figura 117.

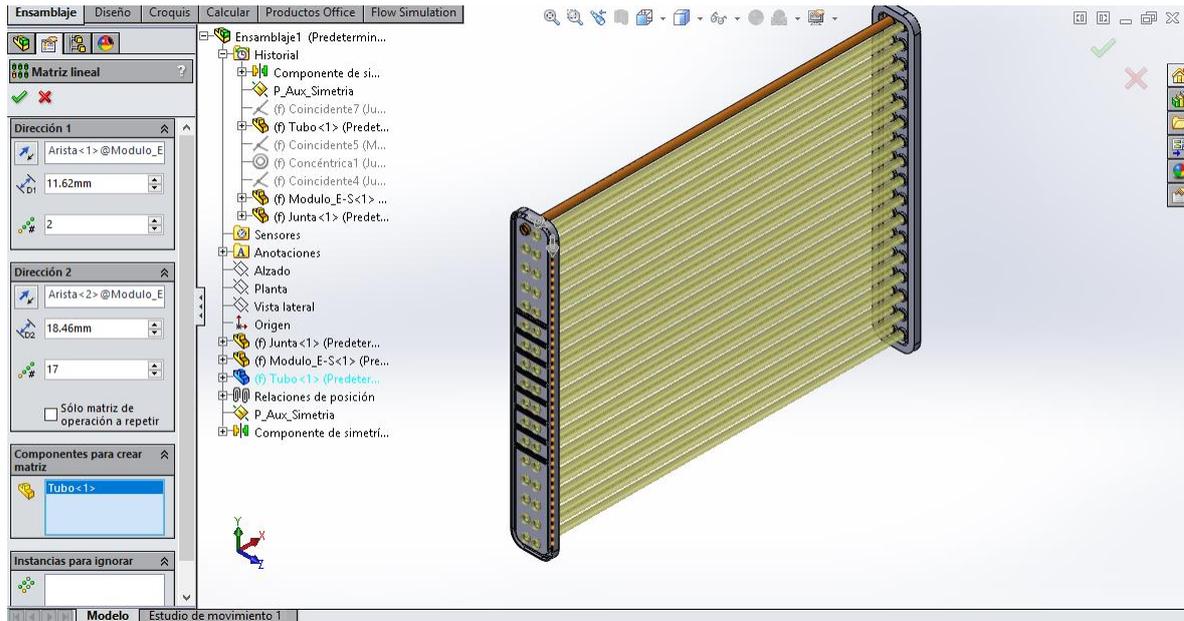


Figura 117. Matriz de componente lineal de los tubos.

Tras esto, se introducen los colectores de entrada y de salida. Primero, se coloca el colector de entrada. Se ha de establecer dos relaciones para después fijar la posición, esto es, primero una relación de coincidencia de los planos que se tocan y entre los contornos coincidentes. De la misma forma, se ensambla el colector de salida. Figura 118.

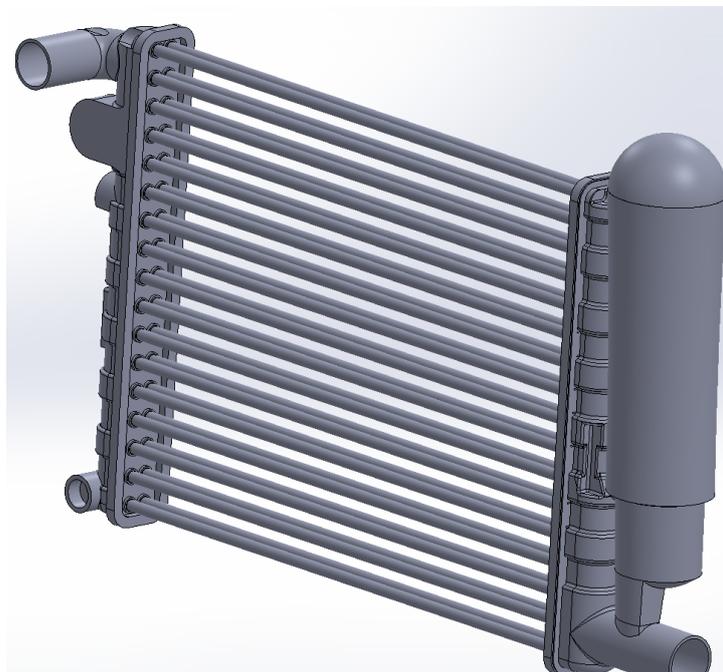


Figura 118. Ensamblaje de los colectores de entrada y salida.

Para que el modelo esté completo, solo es necesario el ensamblaje de las aletas. Con este fin, se coloca la primera y las demás se generarán a partir de una matriz de componente lineal. Tras la inserción de la aleta y la agregación de las relaciones necesarias, se tiene su posición fijada tal y como aparece en la Figura 119.



Figura 119. Ensamblaje de la aleta.

Se realiza una matriz de componentes lineal para generar las 351 aletas, las cuales están distanciadas 1,111 mm longitudinalmente a lo largo de los tubos. Tras esta operación, queda lo mostrado en la Figura 120. Se puede decir que el ensamblaje está finalizado y listo para someterse a un estudio en el complemento “FlowSimulation”. Se guarda el ensamblaje como “Radiador.SLDASM”.



Figura 120. Ensamblaje finalizado.

8. Materiales y colores de las distintas piezas

Se procede ahora a la asignación de los correspondientes materiales a cada parte. Para ello, se ha de seguir el siguiente orden: “Botón derecho sobre la pieza en cuestión > Material > Editar Material”. Y se elige el material en cuestión de la lista desplegable. Figura 121

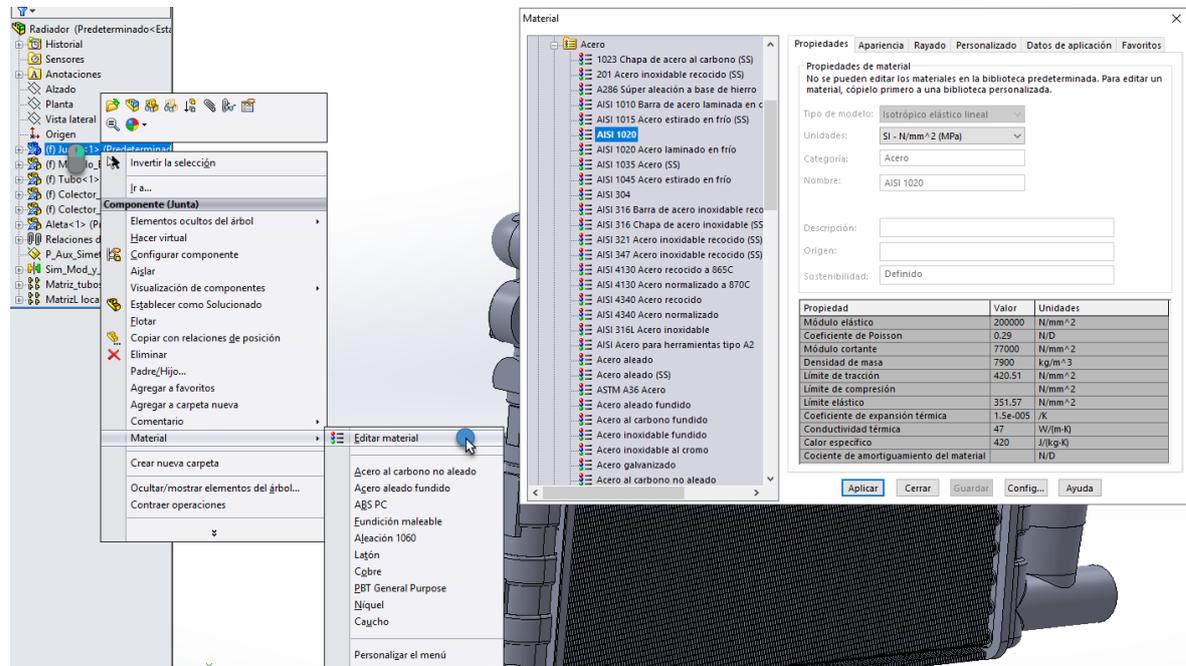


Figura 121. Asignación del material.

8.1. Identificación de los materiales

Fundamentalmente, se tienen dos tipos de plásticos y dos tipos de metal. Tanto los colectores como las juntas están materializadas en plástico, las aletas y los tubos están materializados en aluminio y el colector de entrada salida en acero.

Los colectores están materializados en un plástico de referencia PA66-GF30. Tras una búsqueda en internet se encuentra la hoja de características del material en la página del fabricante, el nombre comercial del plástico es “Ultramid A3W6”. Se adjunta en la siguiente figura las características del material a 23 °C.

Typical values at 23°C	Test method	Unit	Condition	Values
Properties				
Abbreviated term	ISO 1043	-	-	PA66-GF30
Density	ISO 1183	g/cm ³	-	1.36
Viscosity number (solution 0.005 g/ml sulfuric acid)	ISO 307	ml/g	-	145
Colour: natural (n), coloured (c), black (bk)	-	-	-	n,bk
Water absorption, equilibrium in water at 23°C	ISO 62	%	-	5.20 - 5.80
Moisture absorption, equilibrium 23°C/50% r.h.	ISO 62	%	-	1.50 - 1.90
Processing				
Melting temperature, DSC	ISO 3146	°C	-	260
Melt volume rate MVR 275/5	ISO 1133	cm ³ /10 min	-	40
Melt temperature, injection moulding/extrusion	-	°C	-	280 - 300
Mould temperature, injection moulding	-	°C	-	80 - 90
Moulding shrinkage, constrained ⁶⁾	-	%	-	0.55
Flammability				
UL94 rating at 1.6 mm thickness	UL 94	class	-	HB
Automotive materials (thickness d ≥ 1mm)	FMVSS 302	-	-	+
Mechanical properties				
Tensile modulus	ISO 527-2	MPa	dry/cond.	10000/7200
Yield stress (v = 50 mm/min), Stress at break (v = 5 mm/min)*	ISO 527-2	MPa	dry/cond.	190*/130*
Yield strain (v = 50 mm/min)	ISO 527-2	%	dry/cond.	-
Nominal strain at break, Strain at break*	ISO 527-2	%	dry/cond.	3.0*/5.0*
Tensile creep modulus, 1000 h, strain ≤ 0.5%, +23°C	ISO 899-1	MPa	cond.	5300
Flexural modulus	ISO 178	MPa	dry/cond.	8600/6500
Flexural strength	ISO 178	MPa	dry/cond.	280/210
Charpy unnotched impact strength ³⁾ +23°C	ISO 179/1eU	kJ/m ²	dry/cond.	85/100
Charpy unnotched impact strength -30°C	ISO 179/1eU	kJ/m ²	dry	70
Charpy notched impact strength ³⁾ +23°C	ISO 179/1eA	kJ/m ²	dry/cond.	13.0/22.0
Charpy notched impact strength -30°C	ISO 179/1eA	kJ/m ²	dry	10.0
Izod notched impact strength 1A ³⁾ +23°C	ISO 180/1A	kJ/m ²	dry/cond.	11.5/15.5
Izod notched impact strength 1A -30°C	ISO 180/1A	kJ/m ²	dry	-
Ball indentation hardness H 358/30, H 961/30*	ISO 2039-1	MPa	dry/cond.	240*/190*
Thermal properties				
Deflection temperature 1.8 MPa (HDT A)	ISO 75-2	°C	-	250
Deflection temperature 0.45 MPa (HDT B)	ISO 75-2	°C	-	250
Max. service temperature (short cycle operation) ²⁾	-	°C	-	240
Temperature index at 50% loss of tensile strength after 20000 h / 5000 h	IEC 216-1	°C	-	145 / 175
Thermal coefficient of linear expansion, longitudinal / transverse (23-80)*°C	DIN 53752	10 ⁻⁴ /K	-	0.2 - 0.3 / 0.6 - 0.7
Thermal conductivity	DIN 52 612	W(m · K)	-	0.35
Specific heat capacity	-	J(kg · K)	-	1500.00
Electrical properties				
Dielectric constant at 1 MHz	IEC 60250	-	dry/cond.	3.5/5.6
Dissipation factor at 1 MHz	IEC 60250	10 ⁻⁴	dry/cond.	140/3000
Volume resistivity	IEC 60093	Ω · m	dry/cond.	10 ¹³ /10 ¹⁰
Surface resistivity	IEC 60093	Ω	dry/cond.	10 ¹² /10 ¹⁰
CTI, solution A	IEC 60112	-	cond.	450

Figura 122. Propiedades del plástico PA66-GF30 a 23 °C.

Por otro lado, se tiene que el material usado para la realización de las juntas es Teflón, se escogerá el material llamado “PET” en el programa.

El material PA66-GF30 se ha de introducir manualmente, para ello, se toma como base la tabla de la Figura 122, para así, generar un material personalizado en el software, tal y como se ve en la Figura 123.

Tras asignar a cada pieza su material correspondiente, para mejorar la apariencia, se les asigna, tanto a los colectores como a las juntas, el color que tienen en la realidad. Para ello, se ha de seguir los clics realizados en la Figura 124 (a), será la bola de color dentro de la herramienta “Apariencia” la que permita el cambio de color del elemento en cuestión.

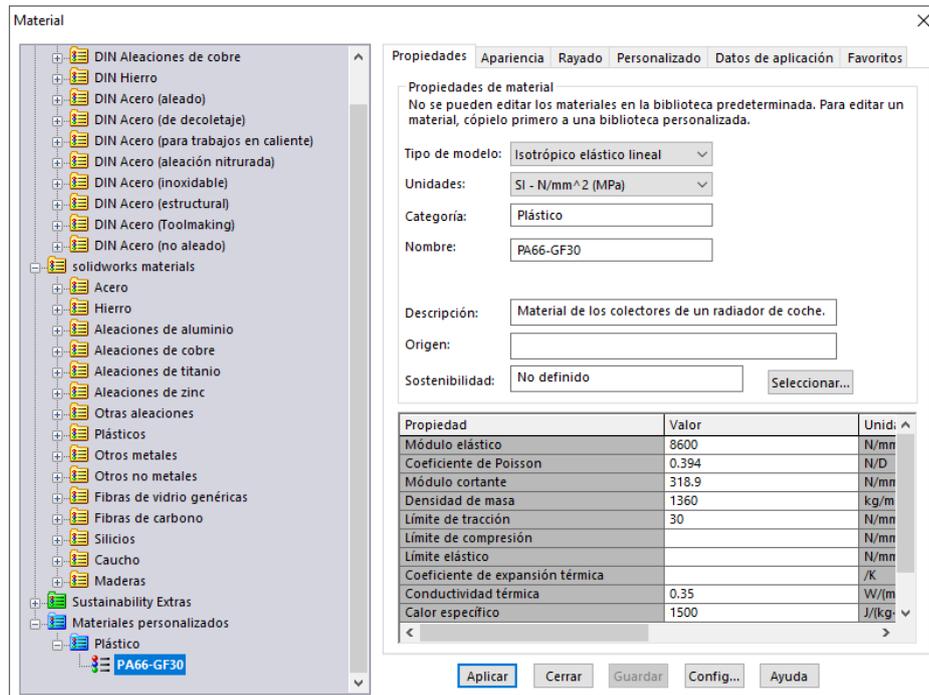


Figura 123. Generación de un material personalizado.



(a) (b)

Figura 124. Asignación de color. (Apariencia) (a) y resultado final (b).

9. Modelos para simulación

9.1. Radiador completo sin aletas

Para la primera simulación se ha optado por un modelo más simple que el intercambiador completo, es decir, se han eliminado las aletas, para tener una primera aproximación al problema, ya que es de una envergadura mayor que la que es capaz de simular el equipo disponible.

Para poder realizar la primera de las simulaciones, se ha de copiar el ensamblaje realizado a una nueva carpeta. Una vez copiado el modelo completo dentro de la carpeta de simulación, se ha de crear una nueva configuración, en la cual se supriman las aletas. Para ello, se abre el ensamblaje, y en el Property Manager, existe una pestaña llamada Configuraciones, se ha de pinchar sobre ella, y con el botón derecho se ha de generar una nueva configuración.

En esta configuración, se suprimen todas las aletas, para poder simular. Para ello, se ha de pinchar con el botón derecho sobre los elementos en cuestión y seleccionar “Configurar componente”.

En la Figura 125 se muestra cómo suprimir un componente en una sola configuración, manteniéndose en el resto de ellas. Se ha de hacer tanto para la matriz lineal de aletas, como para la aleta que hay fuera de esta matriz.

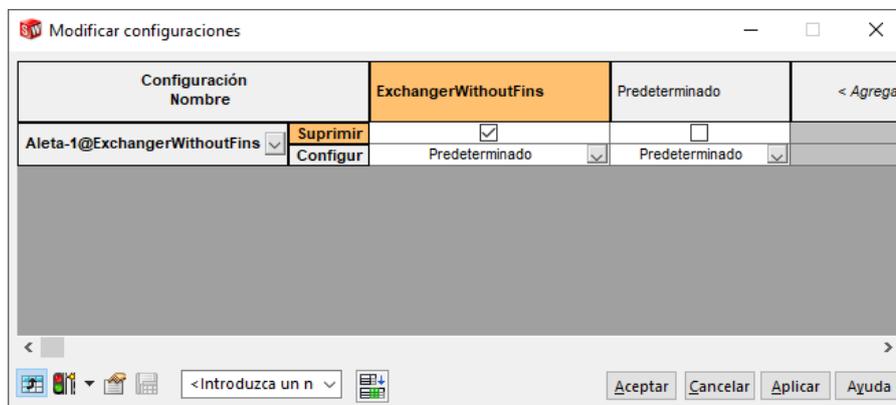


Figura 125. Modificar elementos mostrados en las configuraciones.

Una vez suprimidos los elementos que no se van a considerar en la simulación, se ha de generar los volúmenes de control, uno para el agua, y otro para el aire. Esto, en el software, se realiza mediante la definición de tapas en los límites de los volúmenes de control.

Así, se ha de generar un conducto que delimite el volumen de control del aire. Para ello, en la cinta superior, en la pestaña Ensamblaje, se selecciona: “Insertar componente > Nueva pieza”. Esta opción, permite generar los componentes necesarios para la simulación dentro del modelo.

Sobre el plano Alzado, se genera dicho conducto de forma que quede lo más ajustado posible al modelo, haciendo que las cuatro aristas de su perfil sean tangentes al modelo, el conducto se define de espesor 1 mm (esta dimensión no es importante en cuanto a cálculo), queda lo visible en la Figura 126.

Tras esto, se ha de poner dos superficies límite al volumen de control, esto es, se han de extrudir dos tapas en los extremos de los conductos. Para ello, se utiliza la opción “Extrudir base/saliente” dentro de la misma pieza.

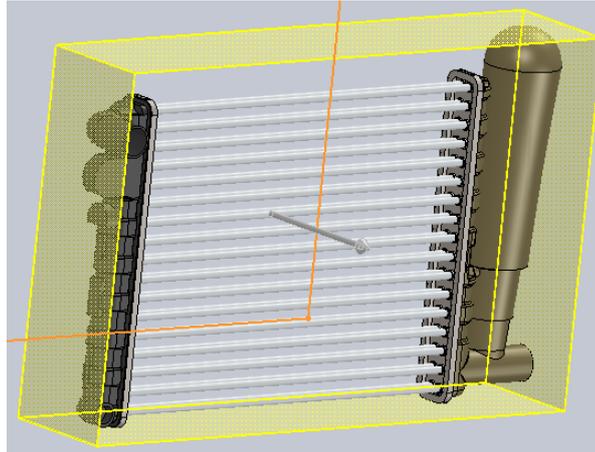


Figura 126. Volumen de control para el aire.

Se ha realizar esta operación, tanto en un lado como en el otro. Así, queda el volumen de control para el aire definido. El espesor de las tapas es de 1 mm, aunque, como en el caso de las paredes del volumen de control del aire, esta dimensión no es importante.

Para poder definir el volumen de control para el agua, es necesario, primero, guardar la pieza recién creada, y después, ocultar la misma. (Botón derecho sobre la pieza > Ocultar componente).

Se ha de insertar otra pieza, igual que en el caso anterior. Para ello: “Insertar componente > Nueva pieza”, sobre la pestaña “Ensamblaje” de la cinta superior. Se selecciona la operación “Extrudir base/saliente” y se ha de generar dos tapas, una a la entrada del aire del intercambiador y la otra, a la salida.

Como se puede ver en la Figura 127 (b), la tapa queda ajustada a la superficie de entrada, de nuevo, el espesor de este elemento no es demasiado importante, y se fija una dimensión de 1 mm. Tras realizar la misma operación en la parte de salida, queda el modelado finalizado para simular.

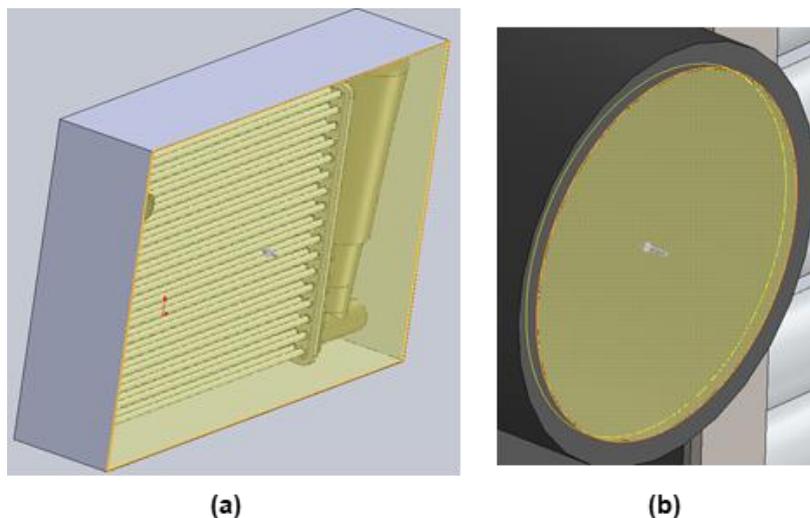


Figura 127. Tapas de definición de las condiciones de contorno para el VC del aire (a) y de agua (b)

9.2. Tubo con aletas

Para esta simulación, se van a considerar las aletas, pero para el caso de un solo tubo. La aleta, en primera instancia, se va a considerar plana, por simplicidad. Se habrá de considerar la parte proporcional de esta, para ello, se realiza la partición que se puede observar en el croquis de la Figura 32.

La distancia entre aletas y el número de las mismas, se mantiene igual que para el caso del intercambiador completo (1,111 mm y 351 aletas, respectivamente), siendo el espesor de cada una igual a 0,065 mm.

