



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
INGENIERÍA MECÁNICA, TÉRMICA Y DE FLUIDOS
MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS

TRABAJO FIN DE GRADO

Estudio experimental de un intercambiador de calor de carcasa y tubos. Modelado y simulación térmica con SolidWorks Flow Simulation.

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Guillermo Ferrer López

Tutor: D. Manuel González Aragón

MÁLAGA, septiembre de 2018

Guillermo Ferrer López, estudiante del Grado en Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Málaga, **DECLARA QUE:**

El Trabajo de Fin de Grado que presenta para su exposición y defensa titulado

Estudio experimental de un intercambiador de calor de carcasa y tubos. Modelado y simulación térmica con SolidWorks Flow Simulation

y cuyo tutor es D. Manuel González Aragón

es original y que todas las fuentes utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo.

Málaga, 3 de septiembre de 2018

Fdo.: Guillermo Ferrer López

Estudio experimental de un intercambiador de calor de
carcasa y tubos. Modelado y simulación térmica con
SolidWorks Flow Simulation.

Guillermo Ferrer López

Septiembre de 2018

Resumen

En el presente trabajo se busca comparar los datos experimentales recogidos en laboratorio de un intercambiador de calor de carcasa y tubos, agua-agua, con los obtenidos mediante simulaciones en Flow Simulation.

En la primera parte, se hace una introducción a los distintos tipos de intercambiadores de calor y sus aplicaciones, seguida de una exposición de la teoría para su estudio. A continuación, se realizan diversos ensayos en laboratorio del intercambiador de carcasa y tubos de la marca Edibon.

En la segunda parte, se procede a realizar un modelo geométrico del intercambiador con SolidWorks. Terminado el modelado, se realizan diversas simulaciones con Flow Simulation tomando como datos iniciales los medidos en el laboratorio en cada uno de los supuestos.

Por último, se hace una comparación de los resultados experimentales y simulados, comentando las posibles discrepancias o similitudes.

Palabras clave: Intercambiador de calor, SolidWorks, Flow Simulation, Modelado, Simulación Térmica, Carcasa y tubos.

Índice general

Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XIX
1 Introducción	1
1.1 Objeto	1
1.2 Motivación del trabajo	1
2 Fundamentos teóricos	3
2.1 Introducción	3
2.2 Clasificación	3
2.3 Coeficiente global de transferencia de calor	10
2.3.1 Factor de incrustación	11
2.4 Análisis de los intercambiadores de calor	12
2.4.1 Método de la diferencia media logarítmica de temperatura (LMTD)	14
2.4.1.1 Factor de corrección para los intercambiadores de flujo cru-	16
zado y de carcasa y tubo de pasos múltiples	
2.4.2 Método de la efectividad-NTU (ϵ -NTU)	17
2.4.2.1 Transferencia de calor máxima	18
2.4.2.2 Efectividad de la transferencia de calor	19
2.5 Selección	21
3 Ensayos experimentales	23
3.1 Introducción	23
3.2 Equipo	23
3.3 Procedimiento	27
3.3.1 Comienzo del ensayo	28
3.3.2 Toma de datos	29
3.4 Resultados	30
4 Simulación térmica con Flow Simulation	33
4.1 Procedimiento	33
4.2 Cálculo del coeficiente de convección exterior \bar{h}_{ext}	35
4.2.1 Determinación del coeficiente de convección de manera teórica . . .	35
4.2.2 Determinación del coeficiente de convección mediante simulación . .	37
4.2.2.1 Estudio de convergencia de \bar{h}_{ext}	38
4.2.3 Asignación del coeficiente de convección exterior \bar{h}_{ext}	40

4.3	Convergencia de malla	41
4.4	Simulación térmica del intercambiador	45
5	Comparación de resultados	49
6	Conclusiones y líneas futuras de trabajo	53
6.1	Conclusiones	53
6.1.1	Conclusiones generales	53
6.1.2	Conclusiones específicas	53
6.2	Líneas futuras de trabajo	54
A	Modelado geométrico	55
A.1	Conceptos previos	55
A.1.1	Anclar menú superior	56
A.1.2	Crear un archivo tipo pieza nuevo	56
A.1.3	Visibilidad de planos	57
A.1.4	Ejes temporales	58
A.1.5	Transparencia de una pieza	59
A.1.6	Croquis	59
A.1.7	Cotas	62
A.1.8	Relaciones de elementos	63
A.1.9	Extruir	64
A.1.10	Extruir corte	66
A.1.11	Crear plano	67
A.2	Modelado de la carcasa	68
A.3	Modelado de los cierres laterales	81
A.4	Modelado de la unión carcasa-cierres laterales	85
A.5	Modelado de los deflectores	88
A.6	Modelado de las juntas de los deflectores	90
A.7	Modelado de los tubos interiores	92
A.8	Modelado de las tuberías de entrada y salida	92
A.8.1	<i>07 Tubería 1.SLDPRT</i>	92
A.8.2	<i>08 Tubería 2.SLDPRT</i>	94
A.8.3	<i>09 Tubería 3.SLDPRT</i>	100
A.8.4	<i>10 Tubería 4.SLDPRT</i>	101
A.9	Modelado de los sensores	102
A.9.1	<i>11 Sensor carcasa.SLDPRT</i>	102
A.9.2	<i>12 Sensor tubería.SLDPRT</i>	105
A.10	Modelado de los elementos de fijación y ensamble	106
A.10.1	<i>13 Tornillo carcasa.SLDPRT</i>	109
A.10.2	<i>14 Tuerca carcasa.SLDPRT</i>	109
A.10.3	<i>15 Tornillo deflector.SLDPRT</i>	110
A.10.4	<i>16 Tuerca deflector.SLDPRT</i>	110
A.10.5	<i>17 Arandela carcasa.SLDPRT</i>	111
A.11	Ensamblaje del modelo	111
A.12	Preparación del modelo para la simulación	133
A.12.1	Crear una configuración nueva	134

A.12.2	Suprimir operación/relación	135
A.12.3	Nueva configuración de <i>01 Carcasa.SLDPRT</i>	136
A.12.4	Nueva configuración de <i>02 Cierre lateral.SLDPRT</i>	136
A.12.5	Nueva configuración de <i>03 Placa unión.SLDPRT</i>	137
A.12.6	Nueva configuración de <i>04 Deflector.SLDPRT</i>	137
A.12.7	Nueva configuración de <i>07 Tubería 1.SLDPRT</i>	137
A.12.8	Nueva configuración de <i>08 Tubería 2.SLDPRT</i>	137
A.12.9	Nueva configuración de <i>09 Tubería 3.SLDPRT</i>	140
A.12.10	Nueva configuración de <i>10 Tubería 4.SLDPRT</i>	141
A.12.11	Nueva configuración de <i>11 Sensor carcasa.SLDPRT</i>	141
A.12.12	Nueva configuración de <i>12 Sensor tubería.SLDPRT</i>	142
A.12.13	Nueva configuración de Ensamblaje intercambiador.SLDASM	143
A.12.14	Crear tapas de entrada y salida	148
B	Simulación térmica	151
B.1	Pasos previos	151
B.1.1	Activar Flow Simulation	151
B.1.2	Definición de los materiales	151
B.1.3	Nuevas configuraciones	156
B.2	Coefficiente de convección exterior	157
B.2.1	Nuevo proyecto de Flow Simulation	157
B.2.2	Dominio computacional	162
B.2.3	Desactivar componentes	163
B.2.4	Subdominio del fluido	164
B.2.5	Materiales de los sólidos	166
B.2.6	Condiciones de contorno	168
B.2.7	Parámetros de interés (Goals)	171
B.2.8	Malla	174
B.2.9	Opciones de control del cálculo	178
B.2.10	Ejecutar simulación	179
B.2.11	Extraer resultados	181
B.3	Simulaciones internas para la convergencia de malla	182
B.3.1	Proyecto de Flow Simulation	182
C	Datos y resultados	185
C.1	Datos de los ensayos realizados en laboratorio	185
C.1.1	Gráficas	186
C.1.1.1	Ensayos con flujo en contracorriente	186
C.1.1.2	Ensayos con flujo en paralelo	190
C.1.1.3	Media ensayos con flujo en contracorriente	193
C.1.1.4	Media ensayos con flujo en paralelo	196
C.1.2	Tablas	199
C.2	Resultados de las simulaciones con Flow Simulation	205
C.2.1	Coefficiente de convección exterior	205
C.2.2	Convergencia de malla. Distribución de temperaturas	209
C.2.3	Simulaciones finales. Distribución de temperaturas y velocidades	212

Nomenclatura	221
Bibliografía	223

Índice de figuras

2.1	Regenerador [1].	5
2.2	Intercambiador en zig-zag [2].	5
2.3	Intercambiador de serpentín [3].	5
2.4	Tipos de flujo cruzado [1].	6
2.5	Intercambiador de doble tubo [1].	7
2.6	Tipos de flujo [1].	7
2.7	Esquemas de un intercambiador de carcasa y tubos [1].	8
2.8	Deflectores en un intercambiador de carcasa y tubos [1].	8
2.9	Intercambiador de placas [4].	9
2.10	Intercambiador de placas soldadas [4].	9
2.11	Distintos tipos de intercambiadores compactos [5].	10
2.12	Resistencias térmicas [6].	11
2.13	Diferencia de temperatura en distintos flujos [5].	14
2.14	Tipos de flujo cruzado [6].	17
2.15	Efectividad en distintos tipos de intercambiadores [6].	20
3.1	Intercambiador de carcasa y tubos Edibon.	23
3.2	Unidad base.	24
3.3	Resistencia interior del depósito.	24
3.4	Válvulas dispuestas para flujo en contracorriente.	25
3.5	Válvulas dispuestas para flujo en paralelo.	25
3.6	Caja de interfaz de control.	25
3.7	Esquema del montaje [7].	26
3.8	Ventana de inicio del programa de control y adquisición y manejo de datos.	26
3.9	Menú de selección del tipo de intercambiador.	28
3.10	Ventana principal.	28
3.11	Esquemas de los tipos de flujo en el programa de control.	29
3.12	Medias de las lecturas en los tres ensayos a 40 °C.	30
3.13	Posición y nombre de los sensores en el intercambiador.	31
4.1	Procedimiento seguido en las simulaciones externas.	34
4.2	Procedimiento seguido en las simulaciones internas.	34
4.3	Distribución de \bar{h}_{ext} en la simulación de 40 °C, a contracorriente y nivel 3 de malla básica.	37
4.4	GCI y extrapolación de Richardson de \bar{h}_{ext} . Contracorriente con $T_{h,i} = 40$ °C.	39
4.5	Comparación \bar{h}_{ext} en contracorriente y paralelo con $T_{h,i} = 40$ °C.	40

4.6	GCI y extrapolación de Richardson de las temperaturas de los sensores del intercambiador. Contracorriente con $T_{h,i} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	42
4.7	Malla nivel 3. Temperaturas en los elementos.	44
4.8	Distribución de temperaturas y velocidades en el intercambiador. Temperatura de entrada de agua caliente: $40\text{ }^{\circ}\text{C}$	46
4.9	Trayectoria del agua dentro del intercambiador. Entrada de agua caliente a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$	47
4.10	Representación de la vorticidad en el intercambiador.	47
5.1	Comparación de las temperaturas obtenidas experimentalmente y mediante simulación.	50
5.2	Caudales de entrada de agua caliente y fría.	51
5.3	Parámetros no considerados en las simulaciones.	52
A.1	Flecha desplegable del menú superior.	56
A.2	Menú desplegable activado.	56
A.3	Menú desplegable anclado.	56
A.4	Crear un archivo nuevo.	57
A.5	Seleccionar el tipo de archivo nuevo.	57
A.6	Visibilidad de planos en el Gestor de diseño.	58
A.7	Ocultar/mostrar elementos.	58
A.8	Ver ejes temporales.	59
A.9	Cara transparente.	59
A.10	Cambiar transparencia.	59
A.11	Crear un nuevo croquis.	60
A.12	Selección del plano sobre el que hacer el croquis.	60
A.13	Pestaña de croquis.	60
A.14	Convertir en línea de construcción.	61
A.15	Trazado de línea de construcción.	61
A.16	Salir del croquis.	61
A.17	Editar croquis.	62
A.18	Cota inteligente.	62
A.19	Ventana de introducción de cota.	63
A.20	Elementos sin relaciones.	63
A.21	Línea horizontal.	63
A.22	Circunferencia y línea tangentes.	63
A.23	Selección de la operación de extruir saliente/base.	64
A.24	Selección del croquis para extruir.	64
A.25	PropertyManager.	64
A.26	Salir de la extrusión.	65
A.27	Editar operación.	65
A.28	Extrusión terminada.	66
A.29	Selección de operación de extruir corte.	66
A.30	Croquizado en la operación de extruir corte.	66
A.31	Parámetros para modificar la operación de extruir corte.	67
A.32	Extrusión de corte terminada.	67
A.33	Creación de plano.	67

A.34	Referencias para la definición del plano.	68
A.35	Definición del plano medio.	68
A.36	Plano medio terminado.	68
A.37	Extrusión de la zona central de la carcasa.	69
A.38	Extrusión del extremo de la carcasa.	69
A.39	Invertir dirección de extrusión.	70
A.40	Asistente para taladro.	70
A.41	Tipo de taladro (1).	71
A.42	Tipo de taladro (2).	71
A.43	Posición de taladro.	71
A.44	Matriz circular.	72
A.45	Matriz circular de los taladros.	72
A.46	Operación de simetría.	73
A.47	Simetría del extremo de la carcasa.	73
A.48	Simetría de las uniones del extremo.	73
A.49	Corte del interior de la carcasa.	74
A.50	Definición del plano tangente superior.	74
A.51	Corte del orificio superior.	75
A.52	Resultado del corte de los orificios.	75
A.53	Plano para los orificios de los sensores.	76
A.54	Orificios de los sensores.	76
A.55	Corte de los orificios de los sensores y plano de los soportes.	77
A.56	Eje de simetría del croquis.	77
A.57	Recortar entidades.	78
A.58	Circunferencia recortada.	78
A.59	Líneas a las que aplicar simetría.	78
A.60	Simetría de entidades.	78
A.61	Croquis del soporte.	79
A.62	Extrusión del soporte.	79
A.63	Croquis del pie del soporte.	79
A.64	Extrusión del pie del soporte.	79
A.65	Simetría del soporte completo.	80
A.66	Operaciones de redondeo y chaflán.	80
A.67	Redondeo exterior del soporte.	80
A.68	Redondeo interior del soporte.	80
A.69	Chaflán de la unión entre el soporte y la carcasa.	81
A.70	Chaflán de la unión entre el extremo y la carcasa.	81
A.71	Modelado final de la carcasa.	81
A.72	Zona de unión del cierre.	82
A.73	Extremo del cierre.	82
A.74	Plano para el corte interior.	82
A.75	Resultado del corte interior.	82
A.76	Corte del orificio para entrada/salida.	83
A.77	Taladro en la zona de unión.	84
A.78	Matriz circular de taladros.	84
A.79	Modelado final del cierre lateral.	84

A.80	Extrusión desde el plano medio.	85
A.81	Croquis del primer orificio.	85
A.82	Matriz lineal de croquis.	85
A.83	Orificios en el sentido positivo del eje x.	86
A.84	Orificios en el sentido negativo del eje x.	86
A.85	Matriz lineal en el eje y.	86
A.86	Selección de las circunferencias de las esquinas.	87
A.87	Circunferencias de las esquinas eliminadas.	87
A.88	Corte de los orificios de los tubos.	87
A.89	Modelado final de la unión.	87
A.90	Cuerpo base del deflector.	88
A.91	Croquis inicial de los orificios del deflector.	89
A.92	Croquis final de los orificios del deflector.	89
A.93	Corte de los orificios del deflector.	89
A.94	Especificación del taladro (1).	90
A.95	Especificación del taladro (2).	90
A.96	Modelado final del deflector.	90
A.97	Cuerpo base de la junta del deflector.	91
A.98	Corte interior de la junta.	91
A.99	Taladros de la junta.	91
A.100	Tubo interior.	92
A.101	Comienzo del modelado de la primera tubería.	93
A.102	Plano superior tangente a la tubería.	93
A.103	Corte del orificio para introducir el sensor.	94
A.104	Modelo terminado de la tubería 1.	94
A.105	Croquis de la segunda tubería.	94
A.106	Definición del plano en el extremo de la tubería.	95
A.107	Croquis en el extremo de la tubería.	95
A.108	Operación de Saliente/Base barrido.	96
A.109	Barrido con operación lámina de la segunda tubería.	96
A.110	Curva de intersección.	97
A.111	Intersección de la tubería con el plano.	97
A.112	Extrusión del extremo de la tubería.	97
A.113	Circunferencia para el corte del extremo.	98
A.114	Corte del extremo de la tubería.	98
A.115	Definición del plano lateral a la tubería.	99
A.116	Croquis del orificio del sensor.	99
A.117	Modelo terminado de la tubería 2.	99
A.118	Orientación de la tercera tubería.	100
A.119	Definición del plano tangente superior.	101
A.120	Dimensiones del orificio para el sensor.	101
A.121	Modelo terminado de la tubería 3.	101
A.122	Modelo terminado de la tubería 4.	102
A.123	Redondeo del extremo del sensor.	102
A.124	Elemento polígono.	103
A.125	Croquis hexagonal del sensor.	103

A.126	Extrusión del cuerpo hexagonal del sensor.	103
A.127	Croquis para el recorte por revolución.	104
A.128	Operación de corte por revolución.	104
A.129	Resultado del corte por revolución.	105
A.130	Definición del plano medio en el cuerpo hexagonal.	105
A.131	Modelo terminado del sensor de la carcasa.	105
A.132	Extrusión y redondeo del sensor.	105
A.133	Croquis para el corte del sensor.	106
A.134	Invertir lado a cortar.	106
A.135	Modelo terminado del sensor de la tubería.	106
A.136	Acceso a los complementos.	107
A.137	Ventana con los complementos de SolidWorks.	107
A.138	Distintos elementos del Toolbox de SolidWorks.	108
A.139	Tornillo carcasa.	109
A.140	Tuerca carcasa.	109
A.141	Tornillo deflector.	110
A.142	Tuerca deflector.	110
A.143	Arandela carcasa.	111
A.144	Crear un nuevo ensamblaje.	111
A.145	Empezar ensamblaje.	112
A.146	Flotar pieza.	113
A.147	Selección del origen de la pieza y del ensamblaje.	113
A.148	Relación de posición.	114
A.149	Insertar componentes.	114
A.150	Girar componente.	114
A.151	Giro de 180° del deflector.	115
A.152	Posición provisional de los deflectores.	115
A.153	Croquis de los ejes de referencia.	116
A.154	Relación de <i>Concéntrica</i> y la opción de <i>Bloquear rotación</i>	116
A.155	Relación de <i>Distancia</i>	117
A.156	Posición del deflector y de uno de los tubos.	117
A.157	Matriz de componente lineal.	117
A.158	Posición de los tubos en el deflector.	118
A.159	Posición de los tres tubos superiores.	119
A.160	Relación de <i>Concéntrica</i> entre el deflector y el tubo central.	119
A.161	Posición de los dos primeros deflectores.	120
A.162	Posición de los cuatro deflectores y los tubos interiores.	120
A.163	Relación entre los taladros del deflector y los de la junta.	121
A.164	Deflector con las dos juntas.	121
A.165	Relación entre el tornillo y la cara de la junta.	122
A.166	Relación entre el tornillo y el taladro del deflector.	122
A.167	Tuerca ya posicionada en el deflector.	122
A.168	Matriz de componente circular.	123
A.169	Tornillos y tuercas en el deflector.	123
A.170	Tubos interiores con los cuatro deflectores completos.	123
A.171	Relación entre el tubo inferior y el orificio del segundo deflector.	124

A.172	Caras coincidentes entre la placa de unión y la carcasa.	124
A.173	Taladros coincidentes de la placa de unión con la carcasa.	125
A.174	Posición de los tubos respecto a la placa de unión.	125
A.175	Distancia entre el primer deflector y el extremo de la carcasa.	125
A.176	Carcasa con los tubos interiores y los deflectores posicionados.	126
A.177	Cierre lateral mal orientado.	126
A.178	Alineación inversa.	126
A.179	Relación de los taladros del cierre lateral.	127
A.180	Arandela de la parte posterior.	127
A.181	Arandela de la parte frontal.	127
A.182	Unión entre la carcasa y el cierre lateral.	127
A.183	Resultado de la matriz circular.	128
A.184	Simetría de componentes.	128
A.185	Flecha de <i>Siguiente</i>	128
A.186	Reorientar componentes.	129
A.187	Ensamblaje del intercambiador hasta este punto.	129
A.188	Ensamblaje de la tubería 1.	130
A.189	Ensamblaje de la tubería 2.	130
A.190	Ensamblaje de la tubería 3.	131
A.191	Ensamblaje con todas las tuberías insertadas.	131
A.192	Posición del sensor en la carcasa.	132
A.193	Posición del sensor en una de las tuberías.	132
A.194	Pestaña del ConfigurationManager.	134
A.195	Agregar configuración.	134
A.196	Configuración activa.	134
A.197	Suprimir.	135
A.198	Desplegable de relaciones de posición.	135
A.199	Modificación del plano de corte.	138
A.200	Posición inicial del plano.	139
A.201	Posición final del plano.	139
A.202	Editar plano de croquis.	139
A.203	Cambiar el plano de croquis en sólo una configuración.	139
A.204	Corte modificado del extremo.	140
A.205	Croquis para el corte del extremo del sensor de la carcasa.	141
A.206	Sensor de la carcasa simplificado.	142
A.207	Croquis para el corte del extremo del sensor de la tubería.	142
A.208	Sensor de la tubería simplificado.	143
A.209	Desplegable con las configuraciones de la pieza.	144
A.210	Relación entre la carcasa y la placa de unión.	145
A.211	Relación entre la carcasa y el cierre lateral.	145
A.212	Posición del sensor 1 de la carcasa.	146
A.213	Posición del sensor 2 de la carcasa.	146
A.214	Posición del sensor 3 de la carcasa.	147
A.215	Posición del sensor de la tubería 1.	147
A.216	Posición del sensor de la tubería 4.	147
A.217	Posición del sensor de la tubería 2.	148

A.218	Posición del sensor de la tubería 3.	148
A.219	Modelo simplificado del intercambiador.	148
A.220	Tapa concéntrica a la tubería.	149
A.221	Distancia entre caras.	149
A.222	Configurar operación.	149
A.223	Modificar configuraciones.	150
B.1	Activar Flow Simulation.	151
B.2	Pestaña de Flow Simulation.	151
B.3	Editar material.	152
B.4	Selección del material.	152
B.5	Casilla para aplicar apariencia.	153
B.6	Aplicar el material a todas las configuraciones.	153
B.7	Distintas configuraciones creadas.	156
B.8	Asistente de Flow Simulation.	157
B.9	Nombre del proyecto.	157
B.10	Sistema de unidades.	158
B.11	Tipo de análisis.	159
B.12	Fluido por defecto.	159
B.13	Sólido por defecto.	160
B.14	Condiciones de pared.	160
B.15	Condiciones iniciales y ambientales.	161
B.16	Editar dominio computacional.	162
B.17	Condición de simetría.	162
B.18	Dominio computacional final.	163
B.19	Component control.	163
B.20	Componentes desactivados.	164
B.21	Insertar subdominio de fluido.	164
B.22	Selección de la cara interior de la tubería.	164
B.23	Definición del tipo de líquido en el subdominio 1.	165
B.24	Subdominio 1.	165
B.25	Selección de la cara interior de la segunda tubería.	166
B.26	Subdominio 2.	166
B.27	Importar materiales.	166
B.28	Materiales importados y piezas con avisos.	167
B.29	Botón para importar los materiales.	167
B.30	Salir de la selección de materiales.	167
B.31	Insertar materiales manualmente.	168
B.32	Insertar material aislante.	168
B.33	Esquema de los flujos de entrada y salida en contracorriente.	169
B.34	Introducir condiciones de contorno.	169
B.35	Cara interior de la entrada de agua caliente.	170
B.36	Condiciones de la entrada de agua caliente.	170
B.37	Cara interior de la entrada de agua fría.	170
B.38	Condiciones de la entrada de agua fría.	170
B.39	Cara interior de la salida de agua caliente.	171

B.40	Condiciones de la salida de agua caliente.	171
B.41	Cara interior de la salida de agua fría.	171
B.42	Insertar objetivos.	172
B.43	Selección del extremo del sensor.	172
B.44	Ventana de objetivos.	173
B.45	Caras exteriores seleccionadas.	173
B.46	Selección del objetivo de <i>Heat Flux</i>	174
B.47	Objetivos sin renombrar.	174
B.48	Objetivos después de renombrar.	174
B.49	Tamaño de la malla básica.	175
B.50	Elementos de la malla básica de nivel 1.	176
B.51	Refinado de nivel 3 en la malla básica de nivel 1.	176
B.52	Tamaño de los elementos.	177
B.53	Crear malla.	177
B.54	Ejecutar el mallado.	177
B.55	Información sobre el proceso de mallado.	178
B.56	Opciones de control del cálculo.	178
B.57	Casillas activas en el control del cálculo.	179
B.58	Ejecutar simulación.	179
B.59	Insert Goals Plot.	179
B.60	Insert Preview.	179
B.61	Ejemplos de Preview.	180
B.62	Ejemplos de Preview.	181
B.63	Insertar <i>Surface Parameters</i>	181
B.64	Mostrar valor del coeficiente de convección.	182
B.65	Nuevo desplegable en la ventana de condiciones de pared.	183
B.66	Duplicar proyecto.	183
B.67	Pestaña de duplicado de proyecto.	183
B.68	Estudio interno.	184
B.69	Modificar el tipo de estudio.	184
B.70	Mensaje de aviso sobre el dominio computacional.	184
C.1	Posición y nombre de los sensores en el intercambiador.	185
C.2	Datos superpuestos de los ensayos a 40 °C en contracorriente.	187
C.3	Datos superpuestos de los ensayos a 50 °C en contracorriente.	188
C.4	Datos superpuestos de los ensayos a 60 °C en contracorriente.	189
C.5	Datos superpuestos de los ensayos a 40 °C en paralelo.	190
C.6	Datos superpuestos de los ensayos a 50 °C en paralelo.	191
C.7	Datos superpuestos de los ensayos a 60 °C en paralelo.	192
C.8	Media de los ensayos a 40 °C en contracorriente.	193
C.9	Media de los ensayos a 50 °C en contracorriente.	194
C.10	Media de los ensayos a 60 °C en contracorriente.	195
C.11	Media de los ensayos a 40 °C en paralelo.	196
C.12	Media de los ensayos a 50 °C en paralelo.	197
C.13	Media de los ensayos a 60 °C en paralelo.	198
C.14	Distribución de \bar{h}_{ext} . Malla básica nivel 1.	205

C.15	Distribución de \bar{h}_{ext} . Malla básica nivel 2.	206
C.16	Distribución de \bar{h}_{ext} . Malla básica nivel 3.	206
C.17	Distribución de \bar{h}_{ext} . Malla básica nivel 4.	207
C.18	Distribución de \bar{h}_{ext} . Malla básica nivel 5.	207
C.19	Distribución de \bar{h}_{ext} . Malla básica nivel 6.	208
C.20	Distribución de temperaturas en el intercambiador. Niveles 1 y 2 de malla básica. Contracorriente con $T_{h,i} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	209
C.21	Distribución de temperaturas en el intercambiador. Niveles 3 y 4 de malla básica. Contracorriente con $T_{h,i} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	210
C.22	Distribución de temperaturas en el intercambiador. Nivel 5 de malla básica. Contracorriente con $T_{h,i} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	211
C.23	Distribución de temperaturas y velocidades en el intercambiador. 40 °C y contracorriente.	212
C.24	Distribución de temperaturas y velocidades en el intercambiador. 50 °C y contracorriente.	213
C.25	Distribución de temperaturas y velocidades en el intercambiador. 60 °C y contracorriente.	214
C.26	Distribución de temperaturas y velocidades en el intercambiador. 40 °C y paralelo.	215
C.27	Distribución de temperaturas y velocidades en el intercambiador. 50 °C y paralelo.	216
C.28	Distribución de temperaturas y velocidades en el intercambiador. 60 °C y paralelo.	217
C.29	Trayectorias para flujo en contracorriente.	218
C.30	Trayectorias para flujo en paralelo.	219

Índice de tablas

2.1	Recomendación de uso de los métodos.	12
3.1	Parámetros de los ensayos.	27
3.2	Correspondencia entre variables y los sensores de la maqueta del intercambiador.	31
4.1	Constantes de la ecuación 4.3 para convección libre sobre un cilindro circular horizontal [5].	36
4.2	Cálculo teórico de \bar{h}_{ext} para distintas temperaturas de entrada en contracorriente.	37
4.3	Datos de las simulaciones de tipo externo en función del nivel de la malla básica.	38
4.4	Valor de \bar{h}_{ext} adoptado para las futuras simulaciones.	40
4.5	Datos de las simulaciones internas del estudio de convergencia de malla.	41
4.6	Diferencias porcentuales, en valor absoluto, del paso de una malla a otra más fina.	43
4.7	Resultados de las simulaciones a 40 °C.	45
4.8	Resultados de las simulaciones a 40 °C.	46
5.1	Comparación de las temperaturas obtenidas en los ensayos experimentales y por simulación.	49
C.1	Correspondencia entre variables y los sensores de la maqueta del intercambiador.	186
C.2	Datos y media de los ensayos a 40 °C. Condiciones iniciales.	199
C.3	Datos y media de los ensayos a 40 °C. Condiciones finales.	200
C.4	Datos y media de los ensayos a 50 °C. Condiciones iniciales.	201
C.5	Datos y media de los ensayos a 50 °C. Condiciones finales.	202
C.6	Datos y media de los ensayos a 60 °C. Condiciones iniciales.	203
C.7	Datos y media de los ensayos a 60 °C. Condiciones finales.	204

Capítulo 1

Introducción

1.1. Objeto

En este trabajo se busca comparar los datos experimentales recogidos en laboratorio de un intercambiador de calor de carcasa y tubos, agua-agua, con los obtenidos mediante simulaciones en Flow Simulation.

En la primera parte, se hace una introducción a los distintos tipos de intercambiadores de calor y sus aplicaciones, seguida de una exposición de la teoría para su estudio. A continuación, se realizan diversos ensayos en laboratorio del intercambiador de carcasa y tubos de la marca Edibon. Se establecen seis supuestos y se hacen tres ensayos de cada uno de ellos a fin de obtener la mayor precisión posible en los resultados. Una vez terminada la recogida de datos, se procede a su tratamiento y representación para facilitar su interpretación.

En la segunda parte, se procede a realizar un modelo geométrico del intercambiador con SolidWorks. Se detallan los pasos seguidos para modelar cada una de las piezas que conforman el intercambiador y el procedimiento para hacer el ensamblaje del conjunto. Terminado el modelado, se realizan diversas simulaciones con Flow Simulation tomando como datos iniciales los medidos en el laboratorio en cada uno de los supuestos.

Por último, se hace una comparación de los resultados experimentales y simulados, comentando las posibles discrepancias o similitudes.

1.2. Motivación del trabajo

La principal motivación para realizar el presente trabajo es superar la asignatura de Trabajo de Fin de Grado y obtener los créditos necesarios para finalizar el Grado en Ingeniería Mecánica.

Igualmente presenta la oportunidad de profundizar en el uso de SolidWorks, Flow Simulation y $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ para su elaboración.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos

2.1. Introducción

El intercambio de calor entre dos fluidos a distintas temperaturas, impidiendo que se mezclen, es un proceso muy utilizado en aplicaciones como la calefacción y acondicionamiento de aire, producción de potencia, procesamiento químico, etc. El dispositivo utilizado para realizar este intercambio de calor se denomina *intercambiador de calor*, donde la transferencia de calor se lleva a cabo, fundamentalmente, mediante *conducción* y *convección*.

Desde el punto de vista térmico, se emplean dos métodos para el diseño y análisis de los intercambiadores:

- Método de la diferencia media logarítmica de temperatura (LMTD).
- Método de la efectividad-NTU (ε -NTU).

A continuación se procede a realizar una clasificación de los tipos de intercambiadores de calor, así como a explicar los diferentes métodos de cálculo y diseño.

2.2. Clasificación

El intento de adaptar los intercambiadores a las distintas necesidades ha llevado a diversos tipos de diseños.

Los intercambiadores se suelen clasificar en base al *tipo de flujo* o la *forma de transferencia de calor*, permitiendo distinguir dos grandes grupos de intercambiadores:

- **Transferencia directa:** transfieren la energía térmica directamente de una corriente de fluido a otra, normalmente a través de una pared que los separa.
- **Transferencia indirecta:** la energía térmica se transfiere de una corriente a otra de manera indirecta haciendo uso de un elemento intermedio. El *regenerador* (figura 2.1) es un ejemplo de intercambiador de calor de transferencia indirecta.

El primer grupo también se puede clasificar en función del elemento que separa los fluidos que circulan por el interior del intercambiador. Dicho elemento puede ser una pared cilíndrica o plana.



A continuación se exponen las características principales de cada tipo de intercambiador.

Regenerador

Es un intercambiador de calor en el que el fluido caliente y frío circulan a través de una matriz fabricada con un material con un alto calor específico. La circulación de ambos fluidos es alterna, de manera que no se mezclan.

El fluido caliente cede calor a la matriz cuando éste circula a través de ella. Ese mismo calor es cedido al fluido frío cuando éste sea el que circule a través de la matriz.

Intercambiador de tubo liso

Está formado por una pared cilíndrica que separa los dos fluidos en el intercambiador. Uno de ellos circulará por dentro del tubo y el otro, por fuera. Para tener una superficie de contacto adecuada, la longitud del conducto suele ser grande, por lo que hace falta modificar su disposición de manera que ocupe menos espacio y sea más fácilmente manejable.

Se pueden encontrar intercambiadores en **zig-zag** (figura 2.2), o en varias capas. También se pueden encontrar intercambiadores de **haces tubulares**. Este último tipo está formado por tubos paralelos soldados en los extremos a un colector común.

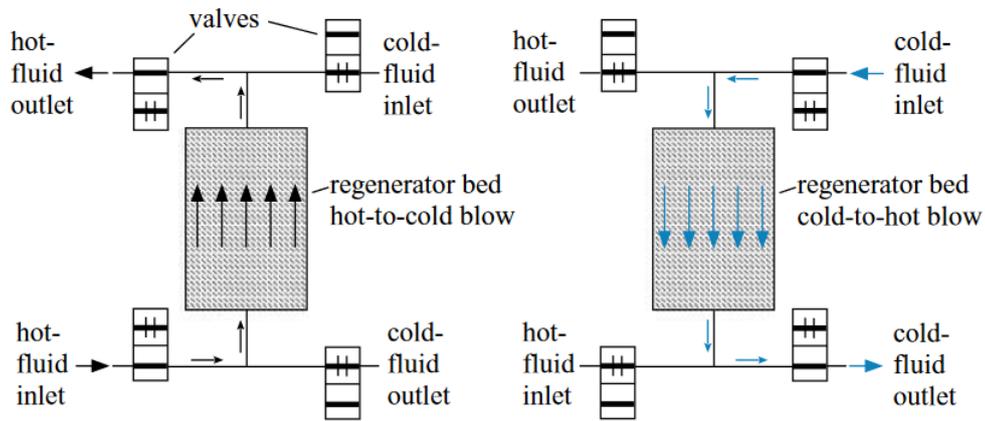


Figura 2.1: Regenerador [1].

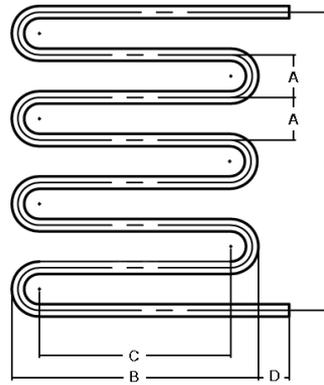


Figura 2.2: Intercambiador en zig-zag [2].

Otra disposición de los tubos lisos es en forma de espiral, constituyendo los intercambiadores de **serpentín**. Este tipo de intercambiador se utiliza en el interior de depósitos con forma cilíndrica (figura 2.3).

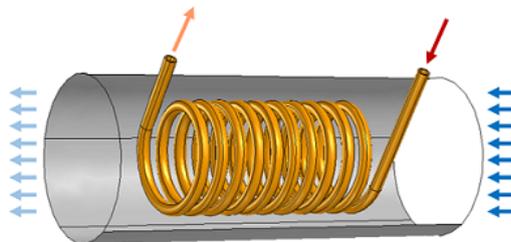


Figura 2.3: Intercambiador de serpentín [3].

Intercambiador de tubo con aletas

Formado por tubos en disposición de serpentin plano en una o varias capas. De forma perpendicular al eje, se fijan a los tubos unas láminas muy finas con la función de aumentar la superficie de intercambio de calor del tubo.

La separación entre las aletas varía entre 3 mm y 18 mm en función de la aplicación a la que esté destinada el intercambiador.

En este tipo de intercambiadores los dos fluidos suelen moverse de manera perpendicular entre sí, flujo conocido como **flujo cruzado**. En el caso de los intercambiadores de tubo con aletas, el flujo cruzado se trata de un flujo **no mezclado**¹ (figura 2.4a).

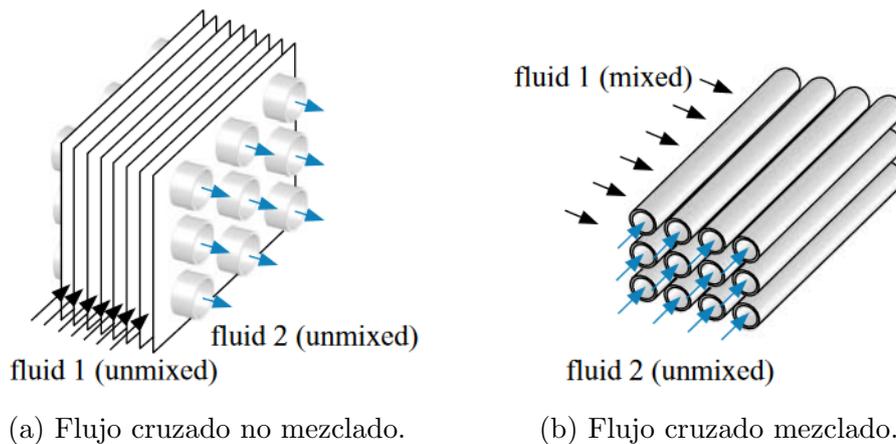


Figura 2.4: Tipos de flujo cruzado [1].

Intercambiador de doble tubo

También llamado intercambiador de tubos concéntricos. Es el intercambiador de calor más simple y consta de dos tubos concéntricos de distinto diámetro (figura 2.5).

Uno de los fluidos circula por el tubo interior y el otro lo hace por la sección anular existente entre los dos tubos, de manera que ambos fluidos se mueven en direcciones paralelas pudiendo ser en el mismo sentido o en sentidos contrarios.

El primer tipo de flujo se denomina flujo **paralelo** o equicorriente, en el que ambos flujos entran en el intercambiador por el mismo extremo y se mueven en el mismo sentido (figura 2.6a). El segundo tipo de flujo se trata del flujo **contracorriente**, en el que los fluidos entran en el intercambiador por los extremos opuestos y se mueven en sentidos contrarios (figura 2.6b).

¹Si el intercambiador no tuviera aletas y el flujo fuera cruzado se trataría de un flujo *mezclado* (figura 2.4b).

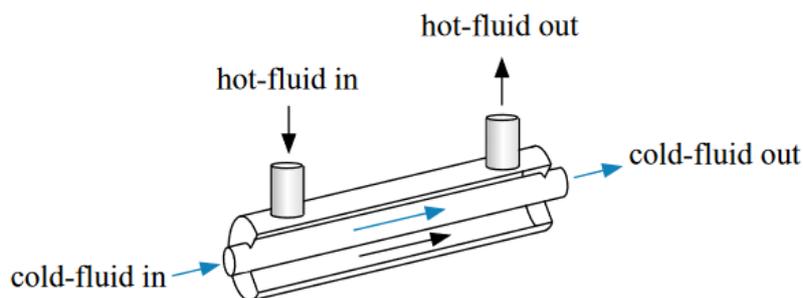


Figura 2.5: Intercambiador de doble tubo [1].

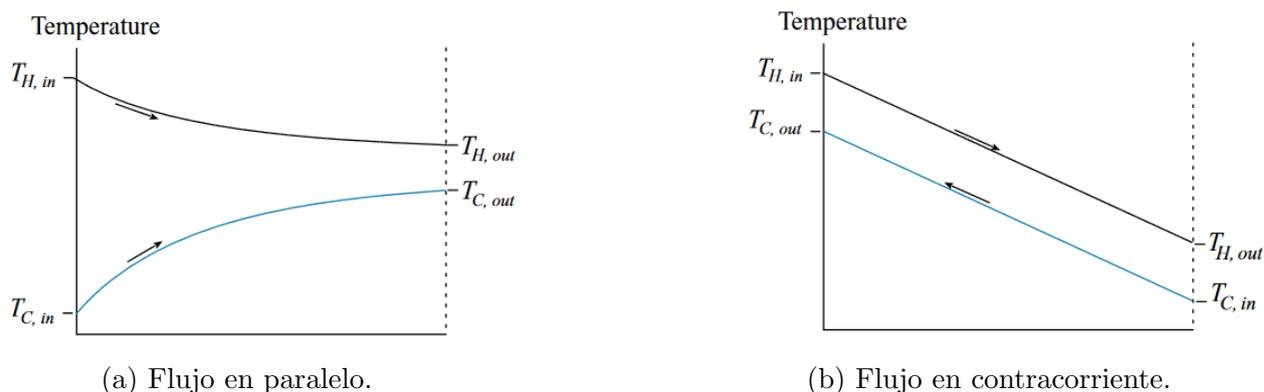


Figura 2.6: Tipos de flujo [1].

Intercambiador multitubular

Se trata del tipo de intercambiador de calor más utilizado. Está constituido por un conjunto de tubos instalados en el interior de una **carcasa**, también conocida como *coraza* o *casco*.

Uno de los fluidos circula por el interior de los tubos y el otro, por el espacio existente entre la carcasa y los tubos. Los fluidos no se mezclan.

Los intercambiadores de este tipo se pueden clasificar según el número de pasos que se realizan por la carcasa y por los tubos, entendiéndose por *pasos* al número de sentidos en los que los fluidos recorren el intercambiador de forma sucesiva. Pueden existir intercambiadores con varios pasos tanto de carcasa como de tubos (ver figuras 2.7a, 2.7c y 2.7b).

Los extremos de la carcasa están delimitados por los **cabezales**, que son unos elementos que hacen que la carcasa sea estanca y obligan a los fluidos a circular en la dirección y sentido conveniente. El cabezal anterior se denomina *distribuidor* y por él entra en fluido al intercambiador. Al cabezal posterior se le conoce como *fondo*.

Es habitual disponer en el interior de la carcasa una serie de elementos denominados **deflectores**, pantallas o tabiques. Su misión es, además de mantener la posición de los

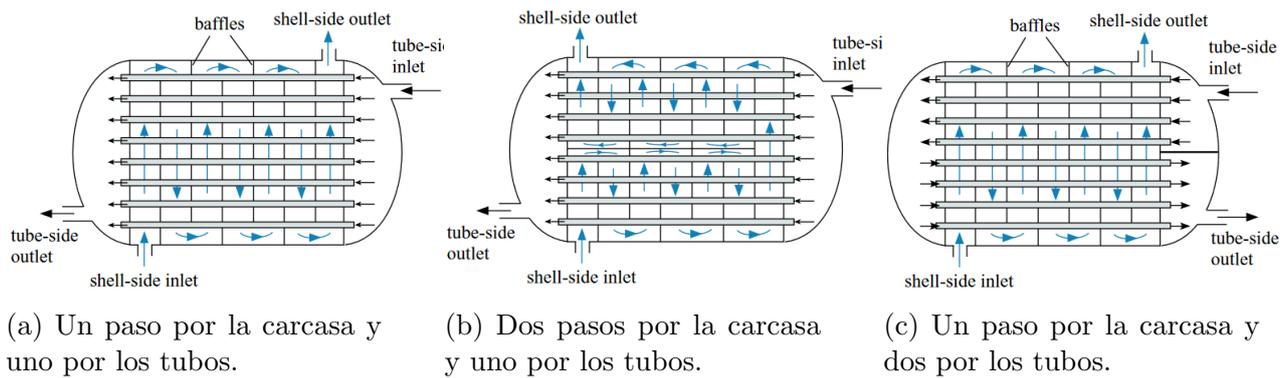


Figura 2.7: Esquemas de un intercambiador de carcasa y tubos [1].

tubos en el interior del intercambiador, forzar al fluido a moverse en dirección transversal a la coraza para mejorar la transferencia de calor (figura 2.8).

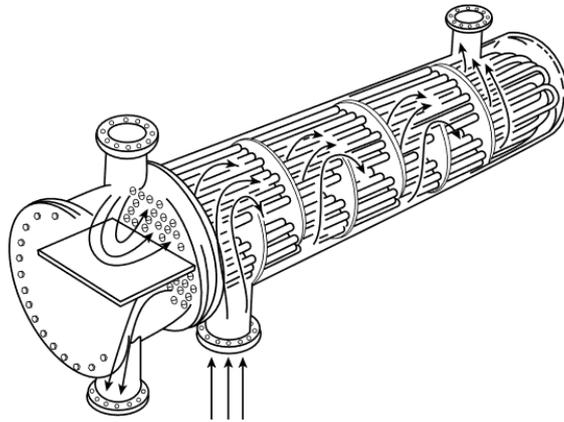


Figura 2.8: Deflectores en un intercambiador de carcasa y tubos [1].

Intercambiador de placas selladas

Está formado por una serie de placas estampadas corrugadas y comprimidas entre sí (figura 2.9). Los fluidos circulan en pasos alternados, de maneras que cada uno de los fluidos queda rodeado por dos corrientes del otro fluido. Esto se traduce en una transferencia muy eficaz de calor.

Intercambiador de placas soldadas

Se trata también de un intercambiador de placas pero sin juntas, por lo que aquéllas están preparadas para trabajar a altas temperaturas y presiones. Al estar los circuitos completamente aislados, se reduce el riesgo de mezcla entre los dos fluidos (figura 2.10).

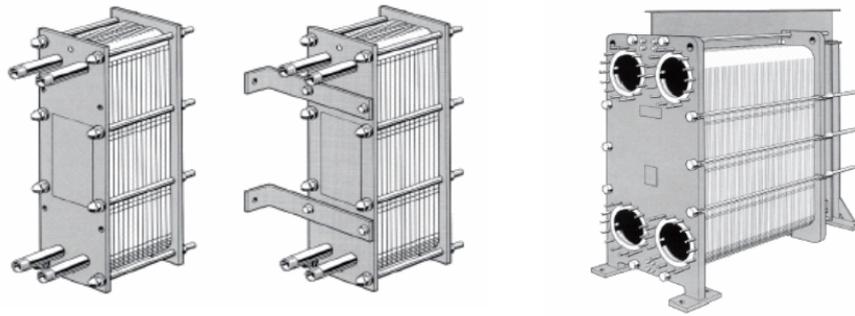


Figura 2.9: Intercambiador de placas [4].

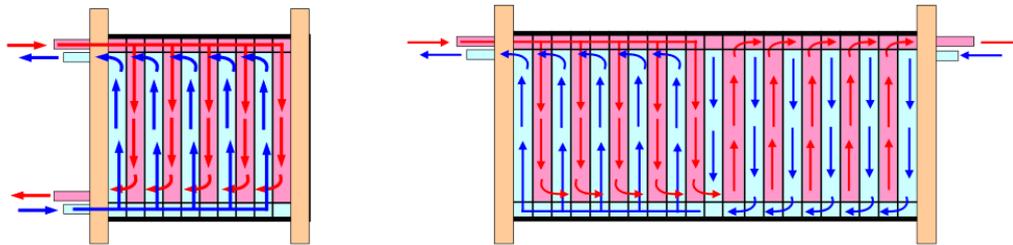


Figura 2.10: Intercambiador de placas soldadas [4].

Intercambiador compacto

Con este tipo de intercambiador se pretende obtener una *densidad de área* β elevada. Los intercambiadores con $\beta > 700 \frac{m^2}{m^3}$ se consideran intercambiadores de calor compactos (figura 2.11).

Se utilizan normalmente cuando al menos uno de los fluidos es un gas, compensando un coeficiente de convección pequeño con una mayor área de intercambio. Consiguen razones elevadas de transferencia de calor entre dos fluidos en un pequeño volumen y su principal campo de aplicación se encuentra en la industria automotriz y aeroespacial, donde existen estrictas limitaciones de peso y volumen.

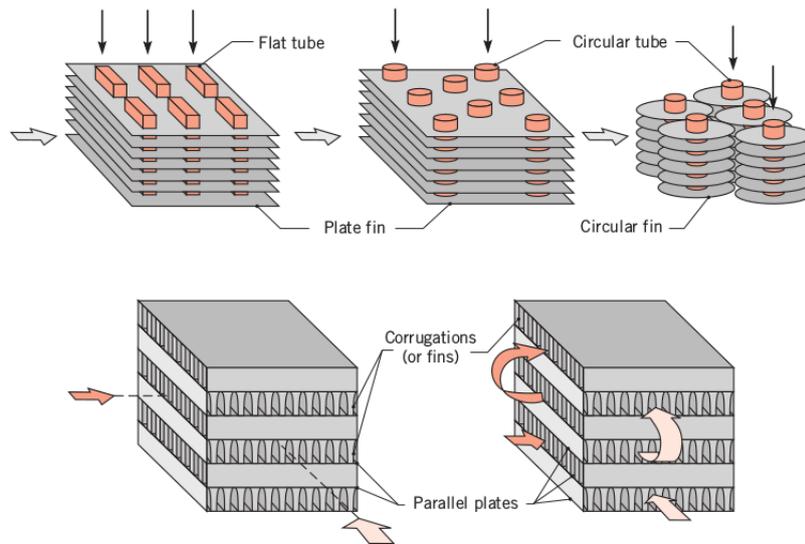


Figura 2.11: Distintos tipos de intercambiadores compactos [5].

2.3. Coeficiente global de transferencia de calor

En un intercambiador, la transferencia de calor se realiza, en primer lugar, del fluido caliente hacia la pared mediante *convección*. A continuación, a través de la pared mediante *conducción* para, finalmente, llevarse a cabo mediante *convección* de la pared hacia el fluido frío.

La resistencia térmica total se puede considerar como:

$$R_{total} = R_i + R_{pared} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (2.1)$$

donde el subíndice i representa la superficie interior del tubo interior y o , la superficie exterior del tubo interior (figura 2.12). La conductividad térmica del material de la pared es k y L , la longitud del tubo.

En un intercambiador, la razón de la transferencia de calor entre los dos fluidos se expresa como:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{total}} = U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T \quad (2.2)$$

donde U es el **coeficiente global de transferencia de calor**.

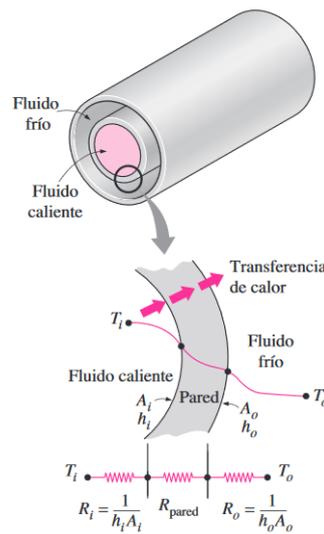


Figura 2.12: Resistencias térmicas [6].

Simplificando la ecuación 2.2 y sustituyendo en ella la ecuación 2.1, se obtiene:

$$\frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (2.3)$$

Cabe destacar que $U_i A_i = U_o A_o$, pero que $U_i \neq U_o$, a no ser que $A_i = A_o$. Se puede observar que existen dos coeficientes de transferencia de calor globales, U_i y U_o debido a que las áreas de intercambio de calor, A_i y A_o , en general, no son iguales, por lo que el coeficiente global de transferencia de calor debe especificarse sobre qué superficie se está calculando.

En [4]² se pueden ver varios valores de referencia del coeficiente global de transferencia de calor.

2.3.1. Factor de incrustación

La ecuación 2.3 es sólo válida para intercambiadores con los tubos perfectamente limpios pues a lo largo de la vida útil del intercambiador, se van acumulando depósitos sobre las superficies de transferencia de calor, provocando una disminución de la misma.

Para contabilizar estos depósitos, se añade a la ecuación 2.1 un **factor de incrustación** (R_f), quedando:

$$R_{total} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (2.4)$$

²Tabla 5, pág. 78.

La ecuación 2.3 se modificaría a:

$$\frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (2.5)$$

En [4]³ aparecen valores representativos de factores de incrustacion.

2.4. Análisis de los intercambiadores de calor

En los apartados 2.4.1 y 2.4.2 se van a desarrollar dos métodos de cálculo de intercambiadores de calor que se pueden aplicar en cualquier problema, pero dependiendo de la naturaleza del mismo será más fácil aplicar un método u otro.

En cuanto a los problemas de **diseño de intercambiadores**, se fijan las temperaturas de entrada y las velocidades de ambos fluidos junto con la temperatura de salida de uno de ellos. El objetivo será determinar qué tipo de intercambiador es el más apropiado así como el área de intercambio de calor. En este tipo de problemas se pueden aplicar, sin excesiva complicación, ambos métodos de cálculo.

En los problemas de **cálculo de rendimiento**, en los que se conoce de antemano el tipo de intercambiador, su tamaño, las velocidades de los fluidos y sus temperaturas de entrada, se pretende determinar las temperaturas de salida, así como la transferencia de calor. Para este tipo de problemas, el método LMTD hay que aplicarlo de manera iterativa, por lo que es recomendable utilizar el método NTU.

Tabla 2.1: Recomendación de uso de los métodos.

Problema	Datos conocidos	Objetivos	Método
Diseño	$T_{h,i}, T_{c,i}, \dot{V}_h, \dot{V}_c$	Tipo de intercambiador	LMTD
	$T_{h,o}$ o $T_{c,o}$	Área de intercambio	
Análisis	Tipo de intercambiador	$T_{h,o}, T_{c,o}, \dot{Q}$	NTU
	Área de intercambio		
	$T_{h,i}, T_{c,i}, \dot{V}_h, \dot{V}_c$		

³Tabla 6, pág. 79.

El subíndice i indica *entrada* y o , *salida*.

A la hora de realizar el análisis térmico de un intercambiador, se hacen las siguientes idealizaciones:

- Los intercambiadores se consideran dispositivos de **flujo estacionario**.
- El **calor específico** de los fluidos se considera **constante** dentro de un rango de temperaturas.
- La **conducción axial** de calor a lo largo de los tubos se considera **despreciable**.
- **Superficie exterior** del intercambiador **perfectamente aislada**.

Hechas estas idealizaciones, la transferencia de calor⁴ se puede expresar como:

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \\ \dot{Q} &= \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i})\end{aligned}\quad (2.6)$$

donde \dot{m} es el gasto másico y c_p el calor específico.

El producto del gasto másico y del calor específico se suele definir como **capacidad calorífica**, que representa la cantidad de calor necesaria para aumentar en 1 K una corriente de fluido.

$$\begin{aligned}C_h &= \dot{m}_h c_{p,h} \\ C_c &= \dot{m}_c c_{p,c}\end{aligned}\quad (2.7)$$

La transferencia de calor en un intercambiador también se puede expresar como:

$$\dot{Q} = UA \Delta T_m \quad (2.8)$$

donde U es el coeficiente global de transferencia de calor (ver apartado 2.3) y ΔT_m es una diferencia *promedio* de temperatura entre los dos fluidos que circulan en el intercambiador⁵.

⁴ \dot{Q} se considera positiva. Su sentido va del del fluido caliente al frío.

⁵Esta diferencia de temperatura es de tipo logarítmico (ver apartado 2.4.1).

2.4.1. Método de la diferencia media logarítmica de temperatura (LMTD)

Para poder aplicar la ecuación 2.8 hace falta conocer, entre otros parámetros, una diferencia de temperatura media (ΔT_m).

Se puede ver en las figuras 2.13a y 2.13b que la diferencia de temperatura entre los dos fluidos no es constante, sino que varía a lo largo del intercambiador.

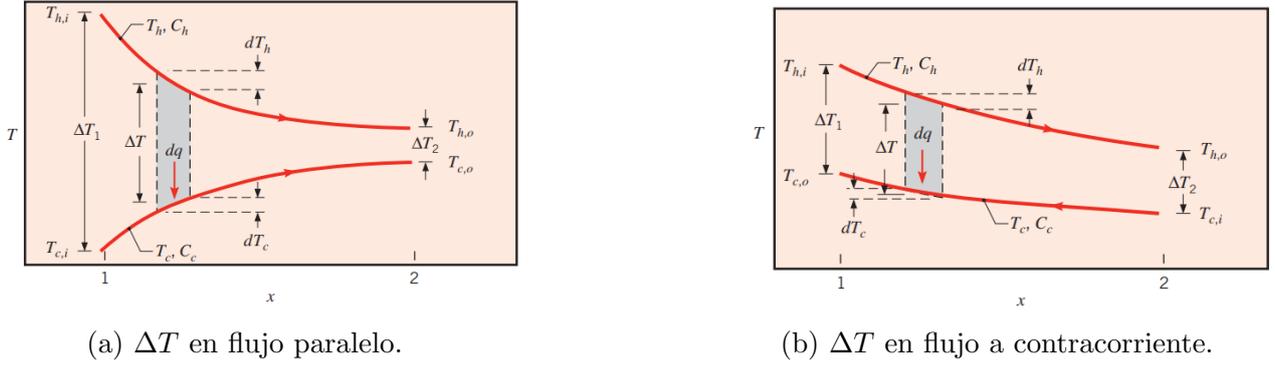


Figura 2.13: Diferencia de temperatura en distintos flujos [5].

Para determinar una diferencia de temperatura media, se considera un intercambiador de calor de doble tubo y flujo paralelo. Haciendo las suposiciones que se comentaron en la primera parte del apartado 2.4, se puede hacer un balance de energía⁶ en el fluido caliente (ecuación 2.9) y en el fluido frío (ecuación 2.10).

$$\delta\dot{Q} = -\dot{m}_h c_{p,h} dT_h \quad (2.9)$$

$$\delta\dot{Q} = \dot{m}_c c_{p,c} dT_c \quad (2.10)$$

Despejando dT_h y dT_c de las ecuaciones 2.9 y 2.10, respectivamente, se obtienen las ecuaciones 2.11 y 2.12:

$$dT_h = -\frac{\delta\dot{Q}}{\dot{m}_h c_{p,h}} \quad (2.11)$$

$$dT_c = \frac{\delta\dot{Q}}{\dot{m}_c c_{p,c}} \quad (2.12)$$

⁶El signo negativo se debe a que el cambio de temperatura en el fluido caliente es negativo. Se añade el signo negativo para hacer que la transferencia de calor sea positiva.