Para poder realizar este modelo, se ha de generar un nuevo ensamblaje, insertando el tubo en primer lugar. Queda lo que se ve en la Figura 128.

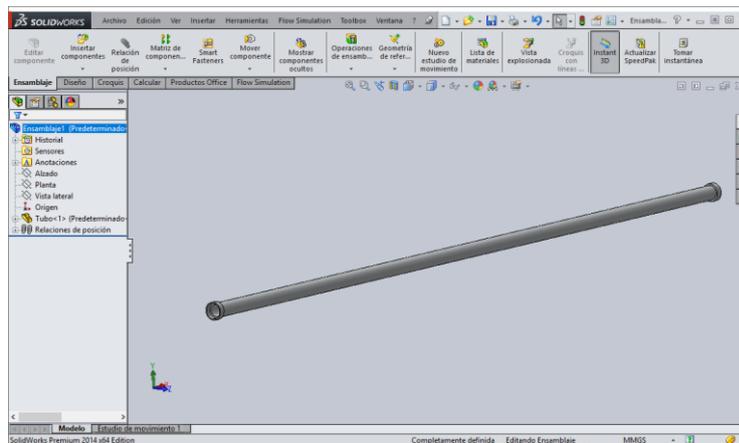


Figura 128. Importación del tubo.

Tras fijar el tubo, se ha de generar las aletas con las restricciones geométricas comentadas. Para ello se ha de clicar sobre: “Insertar componente > Nuevo componente”.

Se ha de realizar la extrusión de la aleta en un plano a 1,111 mm de la parte plana anterior de la protrusión de la aleta. Tras eso, se ha de generar una matriz lineal, igual que para el caso del radiador completo.

Por otro lado, hay que generar las tapas que servirán para la definición de las condiciones de contorno en el complemento y también el volumen de control para el aire. para ello, en la cinta superior, en la pestaña “Ensamblaje”, seleccionar: “Insertar componente > Nuevo componente”. Se han de realizar dos tapas en los extremos de los tubos, se utiliza la operación “Extrudir saliente/base”. El espesor de las tapas se fija en 0,5 mm. Tras la realización de la matriz lineal de las aletas y las tapas, el modelo queda finalizado. Figura 129.

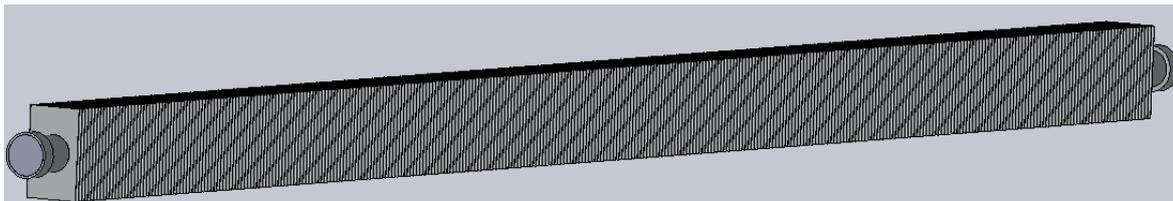


Figura 129. Tubo con aletas

9.3. Dos tubos con aletas

Para realizar este modelo, se ha de hacer una simetría al modelo anterior, para así tener los dos tubos, el uno al lado del otro. En primera instancia, se ha de generar el plano de simetría, tal y como se ve en la Figura 130.

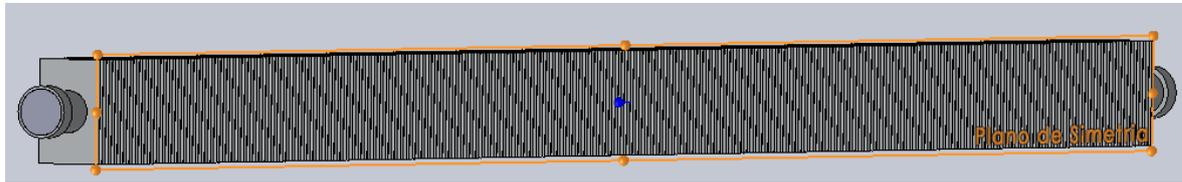


Figura 130. Plano de simetría

De esta manera, se seleccionan todos los componentes, y se realiza la simetría mencionada. La geometría final de este modelo queda reflejada en la Figura 131.

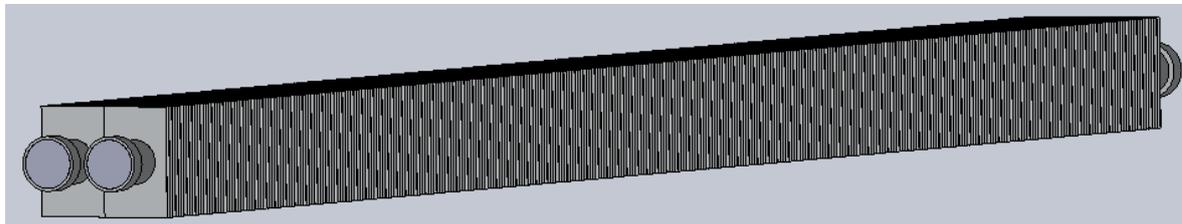


Figura 131. Modelo con la simetría realizada

Capítulo 4: **SIMULACIÓN EN SOLIDWORKS** **FLOW SIMULATION**

En este apartado se va a detallar el proceso seguido para simular el intercambiador y los problemas que han surgido. Por ser el modelo demasiado complejo para introducirlo directamente en el software de cálculo, se ha de simplificar su geometría, por ello, en su estudio inicial no se ha considerado piezas tales como, ventilador o el elemento que lo sostiene.

A continuación, se explica cómo se va a usar el complemento, para después, proceder a realizar distintas simulaciones con distintas condiciones de contorno, para así poder analizar su comportamiento en el rango de funcionamiento del mismo.

1. Uso del complemento, SolidWorks Flow Simulation

1.1. Análisis interno

Este complemento permite la realización estudios de dinámica de fluidos computacional (CFD – Computational Fluid Dynamics), el cual ofrece información sobre el flujo. Este estudio puede llegar a contener transferencia de calor, mezclas y flujos inestables y compresibles. Para poder acceder a dicho paquete de simulación, es necesario, activarlo. Para ello, en la cinta superior, se ha de activar el complemento tal y como se ve en la Figura 132. Esto se ha de hacer desde un archivo abierto, puede ser cualquiera. Tras esto, en la cinta de herramientas aparecerá una pestaña llamada “Flow Simulation”.

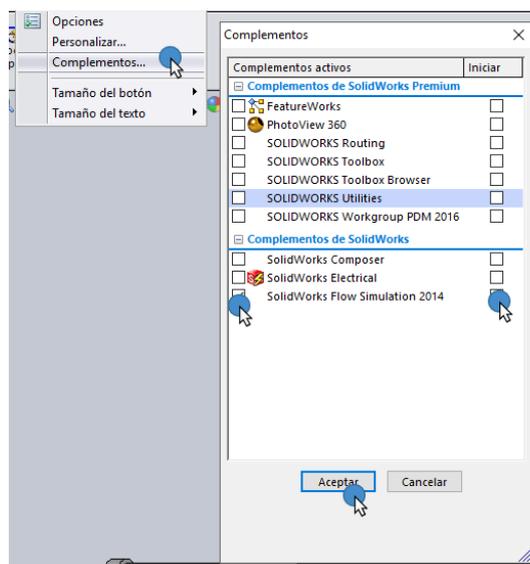


Figura 132. Activación del complemento.

Para comenzar, lo primero que se ha de notar es que la herramienta está en inglés. Se ha iniciar un nuevo proyecto, para esto, se ha de clicar sobre la opción “Wizard”, disponible en dicha pestaña. Se sigue el procedimiento mostrado desde la Figura 133 hasta la Figura 140.

En la Figura 133 se puede ver la primera de las ventanas, en ella podemos anotar el nombre del proyecto así como la configuración del modelo que se va a usar.

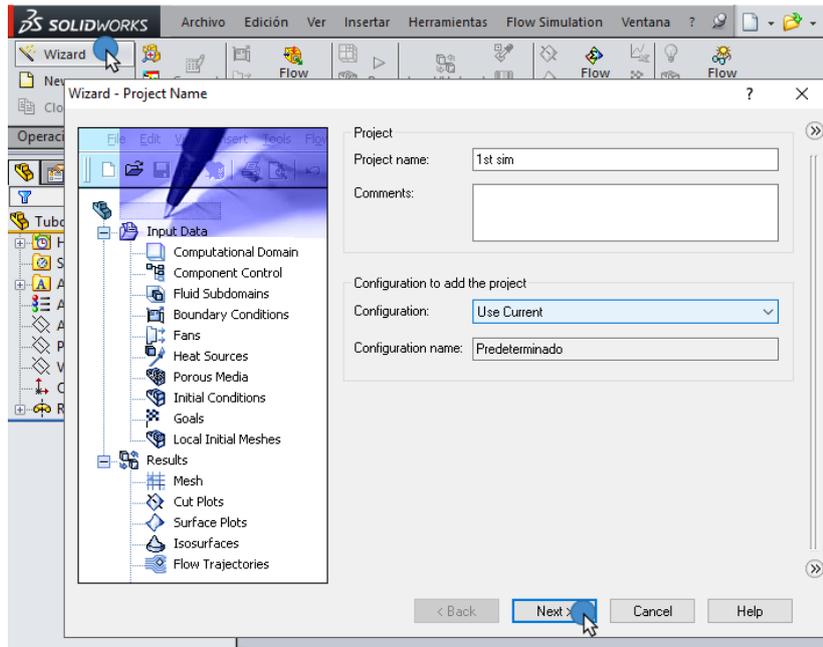


Figura 133. Wizard - Project Name

En la ventana de Figura 134, se puede elegir el sistema de unidades, se deja por defecto. Aunque se podría modificar cualquiera de ellas para hacer la introducción de datos más simple.

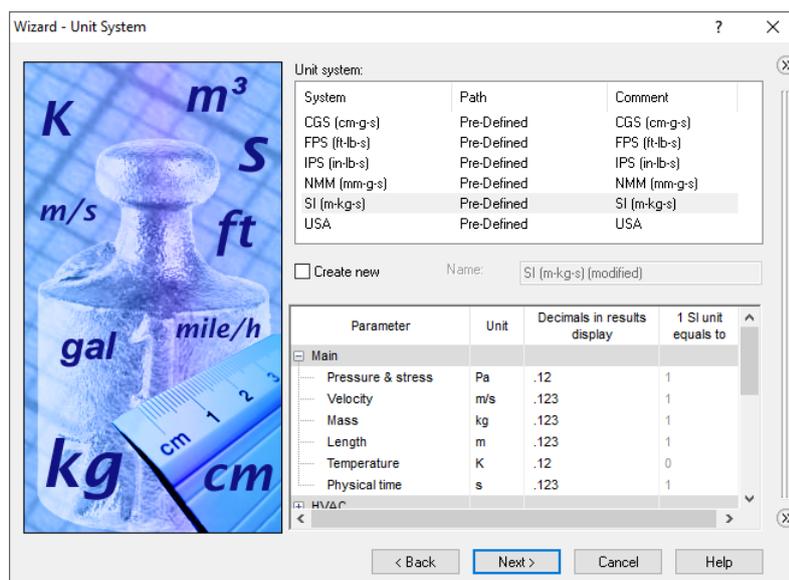


Figura 134. Wizard - Unit System

En la Figura 135, se ha de clicar sobre el cuadro de “Heat conduction in solids”. Esta opción activa el estudio de conducción. Así, se analiza tanto la conducción como la convección. Esta última es tenida en cuenta por defecto.

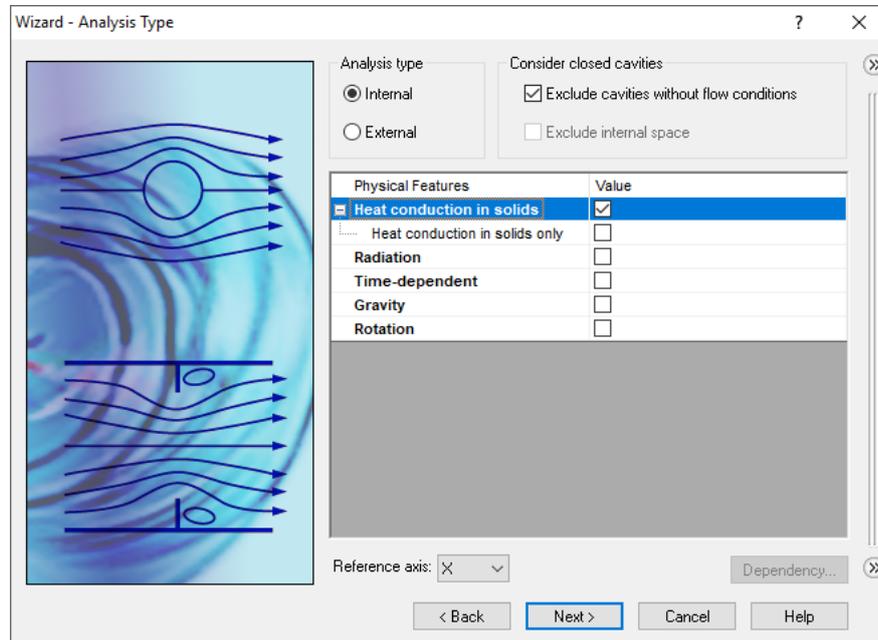


Figura 135. Wizard - Analysis Type

En la Figura 136 y en la Figura 137, se ha de escoger el fluido y el material, respectivamente, que considerará SolidWorks como predeterminado. Si se tiene un solo material, simplificará la introducción de datos y la resolución de los cálculos.

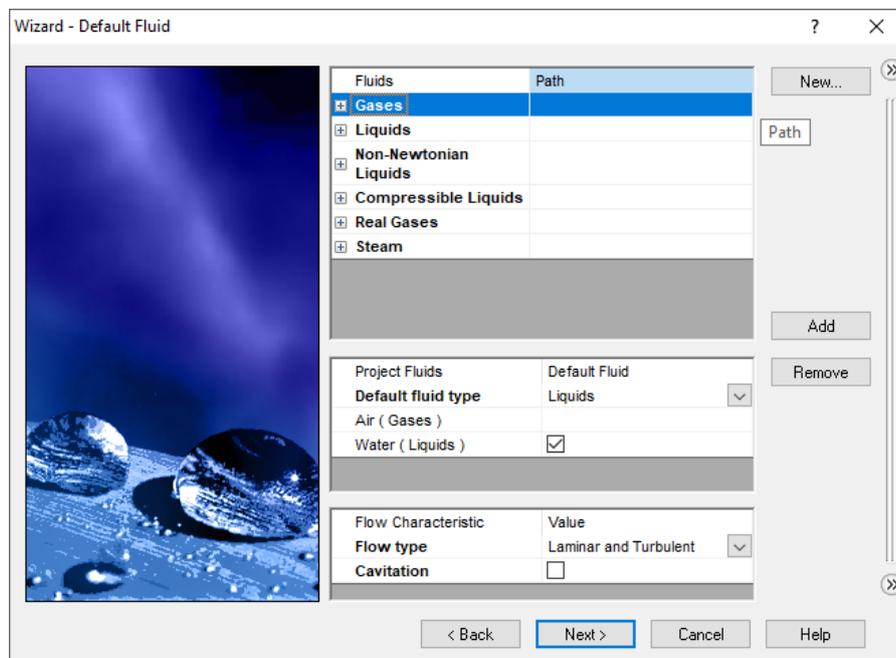


Figura 136. Wizard - Default Fluid

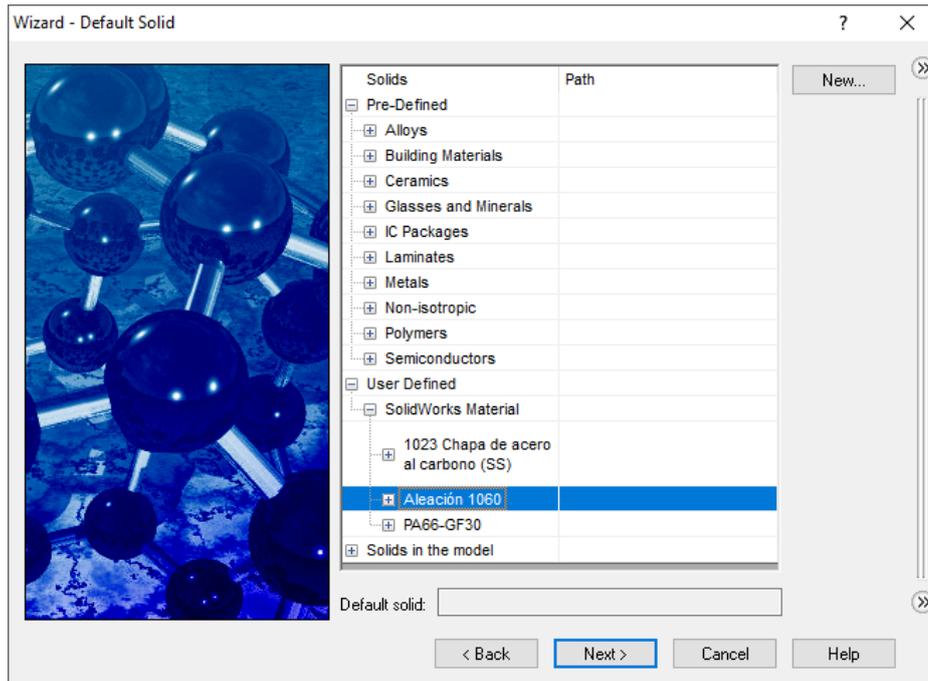


Figura 137. Wizard - Default Solid.

En la siguiente figura, se considera la rugosidad como nula, aunque esto sea una aproximación, no se está estudiando el fluido en pequeñas regiones cercanas a alguna pared, por lo tanto, en principio, no habrá de afectar a la transferencia global de calor entre el aire y el agua, ya que los tubos no son rugosos.

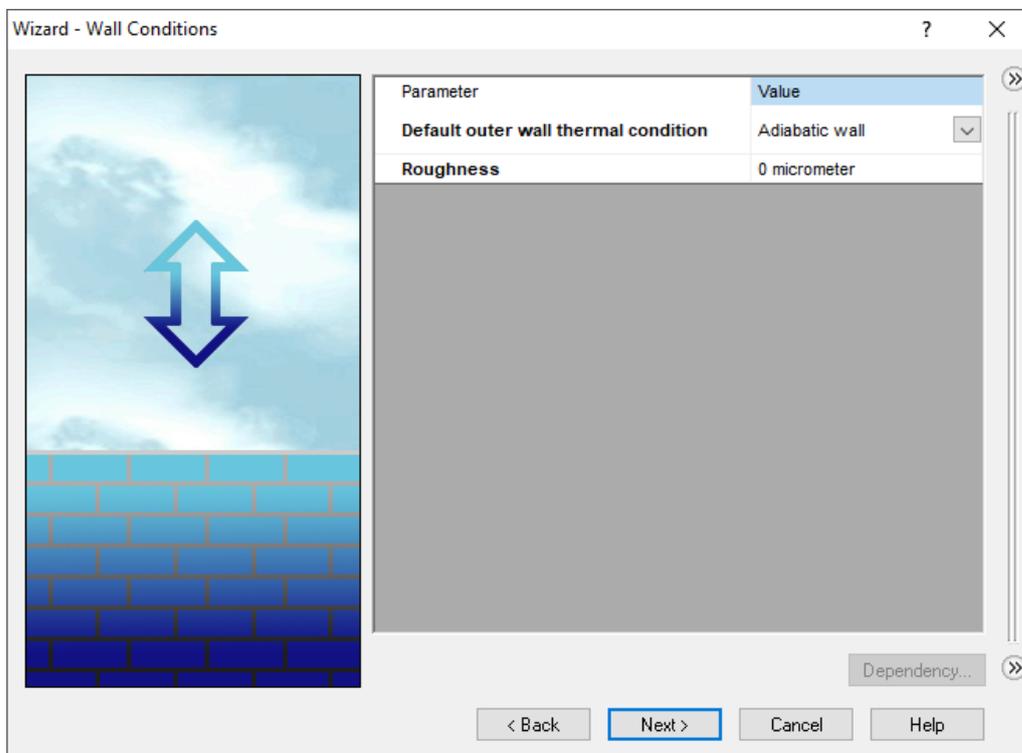


Figura 138. Wizard - Wall Conditions

En cuanto a lo que se refiere la Figura 139 se pueden definir las condiciones iniciales del flujo principal, se pueden también definir en el momento de configuración de la simulación.

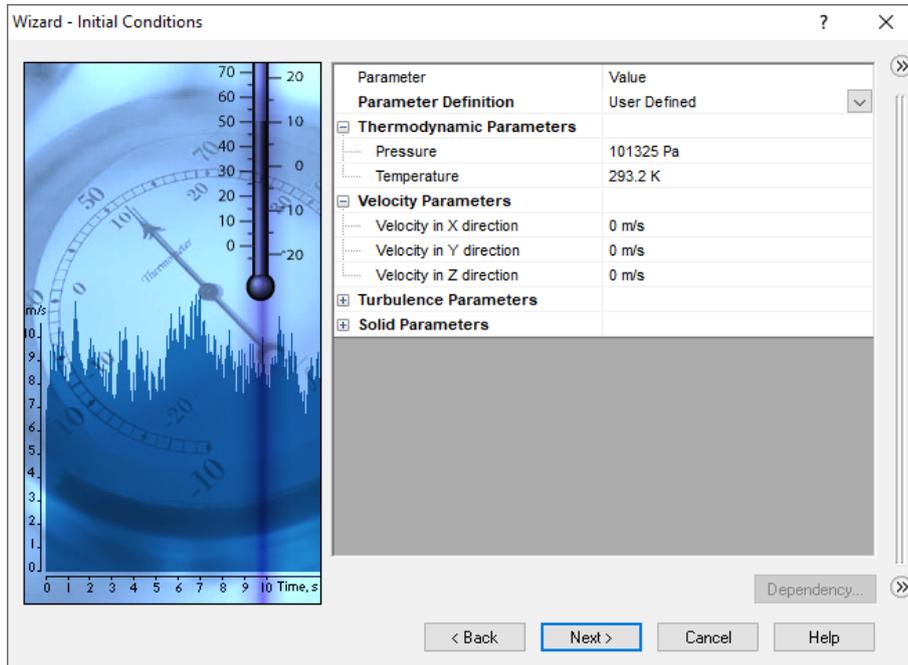


Figura 139. Wizard - Initial Conditions

La Figura 140 representa una de las pestañas más importantes de la simulación, pues será en ella donde se definan los parámetros de malla generales. En primera instancia, se dejará todo por defecto, esto es, un nivel 3 de malla. Cualquier modificación se realizará a través de la herramienta en el momento de la simulación.