La ecuación 2.8 se puede expresar de forma diferencial como:

$$\delta\dot{Q} = U dA (T_h - T_c) \quad (2.13)$$

Restando las ecuaciones 2.11 y 2.12, y combinando con la ecuación 2.13, se llega a la expresión 2.14.

$$\frac{d(T_h - T_c)}{T_h - T_c} = -U dA \left(\frac{1}{\dot{m}_h c_{p,h}} + \frac{1}{\dot{m}_c c_{p,c}} \right) \quad (2.14)$$

A continuación, se integra la ecuación 2.14, en la que incluyendo las ecuaciones 2.11 y 2.12 y reordenando se obtiene una expresión del tipo:

$$\dot{Q} = UA \Delta T_{lm} \quad (2.15)$$

donde ΔT_{lm} es la **diferencia media logarítmica de temperatura** y se define como:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1/\Delta T_2)} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2/\Delta T_1)} \quad (2.16)$$

ΔT_1 y ΔT_2 se corresponden con la diferencia de temperatura entre los dos fluidos en la entrada y en la salida del intercambiador.

Para un intercambiador de flujo paralelo se tiene:

$$\begin{bmatrix} \Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,i} \\ \Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,o} \\ \Delta T_{lm} \equiv \Delta T_{lm,pf} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

La expresión 2.16 es igualmente válida para el caso de un intercambiador de calor de doble tubo y flujo en contracorriente, donde:

$$\begin{cases} \Delta T_1 = T_{h,i} - T_{c,o} \\ \Delta T_2 = T_{h,o} - T_{c,i} \\ \Delta T_{lm} \equiv \Delta T_{lm,cf} \end{cases} \quad (2.18)$$

En este tipo de flujo se puede dar el *caso particular* en el que los *dos fluidos tengan la misma capacidad calorífica*, $C_h = C_c$, y $\Delta T_1 = \Delta T_2$. La ecuación 2.16 presentaría una indeterminación, en la que aplicando la regla de L'Hôpital se obtiene $\Delta T_{lm,cf} = \Delta T_1 = \Delta T_2$.

No obstante, para los intercambiadores de calor de flujo cruzado y de carcasa y tubo de pasos múltiples, la expresión 2.16, para el caso de un intercambiador en flujo en contracorriente (expresión 2.18), debe modificarse con un factor de corrección.

2.4.1.1. Factor de corrección para los intercambiadores de flujo cruzado y de carcasa y tubo de pasos múltiples

La expresión para la diferencia media logarítmica para los intercambiadores de flujo cruzado y para los de carcasa y tubo de pasos múltiples es más difícil de obtener debido a las condiciones del flujo. En estos casos se corrige la expresión 2.16, para el caso de contracorriente, con un factor de corrección F .

$$\Delta T_{lm} = F \Delta T_{lm,cf} \quad (2.19)$$

El factor de corrección depende de la configuración geométrica del intercambiador y de las temperaturas de entrada y salida y se puede ver en las figuras 2.14a, 2.14b, 2.14c y 2.14d.

Los factores P^7 y R^8 , tomando como referencia un intercambiador con flujo en contracorriente, se definen como:

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (2.20)$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{(\dot{m} c_p)_{coraza}}{(\dot{m} c_p)_{tubo}} \quad (2.21)$$

⁷Conocido como *efectividad del LMTD*.

⁸Conocido con el nombre de *relación de capacidades caloríficas*.

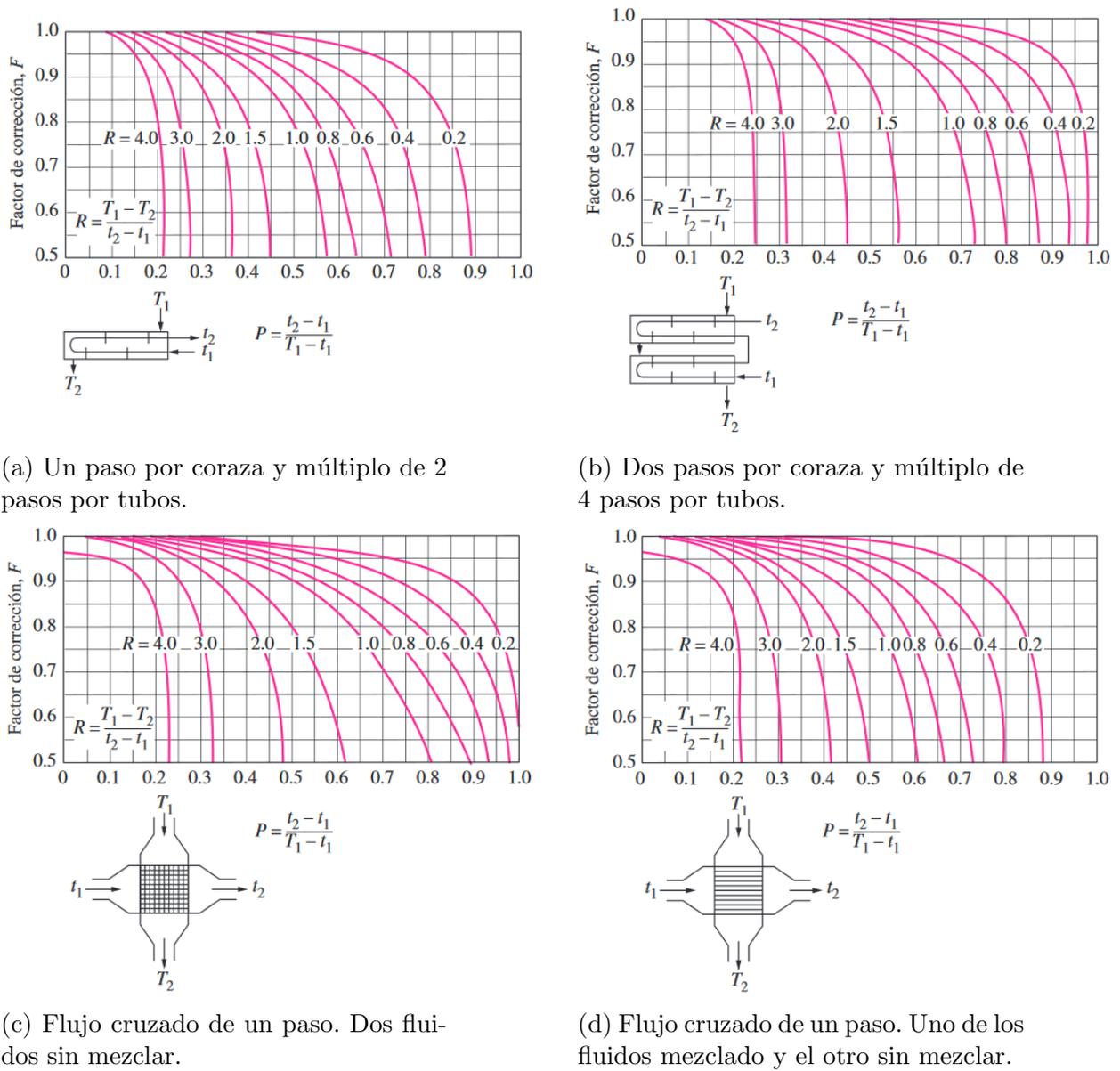


Figura 2.14: Tipos de flujo cruzado [6].

Los subíndices 1 y 2 se refieren a *entrada* y *salida*, respectivamente, y *T* y *t* a *lado de la coraza* y *lado del tubo*.

2.4.2. Método de la efectividad-NTU (ϵ -NTU)

Este método se basa en el uso de un parámetro adimensional llamado **efectividad de la transferencia de calor**, ϵ , y busca simplificar el proceso de análisis de los intercambiadores de calor, en el que se desconoce la transferencia de calor, \dot{Q} , y las temperaturas de salida, $T_{h,o}$ y $T_{c,o}$.

2.4.2.1. Transferencia de calor máxima

En el método ε -NTU, la transferencia de calor se expresa en función de la máxima transferencia de calor posible, donde:

$$\dot{Q} = \varepsilon \dot{Q}_{m\acute{a}x} \quad (2.22)$$

ε es la efectividad de la transferencia de calor, que depende de la geometría del intercambiador y de las condiciones de flujo.

Para poder determinar $\dot{Q}_{m\acute{a}x}$, se define la máxima diferencia de temperatura en el intercambiador como:

$$\Delta T_{m\acute{a}x} = T_{h,i} - T_{c,i} \quad (2.23)$$

La máxima transferencia de calor de un intercambiador se da cuando:

- El fluido frío se calienta hasta la temperatura de entrada del fluido caliente.
- El fluido caliente se enfría hasta la temperatura de entrada del fluido frío.

Estas dos situaciones sólo se pueden producir de manera simultánea cuando la capacidad calorífica del fluido caliente sea igual a la del fluido frío, $C_h = C_c$.

En el caso de que $C_h \neq C_c$, que es lo más común, el fluido que sufrirá un cambio mayor de temperatura será el que tenga una capacidad calorífica menor. Este fluido será el primero que experimentará la máxima diferencia de temperatura, punto a partir del cual se detendrá la transferencia de calor, de manera que

$$\dot{Q}_{m\acute{a}x} = \begin{cases} C_h (T_{h,i} - T_{c,i}) & \text{si } C_h \leq C_c \\ C_c (T_{h,i} - T_{c,i}) & \text{si } C_h \geq C_c \end{cases} \quad (2.24)$$

La expresión 2.24 se puede reducir a

$$\dot{Q}_{m\acute{a}x} = C_{m\acute{i}n} (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (2.25)$$

siendo:

$$C_{m\acute{i}n} = \min(C_h, C_c) \quad (2.26)$$

Sustituyendo la ecuación 2.25 en la ecuación 2.22 se obtiene:

$$\dot{Q} = \varepsilon C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (2.27)$$

2.4.2.2. Efectividad de la transferencia de calor

Como se comentó en el apartado 2.4.2.1, el valor de ε depende de la geometría del intercambiador y de las condiciones del flujo. Esta relación suele contener un parámetro adimensional, llamado **número de unidades de transferencia (NTU)**, que se define como

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} \quad (2.28)$$

Otro parámetro adimensional que conviene definir se denomina **relación de capacidades** y se expresa como

$$c = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \quad (2.29)$$

La efectividad de la transferencia de calor es función del NTU y de c tal que

$$\varepsilon = f(NTU, c) \quad (2.30)$$

Estas relaciones se pueden ver en [6]⁹ y [6]¹⁰, o de manera gráfica en las figuras 2.15a a la 2.15f.

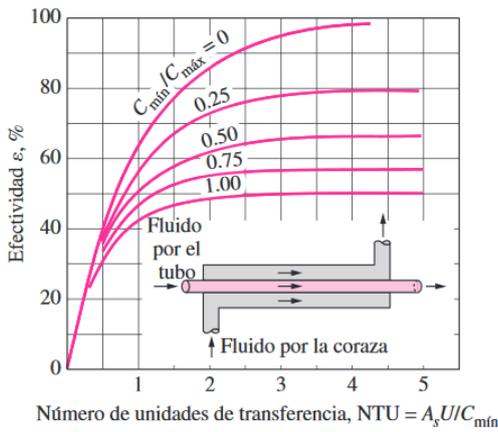
También se puede expresar la efectividad como en la ecuación 2.31 [8]¹¹

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{T_{h,i} - T_{c,i}} & \text{si } C_h \leq C_c \\ \frac{T_{c,o} - T_{c,i}}{T_{h,i} - T_{c,i}} & \text{si } C_h \geq C_c \end{cases} \quad (2.31)$$

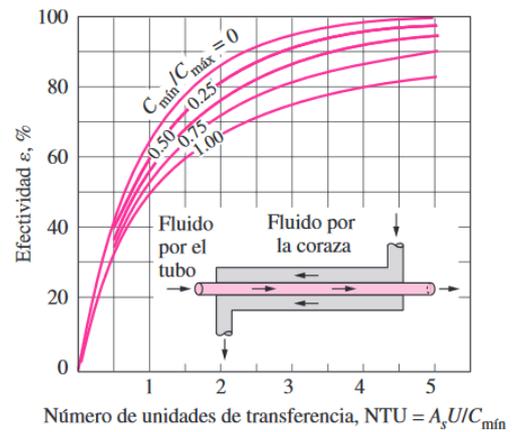
⁹Tabla 11-4, pág. 656.

¹⁰Tabla 11-5, pág. 658.

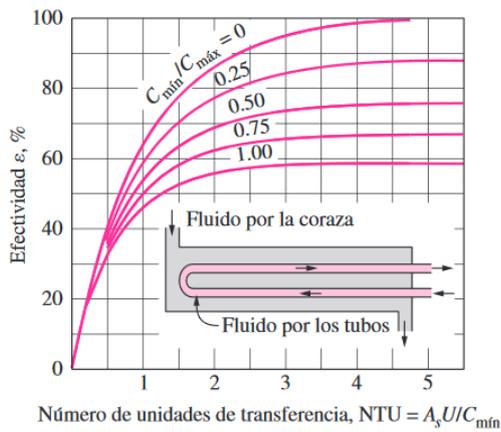
¹¹Pág. 35.



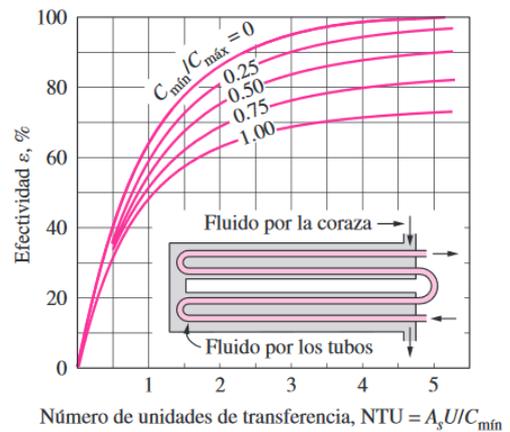
(a) Flujo paralelo.



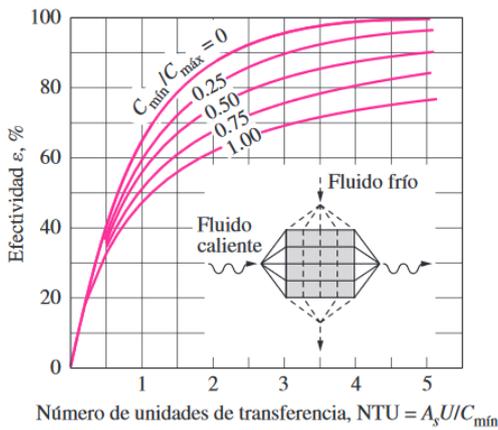
(b) Contracorriente.



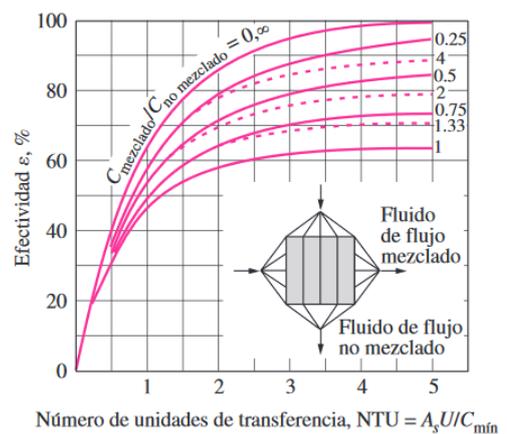
(c) Un paso por coraza y múltiplo de 2 pasos por tubos.



(d) Dos pasos por coraza y múltiplo de 4 pasos por tubos.



(e) Flujo cruzado con los dos fluidos sin mezclar.



(f) Flujo cruzado con uno de los fluidos mezclado y el otro sin mezclar.

Figura 2.15: Efectividad en distintos tipos de intercambiadores [6].

2.5. Selección

A la hora de seleccionar el intercambiador de calor apropiado para una aplicación concreta hay que considerar una serie de parámetros:

- **Transferencia de calor:** es el parámetro más importante a la hora de elegir un intercambiador. Debe ser la adecuada para que se alcancen los objetivos de diseño.
- **Costo:** por norma general, los intercambiadores que estén disponibles en un catálogo tendrán un costo más competitivo que uno que se tenga que diseñar y fabricar bajo pedido. También hace falta considerar el coste de mantenimiento y de operación del mismo.
- **Potencia de bombeo:** para hacer circular los fluidos por el intercambiador de calor hace falta un elemento impulsor, bien sea una bomba o un ventilador. Minimizar la caída de presión en el interior del intercambiador disminuirá el consumo de éstos elementos impulsores, reduciendo así el gasto económico.
- **Tamaño y peso:** el espacio disponible para la colocación del intercambiador puede ser un factor que limite la longitud de los tubos del mismo.
- **Tipo:** se debe seleccionar en función de los tipos de fluidos que vayan a circular en el intercambiador. Por ejemplo, si se van a utilizar dos líquidos el tipo adecuado de intercambiador será el de placas o carcasa y tubos.
- **Materiales:** dependen de las condiciones de trabajo del intercambiador, por ejemplo altas temperaturas o presiones y fluidos corrosivos.
- **Consideraciones adicionales:** son las que se han de tener en cuenta en casos concretos, como por ejemplo la estanqueidad cuando se trabaja con fluidos tóxicos. También se puede tener en cuenta un bajo coste de mantenimiento o un bajo nivel de ruido.

Capítulo 3

Ensayos experimentales

3.1. Introducción

Con el objetivo de comparar los resultados experimentales con los de las simulaciones, se llevaron a cabo una serie de ensayos en el laboratorio. En total se realizaron seis casos distintos, en los que se modificaba la temperatura de entrada de agua caliente al intercambiador y el tipo de flujo con el que éste trabajaba.

En los apartados de este capítulo se explica el equipo utilizado y el procedimiento seguido durante los ensayos. Los resultados se pueden ver en el Anexo C.1

3.2. Equipo

El equipo utilizado consta de un **intercambiador de carcasa y tubos** de la marca Edibon, formado por tubos de acero inoxidable (figura 3.1). El agua caliente circula por el interior de los tubos y el agua fría por el espacio entre la carcasa y los tubos. Cuenta con cuatro deflectores en su interior para modificar la corriente de agua fría y así aumentar la transferencia de calor entre los fluidos.

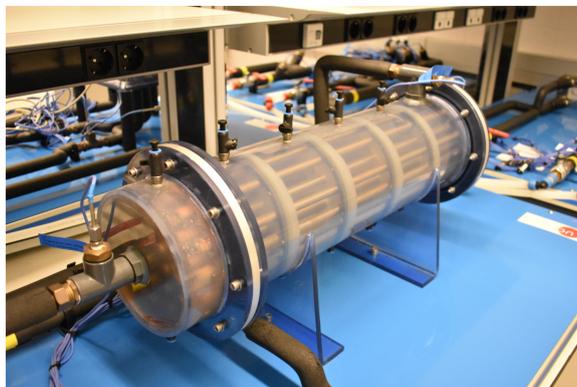


Figura 3.1: Intercambiador de carcasa y tubos Edibon.

El intercambiador se encuentra acoplado a una **unidad base y de servicio**, que se encarga de calentar el agua y bombearla¹ (figura 3.2). En esta unidad se encuentra un depósito de 30 litros en el que se almacena y calienta el agua por medio de una resistencia eléctrica de 3000 W (figura 3.3). El bombeo lo realiza una bomba centrífuga controlada desde el ordenador.



Figura 3.2: Unidad base.

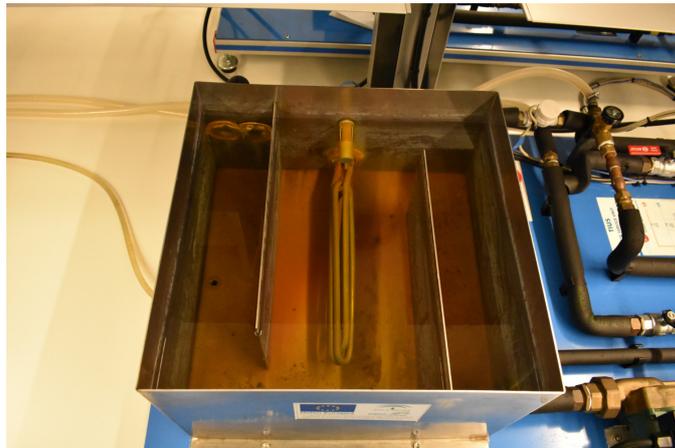


Figura 3.3: Resistencia interior del depósito.

Las válvulas de bola dispuestas en la unidad base permiten modificar la entrada y salida del agua fría. Según su posición, el intercambiador funcionará con flujo en contracorriente (figura 3.4) o en paralelo (figura 3.5).

¹Bombee el agua caliente. El agua fría entra al intercambiador mediante una conexión directa con una toma de agua de la red.



Figura 3.4: Válvulas dispuestas para flujo en contracorriente.



Figura 3.5: Válvulas dispuestas para flujo en paralelo.

En siete puntos se encuentran situados unos **sensores de temperatura**. Éstos, junto con dos medidores de caudal, son los que facilitan las medidas al programa de control a través de una **caja de interfaz de control** (figura 3.6).

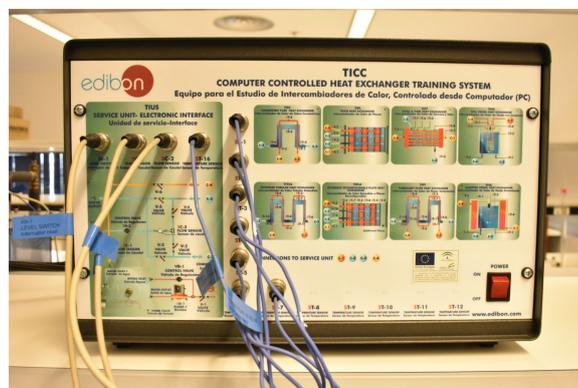


Figura 3.6: Caja de interfaz de control.

En la figura 3.7 se puede ver un esquema del montaje.

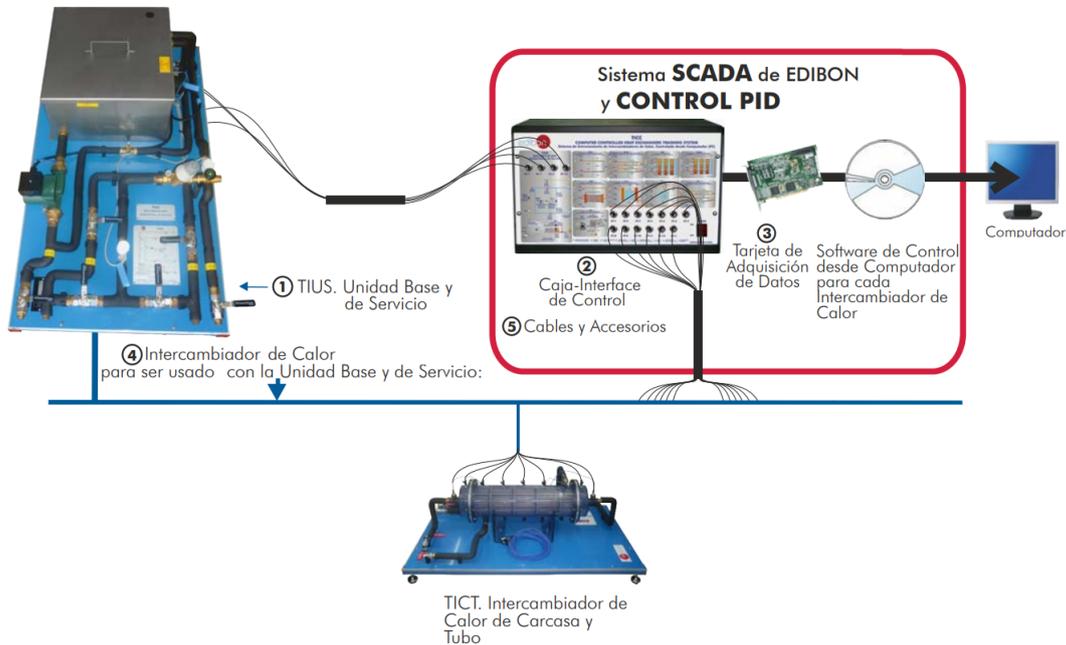


Figura 3.7: Esquema del montaje [7].

El **programa de control** (figura 3.8) permite modificar el caudal de impulsión de agua caliente y la temperatura del depósito. También facilita la lectura de las medidas de los sensores de temperatura y de los caudalímetros, así como el cálculo de una serie de parámetros relacionados con el intercambiador.

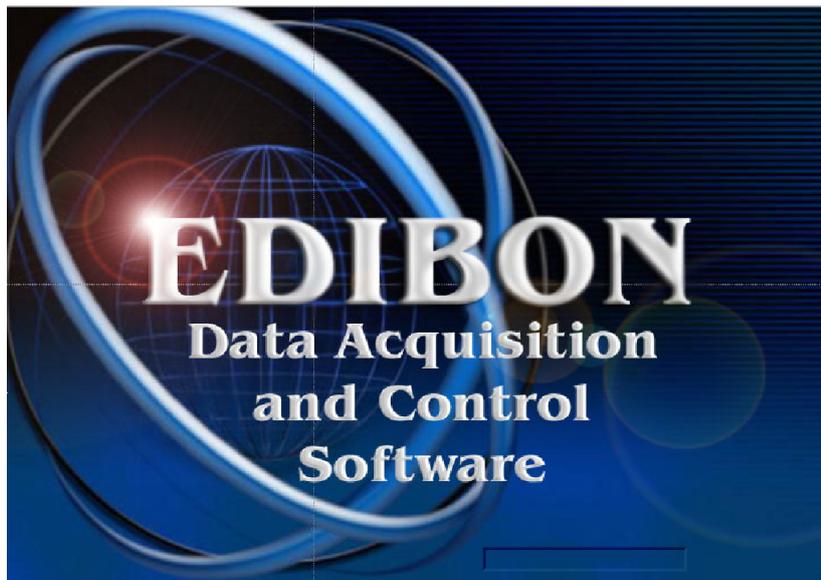


Figura 3.8: Ventana de inicio del programa de control y adquisición y manejo de datos.

3.3. Procedimiento

Los ensayos se han realizado para seis situaciones distintas de funcionamiento del intercambiador. En cada una se fijaba el tipo de flujo en su interior y la temperatura del agua caliente dentro del depósito².

La temperatura ambiental se fijó en 24 °C por medio del sistema de aire acondicionado instalado en el laboratorio. El caudal de impulsión de agua caliente se fija en todos los ensayos en $3 \frac{l}{min}$ y el de agua fría en $1,5 \frac{l}{min}$. La temperatura de agua fría es la propia de la red, con un valor medio entre 27 °C y 28 °C. Estos datos se pueden ver en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Parámetros de los ensayos.

$V_{h,i}$	$3 \frac{l}{min}$
$V_{c,i}$	$1,5 \frac{l}{min}$
$T_{c,i}$	27 - 28 °C
T_{∞}	24 °C

De cada caso se llevaron a cabo tres ensayos, tomando como valores finales la media. Por tanto, se tienen los datos de un total de dieciocho ensayos.

A continuación se describen de forma general los pasos seguidos para la preparación de los ensayos. Este procedimiento busca establecer unas condiciones iniciales comunes en todos los ensayos, así como un tiempo de funcionamiento razonable que permita considerar que éstos son independientes entre sí³:

- Cerrar la válvula de entrada de agua fría y fijar la temperatura del depósito en 40 °C, 50 °C o 60 °C, dependiendo del ensayo. Esperar a que el agua del depósito llegue a la temperatura establecida y una vez que lo haga, activar la bomba de agua caliente. Hacer circular sólo el agua caliente durante 5 minutos.
- Una vez pasados los 5 minutos, abrir la válvula de agua fría para que circule un caudal de $1,5 \frac{l}{min}$. Aquí comienza el ensayo, que durará 15 minutos.
- Al transcurrir los 15 minutos del ensayo, apagar la bomba de agua caliente y hacer circular el agua fría durante 5 minutos. Volver al primer punto para comenzar un nuevo ensayo.

²De ahora en adelante se va a designar cada caso por la temperatura a la que se fijaba el agua caliente en el depósito (40 °C, 50 °C o 60 °C) y el tipo de flujo en el intercambiador (contracorriente o paralelo).

³Esto es, que la temperatura que ha alcanzado el intercambiador en un ensayo no influya en las medidas del siguiente.

3.3.1. Comienzo del ensayo

Abrir el programa de control en el ordenador. Al iniciarlo aparecerá un **menú de selección** del tipo de equipo que se está utilizando. Seleccionar **TICT⁴** (figura 3.9).

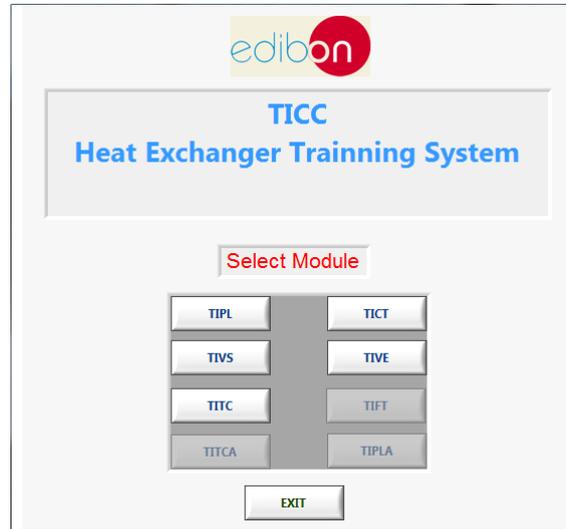


Figura 3.9: Menú de selección del tipo de intercambiador.

A continuación, se abrirá la **ventana principal** (figura 3.10). Pulsar sobre **START** en el panel lateral izquierdo y después, seleccionar con el botón amarillo del panel lateral derecho, según el tipo de ensayo, contracorriente (change to countercurrent) o paralelo (change to parallel).

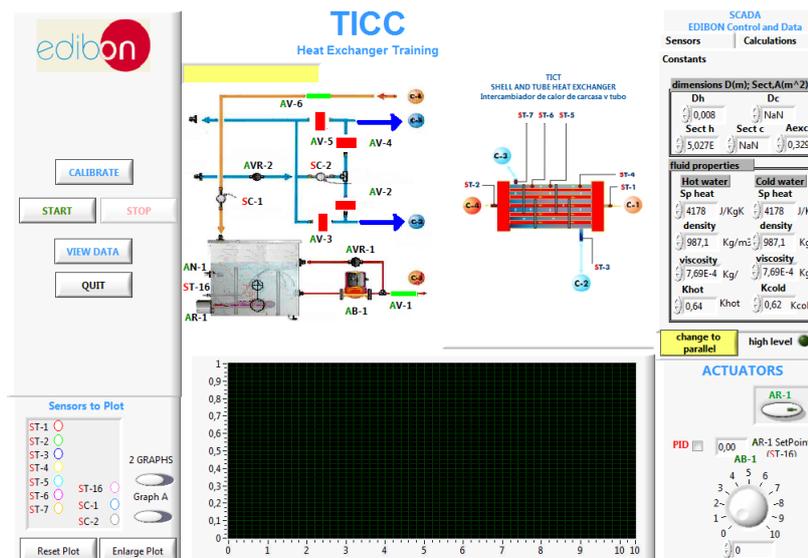


Figura 3.10: Ventana principal.

⁴De Intercambiador de Calor de Carcasa y Tubo.

El tipo de ensayo que está activo se puede ver en la etiqueta amarilla del panel central (figura 3.11).

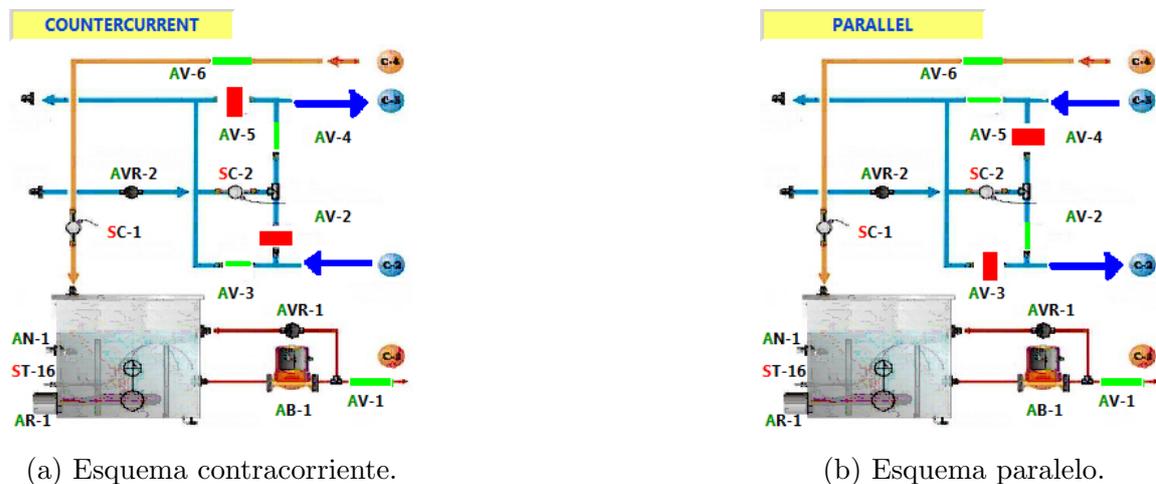


Figura 3.11: Esquemas de los tipos de flujo en el programa de control.

Comprobar que las válvulas del equipo están dispuestas de acorde al ensayo que se vaya a realizar (contracorriente o paralelo).

Pulsar sobre la casilla de **PID**, en el panel lateral izquierdo, para activar el control por PID⁵. En el recuadro justo de al lado introducir la **temperatura** a la que se quiere fijar el agua caliente del interior del depósito.

En el recuadro de **dimensions**, dentro de la pestaña de **Constants**, se deben introducir algunos de los parámetros geométricos del intercambiador. En el recuadro de D_c introducir **0,148** (m) y en el de **Sect c**, **17, 203E - 3** (m^2), que se corresponden con el diámetro y la sección interna del tubo exterior.

Para activar la bomba de agua caliente, hacer girar el botón con forma de rueda situado en la esquina inferior derecha del panel lateral derecho.

3.3.2. Toma de datos

En cada ensayo se han realizado dos tomas de datos. Una al comienzo, justo antes de comenzar la cuenta de los 15 minutos explicada en el apartado 3.3 y otra al pasar los 15 minutos de duración del mismo.

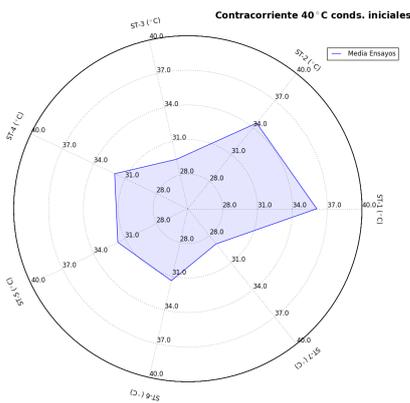
Como algunos parámetros oscilan entre un máximo y un mínimo, se anotaron ambos extremos y se consideró el valor medio como el válido.

⁵Controlador *Proporcional - Integral - Derivativo*.

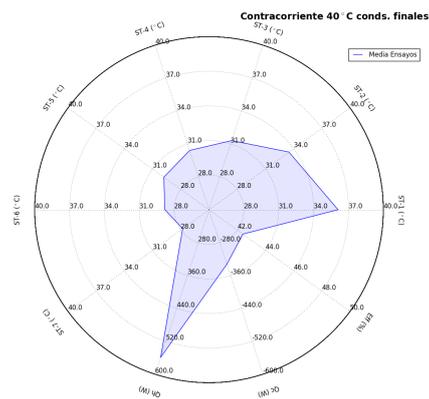
3.4. Resultados

Los valores obtenidos en la toma de datos se pueden ver en el Anexo C.1, tanto en forma de gráficas (apartado C.1.1) como de tablas (apartado C.1.2).

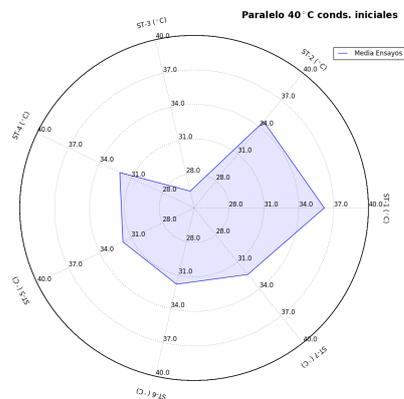
A modo de ejemplo, se muestran los valores medios de los tres ensayos a 40 °C con el flujo en contracorriente (figuras 3.12a y 3.12b) y en paralelo (figuras 3.12c y 3.12d). Los valores medios del resto de los ensayos se pueden ver en las figuras C.8 a la C.13.



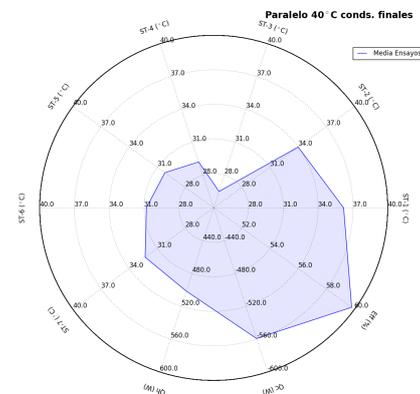
(a) Flujo en contracorriente. Condiciones iniciales.



(b) Flujo en contracorriente. Condiciones finales.



(c) Flujo en paralelo. Condiciones iniciales.



(d) Flujo en paralelo. Condiciones finales.

Figura 3.12: Medias de las lecturas en los tres ensayos a 40 °C.

Las gráficas mostradas en las figuras C.2 a la C.7 representan de forma conjunta los datos de las condiciones iniciales y finales de los tres ensayos realizados en cada caso. Cuanto más parecidas sean las áreas delimitadas por los datos, mejor será la calidad de los ensayos. Esto, además, demuestra la conveniencia de aplicar los procedimientos planteados en el punto 3.3.

En la figura 3.13 se puede ver la posición y el nombre de los sensores dispuestos en el intercambiador.

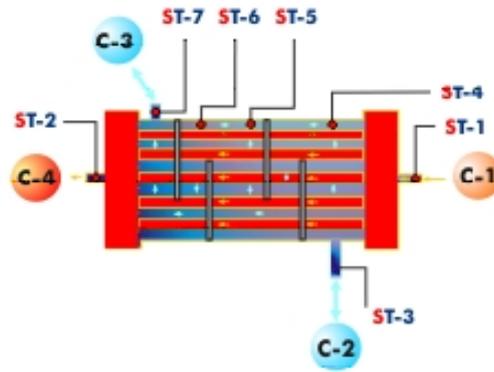


Figura 3.13: Posición y nombre de los sensores en el intercambiador.

En la tabla 3.2 se puede ver la correspondencia entre las variables estudiadas y los sensores de la maqueta que proporcionan sus medidas en los ensayos experimentales.

Tabla 3.2: Correspondencia entre variables y los sensores de la maqueta del intercambiador.

<i>Variable</i>	<i>Contrac.</i>	<i>Paralelo</i>
$T_{h,i}$	ST-1	ST-1
$T_{c,i}$	ST-7	ST-3
$T_{h,o}$	ST-2	ST-2
$T_{c,o}$	ST-3	ST-7
T_1	ST-4	ST-4
T_2	ST-5	ST-5
T_3	ST-6	ST-6

Cabe destacar que el software de control utilizado calcula dos eficiencias distintas. La primera, la designa como **Eff** y la segunda como **Eff_{NTU}**, pudiéndose calcular con las expresiones 3.1 y 3.2 respectivamente:

$$Eff = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{Q}_{m\acute{a}x}} \quad (3.1)$$

$$Eff_{NTU} = \frac{\dot{Q}_h}{\dot{Q}_{m\acute{a}x}} \quad (3.2)$$

Para calcular $\dot{Q}_{m\acute{a}x}$ se puede aplicar la ecuación 2.24 y para el cálculo de \dot{Q}_h y \dot{Q}_c , la ecuación 2.6. El cálculo del NTU no se ha llevado a cabo de manera teórica debido a la dificultad de encontrar ábacos y gráficas que se ajusten al intercambiador analizado en el presente trabajo.

Capítulo 4

Simulación térmica con Flow Simulation

4.1. Procedimiento

En primer lugar, utilizando como modelo para las simulaciones el obtenido según el Anexo A, se calcula de manera teórica el **coeficiente de convección exterior medio** y, a continuación, se realiza una serie de **simulaciones externas** para obtenerlo de manera simulada. Una vez obtenido siguiendo estos dos métodos, se escoge uno de los dos coeficientes de convección exterior.

En segundo lugar, se determina el **nivel de malla básica** a utilizar en las simulaciones finales. Éstas serán **simulaciones internas**, de manera que no se modelará el aire que rodea al intercambiador, lo que permitirá aumentar el nivel de refinado de la malla sin aumentar excesivamente el tiempo de cálculo. Para tener en cuenta la convección externa, se define una condición de contorno de convección entre las paredes exteriores del intercambiador y el aire que lo rodea utilizando el coeficiente de convección medio escogido anteriormente.

Por último, tomando como condiciones de entrada al intercambiador los datos de los ensayos llevados a cabo en el laboratorio (ver capítulo 3), se realizan las simulaciones correspondientes a los seis casos ensayados. A continuación, así como en las figuras 4.1 y 4.2, se puede ver de manera esquemática el procedimiento seguido.

I) Simulaciones externas

- 1) Coeficiente de convección exterior \rightarrow Elección de \bar{h}_{ext} .
 - a) Teórico.
 - b) Simulación.

II) Simulaciones internas

- 1) Estudio de convergencia de malla \rightarrow Elección del nivel de malla básica.
- 2) Simulaciones finales.

SIMULACIONES EXTERNAS

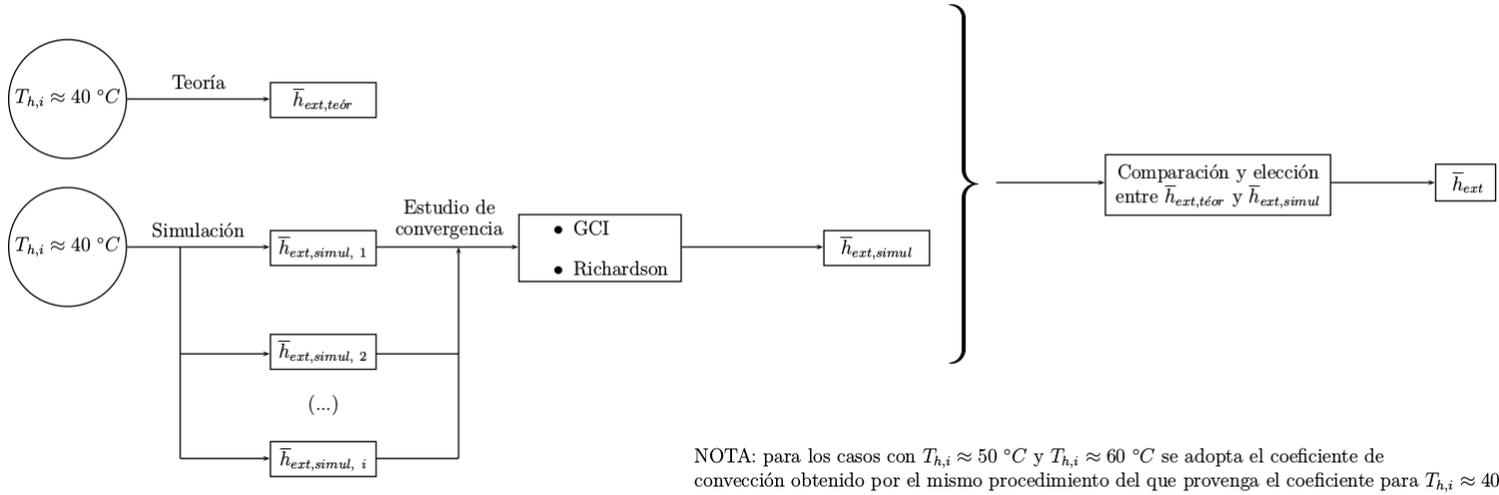


Figura 4.1: Procedimiento seguido en las simulaciones externas.

SIMULACIONES INTERNAS

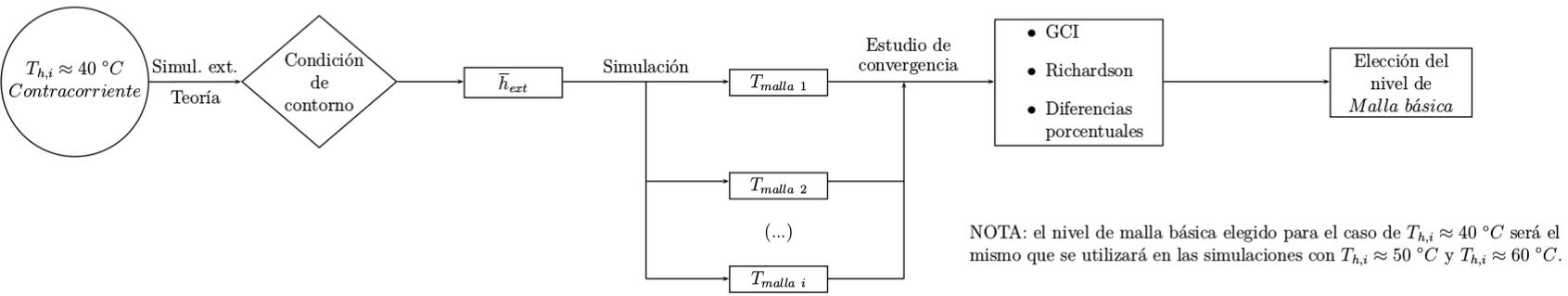


Figura 4.2: Procedimiento seguido en las simulaciones internas.

4.2. Cálculo del coeficiente de convección exterior \overline{h}_{ext}

4.2.1. Determinación del coeficiente de convección de manera teórica

El cálculo teórico del coeficiente de convección se basa en el uso de los números adimensionales de Prandtl (Pr), Grashof (Gr), Rayleigh (Ra) y Nusselt (Nu).

Para la determinación de estos adimensionales se han hecho una serie de consideraciones:

- Temperatura ambiental, lejos de la superficie (T_∞), de 24 °C.
- La temperatura de la superficie se ha supuesto como la media entre la temperatura de entrada del agua caliente y la de entrada del agua fría¹.
- La temperatura a la que se han buscado las propiedades del aire es la media entre la temperatura de la superficie (T_s) y la temperatura ambiental. Esta temperatura es la temperatura media de la capa límite o temperatura de película (T_f) [5]².
- La gravedad (g) tiene un valor de 9,81 $\frac{m}{s^2}$.

El número de Prandtl se obtiene interpolando en [6]³, así como la conductividad térmica (k) y la viscosidad cinemática (ν).

El número de Grashof se calcula mediante la expresión 4.1:

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (4.1)$$

donde $\frac{1}{T_f}$ es el coeficiente de expansión térmica volumétrica [6]⁴ y L la longitud característica del intercambiador, en este caso el diámetro exterior, con un valor de 0,16 m.

El número de Rayleigh es el producto del número de Grashof y de Prandtl (ecuación 4.2):

$$Ra = Gr Pr \quad (4.2)$$

Para calcular el número de Nusselt, donde el subíndice D indica que se calcula para un cilindro, se aplica la ecuación 4.3, obtenida de [5]⁵. Esta expresión proporciona el número de

¹Obtenidas de los ensayos en el laboratorio. Se han considerado las temperaturas de entrada de flujo en contracorriente por ser prácticamente iguales a las de flujo en paralelo.

²Ecuación 7.2, pág. 348.

³Tabla A-15, pág. 884.

⁴Ecuación 9-6, pág. 522.

⁵Ecuación 9.33, pág. 501.

Nusselt promedio sobre la superficie de un cilindro:

$$\overline{Nu}_D = C Ra_D^n \quad (4.3)$$

donde $C = 0,48$ y $n = 0,25$ son dos constantes obtenidas de [5]⁶ (ver tabla 4.1).

Tabla 4.1: Constantes de la ecuación 4.3 para convección libre sobre un cilindro circular horizontal [5].

Ra_D	C	n
$10^{-10} - 10^{-2}$	0,675	0,058
$10^{-2} - 10^2$	1,02	0,148
$10^2 - 10^4$	0,850	0,188
$10^4 - 10^7$	0,480	0,250
$10^7 - 10^{12}$	0,125	0,333

Una vez calculado el número de Nusselt, se puede despejar el coeficiente de convección medio (\bar{h}) de la ecuación 4.4:

$$\overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}D}{k} \quad (4.4)$$

En la tabla 4.2 se muestran los resultados del cálculo teórico del coeficiente de convección.

⁶Tabla 9.1, pág. 501.

Tabla 4.2: Cálculo teórico de \bar{h}_{ext} para distintas temperaturas de entrada en contracorriente.

	40 °C	50 °C	60 °C
Entrada caliente (°C)	36,1	44,5	52,6
Entrada fría (°C)	27,8	27,7	29,1
T_s (°C)	31,95	36,1	40,85
T_∞ (°C)	24	24	24
T_f (°C)	27,975	30,05	32,425
Pr	0,72877	0,72819	0,72752
Gr	4.201.472	6.201.732	8.329.196
β ($\frac{1}{K}$)	$3,32088 \cdot 10^{-3}$	$3,298153 \cdot 10^{-3}$	$3,272519 \cdot 10^{-3}$
v ($\frac{m^2}{s}$)	$1,589 \cdot 10^{-5}$	$1,608 \cdot 10^{-5}$	$1,631 \cdot 10^{-5}$
Ra	3.061.906	4.516.039	6.059.657
Nu	20,079	22,127	23,815
k ($\frac{W}{mK}$)	0,02573	0,02588	0,02606
\bar{h}_{ext} ($\frac{W}{m^2K}$)	3,229	3,579	3,879

4.2.2. Determinación del coeficiente de convección mediante simulación

Siguiendo el procedimiento detallado en el apartado B.2 del Anexo B, para determinar el coeficiente de convección exterior mediante simulación⁷, se obtienen los resultados mostrados en la tabla 4.3.

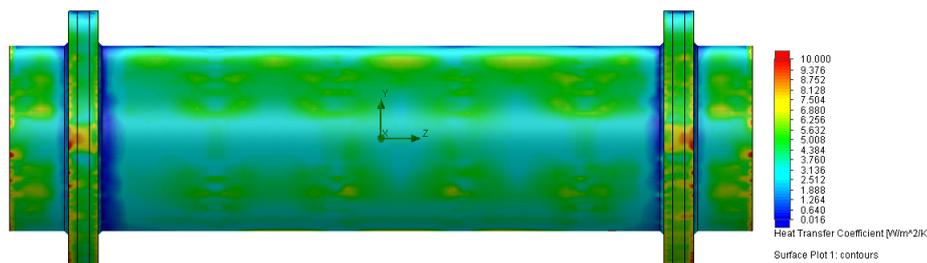


Figura 4.3: Distribución de \bar{h}_{ext} en la simulación de 40 °C, a contracorriente y nivel 3 de malla básica.

En el apartado C.2.1 del Anexo C se encuentran el resto de figuras en las que se puede

⁷Los resultados de las simulaciones para el caso de flujo en paralelo se han calculado de forma análoga al caso de flujo en contracorriente, pero cambiando las condiciones de entrada fría y la de salida fría entre sí (ver apartado B.2.6), con los valores correspondientes de las temperaturas de entrada y salida para el caso de flujo en paralelo.

ver la distribución de \bar{h}_{ext} al igual que en la figura 4.3.

Tabla 4.3: Datos de las simulaciones de tipo externo en función del nivel de la malla básica.

40 °C		
	<i>N° elementos</i>	$\bar{h}_{ext} \left(\frac{W}{m^2K} \right)$
<i>Contracorriente</i>		
<i>Nivel 1</i>	142.354	3,976
<i>Nivel 2</i>	96.744	3,864
<i>Nivel 3</i>	199.588	3,898
<i>Nivel 4</i>	173.533	3,846
<i>Nivel 5</i>	234.185	3,858
<i>Nivel 6</i>	1.693.592	3,514
<i>Paralelo</i>		
<i>Nivel 1</i>	142.354	3,894
<i>Nivel 2</i>	96.744	3,764
<i>Nivel 3</i>	199.588	3,826
<i>Nivel 4</i>	173.533	3,757
<i>Nivel 5</i>	234.185	3,761

4.2.2.1. Estudio de convergencia de \bar{h}_{ext}

Los resultados mostrados en la tabla 4.3 se corresponden para distintos tamaños de malla. Se puede ver que los resultados no son iguales, de manera que hace falta estimar cómo es la calidad de las mallas y cuál sería el resultado para una malla cuyo tamaño medio tendiera a cero.

El **GCI** (Grid Convergence Index) [9] se trata de un parámetro que cuantifica el nivel de convergencia de la malla y proporciona un intervalo de error en el que se supone que está la solución considerada como real. Por otro lado, la **extrapolación de Richardson** consiste en un método para estimar el valor de una variable en el que caso de que se simulara con un tamaño de malla que tiende a cero.

Para el cálculo tanto del GCI como de la extrapolación de Richardson se requiere disponer de un tamaño de elemento. Dicho tamaño es el de los elementos que conforman la malla con la que se estén realizando las simulaciones. En el caso de las simulaciones de este trabajo, no se cuenta con un tamaño de elemento constante para toda la malla, ya que se busca optimizar la misma disminuyendo el tamaño de los mismos en las zonas en las que se requiere un mayor nivel de detalle. La solución propuesta ha sido considerar un *tamaño*

medio de elemento ($\bar{x}_{elemento}$) obtenido de la división entre el volumen del dominio computacional y el número de elementos (expresión 4.5):

$$\bar{x}_{elemento} = \sqrt[3]{\frac{V_{dominio, computacional}}{n_{elementos}}} \quad (4.5)$$

El resultado del cálculo del GCI y el valor de la extrapolación de Richardson, para las simulaciones del coeficiente de convección exterior con una entrada de agua caliente a 40 °C en contracorriente se puede ver en la figura 4.4.

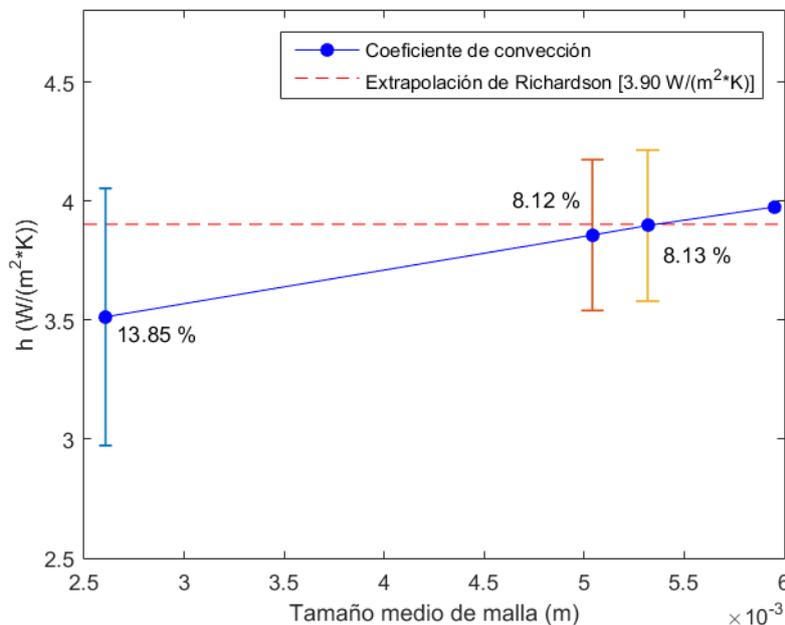


Figura 4.4: GCI y extrapolación de Richardson de \bar{h}_{ext} . Contracorriente con $T_{h,i} = 40$ °C.

En la figura 4.5 se muestra en la misma gráfica los resultados de las simulaciones con una entrada de agua caliente a 40 °C en contracorriente y en paralelo. Se puede ver cómo el valor del coeficiente de convección exterior es muy similar en el caso de contracorriente y en el de flujo en paralelo, además de seguir la misma tendencia. Por esta razón en este trabajo se ha hecho la consideración de que el valor del coeficiente de convección exterior, a igualdad de temperaturas de agua en la entrada, es el mismo para el caso de flujo en contracorriente y en paralelo.

El valor del coeficiente de convección exterior, estimado a partir de los datos de las simulaciones para una entrada de agua caliente a 40 °C tanto a contracorriente como en paralelo, es de **3,90 $\frac{W}{m^2 K}$** .

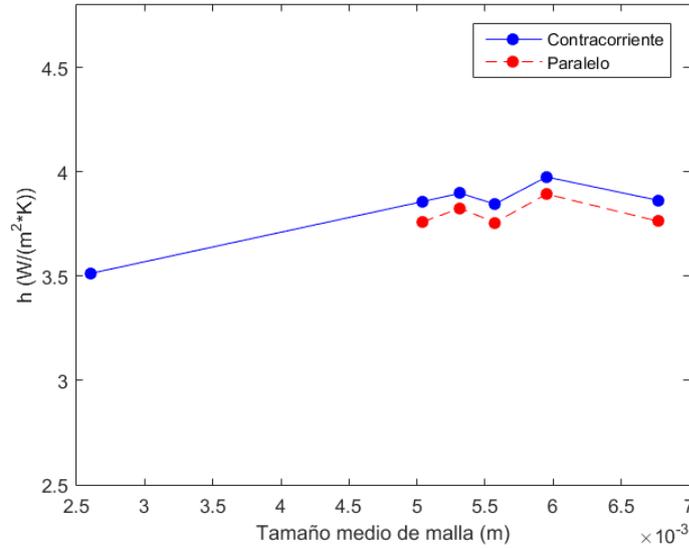


Figura 4.5: Comparación \bar{h}_{ext} en contracorriente y paralelo con $T_{h,i} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.2.3. Asignación del coeficiente de convección exterior \bar{h}_{ext}

En el apartado 4.2.1 se calcula el valor del coeficiente de convección exterior de **manera teórica**. Los casos considerados son para unas temperaturas de entrada de agua caliente de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se hace la suposición de que el coeficiente de convección es similar para los casos de flujo en contracorriente y paralelo. Esta suposición se ve respaldada por los valores de las simulaciones (ver figura 4.5). Los resultados teóricos se pueden ver en la tabla 4.2, teniendo el coeficiente de convección exterior, para el caso de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, un valor de un valor de $3,229\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$.

En el apartado 4.2.2 se estima, mediante diversas **simulaciones**, este mismo coeficiente para el caso de una temperatura de entrada de agua caliente de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ en contracorriente y en paralelo. Tras calcular el GCI y el valor de la extrapolación de Richardson [9] se estima un coeficiente de convección exterior de $3,90\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$.

La convección que está teniendo lugar entre el exterior de la carcasa y el ambiente se trata de *convección natural*, cuyos valores del coeficiente de convección son relativamente pequeños [6], Tabla 1-5, pág. 26. Se puede ver que el valor estimado con las simulaciones es *similar* al calculado de manera teórica (ver tabla 4.3). Por lo tanto, se va a considerar en el resto de simulaciones que el valor del coeficiente de convección exterior se corresponde con el **valor teórico** calculado en el apartado 4.2.1. Los coeficientes de convección exterior adoptados para las simulaciones finales quedan reflejados en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Valor de \bar{h}_{ext} adoptado para las futuras simulaciones.