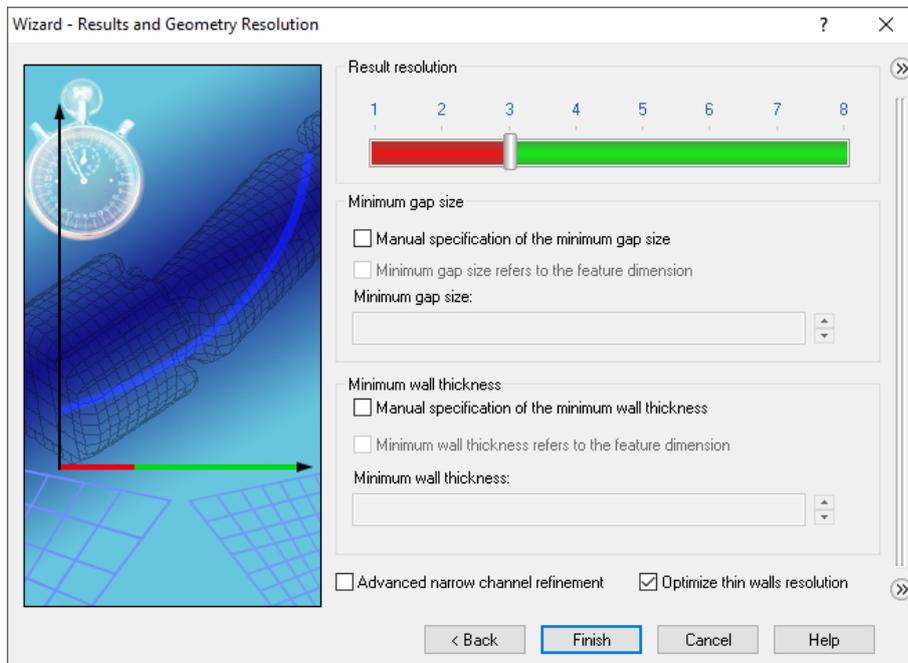


Figura 140. Wizard - Results and Geometry Resolution.

1.2. Análisis externo

Para realizar un análisis externo de los modelos, solamente hay que cambiar la opción de la Figura 135 de “Internal” a “External”. Se ha de definir como fluido por defecto el aire, y será en las condiciones iniciales donde se le atribuyan las propiedades de velocidad, temperatura y presión. Figura 139.

1.3. Uso de configuraciones en el modelo.

Para poder realizar las distintas simulaciones, se habrán de configurar distintos modelos. Esto es, se comenzó simplificando el modelo por la imposibilidad de realizar la simulación del modelo completa, también, de esta manera se ahorra tiempo computacional.

Así, para en un solo modelo poder tener todas las versiones necesarias para las distintas simulaciones, se recurre a la pestaña de “Configuraciones”. Figura 141.

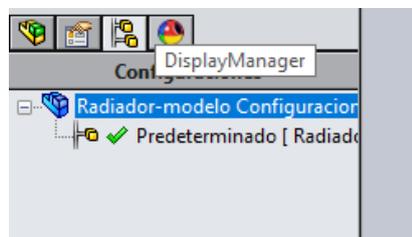


Figura 141. Configuraciones.

Pulsando con el botón izquierdo sobre lo mostrado en azul, se puede añadir una configuración nueva al modelo. De esta manera, todo lo que se haga sobre la segunda configuración queda guardado de forma independiente a la configuración “Predeterminado”.

Se accede a la primera pestaña que aparece en la Figura 141, donde se pueden realizar todas las modificaciones necesarias. Esto se puede usar tanto en ensamblajes, como en piezas aisladas.

1.4. Estudios paramétricos

Una herramienta muy potente del complemento son los llamados *estudios paramétricos*, o “Parametric Study” como el software lo denomina. Para acceder a uno, en la barra de herramientas superior, se sigue la siguiente ruta: Flow Simulation > Solve > New Parametric Study. La pestaña que arroja es la representada en la Figura 142.

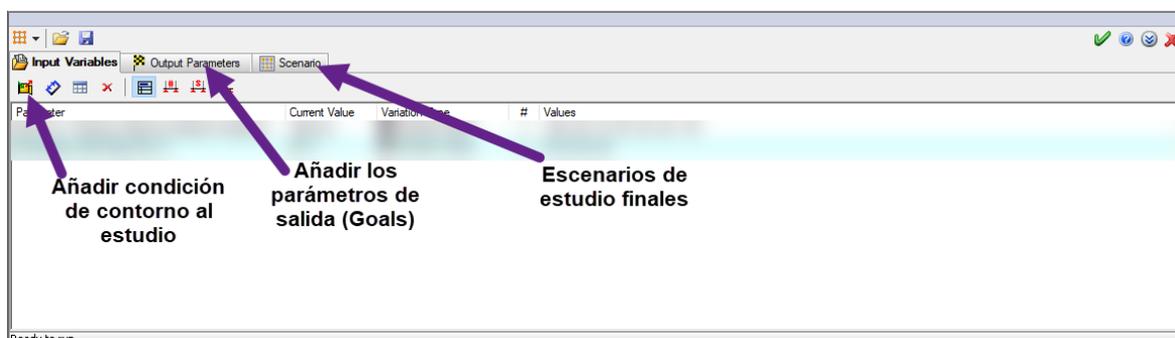


Figura 142. Estudios paramétricos.

Esta ventana tiene tres pestañas, la primera sirve para la definición de las variables de entradas del estudio, que en el caso que se ocupa, serán temperatura de entrada del agua por el tubo, y la velocidad del aire en dirección Y. En la segunda pestaña se declaran todas las variables de salida, que en este caso serán las temperaturas del agua a lo largo del tubo. Y en la última pestaña, el software muestra las distintas combinaciones que se pueden dar de las variables de entrada. En esta última pestaña, se puede ejecutar las simulaciones, obteniendo los distintos resultados en función de las variables de entrada.

Ejecutar los estudios

Input Variables | Output Parameters | **Scenari**

Exportar a Excel los valores obtenidos

	Design Point 1	Design Point 2	Design Point 3	Design Point 4	Design Point 5	Design Point 6	Design Point 7	Design Point 8	Design Point 9
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Cor	-100	-100	-100	-100	-85	-85	-85	-85	-70
Temperature (Inlet Mass Flow 1) [°C]	95	90	85	80	95	90	85	80	95
G Temperature (Fluid) 1 [°C]	92.1788253	87.3809644	82.5823604	77.7863982	92.3447591	87.5345481	82.7230829	77.9148085	92.517707
G Temperature (Fluid) 2 [°C]	92.2616268	87.4579726	82.6529784	77.8509	92.4227091	87.607197	82.7895655	77.9756698	92.5907307
G Temperature (Fluid) 3 [°C]	92.3469509	87.5372783	82.7258933	77.9174905	92.5031138	87.6820771	82.8581809	78.0384752	92.6660132
G Temperature (Fluid) 4 [°C]	92.4325082	87.6166563	82.7990132	77.9842536	92.5837705	87.7570804	82.9270317	78.1014757	92.7415356
G Temperature (Fluid) 5 [°C]	92.5180136	87.6958268	82.8720899	78.0509565	92.6643691	87.8319014	82.9958546	78.1644759	92.8169881
G Temperature (Fluid) 6 [°C]	92.6035502	87.7748091	82.9451656	78.1176333	92.7449437	87.9065314	83.0647123	78.2274646	92.8924233
G Temperature (Fluid) 7 [°C]	92.6890952	87.8536347	83.0182132	78.1842588	92.8254098	87.9810116	83.1336042	78.2904304	92.9677972
G Temperature (Fluid) 8 [°C]	92.7744759	87.9321556	83.0911168	78.2507717	92.9056423	88.0552205	83.2024039	78.3532385	93.0428782
G Temperature (Fluid) 9 [°C]	92.8594198	88.0102205	83.1637778	78.3170502	92.9853668	88.1288836	83.2710347	78.415863	93.1175383

Figura 143. Escenarios del estudio paramétrico.

Como se puede ver en la Figura 143, la última pestaña da acceso tanto al cálculo de los distintos estudios, como a la exportación de los resultados a formato Excel. También aparecen las distintas combinaciones posibles (recuadro en rojo) y una vez calculado, aparecen los resultados de las variables de salida (recuadro morado).

1.5. Especificaciones técnicas de la máquina usada

La máquina usada tiene las siguientes características técnicas:

- Procesador: Intel® Core i7-4720HQ, 3,4 GHz.
- Memoria RAM: 16 GB, DDR3 SRAM 1600 MHz.
- Procesador gráfico: NVIDIA® GTX 950M, GDDR5 1024 MHz 2 GB.
- Sistema operativo: Windows® 10 Pro, compilación 15063.
- Disco duro: Kingston SSD 120 GB.

2. Primer modelo de simulación

Para realizar la primera simulación fue necesario eliminar todas las aletas, debido a que la potencia de cálculo de la máquina usada es insuficiente para poder simular el modelo completo. Para ello, se generó una configuración en la que se suprimieron todas ellas, para que fuera posible correr la primera simulación.

Se genera un nuevo proyecto y se configura de la forma explicada anteriormente, utilizando la configuración de análisis interno de fluidos. Se utiliza el modelo del radiador completo para la primera simulación descrito en el anexo anterior.

En primera instancia, se han de generar los dos subdominios necesarios, uno para el aire, y otro para el agua, ya que se tienen dos fluidos distintos. Para ello, se selecciona una de las superficies internas que definen el volumen de control en cuestión, y se clicca, con el botón derecho, sobre "Fluid Subdomain > Insert Fluid Subdomain". Figura 144 y Figura 145.

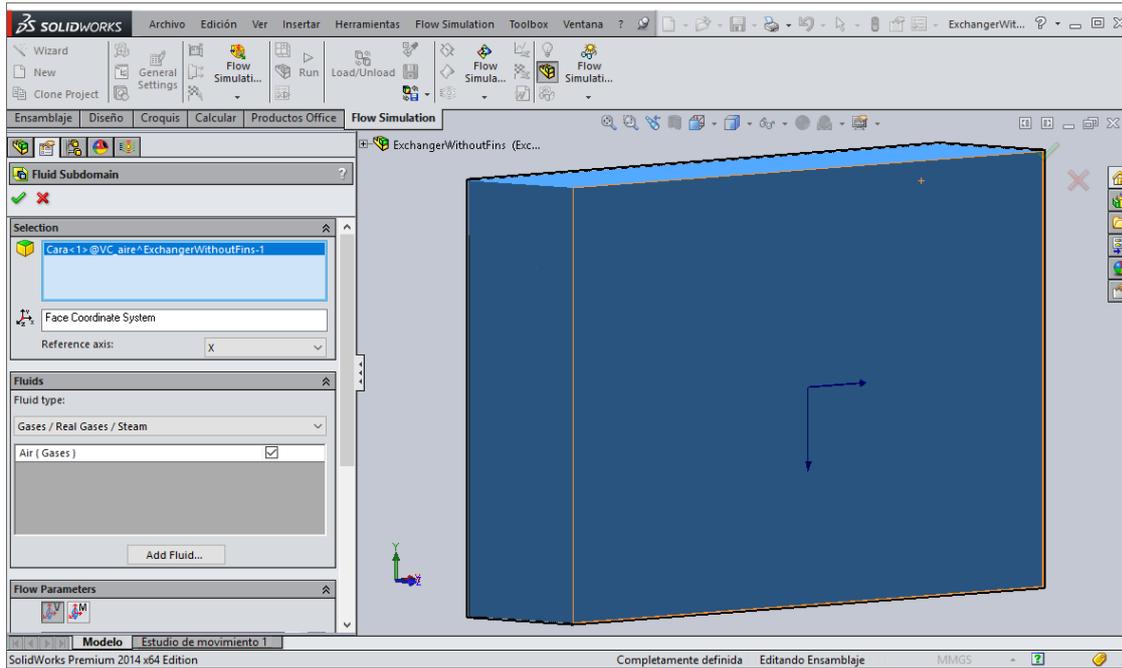


Figura 144. Fluid Subdomain para el aire.

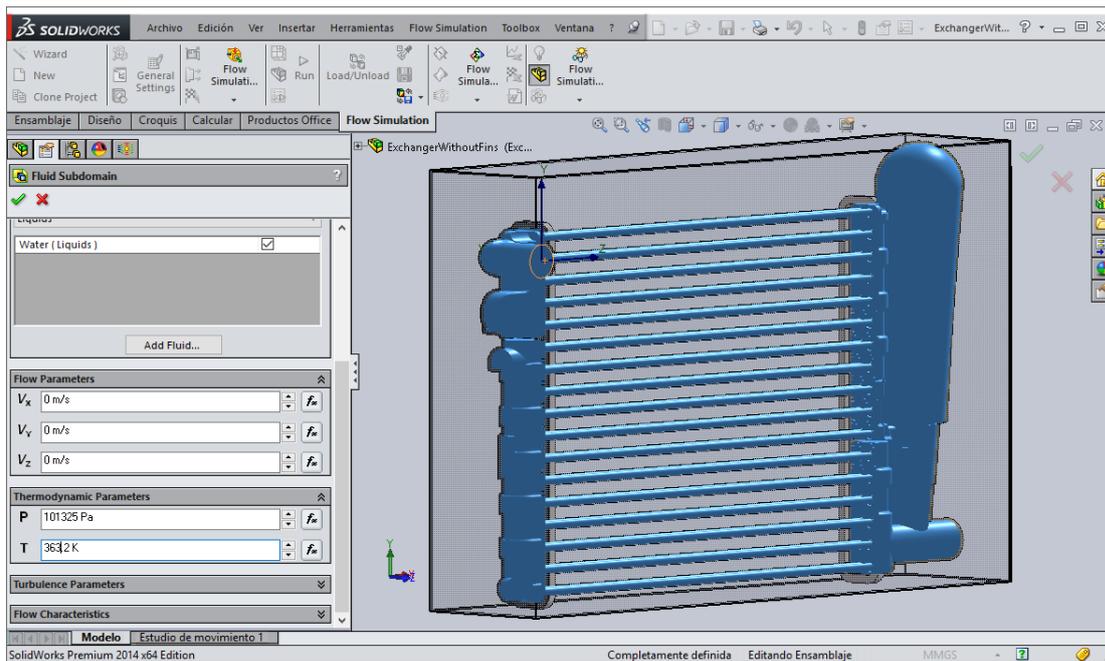


Figura 145. Fluid Subdomain para el agua.

Se han de definir las siguientes condiciones de contorno:

- Condiciones iniciales del aire: $p = 101325 \text{ Pa}$; $T = 298,2 \text{ K}$. Velocidad: 25 m/s
- Condiciones iniciales del agua: $p = 101325 \text{ Pa}$; $T = 363,2 \text{ K}$. Flujo másico de agua de $0,83612 \text{ kg/s}$.
- Presión atmosférica tanto a la salida del intercambiador como el VC del aire.

Para generar una condición de contorno, se ha de seleccionar la superficie (o superficies de interés) y clicar con el botón derecho y seleccionar “Boundary Condition”. En la parte izquierda de la pantalla, aparece, entonces, un menú donde se podrá configurar la misma.

Para la primera condición de las listadas, se selecciona la superficie interior de la tapa del VC del aire y se configura la condición de contorno de la forma en que se ve en la Figura 146.

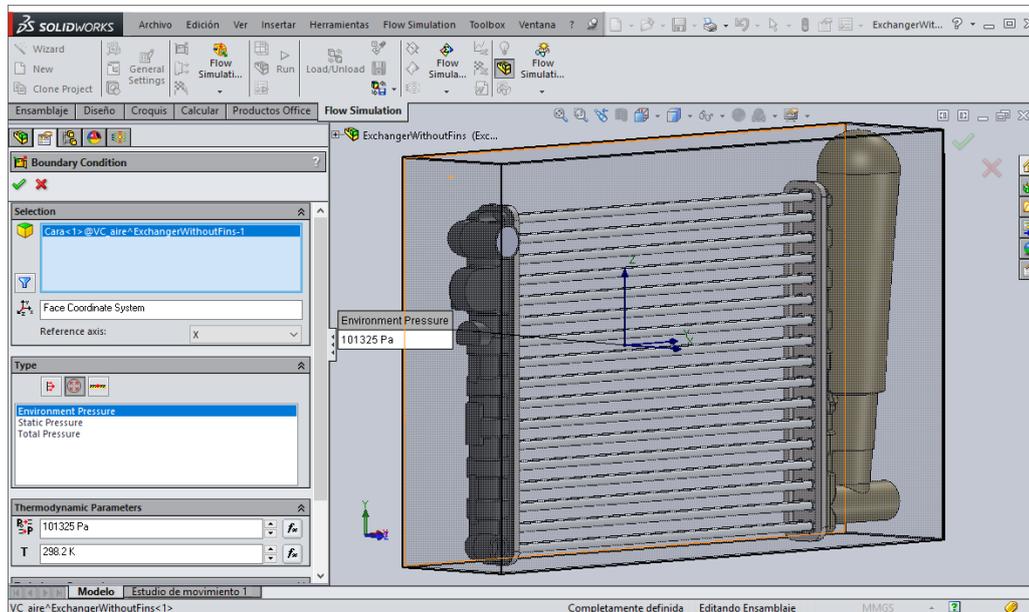


Figura 146. Environment Pressure

De la misma manera, se realiza para la salida del intercambiador. Para la condición de velocidad de entrada del aire, se ha de realizar el mismo proceso, pero configurando la herramienta de la forma que se muestra en la Figura 147.

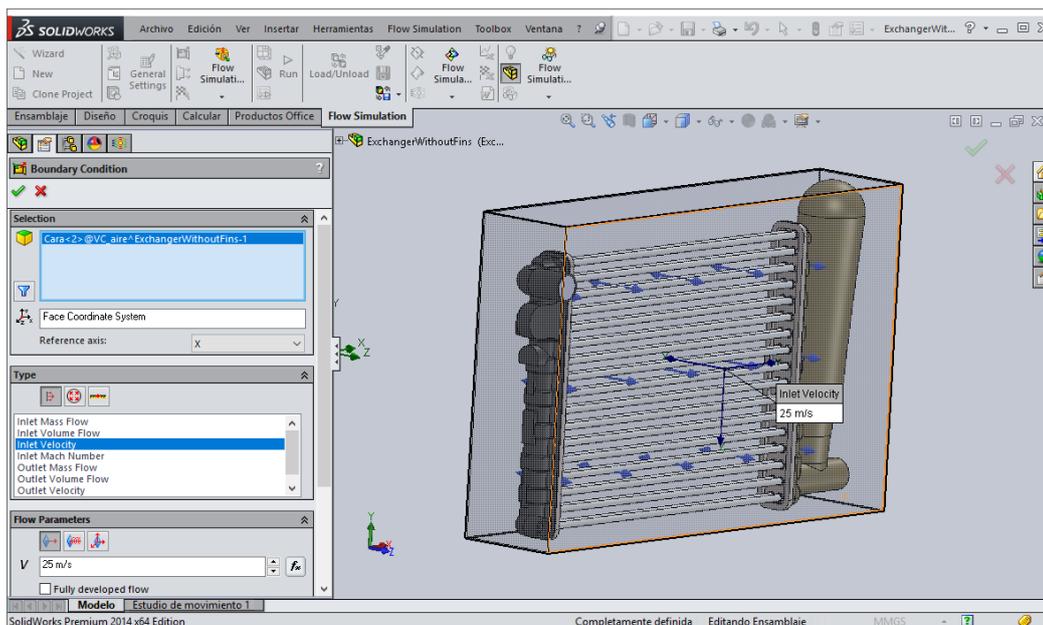


Figura 147. Condición de velocidad de entrada del aire.

De igual manera, pero seleccionando “Inlet Mass Flow”, y una masa de 0,83612 kg/s, se configura la entrada de agua en el intercambiador. La superficie para esta condición de contorno es la de entrada al intercambiador.

Por otro lado, se han de definir los materiales del intercambiador, como se ha definido aluminio como material por defecto, solo es necesario la declaración de los materiales que sean distintos a éste. Esto es:

- Junta: PET.
- Módulo E/S: Chapa de acero al carbono (SS).
- Colectores de entrada y de salida: PA66-GF30.

Esto, se realiza clicando con el botón derecho sobre “Solid Materials > Import Data From Model”. En la lista que aparece en la parte inferior de la pantalla, se han de seleccionar los materiales que se han detallado anteriormente. Figura 148.

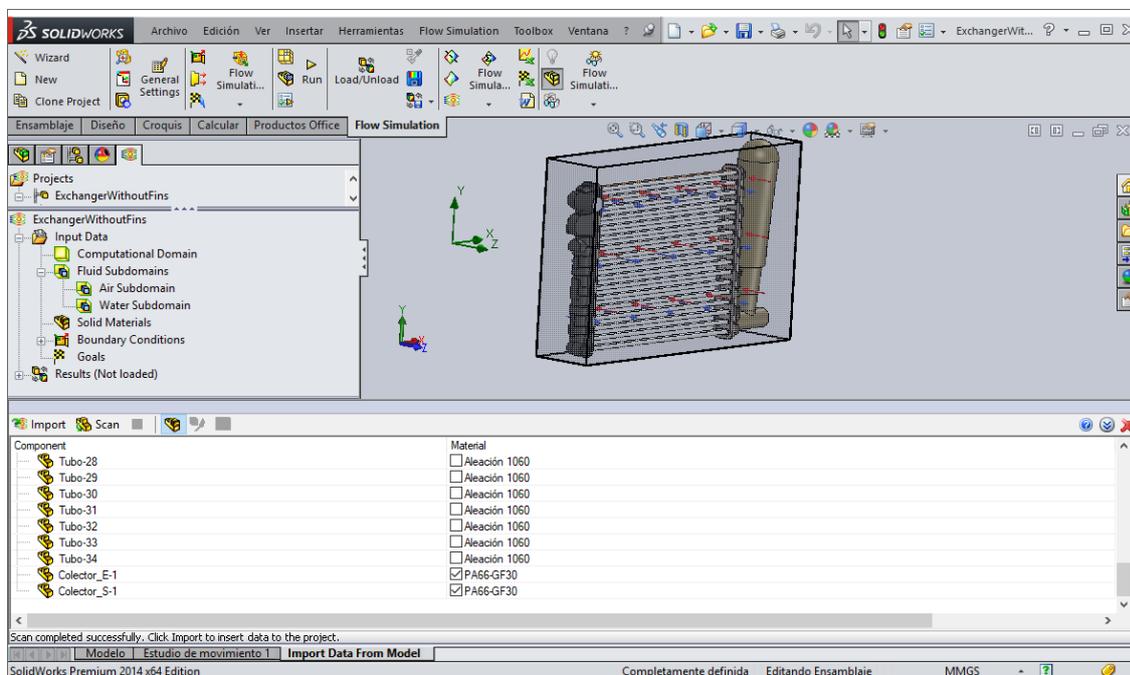


Figura 148. Solid Materials

Por último, se definen las metas de cálculo para la simulación, esto es, los parámetros que va a utilizar el software como condiciones de convergencia. Se van a definir las siguientes condiciones de convergencia:

- Temperatura media de los fluidos.
- Coeficiente de transferencia de calor.
- Temperatura de los sólidos

Estos parámetros son los de más interés para el estudio que se está realizando. Para insertar una nueva meta, se ha de clicar, con el botón derecho, sobre “Goals”. En el desplegable que sale, se ha de seleccionar “Global Goals” para las tres primeras condiciones mencionadas.

Una vez seleccionadas las tres metas globales, aparecen de la forma en que se ve en la Figura 149:



Figura 149. Metas globales.

Queda así el modelo listo para la simulación. Para ejecutarla, se ha de clicar sobre el botón “Run” disponible en la cinta superior.

Se ha de configurar el solucionador tal y como se ve en la Figura 150, esta es la configuración por defecto. Tras ejecutarse la simulación, se puede obtener la información que se muestra en la Figura 151.

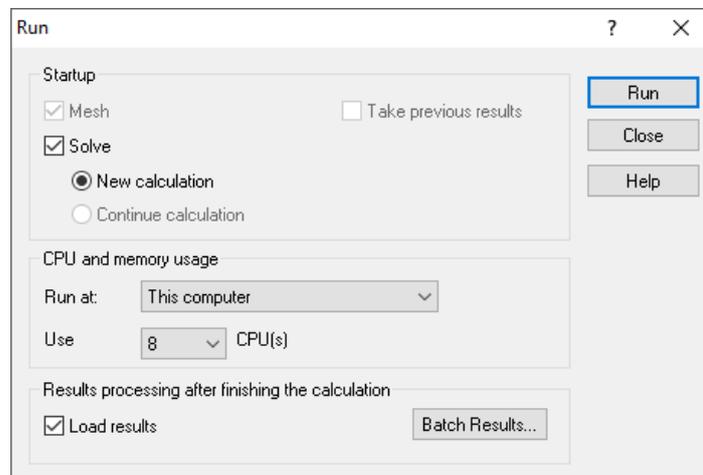


Figura 150. Configuración del EDF Solver

Parameter	Value
Status	Solver is finished.
Fluid cells	150625
Solid cells	16337
Partial cells	181222
Iterations	297
Last iteration finished	13:58:43
CPU time per last iteration	00:00:14
Travels	2.11085
Iterations per 1 travel	141
Cpu time	1 : 16 : 57

Figura 151. Información sobre el modelo

Se tiene un modelo con 150.625 volúmenes finitos y un total de 16.337 nodos sólidos. Han sido necesarias un total de 297 iteraciones para llegar al resultado final. En la Figura 152 se puede ver la convergencia del resultado en una escala relativa que varía entre 0 y 1. Se ve que las gráficas de la Figura 152, en su parte final son planas, por lo que, se dice que la solución se ha estabilizado.

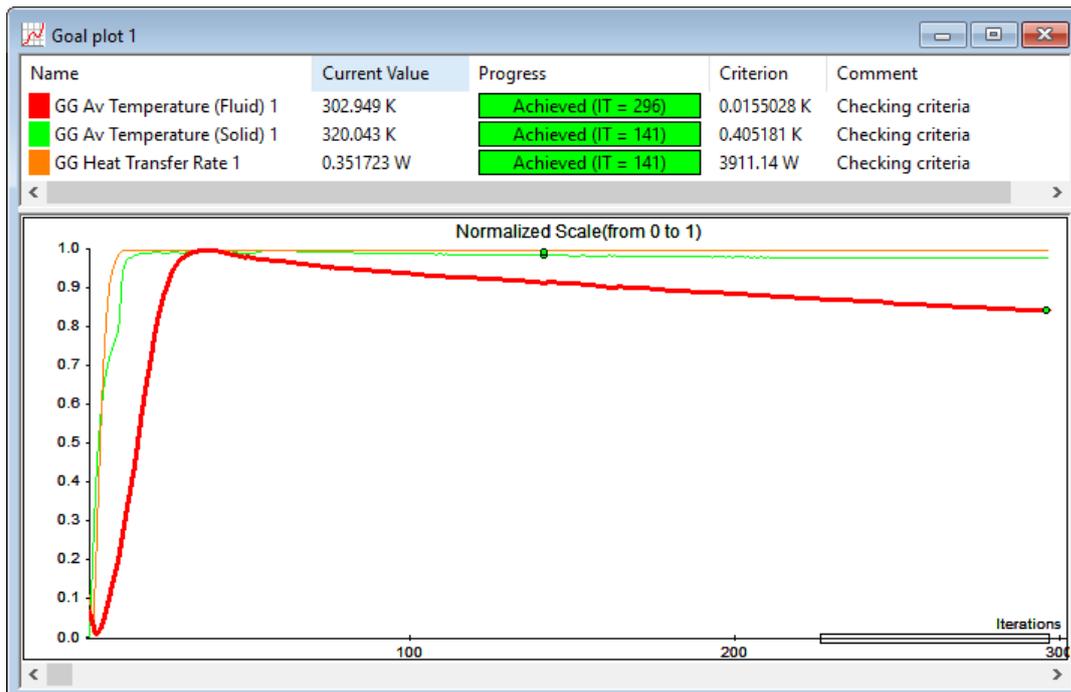


Figura 152. Análisis de la convergencia de la solución.

Que el valor de un parámetro no haya llegado al 1, no significa que no se haya llegado a una solución correcta, ya que esta grafica muestra la relación entre los valores de los parámetros. Lo importante es que se haya alcanzado la convergencia, es decir, que en cada variable aparezca el círculo coloreado de verde que aparece en la Figura 152. Lo que indica que el resultado es estable, es decir, que el valor de una iteración respecto a la siguiente es muy próximo.

Para ver la caída de temperatura entre la entrada y la salida del modelo, se ha de generar dos “Surface Plot”, esto, se realiza, clicando con el botón derecho sobre “Surface Plot > Insert” y seleccionando tanto la superficie de entrada, como la de salida.

Se selecciona después “Show” para obtener los valores medios de las temperaturas en las superficies. Se tiene un valor medio en la superficie de entrada igual a 363,20 K (90°C), coincidente con lo programado en las condiciones de contorno, el valor medio de la temperatura a la salida es de 362,30 K (89,1 °C).

También, se obtiene la tasa de transferencia de calor, mediante el mismo procedimiento: Surface Plot > Insert > Heat Transfer Rate, esto se aprecia en la figura siguiente. Se seleccionan todos los tubos para así obtener la potencia evacuada por el intercambiador.

Pulsando sobre “Show”, se obtiene que este parámetro tiene un valor de 0,164 W.

También se realizan dos gráficos de sección. Uno longitudinal y el otro transversal. Para ello, se ha de hacer clic derecho sobre “Cut Plots > Insert”. La configuración es la mostrada en la figura siguiente es para mostrar el gráfico en una sección transversal, para la sección longitudinal, la configuración de la herramienta es idéntica.

Se han de configurar dos gráficos dentro del mismo, uno de colores continuo a lo largo de toda la sección para la temperatura y otro de vectores que muestre la velocidad. Para ello,

como se muestra en la Figura 154, se seleccionan los tipos en el apartado “Display”, configurándose los mismos en las pestañas posteriores.

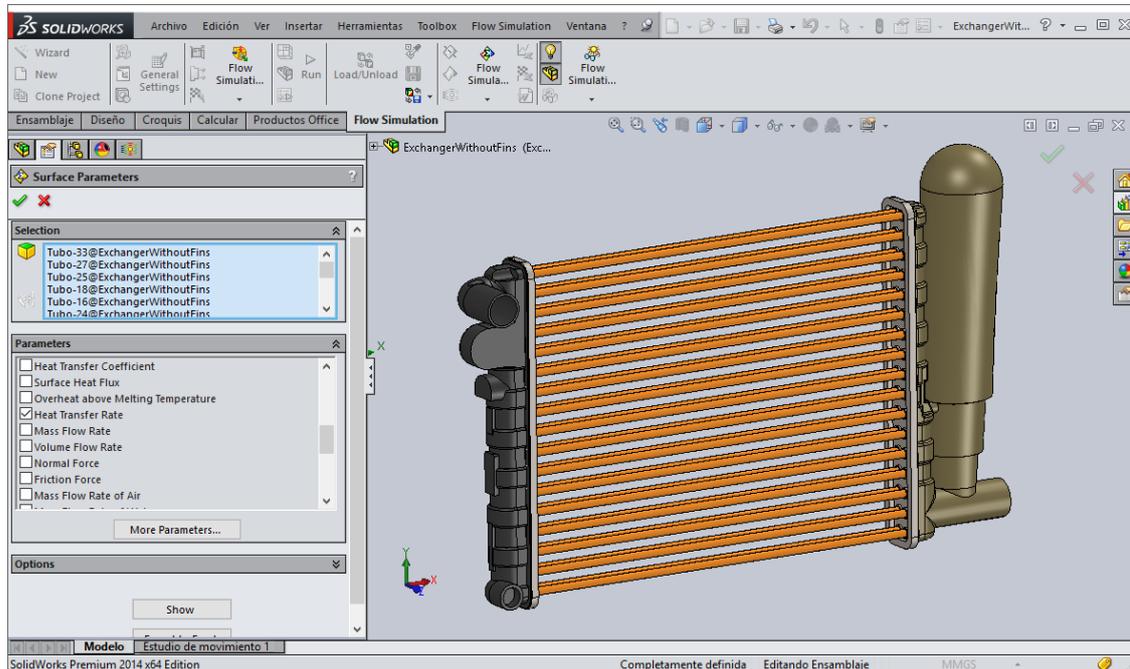


Figura 153. Heat transfer rate definido en un gráfico de superficie

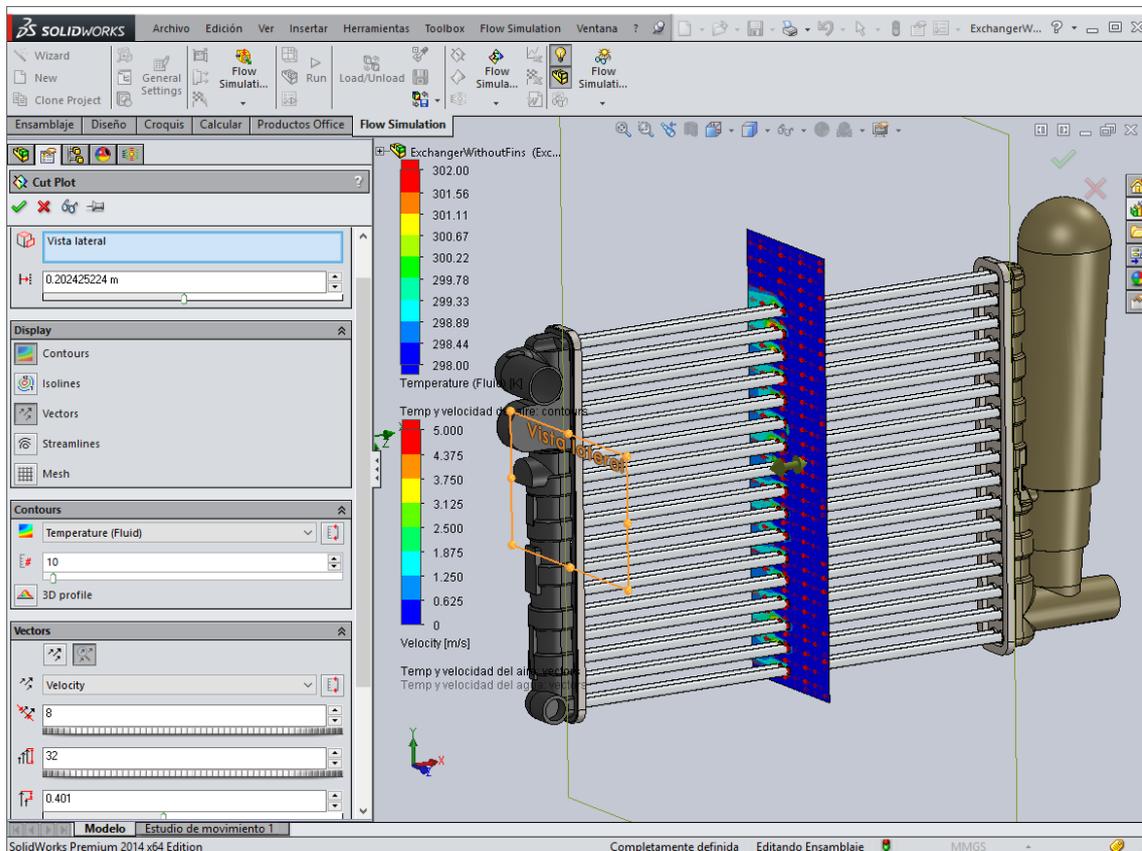


Figura 154. Configuración de un gráfico de corte

3. Segundo modelo de simulación

3.1. Tubo con malla simétrica

Se analiza un modelo que tiene en cuenta un solo tubo. Como el fluido realiza tres pasos por tubo en su recorrido por el intercambiador, será necesario simular en tres ocasiones el modelo actual para tener una representación de la caída de temperatura total en el intercambiador. El procedimiento es el siguiente, se simula el primer paso, y para el segundo paso se toma, como temperatura de entrada del agua, la temperatura de salida del primer paso. Se procede de igual manera con el tercer paso.

La segunda simulación, se realiza mediante un análisis externo y malla simétrica respecto al plano XY, para ello, se utiliza la configuración del Wizard descrita en el punto 1.2. Se utiliza el modelo de un tubo aislado para esta simulación.

Para reducir el número de nodos, aprovechando la condición de simetría respecto al plano XY de la simulación, se declara la misma en la pestaña “Computational Domain”. Figura 155.

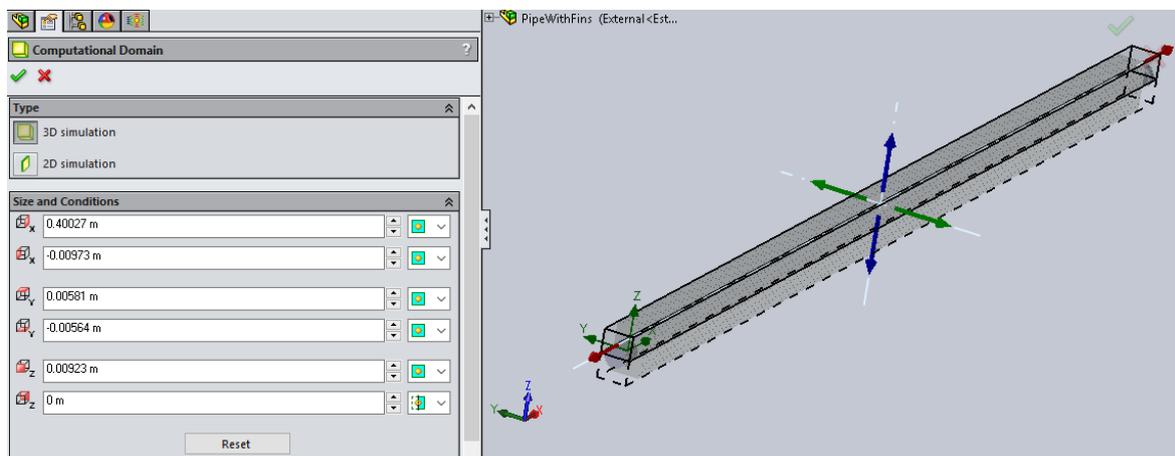


Figura 155. Simetría de la simulación respecto al plano XY.

El caudal de agua de entrada es la mitad, ya que la sección de entrada es la mitad también, siendo las condiciones de contorno utilizadas, las siguientes:

- Condiciones iniciales del aire: $p = 101325 \text{ Pa}$; $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Velocidad en el eje Y: - 100 km/h.
- Condiciones iniciales del agua: $p = 101325 \text{ Pa}$; $T = 95 \text{ }^\circ\text{C}$. Flujo másico de agua: 0,041806 kg/s.

Las metas de cálculo, en primera instancia, son las mismas que para el caso del radiador completo.

3.1.1. Simulaciones para el análisis de convergencia

Nivel 2 de malla

Con la configuración inicial, cambiando el nivel de malla hasta el nivel 2, se obtiene un valor de la temperatura a la salida del tubo de 92,177 °C. Todo esto con 17.016 nodos. El tiempo de simulación es de 4 min.

Nivel 3 de malla

Con la configuración inicial, se ejecuta la simulación. El número de nodos es de 79.177. Mediante la herramienta “Probe” se obtiene una temperatura a la salida del modelo de 92,283 °C. El tiempo aproximado de simulación fue de 15 min.

Nivel 4 de malla

Se genera un nuevo proyecto, y en la pestaña de configuración inicial de malla, se declara un nivel 4. En este caso, el número de celdas asciende a 189.016 celdas. De la misma forma que en el caso anterior y mediante la herramienta “Probe” se obtiene una temperatura del fluido en la salida del tubo de 92,233 °C. Siendo el tiempo aproximado de simulación de 30 min.

Nivel 5 de malla

Para este nivel, el número de celdas llega a las 616.226 unidades, mientras que la temperatura a la salida del tubo tiene por valor 92,237 °C. El tiempo de simulación asciende a las 2 h y 30 min.

3.1.2. Estudio paramétrico

Para el proyecto con nivel 3 de malla, se ejecuta un estudio paramétrico. Se necesita declarar las variables de salida (la temperatura del fluido a lo largo del eje del tubo), optándose por declarar metas puntuales de salida a lo largo del mismo.

Para ello, se clicca con el botón derecho sobre Goals > Insert Point Goals. En este momento aparece una pestaña tal y como se ve en la Figura 156, se ha de seleccionar en el cuadro de “Parameters” la temperatura del fluido.

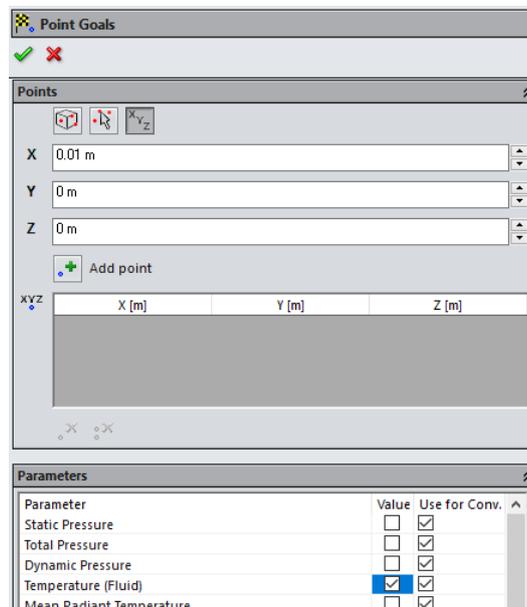


Figura 156. Metas puntuales.

Se añaden puntos cada 0,01 m a lo largo del eje. Estas metas serán las usadas como parámetros de salida en el estudio paramétrico.

Primer paso por tubo

Se abre un nuevo estudio paramétrico, como variables de entrada se seleccionan la temperatura de entrada del agua, y la velocidad del aire en dirección del eje Y. Se estudian todas las posibles combinaciones de los valores discretos mostrados a continuación:

- Temperatura de entrada del agua: 95, 90, 85 y 80 °C.
- Velocidad del aire: 115, 100, 85, 70, 55, 40, 25 km/h.

Esto da un total de 28 posibles estudios. En la pestaña de variables de salida se seleccionan las metas puntuales generadas.

Por último, antes de simular el estudio paramétrico, es conveniente comprobar que los valores de las demás variables no incluidas en el estudio son los correctos, esto es, el caudal de entrada de agua y la temperatura del aire:

- Caudal de agua de entrada: 0,041806 kg/s.
- Temperatura del aire de entrada: 25 °C.

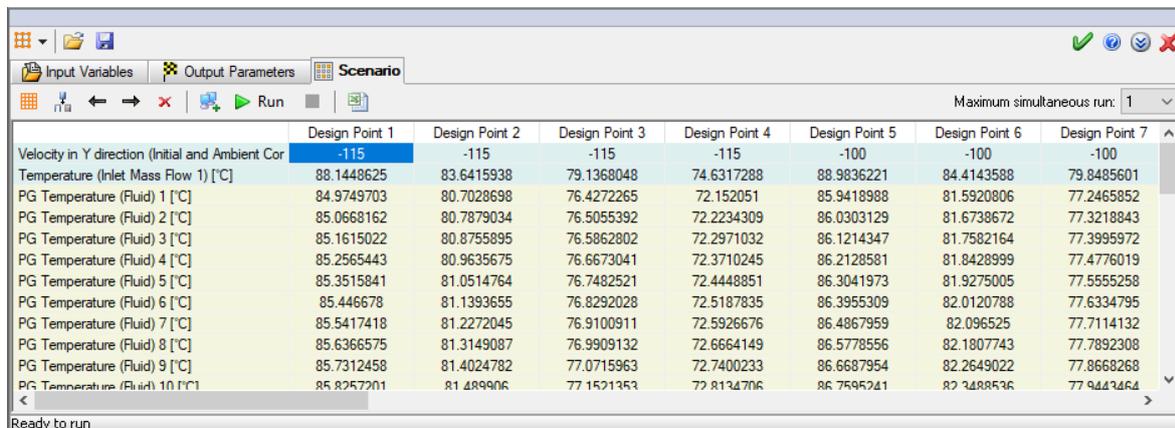
Una vez ejecutado y terminado el estudio, se exportan los resultados a Excel.

Segundo y tercer paso por tubo

Se duplica el estudio anterior clicando sobre el mismo con el botón derecho y seleccionando “Duplicate”. La temperatura de entrada del agua en este caso ha de ser coincidente con la temperatura del agua de salida en el estudio anterior, para ello, se han de copiar los valores de temperatura de salida del estudio anterior, y pegarlos sobre la fila donde se declara la temperatura de entrada del nuevo estudio, el duplicado. Al hacer esto, se eliminarán los resultados del estudio anterior.

Para el segundo y tercer paso por tubo, el valor de caudal ha de ser modificado, y declarar un valor de 0,0348355 kg/s.

Una vez ejecutado los modelos, se exportan los resultados a formato Excel. El aspecto de los estudios paramétricos una vez simulados es el que se ve en la siguiente figura.