	$40\text{ }^{\circ}\text{C}$	$50\text{ }^{\circ}\text{C}$	$60\text{ }^{\circ}\text{C}$
$\bar{h}_{ext, asig.} (\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}})$	3,229	3,579	3,879

4.3. Convergencia de malla

Las simulaciones finales del intercambiador se realizan para los seis casos ensayados en el laboratorio y se tratan de **simulaciones internas**, de ahí el cálculo del coeficiente de convección exterior en el apartado 4.2.

El estudio de convergencia de malla se realiza para el caso de flujo en contracorriente con una entrada de agua caliente a 40 °C. Con los datos del estudio se selecciona un tamaño de malla⁸ común, que será el utilizado en todos los casos de las simulaciones finales (ver figura 4.2). El procedimiento seguido para realizar las simulaciones queda descrito en el apartado B.3 del Anexo B.

Una vez realizadas las simulaciones para el estudio de convergencia modificando el nivel de la malla básica (ver apartado B.2.8), se procede a calcular el GCI y la extrapolación de Richardson con los valores de las temperaturas de los sensores en el modelo del intercambiador. Los valores de las temperaturas de las simulaciones se pueden ver en la tabla 4.5 así como los valores del cálculo del GCI y de la extrapolación de Richardson, que se pueden ver en las gráficas de la figura 4.6.

Tabla 4.5: Datos de las simulaciones internas del estudio de convergencia de malla.

	40 °C					
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
<i>Contracorriente</i>						
<i>Nivel 1</i>	47.334	34,95	29,97	29,43	29,07	28,66
<i>Nivel 2</i>	65.414	34,88	30,12	29,47	29,15	28,70
<i>Nivel 3</i>	136.782	34,73	30,47	29,80	29,36	28,86
<i>Nivel 4</i>	249.831	34,71	30,53	29,80	29,40	28,92
<i>Nivel 5</i>	360.759	34,65	30,81	30,09	29,60	29,15

A: Número de elementos

B: Temperatura salida agua caliente (°C)

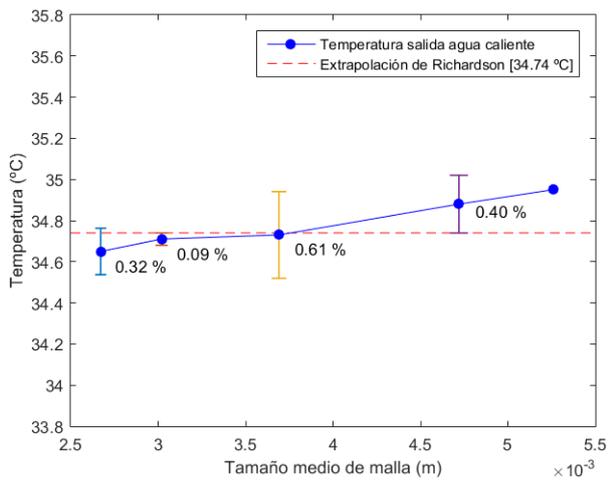
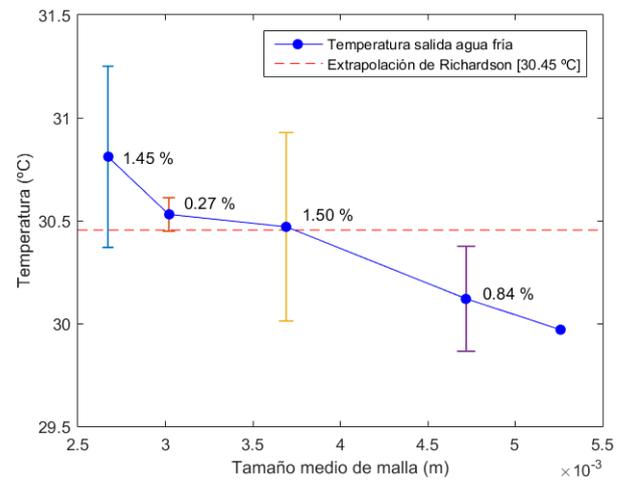
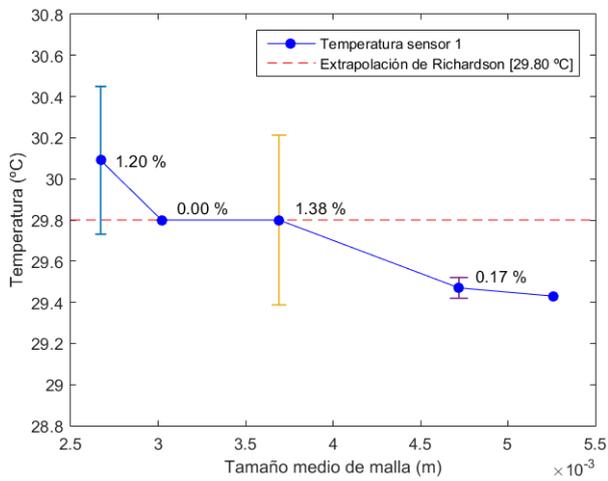
C: Temperatura salida agua fría (°C)

D: Temperatura sensor 1 (°C)

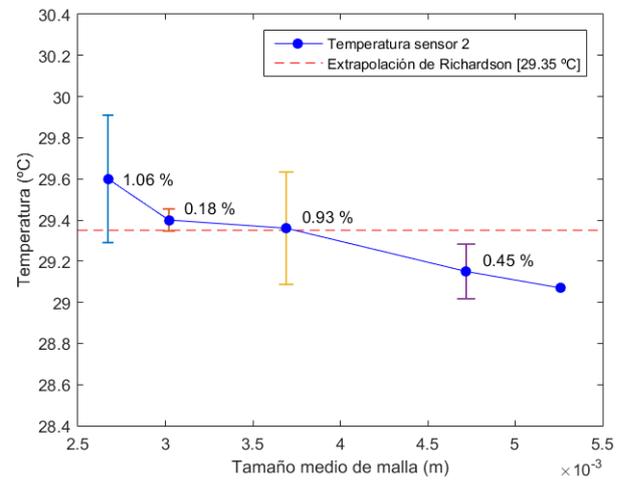
E: Temperatura sensor 2 (°C)

F: Temperatura sensor 3 (°C)

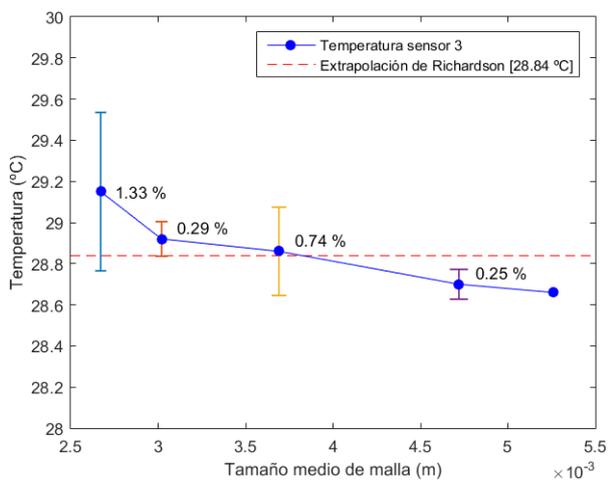
⁸En este trabajo se selecciona el tamaño de malla de forma indirecta, ya que lo que se definirá realmente será el nivel de la malla básica (ver apartado B.2.8).

(a) Temperatura sensor salida agua caliente ($T_{h, o}$).(b) Temperatura sensor salida agua fría ($T_{c, o}$).

(c) Temperatura sensor 1.



(d) Temperatura sensor 2.



(e) Temperatura sensor 3.

Figura 4.6: GCI y extrapolación de Richardson de las temperaturas de los sensores del intercambiador. Contracorriente con $T_{h,i} = 40$ °C.

Otro parámetro que resulta útil a la hora de seleccionar un nivel de malla es la **diferencia porcentual del paso** de una malla a la siguiente, teniendo ésta última un nivel de refinado mayor (expresión 4.6).

$$(\bar{x}_{elemento})_{i+1} < (\bar{x}_{elemento})_i \quad (4.6)$$

Este parámetro se calcula según la ecuación 4.7, siendo f la variable de estudio (por ejemplo la temperatura).

$$diferencia (\%) = \frac{(f)_{i+1} - (f)_i}{(f)_{i+1}} \cdot 100 \quad (4.7)$$

En la tabla 4.6 se proporcionan los valores de las diferencias porcentuales ya mencionadas.

Tabla 4.6: Diferencias porcentuales, en valor absoluto, del paso de una malla a otra más fina.

	40 °C				
	A	B	C	D	E
Contracorriente					
Nivel 1 → Nivel 2	0,20	0,50	0,14	0,27	0,14
Nivel 2 → Nivel 3	0,43	1,15	1,11	0,72	0,55
Nivel 3 → Nivel 4	0,06	0,20	0	0,14	0,21
Nivel 4 → Nivel 5	0,17	0,91	0,96	0,68	0,79

A: Dif. en temperatura salida agua caliente (%)

B: Dif. en temperatura salida agua fría (%)

C: Dif. en temperatura sensor 1 (%)

D: Dif. en temperatura sensor 2 (%)

E: Dif. en temperatura sensor 3 (%)

Buscando un equilibrio entre tiempo de simulación y precisión en los resultados de la simulación, se considera que la malla con un **tamaño medio de elemento** de **3,7 mm** y una **malla básica** de **nivel 3** es la apropiada. Será la adoptada para realizar las simulaciones finales.

La distribución de temperaturas en el caso de flujo en contracorriente con $T_{h,i} \approx 40 \text{ °C}$ y una malla básica de nivel 3 se puede ver en la figura 4.7.

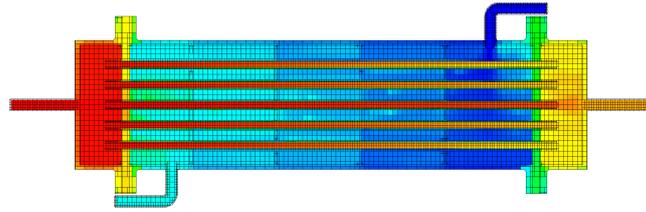


Figura 4.7: Malla nivel 3. Temperaturas en los elementos.

En las figuras C.20, C.21 y C.22, del Anexo C, se pueden ver los valores del resto de simulaciones junto con las mallas utilizadas.

4.4. Simulación térmica del intercambiador

Utilizando el nivel de malla básica seleccionado en el apartado 4.3, se han realizado las simulaciones de los seis casos de estudio. Como coeficientes de convección externa se han adoptado los expuestos en la tabla 4.4. Los resultados de las simulaciones se pueden ver en la tabla 4.7.

Tabla 4.7: Resultados de las simulaciones a 40 °C.

MALLA BÁSICA : nivel 3			
$\bar{x}_{elemento} = 3,7 \text{ mm}$	40 °C	50 °C	60 °C
\bar{h}_{ext}	$3,229 \frac{W}{m^2K}$	$3,579 \frac{W}{m^2K}$	$3,879 \frac{W}{m^2K}$
<i>Contracorriente</i>			
$T_{h,i}$	36,10	44,50	52,60
$T_{c,i}$	27,80	27,70	29,10
T_1	29,80	31,86	35,02
T_2	29,36	30,98	33,78
T_3	28,86	29,93	32,28
$T_{h,o}$	34,73	41,70	48,65
$T_{c,o}$	30,46	33,21	36,94
<i>Paralelo</i>			
$T_{h,i}$	36,20	44,40	52,80
$T_{c,i}$	26,50	27,00	27,30
T_1	28,02	29,77	31,54
T_2	28,46	30,56	32,57
T_3	28,95	31,48	33,94
$T_{h,o}$	34,69	41,63	48,71
$T_{c,o}$	29,49	32,48	35,47

Temperaturas en °C.

Utilizando los datos de la tabla 4.7 se puede obtener la *transferencia de calor máxima*, la *eficiencia* del intercambiador y la *transferencia de calor real* (ver tabla 4.8). Para el cálculo de C_h y C_c se ha asumido⁹ un valor de la densidad del agua de $0,987 \frac{kg}{l}$ y un calor específico de $4,178 \frac{J}{kg \cdot K}$.

En la figura 4.8 se puede ver la distribución de temperaturas y de velocidades en el intercambiador. El caso mostrado es el correspondiente con una temperatura de 40 °C en el

⁹Son los valores que utiliza el software de control de Edibon para realizar los cálculos.

Tabla 4.8: Resultados de las simulaciones a 40 °C.

MALLA BÁSICA : nivel 3			
$\bar{x}_{elemento} = 3,7 \text{ mm}$	40 °C	50 °C	60 °C
Contracorriente			
$\dot{Q}_{m\acute{a}x} \text{ (W)}$	855,66	1731,95	2422,67
$\varepsilon \text{ (\%)}$	32,05	32,80	33,36
$\dot{Q} \text{ (W)}$	274,24	568,08	808,20
Paralelo			
$\dot{Q}_{m\acute{a}x} \text{ (W)}$	999,99	1793,80	2628,85
$\varepsilon \text{ (\%)}$	30,82	31,49	32,04
$\dot{Q} \text{ (W)}$	308,20	564,87	842,28

Ver ecuaciones 2.24 y 2.27 para el cálculo de $\dot{Q}_{m\acute{a}x}$ y \dot{Q} .

Ver ecuación 2.31 para el cálculo de ε .

$$C_h = 206,18 \frac{W}{K} \geq C_c = 103,09 \frac{W}{K}.$$

depósito. Como se ha comentado al comienzo del presente apartado, la malla básica utilizada, y por lo tanto mostrada, es de nivel 3.

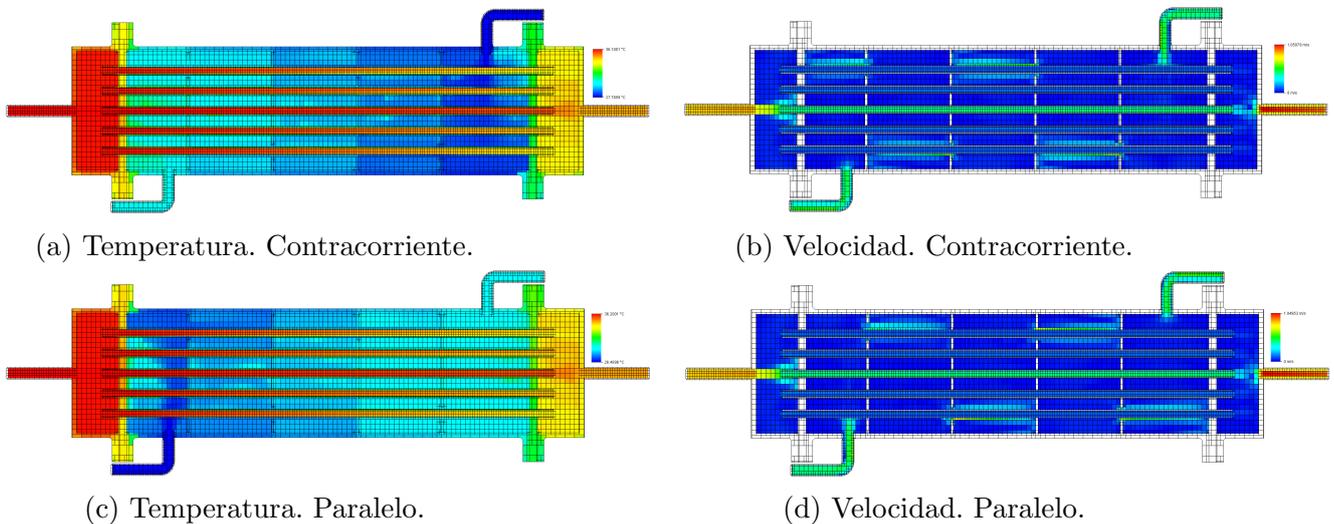


Figura 4.8: Distribución de temperaturas y velocidades en el intercambiador. Temperatura de entrada de agua caliente: 40 °C.

En la figura 4.9 se muestra la trayectoria del flujo de agua dentro del intercambiador también cuando la temperatura del depósito es de 40 °C. Se ve cómo los deflectores cumplen con su función, la de modificar el flujo del agua y hacer que se mueva de forma transversal a los tubos centrales. El color de las trayectorias está asignado en función de la temperatura del fluido.

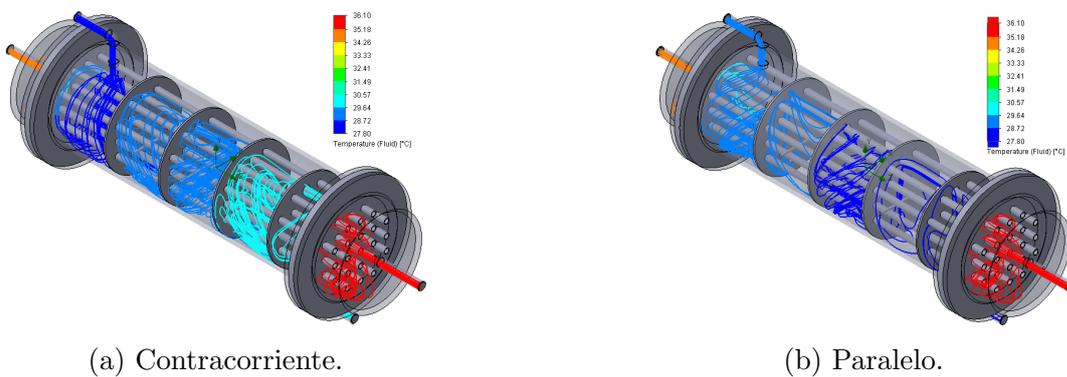


Figura 4.9: Trayectoria del agua dentro del intercambiador. Entrada de agua caliente a 40 °C.

Se puede apreciar cómo la velocidad en el tubo central es ligeramente superior a la velocidad en los demás tubos. Además, en las figuras 4.8b y 4.8d se pueden ver cuatro zonas en las que el flujo de agua aumenta de velocidad. Estos puntos son los orificios de los deflectores por los que se permite el paso del agua. Al disminuir la sección de paso, la velocidad del fluido debe aumentar.

Otro aspecto de las imágenes que llama la atención es el aumento de velocidad que experimenta el fluido caliente en el conducto de salida. La explicación de este efecto se encuentra en las turbulencias que surgen al disminuir de forma brusca la sección. La velocidad en estos puntos será algo mayor que en la zona antes de entrar en el conducto de salida.

En la figura 4.10 se puede ver una imagen obtenida de las simulaciones en la que se ve la *vorticidad* en un plano que corta transversalmente al intercambiador. Ésta tiene sus valores más altos en los estrechamientos de los deflectores y en la salida del agua caliente, produciendo así un máximo en las velocidades representadas en las figuras 4.8b y 4.8d.

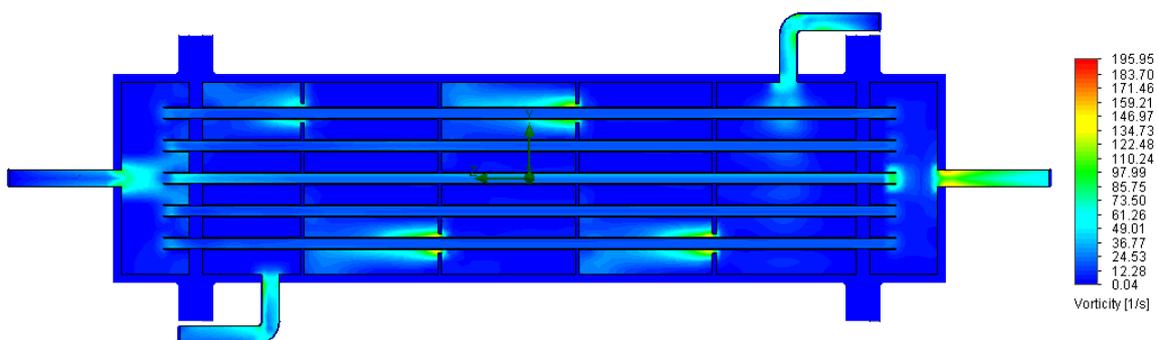


Figura 4.10: Representación de la vorticidad en el intercambiador.

En el Anexo C, apartado C.2.3, se pueden ver la figuras 4.8 y 4.9 con más detalle, además de las del resto de los casos simulados.

Capítulo 5

Comparación de resultados

En este capítulo se muestran los resultados de los ensayos y de las simulaciones de forma conjunta. Se comentan las similitudes y diferencias entre los mismos.

Tabla 5.1: Comparación de las temperaturas obtenidas en los ensayos experimentales y por simulación.

	40°C			50°C			60°C		
	<i>Ensayo</i>	<i>Sim.</i>	<i>Dif.</i>	<i>Ensayo</i>	<i>Sim.</i>	<i>Dif.</i>	<i>Ensayo</i>	<i>Sim.</i>	<i>Dif.</i>
<i>Contr.</i>									
$T_{h,i}$	36,10	36,10	-	44,50	44,50	-	52,60	52,60	-
$T_{c,i}$	27,80	27,80	-	27,70	27,70	-	29,10	29,10	-
$T_{h,o}$	33,50	34,73	3,67	39,00	41,70	6,92	45,70	48,65	6,46
$T_{c,o}$	31,30	30,46	2,68	36,20	33,21	8,26	42,00	36,94	12,05
T_1	30,40	29,80	1,97	34,60	31,86	7,92	39,50	35,02	11,34
T_2	29,80	29,36	1,48	33,10	30,98	6,40	37,40	33,78	9,68
T_3	28,80	28,86	0,21	31,00	29,93	3,45	34,40	32,28	6,16
<i>Paralelo</i>									
$T_{h,i}$	36,20	36,20	-	44,40	44,40	-	52,80	52,80	-
$T_{c,i}$	26,50	26,50	-	27,00	27,00	-	27,30	27,30	-
$T_{h,o}$	34,00	34,69	2,03	40,30	41,63	3,3	46,10	48,71	5,66
$T_{c,o}$	32,30	29,49	8,70	36,90	32,48	11,98	41,50	35,47	14,53
T_1	29,20	28,02	4,04	32,10	29,77	7,26	35,40	31,54	10,90
T_2	30,20	28,46	5,76	33,90	30,56	9,85	37,60	32,57	13,38
T_3	30,80	28,95	6,00	35,10	31,48	10,31	39,60	33,94	14,29

T (°C).

En la tabla 5.1 se muestran los valores de las temperaturas medidas en los ensayos junto con las calculadas en las simulaciones.

Se calcula la diferencia porcentual en valor absoluto (*Dif.*) respecto al valor medido en el ensayo. Este parámetro no se ha calculado para las temperaturas de entrada, ya que los valores para establecer las condiciones de entrada del intercambiador en las simulaciones se tomaron de los datos medidos en los ensayos.

Las temperaturas T_1 , T_2 y T_3 son las medidas con los tres sensores instalados a lo largo de la carcasa, siendo el sensor que mide T_1 el más cercano a la entrada de agua caliente.

Los datos de la tabla 5.1 se pueden ver de manera gráfica en la figura 5.1, donde se muestran las temperaturas medidas en los sensores que están dispuestos a lo largo del intercambiador de calor¹.

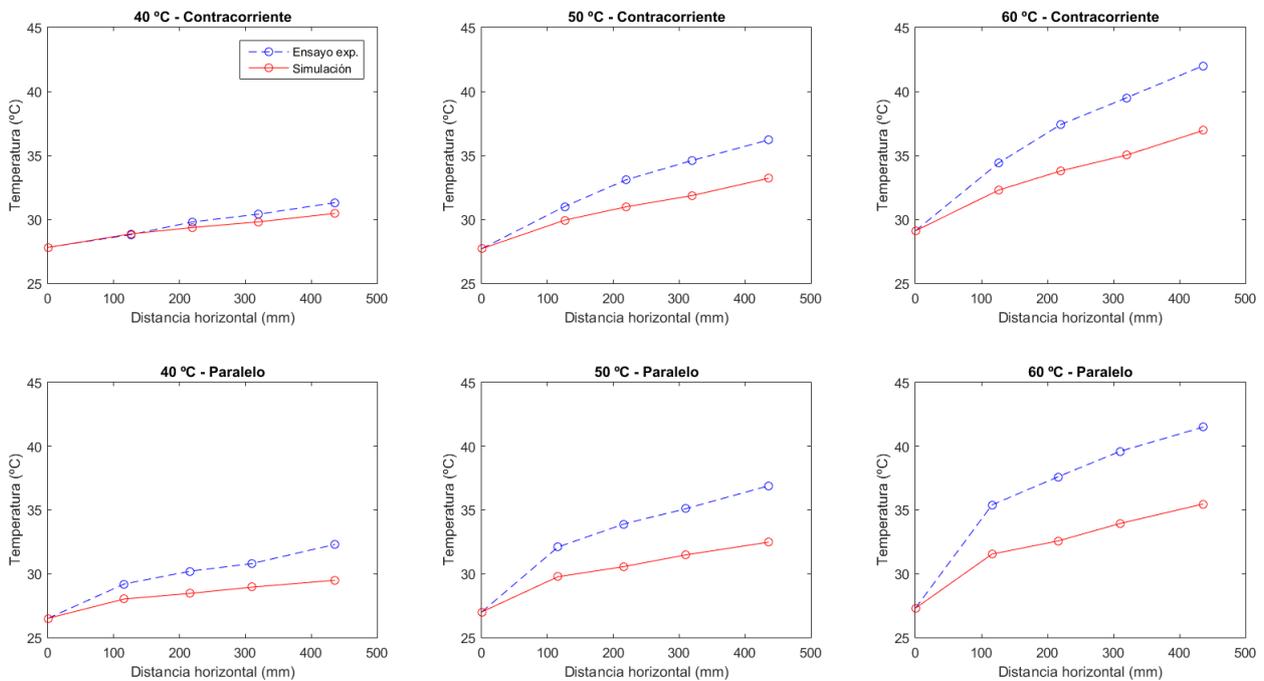


Figura 5.1: Comparación de las temperaturas obtenidas experimentalmente y mediante simulación.

Se puede observar que las mayores diferencias entre los ensayos y las simulaciones se dan para el caso de flujo en paralelo y con una temperatura de 60 °C en el depósito de agua caliente. Del mismo modo, se aprecia que las diferencias tienden a aumentar cuando el tipo de flujo es paralelo y cuando las temperaturas de entrada son mayores.

Una de las causas de estas diferencias se encuentra en los ensayos realizados en el laboratorio. Según aumentaba la temperatura del agua dentro del depósito, la bomba de agua

¹Estas temperaturas serán, por tanto, del agua que circula por el interior de la carcasa, es decir, del agua fría.

caliente disminuía el caudal de impulsión sin poder llegar a igualar en todo momento al caudal del resto de casos (ver figura 5.2). El caudal es un parámetro que se ha considerado constante en las simulaciones, por lo que las condiciones de funcionamiento en los ensayos difiere en mayor medida de las condiciones establecidas en las simulaciones.



Figura 5.2: Caudales de entrada de agua caliente y fría.

Otra causa del aumento de las diferencias porcentuales con la temperatura se debe a que al aumentar el gradiente de temperatura en el intercambiador, también aumenta el gradiente de temperatura entre los elementos que conforman la malla en las simulaciones. Una forma de evaluar con más precisión este cambio de temperatura a lo largo del modelo consistiría en aumentar el nivel de refinado de la malla, lo que llevaría parejo un aumento del tiempo de simulación, así como de recursos necesarios, en el equipo donde se estén llevando a cabo las simulaciones.

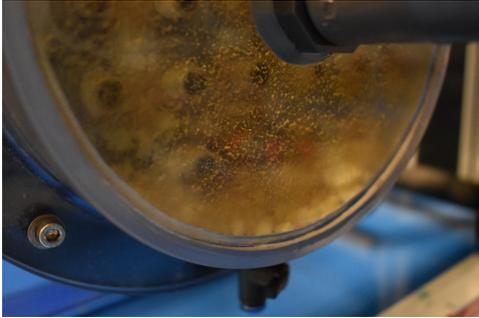
El gradiente de temperatura entre elementos de la malla es mayor cuanto mayor sea la temperatura del agua de entrada² y cuando el intercambiador está trabajando con el flujo en paralelo. Esto se debe a que en el mismo extremo del intercambiador se encuentran el agua con menor temperatura (entrada de agua fría) y el agua más caliente (entrada de agua caliente). Esta mayor diferencia de temperatura se puede ver en la figura 2.13 del capítulo 2.

La tercera causa radica en que el estudio de convergencia de malla se ha hecho para el caso de 40 °C en contracorriente, de hecho es el caso con las menores diferencias (ver tabla 5.1), y se consideró que en el resto de casos la misma malla permitiría obtener unos resultados de una calidad similar. Hacer esta consideración conlleva una agilización del proceso de simulación a costa de perder precisión en las simulaciones que se alejen más del caso de partida.

Por otro lado, los cálculos realizados por el software de control se hacen en base a las medidas de temperaturas y caudales en cada instante. Los caudales de agua caliente y fría que se han utilizado en las simulaciones han sido constantes, no cambian a lo largo de la misma, pero en los ensayos sí que lo hacen, tal y como se ha comentado antes, a pesar de el esfuerzo por mantenerlo constante. Esto influye en el cálculo de las capacidades caloríficas y, por tanto, en el cálculo de la eficiencia que proporciona el software de control.

²Ya que la temperatura de agua fría es prácticamente la misma en todos los casos.

Del mismo modo, el funcionamiento del intercambiador en el laboratorio está sujeto a parámetros que no se contemplan en las simulaciones, tales como suciedad dentro del propio intercambiador, producida por los depósitos del agua (ver figura 5.3a), así como a burbujas de aire atrapadas en el interior de la carcasa (figura 5.3b).



(a) Depósitos en el intercambiador.



(b) Aire dentro de la carcasa.

Figura 5.3: Parámetros no considerados en las simulaciones.

Capítulo 6

Conclusiones y líneas futuras de trabajo

6.1. Conclusiones

Realizados los ensayos en laboratorio y las simulaciones por ordenador, siguiendo los procedimientos expuestos en el presente trabajo, se puede llegar a las siguientes conclusiones tanto generales como específicas:

6.1.1. Conclusiones generales

- 1) A pesar de haber tomado las precauciones necesarias para eliminar en la mayor medida de lo posible la variabilidad entre los ensayos, ha resultado inevitable obtener diferencias entre los mismos.
- 2) Con un tamaño de malla menor se podrían haber obtenido unos resultados más precisos, a costa de aumentar en gran medida el tiempo de simulación y los recursos requeridos por el ordenador.
- 3) La aplicación del GCI y de la extrapolación de Richardson han resultado ser de gran utilidad para poder evaluar de manera objetiva el tamaño de malla que adoptar.
- 4) Se puede considerar SolidWorks como una herramienta adecuada para realizar el modelado del intercambiador. El complemento Flow Simulation, al estar integrado en SolidWorks, facilita el proceso de simulación. Se podrían haber obtenido unos resultados más acordes con la realidad si se hubiera utilizado un programa diseñado específicamente para realizar simulaciones, por ejemplo ANSYS.

6.1.2. Conclusiones específicas

- 1) La maqueta del intercambiador y el software de control, para temperaturas bajas de entrada de agua caliente, proporcionan unos datos consistentes entre sí. Cuando la temperatura de entrada aumenta, los datos entre ensayos con las mismas condiciones tienden a diferir ligeramente.

- 2) Los resultados obtenidos en las simulaciones se asemejan más a los de los ensayos cuando el flujo en el interior del intercambiador está en contracorriente que cuando está en paralelo. Del mismo modo, los resultados son más parecidos entre sí para temperaturas menores de entrada de agua caliente.
- 3) Las diferencias entre simulación y experimentación dan pie a pensar que se podrían realizar modificaciones en la simulación, en base a las diferencias obtenidas, para extrapolar los resultados a la realidad.

6.2. Líneas futuras de trabajo

En el presente apartado se plantea una serie de puntos, relacionados con este trabajo, que se podrían desarrollar más en profundidad:

- Análisis del perfil de velocidades y temperaturas a lo largo de los distintos tubos del intercambiador.
- Estudio de diferentes modelos de deflectores para mejorar la transferencia de calor.
- Optimización de la separación entre los tubos interiores para aumentar la transferencia de calor.
- Empleo de técnicas de mallado adaptativo para la simulación.
- Comparación de los resultados obtenidos en las simulaciones llevadas a cabo con diferentes programas de simulación.

Anexo A

Modelado geométrico

En este documento se detallan los pasos que se han llevado a cabo en SolidWorks para obtener la geometría completa del intercambiador objeto de estudio. La versión utilizada de SolidWorks es la 2016.

Se comenzará con el modelado de cada una de las partes que componen el intercambiador. A continuación, se ensamblarán las piezas que conforman el intercambiador completo y se realizarán las simplificaciones oportunas para preparar el modelo para el proceso de simulación. Este modelo servirá como base para realizar el estudio térmico.

A.1. Conceptos previos

Antes de empezar, se explicarán una serie de pasos previos al modelado.

Para mantener el modelo ordenado y claro, es recomendable renombrar las operaciones con nombres suficientemente descriptivos. Al comienzo de cada apartado se incluirá el nombre con que se ha guardado el archivo que se esté desarrollando. Se recomienda guardar periódicamente el archivo en el que se esté trabajando para evitar la pérdida de cualquier trabajo no guardado.

También se aconseja guardar todos los archivos .SLDPRT en la misma carpeta para que a la hora de hacer el ensamblaje queden todas las piezas ordenadas y organizadas. En este trabajo se va a seguir la siguiente estructura de carpetas para guardar los archivos:

- Una carpeta general llamada **Modelado Geométrico**.
- Dentro de esta carpeta se crea otra carpeta llamada **Geometría**. Aquí se guardarán todos los archivos de tipo pieza.
- Dentro de la carpeta **Modelado Geométrico**, y fuera de la carpeta **Geometría**, se guardará el archivo del ensamblaje.

En resumen:

- **Modelado Geométrico** > **Geometría** > (archivos tipo pieza)

- **Modelado Geométrico** > (archivo tipo ensamblaje)

A.1.1. Anclar menú superior

Por comodidad, se decide anclar el menú que aparece al pasar el cursor sobre la flecha situada en la esquina superior izquierda (figuras A.1 y A.2). Para ello, se pulsa sobre el dibujo que representa una chincheta. De esta forma el menú no se contraerá al pulsar sobre otro lugar de la pantalla y permanecerá siempre visible (figura A.3).

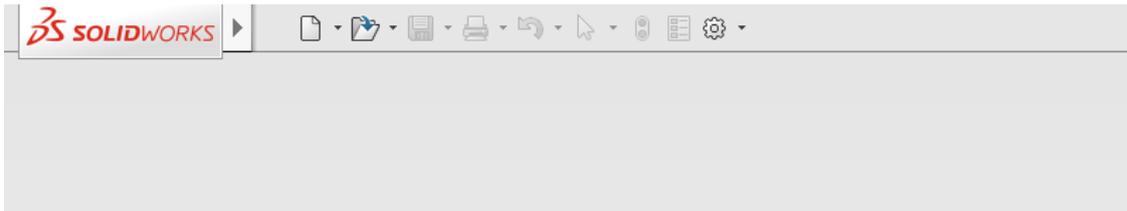


Figura A.1: Flecha desplegable del menú superior.

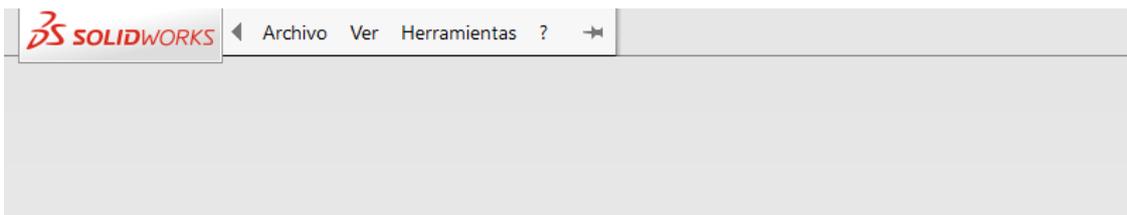


Figura A.2: Menú desplegable activado.

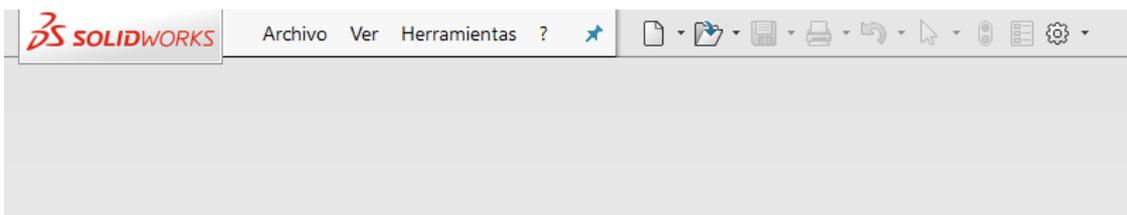


Figura A.3: Menú desplegable anclado.

A.1.2. Crear un archivo tipo pieza nuevo

Para crear un nuevo archivo, pulsar sobre el icono con forma de hoja y sobre **Nuevo** (figura A.4). Aparecerá una nueva ventana para elegir qué tipo de archivo crear. Seleccionar **Pieza** (figura A.5).

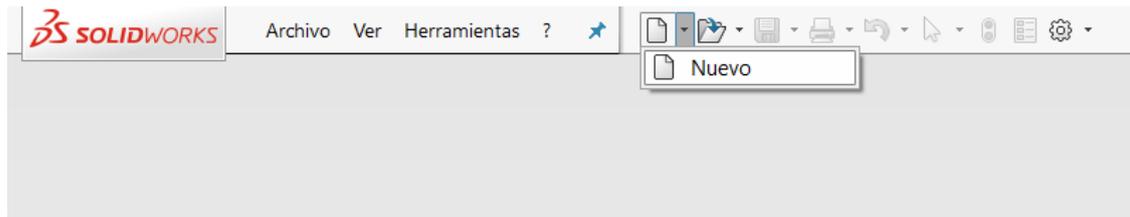


Figura A.4: Crear un archivo nuevo.



Figura A.5: Seleccionar el tipo de archivo nuevo.

A.1.3. Visibilidad de planos

Por defecto, al crear un archivo nuevo, no se muestran los planos principales en el espacio de trabajo.

Al menú que hay a la izquierda se le llama **Gestor de diseño** (figura A.6a). En él aparecen las operaciones que se han realizado, así como los planos que hay en el modelo. Al pulsar sobre el nombre de un plano, éste se hará visible de forma temporal, es decir, hasta que se haga clic en cualquier otro lugar.

Para hacer visible un plano de forma permanente, pulsar sobre el nombre del plano que se quiera visualizar y hacer clic sobre el icono con forma de ojo (**Mostrar**, figura A.6b). El icono del plano cambiará de color y se pondrá azul. Esto indica que el plano está visible.

Si en cualquier momento se quiere ocultar el plano, repetir el proceso, pero esta vez al pulsar sobre el icono con forma de ojo se ocultará el plano (figura A.6c).

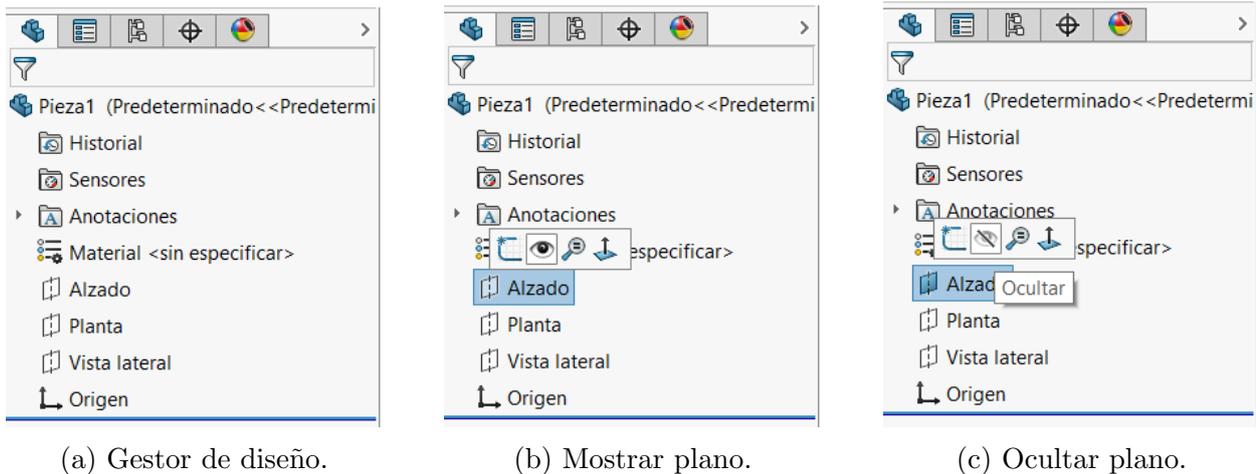


Figura A.6: Visibilidad de planos en el Gestor de diseño.

A.1.4. Ejes temporales

En determinadas situaciones puede resultar útil poder seleccionar el eje de revolución de una pieza. Para poder visualizar los ejes, hacer clic sobre el icono con forma de ojo que hay en la ventana gráfica (figura A.7). Este icono es el de **Ocultar/mostrar elementos**.

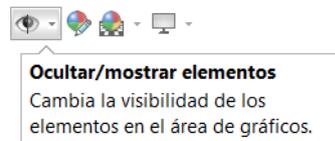


Figura A.7: Ocultar/mostrar elementos.

Al pulsar sobre el icono, se abrirá un desplegable. Seleccionar el icono situado en la segunda fila y la segunda columna (figura A.8). Esto activará la opción de **Ver ejes temporales**.

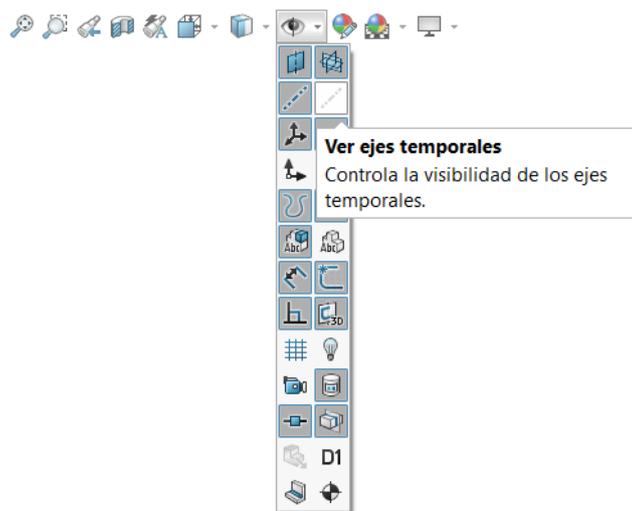


Figura A.8: Ver ejes temporales.

A.1.5. Transparencia de una pieza

Cambiar la transparencia de la cara de una pieza puede facilitar la visualización de detalles interiores o clarificar la forma interior de la misma (figura A.9). Para ello, hacer clic sobre la cara de una pieza con el botón derecho y seleccionar **Cambiar transparencia** (figura A.10).

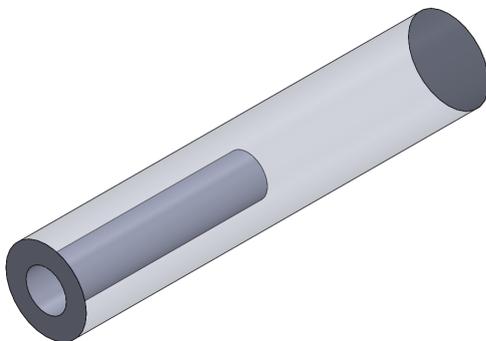


Figura A.9: Cara transparente.

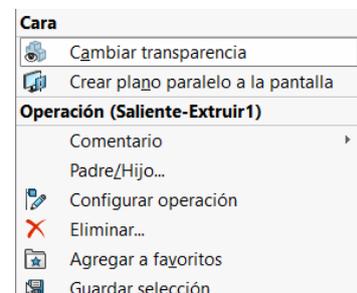


Figura A.10: Cambiar transparencia.

Para volver a visualizar la cara de modo normal, repetir los pasos anteriores, sólo que esta vez se desactivará la transparencia.

A.1.6. Croquis

En SolidWorks, los croquis se deben hacer sobre planos. Para hacer un croquis, pulsar sobre el icono de **Croquis**, en la pestaña de **Croquis** (figura A.11). Una vez pulsado el icono, seleccionar el plano sobre el que hacer el croquis (figura A.12). Por defecto, SolidWorks cambiará la vista y la hará perpendicular al plano sobre el que se dibujará el croquis.

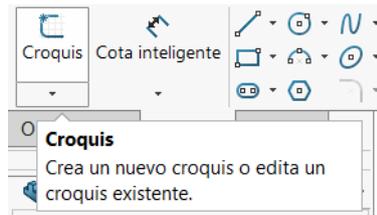


Figura A.11: Crear un nuevo croquis.

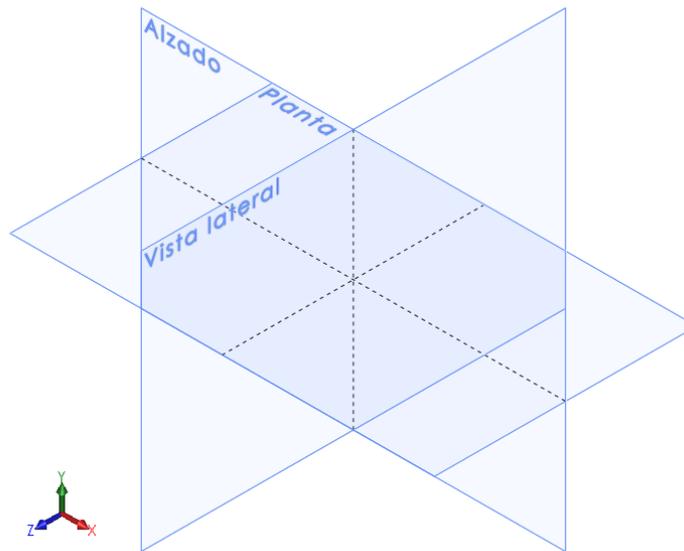


Figura A.12: Selección del plano sobre el que hacer el croquis.

Los distintos elementos que se pueden croquizar, junto con varios tipos de operaciones que se pueden llevar a cabo dentro del croquizado, se encuentran en la pestaña de **Croquis** (figura A.13). Entre estos elementos están: **Línea**, **Círculo**, **Rectángulo**, etc.

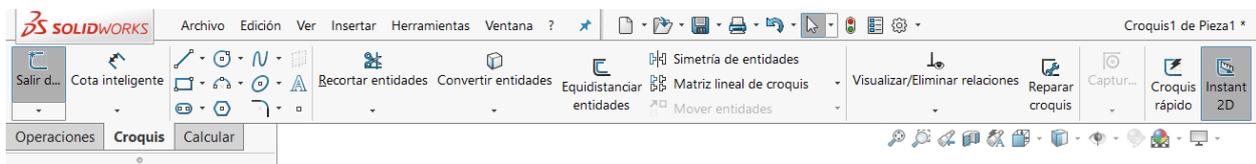


Figura A.13: Pestaña de croquis.

Es de gran utilidad poder crear elementos auxiliares en los croquis que después sirvan como referencia en la construcción de croquis más complejos. Para ello, seleccionar el elemento que se quiera convertir en auxiliar y en el menú que aparece a la izquierda, activar la casilla de **Para construcción** (figura A.14).

Se puede ver que un elemento es auxiliar ya que su trazado será distinto al del resto de elementos (figura A.15).

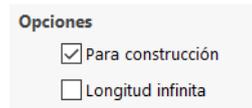


Figura A.14: Convertir en línea de construcción.

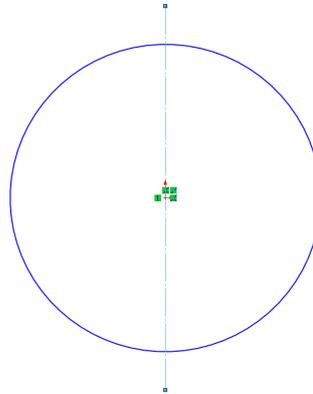


Figura A.15: Trazado de línea de construcción.

Para salir del croquis, una vez terminado, pulsar sobre el icono con la flecha que aparece en la esquina superior derecha (figura A.16).

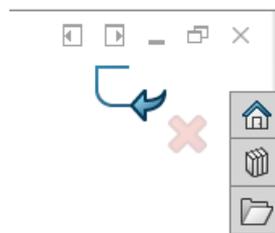


Figura A.16: Salir del croquis.

Si en algún momento se quiere modificar un croquis ya hecho, pulsar con el botón derecho sobre el nombre del croquis, en el **Gestor de diseño**, y hacer clic sobre el icono de **Editar croquis** (figura A.17). Una vez que se haya terminado de modificar el croquis, salir de la misma forma que la explicada anteriormente.

Para cambiar el nombre de un croquis, hacer clic sobre el nombre del croquis, dentro del **Gestor de diseño**, y pulsar *F2*.

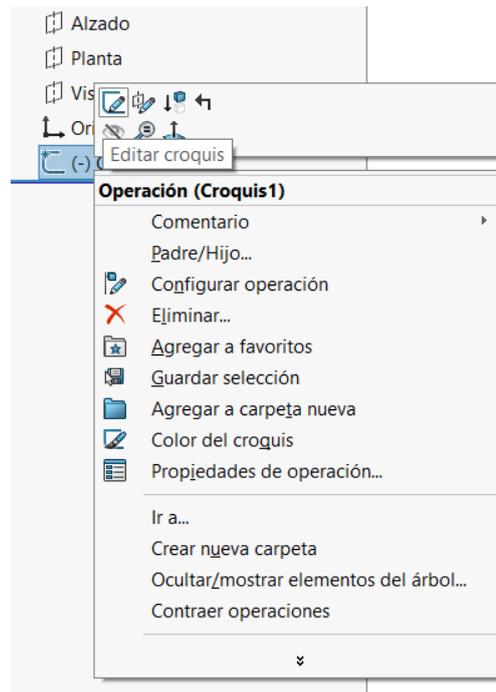


Figura A.17: Editar croquis.

A.1.7. Cotas

A la hora de establecer las cotas de los elementos de un croquis, se utiliza la herramienta de **Cota inteligente** (figura A.18). Ésta se encuentra en la pestaña de **Croquis**.

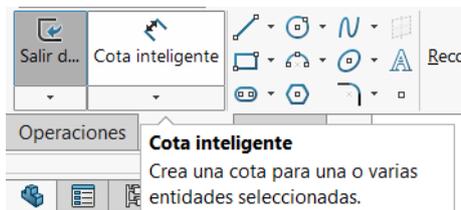


Figura A.18: Cota inteligente.

Tras pulsar sobre su icono, seleccionar el elemento que se quiera acotar y hacer clic en la posición en la que se quiera dejar la cota. Una vez hecho esto, aparecerá una ventana en la que introducir la magnitud de la cota correspondiente (figura A.19). Al terminar de introducirla, pulsar *Enter*.

Si en algún momento se quiere modificar la cota, hacer doble clic sobre la misma y aparecerá de nuevo la ventana para la introducción de la nueva cota.

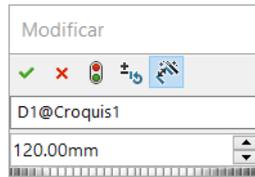


Figura A.19: Ventana de introducción de cota.

A.1.8. Relaciones de elementos

SolidWorks permite definir relaciones entre elementos. Algunas de las relaciones existentes son **Perpendicular**, **Paralelo**, **Coincidente**, **Tangente**, etc. También existen relaciones para un sólo elemento, como podría ser una línea, en la que se puede definir si es **Horizontal** o **Vertical** (figuras A.21 y A.22).

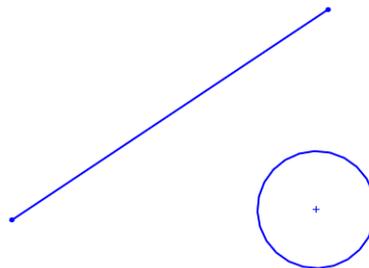


Figura A.20: Elementos sin relaciones.

Para acceder a estas relaciones, seleccionar el elemento, o los elementos, entre los que definir la relación. Dependiendo del tipo de elementos que se seleccionen, estarán disponibles unas relaciones u otras¹. Las relaciones aparecerán en el menú situado a la izquierda de la ventana gráfica.

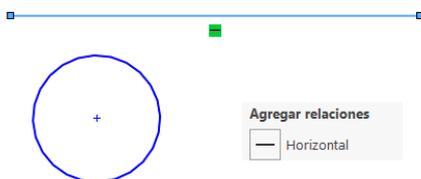


Figura A.21: Línea horizontal.

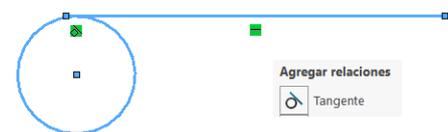


Figura A.22: Circunferencia y línea tangentes.

Las relaciones definidas entre los elementos se pueden ver en el croquis como pequeños símbolos dentro de unos cuadros verdes. Si se hace doble clic sobre estos símbolos, se podrán modificar las relaciones.

¹Por ejemplo, seleccionando una circunferencia y una línea se podrá definir una relación de tangencia. Esta relación no estará disponible en el caso de que se seleccionen dos líneas.

A.1.9. Extruir

En la pestaña de **Operaciones**, pulsar sobre el icono de **Extruir saliente/base** (figura A.23). SolidWorks nos indicará que seleccionemos un croquis en el que aplicar la operación (figura A.24).

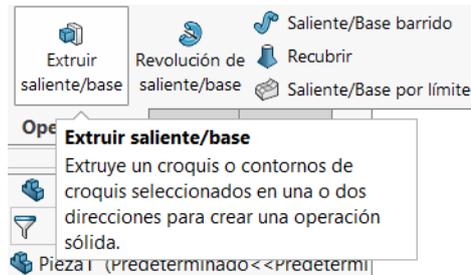


Figura A.23: Selección de la operación de extruir saliente/base.

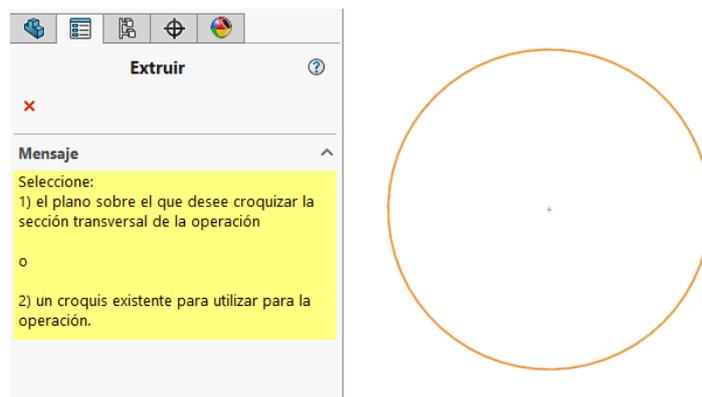


Figura A.24: Selección del croquis para extruir.

En el lugar donde antes estaba activa la pestaña del **Gestor de diseño**, ahora estará activa otra pestaña, la del **PropertyManager** (figura A.25).

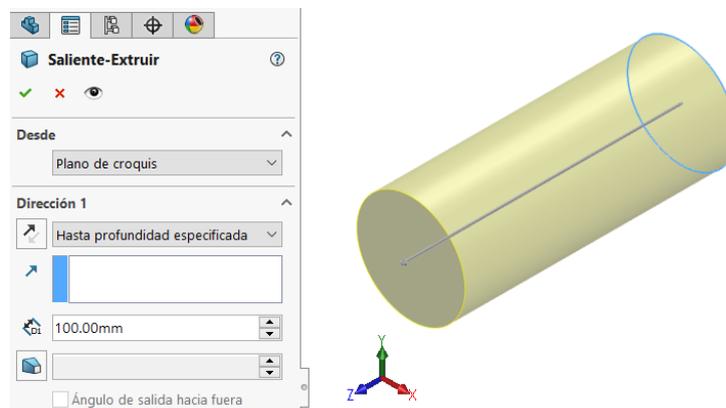


Figura A.25: PropertyManager.

En esta pestaña se pueden especificar diversos parámetros de la operación de modelado que se esté realizando. Cuando se hayan seleccionado los parámetros necesarios, pulsar sobre el icono verde que aparece en la esquina superior derecha (figura A.26).



Figura A.26: Salir de la extrusión.

Si en algún momento se quiere modificar una extrusión ya realizada, pulsar con el botón derecho sobre el nombre de la operación, dentro del **Gestor de diseño**, y hacer clic sobre el icono de **Editar operación** (figura A.27).

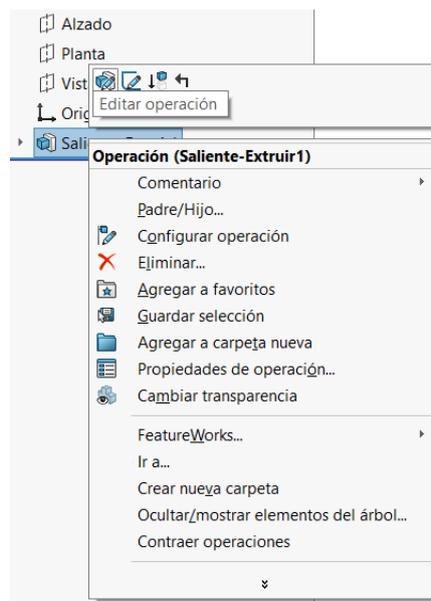


Figura A.27: Editar operación.

Una vez que se haya terminado de modificar la operación, salir de la misma forma que la explicada anteriormente.

Para cambiar el nombre de una operación, hacer clic sobre el nombre de la operación, dentro del **Gestor de diseño** y pulsar *F2*.

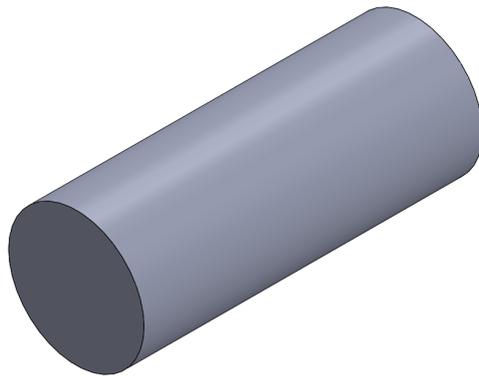


Figura A.28: Extrusión terminada.

A.1.10. Extruir corte

En la pestaña de **Operaciones**, pulsar sobre el icono de **Extruir corte** (figura A.29). SolidWorks nos indicará que seleccionemos una cara o plano sobre el que croquizar la sección del corte, o un croquis ya hecho para usarlo como sección de corte.

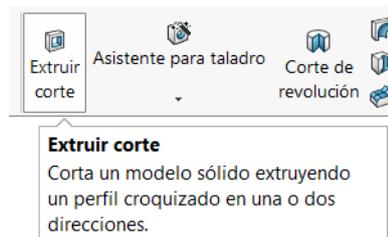


Figura A.29: Selección de operación de extruir corte.

Seleccionando una cara del modelo, en lugar de un croquis ya hecho, se nos activará la pestaña de **Croquis**.



Figura A.30: Croquizado en la operación de extruir corte.

Una vez llegados a este punto, hay que dibujar un croquis, que será el que utilice Solid-

Works como forma del corte (figura A.30). Para salir del croquis, una vez terminado, pulsar sobre el icono con la flecha que aparece en la esquina superior derecha.

A continuación, se abrirá la pestaña del **PropertyManager**, con una serie de parámetros para modificar la operación (figura A.31). Cuando se hayan seleccionado los parámetros necesarios, pulsar sobre el icono verde que aparece en la esquina superior derecha.

Los parámetros de la operación se pueden modificar de forma similar a la explicada para la operación de extrusión.

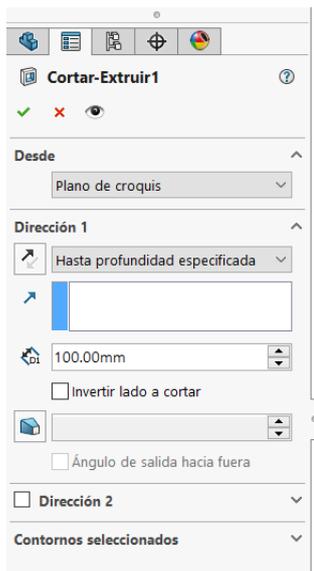


Figura A.32: Extrusión de corte terminada.

Figura A.31: Parámetros para modificar la operación de extruir corte.

A.1.11. Crear plano

En la pestaña de **Operaciones**, pulsar sobre el icono de **Geometría de referencia**. Aparecerá un desplegable, seleccionar **Plano** (figura A.33).

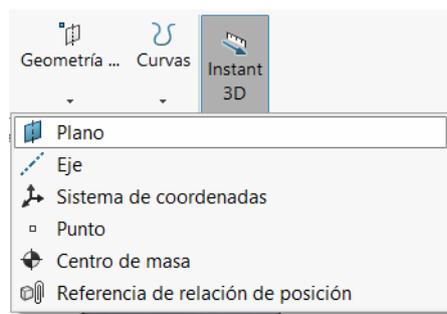


Figura A.33: Creación de plano.

Se abrirá la pestaña del **PropertyManager**, con una serie de espacios para introducir referencias que definan el plano que se quiera crear (figura A.34). Una posible opción sería, si se quiere hacer un plano medio entre dos caras, seleccionar las dos caras entre las que se encontrará el nuevo plano (figura A.35).

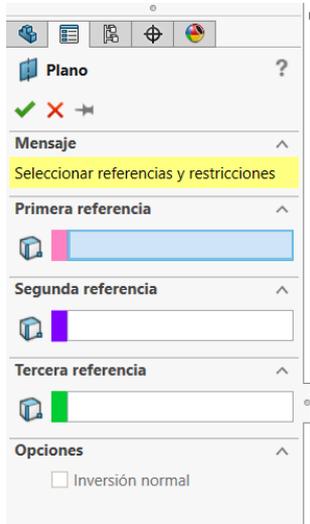


Figura A.34: Referencias para la definición del plano.

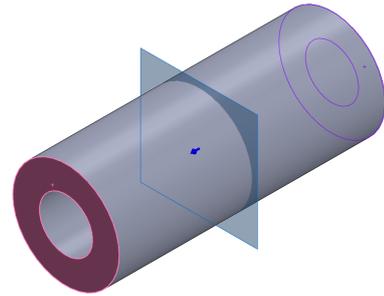


Figura A.35: Definición del plano medio.

Para validar la operación, pulsar sobre el icono verde que aparece en la esquina superior derecha, o bien sobre el que aparece en el **PropertyManager**.

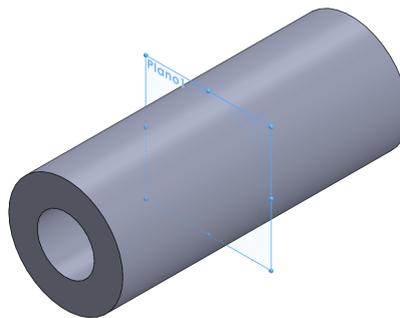


Figura A.36: Plano medio terminado.

A.2. 01 Carcasa.SLDPRT

Modelado de la carcasa

Crear un archivo nuevo de tipo pieza. En el plano de **Alzado** hacer un croquis, que se corresponderá con el diámetro exterior de la zona central de la carcasa.

Dibujar una circunferencia de **160 mm** de diámetro y extruir **500 mm**, seleccionando **Plano medio** en el desplegable de **Dirección 1** (figura A.37).

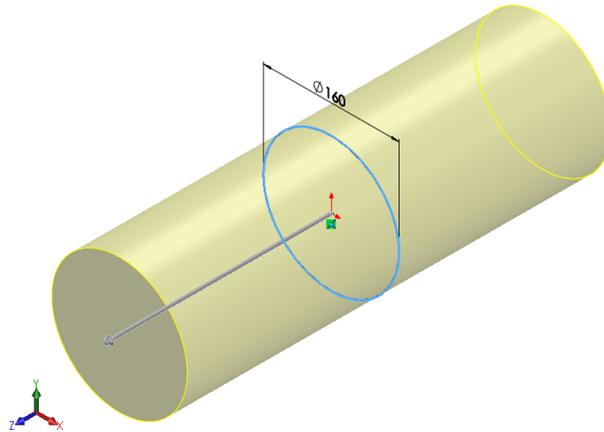


Figura A.37: Extrusión de la zona central de la carcasa.

Ahora se va a modelar uno de los extremos de la carcasa. Hacer una circunferencia de **220 mm** de diámetro sobre la cara plana frontal. Extruir la circunferencia **8 mm** en dirección al cuerpo central de la carcasa (figura A.38).

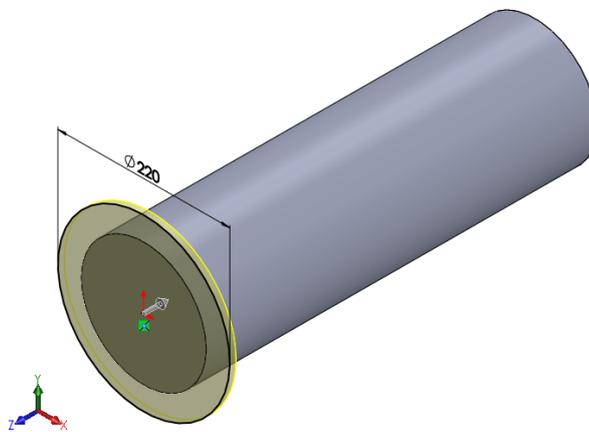


Figura A.38: Extrusión del extremo de la carcasa.

En el caso de que la dirección de extrusión fuera la opuesta a la que se busca, pulsar sobre **Invertir dirección** (figura A.39).

El siguiente paso consiste en llevar a cabo los taladros por los que pasarán las fijaciones que unirán las distintas piezas del extremo del intercambiador. Para esto, se hará uso del **Asistente para taladro** (figura A.40). Estos taladros no serán roscados, sino lisos, de forma que los tornillos que pasen por cada uno de ellos fijarán la unión gracias a unas tuercas que

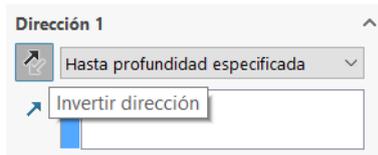


Figura A.39: Invertir dirección de extrusión.

se encontrarán en el otro extremo.

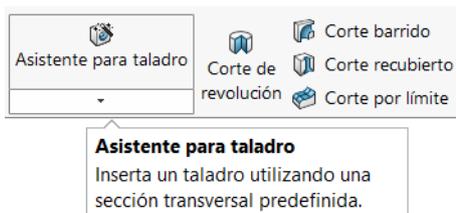


Figura A.40: Asistente para taladro.

Seleccionar la cara plana exterior del extremo de la carcasa y pulsar sobre el icono del **Asistente para taladro**. En el **PropertyManager** aparecerán dos pestañas: la primera es la pestaña **Tipo** y la segunda, **Posiciones**. En estas pestañas se define el tipo de taladro que se quiere hacer y las posiciones en las que hacerlo, respectivamente.

En la pestaña de **Tipo**, dentro del desplegable de **Tipo de taladro** (figuras A.41 y A.42), seleccionar el icono de la tercera columna de la primera fila. Este icono se corresponde con el tipo **Taladro**. En **Estándar** seleccionar **ISO** y en el desplegable **Tipo, Márgenes de tornillo**.

En el desplegable de **Especificaciones de taladro**, seleccionar el tamaño **M4**. Dejar el valor por defecto del **Ajuste exacto** como **Suelto**.

Para terminar la introducción de los valores de esta pestaña, en el desplegable de **Condición final**, indicar **Hasta el siguiente**.

A continuación, se define la posición de los taladros desde la pestaña **Posiciones**. Para indicar en SolidWorks la posición en la que se quiere hacer un taladro, se debe crear un croquis. En dicho croquis, los elementos de tipo **Punto** serán los que definan el lugar donde irán los taladros.

El croquis consistirá en una circunferencia de **190 mm** de diámetro, con centro coincidente con el origen.

El punto en el que irá el taladro se sitúa en la intersección de la circunferencia con una línea vertical que pase por el centro del círculo. Para los elementos que conformen este croquis, activar en el **PropertyManager** la casilla **Para construcción**.

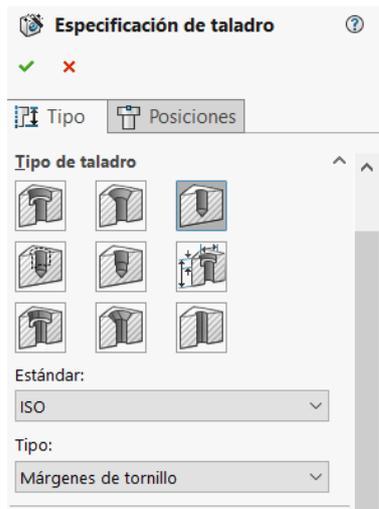


Figura A.41: Tipo de taladro (1).

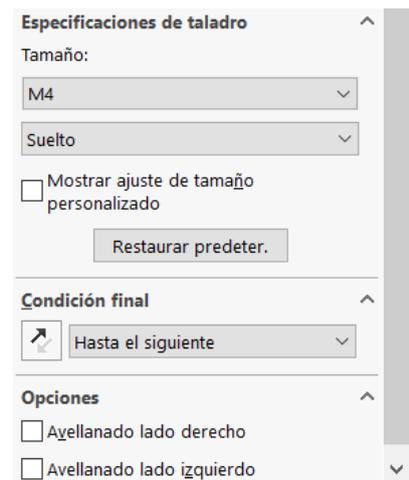


Figura A.42: Tipo de taladro (2).

Una vez definido el punto, introducir desde la pestaña de **Croquis** un elemento **Punto** en la intersección comentada anteriormente (figura A.43).

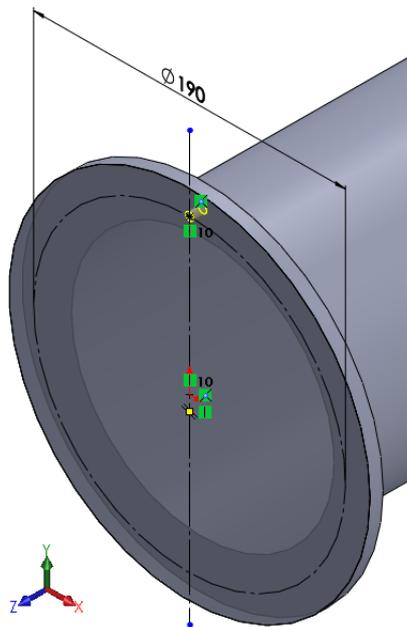


Figura A.43: Posición de taladro.

Para hacer el resto de taladros, se recurre a la operación de **Matriz circular**, en la pestaña de **Operaciones** (figura A.44). Esta operación tiene una serie de parámetros.

Como **Eje de matriz**, seleccionar el eje de revolución de la carcasa². El **Ángulo** será de **360°** y el **Número de instancias**, **8**. Activar la casilla de **Separación igual**.

²Ver A.1.4. Ejes temporales.

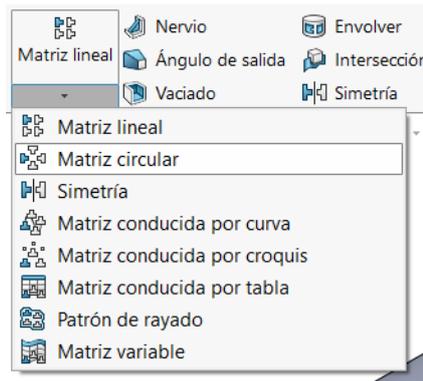


Figura A.44: Matriz circular.

En el desplegable de **Operaciones y caras**, en el recuadro de **Operaciones para la matriz**, seleccionar el taladro creado anteriormente. El taladro se puede seleccionar directamente, pulsando sobre él en la pieza, o haciendo clic en el **Gestor de diseño** y seleccionando la operación del taladrado en el desplegable. El resultado de la matriz se puede ver en la figura A.45

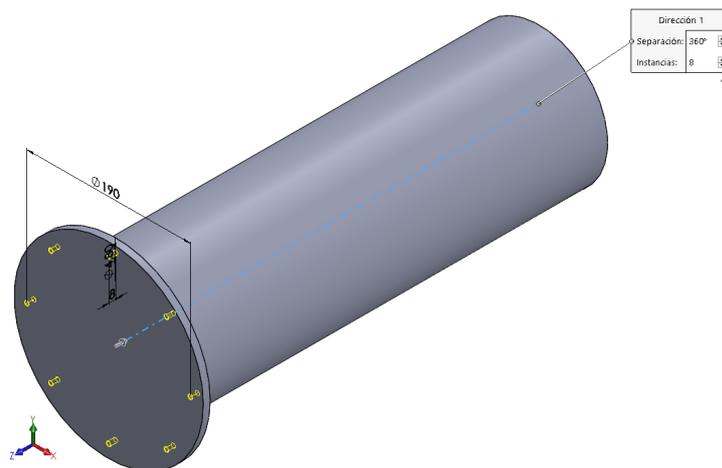


Figura A.45: Matriz circular de los taladros.

Como se ha modelado sólo uno de los dos extremos, se hará una **Simetría** del extremo modelado. De esta manera se agiliza el proceso de creación de la pieza.

En la pestaña de **Operaciones**, seleccionar la pestaña de **Simetría** (figura A.46). Se activará la operación en el **PropertyManager**. Seleccionar el plano de **Alzado** en el desplegable de **Simetría de cara/plano**.

En el desplegable de **Operaciones para hacer la simetría**, seleccionar la operación de **Extrusión del extremo** (figura A.47). Hacer otra operación de **Simetría**, seleccionando esta vez en **Operaciones para hacer la simetría** la operación de la **Matriz circular** (figura A.48).

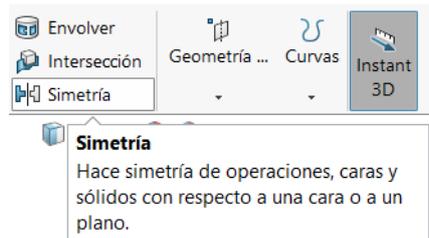


Figura A.46: Operación de simetría.

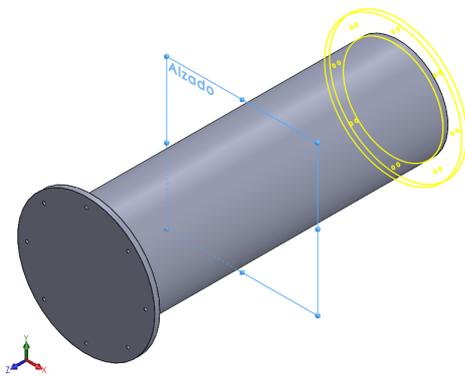


Figura A.47: Simetría del extremo de la carcasa.

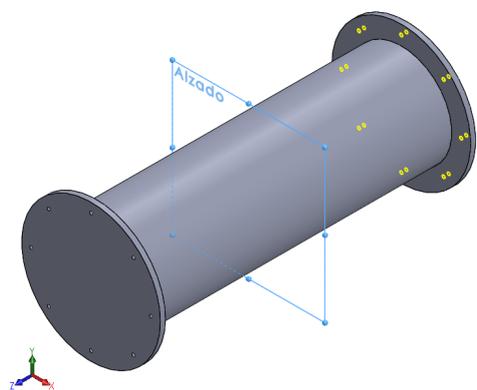


Figura A.48: Simetría de las uniones del extremo.

El interior de la carcasa se consigue haciendo una operación de **Extruir corte**. El croquis será una circunferencia de **148 mm** de diámetro, con centro en el origen, dibujada sobre la cara plana de uno de los extremos de la pieza. En la **Dirección 1**, seleccionar **Por todo** (figura A.49).

A continuación, se van a crear los orificios de entrada y salida de agua a la carcasa. Para poder hacerlos, hace falta definir primero dos planos tangentes a la superficie de la carcasa. En primer lugar, se definirá el plano tangente superior y se hará el orificio superior. Después se repetirá el procedimiento para el orificio inferior.

Para definir un plano tangente a la superficie, crear un plano en el que la **Primera referencia** sea la **cara exterior de la carcasa** y la **Segunda referencia**, el plano de **Planta**. Como el plano tangente se necesita en la parte superior, y paralelo al plano de **Planta**, seleccionar la opción de **Paralelos** en la referencia al plano de **Planta** (figura A.50). Si el plano tangente se situara en la cara inferior en lugar de en la cara superior, activar la casilla de **Invertir equidistancia**. Una vez definido, se recomienda ocultar el plano para mantener la vista del modelo lo más clara posible³.

³Ver A.1.3. Visibilidad de planos.

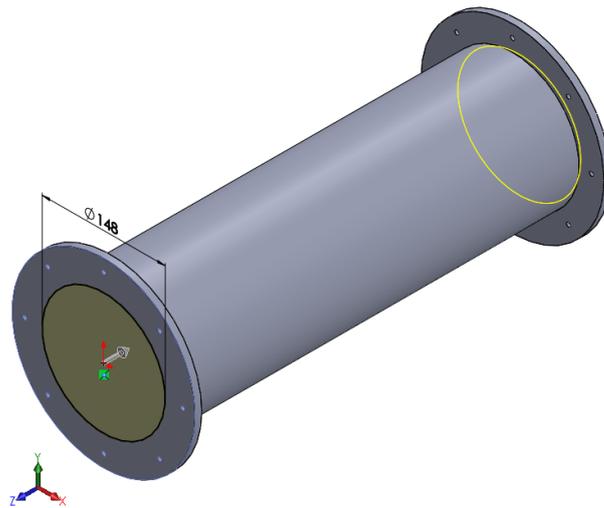


Figura A.49: Corte del interior de la carcasa.

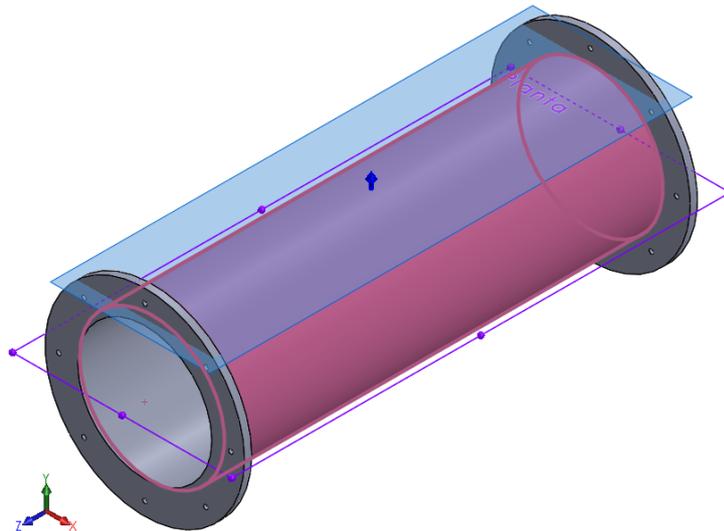


Figura A.50: Definición del plano tangente superior.

Tanto el orificio superior como el inferior se crean mediante la operación de **Extruir corte**, por lo tanto, hay que hacer un croquis con sus dimensiones.

Pulsar en la operación de **Croquis** y seleccionar el plano tangente superior que se ha definido antes. Dibujar una circunferencia de **12,70 mm** de diámetro, estando el centro alineado con el origen, de forma que quede contenido en la proyección del eje de la carcasa en la superficie exterior. El centro de la circunferencia estará a **52 mm** de la cara plana exterior del extremo derecho de la carcasa (figura A.51).

Una vez terminado el croquis, seleccionar la operación de **Extruir corte**. En la **Dirección 1** seleccionar **Hasta el siguiente**, de forma que la operación se limitará a cortar sólo la primera pared de la carcasa.

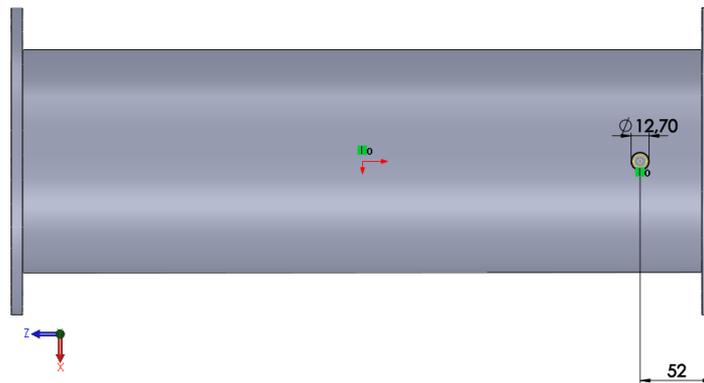


Figura A.51: Corte del orificio superior.

Repetir el procedimiento descrito, definiendo esta vez el plano tangente en la parte inferior y haciendo el corte en ese plano, con la separación de **52 mm** medida esta vez desde el extremo opuesto de la carcasa. El resultado se puede ver en la figura A.52.

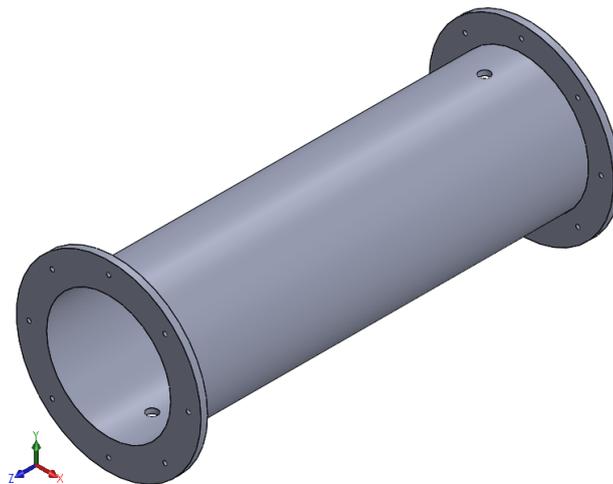


Figura A.52: Resultado del corte de los orificios.

Lo siguiente que se modelará serán los orificios en los que irán introducidos los sensores de temperatura. Los orificios tendrán un diámetro de **4 mm** de diámetro. Para realizarlos, utilizar la operación de **Extruir corte**. El croquis que se utilizará como base estará hecho en un plano tangente a la cara lateral trasera del intercambiador, por lo tanto habrá que definir un nuevo plano, tangente a la carcasa y perpendicular al plano de **Planta** (figura A.53).

La posición de los orificios se puede ver en la figura A.54⁴.

⁴Las cotas están en milímetros. Se ha cambiado la transparencia de la carcasa para que se vea con mayor claridad desde qué extremo de la pieza se han tomado las medidas

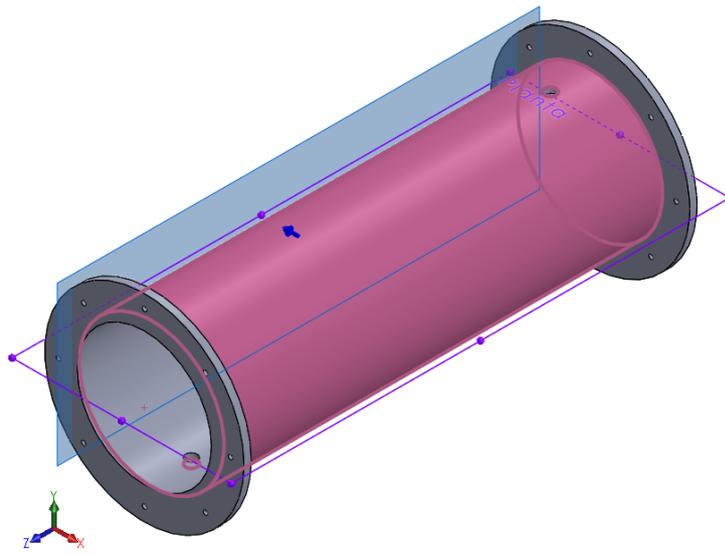


Figura A.53: Plano para los orificios de los sensores.

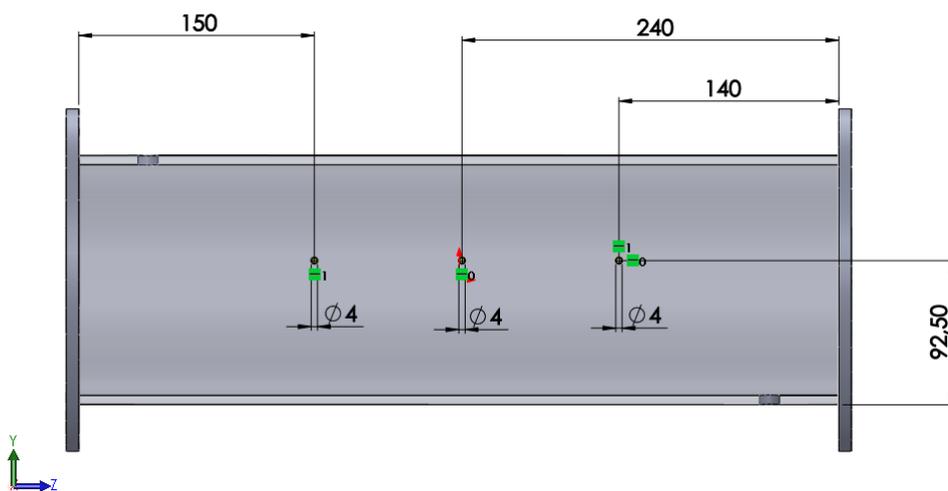


Figura A.54: Orificios de los sensores.

En la operación de **Extruir corte**, seleccionar como **Condición final Hasta el siguiente**. En la figura A.55a, se puede ver cómo quedaría la pieza después de hacer los orificios de los sensores de temperatura.

Para terminar con el modelado de esta pieza, se modelarán los soportes de apoyo de la carcasa. En primer lugar, hace falta apoyar el croquis en un plano. Este plano se definirá seleccionando la cara plana frontal de la carcasa y haciéndolo paralelo a una distancia de **104 mm** (figura A.55b).

Sobre este plano se hará un croquis que, posteriormente, se extruirá. En el croquis, dibujar una línea vertical, con una longitud algo mayor que el diámetro del extremo de la carcasa, cuyo punto medio sea coincidente con el origen. Activar la casilla **Para construcción**. Esta

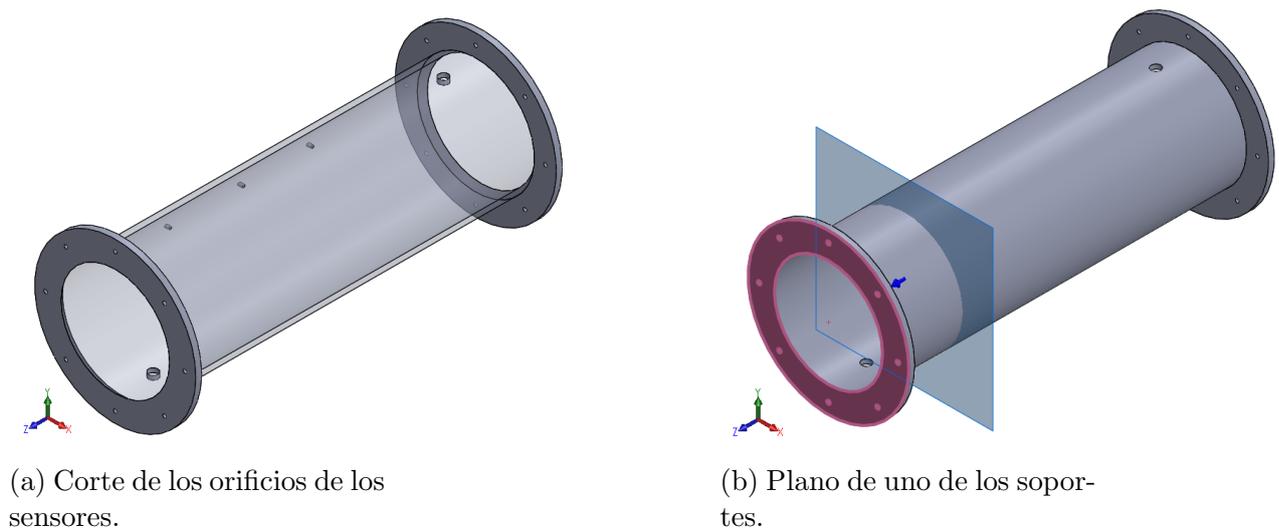


Figura A.55: Corte de los orificios de los sensores y plano de los soportes.

recta servirá como eje de simetría (figura A.56).

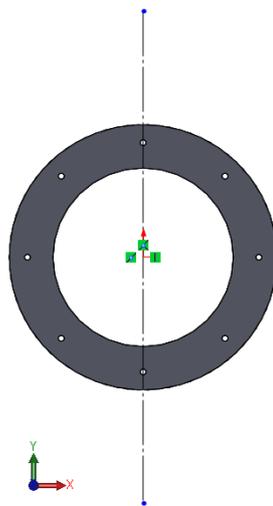


Figura A.56: Eje de simetría del croquis.

A continuación, dibujar una circunferencia de **160 mm** de diámetro con centro en el origen y una línea horizontal que pase por el origen y que corte a la circunferencia en dos puntos. La recta se utilizará para cortar la circunferencia haciendo uso de la herramienta **Recortar entidades** (figura A.57).

Seleccionando esta herramienta, junto con la opción de **Recorte inteligente**, se pueden recortar elementos de un croquis. Para ello, arrastrar el cursor sobre el elemento que se quiera borrar, pulsando el botón izquierdo, al mismo tiempo que se pulsa la tecla *CTRL* (figura A.58). Una vez que se haya terminado de recortar, hacer clic sobre el icono verde que aparece en la esquina superior derecha y borrar la línea horizontal del croquis.

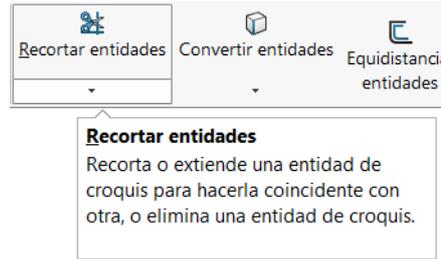


Figura A.57: Recortar entidades.

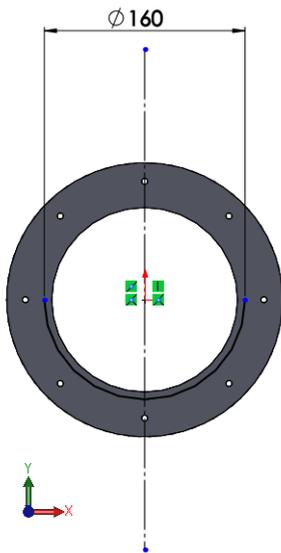


Figura A.58: Circunferencia recortada.

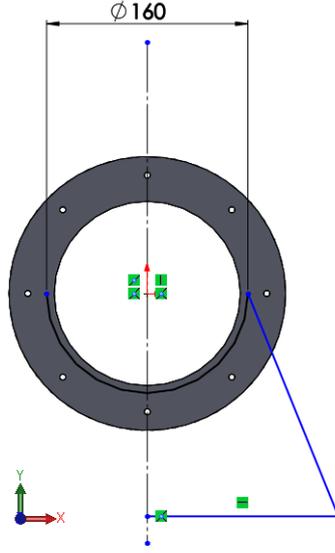


Figura A.59: Líneas a las que aplicar simetría.

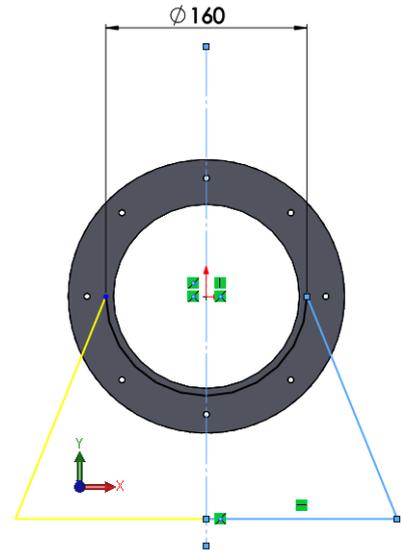


Figura A.60: Simetría de entidades.

Añadir al croquis dos líneas como las que se indican en la figura A.59. Con la operación de **Simetría de entidades**, seleccionar estas dos últimas líneas en el recuadro de **Entidades para simetría** y la línea vertical de construcción en el recuadro de **Con respecto a**. El resultado de la simetría se puede ver en la figura A.60.

Por último, para definir por completo el croquis, acotarlo con las medidas que se pueden ver en la figura A.61. Extruirlo **8 mm** hacia el extremo más alejado de la carcasa (figura A.62).

Seleccionar la cara más externa del soporte y crear un nuevo croquis sobre ella. Este croquis servirá como base para una extrusión que será el pie del soporte. Se ha vuelto a utilizar una línea de construcción como eje de simetría así como la operación de simetría. Hacer el croquis como el que se muestra en la figura A.63.

Extruirlo **38 mm** hacia el extremo más alejado de la carcasa, tal y como se muestra en la figura A.64.

Falta por modelar el segundo soporte, para lo que se utilizará la operación de **Simetría**

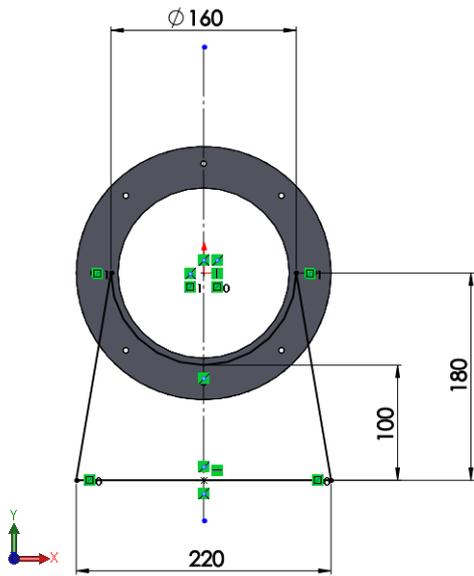


Figura A.61: Croquis del soporte.

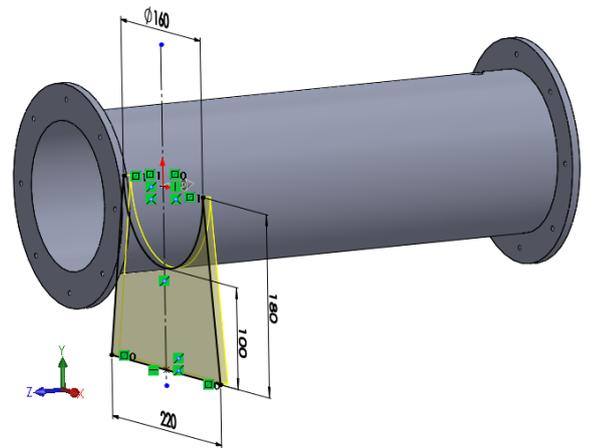


Figura A.62: Extrusión del soporte.

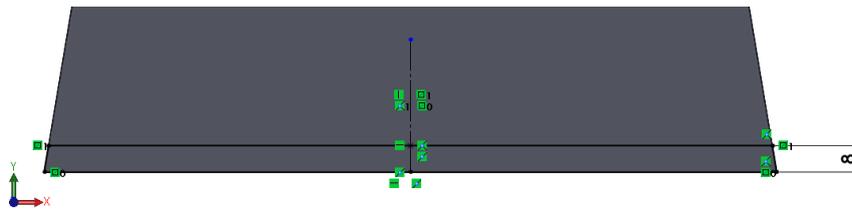


Figura A.63: Croquis del pie del soporte.

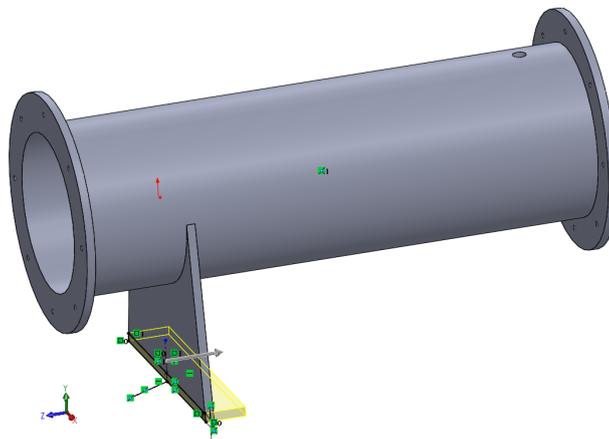


Figura A.64: Extrusión del pie del soporte.

respecto al plano de **Alzado**, que en este modelo coincide con el plano medio.

Hacer clic en la operación de **Simetría** y seleccionar las dos últimas extrusiones que se han modelado como operaciones a las que aplicar la simetría. Utilizar el plano de **Alzado** como plano de simetría (figura A.65).

A continuación, se van a aplicar las operaciones de acabado, tales como **Redondeo** y **Chaflán**.

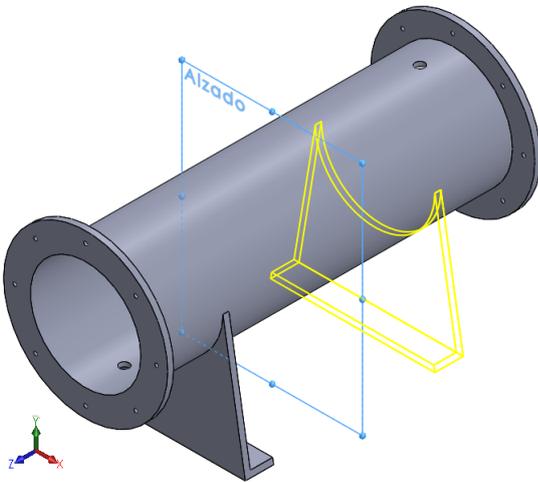


Figura A.65: Simetría del soporte completo.

Se empieza con el acabado de los soportes para terminar con el acabado de la unión del cuerpo central de la carcasa con los extremos.

En los soportes se realizan tres operaciones de acabado. La primera es un **Redondeo** con un radio de **10 mm** de la arista exterior. Para ello, seleccionar la operación de **Redondeo**, hacer clic sobre las aristas e introducir el valor de **10 mm** en el recuadro de **Radio** (figura A.67).

La segunda operación de redondeo se hará en la arista interior de los soportes, con un **Radio** de **2 mm**. Esta operación se puede ver en la figura A.68.

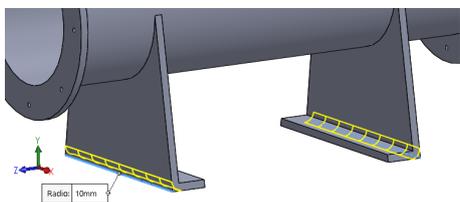


Figura A.67: Redondeo exterior del soporte.

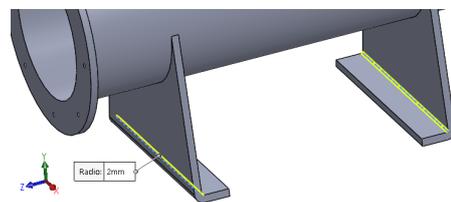


Figura A.68: Redondeo interior del soporte.

Por último, se hace un **Chaflán** con una **Distancia** de **3 mm** y un **Ángulo** de **45°** en las aristas de unión de los soportes con el cuerpo central de la carcasa (figura A.69).

Para terminar con el modelado de la carcasa, se hace un chaflán con una **Distancia** de **3 mm** y un **Ángulo** de **45°** en las aristas de unión del cuerpo central de la carcasa con los

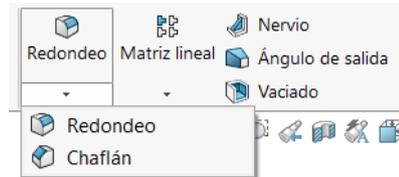


Figura A.66: Operaciones de redondeo y chaflán.

extremos. Esta operación se puede ver en la figura A.70.

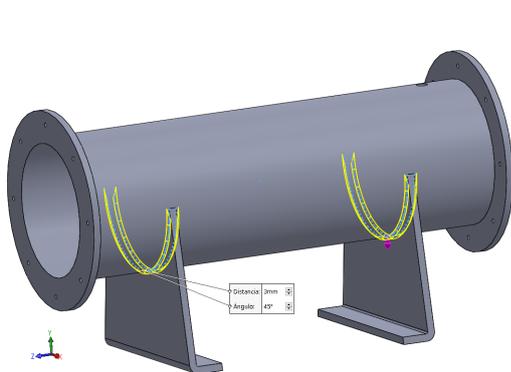


Figura A.69: Chaflán de la unión entre el soporte y la carcasa.

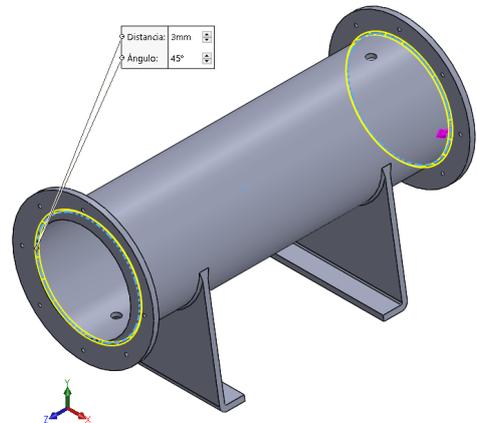


Figura A.70: Chaflán de la unión entre el extremo y la carcasa.

El modelo de la carcasa terminado se puede ver en la figura A.71.

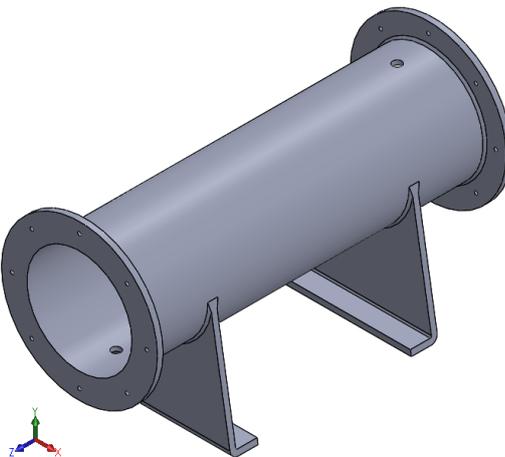


Figura A.71: Modelado final de la carcasa.

A.3. 02 Cierre lateral.SLDPRT

Modelado de los cierres laterales

Crear un archivo nuevo de tipo pieza. Dibujar en el plano de **Alzado** una circunferencia de **220 mm** de diámetro y extruirla **8 mm** en el sentido positivo del eje z (figura A.72).

Sobre la cara opuesta al plano de alzado de la extrusión anterior, hacer el **croquis** de una circunferencia de **160 mm** de diámetro. **Extruir 50 mm** en el mismo sentido que la

extrusión anterior (figura A.73).

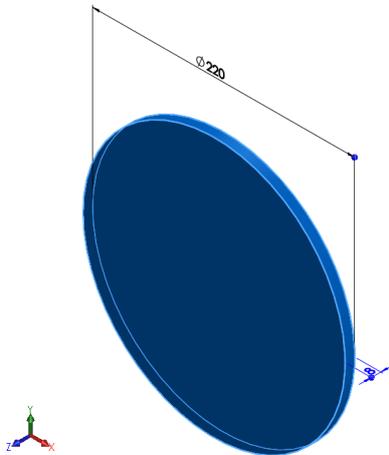


Figura A.72: Zona de unión del cierre.

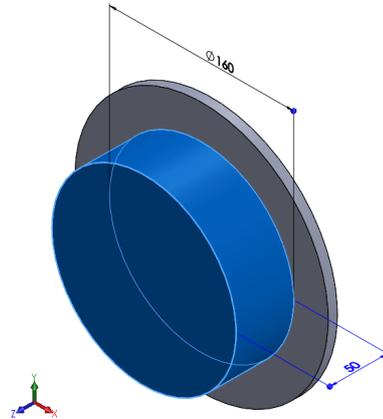


Figura A.73: Extremo del cierre.

Se va a crear un plano sobre el que se apoyará un croquis que servirá para hacer un corte de la pieza. Pulsar sobre **Geometría de referencia > Plano** y como **Primera referencia** seleccionar la cara más alejada del plano de alzado. En el recuadro de **Equidistancia** introducir **6 mm**. El plano se debe crear hacia dentro de la pieza, es decir, en el sentido negativo del eje z. En el caso de que la equidistancia se haga en el sentido contrario, activar la casilla de **Invertir equidistancia** (figura A.74).

Sobre el último plano creado, hacer el **croquis** de una circunferencia de **148 mm** de diámetro. Haciendo clic sobre este croquis, pulsar en **Extruir corte** y en la **Condición final** de la **Dirección 1** seleccionar **Hasta el siguiente**. El corte debe ser en el sentido negativo del eje z. Si el corte se hiciera en el sentido opuesto, pulsar sobre el icono de **Invertir dirección** (figura A.75).

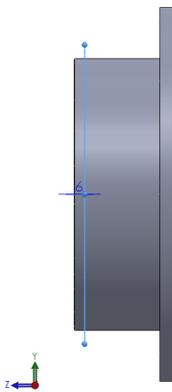


Figura A.74: Plano para el corte interior.

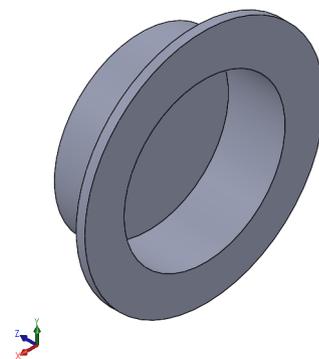


Figura A.75: Resultado del corte interior.

A continuación, se hace un orificio para la entrada o salida de agua. Hacer un **croquis** de una circunferencia de **12,70 mm** de diámetro sobre la cara más alejada del plano de alzado. Una vez terminado el croquis, realizar la operación de **Extruir corte** utilizando este croquis como base. Hacer la operación en el sentido negativo del eje z, es decir, hacia el plano de alzado, seleccionando la opción de **Hasta el siguiente** (figura A.76).

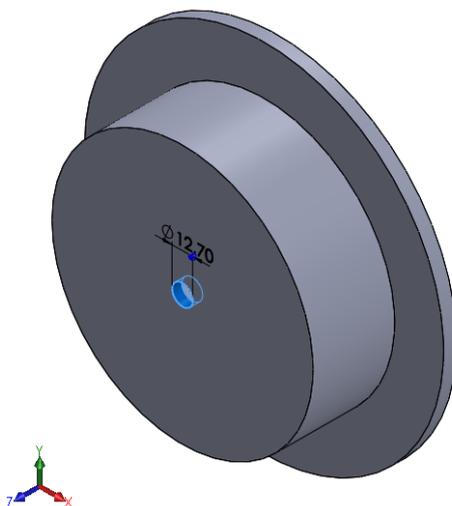


Figura A.76: Corte del orificio para entrada/salida.

En la zona de la unión con el resto del intercambiador se hacen unos taladros por los que poder pasar las fijaciones. Se utilizará el **Asistente para taladro**.

En la pestaña de **Tipo**, seleccionar **Taladro** y como **Estándar**, **ISO**. En el desplegable de **Especificaciones de tamaño**, seleccionar en **Tamaño**, **M4**. Finalmente, en el desplegable de **Condición final** seleccionar **Hasta el siguiente**.

En la pestaña de **Posiciones**, hacer un **Croquis** de una circunferencia de **190 mm** sobre una de las caras de la zona con mayor diámetro. Sobre esta circunferencia la que irán los centros de los taladros y será de tipo **Para construcción**.

Para definir el centro del primer taladro, se hace en el croquis de posición del taladro una línea vertical, también auxiliar. En el punto de intersección de esta línea y la circunferencia auxiliar anterior, introducir un punto. Ahí será donde se haga el primer taladro (figura A.77).

El resto de taladros se introducirán mediante la operación de **Matriz circular**. Como **Eje de matriz**, seleccionar el eje de revolución de la pieza⁵. En el apartado de **Ángulo**, introducir **360°** y en el de **Número de instancias**, **8**. Activar la casilla de **Separación igual**.

En el desplegable de **Operaciones y caras**, en el apartado de **Operaciones para la matriz**, seleccionar la operación del taladro realizado anteriormente (figura A.78).

⁵Ver A.1.4. Ejes temporales.

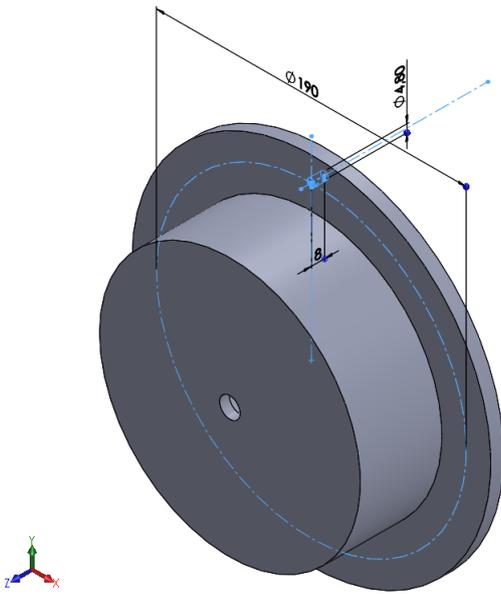


Figura A.77: Taladro en la zona de unión.

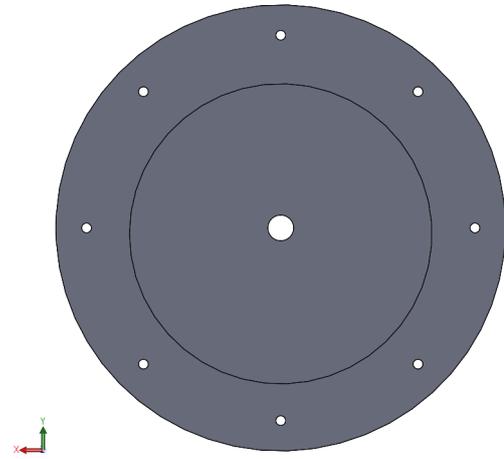


Figura A.78: Matriz circular de taladros.

Por último, se crea un **Chaflán** de **3 mm** y **45°** sobre la arista que une el cuerpo de menor diámetro con el de mayor diámetro. El resultado final de la pieza modelada se puede ver en la figura A.79.

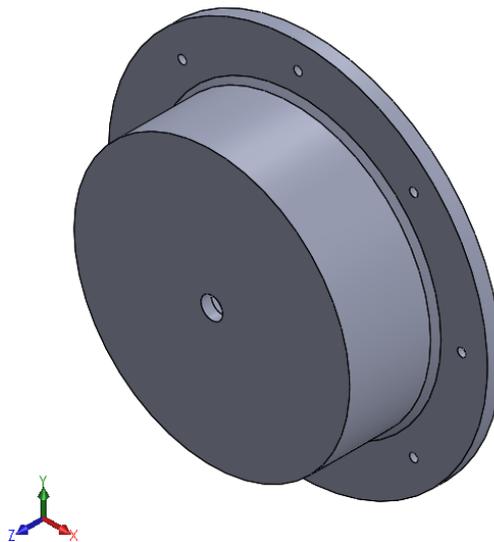


Figura A.79: Modelado final del cierre lateral.

A.4. 03 Placa unión.SLDPRT

Modelado de la unión carcasa-cierres laterales

Crear un archivo nuevo de tipo pieza. Dibujar en el plano de **Alzado** una circunferencia de **220 mm** de diámetro y extruirla **10 mm**, estableciendo en el desplegable de **Dirección 1** la **Condición final** de **Plano medio** (figura A.80).

A través de esta pieza pasarán los tubos que se encontrarán en el interior del intercambiador, por lo que se deben hacer unos orificios para permitir su paso. Hacer un **croquis** sobre la cara plana que se encuentra en el lado positivo del eje z. Dibujar en el croquis una circunferencia de diámetro **10 mm**, con centro en la misma vertical que el origen y a una distancia de **50 mm** del mismo (figura A.81).

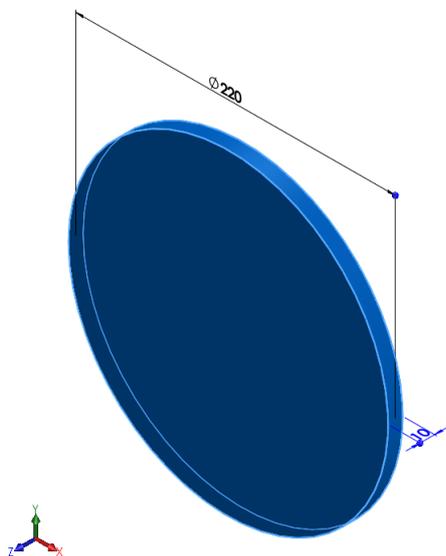


Figura A.80: Extrusión desde el plano medio.

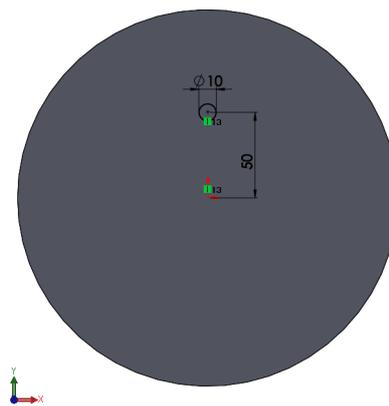


Figura A.81: Croquis del primer orificio.

Hacer clic sobre la operación de **Matriz lineal de croquis** (figura A.82). Una vez activada la operación, seleccionar la circunferencia antes dibujada. En el desplegable de **Dirección 1**, introducir **25 mm** en el cajetín de **Separación**. En el apartado de **Número de instancias**, introducir **3**. Esto creará 2 copias, además de la existente, de la circunferencia seleccionada al principio de la operación (figura A.83).

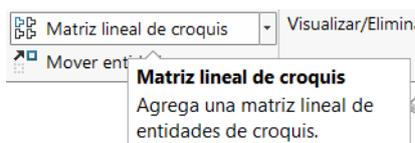


Figura A.82: Matriz lineal de croquis.

Repetir la operación anterior, pulsando esta vez sobre el icono de **Invertir dirección**

dentro del desplegable de **Dirección 1** (figura A.84).

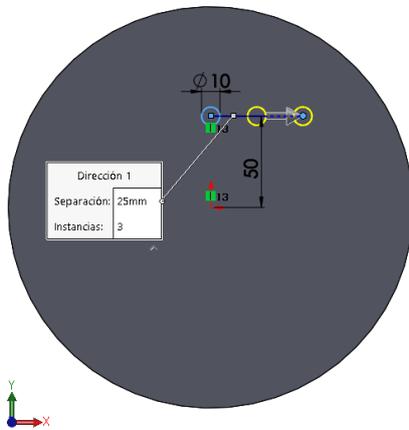


Figura A.83: Orificios en el sentido positivo del eje x.

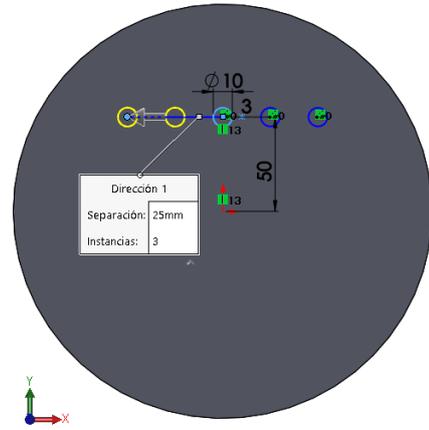


Figura A.84: Orificios en el sentido negativo del eje x.

Por última vez, hacer clic sobre la operación de **Matriz lineal de croquis** y seleccionar las cinco circunferencias que se han creado con las operaciones anteriores. En el desplegable de **Dirección 1**, en el cajetín de **Número de instancias**, introducir **1**. De esta forma no se copiarán instancias a lo largo del eje x. En el desplegable de **Dirección 2**, introducir **25 mm** en el cajetín de **Separación** y **5** en el de **Número de instancias**. En el cajetín de **Ángulo**, introducir **270°**, o bien, pulsar sobre el icono de **Invertir dirección**, de manera que las copias de las circunferencias se hagan en el sentido negativo del eje y.

El resultado de esta operación de matriz lineal se puede ver en la figura A.85.

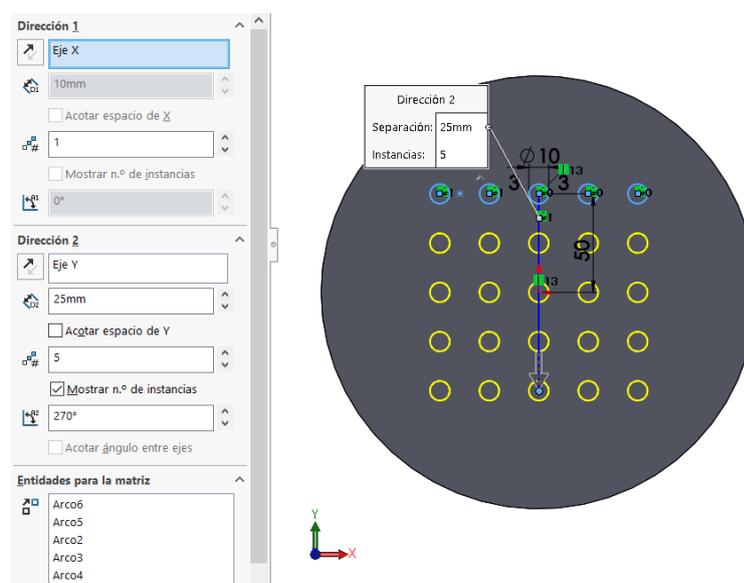


Figura A.85: Matriz lineal en el eje y.

Seleccionar las cuatro circunferencias de las esquinas y borrarlas. Para seleccionar varios elementos del mismo croquis a la vez, seleccionarlos mientras se mantiene pulsada la tecla *SHIFT* (figura A.86). Para eliminarlas, pulsar la tecla de *SUPR* (figura A.87).

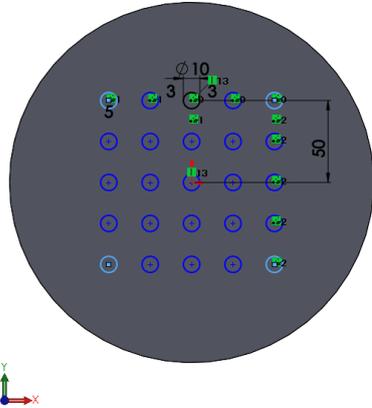


Figura A.86: Selección de las circunferencias de las esquinas.