	Design Point 1	Design Point 2	Design Point 3	Design Point 4	Design Point 5	Design Point 6	Design Point 7
Velocity in Y direction (Initial and Ambient Cor	-115	-115	-115	-115	-100	-100	-100
Temperature (Inlet Mass Flow 1) [°C]	88.1448625	83.6415938	79.1368048	74.6317288	88.9836221	84.4143588	79.8485601
PG Temperature (Fluid) 1 [°C]	84.9749703	80.7028698	76.4272265	72.152051	85.9418988	81.5920806	77.2465852
PG Temperature (Fluid) 2 [°C]	85.0668162	80.7879034	76.5055392	72.2234309	86.0303129	81.6738672	77.3218843
PG Temperature (Fluid) 3 [°C]	85.1615022	80.8755895	76.5862802	72.2971032	86.1214347	81.7582164	77.3995972
PG Temperature (Fluid) 4 [°C]	85.2565443	80.9635675	76.6673041	72.3710245	86.2128581	81.8428999	77.4776019
PG Temperature (Fluid) 5 [°C]	85.3515841	81.0514764	76.7482521	72.4448851	86.3041973	81.9275005	77.5555258
PG Temperature (Fluid) 6 [°C]	85.446678	81.1393655	76.8292028	72.5187835	86.3955309	82.0120788	77.6334795
PG Temperature (Fluid) 7 [°C]	85.5417418	81.2272045	76.9100911	72.5926676	86.4867959	82.096525	77.7114132
PG Temperature (Fluid) 8 [°C]	85.6366575	81.3149087	76.9909132	72.6664149	86.5778556	82.1807743	77.7892308
PG Temperature (Fluid) 9 [°C]	85.7312458	81.4024782	77.0715963	72.7400233	86.6687954	82.2649022	77.8668268
PG Temperature (Fluid) 10 [°C]	85.8257201	81.488906	77.1521353	72.8134706	86.7595241	82.3488536	77.9443464

Figura 157. Parametric Study del tercer paso por tubo.

En la figura de arriba, la variable de salida “PG Temperature (Fluid) 1” corresponde con la temperatura de salida del agua.

3.2. Tubo con malla periódica

La tercera simulación se va a realizar, considerando una malla periódica a lo largo de la dirección Z, para ello, se ha de configurar el “Computational Domain” tal y como se puede ver en la Figura 158. Para declarar la malla periódica, se ha de seleccionar la opción rodeada, lo que da lugar a la malla periódica que aparece señalada con las flechas.

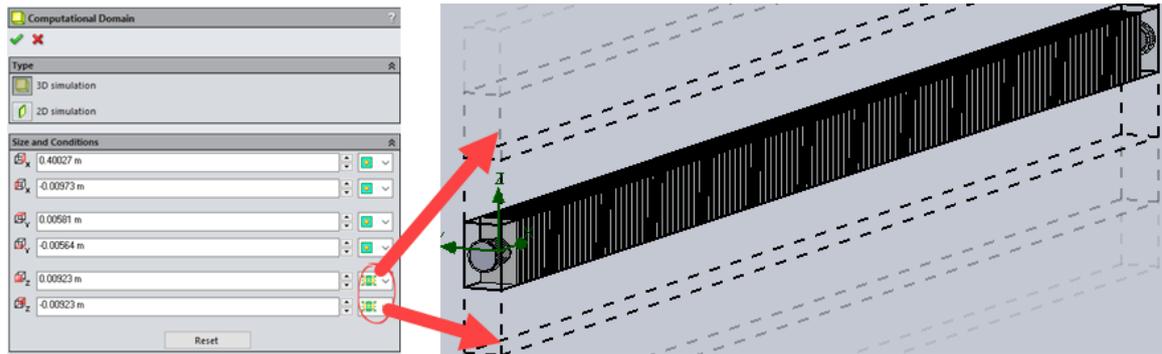


Figura 158. Modelo con malla periódica.

3.2.1. Estudio paramétrico

El estudio paramétrico es definido y configurado de la misma forma que en el caso anterior, pero con la salvedad de que los caudales de entrada de agua no son los mismos.

Para el primer paso por tubo, el caudal de entrada de agua será de 0,083612 kg/s, mientras que, para el segundo y tercer paso por tubo, el caudal será de 0,06977 kg/s.

Para su cálculo se ha de proceder de la misma forma, primero se ha de simular el primer paso por tubo, duplicar el estudio, copiar los valores de salida y declararlos como entrada, volver a duplicar el estudio para generar el último paso por tubo, y volver a copiar los valores de salida declarándolos como entrada.

En todos los estudios se ha de exportar a Excel el resultado del estudio.

4. Tercer modelo de simulación

Se utiliza en este apartado el modelo de dos tubos descrito en el Anexo I. El nivel de malla usado es 3.

4.1. Dos tubos con malla simétrica

Para esta simulación, se va a hacer uso de la simetría de la malla respecto al plano XY, para ello, se ha de configurar el “Computational Domain” tal y como se ve en la Figura 159.

En este modelo, al tener dos tubos será necesario modificar las condiciones de contorno definida en los anteriores modelos de simulación. De esta manera, se tiene que la condición de contorno por la cual se define la temperatura y el caudal del agua de entrada, ha de estar declarada tanto para la tapa de la izquierda como para la de la derecha. Esto se ha de extrapolar tanto para el caso de las condiciones de contorno como para el caso del subdominio del agua.

Por otro lado, se han de generar las mismas metas de temperatura puntuales a lo largo del eje del tubo derecho.

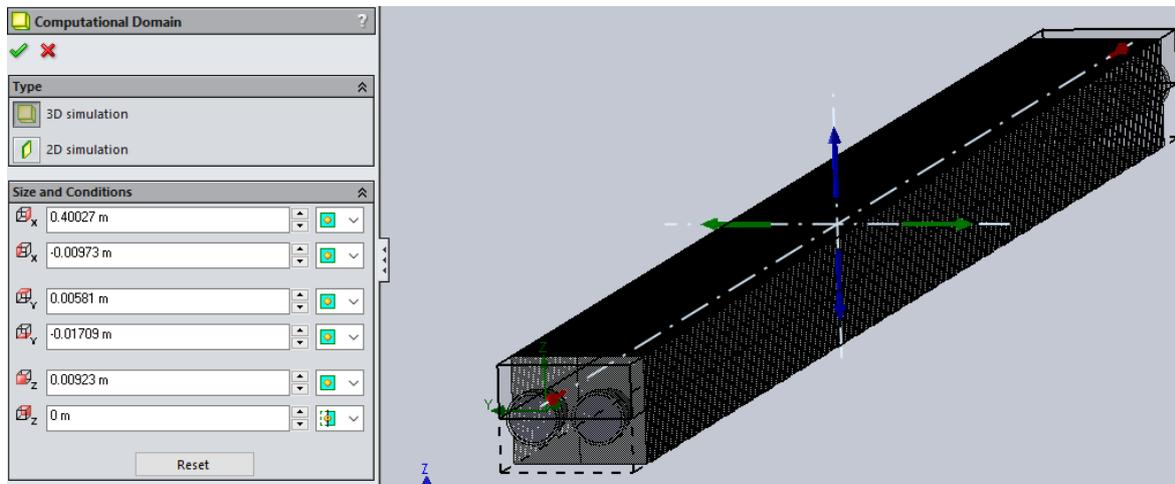


Figura 159. Computational domain con malla simétrica

4.1.1. Estudio paramétrico

Las variables de entrada son las mismas, temperatura de entrada del agua y velocidad del flujo de aire. Se han de añadir todas las metas puntuales nuevas al estudio como parámetros de salida, para que se muestren en el resultado final tras la simulación.

El caudal de agua de entrada es la mitad en cada una de los tubos, pero como la condición de contorno está definida para las dos superficies y el reparto es proporcional, se ha de duplicar el flujo en la declaración de la variable de contorno. Siendo las dos condiciones de contorno declaradas:

- Condiciones iniciales del aire: $p = 101325 \text{ Pa}$; $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Velocidad en el eje Y: - 100 km/h.
- Condiciones iniciales del agua: $p = 101325 \text{ Pa}$; $T = 95 \text{ }^\circ\text{C}$. Flujo másico de agua de 0,083612 kg/s.

Primer paso por tubo

Se abre un nuevo estudio paramétrico, el cual tiene por variables de entradas las mismas que para los dos estudios anteriores:

- Temperatura de entrada del agua: 95, 90, 85 y 80 $^\circ\text{C}$.
- Velocidad del aire: 115, 100, 85, 70, 55, 40, 25 km/h.

Esto da un total de 28 posibles estudios. El caudal para este primer paso es de 0,083612 kg/s. Tras configurar el estudio de ha de ejecutar y exportar los resultados a formato Excel.

Segundo y tercer paso por tubo

Se duplica el estudio paramétrico. Para definir ahora las temperaturas de entrada de cada uno de los tubos, se hace la media de las temperaturas de salida de los tubos, para cada simulación perteneciente al estudio. Así, se tiene que la temperatura de entrada del agua

del segundo y tercer paso por tubo es la media aritmética de las temperaturas de salida de los tubos del paso por tubo anterior en cada una de las simulaciones de las que consta el estudio paramétrico.

El caudal de entrada de agua, en este caso es de 0,069677 kg/s. Tras esto, se ha de ejecutar el estudio, y exportar los resultados a formato Excel.

4.2. Dos tubos con malla periódica

Para esta simulación, se ha de hacer uso de la opción de malla periódica presente en la herramienta “Computational Domain”, la cual se ha de configurar tal y como aparece en la Figura 160 para tener en cuenta los dos tubos.

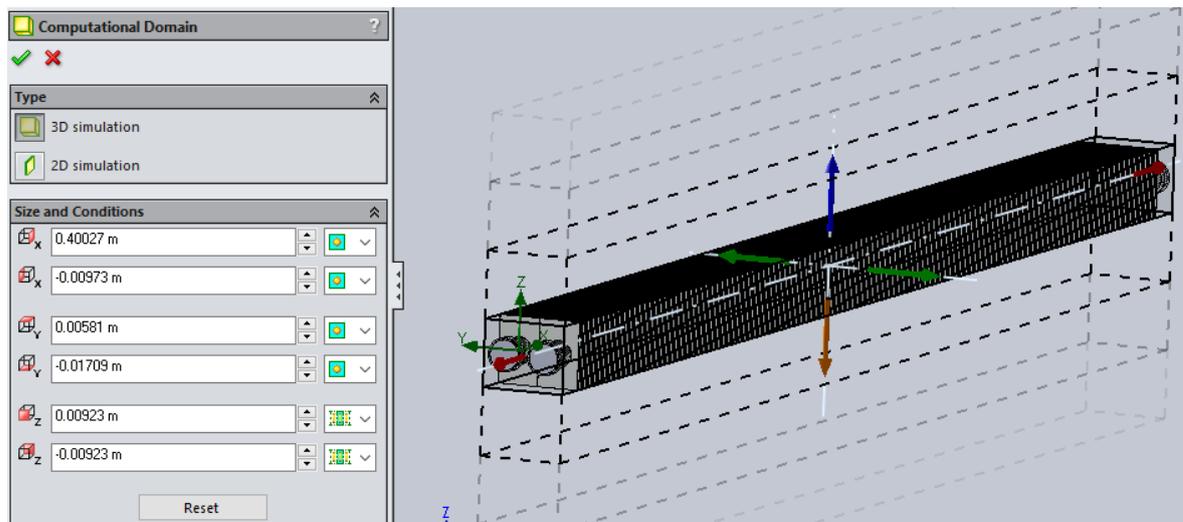


Figura 160. Computational Domain con malla periódica.

4.2.1. Estudio paramétrico

El estudio paramétrico es definido y configurado de la misma forma que en el caso anterior, pero con la salvedad de que los caudales de entrada de agua no son los mismos.

Para el primer paso por tubo, el caudal de entrada de agua será de 0,167224 kg/s, mientras que, para el segundo y tercer paso por tubo, el caudal será de 0,13954 kg/s.

Para su cálculo se ha de proceder de la misma forma, primero se ha de simular el primer paso por tubo, duplicar el estudio, definir las temperaturas de entrada como la media de las temperaturas de salida de los dos tubos, volver a duplicar el estudio para generar el último paso por tubo, y volver a definir, de igual forma, las temperaturas de entrada del agua.

En todos los estudios se ha de exportar a Excel el resultado del estudio

Capítulo 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

1. Análisis de resultados

1.1. Comparación de la caída de temperatura entre los modelos de un solo tubo

En este apartado se van a comprar los valores de variación de temperatura entre el modelo de malla simétrica y el de malla periódica (comparación de los valores de la Tabla 5 respecto a los de la Tabla 7). La variación porcentual se puede ver en la Tabla 13.

Tabla 13. Variación porcentual de la caída de temperatura para las dos mallados del modelo de un tubo.

	Temperatura de entrada del fluido (°C)			
	95	90	85	80
115	0,917%	0,911%	0,531%	0,567%
100	3,385%	2,249%	3,755%	3,876%
85	3,418%	2,971%	3,119%	3,413%
70	3,310%	2,642%	2,815%	3,112%
55	3,360%	2,965%	2,748%	3,269%
40	4,073%	3,688%	3,801%	3,943%
25	5,761%	5,481%	5,495%	5,675%

Como se puede ver, cuanto menor es la velocidad, más se acentúa que es mayor la caída de temperatura para el caso de la malla periódica. Esto es debido a que la velocidad del aire es mayor al ser la sección de paso inferior, lo que aumenta el coeficiente de convección. Al aumentar el coeficiente de convección, la caída de temperatura entre la salida y la entrada sea mayor, ya que aumenta el calor evacuado.

La imagen izquierda de la Figura 161 y de la Figura 162 son las correspondientes al modelo simétrico, mientras que las imágenes de la parte derecha son las del modelo periódico.

Para poder comparar de una forma más visual las distribuciones de temperatura y velocidad del aire, se han tratado las dos figuras de la simulación con malla simétrica. Como se puede ver en las imágenes, se han copiado las mismas de forma simétrica, de manera que se observa la distribución en la totalidad del modelo, y no únicamente en la mitad superior.

Así, comparando una imagen con otra, se tiene evidencia de la no simetría del modelo. Lo que, a su vez, justifica la diferencia de resultados visible en la Tabla 13.

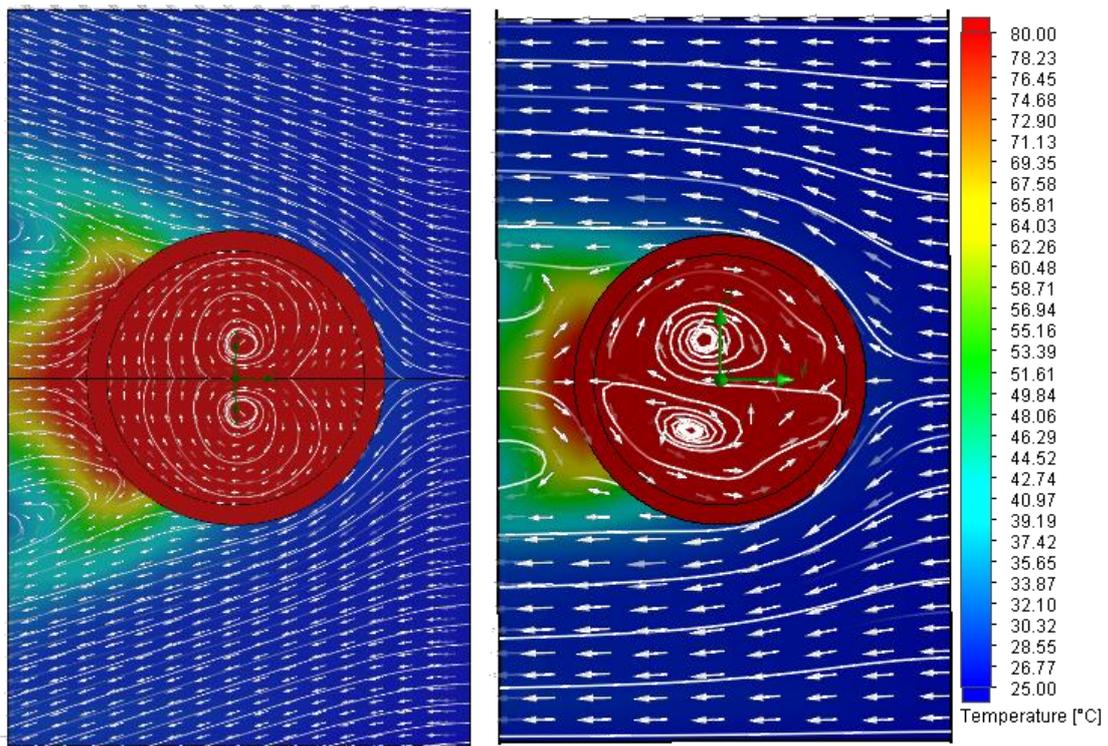


Figura 161. Comparación entre las distribuciones de velocidad y temperatura del aire en ambos mallados.

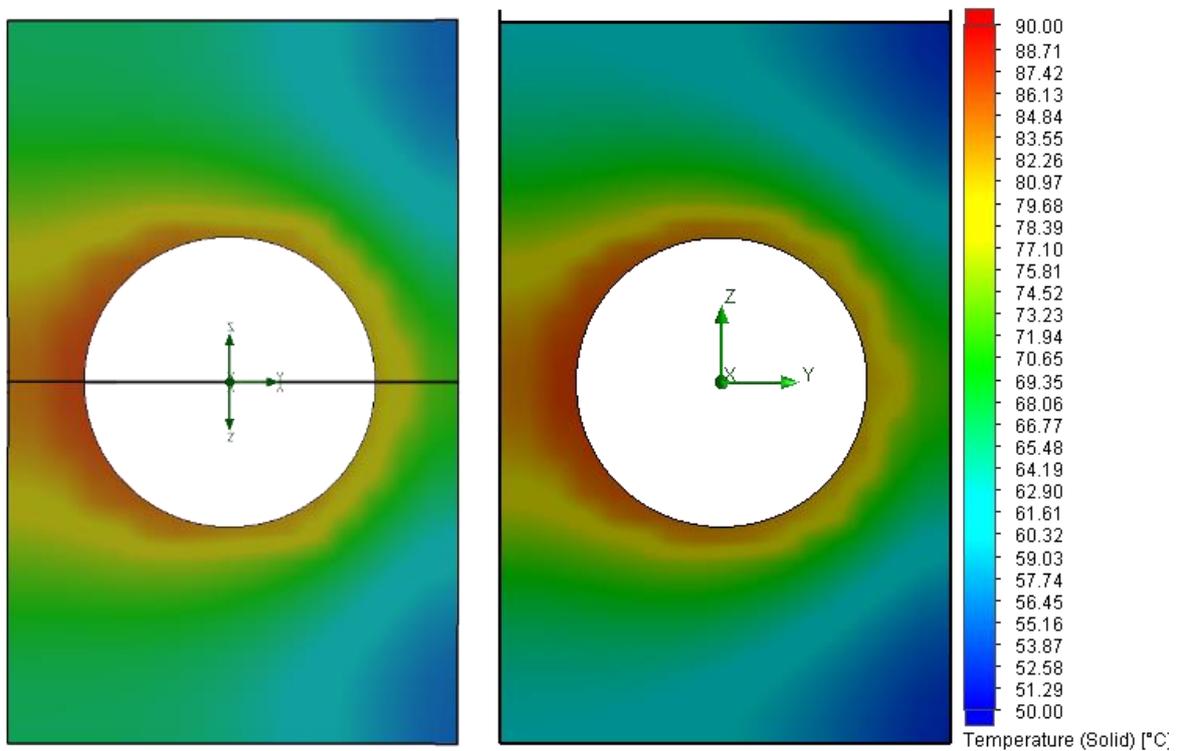


Figura 162. Comparación entre las distribuciones de temperatura de las aletas en ambos mallados.

1.2. Comparación de la caída de temperatura entre los modelos de dos tubos

Al igual que en el apartado anterior se va a analizar la variación porcentual entre los resultados de caída de temperatura media entre los modelos de malla simétrica y malla periódica, dentro del modelo de dos tubos. Se obtiene la Tabla 14.

Tabla 14. Variación porcentual de la temperatura media para las distintas mallas del modelo de dos tubos.

Velocidad del aire (km/h)	Temperatura de entrada del fluido (°C)			
	95	90	85	80
115	4,874%	4,876%	4,898%	4,968%
100	3,438%	3,413%	3,528%	3,558%
85	2,495%	2,544%	2,594%	2,477%
70	4,370%	4,040%	3,612%	3,368%
55	10,102%	9,306%	8,677%	8,413%
40	19,923%	19,747%	19,624%	19,525%
25	19,284%	19,301%	19,384%	19,354%

En este caso se hace más evidente aún lo expuesto en el punto anterior. Esto es porque las temperaturas son más bajas, lo que acrecienta el efecto, ya que las mayores diferencias se dan para temperaturas bajas, es decir a bajas velocidades del aire y de temperatura de entrada del agua.

En la Figura 163 y en la Figura 164 se muestra, en la parte izquierda las distribuciones de temperatura y velocidad de la malla simétrica y, en la parte derecha, las de la malla periódica. Al igual que en el caso anterior, se ha copiado las figuras del caso simétrico, para poder ver una representación de la distribución en su totalidad y facilitar la comparación.

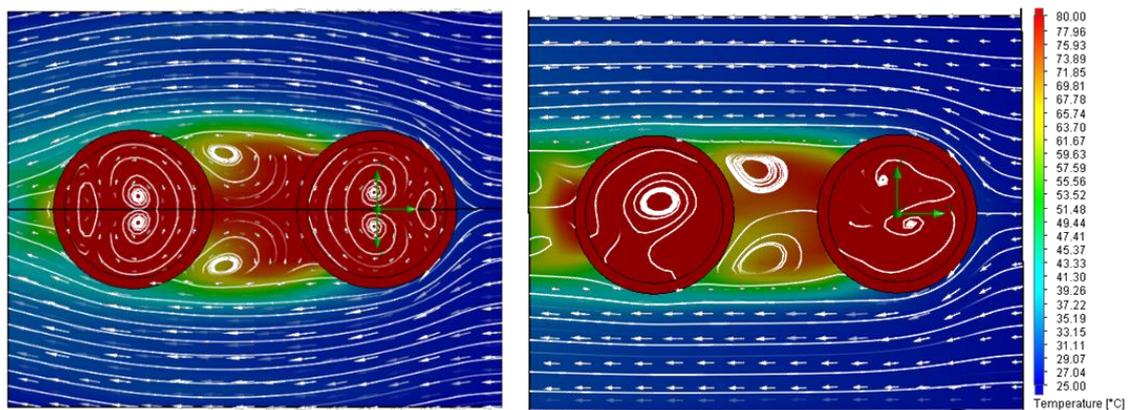


Figura 163. Comparación de la distribución de velocidad y temperatura para los dos mallados.

Como se puede observar en la Figura 164, la temperatura de la aleta es inferior para el caso simétrico, muestra también de las variaciones obtenidas. Por otro lado, también se observan distintas a simetrías si se comparan. Esto último refleja, que los modelos de malla periódica, son más realistas que los simétricos.

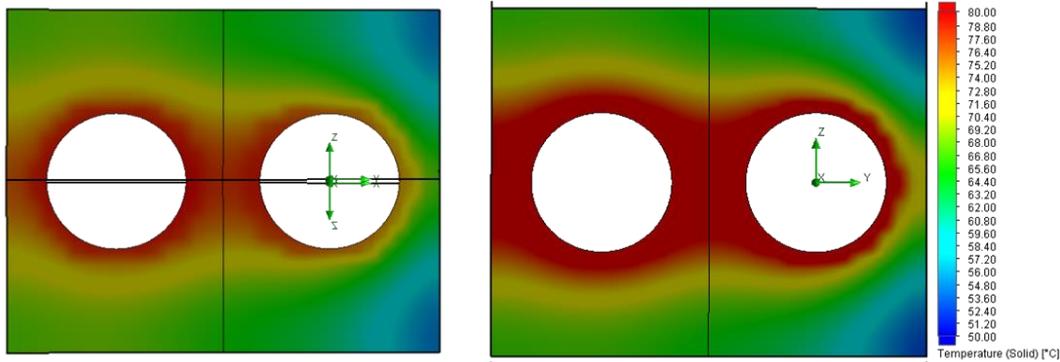


Figura 164. Comparación de la distribución de temperatura en una aleta entre los dos mallados.

1.3. Comparación de la caída de temperatura entre los modelos de 1 y 2 tubos.

1.3.1. Mallados simétricos.

Para el caso de los mallados simétricos, al igual que en los apartados anteriores se compara la variación porcentual, entre los modelos de uno y dos tubos, de la caída de temperatura entre la entrada y la salida. Se comparan, por lo tanto, los valores de la Tabla 5 con los valores de la Tabla 9. Se obtiene la Tabla 15.

Tabla 15. Comparación entre los modelos de 1 y 2 tubos con malla simétrica.

Velocidad del aire (km/h)	Temperatura de entrada del fluido (°C)			
	95	90	85	80
115	29,848%	29,721%	29,615%	29,586%
100	24,521%	24,615%	24,543%	24,454%
85	24,871%	24,861%	24,876%	24,851%
70	26,986%	26,588%	25,957%	25,684%
55	32,845%	31,760%	30,970%	30,559%
40	45,971%	45,798%	45,500%	45,299%
25	42,377%	42,345%	42,524%	42,578%

Con el modelo de un solo tubo se consiguen mayores caídas de temperatura, llegándose a diferencias de 3 e incluso 4 grados. En el modelo que tiene los dos tubos, la temperatura del aire cuando contacta con el segundo tubo es mayor, debido a que el primer tubo ha calentado el aire. Por lo que, la transferencia de calor del segundo tubo al aire, es más pobre. Esto es lo que hace que el valor medio de la temperatura de salida sea menor para el caso de dos tubos.

Se podría pensar, que es mejor tener un intercambiador con una sola fila de tubos que uno con dos filas, porque la temperatura de salida sería menor en el primer caso. Esto es cierto, pero se podría enfriar menos caudal de agua.

Una solución sería poner más tubos dispuestos en una sola fila, pero el espacio disponible al adaptar el intercambiador a un motor es muy pequeño, por lo que se opta por disponer dos filas de tubos, ya que, se puede enfriar más caudal de agua. Además, debido a que las diferencias son inferiores al 50%, se tiene que la cantidad de calor evacuado por un

radiador con dos tubos por fila es mayor que la que evacuaría ese mismo intercambiador con una sola fila.

1.3.2. Mallados periódicos.

Se compara también la caída de temperatura entre el modelo de un tubo, respecto al modelo de dos tubos, esto es la Tabla 7 con la Tabla 11. En la Tabla 16, al igual que en las anteriores, se muestra la variación porcentual de un valor respecto al otro.

Tabla 16. Comparación entre los modelos de 1 y 2 tubos con malla periódica.

Velocidad del aire (km/h)	Temperatura de entrada del fluido (°C)			
	95	90	85	80
115	22,397%	22,282%	22,615%	22,453%
100	24,454%	23,131%	24,837%	24,867%
85	26,064%	25,411%	25,553%	26,060%
70	25,594%	24,771%	24,924%	25,351%
55	23,577%	23,149%	22,985%	23,615%
40	21,851%	21,489%	21,569%	21,729%
25	21,946%	21,532%	21,579%	21,902%

En este caso, se tiene que la caída de temperatura para el caso de un solo tubo es entre un 21 a un 26% superior que para el caso de dos tubos. En el modelo de dos tubos, como se ha explicado en el punto 1.3.1, al segundo tubo le llega aire más caliente tras transferirle calor el primer tubo, lo que lleva a que la caída de temperatura sea inferior en el caso de dos tubos.

2. Conclusiones

2.1. Conclusiones generales

En este apartado se toman las conclusiones generales relativas tanto a los resultados como al software en sí. Ya que, como se ha visto durante el desarrollo del trabajo, éste está, en parte, orientado al cálculo de dinámica de fluidos computacional (CFD).

- Como se ha podido ver este complemento de SolidWorks en versión del año 2014, no incorpora la posibilidad de obtener representaciones, de, por ejemplo, el mallado. Para realizar un estudio, con cierta profundidad, se necesita un gran esfuerzo por parte del usuario.
- Por otro lado, se ha tenido que simplificar mucho la geometría para obtener un modelo ligero capaz de simular en un equipo de prestaciones normales. En primera instancia, como se puede ver, este complemento no es una buena alternativa para estudios de cierta envergadura, por el consumo computacional.
- En lo relativo a los resultados, se puede observar que los resultados de los modelos de malla periódica son en los que más confianza se pueden depositar. Comparando las simulaciones con este tipo de malla, para el caso de un tubo y de dos, se tienen menores caídas de temperatura en el segundo caso, pero con una transferencia de calor mayor en relación a un hipotético intercambiador con una sola fila de tubos. La diferencia porcentual entre la caída de temperatura es inferior al 26%.

2.2. Conclusiones específicas

2.2.1. Primer modelo de simulación

En el primer modelo simulado, se ha tomado el radiador completo, pero eliminando las aletas del análisis. Se ha obtenido una caída de temperatura igual a 0,9 °C. Debido a que esa caída de temperatura se aleja mucho de los 10 °C que, aproximadamente habría de tener, este modelo no es representativo. La simplificación realizada no es realista, por lo que se ha de optar por otro modelo, de menor número de tubos y en el que se tengan en cuenta las aletas.

2.2.2. Segundo modelo de simulación

Este modelo se ha analizado usando dos mallas, la primera con condición de simetría respecto al plano XY, y la segunda, con condición de periodicidad. De forma general, se observa una menor caída de temperatura en el primer mallado. Aunque el primer modelo es más simple y tiene un coste computacional de cálculo inferior, muestra importantes diferencias con el segundo, el cual se ajusta más a la realidad. Estas diferencias son debidas a las asimetrías que presenta el flujo del aire y del agua a su paso por los tubos las cuales no son representadas en el primer mallado. También, debido a que se tiene en cuenta los tubos que existen encima y debajo, la velocidad del flujo de aire es mayor, lo que enfría más el agua que circula por el interior de los tubos. Todo esto, hace pensar que el mallado con malla periódica es más realista, y, por lo tanto, se tiene mayor confianza en éste.

2.2.3. Tercer modelo de simulación

En este modelo, también se analizaron dos mallados, igual que en el modelo anterior, pero con la diferencia de que este modelo presenta dos tubos. Aquí se hace evidente que la energía que es capaz de evacuar el primer tubo, al cual le llega aire más frío, es mayor que el segundo tubo, el cual le llega aire más caliente, por lo que, esta evacuará menor cantidad de calor que el primero.

Al igual que en el caso anterior, el mallado simétrico es menos preciso, ya que el modelo con malla periódica es capaz de reflejar las asimetrías del modelo, así como la mayor velocidad del flujo de aire. También en el modelo de malla periódica las caídas de temperatura son mayores, igual que pasa en el caso anterior.

Si se comparan los modelos de malla periódica de un tubo y de dos, se tiene que la caída de temperatura en el caso del segundo modelo es entre un 21 y 26% inferiores. Esto es debido a la acción del segundo tubo. Todo esto no quiere decir que la transferencia de calor sea más pobre en el hipotético caso de un radiador con una sola fila de tubos, ya que, en ese caso, el caudal de agua que se enfriaría es inferior.

En el caso de un radiador con dos tubos por fila, se tiene que la caída de temperatura es inferior al hipotético caso de un solo tubo por fila, pero la cantidad de calor transferido es mayor. Para que fuera efectivo este caso hipotético, se deberían disponer más cantidad de filas, y por limitaciones de espacio, esto no es posible en la adaptación del intercambiador al sistema de refrigeración del motor, pues el espacio disponible, en este tipo de sistemas, es relativamente bajo.

3. Líneas futuras de trabajo

En este punto se plantean posibles continuaciones del trabajo hasta ahora desarrollado.

Este trabajo se ha enfocado a un análisis únicamente a nivel computacional, concretamente se han variado tanto las temperaturas de entrada del agua y la velocidad del aire a su paso por el radiador. Como posibles continuaciones se mencionan las siguientes:

1. Análisis de la variación de la caída de temperatura cuando se varía el flujo másico que pasa a través de los tubos del radiador.
2. Maquetación del radiador estudiado, usando sensores de temperatura, caudalímetro y ventilador que permita recrear las condiciones de estudio.
3. Validación de los modelos realizados a partir de la maqueta.
4. Realización del mismo estudio con una mezcla de etilenglicol y agua como fluido caloportador.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Payri González, Francisco**, *Motores de combustión interna alternativos*, Valencia: Reverte, 2011.
- [2] **Molina Aiz, F.D**, *Termotecnia: Fundamentos y sistemas de transmisión de calor*, Almería: Universidad de Almería, 2010.
- [3] **Yunus A. Çengel, Afshin J. Ghajar**, *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones*, McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2011.
- [4] **Michael J. Moran, Howard N. Shapiro, Bruce R. Munson, David P. DeWitt**, *Introduction to Thermal Systems Engineering*, John Wiley & Sons Inc., 2002.
- [5] **Frank P. Incropera, David P. DeWitt**, *Fundamentos de transferencia de calor*, Prentice Hall, 2009.
- [6] **P. Zal**, «automobile-catalog.com,» 2010. [En línea]. Available: http://www.automobile-catalog.com/curve/2003/546230/citroen_saxo_1_1i_sx.html.
- [7] **Richardson, L.F.**, *The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems involving differential equations with an application to stresses in a masonry dam*, London: Trans. Royal Society London, 1910.
- [8] **G. Nellis, S. Klein**, *Heat Transfer*, Cambridge University Press, 2012.

GLOSARIO

3D

En tres dimensiones.V, 2, 49, 50, 61, 63

Aletas

Lámina de metal que aumenta la superficie de contacto entre los fluidos entre los que existe transferencia térmica en un intercambiadorV, 4, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 22, 23, 25, 28, 29, 31, 45, 49, 53, 54, 56, 57, 58, 60, 61, 62, 63, 64, 95, 96, 97, 99, 100, 102, 103, 111, 126, 130

Calibre

Instrumento metrológico capaz de medir con cierta precisión y con una determinada incertidumbre asociada.....3, 4, 49, 63

Caudalímetro

Instrumento metrológico capaz de realizar mediciones del caudal que discurre por una canalización. 131

CFD

Dinámica de fluidos computacional. Permite el cálculo de problemas que involucren a fluidos y a sólidos mediante la teoría de volúmenes finitos.105, 129

Comparador Digital

Instrumento metrológico que mide diferencia de posición. 5

Condición de contorno

Estado de aquellas variables que tienen influencia en el problema. La solución de dicho problema depende de estas condiciones.2, 26, 28, 31, 32, 36, 40, 46, 101, 102, 105, 112, 116, 118, 121, 122

Conducción

Transmisión de calor a través de un sólido, desde un punto de mayor temperatura hasta otro de menor..... 16, 107

Convección

Forma de transmisión del calor que involucra un fluido que porta el calor desde un punto hasta otro con temperatura distinta.9, 12, 14, 25, 39, 107, 125

Corruca

Estrías regulares en una superficie lisa que hace que la hace fija. 12, 13

Error de apreciación

Diferencia entre el valor verdadero y el valor real inherente a cualquier medición metrológica . 4

Estudio de convergencia

Análisis que permite la identificación de aquella malla de menor coste computacional que proporciona una solución con un error, respecto a la de siguiente nivel, menor del 3%. 31, 32

Etilenglicol

Fluido usado como elemento anticongelante en los circuitos de refrigeración. Se suele mezclar a partes iguales con agua..... 131

Flow Simulation

Es un complemento del software Solidworks (R) de dinámica computacional de fluidos.III, V, 1, 2, 50, 105, 110

Fluido caloportador

Denominación general del líquido refrigerante de un circuito de refrigeración.9, 10, 74, 131

Flujo cruzado

Dicho de un intercambiador cuando el flujo del fluido caloportador discurre perpendicularmente al del fluido con el que se realiza la transferencia..... III, V, 9, 10, 11, 13, 14, 17

Intercambiador

Es un radiador diseñado para transferir calor entre dos fluidos.III, V, 1, 2, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 25, 28, 29, 31, 37, 40, 44, 46, 49, 63, 99, 101, 102, 105, 112, 113, 114, 116, 118, 128, 129, 130

Mallado

Conjunto de elementos finitos con el que aproximamos la realidad de la geometría del modelo, a la hora de realizar una simulación.XII, XIII, XV, XVIII, XIX, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 39, 40, 42, 43, 44, 46, 109, 118, 119, 121, 122, 123, 125, 127, 128, 129, 130

Motor Stirling

Máquina térmica ideada en 1816 por el reverendo escocés Robert Stirling. Aprovecha un ciclo de aire para obtener un trabajo neto del mismo. 10

Pie de rey Véase *Calibre*

Proyección episcópica

Modo de funcionamiento de un proyector de perfiles. La luz incide en la cara posterior del elemento a medir, por lo que se mide la sombra que proyecta el mismo. 4, 24

Proyector de perfiles

Instrumento metrológico que es capaz de medir dimensiones y formas mediante amplificación óptica. 4, 23, 24, 53, 54, 56, 58

Relaje

Ajuste mecánico de los distintos elementos del sistema de distribución. 8

SolidWorks

Es un software CAD para modelado mecánico en 2D y 3D, desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp., una filial de Dassault Systèmes, S.A. III, V, 1, 23, 105, 107, 129

Termocontacto

Dispositivo que permite el paso de agua a través del intercambiador cuando se sobrepasa una determinada temperatura..... 28

VC

Volumen de control. Lugar del espacio en el que se realiza el estudio en cuestión.28, 31, 101, 112, 113

Anexo 1: **PRESUPUESTO**

1. Recursos informáticos

El trabajo ha necesitado de varios programas para poder realizarse. En la Tabla 17, se exponen los distintos programas usados, así como el propietario de la licencia y el coste de la misma para el trabajo. Las licencias ofrecidas por la universidad se han tomado como gratuitas por pertenecer a la misma.

Tabla 17. Presupuesto del software.

Software	Propietario de la licencia	Coste (€)
Microsoft Office 365	UMA	Gratis
SolidWorks 2014	UMA	Gratis
Foxit PDF Reader	Autor	Gratis
TOTAL		0 €

2. Recursos humanos

El trabajo ha involucrado a un alumno, al cual se le asigna un salario simbólico de 10€/h, y un profesor docente investigador, al cual se le asigna un salario de 50€/h. En la Tabla 18 se puede ver el desglose del coste. El conteo de las horas en cuanto al trabajo del alumno se ha realizado mediante el número de horas de edición de los distintos documentos y archivos, así como las horas pasadas en reuniones con el tutor del trabajo y las horas pasadas en el laboratorio.

Tabla 18. Presupuesto de los recursos humanos.

Puesto	Tiempo (horas)	Coste (€/hora)	Coste (€)
Alumno	930 h	10 €/h	9.300 €
Profesor docente	120 h	50 €/h	6.000 €
TOTAL			15.300 €

3. Materiales e instrumentación

Por último, ha sido necesaria una serie de materiales e instrumentos, se supone como si se hubieran comprado nuevos. El precio de cada uno de ellos se ha adoptado en función al mercado. Tabla 19.

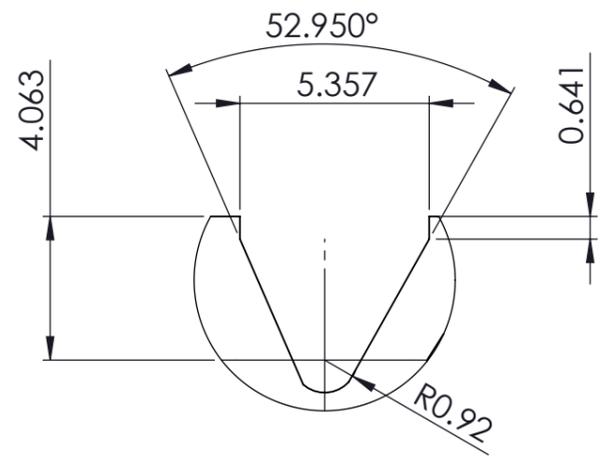
Tabla 19. Presupuesto de los materiales e instrumentos usados.

Elemento	Ud.	Coste ud.	Coste (-IVA)	Coste (+IVA)
Intercambiador Citroën Saxo 1.1 SX	1	63,80 €	63,80 €	77,20 €
Juego de destornilladores y llaves de vaso	1	21,49 €	21,49 €	26,00 €
Sierra radial de mano con discos	1	57,44 €	57,44 €	69,50 €
Guantes	1	1,45 €	1,45 €	1,75 €
Calibre digital 150 mm	1	18,64 €	18,64 €	22,55 €
Micrómetro digital 25 mm 0,001 mm	1	34,63 €	34,63 €	41,90 €
Proyector de perfiles MITUTOYO PJ 300	1	1.950,00 €	1.950,00 €	2.359,50 €
			TOTAL	2.598,40 €

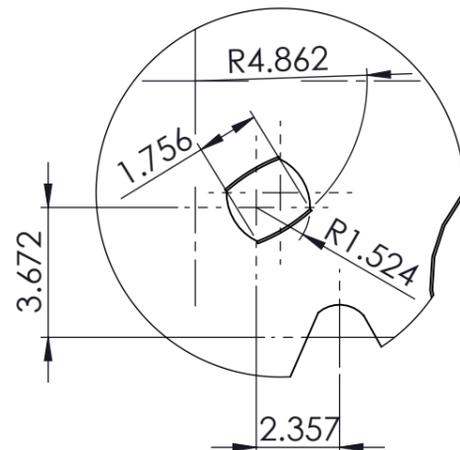
PLANOS

Se recoge en esta última parte del trabajo los planos de taller de las distintas piezas que se han modelado. Se listan, a continuación, los planos:

- Plano 1: Aleta.
- Plano 2: Aleta Plana.
- Plano 3: Colector de entrada.
- Plano 4: Colector de salida.
- Plano 5: Junta de estanqueidad, módulo de fijación de los tubos y tubo interior.
- Plano 6: Plano de ensamblaje.