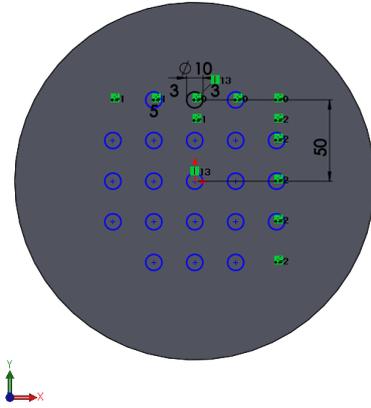


Figura A.87: Circunferencias de las esquinas eliminadas.

Salir del croquis y pulsar sobre la operación de **Extruir corte**. Seleccionar el croquis anterior y realizar el corte con la **Condición final** de **Hasta el siguiente**. La pieza debe quedar como la que se muestra en la figura A.88.

Por último, se hacen unos taladros con el mismo procedimiento que el descrito en el apartado A.3 (02 Cierre lateral.SLDPRT. Modelado de los cierres laterales), es decir, **8** taladros de tipo **M4**, con centro en una circunferencia auxiliar de **190 mm** de diámetro, obtenidos mediante el **Asistente para taladro** y, posteriormente, una operación de **Matriz circular**.

El resultado final de la pieza modelada se puede ver en la figura A.89.

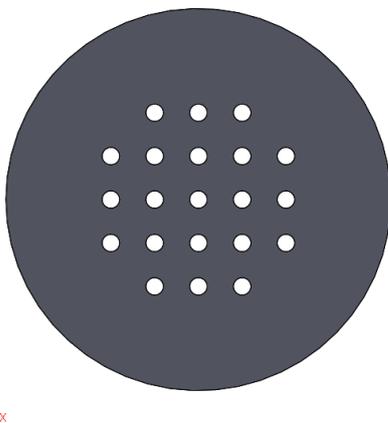


Figura A.88: Corte de los orificios de los tubos.

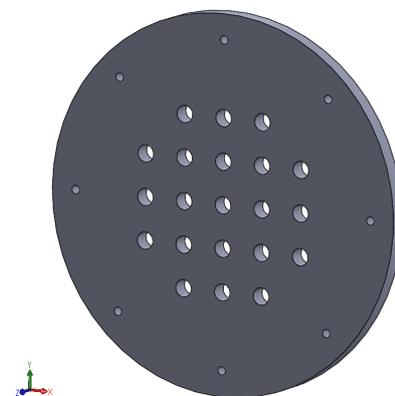


Figura A.89: Modelado final de la unión.

A.5. 04 Deflector.SLDPRT

Modelado de los deflectores

Crear un archivo nuevo de tipo pieza. Dibujar en el plano de **Alzado** una circunferencia de **148 mm** de diámetro y extruirla **3 mm** estableciendo en el desplegable de **Dirección 1** la **Condición final** de **Plano medio** (figura A.90).

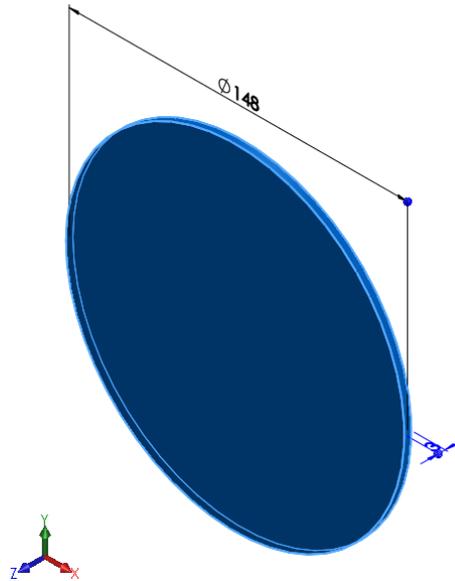


Figura A.90: Cuerpo base del deflector.

Para hacer el croquis de los orificios por los que pasarán los tubos del interior del intercambiador, proceder de la misma forma que en el apartado A.4 (Modelado de la unión carcasa-cierres laterales). Así, se debe llegar a un croquis como el que se muestra en la figura A.91.

Como a través de los deflectores debe circular agua, se debe facilitar una superficie de paso. Esta superficie se consigue modificando la circunferencia inferior central. Al pertenecer a una operación de una matriz lineal, no se puede modificar la cota de la circunferencia existente. Para poder cambiar su diámetro, se debe eliminar la circunferencia y dibujar una nueva con el centro en la misma vertical que el origen y en la misma horizontal que las dos circunferencias de esa fila. El diámetro de la nueva circunferencia será de **15 mm**. Se puede ver el croquis en la figura A.92.

Salir del croquis y pulsar sobre la operación de **Extruir corte**. Seleccionar el croquis anterior y realizar el corte con la **Condición final** de **Hasta el siguiente**. La pieza debe quedar como se muestra en la figura A.93.

Por último, se hacen unos taladros siguiendo el mismo procedimiento que el descrito en el apartado A.3 (02 Cierre lateral.SLDPRT. Modelado de los cierres laterales), pero con la

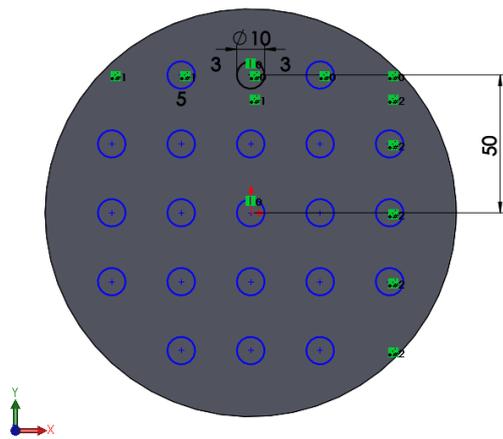


Figura A.91: Croquis inicial de los orificios del deflector.

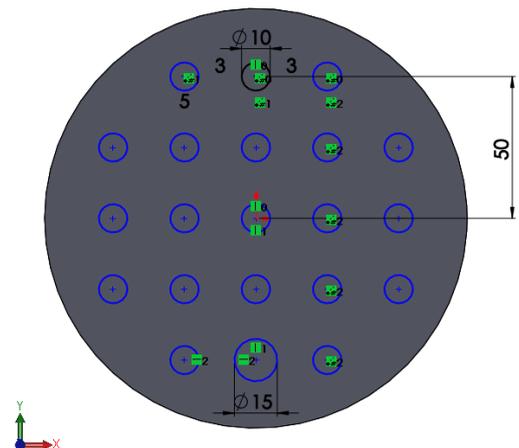


Figura A.92: Croquis final de los orificios del deflector.

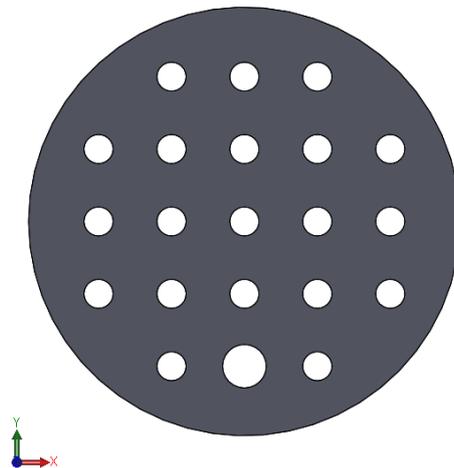


Figura A.93: Corte de los orificios del deflector.

modificación de algunas medidas.

La cota de los 8 taladros se modifica a un diámetro de **3,5 mm**. Para modificar la cota de un taladro, en la pestaña de **Tipo de taladro**, dentro del desplegable de **Especificaciones de taladro**, activar la casilla de **Mostrar ajuste de tamaño personalizado** e introducir el valor de **3,5 mm** (figura A.94). Los taladros tendrán el centro sobre una circunferencia auxiliar de **130 mm** de diámetro, obtenidos mediante el **Asistente para taladro** y, posteriormente, una operación de **Matriz circular**.

El resultado final de la pieza modelada se puede ver en la figura A.96.

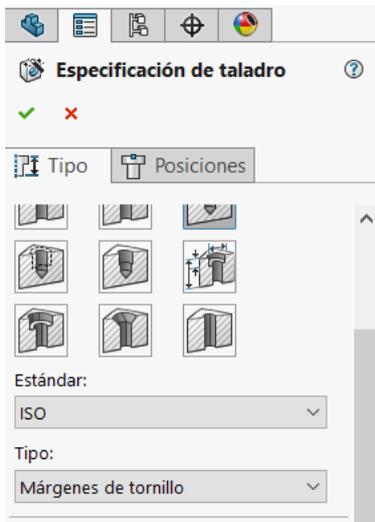


Figura A.94: Especificación del taladro (1).

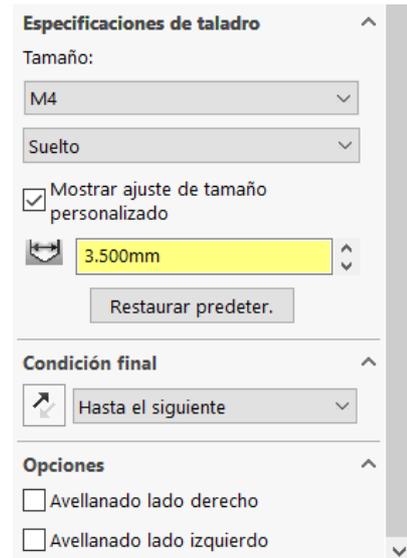


Figura A.95: Especificación del taladro (2).

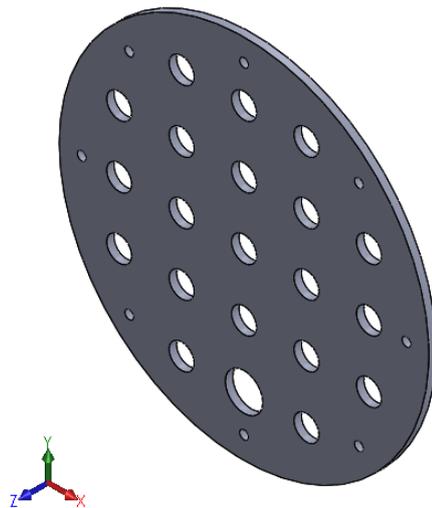


Figura A.96: Modelado final del deflector.

A.6. 05 Junta deflector.SLDPRT

Modelado de las juntas de los deflectores

Crear un archivo nuevo de tipo pieza. Dibujar en el plano de **Alzado** una circunferencia de **148 mm** de diámetro y extruirla **5 mm** estableciendo en el desplegable de **Dirección 1** la **Condición final** de **Plano medio** (figura A.97).

A continuación, hacer un **croquis** sobre la cara plana que se encuentra en el lado positivo del eje z. El croquis consiste en una circunferencia con centro en el origen y **121,8 mm** de diámetro. Una vez terminado el croquis, pulsar sobre la operación de **Extruir corte** y seleccionar el croquis. Hacer el corte a través de la pieza con la condición final de **Hasta el**

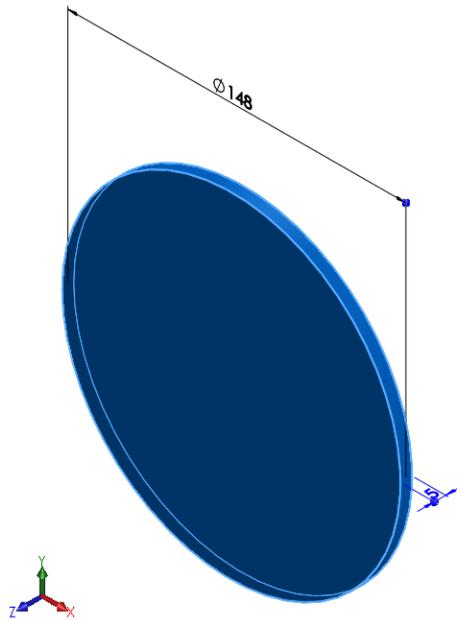


Figura A.97: Cuerpo base de la junta del deflector.

siguiente (figura A.98).

Por último, hacer **8** taladros con las mismas medidas que en el apartado A.5 (04 Deflector.SLDPRT. Modelado de los deflectores), es decir, taladros con un diámetro de **3,5 mm** con los centros sobre una circunferencia de **130 mm**, siguiendo el procedimiento explicado en el apartado A.3 (02 Cierre lateral.SLDPRT. Modelado de los cierres laterales).

El resultado final del modelado de la pieza se puede ver en la figura A.99.

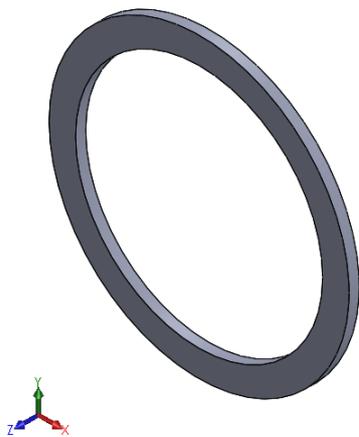


Figura A.98: Corte interior de la junta.

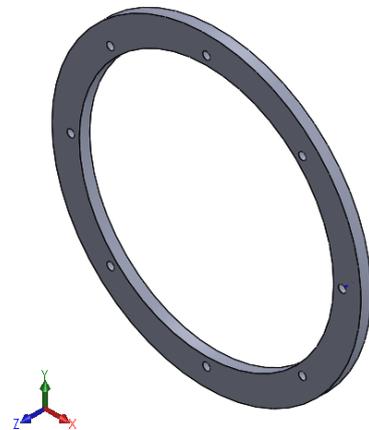


Figura A.99: Taladros de la junta.

A.7. 06 Tubo interior.SLDPRT

Modelado de los tubos interiores

Crear un archivo nuevo de tipo pieza. Dibujar en el plano de **Alzado** una circunferencia de **10 mm** de diámetro y extruirla **560 mm** estableciendo en el desplegable de **Dirección 1** la **Condición final** de **Plano medio**.

A continuación, hacer el **Croquis** de una circunferencia de **8 mm** de diámetro sobre la cara plana que se encuentra en el lado positivo del eje z. Seleccionar la operación de **Extruir corte** y hacer clic sobre el último croquis. Realizar el corte a través de la pieza con la condición final de **Hasta el siguiente**

El resultado final del modelado de la pieza se puede ver en la figura A.100.

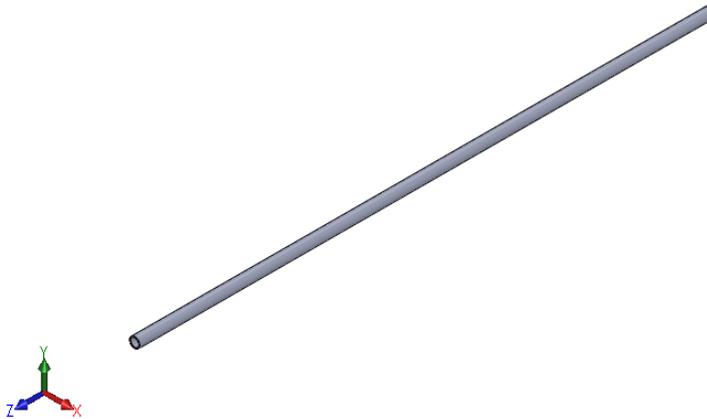


Figura A.100: Tubo interior.

A.8. Modelado de las tuberías de entrada y salida

A.8.1. 07 Tubería 1.SLDPRT

Crear un archivo nuevo de tipo pieza. Dibujar en el plano de **Alzado** una circunferencia de **15 mm** de diámetro y extruirla **80 mm** en el sentido positivo del eje z.

A continuación, hacer el **Croquis** de una circunferencia de **12,7 mm** de diámetro sobre la cara plana de la pieza que se encuentra en el lado positivo del eje z. Seleccionar la operación de **Extruir corte** y hacer clic sobre el último croquis. Realizar el corte a través de la pieza con la condición final de **Hasta el siguiente** (figura A.101).

Para terminar con el modelado de la tubería hace falta realizar un orificio por el que se introducirá un sensor de temperatura.

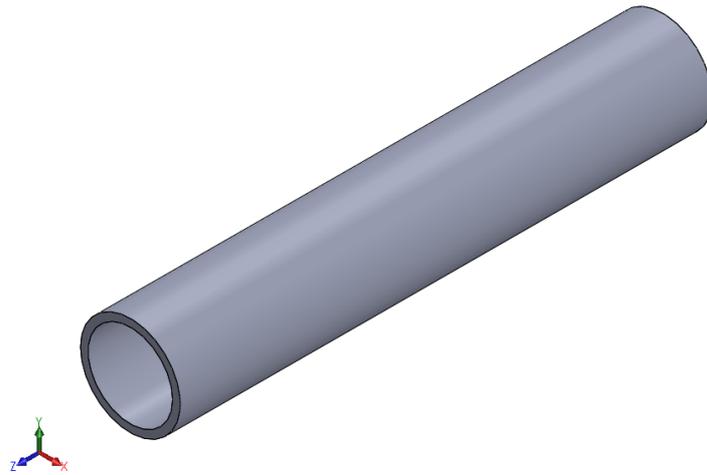


Figura A.101: Comienzo del modelado de la primera tubería.

Crear un **Plano** paralelo al plano de **Planta**, y tangente a la tubería, en la parte superior de la misma (figura A.102).

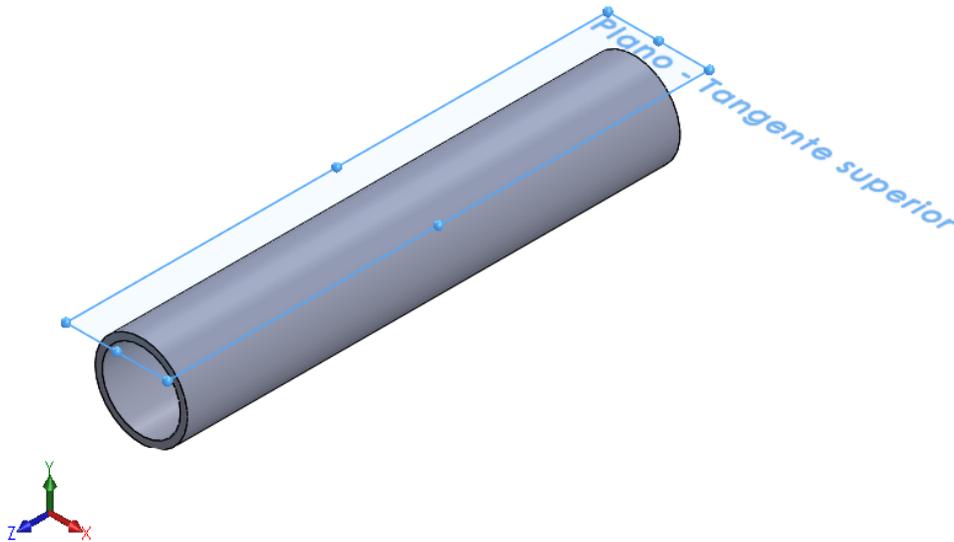


Figura A.102: Plano superior tangente a la tubería.

Sobre el plano anterior, hacer el **Croquis** de una circunferencia de diámetro **4 mm**, con el centro a una distancia de **28 mm** del extremo de la tubería que coincide con el origen de coordenadas. Una vez terminado el croquis, realizar una operación de **Extruir corte**, con la condición final de **Hasta el siguiente** (figura A.103).

El resultado final del modelado de la pieza se puede ver en la figura A.104.

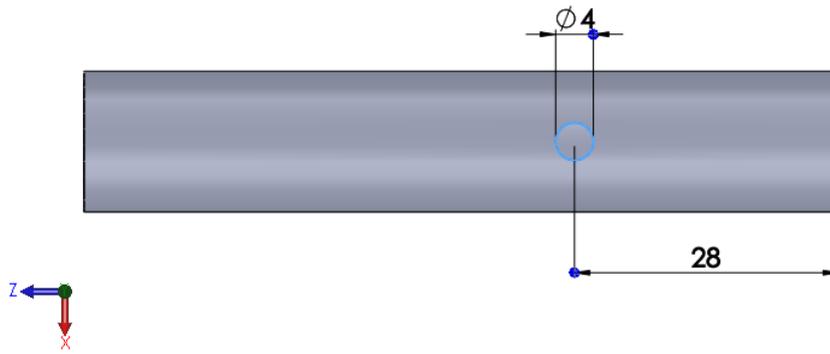


Figura A.103: Corte del orificio para introducir el sensor.



Figura A.104: Modelo terminado de la tubería 1.

A.8.2. 08 Tubería 2.SLDPRT

Crear un archivo nuevo de tipo pieza. Dibujar en el plano de **Alzado** dos rectas perpendiculares entre sí, con un redondeo de **10 mm** en la unión (figura A.105).

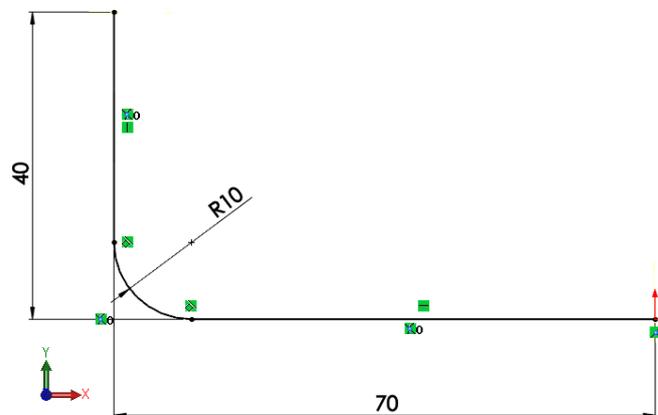


Figura A.105: Croquis de la segunda tubería.

Crear un nuevo **Plano**, tomando como **Primera referencia** el plano de **Planta** y como **Segunda referencia**, el punto del extremo (que no coincide con el origen) del croquis anterior (figura A.106).

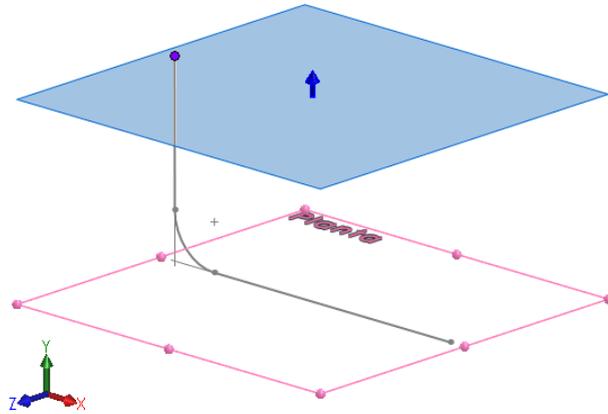


Figura A.106: Definición del plano en el extremo de la tubería.

Sobre el plano recién creado, hacer el croquis de una circunferencia de **12,7 mm** de diámetro, con centro en el punto que se ha usado para definir el plano anterior (figura A.107).

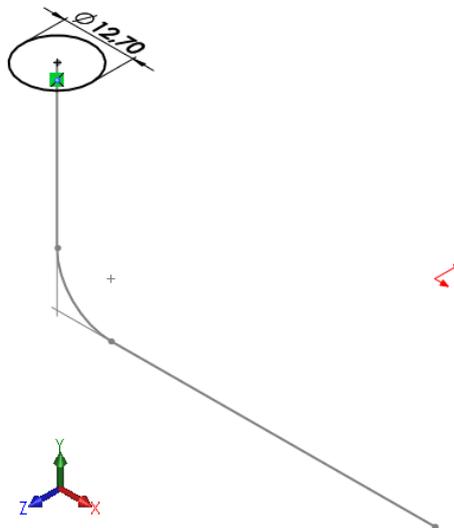


Figura A.107: Croquis en el extremo de la tubería.

En la pestaña de operaciones, seleccionar la operación de **Saliente/Base barrido** (figura A.108). Mediante esta operación se podrá tomar un croquis como trayectoria sobre la que extruir otro croquis.

En el recuadro de **Perfil**, seleccionar el croquis de la circunferencia y en el de **Ruta**, el primer croquis de todos. De esta manera se creará un sólido macizo. Para modelar también

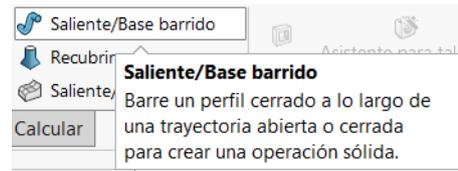


Figura A.108: Operación de Saliente/Base barrido.

las paredes de la tubería, activar la casilla de **Operación lámina**. En el desplegable de **Tipo**, seleccionar **Una dirección**, y en el recuadro de **Espesor**, introducir **1,15 mm** (figura A.109)⁶.

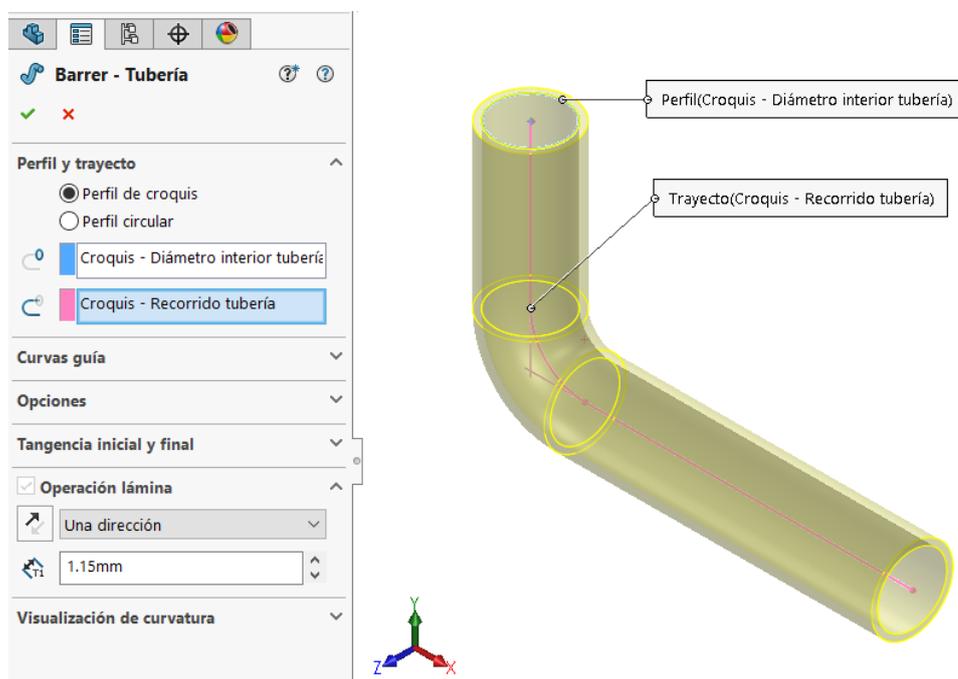


Figura A.109: Barrido con operación lámina de la segunda tubería.

La tubería irá acoplada a la carcasa del intercambiador. Como la carcasa es curva, y la cara de unión de la tubería es plana, hace falta redondearla para que a la hora de realizar el ensamblaje no haya problemas. Para ello se prolongará unos milímetros el extremo de la tubería para, a continuación, recortarlo con la misma curvatura que la carcasa.

En la pestaña de croquis, hacer clic sobre el desplegable de la operación de **Convertir entidades**, y seleccionar **Curva de intersección** (figura A.110).

En el recuadro de **Seleccionar entidades**, seleccionar la cara plana superior de la tubería (la cara paralela al plano de planta), y el plano creado anteriormente en el que se hizo el croquis de la circunferencia de **12,7 mm** de diámetro. Al seleccionar estos elementos,

⁶Comprobar que las paredes se crean hacia fuera, es decir, resultando en un diámetro exterior de **15 mm**. En caso contrario, pulsar sobre el icono correspondiente a **Invertir dirección**.

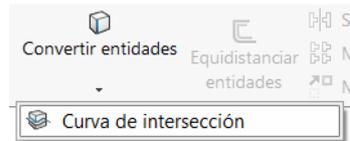


Figura A.110: Curva de intersección.

SolidWorks creará un **Croquis 3D** con la intersección de la cara con el plano (figura A.111).

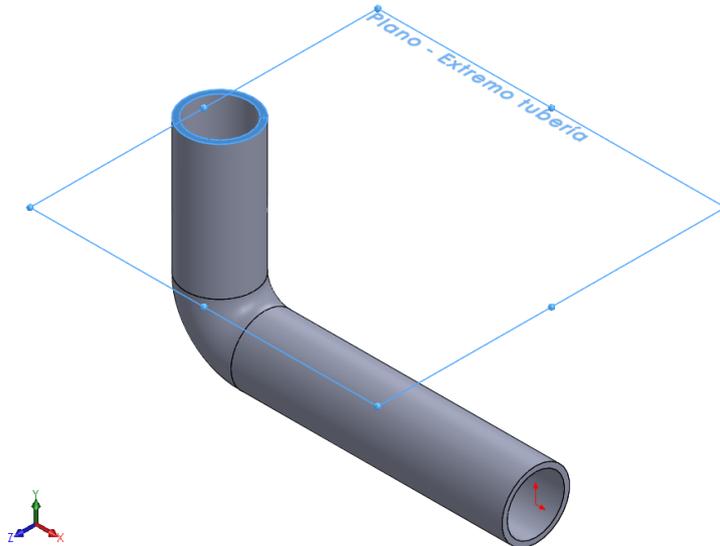


Figura A.111: Intersección de la tubería con el plano.

A continuación, hacer clic sobre la operación de **Extruir saliente/base**. Seleccionar el croquis 3D creado en el paso anterior y, al tratarse de un croquis 3D, también hace falta definir la dirección en que se va a extruir. Para ello, hacer visibles los ejes de las piezas y seleccionar el eje de la tubería paralelo al eje y. Extruir **5 mm** en el sentido positivo del eje y (figura A.112).

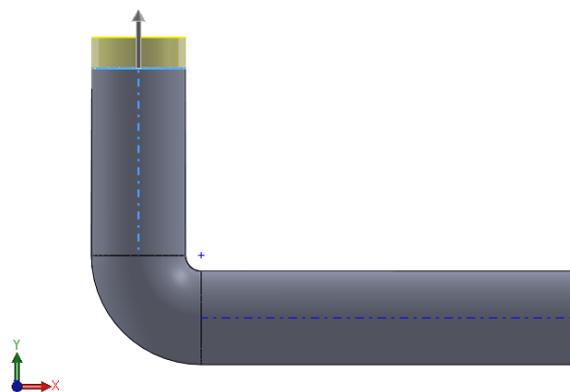


Figura A.112: Extrusión del extremo de la tubería.

Para realizar el corte, hacer en el plano de **Alzado** el croquis de una circunferencia de **160 mm** de diámetro. El centro debe estar en la misma vertical que el centro de la trayectoria vertical de la tubería, y a **80 mm** del extremo de la misma, antes de haber sido prolongada. Hacer visible el croquis de la trayectoria de la tubería para poder fijar la posición de la circunferencia (figura A.113).

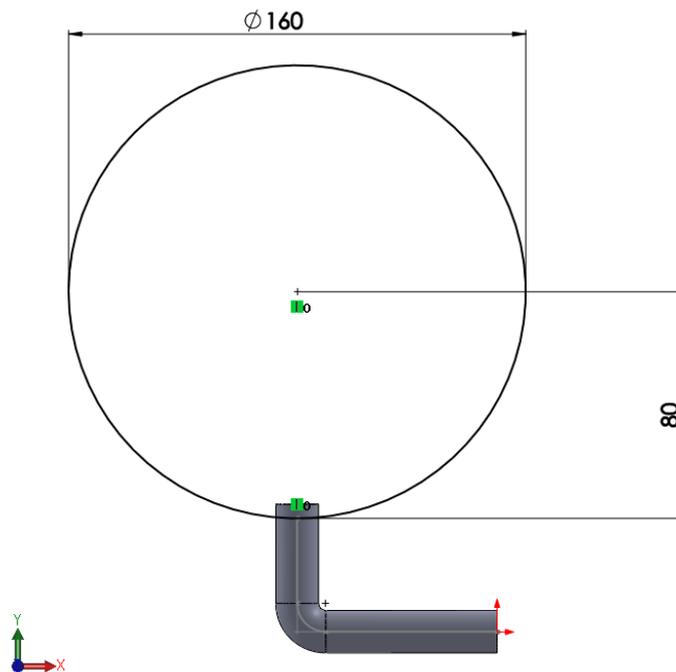


Figura A.113: Circunferencia para el corte del extremo.

Hacer clic en la operación de **Extruir corte** y seleccionar el croquis. En la pestaña de **Dirección 1**, dentro del desplegable de **Condición final**, seleccionar **Por todo: ambos**. De esta manera se deberá realizar el corte, dejando en el extremo de la tubería la misma curvatura de la carcasa (figura A.114).

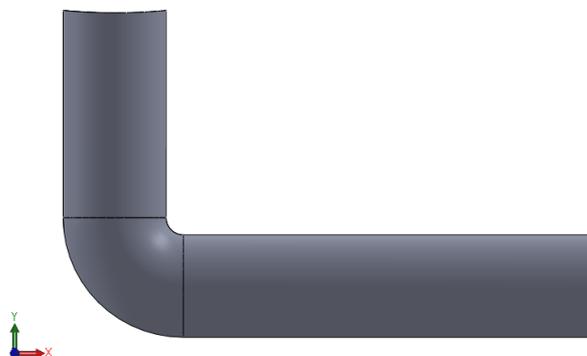


Figura A.114: Corte del extremo de la tubería.

Para terminar con el modelado de la tubería, hace falta realizar un orificio por el que se introducirá un sensor de temperatura.

Definir un **Plano**, paralelo al plano de **Alzado**, y tangente al tramo horizontal de la tubería (figura A.115). Sobre este plano, hacer el **Croquis** de una circunferencia de **4 mm** de diámetro, con el centro en la misma horizontal que el origen y a una distancia de **10 mm** del principio del codo (figura A.116).

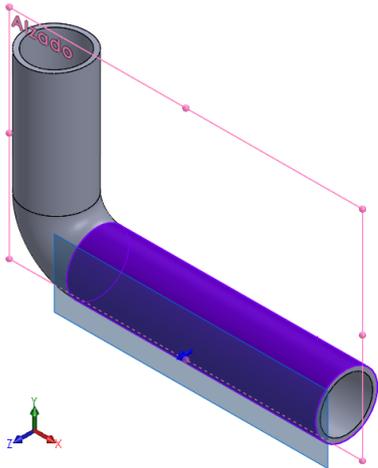


Figura A.115: Definición del plano lateral a la tubería.

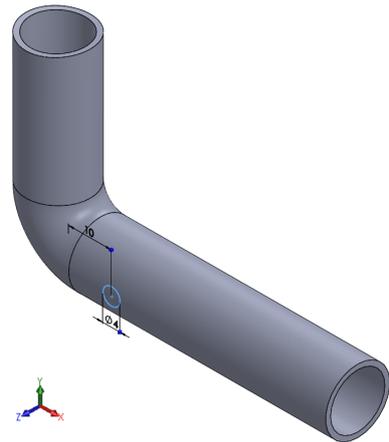


Figura A.116: Croquis del orificio del sensor.

Finalmente, seleccionar la operación de **Extruir corte** con la condición final de **Hasta el siguiente**. El resultado final del modelado de la pieza se puede ver en la figura A.117.

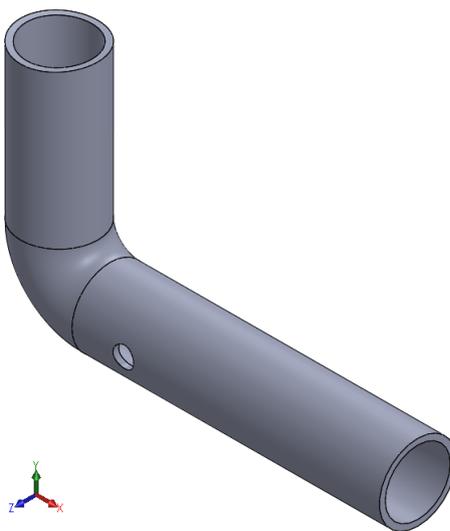


Figura A.117: Modelo terminado de la tubería 2.

A.8.3. 09 Tubería 3.SLDPRT

El modelado de esta tubería se realizará de manera similar al modelado de la tubería del apartado A.8.2 (08 Tubería 2.SLDPRT), pero con una orientación distinta y con el orificio para el sensor en una posición diferente.

La pieza debe quedar orientada como si se hubiese girado 180° respecto al eje z (figura A.118).

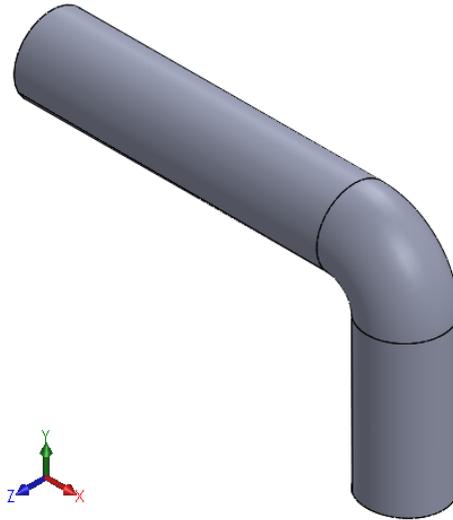


Figura A.118: Orientación de la tercera tubería.

Para terminar con el modelado de la tubería, hace falta realizar un orificio por el que se introducirá un sensor de temperatura.

Definir un **Plano**, paralelo al plano de **Planta**, y tangente al tramo horizontal de la tubería (figura A.119). Sobre este plano, hacer un **Croquis** de una circunferencia de **4 mm** de diámetro, con el centro en la misma horizontal que el origen y a una distancia de **10 mm** del principio del codo (figura A.120).

Finalmente, seleccionar la operación de **Extruir corte** con la condición final de **Hasta el siguiente**. El resultado final del modelado de la pieza se puede ver en la figura A.121.

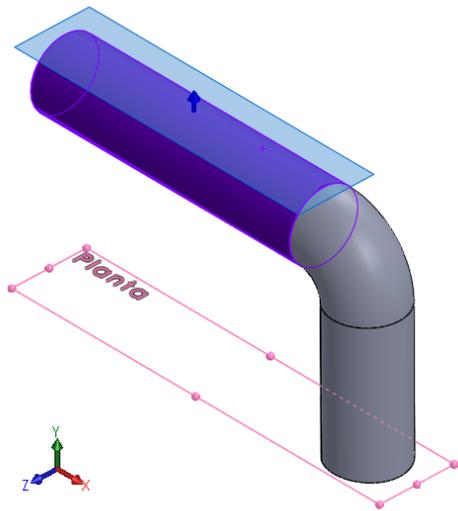


Figura A.119: Definición del plano tangente superior.

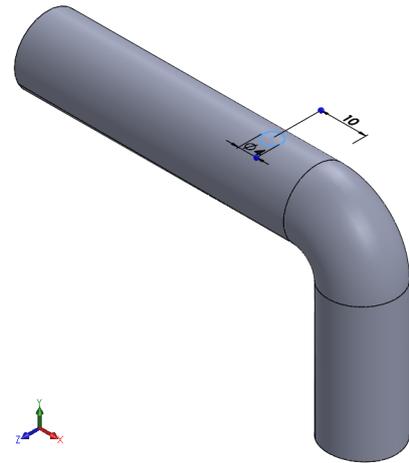


Figura A.120: Dimensiones del orificio para el sensor.

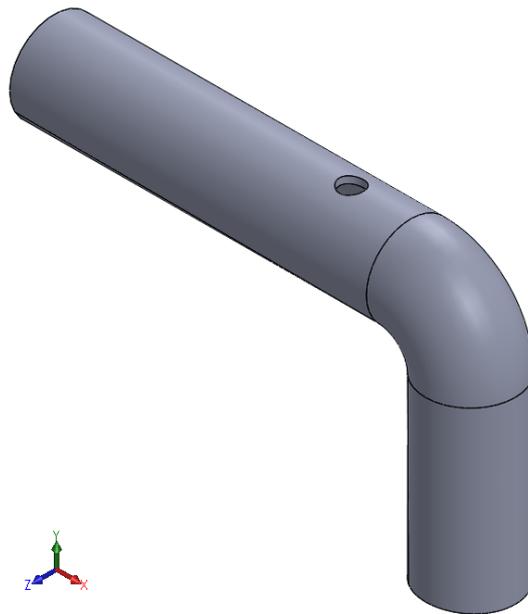


Figura A.121: Modelo terminado de la tubería 3.

A.8.4. 10 Tubería 4.SLDPRT

El modelado de esta tubería se realizará de manera similar al modelado de la tubería del apartado A.8.1 (*07 Tubería 1.SLDPRT*), pero con el orificio para el sensor en una posición diferente, concretamente midiendo la distancia de separación del orificio al extremo desde el extremo opuesto.

La pieza modelada se puede ver en la figura A.122.



Figura A.122: Modelo terminado de la tubería 4.

A.9. Modelado de los sensores

A.9.1. 11 *Sensor carcasa.SLDPRT*

Crear un archivo nuevo de tipo pieza. Dibujar en el plano de **Alzado** una circunferencia de 4 mm de diámetro y extruirla **70 mm** en el sentido positivo del eje z.

Seleccionar la operación de **Redondeo** y aplicar un redondeo de **2 mm** de radio a la arista más alejada del origen (figura A.123).

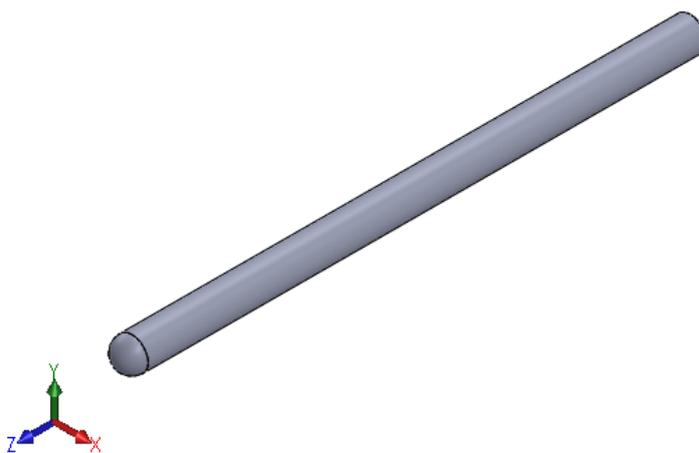


Figura A.123: Redondeo del extremo del sensor.

Crear un **Croquis** en el plano de **Alzado**. El croquis será un hexágono con una circunferencia inscrita de **10 mm** de diámetro. Para dibujar un hexágono, seleccionar el elemento

Polígono dentro de la pestaña de **Croquis** (figura A.124).

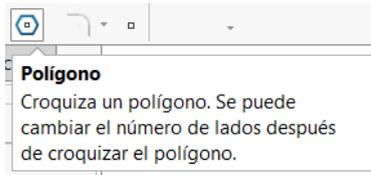


Figura A.124: Elemento polígono.

Dentro de la selección del elemento, en el recuadro de **Número de lados**, introducir **6**. Activar la casilla de **Círculo inscrito**. En el recuadro de **Diámetro de círculo** introducir **10**, y en el de **Ángulo**, **360°** (figura A.125).

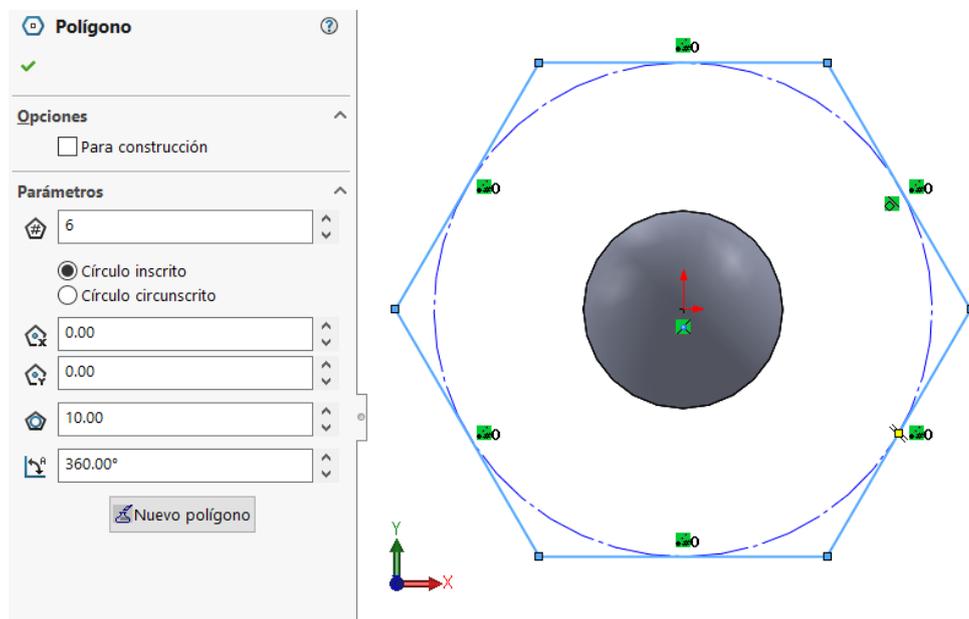


Figura A.125: Croquis hexagonal del sensor.

Extruir 13 mm el croquis anterior en el sentido negativo del eje z (figura A.126).



Figura A.126: Extrusión del cuerpo hexagonal del sensor.

Sobre el plano de perfil, hacer el **Croquis** de un triángulo con la forma y en la posición de la figura A.127.

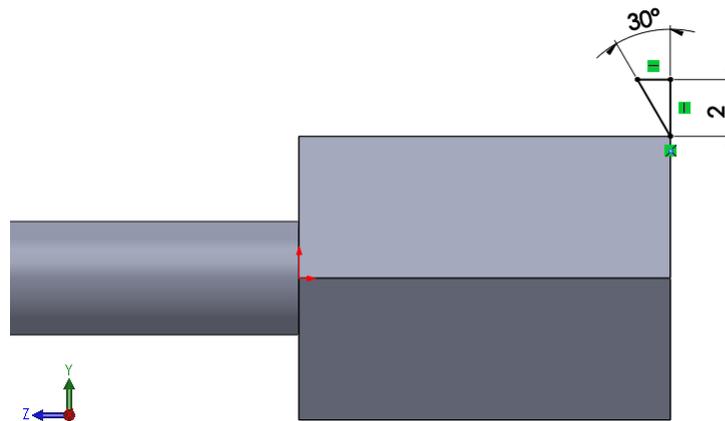


Figura A.127: Croquis para el recorte por revolución.

Seleccionar el croquis anterior y hacer clic sobre la operación de **Corte de revolución** en la pestaña de operaciones (figura A.128). En el recuadro de **Eje de revolución**, seleccionar el eje longitudinal del sensor (eje paralelo al eje z). Para seleccionarlo debe hacerse visible de la manera explicada en el apartado A.1.3 (Visibilidad de planos). La operación debe quedar como se ve en la figura A.129.

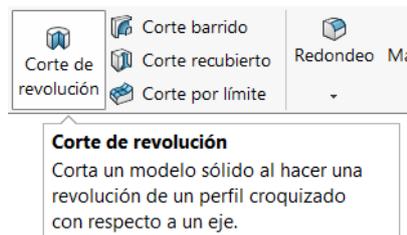


Figura A.128: Operación de corte por revolución.

Crear un **Plano** entre las dos caras del extremo del sensor. Para ello seleccionar la operación de **Geometría de referencia** y, a continuación, **Plano**. Una vez dentro de la operación, en el recuadro de la **Primera referencia** seleccionar una de las caras planas del extremo, y en el recuadro de **Segunda referencia**, la otra cara plana. Con esto se habrá creado un plano medio entre las dos caras (figura A.130).

Por último, seleccionar la operación de **Simetría**. En el recuadro de **Simetría de cara/plano** seleccionar el plano medio creado antes. En el recuadro de **Operaciones para hacer simetría**, seleccionar la operación de corte por revolución realizada anteriormente.

El resultado final de la pieza modelada se puede ver en la figura A.131.

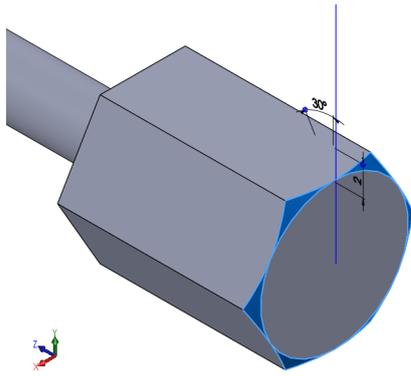


Figura A.129: Resultado del corte por revolución.

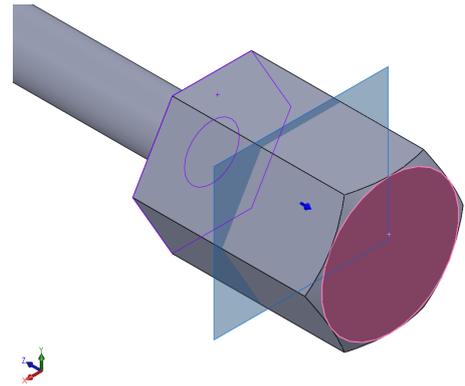


Figura A.130: Definición del plano medio en el cuerpo hexagonal.

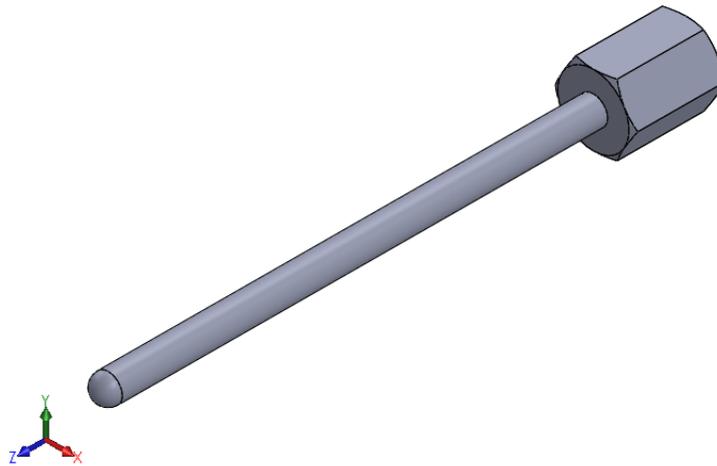


Figura A.131: Modelo terminado del sensor de la carcasa.

A.9.2. 12 Sensor tubería.SLDPRT

Crear un archivo nuevo de tipo pieza. Dibujar en el plano de **Alzado** una circunferencia de 4 mm de diámetro y extruirla **7,5 mm** en el sentido positivo del eje z.

Seleccionar la operación de **Redondeo** y aplicar un redondeo de **2 mm** de radio a la arista más alejada del origen (figura A.132).

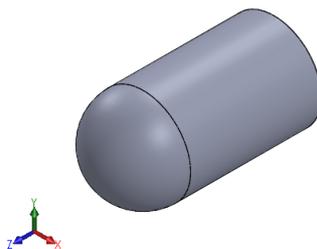


Figura A.132: Extrusión y redondeo del sensor.

Crear un **Croquis** en el plano de **Planta**. El croquis será una circunferencia con centro en el extremo del sensor y con un diámetro de **15 mm** (figura A.133).

Hacer clic sobre la operación de **Extruir corte** y seleccionar el croquis anterior. En el desplegable de **Condición final** del apartado de **Dirección 1**, seleccionar **Por todo: ambos**. Activar la casilla de **Invertir lado a cortar** para eliminar lo que quede fuera de la circunferencia, no dentro (figura A.134).

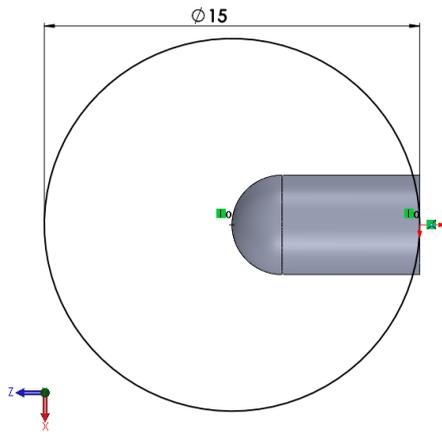


Figura A.133: Croquis para el corte del sensor.

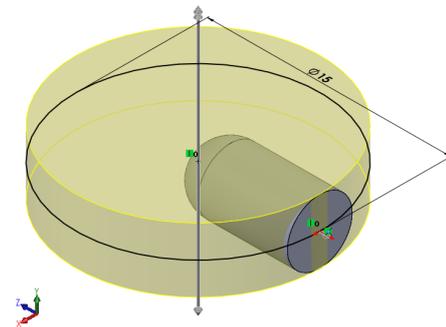


Figura A.134: Invertir lado a cortar.

Una vista de la pieza modelada se puede ver en la figura A.135.

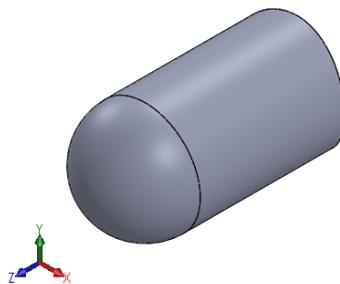


Figura A.135: Modelo terminado del sensor de la tubería.

A.10. Modelado de los elementos de fijación y ensamblaje

Habrán dos tipos distintos de tornillos, dos tipos de tuercas y un tipo de arandela. Para obtenerlos, se hará uso del complemento **Toolbox** de SolidWorks.

Para activar el complemento, hacer clic sobre el desplegable junto al icono de **Opciones**, con forma de engranaje en la barra superior. Dentro del desplegable, seleccionar **Complementos...** (figura A.136).

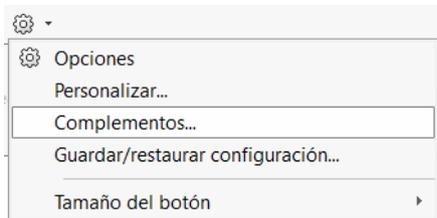


Figura A.136: Acceso a los complementos.

Se abrirá la ventana que administra el uso de los complementos instalados. Buscar los complementos **SOLIDWORKS Toolbox Library** y **SOLIDWORKS Toolbox Utilities**. Activar la primera casilla de cada uno de los dos complementos para que se active el complemento en la sesión actual de SolidWorks. Para no tener que repetir este proceso cada vez que se inicie el programa, se puede activar la segunda casilla también, que arrancará el complemento cada vez que se inicie SolidWorks (figura A.137). Para salir, pulsar en **Aceptar**.

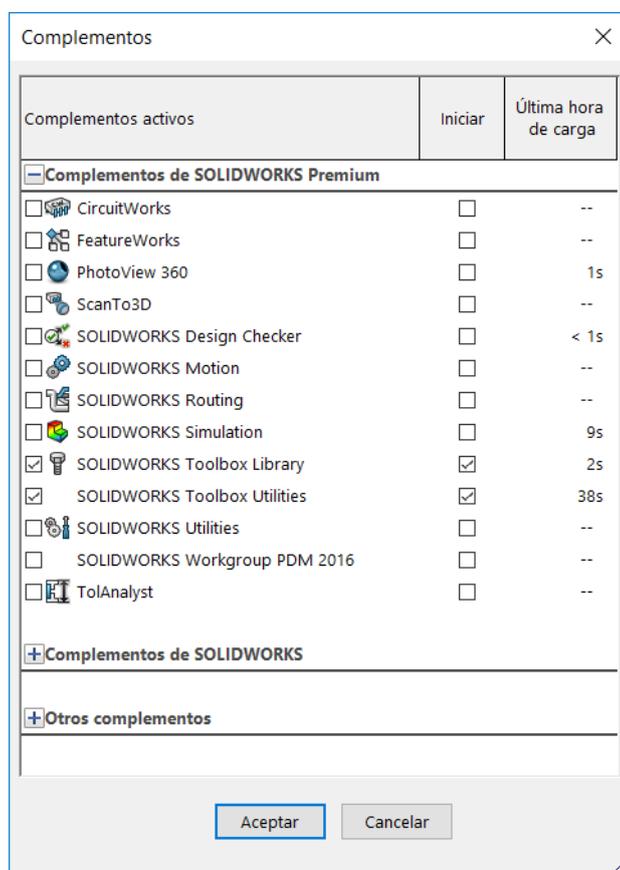


Figura A.137: Ventana con los complementos de SolidWorks.

Una vez activado el complemento, hacer clic sobre el segundo icono de la barra del lateral derecho. El icono corresponde a la **Biblioteca de diseño**. En ella, se podrá ver que se encuentra un desplegable llamado **Toolbox**. Hacer clic sobre él y se podrán ver las distintas carpetas en las que están los elementos de este complemento (figura A.138).

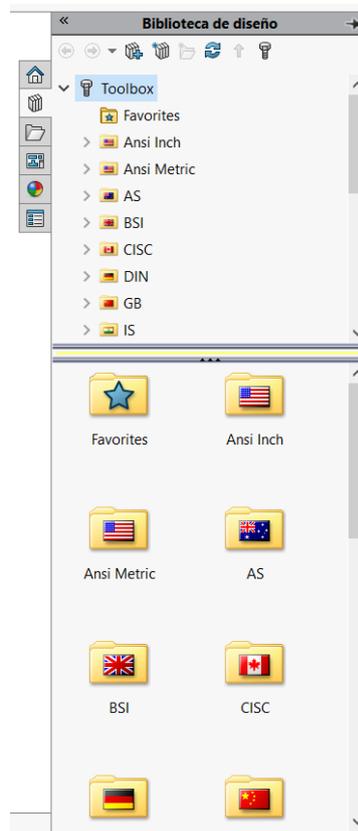


Figura A.138: Distintos elementos del Toolbox de SolidWorks.

A la hora de utilizar un elemento del Toolbox, pulsar sobre él con el botón derecho y pulsar sobre **Crear pieza...**

En el **PropertyManager** aparecerán una serie de desplegados en los que se podrán definir varios parámetros de las piezas. Una vez configurados estos parámetros, hacer clic sobre el icono verde que aparecerá y así se guardarán los cambios hechos en la configuración del componente. A continuación, guardar el archivo con el nombre deseado, en la carpeta que se quiera.

Este será el procedimiento a seguir para conseguir cada una de las piezas que se presentan a continuación. En cada apartado, simplemente se escribirá la ruta de Toolbox en la que se encuentra la pieza y los parámetros del elemento que se han configurado. El nombre con el que se guarde el archivo se puede ver en el título de cada apartado.

A.10.1. 13 Tornillo carcasa.SLDPRT

Ruta del componente: ISO > Pernos y tornillos > Tornillos con cabeza hueca hexagonal > Cabeza hexagonal hueca ISO 4762

- **Tamaño:** M4
- **Longitud:** 40
- **Longitud de rosca:** 40



Figura A.139: Tornillo carcasa.

A.10.2. 14 Tuerca carcasa.SLDPRT

Ruta del componente: ISO > Tuercas > Tuercas hexagonales > Tuerca hexagonal tipo 1 ISO - 4032

- **Tamaño:** M4
- **Finalizar:** Chafán doble

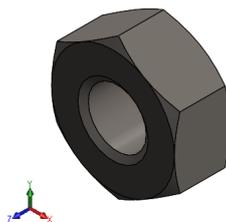


Figura A.140: Tuerca carcasa.

A.10.3. 15 Tornillo deflector.SLDPRT

Ruta del componente: ISO > Pernos y tornillos > Tornillos con cabeza hueca hexagonal > Cabeza hexagonal hueca ISO 4762

- Tamaño: M3
- Longitud: 20
- Longitud de rosca: 20



Figura A.141: Tornillo deflector.

A.10.4. 16 Tuerca deflector.SLDPRT

Ruta del componente: ISO > Tuercas > Tuercas hexagonales > Tuerca hexagonal tipo 1 ISO - 4032

- Tamaño: M3
- Finalizar: Chaflán doble

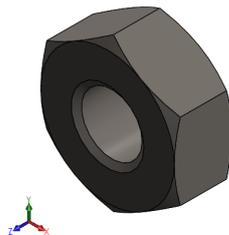


Figura A.142: Tuerca deflector.

A.10.5. 17 Arandela carcasa.SLDPRT

Ruta del componente: ISO > Arandelas > Arandelas simples > Arandela – ISO 10673 pequeña, normal y grande

- **Tamaño:** 4,55
- **Tipo:** S

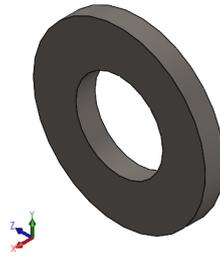


Figura A.143: Arandela carcasa.

A.11. Ensamblaje del modelo

Desde la ventana principal de SolidWorks, crear un **Nuevo** archivo y seleccionar el tipo **Ensamblaje**, tal y como se muestra en la figura A.144.



Figura A.144: Crear un nuevo ensamblaje.

Una vez creado el ensamblaje nuevo, se abrirá en la pestaña del **PropertyManager** la operación de **Empezar ensamblaje**. Dentro de esta operación, en el desplegable de **Pieza/Ensamblaje para insertar** pulsar sobre **Examinar...** (figura A.145). Esto último abrirá una ventana desde la que se podrá seleccionar un archivo tipo pieza o un ensamblaje ya hecho.

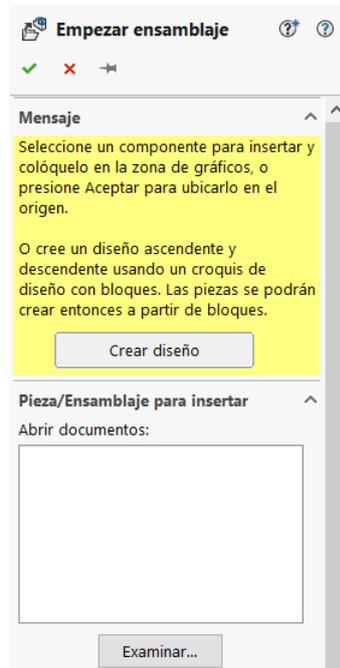


Figura A.145: Empezar ensamblaje.

La primera pieza en incluirse en un ensamblaje suele ser sobre la que irán añadiendo el resto de piezas, por lo que se debe incluir una pieza que se considere como *principal*.

La primera pieza que se va a abrir va a ser el modelo de la carcasa, que en este trabajo se ha guardado con el nombre de **01 Carcasa.SLDPRT**. Al seleccionarla y abrirla, la pieza se situará sobre el cursor y se moverá con él. Para terminar de incluirla en el archivo del ensamblaje, hacer clic sobre cualquier lugar del espacio de trabajo. Esta primera pieza estará, a priori, fija en el espacio de trabajo. Se puede ver esto en la pestaña del **Gestor de diseño** ya que antes del nombre del archivo se añade automáticamente (**f**).

Se va hacer coincidir el origen del ensamblaje con el origen de la carcasa, para ello hay que hacer móvil la pieza de la carcasa pulsando con el botón derecho sobre el nombre de la pieza en la pestaña del **Gestor de diseño** y haciendo clic sobre **Flotar** (figura A.146). Se puede ver que la pieza ya no es fija ya que delante del nombre se habrá cambiado (**f**) por **(-)**.

Una vez hecha la pieza flotante, pulsar sobre el desplegable situado junto al nombre de la pieza en el **Gestor de diseño**. Esto permite ver todas las operaciones realizadas sobre la pieza.

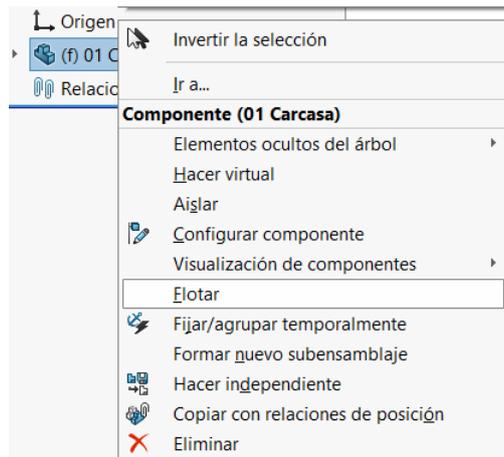


Figura A.146: Flotar pieza.

Hacer clic sobre el **Origen** de la pieza (dentro del desplegable activado en el último paso) y, con la tecla de **CTRL** pulsada, hacer clic sobre el **Origen** del ensamblaje (justo encima del nombre de la carcasa). Ver figura A.147.

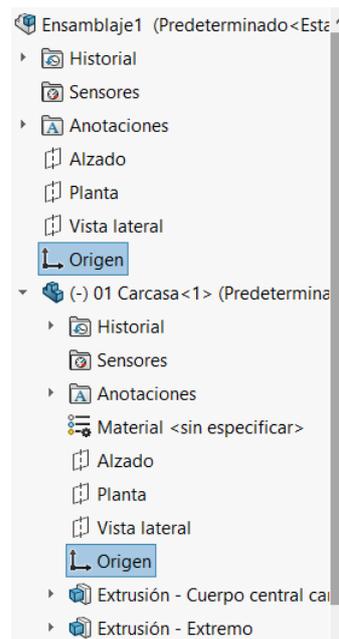


Figura A.147: Selección del origen de la pieza y del ensamblaje.

Con los dos orígenes seleccionados, hacer clic sobre el icono de **Relación de posición**, en la pestaña de **Ensamblaje** (figura A.148). Seleccionar la relación de **Coincidentes** y aceptar.

Para volver a hacer fija la pieza de la carcasa, hacer clic con el botón derecho sobre el nombre de la pieza y seleccionar esta vez **Fijar**.

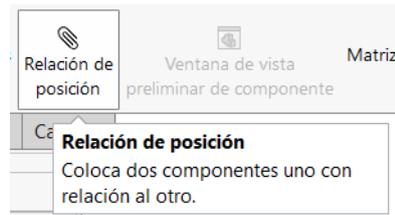


Figura A.148: Relación de posición.

A continuación, se van a incluir en el ensamblaje los deflectores y los tubos interiores. En la pestaña de **Ensamblaje** hacer clic sobre **Insertar componentes** (figura A.149). Aparecerá el mismo diálogo de operación que cuando se insertó la carcasa. Hacer clic sobre **Examinar...**

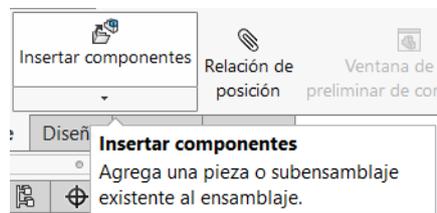


Figura A.149: Insertar componentes.

En la ventana emergente que saldrá, seleccionar la pieza **04 Deflector.SLDPRT**. Insertarla en cualquier punto del ensamblaje.

Se va a necesitar otra copia del deflector. Para ello, se puede volver a insertar de la misma forma que antes o, pulsando la tecla de *CTRL*, pulsar sobre la pieza que se quiera copiar y arrastrar. Al soltar la pieza, se habrá copiado.

Ambos deflectores tienen la misma orientación, pero uno de ellos debe estar girado 180° sobre el eje z. Para girar uno de los deflectores, en la pestaña de **Ensamblaje** pulsar en el desplegable que hay debajo de **Mover componente**. Seleccionar la operación de **Girar componente** (figura A.150).



Figura A.150: Girar componente.

En el desplegable de **Girar**, seleccionar la opción de **Por delta XYZ**, y en el recuadro de ΔZ introducir 180° (figura A.151). Pulsar sobre el primer deflector que se introdujo y hacer clic sobre **Aplicar**. Para confirmar la operación, pulsar sobre el símbolo verde con

forma de tic.

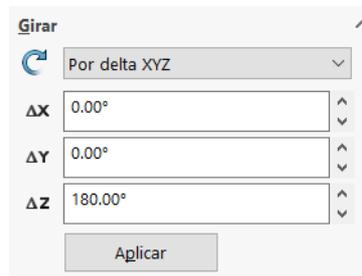


Figura A.151: Giro de 180° del deflector.

El deflector se habrá girado, pero lo habrá hecho respecto al origen del ensamblaje. Para colocarlo en una zona cercana a la original, pulsar sobre la pieza y, manteniendo pulsado el botón izquierdo del ratón, arrastrar hasta donde se quiera soltar la pieza. Tras esto, los dos deflectores deben quedar, provisionalmente, como en la figura A.152

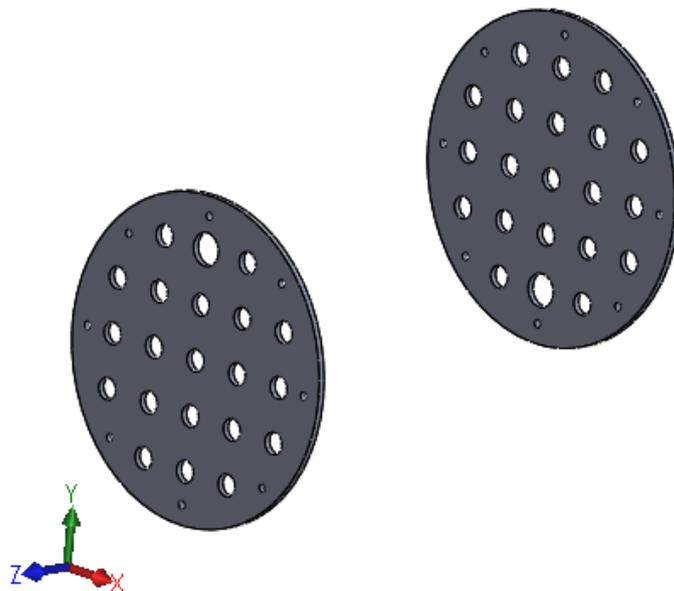


Figura A.152: Posición provisional de los deflectores.

El resto de deflectores se dispondrán después de introducir los tubos interiores del intercambiador.

Introducir en el ensamblaje la pieza **06 Tubo interior.SLDPRT**. Introducirlo en una zona cercana a la de los deflectores para trabajar con mayor comodidad.

Antes de seguir con la introducción de piezas en el ensamblaje, se van a crear dos ejes de referencia que se utilizarán más adelante en varias operaciones. Para ello, crear un **Croquis** en el plano de **Alzado**. El croquis consistirá en dos líneas perpendiculares entre sí, siendo

coincidente con el origen el punto en el que se cortan. Ambas líneas serán de **Construcción** (figura A.153).

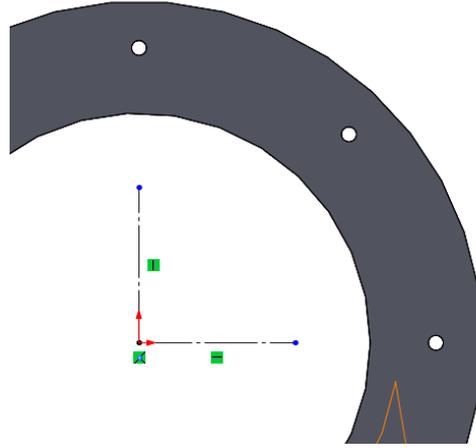


Figura A.153: Croquis de los ejes de referencia.

Una vez creados los ejes de referencia, se va a proceder a disponer el resto de tubos en sus posiciones. Primero, se colocará el tubo, introducido anteriormente, en el primer orificio de la segunda fila del deflector con el orificio mayor en la parte superior. Para ello, en la pestaña de **Ensamblaje**, pulsar sobre la operación de **Relación de posición**⁷.

Tras activar la operación y hacer clic en el recuadro de **Entidades para relacionar**, seleccionar la cara cilíndrica exterior del tubo y la cara correspondiente al espesor del orificio mencionado anteriormente. Automáticamente se definirá la relación de **Concéntrica**. En caso contrario, seleccionarla manualmente. Aparecerá, junto a la relación, un recuadro con el texto **Bloquear rotación**. Activarlo (figura A.154).

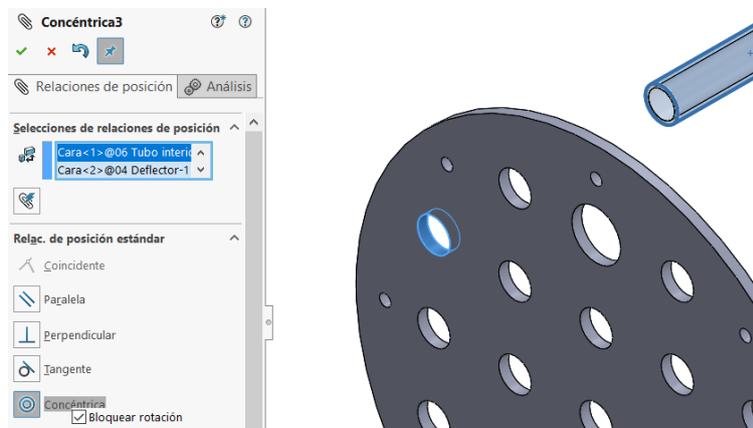


Figura A.154: Relación de *Concéntrica* y la opción de *Bloquear rotación*.

⁷Al seleccionar los dos elementos entre los que se quiera establecer una relación, automáticamente se activará esta operación.

A continuación, seleccionar la cara frontal del deflector y la cara frontal del tubo⁸. Se activará automáticamente la operación de **Relación de posición**. Seleccionar la relación de **Distancia** e introducir el valor de **105 mm** (figura A.155). En el caso de que la distancia se realizara en el sentido contrario al buscado, pulsar sobre el icono de **Invertir distancia**.



Figura A.155: Relación de *Distancia*.

De momento, el deflector junto con uno de los tubos del intercambiador debe que dar como en la figura A.156.

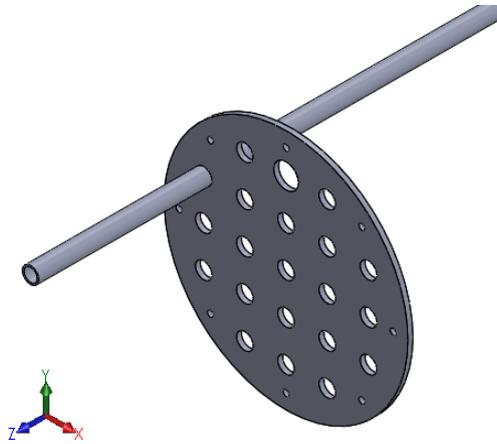


Figura A.156: Posición del deflector y de uno de los tubos.

Cabe comentar que todas las relaciones definidas en el ensamblaje se pueden ver en el desplegable de **Relaciones de posición**, dentro de la pestaña del **Gestor de diseño**.

Para posicionar el resto de tubos se va a hacer uso de la operación de **Matriz de componente lineal**, dentro de la pestaña de **Ensamblaje** (figura A.157). Pulsar sobre la operación.

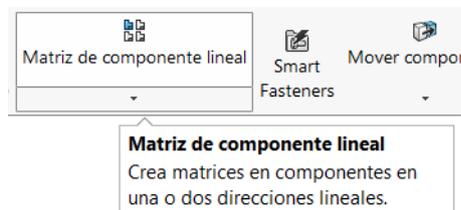


Figura A.157: Matriz de componente lineal.

En el desplegable de **Dirección 1**, dentro del recuadro de **Dirección de matriz**, seleccionar la línea horizontal del croquis de líneas de referencia que se creó anteriormente.

⁸Con la tecla de *SHIFT* pulsada.

En **Separación** introducir **25 mm** y en **Número de instancias**, **5**.

Dentro del desplegable de **Dirección 2**, en el recuadro de **Dirección de matriz**, seleccionar la línea vertical del croquis de líneas de referencia que se creó anteriormente. En **Separación** introducir **25 mm** y en **Número de instancias**, **4**.

En el desplegable de **Componentes para crear matriz**, seleccionar el tubo. En el caso de que la dirección de la matriz fuera en sentido contrario al buscado, pulsar sobre **Invertir dirección**.

Por último, en la pestaña de **Instancias para ignorar**, seleccionar los dos tubos extremos de la fila inferior. Para esto hay que pulsar sobre el punto magenta que aparecerá sobre cada tubo. Antes de validar la operación, el deflector junto con los tubos debería quedar como se muestra en la figura A.158.

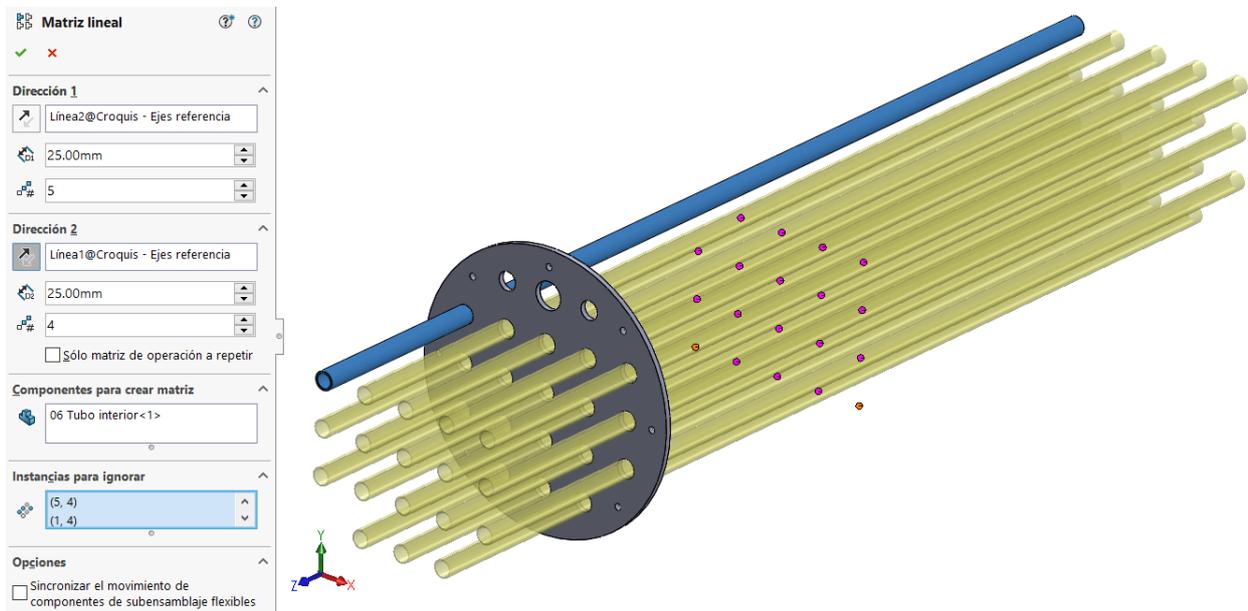


Figura A.158: Posición de los tubos en el deflector.

Para introducir los tres tubos que faltan, se volverá a utilizar la operación de **Matriz de componente lineal**. En el desplegable de **Dirección 1**, dentro del recuadro de **Dirección de matriz**, seleccionar la línea vertical del croquis de líneas de referencia que se creó anteriormente. En **Separación** introducir **25 mm** y en **Número de instancias**, **2**.

En el desplegable de **Componentes para crear matriz**, seleccionar los tres tubos situados debajo de cada uno de los tres orificios vacíos. En el caso de que la dirección de la matriz fuera en sentido contrario al buscado, pulsar sobre **Invertir dirección**. Para ver cómo debe quedar la operación antes de validarla, ver la figura A.159.

Ahora se va a colocar en posición el segundo deflector. En primer lugar, seleccionar la cara cilíndrica exterior del tubo situado en el centro del deflector y la cara correspondiente

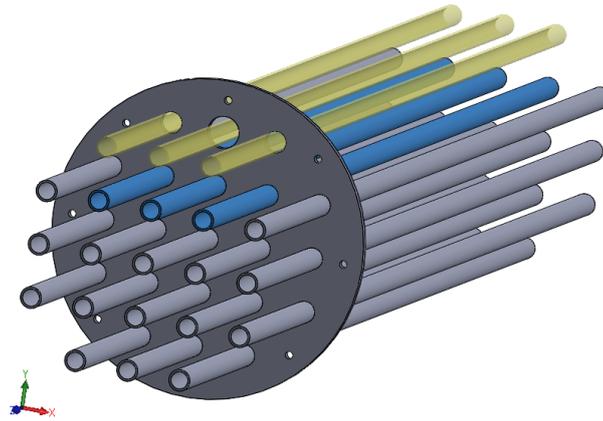
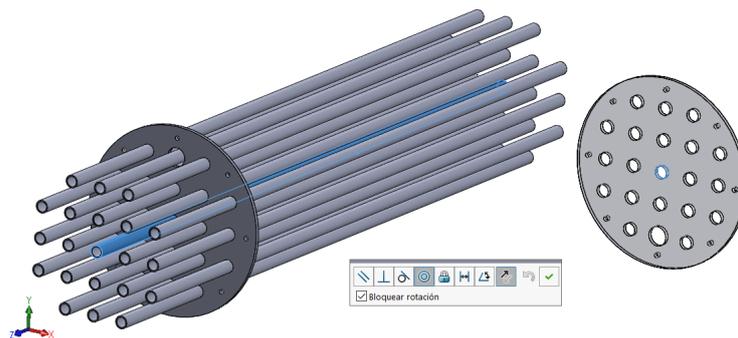


Figura A.159: Posición de los tres tubos superiores.

al espesor del orificio central del segundo deflector. Al igual que antes, automáticamente se definirá la relación de **Concéntrica**. En caso contrario, seleccionarla manualmente. Aparecerá, junto a la relación, un recuadro con el texto **Bloquear rotación**. Activarlo (figura A.160).

Figura A.160: Relación de *Concéntrica* entre el deflector y el tubo central.

Seleccionar las caras frontales de ambos deflectores, y definir la relación de **Distancia** con un valor de **105 mm**. El conjunto de los tubos y los dos deflectores debe quedar como en la figura A.161.

Para terminar de definir la posición de los deflectores, se utilizará una **Matriz de componente lineal**. En el desplegable de **Dirección 1**, dentro del recuadro de **Dirección de matriz**, seleccionar el eje de revolución del tubo central⁹. En **Separación** introducir **210 mm** y en **Número de instancias**, **2**.

En el desplegable de **Componentes para crear matriz**, seleccionar los dos deflectores. En el caso de que la dirección de la matriz fuera en sentido contrario al buscado, pulsar sobre **Invertir dirección**.

⁹Ver A.1.4. Ejes temporales.

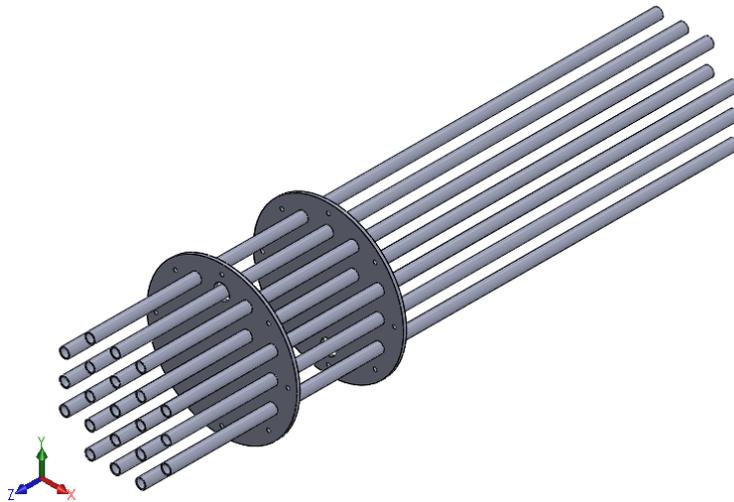


Figura A.161: Posición de los dos primeros deflectores.

El ensamblaje de los tubos con los cuatro deflectores, hasta este punto, debe quedar como se muestra en la figura A.162.

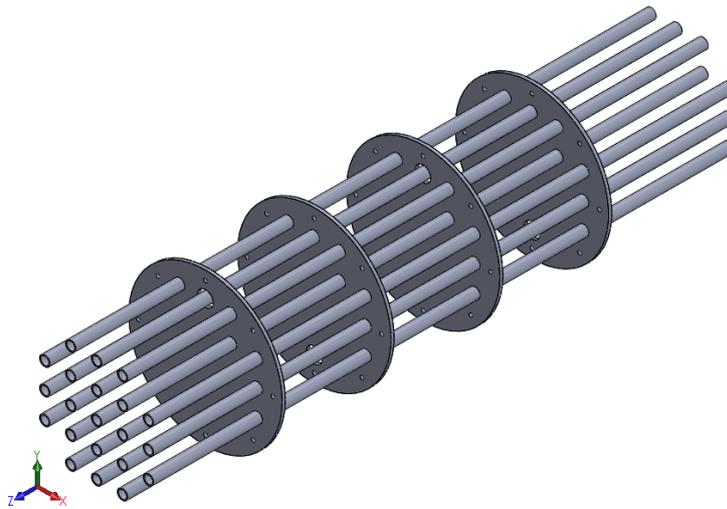


Figura A.162: Posición de los cuatro deflectores y los tubos interiores.

El siguiente paso consiste en insertar las juntas, los tornillos y las tuercas de los deflectores. La razón por la que se han insertado y colocado los cuatro deflectores antes que las juntas¹⁰ es porque haciéndolo así se reduce el número de piezas que se deben insertar manualmente en el ensamblaje pues, siguiendo el procedimiento propuesto en este trabajo, la mayoría de las piezas se generan mediante operaciones de matrices de componente lineal y circular.

Insertar la pieza **05 Junta deflector.SLDPRT** y duplicarla. Para posicionar la primera

¹⁰Físicamente no sería posible ensamblar las juntas una vez colocados los deflectores en sus posiciones.

junta, seleccionar su cara trasera y hacerla **Coincidente** con la cara delantera del primer deflector. A continuación, se fija la junta al deflector. Para que su movimiento quede completamente impedido, hace falta definir la relación de **Concéntrico** entre dos de los taladros de la junta y dos del deflector. En este trabajo se decide establecer las relaciones entre los taladros superior e inferior (figura A.163).

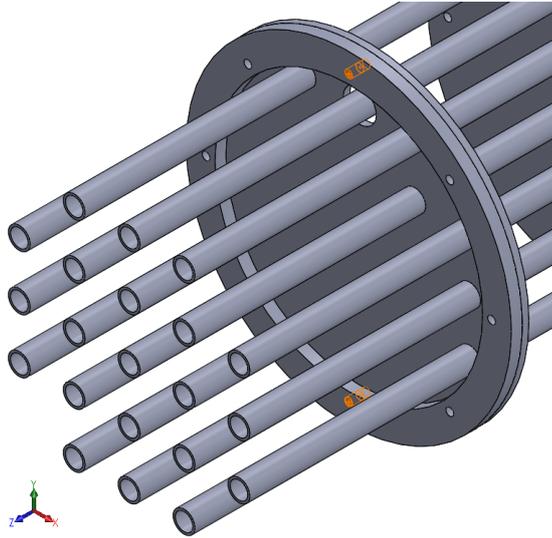


Figura A.163: Relación entre los taladros del deflector y los de la junta.

Establecer las mismas relaciones con la segunda junta, pero esta vez con respecto a la cara trasera del primer deflector. Las dos juntas deberían quedar como en la figura A.164¹¹.

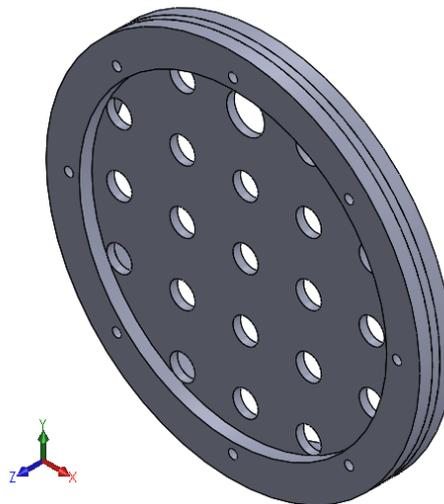


Figura A.164: Deflector con las dos juntas.

¹¹Se han ocultado el resto de piezas para facilitar la visualización del ensamblaje del deflector con las dos juntas.

Insertar la pieza **15 Tornillo deflector.SLDPRT**. Seleccionar la cara trasera de la cabeza del tornillo y hacerla **Coincidente** con la cara frontal de la junta más externa del deflector (figura A.165). Para terminar de definir la posición del tornillo, seleccionar la mayor superficie curva del mismo y la cara interior cilíndrica del taladro del deflector. Hacer ambas superficies **Concéntricas**, seleccionando también la casilla de **Bloquear rotación** (figura A.166).

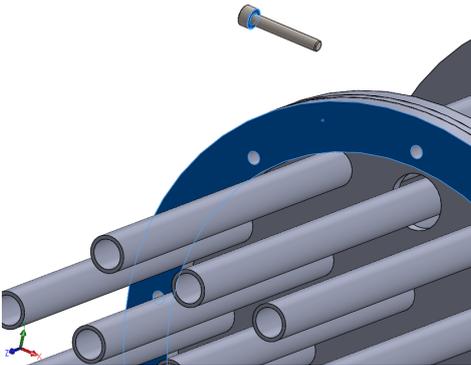


Figura A.165: Relación entre el tornillo y la cara de la junta.

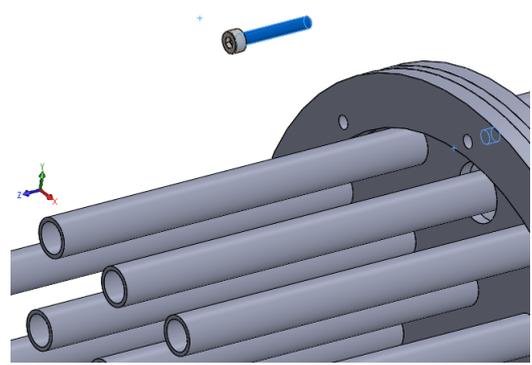


Figura A.166: Relación entre el tornillo y el taladro del deflector.

Insertar la pieza **16 Tuerca deflector.SLDPRT**. Hacer **Coincidente** una de las caras planas de la tuerca con la cara plana trasera del primer deflector y, después, hacer **Concéntricas** la cara curva del interior de la tuerca y la cara curva del tornillo. Activar la casilla de **Bloquear rotación** (ver figura A.167).

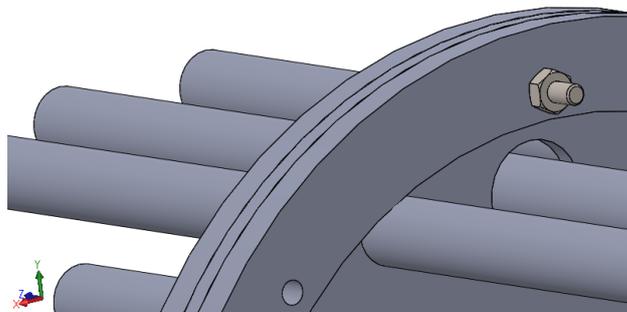


Figura A.167: Tuerca ya posicionada en el deflector.

El resto de tornillos se añadirán con una **Matriz de componente circular** (figura A.168). Como **Eje de matriz** seleccionar el eje de revolución del tubo central. En **Ángulo** introducir **360°** y en **Número de instancias**, **8**. Activar la casilla de **Separación igual**. En el recuadro de **Componentes para crear matriz**, seleccionar el tornillo y la tuerca del deflector. Con esto se deberían crear los ocho tornillos y tuercas del primer deflector (figura A.169)¹².

¹²Se han ocultado el resto de piezas y se ha cambiado la transparencia tanto del deflector como de las dos juntas.

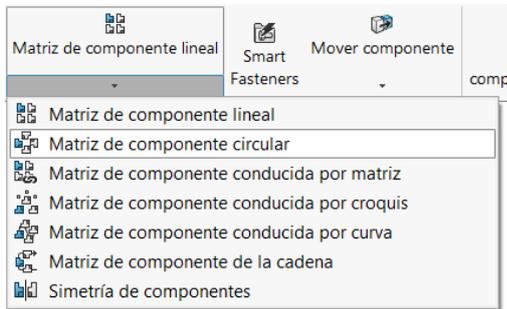


Figura A.168: Matriz de componente circular.

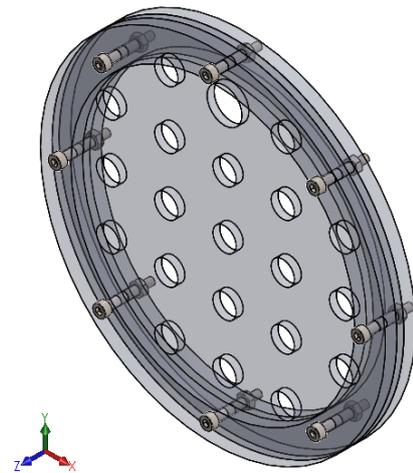


Figura A.169: Tornillos y tuercas en el deflector.

Una vez completo el primer deflector, se utilizará una **Matriz de componente lineal** para posicionar las juntas, los tornillos y las tuercas en el resto de deflectores. En el desplegable de **Dirección 1**, seleccionar el eje de revolución del tubo central como **Dirección de matriz**. En el recuadro de **Distancia** introducir **105 mm**, y en el de **Número de instancias**, **4**.

En el recuadro de **Componentes para crear matriz**, seleccionar las dos juntas y, para seleccionar todos los tornillos y tuercas, en vez de ir uno a uno, hacer clic sobre el desplegable en la esquina superior izquierda de la ventana gráfica. En el desplegable seleccionar la matriz circular con la que se posicionaron los tornillos y tuercas en el deflector.

Con todo esto, los deflectores deben quedar como se muestra en la figura A.170.

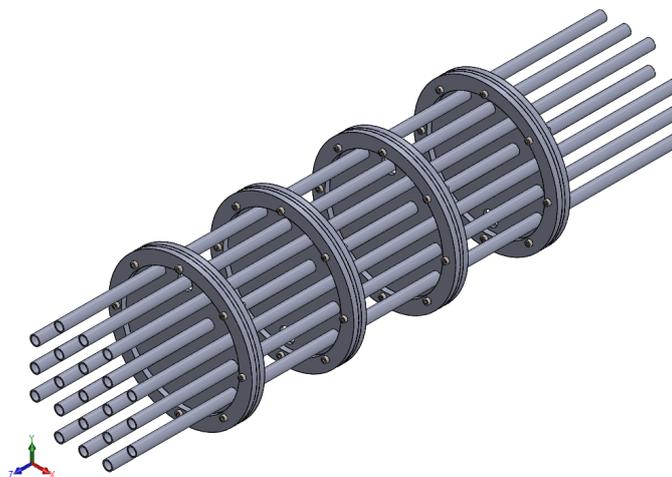


Figura A.170: Tubos interiores con los cuatro deflectores completos.

Llegados a este punto, aparentemente parece que la posición de los tubos con respecto a los deflectores esté completamente definida. Esto no es así, de forma que para definirla por completo basta con añadir una relación de **Concéntrica** entre el orificio mayor del segundo deflector y el tubo que lo atraviesa (figura A.171). Marcar la casilla de **Bloquear rotación**.

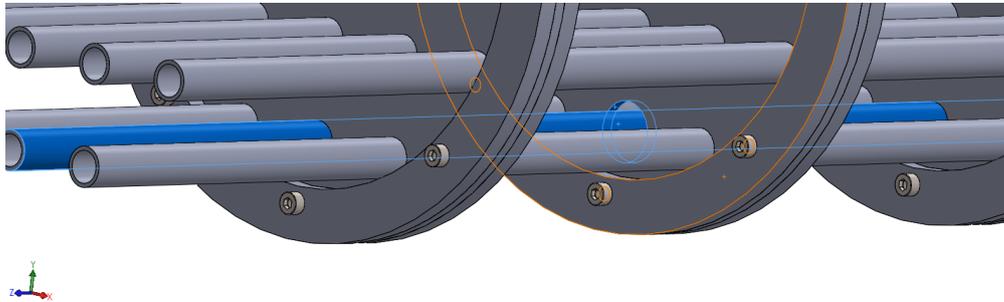


Figura A.171: Relación entre el tubo inferior y el orificio del segundo deflector.

La siguiente pieza que se va a insertar es **03 Placa unión.SLDPRT**. Insertar sólo una copia. Establecer la relación de **Coincidente** entre la cara plana de la placa de unión y la cara plana posterior de la carcasa del intercambiador (figura A.172).

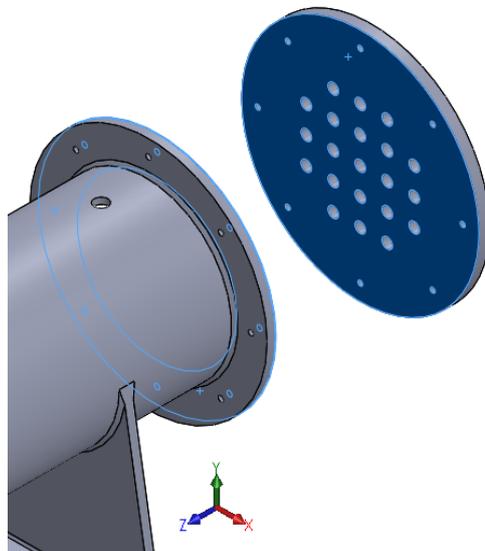


Figura A.172: Caras coincidentes entre la placa de unión y la carcasa.

Para definir por completo la posición de la placa de unión, hacer **Concéntricos** los taladros superior e inferior con los orificios superior e inferior del lateral posterior de la carcasa (figura A.173).

Al estar ya posicionada la placa de unión, se procede a definir la posición de los tubos dentro de la carcasa.

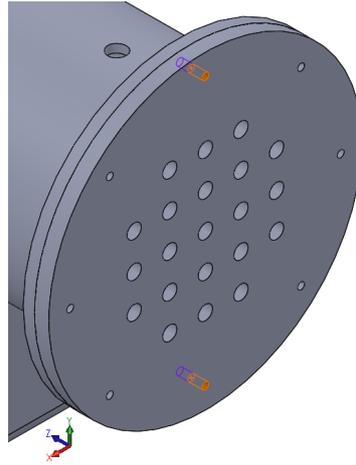


Figura A.173: Taladros coincidentes de la placa de unión con la carcasa.

En primer lugar, hacer los tubos centrales superior e inferior **Concéntricos** con sus orificios correspondientes de la placa de unión (figura A.174). En segundo lugar, definir una **Distancia** de **75 mm** entre la cara plana frontal del primer deflector y la cara plana frontal de la carcasa (figura A.175). De esta forma quedarán los tubos y deflectores en su posición dentro de la carcasa¹³ (figura A.176).

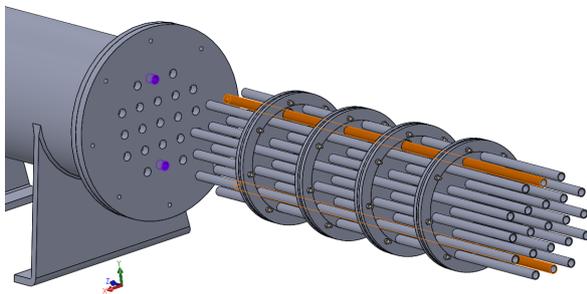


Figura A.174: Posición de los tubos respecto a la placa de unión.

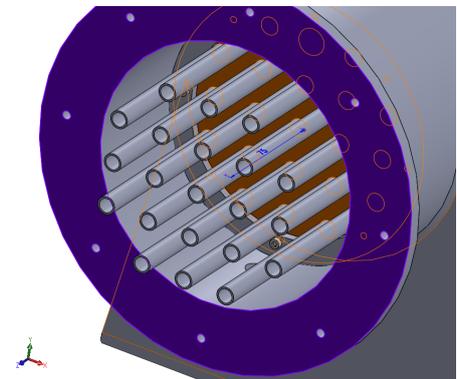


Figura A.175: Distancia entre el primer deflector y el extremo de la carcasa.

Insertar la pieza **02 Cierre lateral.SLDPRT**. Hacer **Coincidente** la cara plana interior del cierre con la cara plana de la placa de unión que se insertó antes. Si el cierre quedara como en la figura A.177, pulsar sobre el icono de **Alineación inversa** (figura A.178).

A continuación, hacer **Concéntricos** los taladros superior e inferior del cierre con los de la placa de unión (figura A.179).

¹³Se recomienda cambiar la transparencia de la carcasa de ahora en adelante para facilitar la visualización de los elementos interiores. Ver A.1.5. Transparencia de una pieza.

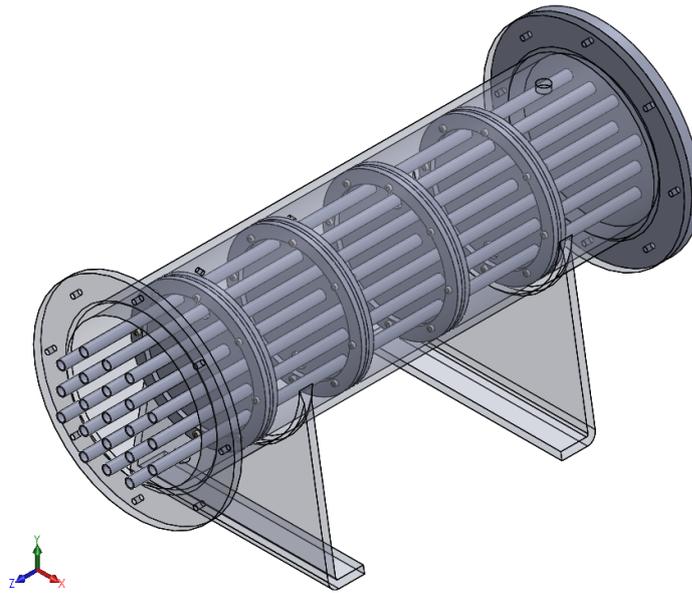


Figura A.176: Carcasa con los tubos interiores y los deflectores posicionados.

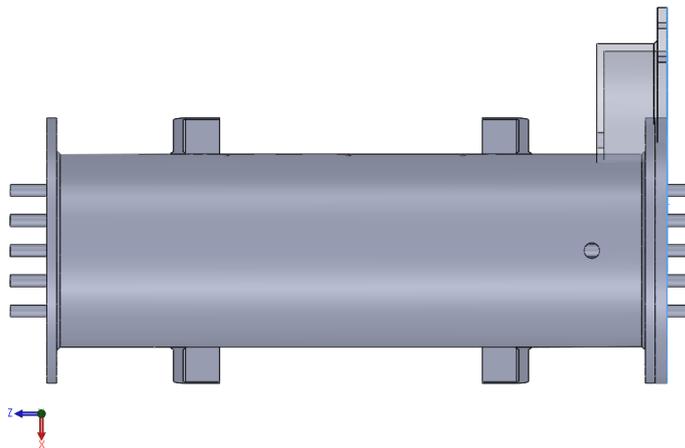


Figura A.177: Cierre lateral mal orientado.



Figura A.178: Alineación inversa.

Insertar la pieza **17 Arandela carcasa.SLDPRT** y duplicarla. Una de las copias hacerla **Coincidente** con la cara plana de la zona de la unión del cierre lateral y **Concéntrica** con el taladro superior (figura A.180). Marcar la casilla de **Bloquear rotación**. Hacer lo mismo con la otra arandela, pero por la parte posterior de la zona de unión entre la placa de unión y la carcasa (figura A.181).

La siguiente pieza a insertar será **13 Tornillo carcasa.SLDPRT**. Hacer **Coincidente**

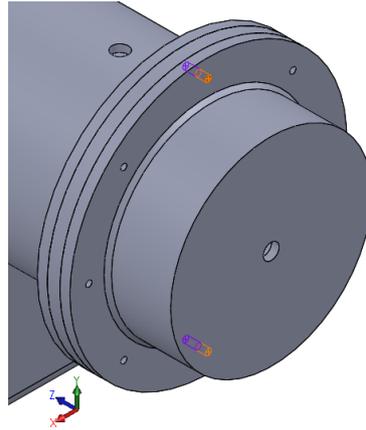


Figura A.179: Relación de los taladros del cierre lateral.

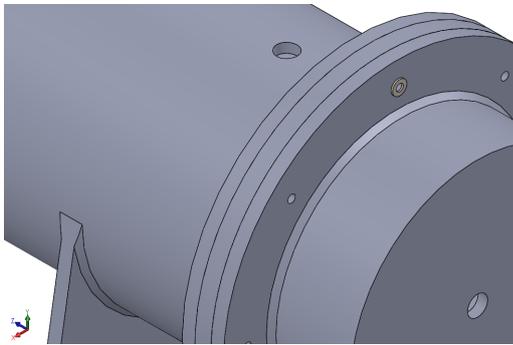


Figura A.180: Arandela de la parte posterior.

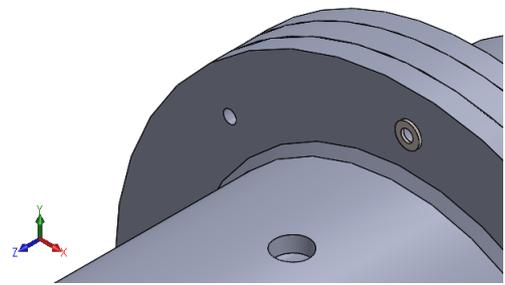


Figura A.181: Arandela de la parte frontal.

la cara plana posterior de la cabeza del tornillo con la cara plana de la arandela superior situada en el cierre de la carcasa. Hacer el tornillo **Concéntrico** con el taladro superior. Activar la casilla de **Bloquear rotación**.

Insertar también la pieza **14 Tuerca carcasa.SLDPRT** y proceder de manera similar al paso anterior, pero en el lado opuesto de la unión, que quedará como en la figura A.182.

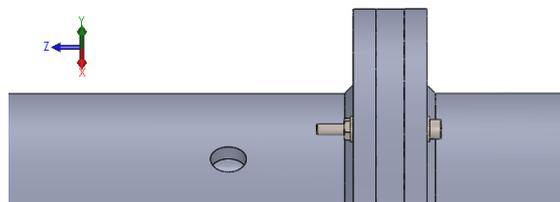


Figura A.182: Unión entre la carcasa y el cierre lateral.

Ahora se van a crear el resto de tornillos, tuercas y arandelas que conforman la unión entre el cierre, la placa y la carcasa. Para ello, realizar una **Matriz de componente circular** seleccionando como elementos para copiar en la matriz el tornillo, la tuerca y las dos arandelas. El resultado se puede ver en la figura A.183.

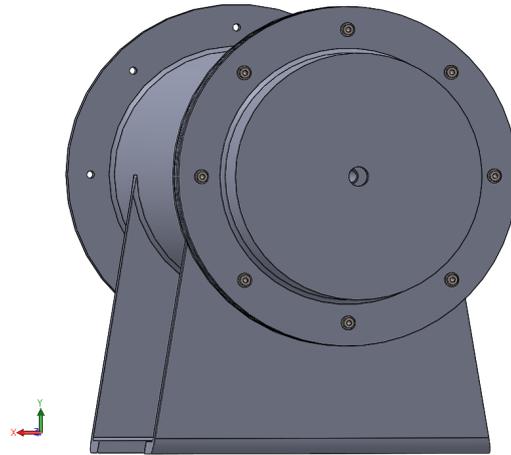


Figura A.183: Resultado de la matriz circular.

Por último, a falta de insertar las tubería y los sensores, realizar una **Simetría de componentes** (figura A.184). Como **Plano de simetría** seleccionar el plano de **Alzado**¹⁴.

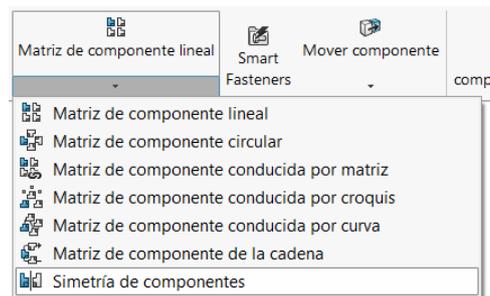


Figura A.184: Simetría de componentes.

En el recuadro de **Componentes para aplicar simetría**, seleccionar el cierre lateral y la placa de unión.

Antes de validar la operación, pulsar sobre la flecha de **Siguiente** que aparece en el **PropertyManager** (figura A.185). En la nueva pestaña, bajo el texto de **Reorientar componentes**, pulsar sobre los iconos de las flechas hasta que el cierre lateral esté orientado correctamente (figura A.186).



Figura A.185: Flecha de *Siguiente*.

¹⁴Para seleccionarlo, pulsar sobre el desplegable en la esquina superior izquierda de la ventana gráfica.

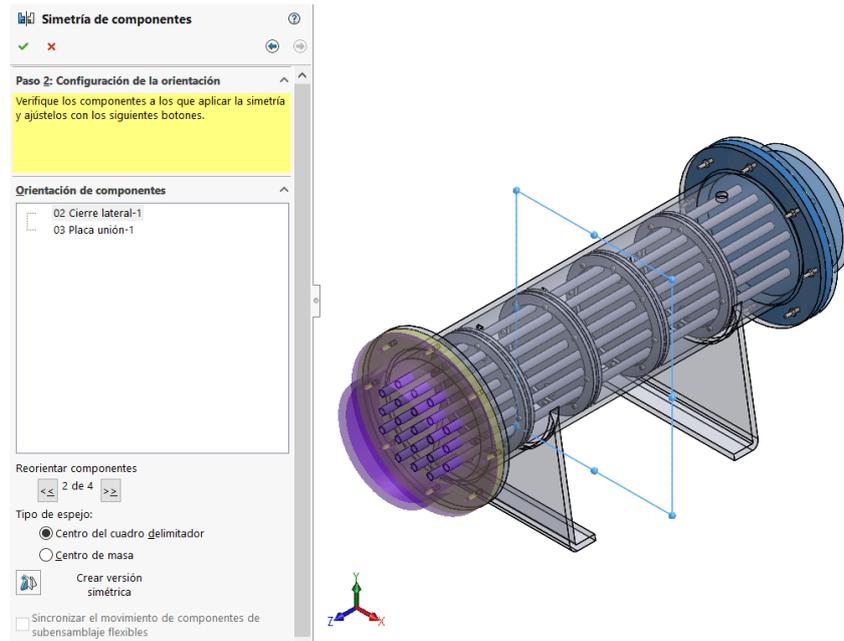


Figura A.186: Reorientar componentes.

Realizar otra operación de **Simetría** respecto al plano de **Alzado**, esta vez seleccionando los elementos de fijación del extremo. En vez de seleccionarlos uno a uno, hacer clic sobre la última matriz circular creada¹⁵.

Tras realizar estas operaciones, el ensamblaje debería quedar de la misma forma que se puede ver en la figura A.187.

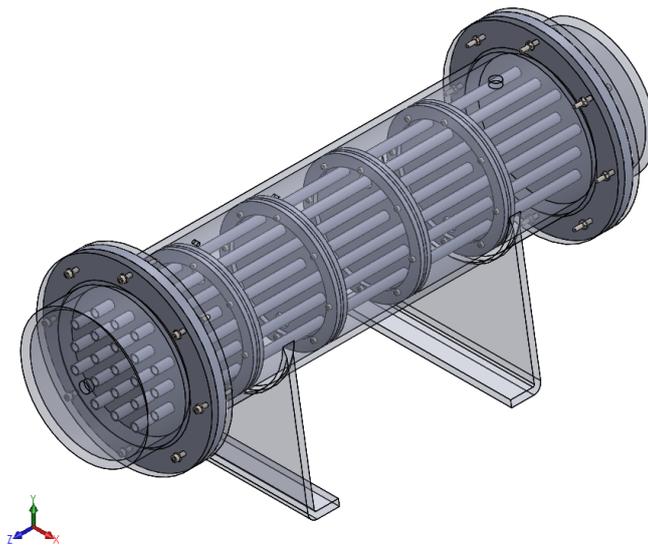


Figura A.187: Ensamblaje del intercambiador hasta este punto.

¹⁵De nuevo, a través del desplegable en la esquina superior izquierda.

A continuación, se van a insertar las cuatro tuberías externas del intercambiador. Insertar en primer lugar la pieza **07 Tubería 1.SLDPRT**. Las relaciones de posición serán que la cara plana posterior de la tubería sea **Coincidente** con la cara plana del cierre lateral frontal y que la tubería sea **Concéntrica** con el orificio de la cara plana del cierre lateral. Activar la opción de **Bloquear rotación** (figura A.188).

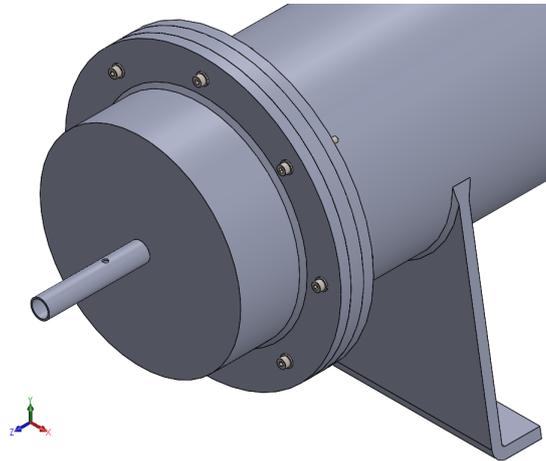


Figura A.188: Ensamblaje de la tubería 1.

Insertar la pieza **08 Tubería 2.SLDPRT**. En este caso, por comodidad, definir primero la relación de **Concéntrica** con el orificio de la parte inferior de la carcasa. Posteriormente, definir otra relación de **Concéntrica** entre la cara curva del extremo de la tubería y la cara cilíndrica de la carcasa (figura A.189).

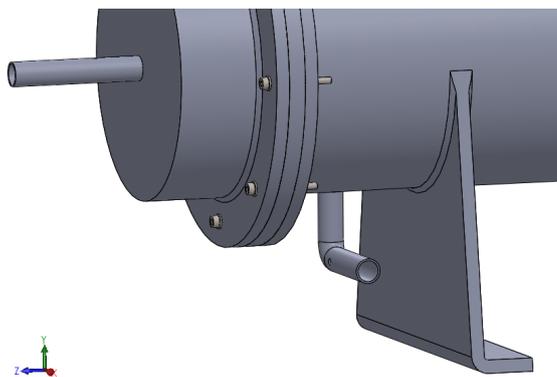


Figura A.189: Ensamblaje de la tubería 2.

Insertar la pieza **09 Tubería 3.SLDPRT** y seguir los mismo pasos del párrafo anterior, pero en el orificio de la parte superior de la carcasa (figura A.190).

Para terminar de insertar tuberías, insertar la pieza **10 Tubería 4.SLDPRT** y proceder de manera similar a la definición de la posición de la pieza **07 Tubería 1.SLDPRT**, pero respecto al orificio del cierre lateral posterior.

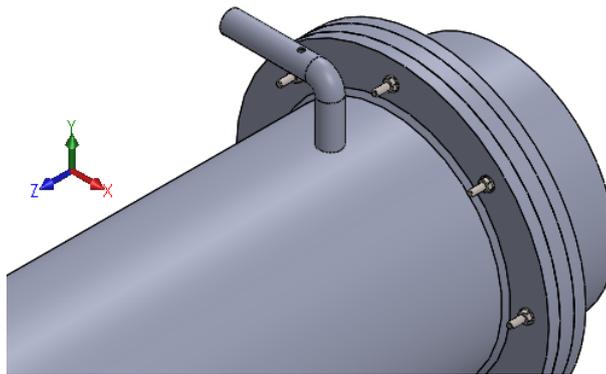


Figura A.190: Ensamblaje de la tubería 3.

El ensamblaje de las cuatro tuberías debe quedar como se muestra en la figura A.191.

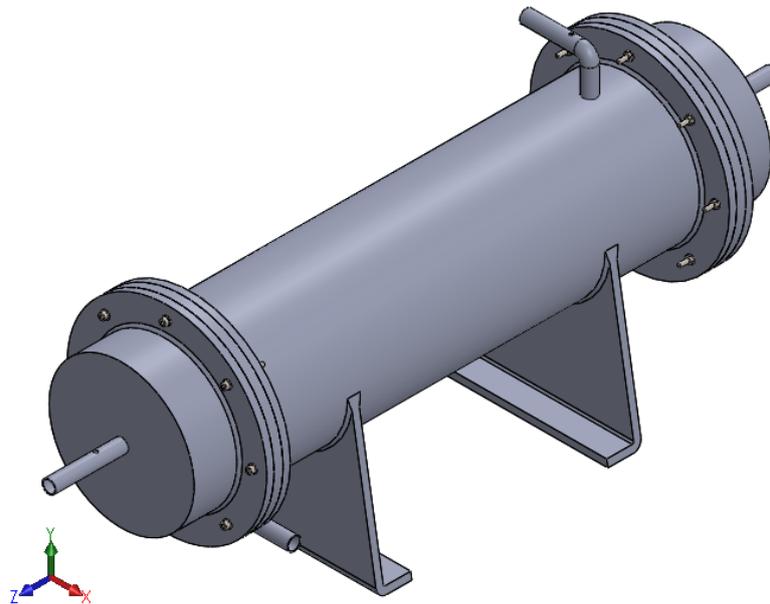


Figura A.191: Ensamblaje con todas las tuberías insertadas.

Por último, falta insertar los sensores. En primer lugar, se van a insertar los sensores de la carcasa, por lo que hace falta insertar la pieza **11 Sensor carcasa.SLDPRT**. La cara cilíndrica del sensor hacerla **Concéntrica** con el orificio más cercano al cierre frontal de la carcasa. Activar la opción de **Bloquear rotación**. Posiblemente el sensor quede mal orientado. Esto se soluciona activando la opción de **Alineación inversa**. A continuación, definir la relación de **Tangente** entre la cara plana del sensor y la cara cilíndrica externa de la carcasa. El resultado se puede ver en la figura A.192.

Duplicar dos veces el sensor y repetir las operaciones en los dos orificios restantes.

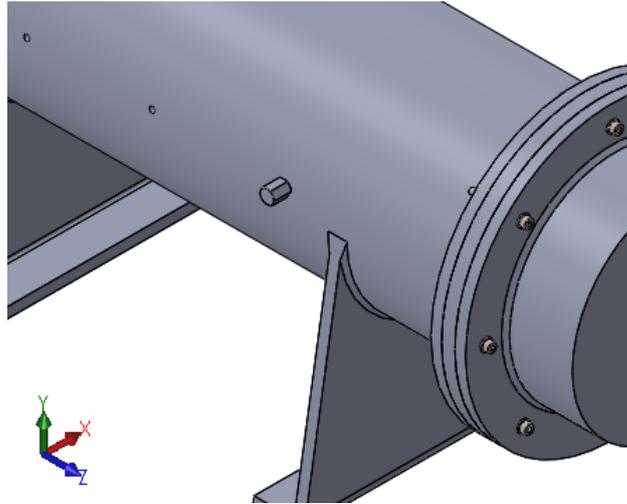


Figura A.192: Posición del sensor en la carcasa.