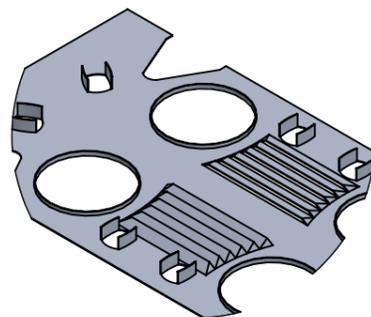
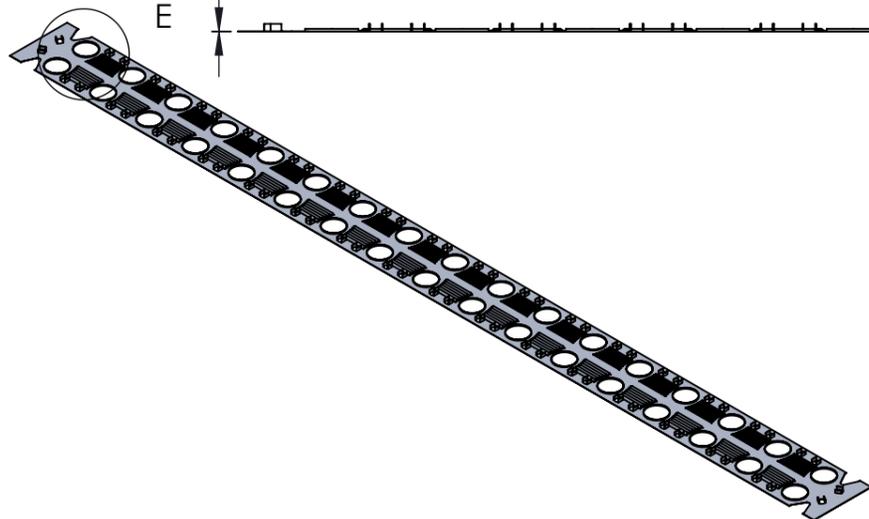
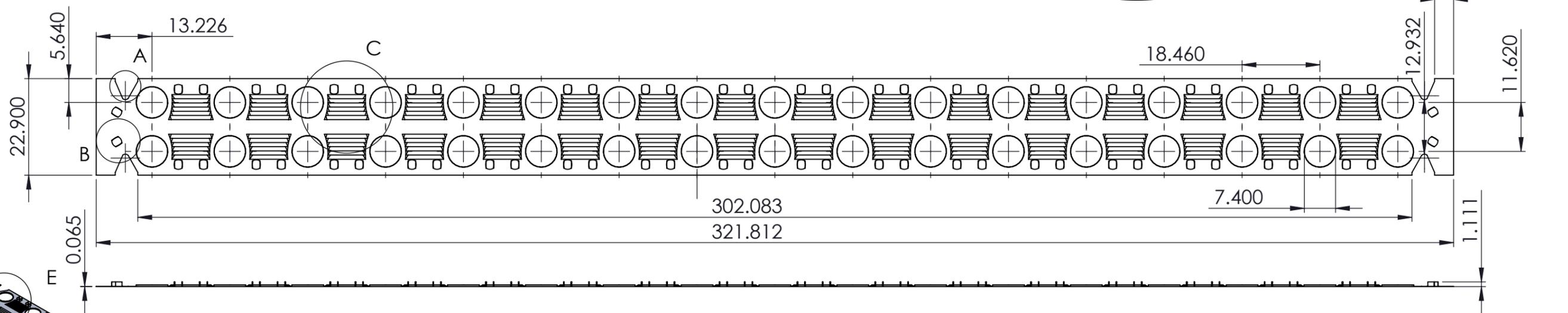
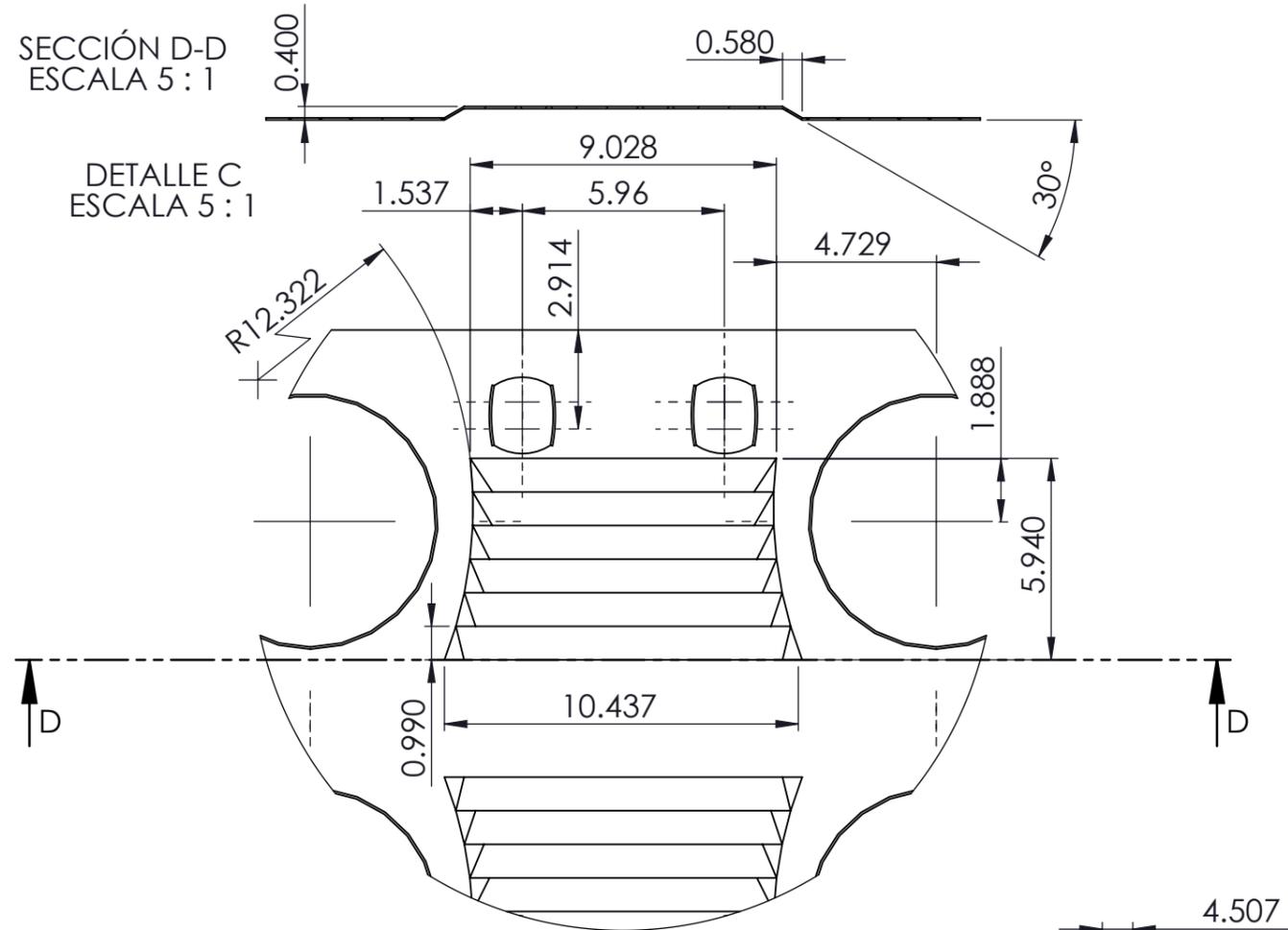
DETALLE A
ESCALA 5 : 1



DETALLE B
ESCALA 5 : 1

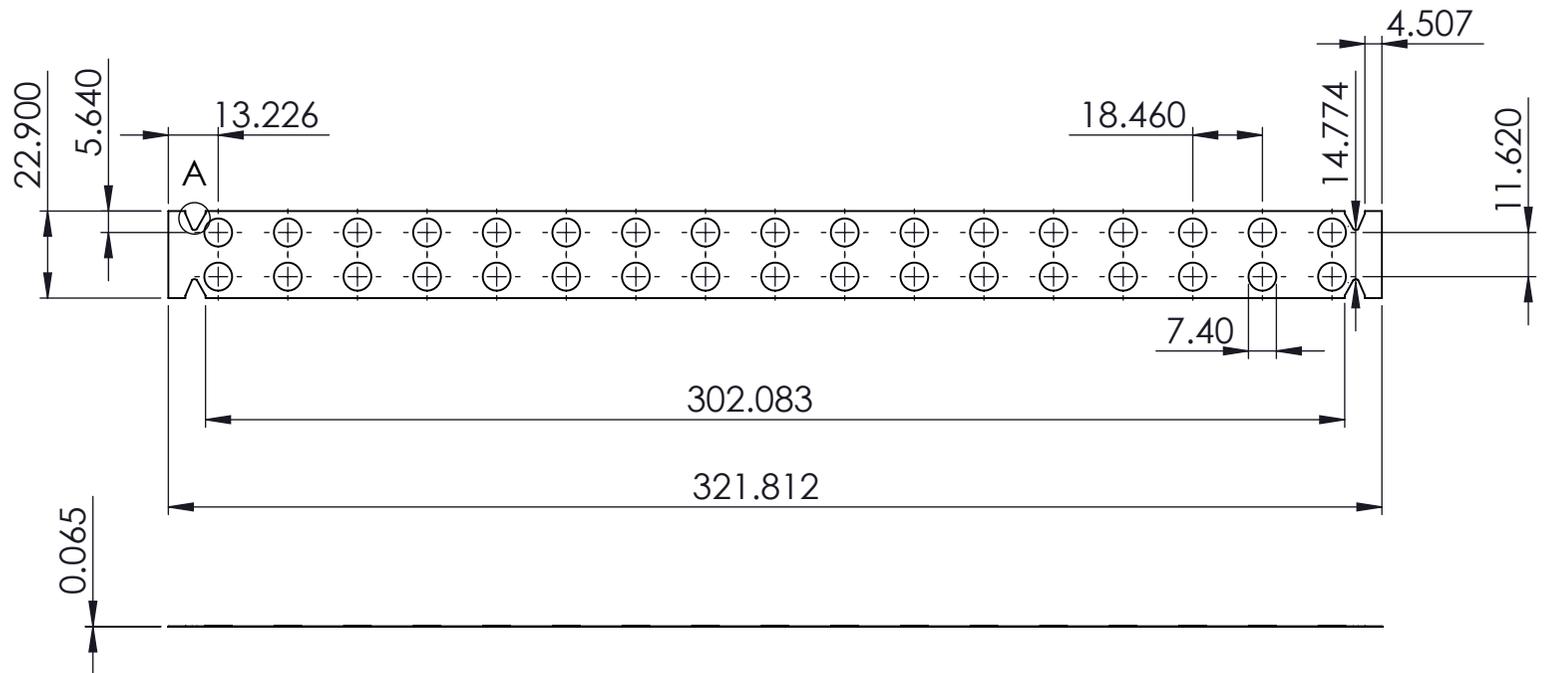
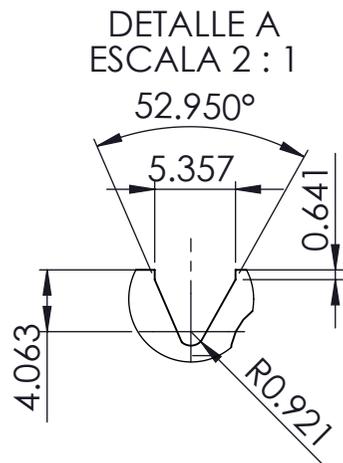
SECCIÓN D-D
ESCALA 5 : 1

DETALLE C
ESCALA 5 : 1



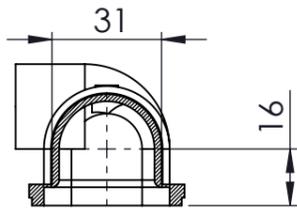
DETALLE E
ESCALA 2 : 1

DELINEANTE Ángel Paredes Parrilla DNI: 15521558 - P		Firma		TRABAJO FIN DE GRADO. 4º CURSO GIM. ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES UNIVERSIDAD DE MÁLAGA			
Escala 1:1		ALETA Espesor de la aleta: 0,065 mm Número de aletas: 351 Distancia entre aletas: 1,111 mm				PLANO Nº-01	
						Sustituye a	
						Sustituido por	

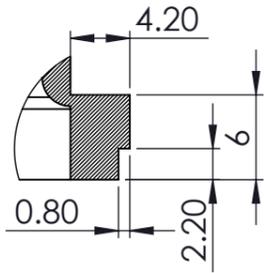


DELINEANTE Ángel Paredes Parrilla DNI: 15521558 - P		Firma	TRABAJO FIN DE GRADO. 4º CURSO GIM. ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES UNIVERSIDAD DE MÁLAGA	
Escala 1:2	ALETA PLANA Número de aletas: 351 Distancia entre aletas: 1,111 mm		PLANO N°-02 Sustituye a Sustituido por	

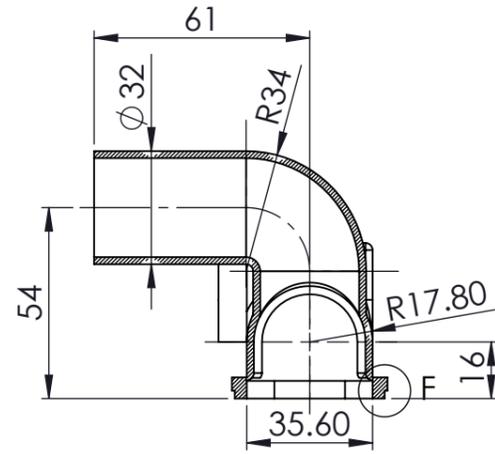
SECCIÓN G-G



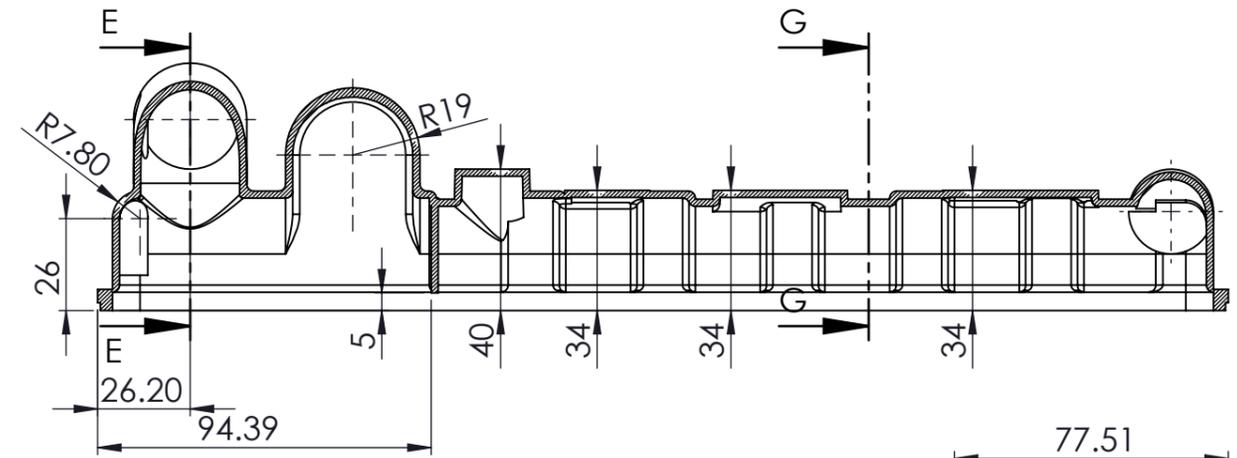
DETALLE F
ESCALA 2 : 1



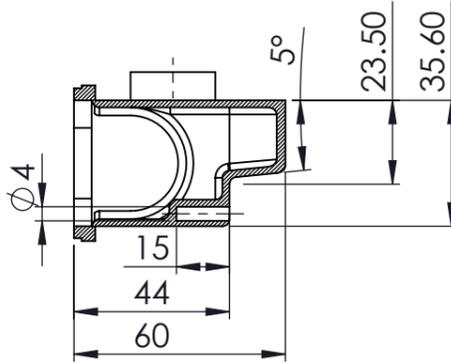
SECCIÓN E-E



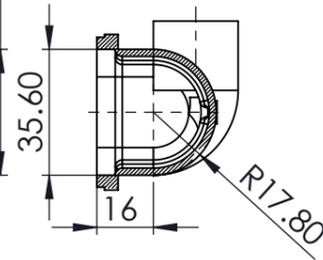
SECCIÓN A-A



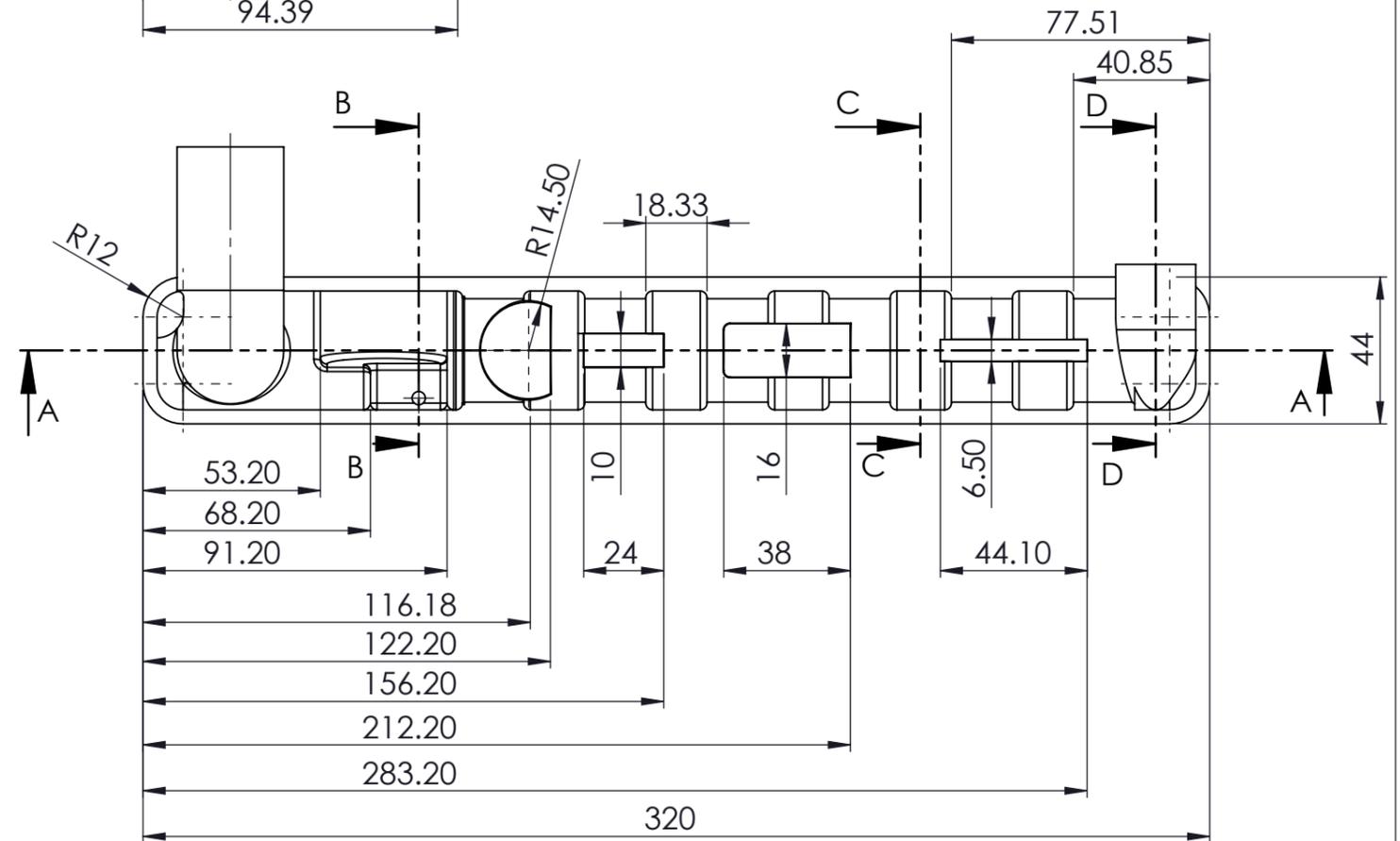
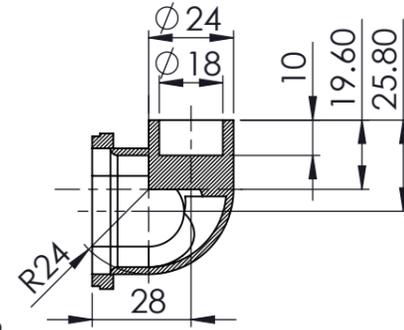
SECCIÓN B-B



SECCIÓN C-C

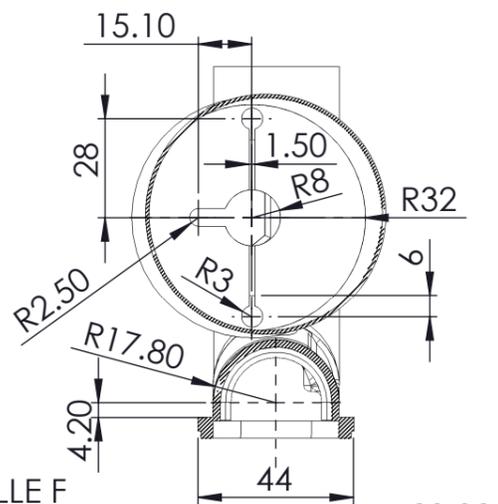


SECCIÓN D-D

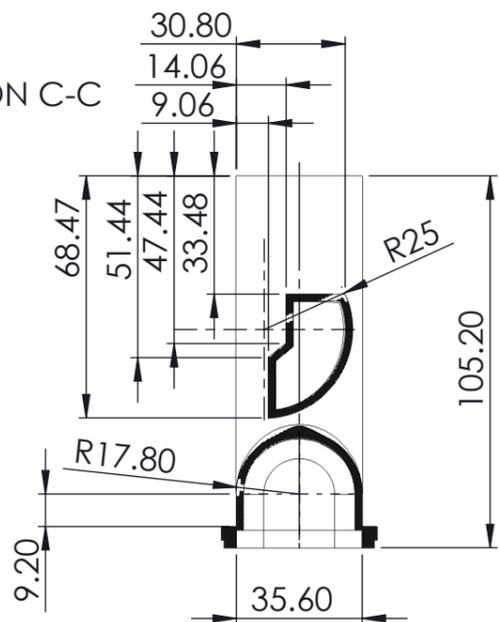


DELINEANTE Ángel Paredes Parrilla DNI: 15521558 - P	Firma	TRABAJO FIN DE GRADO. 4º CURSO GIM. ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES UNIVERSIDAD DE MÁLAGA	
Escala 1:2	COLECTOR DE ENTRADA Radio de redondeado de las aristas: 2 mm Vaciado de 2 mm de espesor	PLANO Nº-03	Sustituye a Sustituido por