En segundo lugar, se van a insertar los sensores de las tuberías, para ello insertar la pieza **12 Sensor tubería.SLDPRT**. Para definir la posición del sensor, establecer la relación de **Concéntrica** entre la cara cilíndrica del sensor y el orificio. Si la orientación del sensor no fuera la correcta, activar la opción de **Alineación inversa**. Para terminar de definir la posición, hacer **Concéntrica** la cara curva del sensor, opuesta al extremo esférico, con la cara cilíndrica exterior de la tubería. El sensor debe quedar en la posición que se indica en la figura A.193.

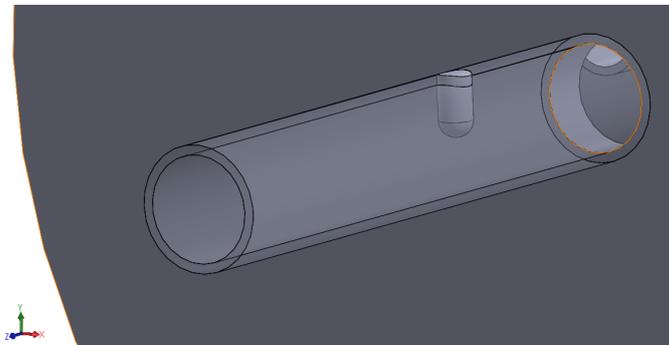


Figura A.193: Posición del sensor en una de las tuberías.

Duplicar tres veces los sensores de las tuberías y repetir los pasos explicados en el resto de tuberías.

Si se comprueba el nombre de las piezas importadas al ensamblaje, se ve que ninguna tiene como prefijo (-). También se puede comprobar que en la barra inferior, a la izquierda, hay un texto que dice **Completamente definida**. Esto indica que las relaciones entre los elementos son sólidas y no quedan elementos con posiciones sin definir, por lo que ya quedaría finalizado el modelado y ensamblaje del modelo.

A.12. Preparación del modelo para la simulación

Con el objetivo de simplificar el proceso de mallado y reducir el tiempo de simulación, se procede a simplificar el modelo. Estas simplificaciones deben ayudar a lograr una mayor rapidez en los cálculos sin afectar significativamente en los resultados.

En el modelo del intercambiador se van a simplificar las uniones y los dos soportes de la carcasa. Se suprimirán los tornillos, las tuercas, las arandelas, las juntas de los deflectores y los taladros donde van acoplados estos elementos.

Por otro lado, se puede observar que el modelo, salvo por la disposición de las tuberías de entrada y salida de agua fría y la posición de algunos sensores, es simétrico respecto al plano de perfil. Aprovechar este aspecto de la geometría resulta de gran utilidad ya que se reduce de manera considerable el tiempo de cálculo y la memoria requerida en ese proceso. Con el objetivo de aprovechar esto último, se va a cambiar la orientación de las dos tuberías y se van a simplificar los sensores.

Para llevar a cabo estas simplificaciones, se va a hacer uso de las **Configuraciones**. Éstas permiten tener distintas versiones de una pieza/ensamblaje dentro del mismo archivo. A continuación se describe el procedimiento que se va a seguir.

En primer lugar, se crea una nueva configuración en los siguientes archivos:

- 01 Carcasa.SLDPRT
- 02 Cierre lateral.SLDPRT
- 03 Placa unión.SLDPRT
- 04 Deflector.SLDPRT
- 07 Tubería 1.SLDPRT
- 08 Tubería 2.SLDPRT
- 09 Tubería 3.SLDPRT
- 10 Tubería 4.SLDPRT
- 11 Sensor carcasa.SLDPRT
- 12 Sensor tubería.SLDPRT

Esta configuración se llamará **Modelo simplificado** en todos los archivos, de manera que sea fácilmente reconocible.

A continuación, se creará una nueva configuración en el archivo **Ensamblaje intercambiador.SLDASM** y se harán las modificaciones necesarias de las relaciones de posición, en la nueva configuración, para definir completamente el modelo simplificado.

A.12.1. Crear una configuración nueva

Para crear una configuración nueva, acceder a la pestaña del **ConfigurationManager** (figura A.194).



Figura A.194: Pestaña del ConfigurationManager.

Hacer clic con el botón derecho sobre el nombre de la pieza/ensamblaje y seleccionar **Agregar configuración...** (figura A.195). En el recuadro de **Nombre de configuración**, introducir el nombre con el que se quiera denominar a la configuración. Como se ha comentado antes, en este trabajo se ha optado por nombrar como **Modelo simplificado** a las nuevas configuraciones que se van a crear.

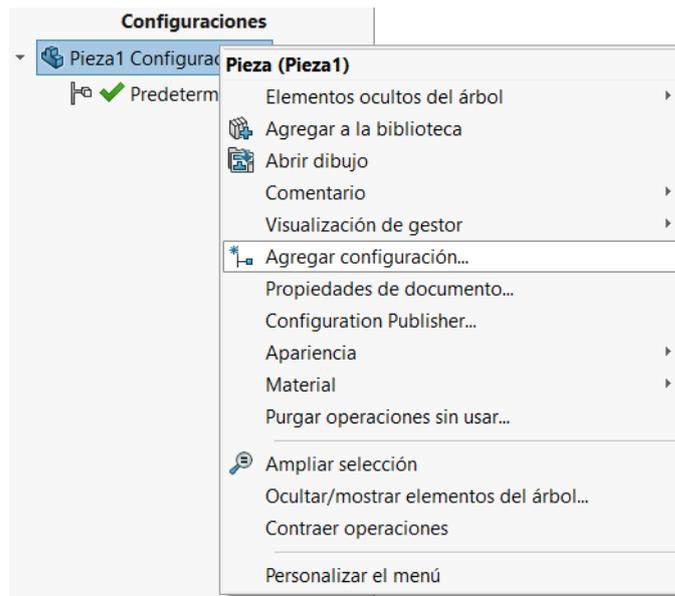


Figura A.195: Agregar configuración.

Una vez introducido el nombre, validar la creación de la configuración. La configuración que esté activa tendrá, delante de su nombre, un tic de color verde (figura A.196). Para cambiar de una configuración a otra, hacer doble clic sobre la configuración que se quiera activar.

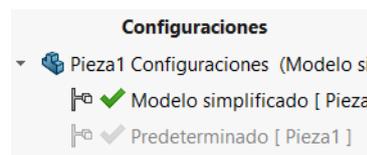


Figura A.196: Configuración activa.

Dentro de una configuración se pueden **Suprimir** operaciones¹⁶ sin que se supriman en el resto de configuraciones.

A.12.2. Suprimir operación/relación

Hacer clic con el botón derecho sobre la operación o relación que se quiera suprimir y pulsar sobre **Suprimir** (figura A.197).

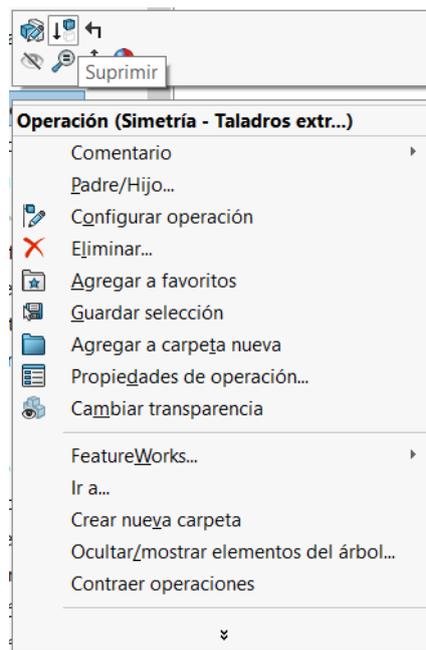


Figura A.197: Suprimir.

Para ver las relaciones que afectan a una pieza en concreto (en lugar de ver las relaciones de todas las piezas del ensamblaje), hacer clic en el desplegable de la pieza en el **Gestor de diseño**. Dentro, aparecerá otro desplegable llamado **Relaciones de posición en <nombre del ensamblaje>** (figura A.198). En el desplegable se mostrarán sólo las relaciones que afecten a esa pieza.

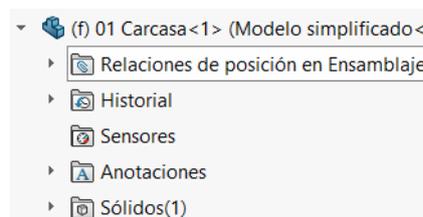


Figura A.198: Desplegable de relaciones de posición.

¹⁶Relaciones de posición en el caso de que se trate de un ensamblaje.

A.12.3. Nueva configuración de *01 Carcasa.SLDPRT*

Crear una nueva configuración. Ésta se activará por defecto.

Ir a la pestaña del **Gestor de diseño** para poder ver las operaciones con las que se creó la pieza y **Suprimir** las siguientes:

- Simetría – Taladros extremo (figura A.48).
- Matriz circular – Taladros extremo (figura A.45).
- Taladro – Extremo (figura A.43).
- Chaflán – Arista unión soporte-carcasa (figura A.69).
- Redondeo – Arista interior soporte (figura A.68).
- Redondeo – Arista exterior soporte (figura A.67).
- Simetría – Soporte completo (figura A.65).
- Extrusión – Pie soporte (figura A.64).
- Extrusión – Soporte (figura A.62).
- Plano – Soporte (figura A.55b).
- Cortar – Orificios sensores (figura A.54).

Al cerrar el archivo, activar la configuración **Predeterminado**.

A.12.4. Nueva configuración de *02 Cierre lateral.SLDPRT*

Crear una nueva configuración. Ésta se activará por defecto.

Ir a la pestaña del **Gestor de diseño** para poder ver las operaciones con las que se creó la pieza y **Suprimir** las siguientes:

- Matriz circular – Taladros unión (figura A.78).
- Taladro – Unión (figura A.77).

Al cerrar el archivo, activar la configuración **Predeterminado**.

A.12.5. Nueva configuración de *03 Placa unión.SLDPRT*

Crear una nueva configuración. Ésta se activará por defecto.

Ir a la pestaña del **Gestor de diseño** para poder ver las operaciones con las que se creó la pieza y **Suprimir** las siguientes:

- Matriz circular – Taladros unión (figura A.89).
- Taladro – Unión (taladro superior en la figura A.89).

Al cerrar el archivo, activar la configuración **Predeterminado**.

A.12.6. Nueva configuración de *04 Deflector.SLDPRT*

Crear una nueva configuración. Ésta se activará por defecto.

Ir a la pestaña del **Gestor de diseño** para poder ver las operaciones con las que se creó la pieza y **Suprimir** las siguientes:

- Matriz circular – Taladros deflector (figura A.96).
- Taladro – Deflector (taladro superior en la figura A.96).

Al cerrar el archivo, activar la configuración **Predeterminado**.

A.12.7. Nueva configuración de *07 Tubería 1.SLDPRT*

Crear una nueva configuración. Ésta se activará por defecto.

Ir a la pestaña del **Gestor de diseño** para poder ver las operaciones con las que se creó la pieza y **Suprimir** las siguientes:

- Cortar – Orificio sensor (figura A.103).
- Plano – Tangente superior (figura A.102).

Al cerrar el archivo, activar la configuración **Predeterminado**.

A.12.8. Nueva configuración de *08 Tubería 2.SLDPRT*

Crear una nueva configuración. Ésta se activará por defecto.

Ir a la pestaña del **Gestor de diseño** para poder ver las operaciones con las que se creó la pieza y **Suprimir** las siguientes:

- Cortar – Orificio sensor (figura A.116).
- Plano – Lateral tubería (figura A.115).

Crear un **Plano** nuevo, paralelo al plano de **Vista lateral**. Dicho plano debe contener al tramo vertical de la tubería, por lo que se debe seleccionar ese tramo¹⁷ para incluirlo en la **Segunda referencia** (ver figura A.199).

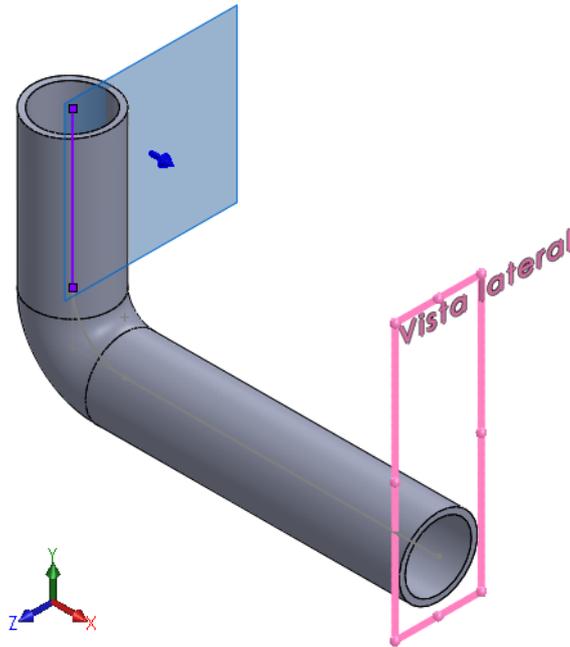


Figura A.199: Modificación del plano de corte.

El objetivo de la creación de este plano es poder modificar el plano en el que se definió el croquis utilizado como base para la operación de corte que redondea el extremo de la tubería. Esto permitirá, en el ensamblaje, que se pueda cambiar la orientación de la tubería buscando la simetría del modelo.

Un croquis sólo se puede dibujar sobre un plano ya existente, de manera que para poder cambiar el croquis de plano hace falta situar el plano, en el Gestor de diseño, antes que la operación de corte. Para esto, pulsar sobre el nombre del plano dentro del Gestor de diseño y, manteniendo pulsado el botón izquierdo del ratón, arrastrar el nombre hasta situarlo encima de la operación del corte del extremo de la tubería (ver figuras A.200 y A.201).

Pulsar en el desplegable de la operación de corte del extremo para poder acceder a su croquis. Hacer clic con el botón derecho sobre el croquis y pulsar en **Editar plano de croquis** (figura A.202). Borrar el plano de **Alzado** del recuadro de **Plano/cara de croquis** y seleccionar el último plano que se ha creado.

¹⁷Hace falta hacer visible el croquis del recorrido de la tubería para poder seleccionarlo.

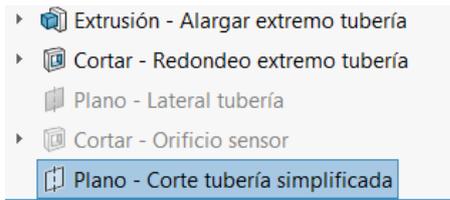


Figura A.200: Posición inicial del plano.

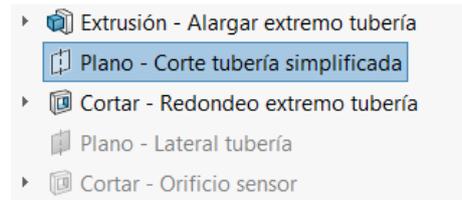


Figura A.201: Posición final del plano.

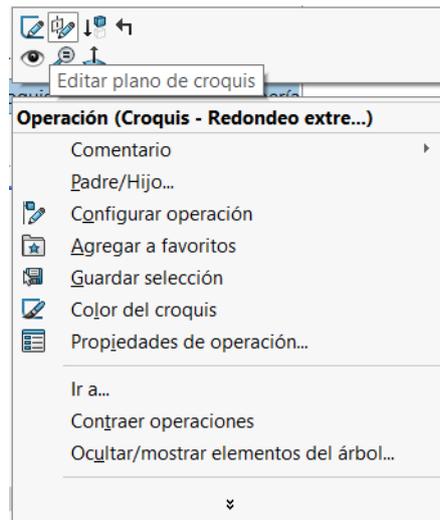


Figura A.202: Editar plano de croquis.

Este cambio del plano de corte sólo se busca en la configuración del modelo simplificado, por lo que es importante marcar en el desplegable de **Configuraciones** la casilla de **Esta configuración** (figura A.203).

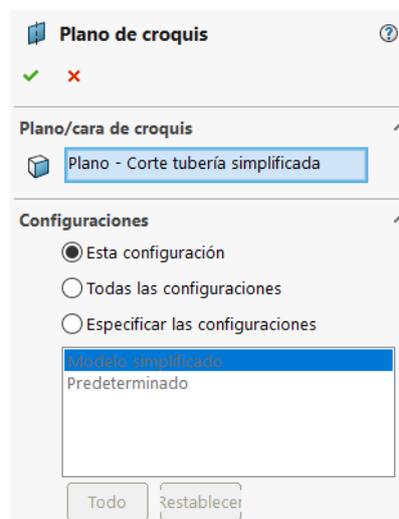


Figura A.203: Cambiar el plano de croquis en sólo una configuración.

Hecho esto, el corte del extremo de la tubería debería quedar como en la figura A.204.

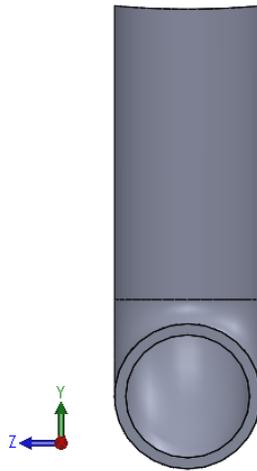


Figura A.204: Corte modificado del extremo.

Al cerrar el archivo, activar la configuración **Predeterminado**.

A.12.9. Nueva configuración de *09 Tubería 3.SLDPRT*

Crear una nueva configuración. Ésta se activará por defecto.

Ir a la pestaña del **Gestor de diseño** para poder ver las operaciones con las que se creó la pieza y **Suprimir** las siguientes:

- Cortar – Orificio sensor (figura A.120).
- Plano – Superior tubería (figura A.119).

El siguiente paso consiste en modificar, al igual que en el apartado A.12.8, en cambiar el plano de croquis de la operación de **Cortar – Redondeo extremo tubería**.

Acceder al plano del croquis de la operación pulsando en el desplegable del corte del extremo. Para ello, hacer clic con el botón derecho sobre el croquis y pulsar en **Editar plano de croquis**. Borrar el plano de **Alzado** del recuadro de **Plano/cara de croquis** y seleccionar el plano de **Vista lateral**.

De nuevo, como este cambio del plano de corte sólo se busca en la configuración del modelo simplificado, es necesario marcar en el desplegable de **Configuraciones** la casilla de **Esta configuración**.

Al cerrar el archivo, activar la configuración **Predeterminado**.

A.12.10. Nueva configuración de 10 Tubería 4.SLDPRT

Crear una nueva configuración. Ésta se activará por defecto.

Ir a la pestaña del **Gestor de diseño** para poder ver las operaciones con las que se creó la pieza y **Suprimir** las siguientes:

- Cortar – Orificio sensor (figura A.103).
- Plano – Tangente superior (figura A.102).

Al cerrar el archivo, activar la configuración **Predeterminado**.

A.12.11. Nueva configuración de 11 Sensor carcasa.SLDPRT

Crear una nueva configuración. Ésta se activará por defecto.

Hacer un nuevo **Croquis** en el plano de **Vista lateral**. Las cotas del croquis se pueden ver en la figura A.205.

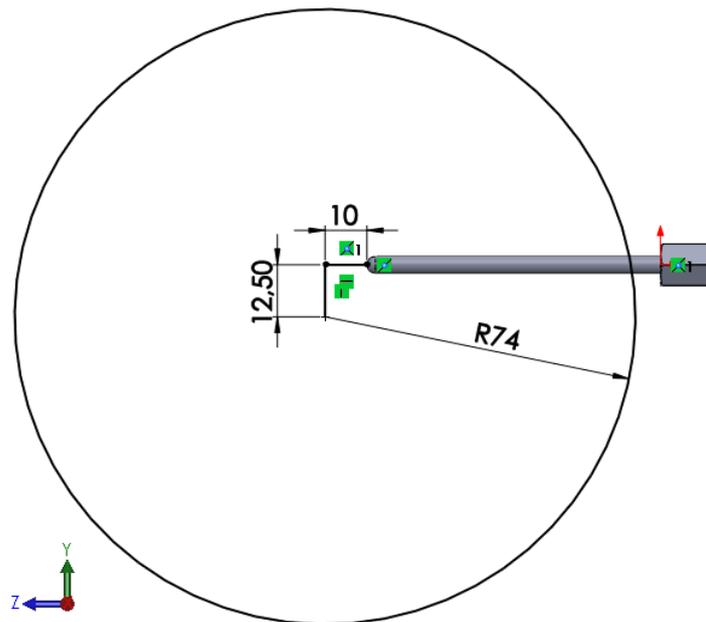


Figura A.205: Croquis para el corte del extremo del sensor de la carcasa.

Realizar una operación de **Extruir corte** utilizando el croquis anterior como base. En el desplegable de **Dirección 1** seleccionar **Por todo: ambos** y activar el recuadro de **Invertir lado a cortar** de manera que se elimine todo lo que quede por fuera del croquis de la circunferencia (ver figura A.206).

Al cerrar el archivo, activar la configuración **Predeterminado**.



Figura A.206: Sensor de la carcasa simplificado.

A.12.12. Nueva configuración de *12 Sensor tubería.SLDPRT*

Crear una nueva configuración. Ésta se activará por defecto.

Ir a la pestaña del **Gestor de diseño** para poder ver las operaciones con las que se creó la pieza y **Suprimir** la siguiente:

- Cortar – Rematado sensor (figura A.134).

Hacer el **Croquis** de una circunferencia de 12,70 mm de diámetro en el plano de **Planta**. El centro de la circunferencia debe ser coincidente con el extremo del sensor (ver figura A.207).

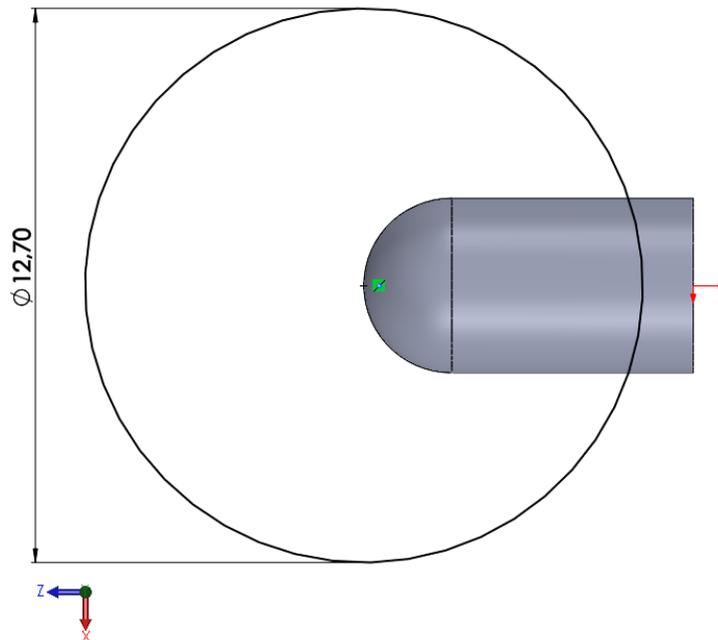


Figura A.207: Croquis para el corte del extremo del sensor de la tubería.

Crear una operación de **Extruir corte** procediendo de manera similar al apartado A.12.11. El sensor debe quedar como en la figura A.208.

Al cerrar el archivo, activar la configuración **Predeterminado**.

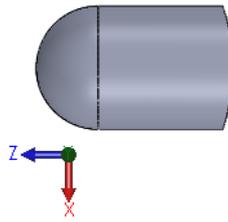


Figura A.208: Sensor de la tubería simplificado.

A.12.13. Nueva configuración de Ensamblaje intercambiador.SLDASM

Puesto que se han suprimido algunas operaciones en las piezas que forman el ensamblaje, y también se van a suprimir algunas piezas, si directamente se cambiara la configuración de las mismas dentro del propio ensamblaje, aparecerían errores de algunas relaciones de posición. Para evitarlo, se suprimirán las relaciones que den problemas antes de cambiar la configuración y se añadirán otras relaciones adicionales para definir por completo la posición de todos los elementos del ensamblaje.

Las nuevas relaciones que se creen estarán activas, por defecto, sólo en la nueva configuración. Aun así, comprobarlo cambiando de configuración y verificar que, efectivamente, estén suprimidas en el resto de configuraciones. En caso contrario, suprimirlas manualmente.

Crear una nueva configuración y nombrarla **Modelo simplificado**. Ésta se activará por defecto.

En esta configuración se van a **Suprimir** las siguientes relaciones y elementos:

- Matriz – Juntas y fijaciones deflectores (figura A.170).
- Matriz circular – Fijaciones deflector (figura A.169).
- Tornillo deflector (figura A.166).
- Tuerca deflector (figura A.167).
- Junta deflector¹⁸ (figura A.164).
- Simetría – Fijaciones extremo (figura A.187).
- Matriz circular – Fijaciones extremo (figura A.183).
- Tornillo carcasa (figura A.182).
- Tuerca carcasa (figura A.182).
- Arandela carcasa¹⁹ (figuras A.180 y A.181).

¹⁸Las dos copias que se insertaron de esta pieza.

¹⁹Las dos copias que se insertaron de esta pieza.

- Relación de **Concéntrica** entre los taladros superior e inferior de la placa de unión y la carcasa (figura A.173).
- Relación de **Concéntrica** entre los taladros superior e inferior de la placa de unión y el cierre lateral (figura A.179).
- Las dos relaciones de **Concéntrica** entre los sensores de las tuberías y las tuberías²⁰ (figura A.193).
- La relación de **Concéntrica** y la de **Tangente** que definen la posición de los sensores de la carcasa²¹ (figura A.192).

Por otro lado, hace falta cambiar la configuración de algunas de las piezas del ensamblaje. Se cambiará la configuración de **Predeterminado** a **Modelo simplificado**.

Existen dos formas de cambiar la configuración de una pieza concreta dentro del ensamblaje. La primera consiste en hacer clic con el botón izquierdo sobre la propia pieza en la ventana gráfica. Si la pieza tiene más de una configuración disponible, aparecerá, entre otras opciones, un desplegable con las configuraciones del elemento. Pulsar sobre el desplegable y seleccionar la configuración que se quiera activar (figura A.209).



Figura A.209: Desplegable con las configuraciones de la pieza.

La segunda forma es similar a la primera, pero en lugar de hacer clic sobre la pieza en la ventana gráfica, se hace clic sobre el nombre de la pieza dentro del **Gestor de diseño**. Aparecerá un desplegable muy parecido.

Se cambiará la configuración de las siguientes piezas:

- Deflector (x4)
- Carcasa
- Placa unión (x2)
- Cierre lateral (x2)
- Tubería 1
- Tubería 2
- Tubería 3

²⁰Suprimir estas dos relaciones en cada uno de los cuatro sensores de las tuberías.

²¹Suprimir las dos relaciones en los tres sensores de la carcasa.

- Tubería 4
- Sensor carcasa (x3)
- Sensor carcasa (x4)

El modelo está, hasta este momento, insuficientemente definido. Esto quiere decir que hay piezas con algún grado de libertad sin restringir. Para solucionarlo, se crearán las siguientes **Relaciones de posición**:

- Hacer **Concéntricas** las caras cilíndricas de la zona de unión de la carcasa y de la placa de unión del extremo derecho (figura A.210).
- Establecer la relación de **Concéntricas** entre las caras cilíndricas de la zona de unión de la carcasa y la del cierre lateral del extremo derecho. Esta vez, activar la casilla de **Bloquear rotación** (figura A.211).

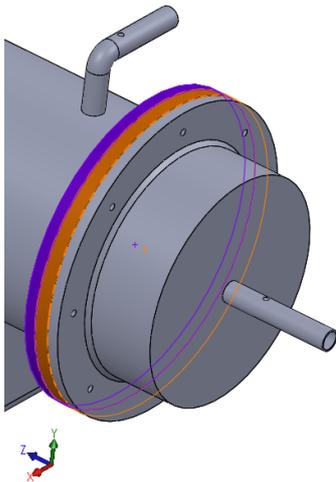


Figura A.210: Relación entre la carcasa y la placa de unión.

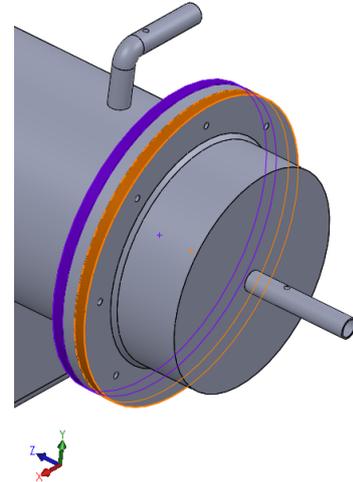


Figura A.211: Relación entre la carcasa y el cierre lateral.

- Hacer **Concéntrica** la cara curva²² del sensor 1 con la cara cilíndrica interior de la carcasa. Entre plano de **Planta** del sensor 1 y el de la carcasa, se debe establecer la relación de **Paralelo**. El plano de **Vista lateral** del sensor debe estar separado una **Distancia** de **140 mm** de la cara plana interior del extremo de la carcasa (ver figura A.212).
- En el sensor 2 establecer las mismas relaciones que en el sensor 1, pero cambiando la **Distancia** de 140 mm a **240 mm** (figura A.213).
- En el sensor 3 definir las mismas relaciones que en el sensor 1. Modificar la **Distancia** a **150 mm**. La cara de la carcasa respecto a la que se define la distancia será la cara plana interior del extremo opuesto de la misma (ver figura A.214).

²²La que es coincidente con la carcasa, no el extremo esférico.

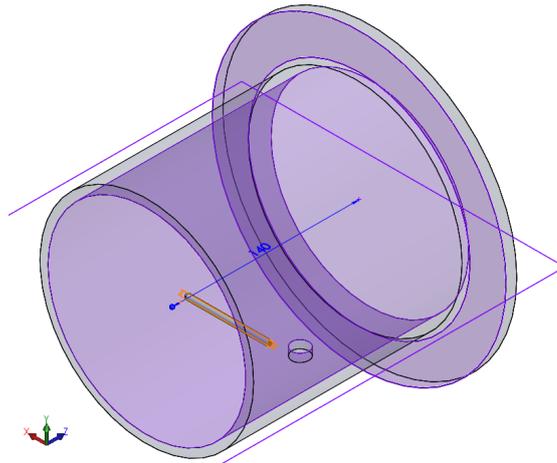


Figura A.212: Posición del sensor 1 de la carcasa.

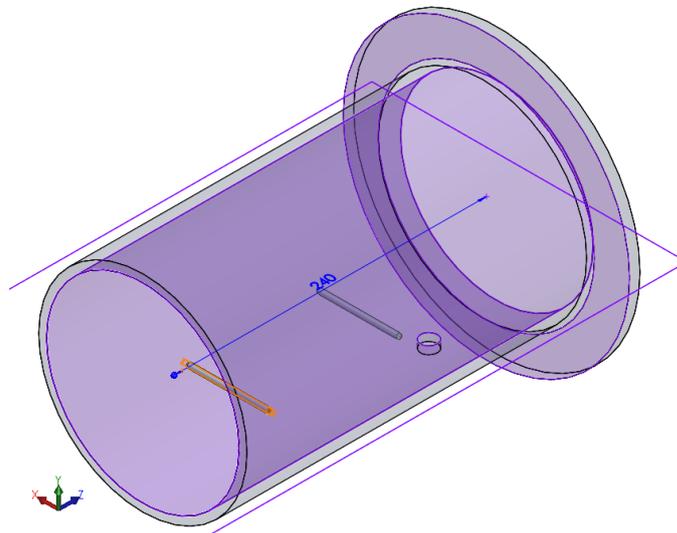


Figura A.213: Posición del sensor 2 de la carcasa.

- Para posicionar tanto el sensor de la tubería 1 como el de la tubería 4, se establecerá la relación de **Concéntrica** entre el extremo curvo del sensor y la cara interior cilíndrica de la tubería. A continuación, hacer **Coincidentes** los planos de **Vista lateral** del sensor y de la tubería. Por último, definir una relación de **Distancia** de **28 mm** entre el plano de **Planta** del sensor 1 y el de **Alzado** de la tubería 1, y de **52 mm** entre la **Planta** del sensor 4 y el plano de **Alzado** de la tubería 4 (ver figuras A.215 y A.216).
- Para definir la posición del sensor de la tubería 2 y el de la tubería 3, hacer **Concéntrico** el extremo curvo del sensor y la cara interior cilíndrica de la tubería. Después, hacer **Coincidente** el plano de **Vista lateral** del sensor y el de **Alzado** de la tubería. Por último, establecer una relación de **Distancia** entre el plano de **Planta** del sensor y el de **Vista lateral** de la tubería. En el caso del sensor de la tubería 2, la distancia de separación será de **50 mm**, y de **20 mm** para el sensor de la tubería 3 (ver figuras A.217 y A.218).

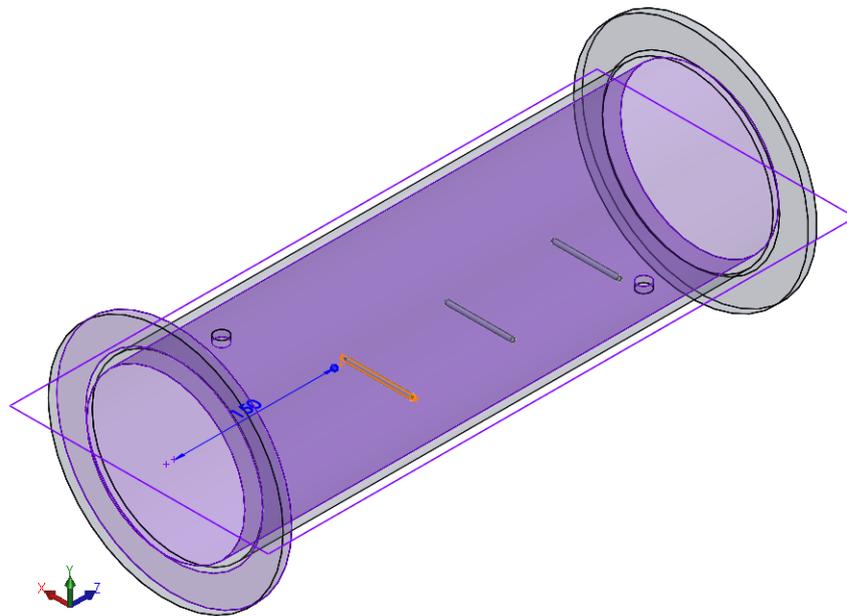


Figura A.214: Posición del sensor 3 de la carcasa.

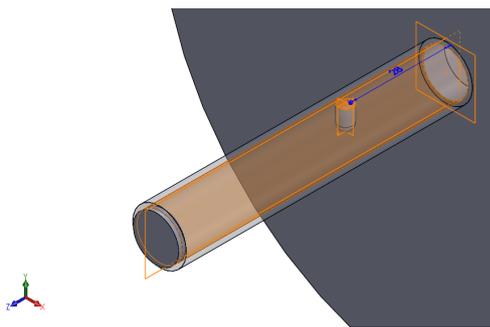


Figura A.215: Posición del sensor de la tubería 1.

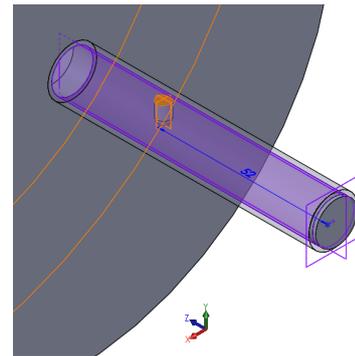


Figura A.216: Posición del sensor de la tubería 4.

Una vez hechos los cambios, la configuración **Modelo simplificado** del ensamblaje debe quedar como en la figura A.219.

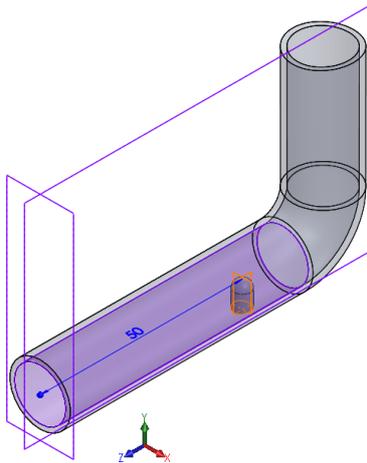


Figura A.217: Posición del sensor de la tubería 2.

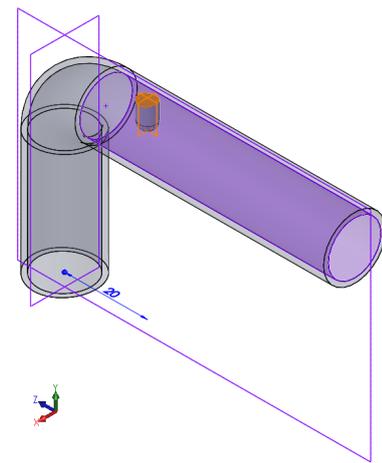


Figura A.218: Posición del sensor de la tubería 3.

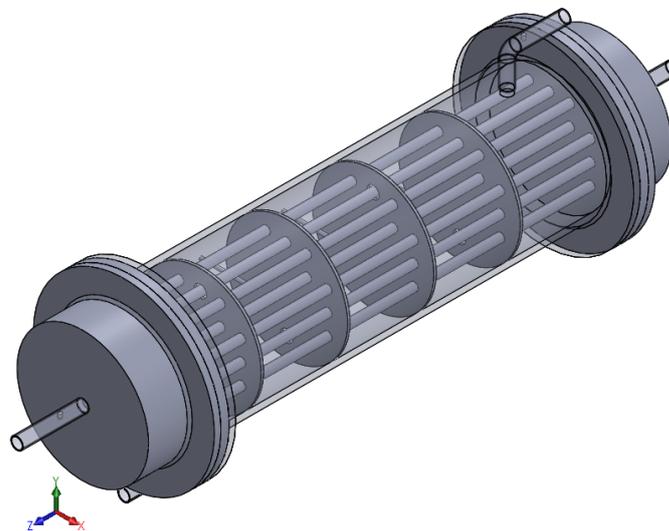


Figura A.219: Modelo simplificado del intercambiador.

A.12.14. Crear tapas de entrada y salida

A la hora de hacer la simulación del intercambiador hace falta definir las superficies de entrada y salida del agua. Estas superficies se pueden crear desde dentro de Flow Simulation o bien manualmente como un archivo de pieza independiente. Se ha optado por el segundo método.

Crear un archivo nuevo de tipo pieza. Dibujar en el plano de **Alzado** una circunferencia de **12,70 mm** de diámetro y extruirla **2 mm**, estableciendo en el desplegable de **Dirección 1** la **Condición final** de **Plano medio**. Guardar el archivo con el nombre **18 Tapa.SLDPRT**.

Una vez guardado el archivo, insertarlo dentro del ensamblaje del intercambiador. Copiar la pieza hasta tener un total de cuatro instancias de la misma (una por tubería).

Para fijar la posición de las tapas en el ensamblaje se debe definir la relación de **Concéntrica** entre el canto de la tapa y la cara interna de la tubería en la que vaya situada (figura A.220). Activar la casilla de **Bloquear rotación**.

A continuación, establecer la relación de **Distancia** entre la cara de la tapa que esté orientada hacia el exterior de la tubería y la cara plana con forma de corona circular de la tubería. La distancia será de **1 mm** de manera que la mitad del espesor de la tapa quede dentro de la tubería y la otra mitad, fuera (figura A.221).

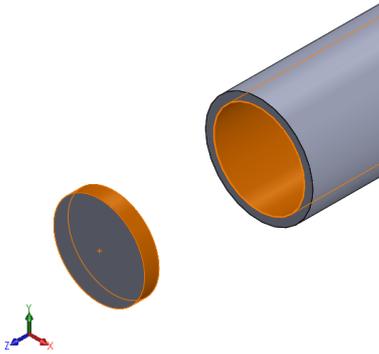


Figura A.220: Tapa concéntrica a la tubería.

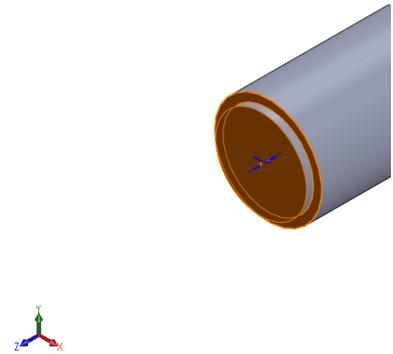


Figura A.221: Distancia entre caras.

Repetir estos pasos con las tres tapaderas restantes para fijar sus respectivas posiciones.

Como en este ensamblaje se está trabajando con dos configuraciones, las relaciones que se acaban de definir entre las tapas y las tuberías no estarán activas en la segunda configuración. Para activarlas, hacer clic con el botón derecho sobre cada una de estas últimas relaciones dentro del **Gestor de diseño** y seleccionar **Configurar operación** (figura A.222).

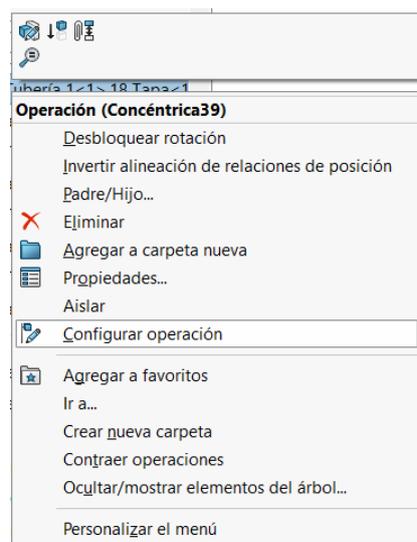


Figura A.222: Configurar operación.

Aparecerá la ventana de **Modificar configuraciones** (figura A.223). Dentro de esta ventana, desactivar las casillas en los dos modelos, de manera que en ninguno de los dos se suprima la operación. Las casillas deben quedar en blanco, sin ningún tic.

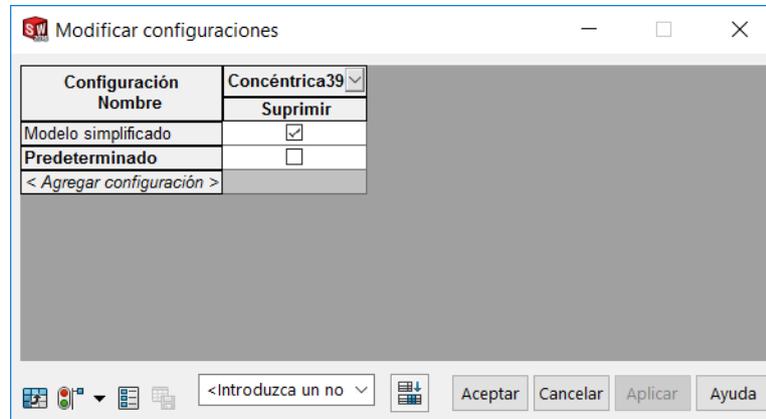


Figura A.223: Modificar configuraciones.

Anexo B

Simulación térmica

B.1. Pasos previos

B.1.1. Activar Flow Simulation

Para poder utilizar Flow Simulation, primero hace falta activar el complemento. Acceder a la ventana de los complementos de la manera explicada al principio del apartado A.10 y activar el complemento de **SOLIDWORKS Flow Simulation 2016** (figura B.1).

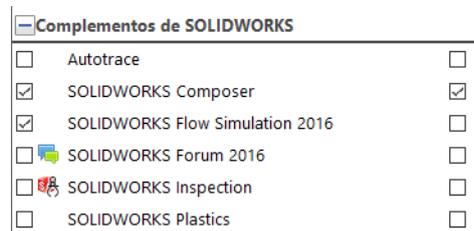


Figura B.1: Activar Flow Simulation.

Una vez activado, estará disponible la pestaña de **Flow Simulation** en la ventana gráfica (figura B.2).

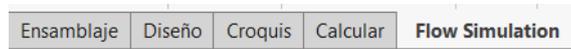


Figura B.2: Pestaña de Flow Simulation.

B.1.2. Definición de los materiales

Durante el proceso de modelado de las piezas no se ha definido el material del que están compuestas. Éste es un dato necesario ya que es la forma en la que se introducen las propiedades físicas de los materiales.

Como se comentó en el apartado A.12, las simulaciones se van a realizar tomando como modelo la geometría simplificada del intercambiador. En principio, bastaría sólo con definir los materiales de las piezas del modelo simplificado pero, para tener un modelo completo, se definirán en todas las piezas¹.

Para definir los materiales, hace falta acceder a cada archivo de tipo pieza. Dentro del archivo, en el **Gestor de diseño**, hacer clic con el botón derecho sobre **Material <sin especificar>** y seleccionar **Editar material** (figura B.3). Se abrirá una ventana como la que se muestra en la figura B.4.

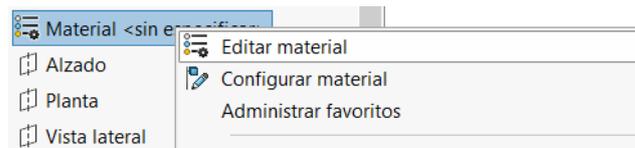


Figura B.3: Editar material.

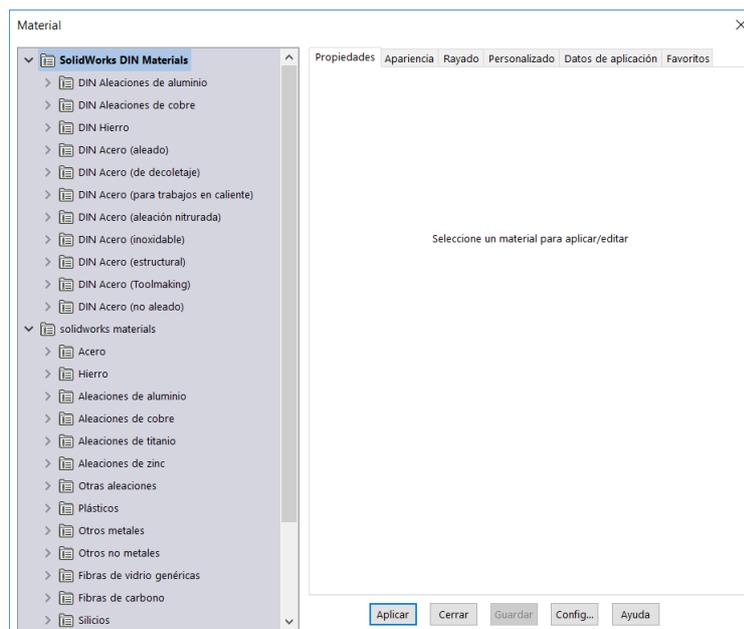


Figura B.4: Selección del material.

Todos los materiales que se van a definir en esta geometría se encuentran dentro del desplegable **solidworks materials**.

Para asignar el material a la pieza, seleccionarlo. Al asignar el material, también se asignará a la pieza su apariencia, es decir, se cambiará el color de la pieza dentro de la ventana gráfica. Si no se quiere cambiar la apariencia del material, pulsar sobre la pestaña de **Apariencia** dentro de la ventana del material y desactivar la casilla de **Aplicar apariencia de:**

¹Esto permitiría hacer un estudio térmico con la geometría no simplificada y comparar los resultados con los del modelo simplificado.

(nombre del material) (figura B.5).



Figura B.5: Casilla para aplicar apariencia.

En el caso de que la pieza tuviera varias configuraciones, el material se asignará a una de ellas. Para asignarlo a todas, pulsar sobre el botón de **Config...** Aparecerá otra ventana en la que se debe seleccionar la opción de **Todas las configuraciones** (figura B.6). Para asignarlo pulsar en **Aceptar**.

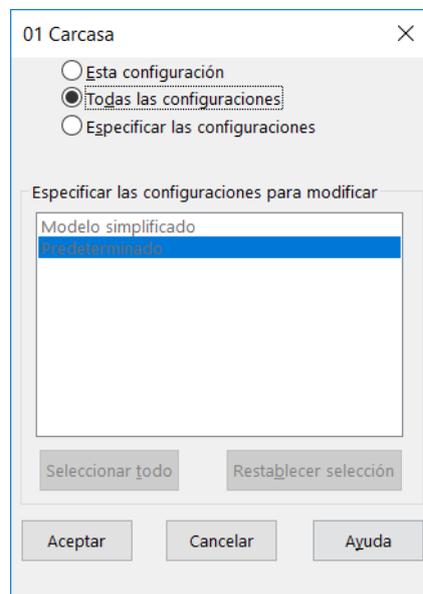


Figura B.6: Aplicar el material a todas las configuraciones.

Una vez hecho esto, hacer clic sobre el botón de **Aplicar**² y cerrar la ventana de la selección del material.

A continuación se muestra la ruta del material de cada pieza. También se especifica si la pieza tiene más de una configuración.

01 Carcasa.SLDPRT

Más de una configuración.

Solidworks materials > Plásticos > PMMA.

²Al pulsar sobre este botón, la ventana no se cerrará a pesar de que se haya asignado el material.

02 Cierre lateral.SLDPRT

Más de una configuración.

Solidworks materials > Plásticos > PMMA.

03 Placa unión.SLDPRT

Más de una configuración.

Solidworks materials > Aleaciones de aluminio > Aleación 1060.

04 Deflector.SLDPRT

Más de una configuración.

Solidworks materials > Plásticos > PMMA.

05 Junta deflector.SLDPRT

Solidworks materials > Acero > AISI 304.

06 Tubo interior.SLDPRT

Solidworks materials > Acero > AISI 304.

07 Tubería 1.SLDPRT³

El material se le asignará más adelante.

08 Tubería 2.SLDPRT

El material se le asignará más adelante.

³Las tuberías se van a considerar de material aislante para que no influyan en el estudio térmico. Este material se introducirá más adelante desde Flow Simulation.

09 Tubería 3.SLDPRT

El material se le asignará más adelante.

10 Tubería 4.SLDPRT

El material se le asignará más adelante.

11 Sensor carcasa.SLDPRT

Solidworks materials > Acero > AISI 304.

12 Sensor tubería.SLDPRT

Solidworks materials > Acero > AISI 304.

13 Tornillo carcasa.SLDPRT

Solidworks materials > Acero > AISI 304.

14 Tuerca carcasa.SLDPRT

Solidworks materials > Acero > AISI 304.

15 Tornillo deflector.SLDPRT

Solidworks materials > Acero > AISI 304.

16 Tuerca deflector.SLDPRT

Solidworks materials > Acero > AISI 304.

17 Arandela carcasa.SLDPRT

Solidworks materials > Acero > AISI 304.

18 Tapa.SLDPRT

Las tapas no deben influir en el análisis térmico. Se considerarán de material aislante, al igual que las tuberías, por lo que se definirá desde Flow Simulation.

El material se le asignará más adelante.

B.1.3. Nuevas configuraciones

En este trabajo se van a hacer varias simulaciones del intercambiador, considerando dos tipos de flujo: contracorriente y paralelo. En cada tipo de flujo se estudiará el funcionamiento del intercambiador modificando la temperatura de entrada del agua caliente. Para mantener lo más organizado posible los diferentes estudios, se van a crear cuatro configuraciones nuevas del ensamblaje. Estas configuraciones serán una copia de la configuración del **Modelo simplificado**.

Ir a la pestaña de **ConfigurationManager** del ensamblaje y hacer doble clic sobre la configuración del **Modelo simplificado**, de manera que sea la configuración que esté activa. Una vez hecho esto, hacer clic con el botón derecho sobre el nombre del ensamblaje, aún dentro de la pestaña del **ConfigurationManager**, y seleccionar **Agregar configuración** (figura A.195).

En el recuadro de **Nombre de configuración** escribir **Contracorriente**. Así se habrá creado la configuración que se va a utilizar en las simulaciones de flujo en contracorriente. Repetir el proceso de creación de una nueva configuración tres veces más y nombrar las nuevas configuraciones⁴ como **Paralelo**, **Coficiente de convección** y **Convergencia de malla** (ver figura B.7).



Figura B.7: Distintas configuraciones creadas.

⁴Al terminar, debe haber un total de seis configuraciones del ensamblaje.

B.2. Coeficiente de convección exterior

B.2.1. Nuevo proyecto de Flow Simulation

Para crear un nuevo proyecto, se va a utilizar el asistente de creación de proyectos de Flow Simulation. Mediante este asistente se irán introduciendo los parámetros principales del proyecto, tales como el nombre, unidades, tipo de estudio, tipos de fluidos que incluir en el estudio, condiciones iniciales, etc.

Pulsar sobre **Wizard**, en la pestaña de **Flow Simulation** (figura B.8).

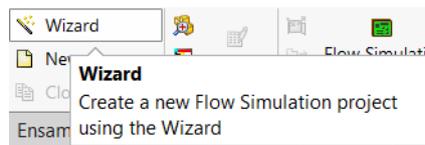


Figura B.8: Asistente de Flow Simulation.

La primera ventana que aparece es la del **Nombre del proyecto**. El cálculo del coeficiente de convección medio se va a realizar con el flujo en contracorriente a una temperatura de entrada de agua caliente de 40 °C. En el recuadro de **Project name** introducir **40 °C - Coeficiente de convección – Nivel 1**

En el desplegable de **Configuration** seleccionar la opción de **Select** y en **Configuration name** elegir la configuración de **Coeficiente de convección** (ver figura B.9). Para pasar a la siguiente ventana, hacer clic en **Next>**.

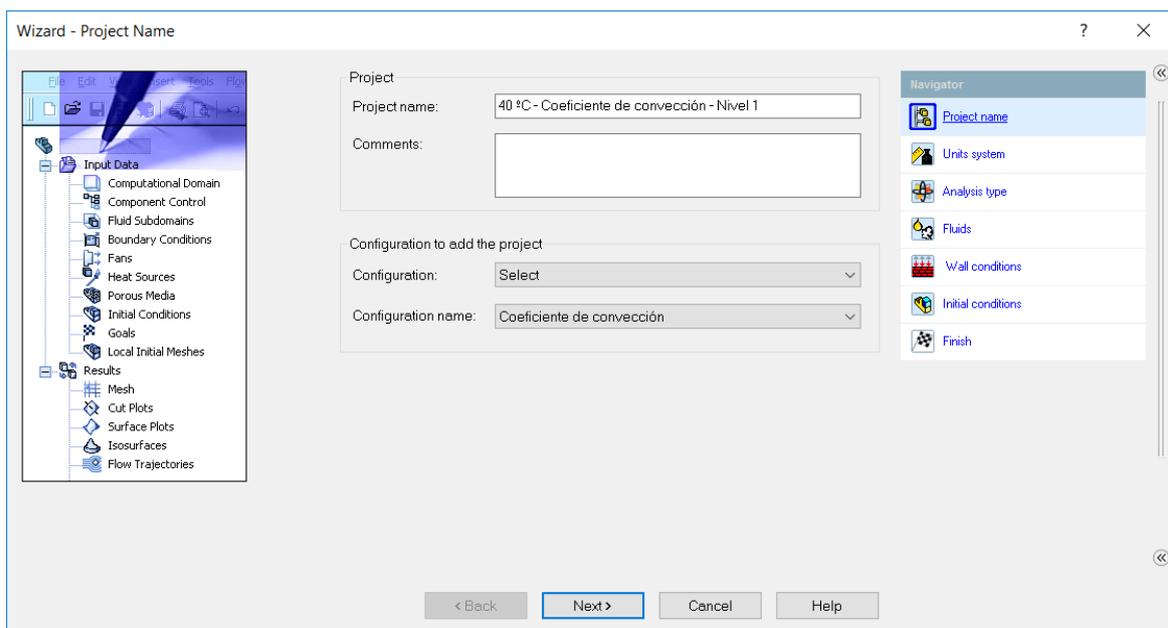


Figura B.9: Nombre del proyecto.

La segunda ventana se corresponde con la del **Sistema de unidades**. En el recuadro de **Unit system** seleccionar el sistema **SI (m-kg-s)**.

En el recuadro inferior se van a cambiar las unidades de la temperatura y del caudal para una mayor comodidad a la hora de introducir y leer los datos. Cambiar las unidades de la **Temperatura** (temperature), en el desplegable **Main**, a grados **Celsius** y la del **Caudal** (volume flow rate), en el desplegable **Loads&Motion**, a **l/min** (figura B.10).

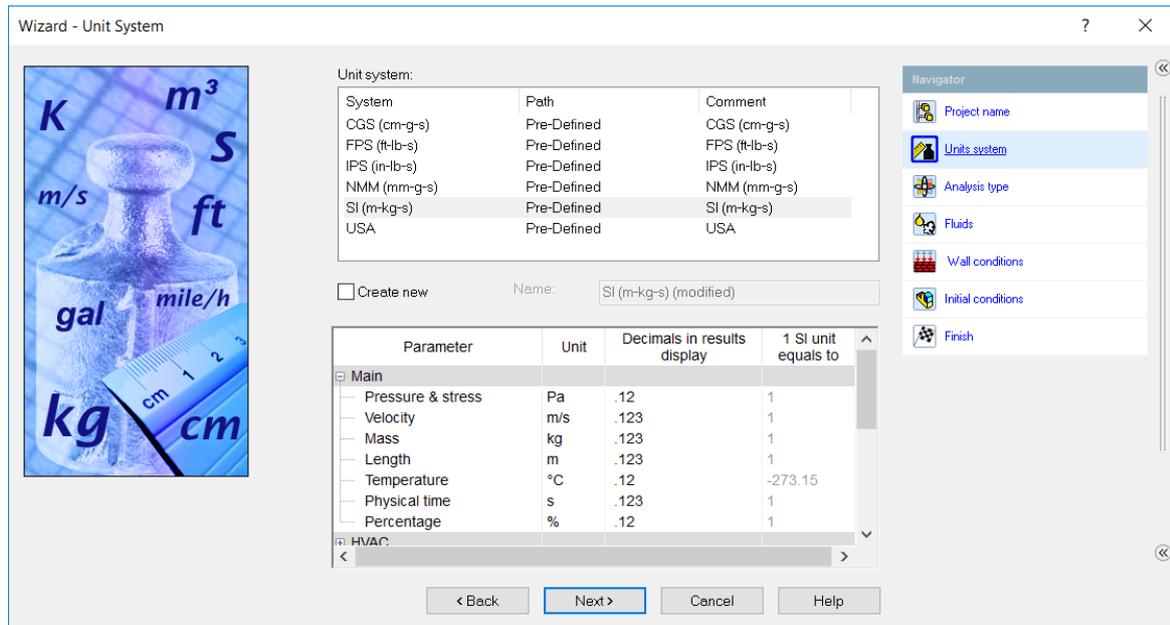


Figura B.10: Sistema de unidades.

La tercera ventana del asistente es la del **Tipo de análisis**. Para el cálculo del coeficiente de convección exterior se debe considerar la convección natural. Para ello, en **Analysis type**, seleccionar **External** y en el recuadro inferior de **Physical Features** seleccionar **Heat conduction in solids** y **Gravity**. Cambiar el eje de referencia, **Reference axis**, al eje **Z** (figura B.11).

La cuarta ventana es la del **Fluido por defecto**. En esta ventana se eligen los fluidos que se van a considerar en la simulación y se establece cuál será el fluido por defecto⁵. Se va a seleccionar como fluidos el aire y el agua.