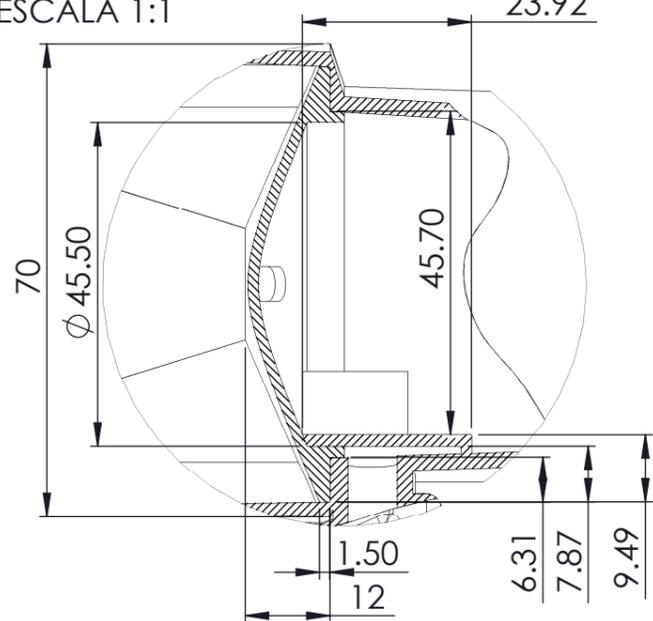
SECCIÓN B-B



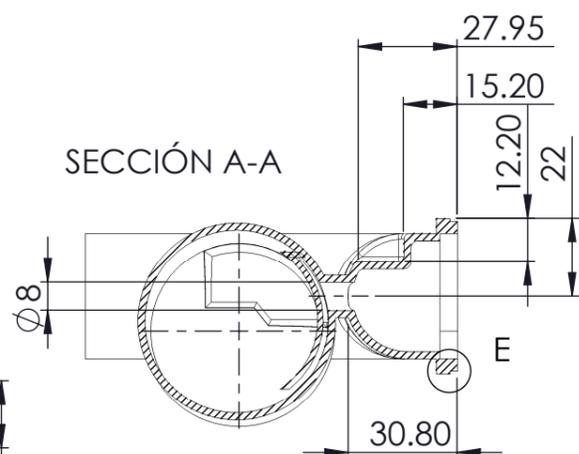
SECCIÓN C-C



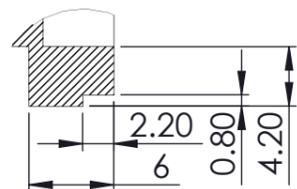
DETALLE F
ESCALA 1:1



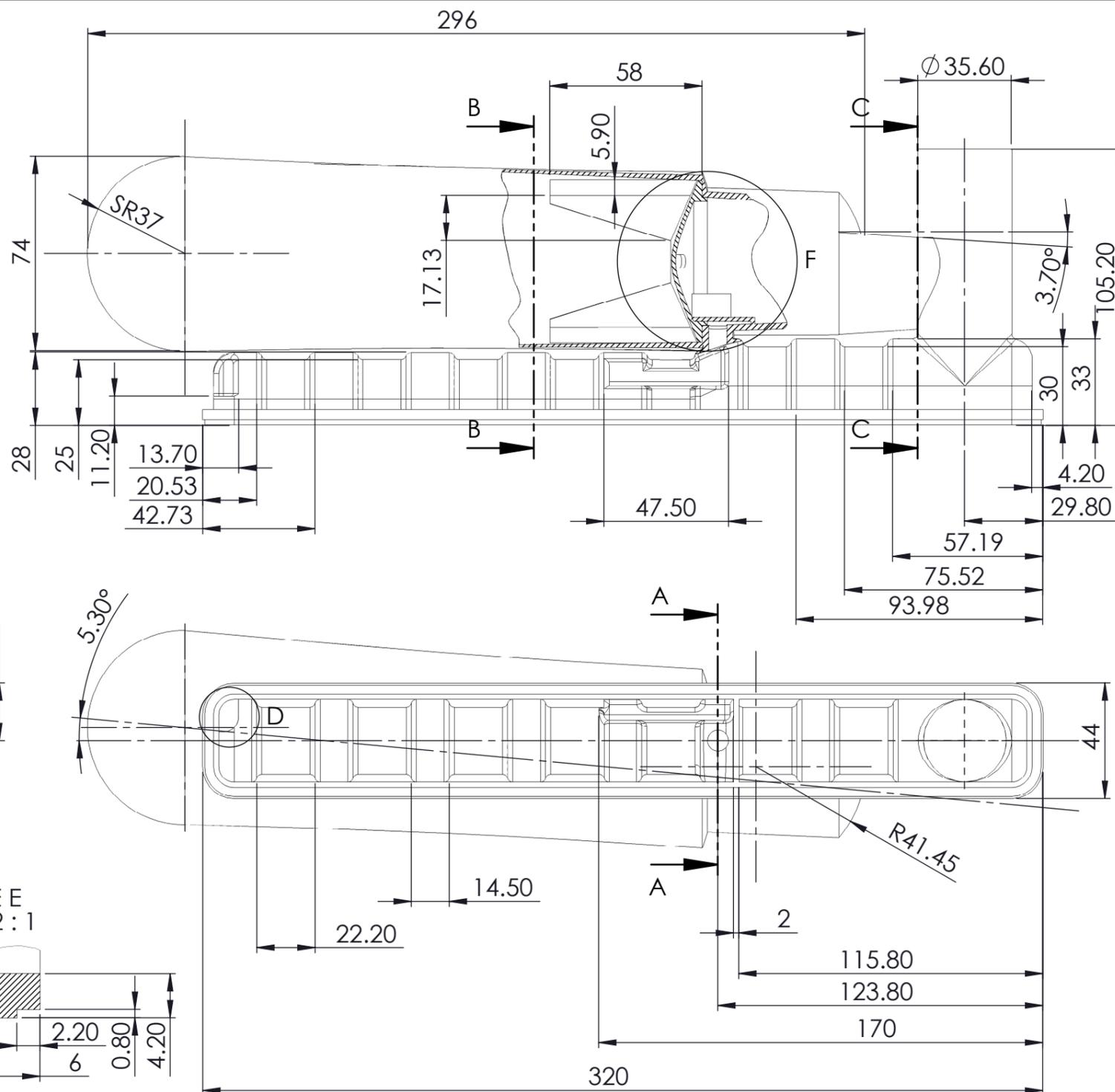
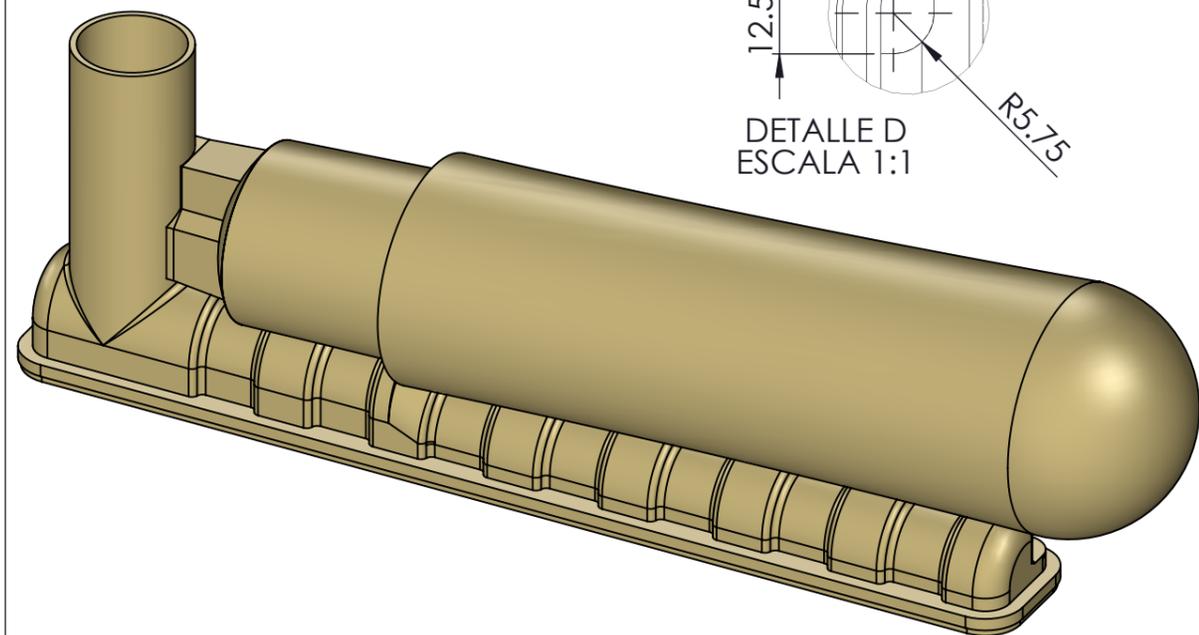
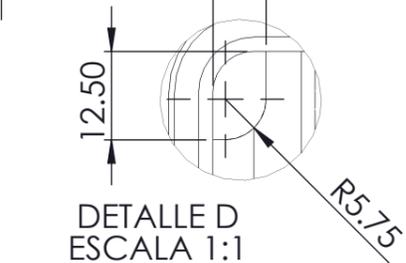
SECCIÓN A-A



DETALLE E
ESCALA 2:1

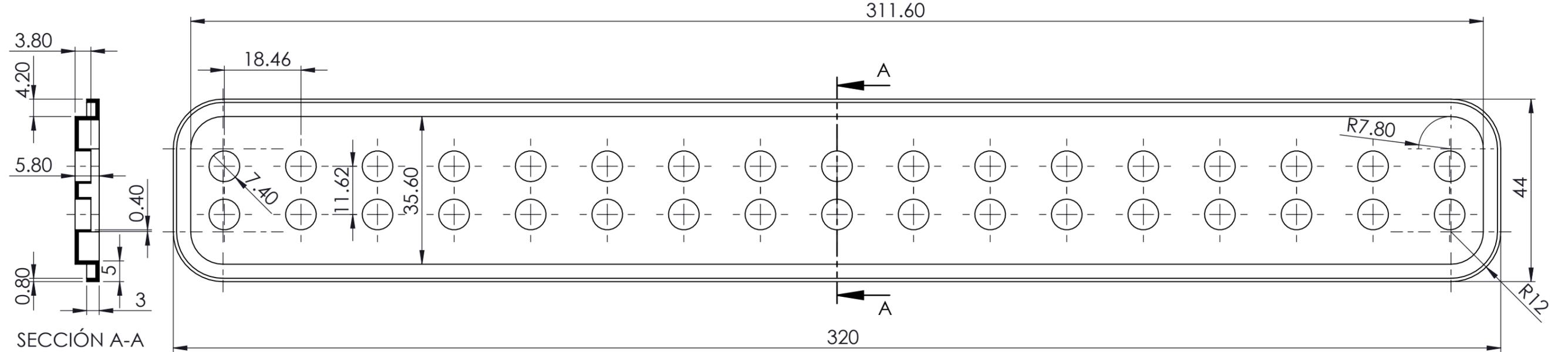


DETALLE D
ESCALA 1:1

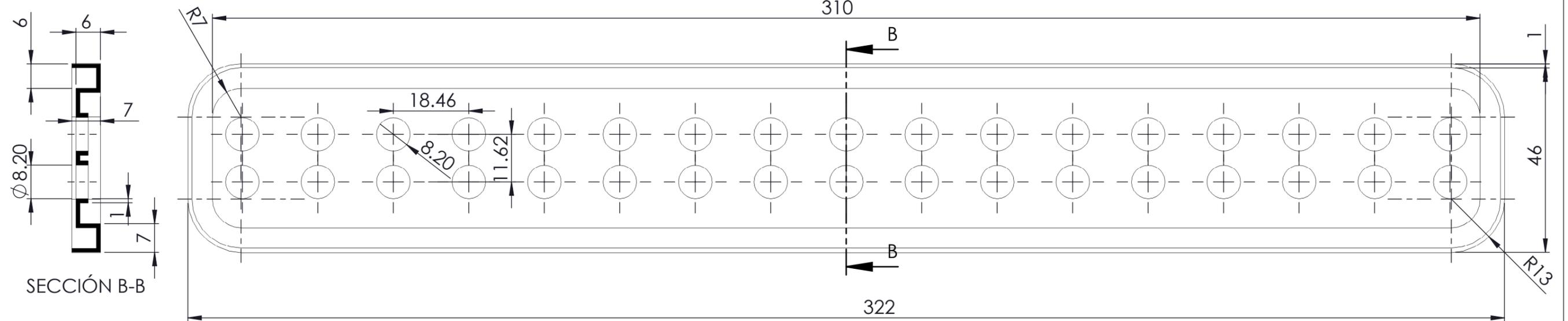


DELINEANTE Ángel Paredes Parrilla DNI: 15521558 - P	Firma	TRABAJO FIN DE GRADO. 4º CURSO GIM. ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES UNIVERSIDAD DE MÁLAGA	
Escala 1:2	COLECTOR DE SALIDA Vaciado de 2 mm de espesor Redondeos de 2mm de radio	PLANO Nº-04	Sustituye a Sustituido por

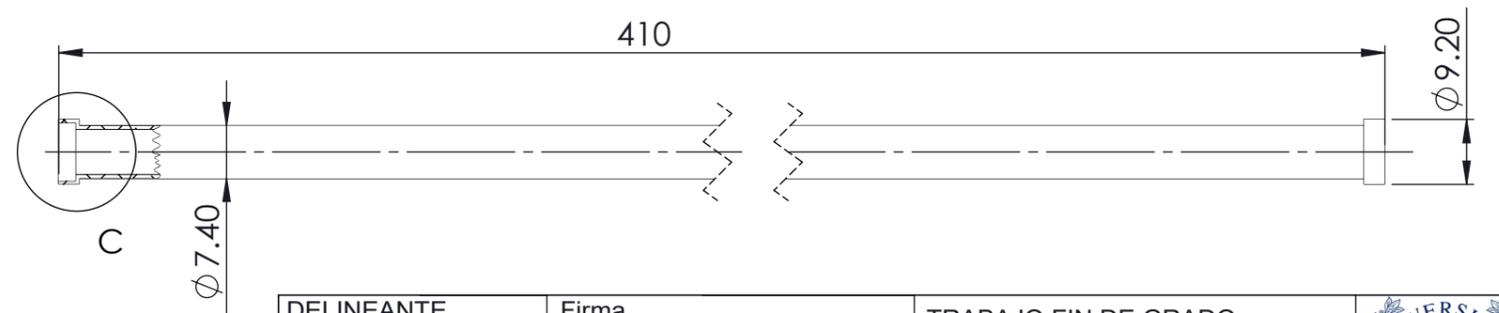
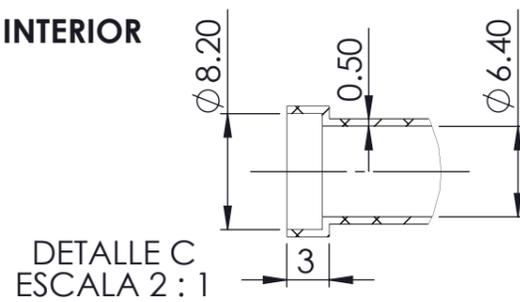
JUNTA DE ESTANQUEIDAD



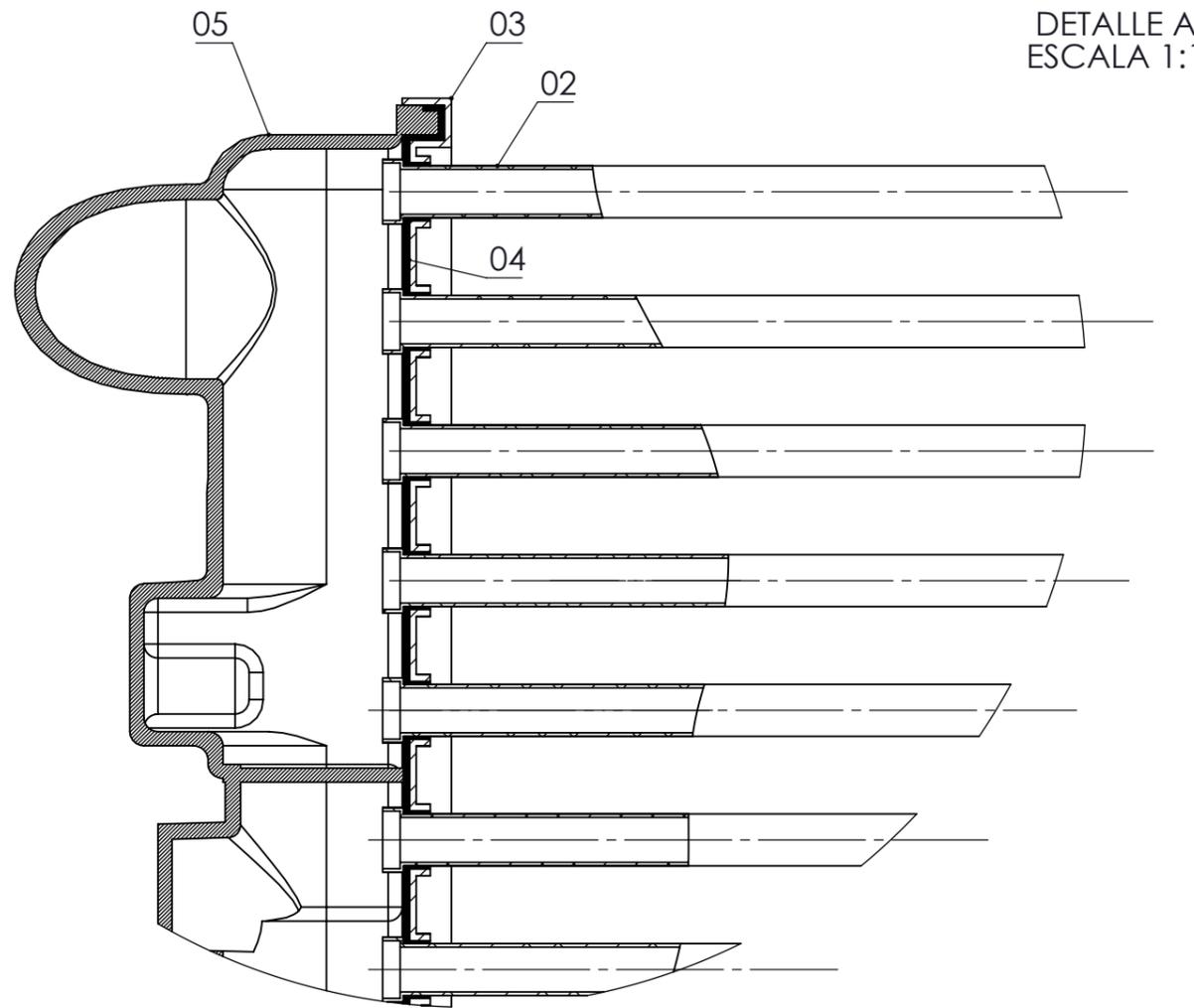
MÓDULO DE FIJACIÓN DE LOS TUBOS



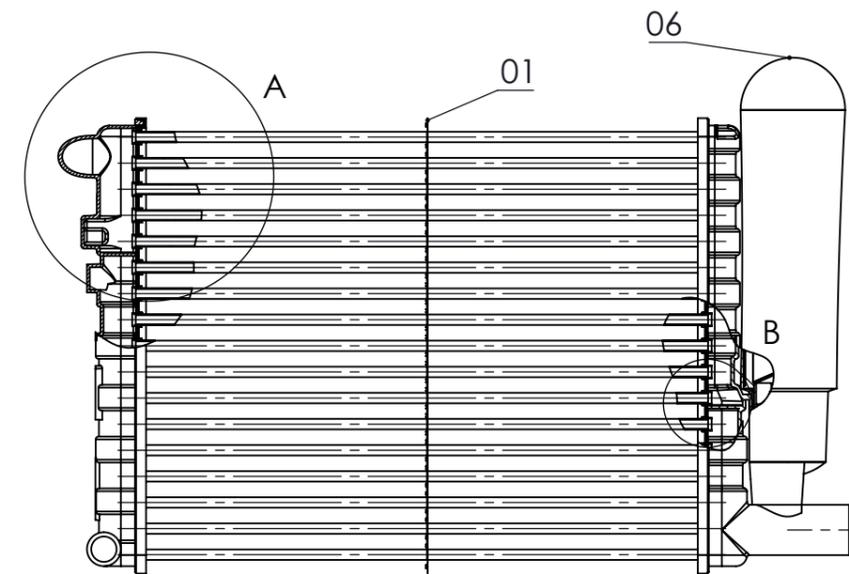
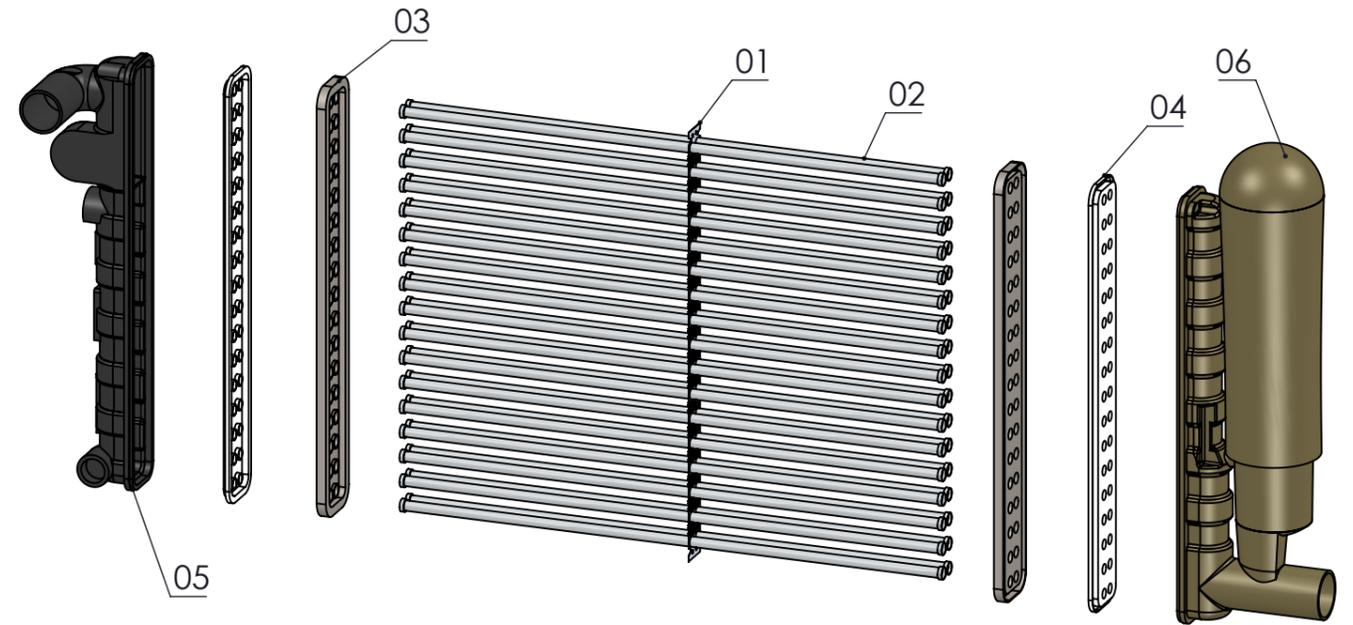
TUBO INTERIOR



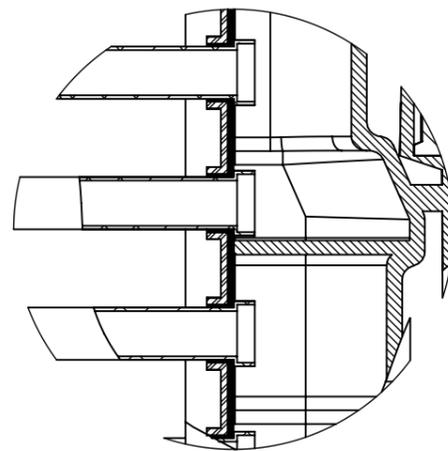
DELINEANTE Ángel Paredes Parrilla DNI: 15521558 - P	Firma	TRABAJO FIN DE GRADO. 4º CURSO GIM. ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES UNIVERSIDAD DE MÁLAGA	
Escala 1:1	JUNTA DE ESTANQUEIDAD MÓDULO DE FIJACIÓN DE LOS TUBOS TUBO INTERIOR	PLANO Nº-05	Sustituye a Sustituido por



DETALLE A
ESCALA 1:1



DETALLE B
ESCALA 1:1



01	351	ALETA	ALUMINIO
02	34	TUBO INTERIOR	ALUMINIO
03	2	MÓDULO FIJACIÓN TUBOS	ACERO
04	2	JUNTA DE ESTANQUEIDAD	TEFLÓN
05	1	COLECTOR DE ENTRADA	PA66-GF30
06	1	COLECTOR DE SALIDA	PA66-GF30
MARCA	CANT.	DENOMINACIÓN	MATERIAL
DELINEANTE		Firma	TRABAJO FIN DE GRADO. 4º CURSO GIM. ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES UNIVERSIDAD DE MÁLAGA
Ángel Paredes Parrilla			
DNI: 15521558 - P			
Escala	PLANO DE ENSAMBLAJE		PLANO Nº-06
1:5			Sustituye a
			Sustituido por