En el desplegable de **Gases**, hacer doble clic sobre **Air**, y en el de **Liquids** sobre **Water**. El aire será el fluido por defecto de la simulación (figura B.12).

La quinta ventana se trata de la del **Sólido por defecto**. El material que se seleccione en esta ventana será el que Flow Simulation asigne a las piezas que no tengan un material definido. Como anteriormente se definió el material de la mayoría de las piezas⁶, a falta de

⁵Será el fluido que Flow Simulation asignará por defecto a un volumen, a no ser que se indique otro fluido diferente.

⁶Ver B.1.2. Definición de los materiales.

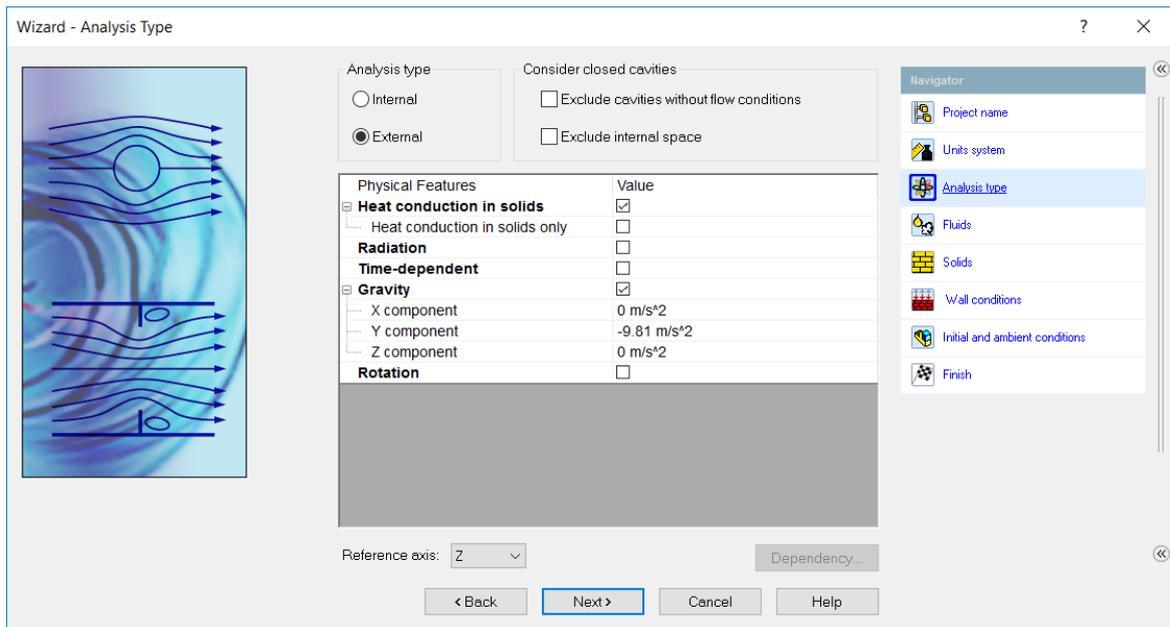


Figura B.11: Tipo de análisis.

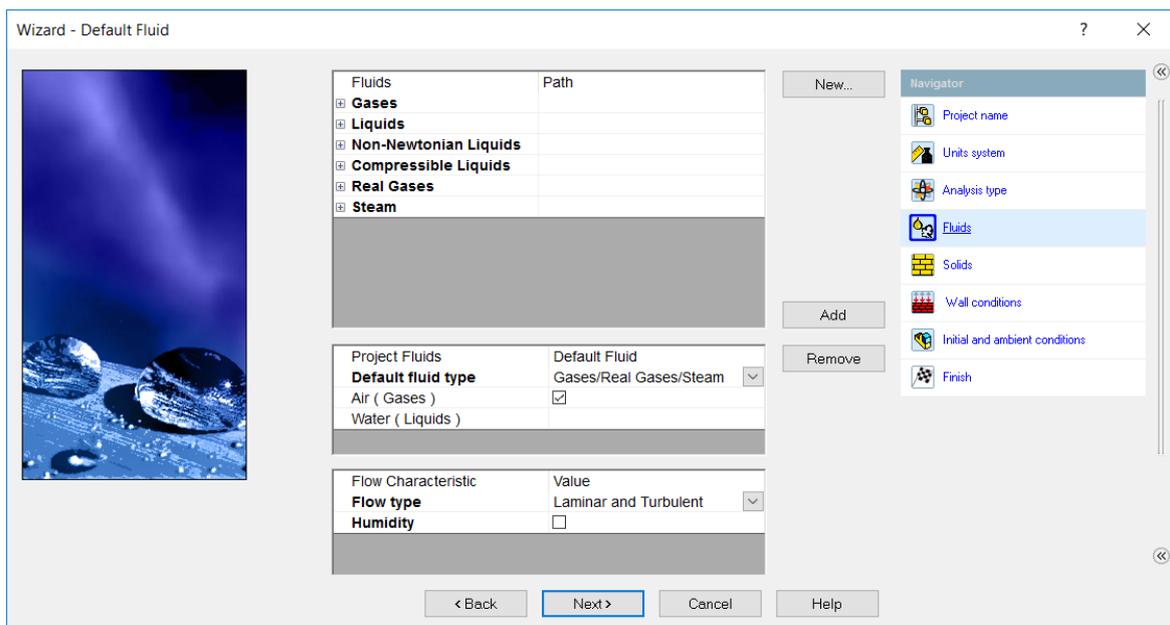


Figura B.12: Fluido por defecto.

definir más adelante el material de las tuberías y los sensores, **no importa** el material que se seleccione en esta ventana. Se decide escoger, por ejemplo, el PMMA (metacrilato), dentro del desplegable de **User Defined > SOLIDWORKS Material** (figura B.13).

La siguiente ventana es la de **Condiciones de pared**. El único valor que se puede introducir, debido al tipo de simulación que se va a llevar a cabo, es la rugosidad de la pared. Dejar el valor por defecto (figura B.14).

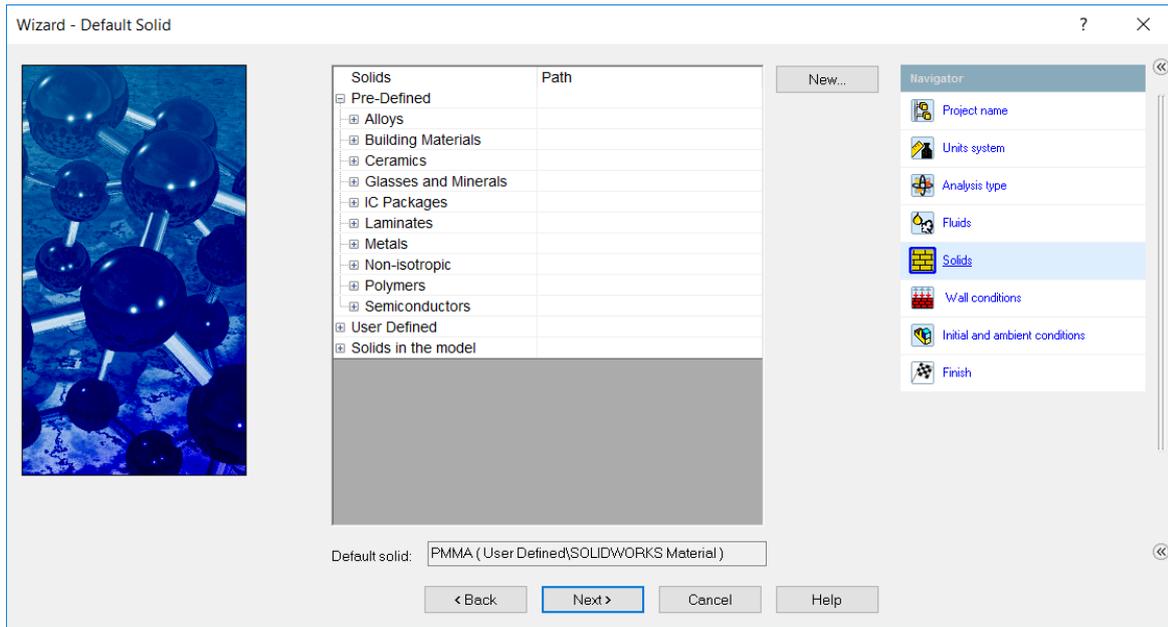


Figura B.13: Sólido por defecto.

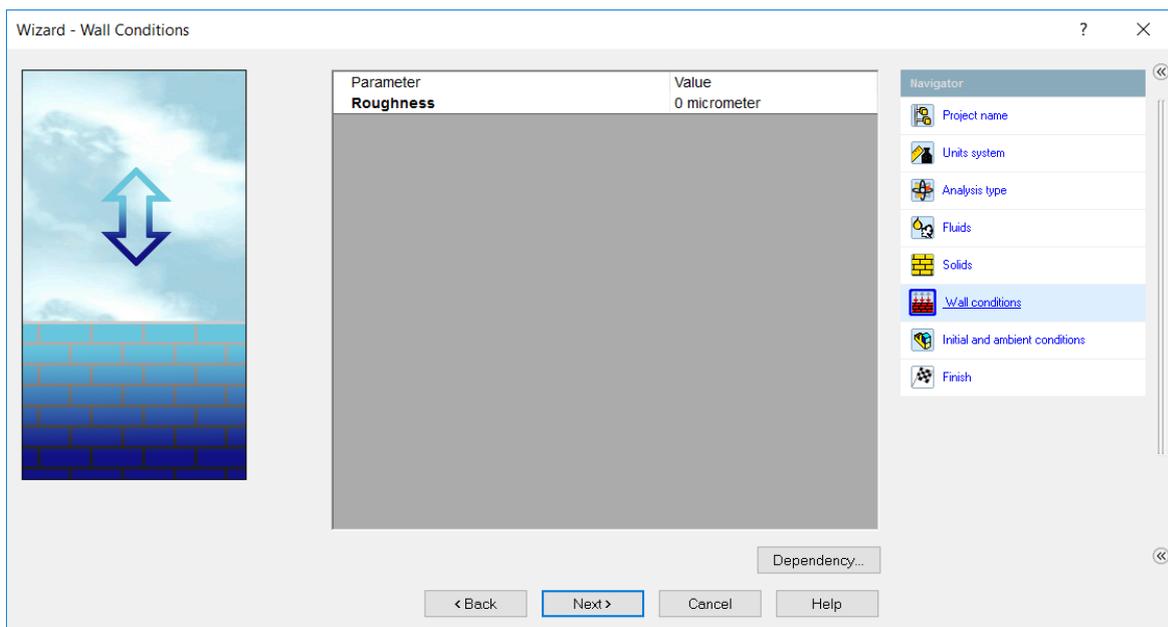


Figura B.14: Condiciones de pared.

La última ventana que aparece es la de **Condiciones iniciales y ambientales**. En el desplegable de **Thermodynamic Parameters**, escribir en el recuadro de **Temperature** **24 °C**⁷. Modificar también la temperatura inicial de los sólidos, en el desplegable de **Solid Parameters**. En el recuadro de **Initial solid temperature** introducir **24 °C**. Dejar los demás valores por defecto (figura B.15).

Una vez introducidos todos los parámetros, hacer clic sobre **Finish**.

⁷Esta es la temperatura ambiental que se estableció en los ensayos experimentales en el laboratorio.

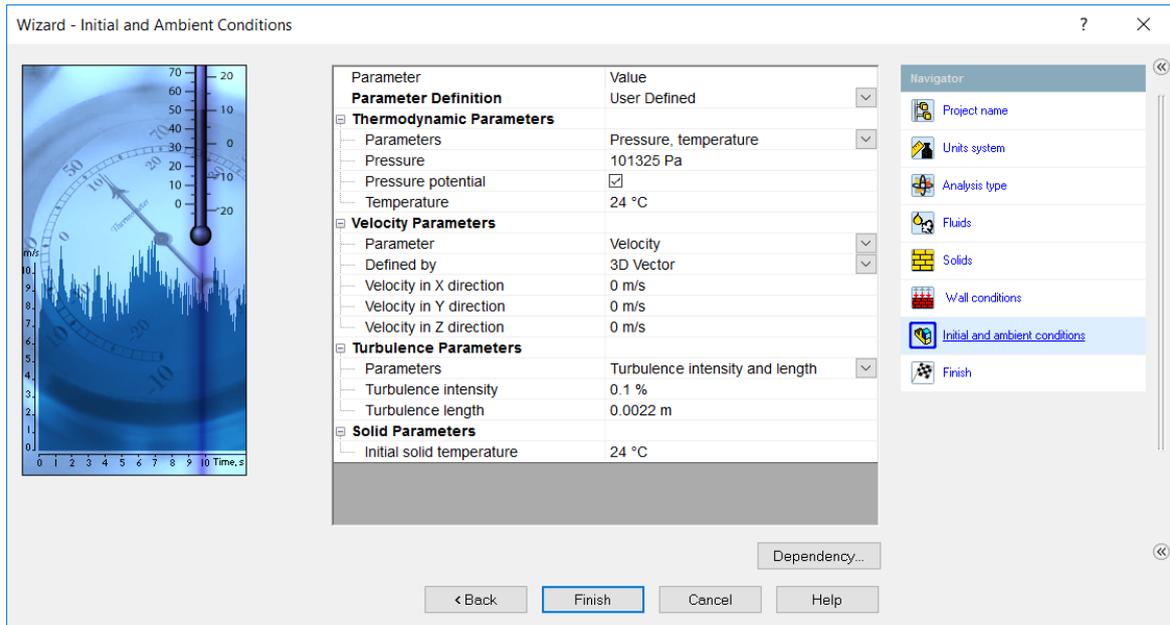


Figura B.15: Condiciones iniciales y ambientales.

B.2.2. Dominio computacional

El **Dominio computacional** es la región del espacio en la que se va a realizar la simulación. Tiene forma de paralelepípedo, con sus ejes paralelos al sistema global de coordenadas, y encierra a todo el modelo [10].

Simular con el dominio que se ha generado por defecto supondría un elevado consumo de recursos del ordenador, por lo que se va a reducir. Para modificarlo, hacer clic con el botón derecho sobre **Computational Domain**, dentro del desplegable de **Input Data**, y seleccionar **Edit Definition...** (figura B.16).

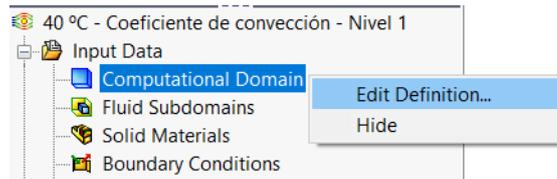


Figura B.16: Editar dominio computacional.

Como se puede ver, el modelo simplificado es simétrico respecto al plano de vista lateral. Para reducir el tiempo de cálculo y los recursos necesarios, se va a definir un dominio computacional simétrico. Para ello, dentro del desplegable de **Size and Conditions**, en el recuadro de **X max**, introducir **0 m**. Pulsar sobre el icono verde de la derecha, de **Boundary Condition**, y seleccionar la condición de simetría, **Symmetry** (ver figura B.17).



Figura B.17: Condición de simetría.

En el resto de dimensiones, introducir los siguiente datos:

- X min: -0,125 m
- Y max: 0,15 m
- Y min: -0,15 m
- Z max: 0,4 m
- Z min: -0,4 m

El dominio computacional final se puede ver en la figura B.18.

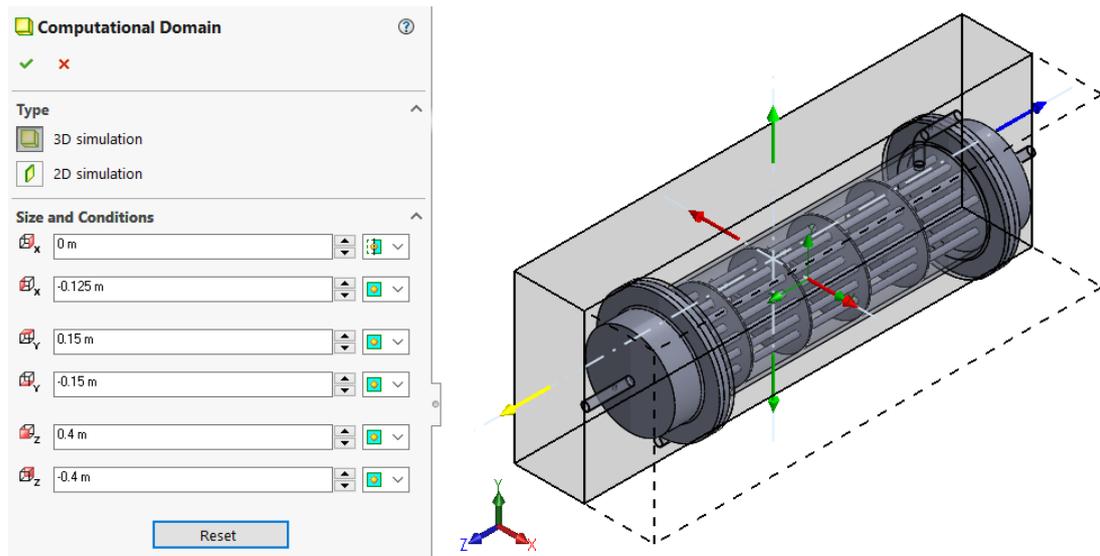


Figura B.18: Dominio computacional final.

B.2.3. Desactivar componentes

Se va a considerar que los sensores son ideales, es decir, que toman medidas sin intervenir en el funcionamiento del intercambiador. Para evitar que un elemento del ensamblaje intervenga en el proceso de simulación⁸, hacer clic con el botón derecho sobre **Input Data** y seleccionar **Component Control** (figura B.19).

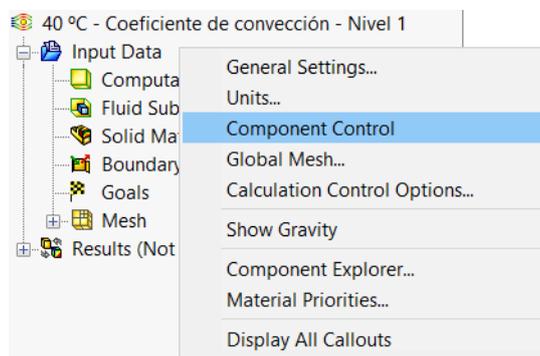


Figura B.19: Component control.

Desmarcar las casillas de los siete sensores (figura B.20).

El haber desactivado los sensores influirá también en la malla que se genere. Ésta será más simple y tendrá menos elementos, por lo tanto, el proceso de cálculo será más eficiente.

⁸Aun así, sí que podrá tomar medidas. Ver B.2.7.

	11 Sensor carcasa-1	<input type="checkbox"/>
	11 Sensor carcasa-2	<input type="checkbox"/>
	11 Sensor carcasa-3	<input type="checkbox"/>
	12 Sensor tubería-1	<input type="checkbox"/>
	12 Sensor tubería-2	<input type="checkbox"/>
	12 Sensor tubería-3	<input type="checkbox"/>
	12 Sensor tubería-4	<input type="checkbox"/>

Figura B.20: Componentes desactivados.

B.2.4. Subdominio del fluido

El fluido que hay dentro del intercambiador (agua) es distinto al que existe a su alrededor (aire). Para separar estos volúmenes y definir qué fluido existe en cada uno, se hace uso de los **Subdominios de fluidos**.

La forma de añadir un subdominio es haciendo clic con el botón derecho sobre **Fluid Subdomains** y pulsando sobre **Insert Fluid Subdomain...** (figura B.21).

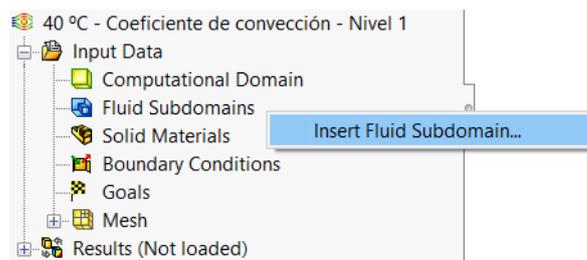


Figura B.21: Insertar subdominio de fluido.

El primer subdominio se va a corresponder con el volumen de fluido que circula por dentro de los tubos interiores. En el recuadro de **Faces to Apply the Fluid Subdomain**, dentro del desplegable de **Selection**, hay que seleccionar una de las caras que estén en contacto con el volumen ya mencionado. Se puede hacer uso de la herramienta de **Seleccionar otra**⁹ para seleccionar, por ejemplo, la cara interior de la tubería 1 (figura B.22).

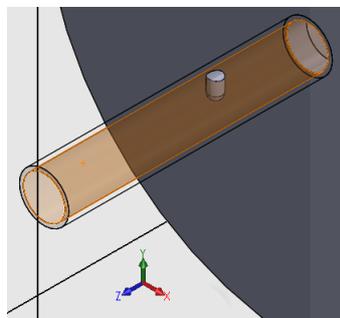


Figura B.22: Selección de la cara interior de la tubería.

⁹Pulsar con el botón derecho sobre la cara que se quiera seleccionar y elegirla en el desplegable que aparecerá.

En el desplegable de **Fluid type**, como el fluido que circulará por el interior será agua, seleccionar **Liquids** y activar la casilla de **Water** (figura B.23).

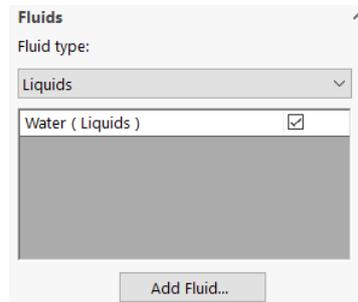


Figura B.23: Definición del tipo de líquido en el subdominio 1.

El primer subdominio debe quedar como en la figura B.24.

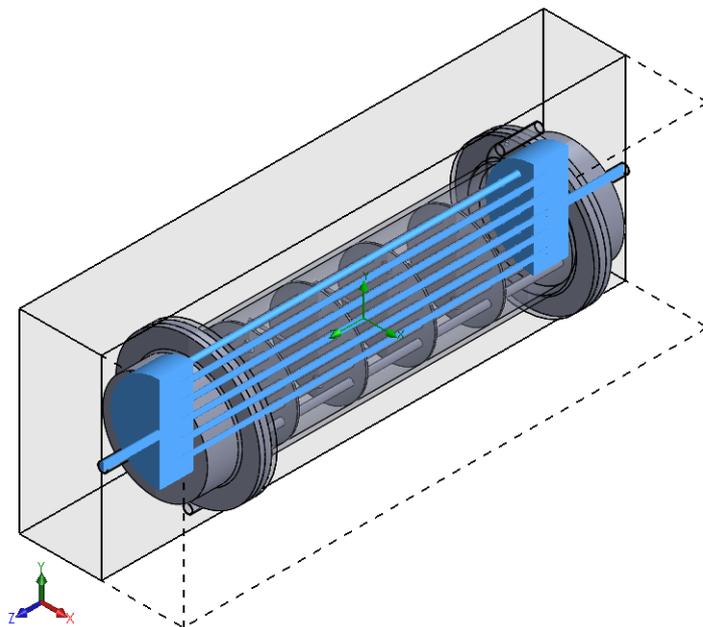


Figura B.24: Subdominio 1.

Una vez definido el primer subdominio, se va a introducir un segundo subdominio. Éste se va a corresponder con el volumen del interior de intercambiador que está en contacto con la superficie exterior de los tubos interiores. Para definirlo, proceder de manera similar a la anterior, pero esta vez seleccionar la cara interior de la tubería 2 (figura B.25).

De nuevo, en el desplegable de **Fluid type**, seleccionar **Liquids** y activar la casilla de **Water**. El segundo subdominio debe quedar como en la figura B.26.

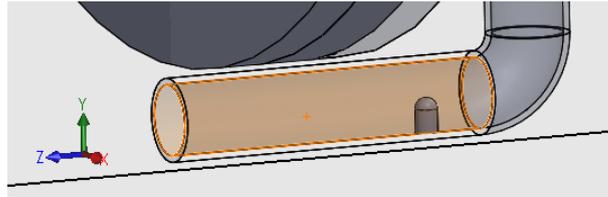


Figura B.25: Selección de la cara interior de la segunda tubería.

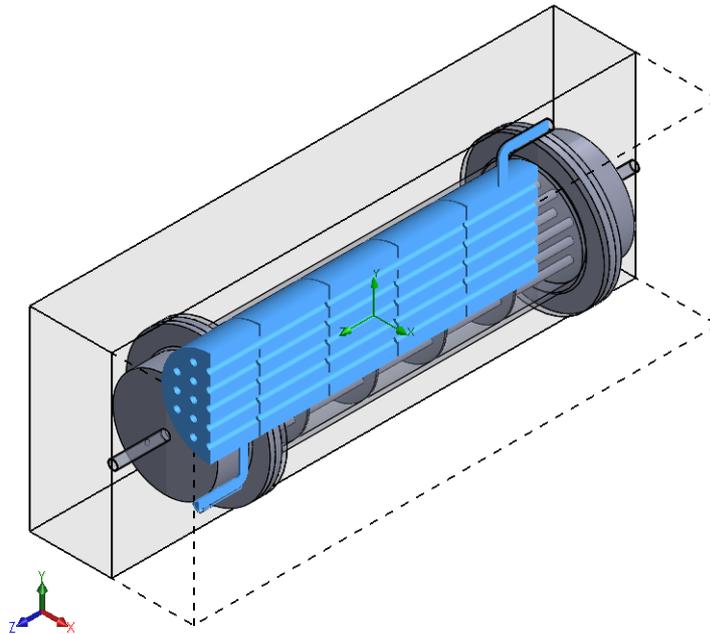


Figura B.26: Subdominio 2.

B.2.5. Materiales de los sólidos

Los materiales de las piezas del ensamblaje se pueden insertar desde Flow Simulation o bien importarse si ya han sido definidos en el modelado de las piezas. En el modelado del intercambiador ya se definieron los materiales de todas las piezas, a excepción de las tuberías y las tapas.

Para importar los datos de los materiales ya definidos, hacer clic con el botón derecho sobre **Solid Materials** y pulsar sobre **Import Data From Model...** (figura B.27).

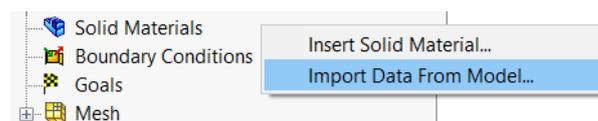
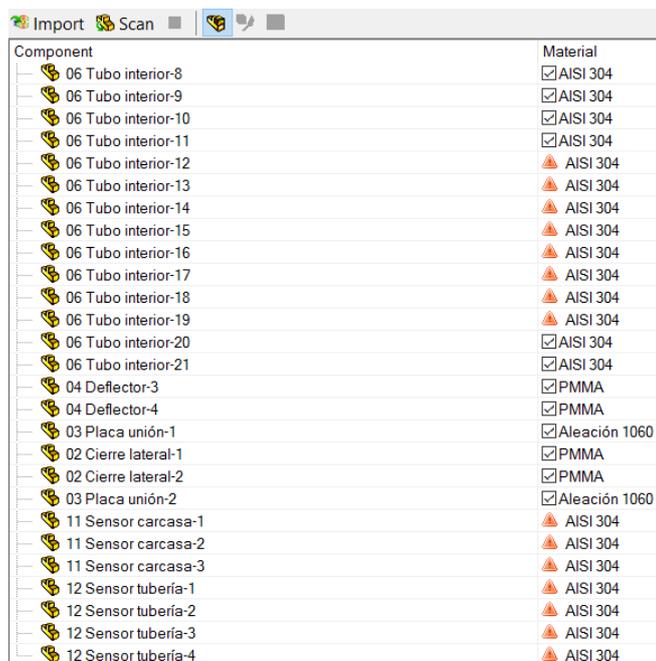


Figura B.27: Importar materiales.

Aparecerá en la parte inferior de la pantalla una ventana con todas las piezas del modelo

que tenían un material definido anteriormente¹⁰. Se puede ver que, por un lado, hay ocho piezas que dan un aviso (ver figura B.28). Estas ocho piezas se corresponden con ocho de los tubos interiores. Esto es debido a que estos ocho tubos quedan completamente fuera del dominio computacional. Por otro lado, hay otras siete piezas con un aviso. Éstas son los siete sensores. El aviso es debido a que tienen un material asignado, pero las piezas están desactivadas dentro de Flow Simulation. Estos avisos se solucionarán automáticamente.



Component	Material
06 Tubo interior-8	<input checked="" type="checkbox"/> AISI 304
06 Tubo interior-9	<input checked="" type="checkbox"/> AISI 304
06 Tubo interior-10	<input checked="" type="checkbox"/> AISI 304
06 Tubo interior-11	<input checked="" type="checkbox"/> AISI 304
06 Tubo interior-12	<input type="checkbox"/> AISI 304
06 Tubo interior-13	<input type="checkbox"/> AISI 304
06 Tubo interior-14	<input type="checkbox"/> AISI 304
06 Tubo interior-15	<input type="checkbox"/> AISI 304
06 Tubo interior-16	<input type="checkbox"/> AISI 304
06 Tubo interior-17	<input type="checkbox"/> AISI 304
06 Tubo interior-18	<input type="checkbox"/> AISI 304
06 Tubo interior-19	<input type="checkbox"/> AISI 304
06 Tubo interior-20	<input checked="" type="checkbox"/> AISI 304
06 Tubo interior-21	<input checked="" type="checkbox"/> AISI 304
04 Deflector-3	<input checked="" type="checkbox"/> PMMA
04 Deflector-4	<input checked="" type="checkbox"/> PMMA
03 Placa unión-1	<input checked="" type="checkbox"/> Aleación 1060
02 Cierre lateral-1	<input checked="" type="checkbox"/> PMMA
02 Cierre lateral-2	<input checked="" type="checkbox"/> PMMA
03 Placa unión-2	<input checked="" type="checkbox"/> Aleación 1060
11 Sensor carcasa-1	<input type="checkbox"/> AISI 304
11 Sensor carcasa-2	<input type="checkbox"/> AISI 304
11 Sensor carcasa-3	<input type="checkbox"/> AISI 304
12 Sensor tubería-1	<input type="checkbox"/> AISI 304
12 Sensor tubería-2	<input type="checkbox"/> AISI 304
12 Sensor tubería-3	<input type="checkbox"/> AISI 304
12 Sensor tubería-4	<input type="checkbox"/> AISI 304

Figura B.28: Materiales importados y piezas con avisos.

Pulsar sobre el botón de **Import** (figura B.29) para importar los materiales del modelo a Flow Simulation. Una vez importados, pulsar sobre la cruz roja de la derecha (figura B.30).

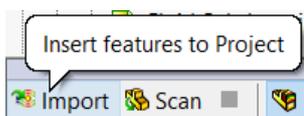


Figura B.29: Botón para importar los materiales.



Figura B.30: Salir de la selección de materiales.

Para terminar de definir todos los materiales, hace falta asignarle un material **aislante** a las cuatro tuberías y tapas¹¹. Pulsar con el botón derecho sobre **Solid Materials** y seleccionar **Insert Solid Material...** (figura B.31).

En el recuadro de **Components to Apply the Solid Material** seleccionar las cuatro tuberías y las cuatro tapas. En el desplegable de **Solid**, seleccionar el material **Aislante**,

¹⁰No aparecerán ni las cuatro tuberías ni los siete sensores, ya que no tenían un material definido en el modelado.

¹¹Puede que las tapas estén ocultas. Si fuera así, mostrarlas para poder seleccionarlas.

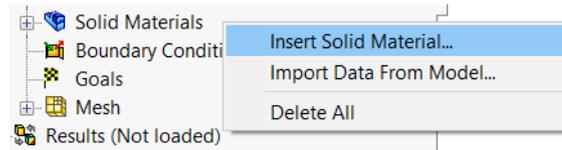


Figura B.31: Insertar materiales manualmente.

que se encuentra en **Pre-Defined > Glasses and Minerals > Insulator** (figura B.32). Para asignar los materiales, pulsar sobre el símbolo del tic verde.

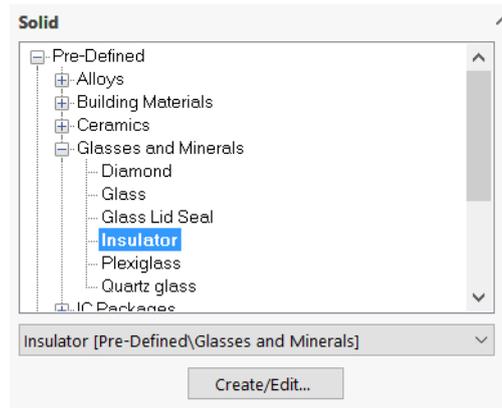


Figura B.32: Insertar material aislante.

B.2.6. Condiciones de contorno

Tal y como se comentó al principio del apartado B.2.1, el cálculo del coeficiente de convección medio se va a hacer con el flujo en contracorriente y una temperatura de entrada de agua caliente de 40 °C.

El agua caliente entrará por la tubería central izquierda (tubería 1) y saldrá por la tubería central derecha (tubería 4). El agua fría entrará por la tubería superior derecha (tubería 3) y saldrá por la tubería inferior izquierda (tubería 2). Un esquema de los flujos de entrada y salida del intercambiador, en contracorriente, se puede ver en la figura B.33.

Las temperaturas que se van a tomar como referencia, tanto para establecer las condiciones de entrada como para la posterior comparación de resultados, van a ser la media aritmética de los ensayos realizados en el laboratorio¹². Por lo tanto, para el caso que se va a simular, la temperatura de **entrada de agua caliente** será de **36,1 °C** y la temperatura de **entrada de agua fría** será de **27,8 °C**. El **caudal de agua caliente** se va a considerar en todos los casos de **3 l/min** y el de **agua fría** de **1,5 l/min**.

¹²De cada caso simulado se llevaron a cabo tres ensayos en el laboratorio. La media se ha realizado entre los tres ensayos de cada uno de los casos. Ver apartado 3.3, del capítulo 3.

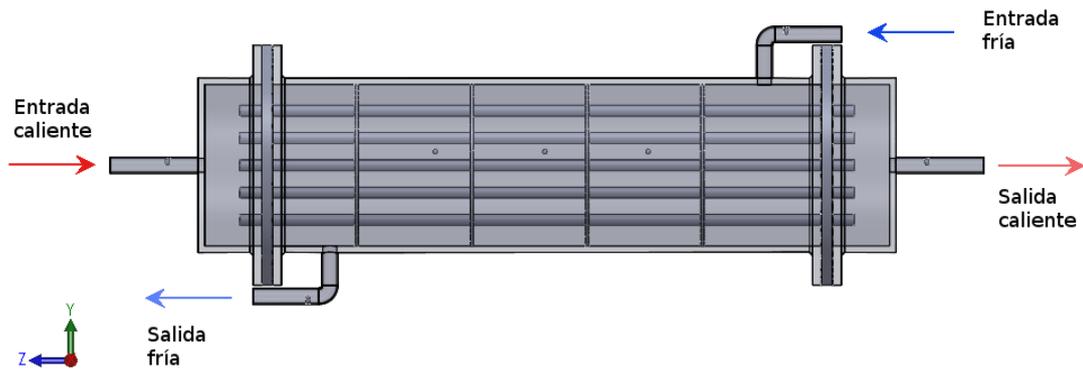


Figura B.33: Esquema de los flujos de entrada y salida en contracorriente.

Hacer clic con el botón derecho sobre **Boundary Conditions** y seleccionar **Insert Boundary Condition...** (figura B.34).

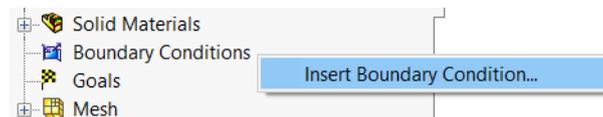


Figura B.34: Introducir condiciones de contorno.

La primera condición de contorno va a ser la entrada de agua caliente. En el recuadro de **Faces to Apply the Boundary Condition** seleccionar la **cara interna** de la tapa de la tubería de entrada de agua caliente (figura B.35).

En el desplegable de **Type**, hacer clic sobre el primer icono, que se corresponde con **Flow Openings** y seleccionar la opción de **Inlet Volume Flow**. Dentro del desplegable de **Flow Parameters** seleccionar el primer icono, **Normal to Face** y en el recuadro de **Volume Flow Rate** introducir el caudal de entrada de agua caliente, **3 l/min**. El último desplegable que se va a modificar es el de **Thermodynamic Parameters**. Introducir la temperatura de entrada del agua caliente, **36,1 °C** (ver figura B.36).

Para identificar fácilmente la condición de contorno, se va a renombrar como **Entrada agua caliente**.

La definición de la condición de contorno de la entrada de agua fría es igual que para la entrada de agua caliente pero cambiando la temperatura y el caudal. Seleccionar como entrada de agua fría la cara interior de la tapa de la tubería de agua fría (figura B.37). La temperatura de entrada de agua fría es de **27,8 °C** y el caudal, de **1,5 l/min** (figura B.38).

Nombrar la condición de contorno como **Entrada agua fría**.

La salida de agua, tanto caliente como fría, se considera que es hacia la atmósfera. Crear una nueva condición de contorno, **Boundary Condition**. Primero se definirá la salida de

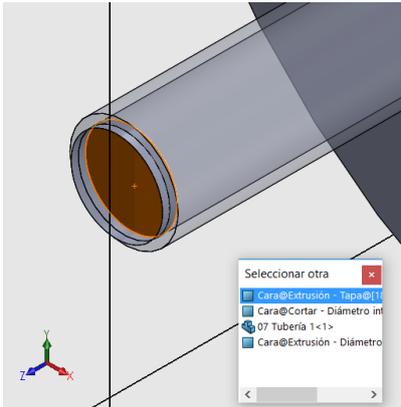


Figura B.35: Cara interior de la entrada de agua caliente.

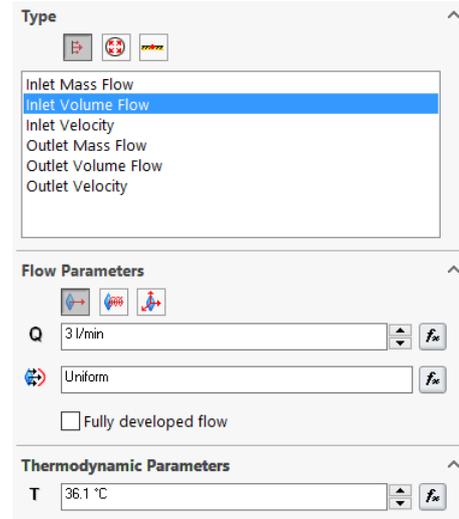


Figura B.36: Condiciones de la entrada de agua caliente.

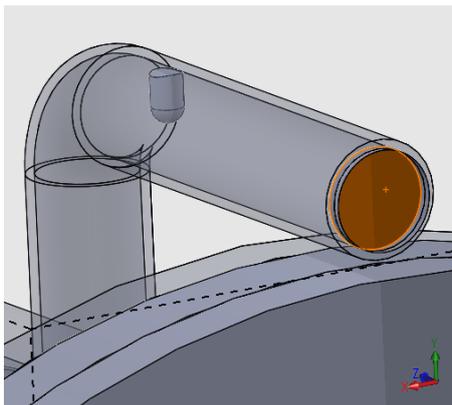


Figura B.37: Cara interior de la entrada de agua fría.

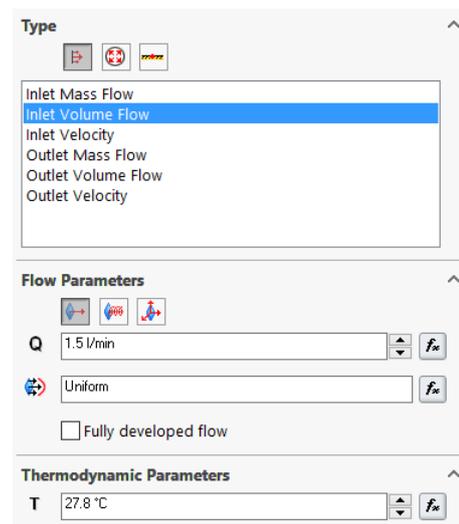


Figura B.38: Condiciones de la entrada de agua fría.

agua caliente y después, siguiendo el mismo procedimiento, la de agua fría.

Seleccionar la cara interna de la tapa de la tubería de salida de agua caliente (figura B.39). En el desplegable de **Type** hacer clic sobre el segundo icono, que se corresponde con **Pressure Openings** y seleccionar **Environment Pressure**. Dejar el resto de parámetros por defecto (figura B.40).

Renombrar como **Salida agua caliente**.

Proceder de igual manera para la salida de agua fría, con los mismos parámetros que para la salida de agua caliente, pero seleccionando la cara de la tubería inferior izquierda

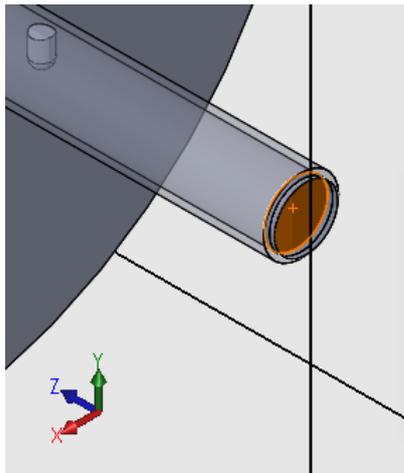


Figura B.39: Cara interior de la salida de agua caliente.

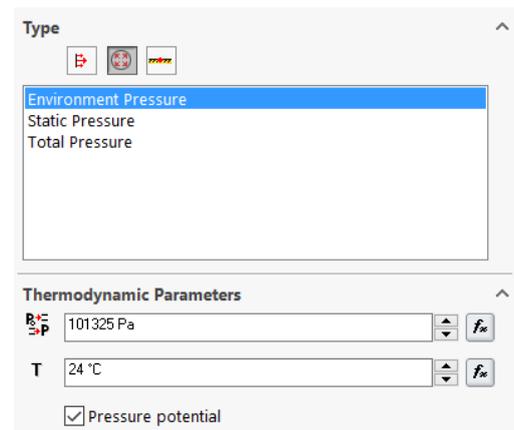


Figura B.40: Condiciones de la salida de agua caliente.

(figura B.41).

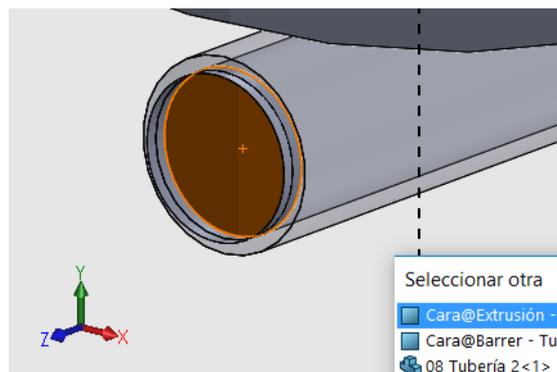


Figura B.41: Cara interior de la salida de agua fría.

Renombrar como **Salida agua fría**.

B.2.7. Parámetros de interés (Goals)

Con el objetivo de reducir el tiempo de cálculo, se pueden definir cuáles son los parámetros de interés de la simulación. A lo largo de las distintas iteraciones durante el proceso de cálculo, estos valores irán cambiando, pero una vez que los valores se hayan estabilizado, la simulación se detendrá. Se dice que la solución ha **convergi**do¹³.

El motivo de recurrir a estos objetivos es que puede haber algunos parámetros que no hayan terminado de converger, o que incluso estén oscilando entre un valor máximo y mínimo, habiendo convergi

¹³Para los parámetros definidos en la simulación. No tiene por qué ser el valor real de la variable estudiada.

sólo las iteraciones necesarias para que converjan los datos que interesen.

El parámetro de interés de este primer análisis es el calor cedido al exterior a través de la superficie del intercambiador aunque, para garantizar la convergencia de la simulación, también se estudiará la convergencia de las temperaturas en los siete sensores. Se ha hecho la suposición de que la medida de la temperatura que realiza el sensor corresponde con el valor medio de temperaturas en la superficie esférica de su extremo.

Para definir los objetivos, hacer clic con el botón derecho sobre **Goals**. Los objetivos que se van a definir son en una superficie, por lo que se debe seleccionar **Insert Surface Goals...** (figura B.42).

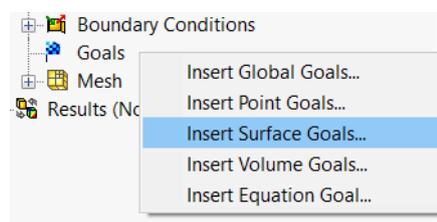


Figura B.42: Insertar objetivos.

En el recuadro de **Faces to Apply the Surface Goal**, seleccionar el extremo esférico (ver figura B.43) de los siete sensores en el siguiente orden:

- Sensor de entrada de agua caliente (figura A.215).
- Sensor de entrada de agua fría (figura A.218).
- Primer sensor de la carcasa (figura A.212).
- Segundo sensor de la carcasa (figura A.213).
- Tercer sensor de la carcasa (figura A.214).
- Sensor de salida de agua caliente (figura A.216).
- Sensor de salida de agua fría (figura A.217).

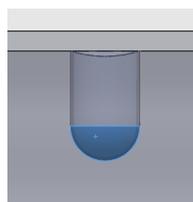


Figura B.43: Selección del extremo del sensor.

Al seleccionar más de una superficie, aparecerá debajo del recuadro una casilla con el texto **Create goal for each surface**. Activar la casilla para que se cree un objetivo por

cada superficie, y no uno conjunto.

En el desplegable de **Parameters**, activar la casilla de la segunda columna¹⁴ de la variable **Temperature (Fluid)**.

La pestaña de selección de objetivos debería quedar como en la figura B.44.

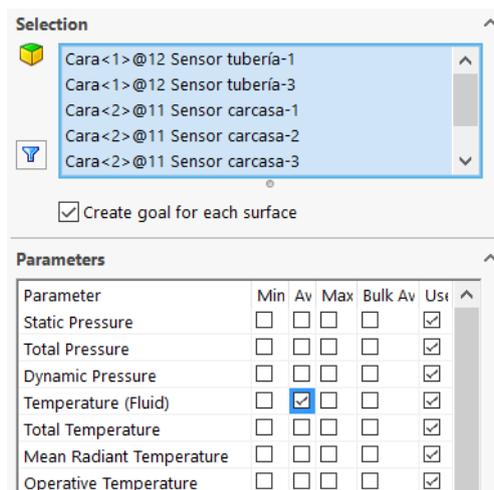


Figura B.44: Ventana de objetivos.

Otro objetivo que se va a definir es el del calor cedido al exterior. Para ello definir un nuevo objetivo de superficie. Las caras que se van a seleccionar son todas las caras exteriores del intercambiador (ver figura B.45).

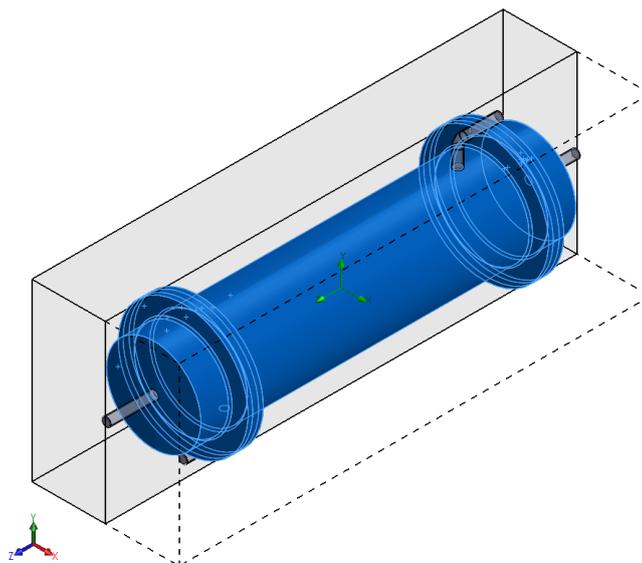


Figura B.45: Caras exteriores seleccionadas.

¹⁴La segunda columna se corresponde con el valor medio, **Average**.

En el desplegable de **Parameters**, activar la casilla de la segunda columna de la variable **Heat Flux** (figura B.46).

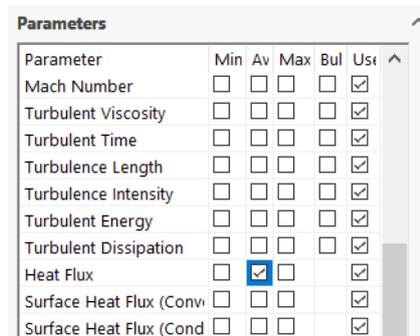


Figura B.46: Selección del objetivo de *Heat Flux*.

Se deben haber creado un total de ocho objetivos. Para poder determinar con la mayor facilidad posible a qué sensor está relacionado cada objetivo (ver figura B.47), éstos últimos se van a renombrar, quedando como en la figura B.48.

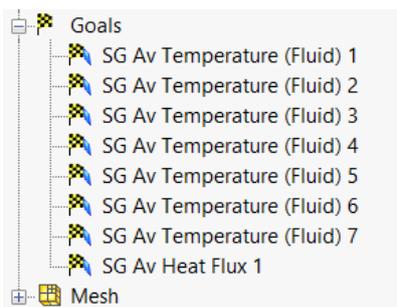


Figura B.47: Objetivos sin renombrar.

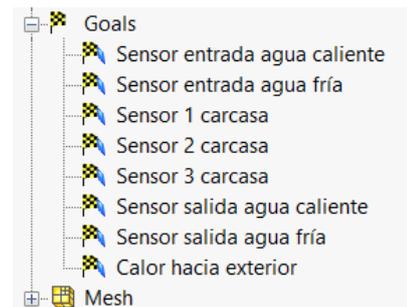


Figura B.48: Objetivos después de renombrar.

B.2.8. Malla

Durante el proceso de mallado, se divide el dominio computacional¹⁵ en elementos más pequeños, también con forma de paralelepípedo. A la malla que conforman estos elementos más pequeños se le denomina **malla básica**.

Una vez definida la malla básica, Flow Simulation crea la malla subdividiendo los elementos de la misma en función de la geometría del modelo, las condiciones de contorno y los objetivos establecidos. A esta malla se le llama **malla inicial** y será la malla que se utilizará para realizar los cálculos. Cabe destacar que el **tamaño más pequeño de elemento que puede formar parte de la malla viene condicionado por el tamaño de los elementos de la malla básica**.

¹⁵Ver B.2.2. Dominio computacional.

El proceso de refinado de la malla consiste en la subdivisión de los elementos que la conforman en ocho elementos más pequeños, dividiendo por la mitad cada una de las aristas de los elementos iniciales. Los elementos de la malla inicial son elementos de **nivel 0**. Al subdividir por primerar vez, los elementos que se creen serán de **nivel 1** y al subdivir por segunda vez, de **nivel 2**. El número máximo de subdivisiones que se pueden hacer es de 9, por lo que los elementos de nivel 9 tendrán un volumen 8^9 veces menor que los elementos de la malla básica.

La regla más importante que Flow Simulation aplica a la hora de refinar la malla tiene el nombre de la **regla de los elementos vecinos** (Cell Mating rule). Dicha regla, que es la de máxima prioridad, establece que los niveles de refinado de dos elementos que tengan una cara en común sólo pueden diferir en uno, es decir, un elemento de nivel cinco sólo puede tener elementos de nivel cuatro, cinco o seis a su alrededor [10].

En este trabajo se ha decidido relizar un mallado automático, modificando el tamaño de los elementos de la malla básica y permitiendo que Flow Simulation estime el nivel adecuado de refinado en función de la geometría del modelo.

Para establecer el tamaño de la malla básica, hacer clic con el botón derecho sobre **Global Mesh**, en el desplegable de **Mesh** y seleccionar la opción de **Edit Definition...** (figura B.49).

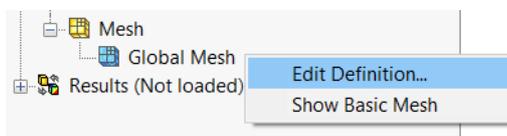


Figura B.49: Tamaño de la malla básica.

En el desplegable de **Type** seleccionar la opción **Automatic**.

En el desplegable de **Settings** se puede ver una barra deslizadora. Con esta barra se establece el nivel inicial de la malla básica. Este nivel irá de 1 a 7, en oposición al nivel de refinado de malla que va de 0 a 9. Para la primera simulación, seleccionar el **nivel 1**.

Para tener una idea del tamaño inicial de la malla básica y del tamaño de las subdivisiones con ese tamaño inicial, se puede activar la casilla de **Show basic mesh**. Una vez activo, aparecerán en la ventana gráfica tres planos ortogonales con la proyección de los elementos de la malla básica (figura B.50).

Para ver el tamaño de los distintos niveles de refinado de la malla básica, activar la casilla de **Display Refinement Level**. Sobre los planos anteriores aparecerá la proyección de los elementos con el nivel de refinado especificado en la barra deslizante de **Refinement level**. Como se comentó anteriormente, el nivel máximo de refinado es 9, por lo que la barra deslizante irá desde 0 hasta 9 (figura B.51).

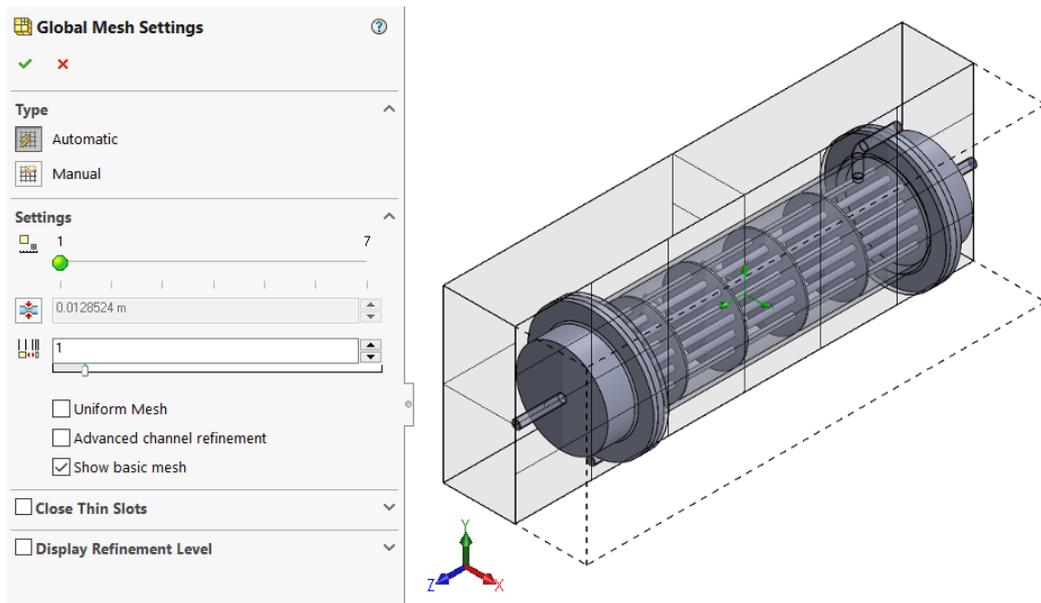


Figura B.50: Elementos de la malla básica de nivel 1.

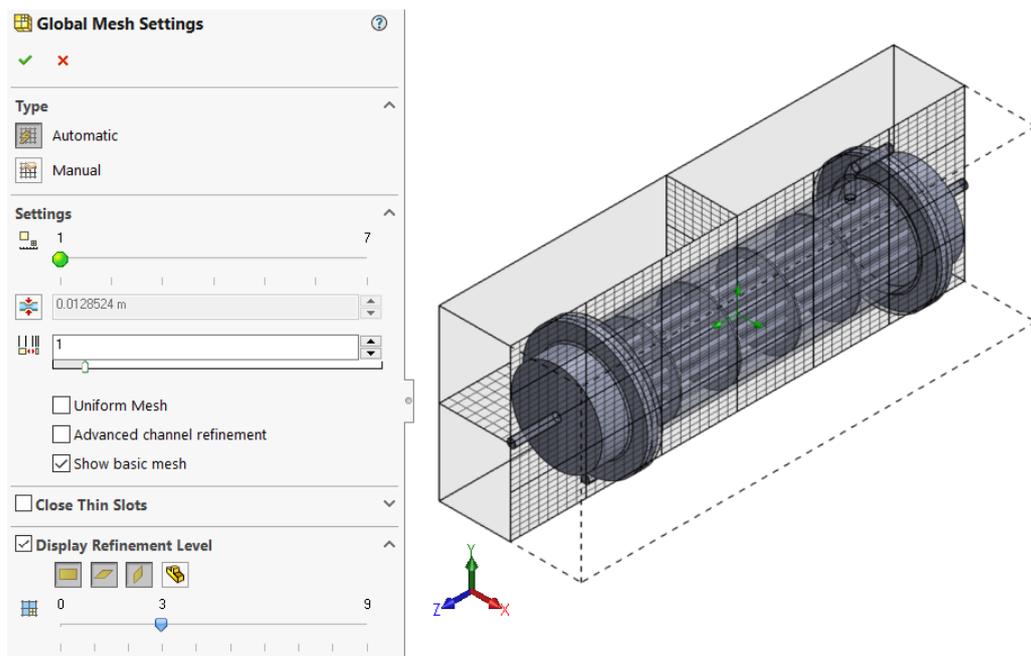


Figura B.51: Refinado de nivel 3 en la malla básica de nivel 1.

Si en algún momento se quiere ver el tamaño de un elemento, hacer clic en el botón de **Show Cell Size**, en la esquina inferior derecha (figura B.52). Pasar con el cursor sobre la malla para ver el tamaño de sus elementos.

Una vez definido el nivel inicial de la malla básica, pulsar con el botón derecho sobre **Mesh** y seleccionar **Create Mesh...** para crear la malla (figura B.53).

Se abrirá una ventana. Pulsar en **Run** para iniciar el mallado (figura B.54).



Figura B.52: Tamaño de los elementos.

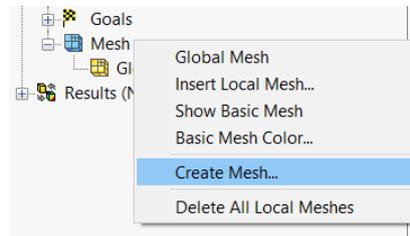


Figura B.53: Crear malla.

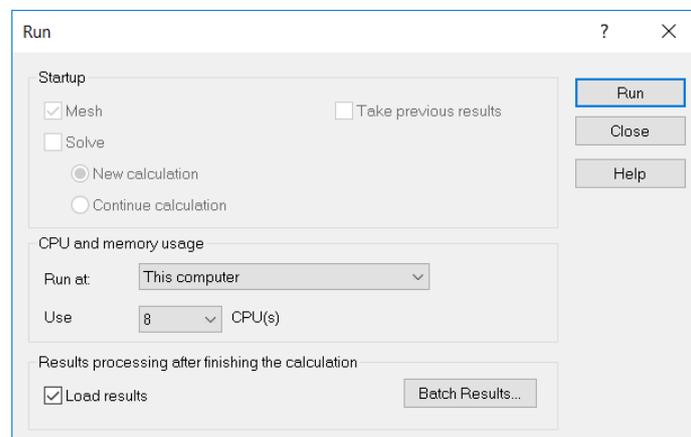
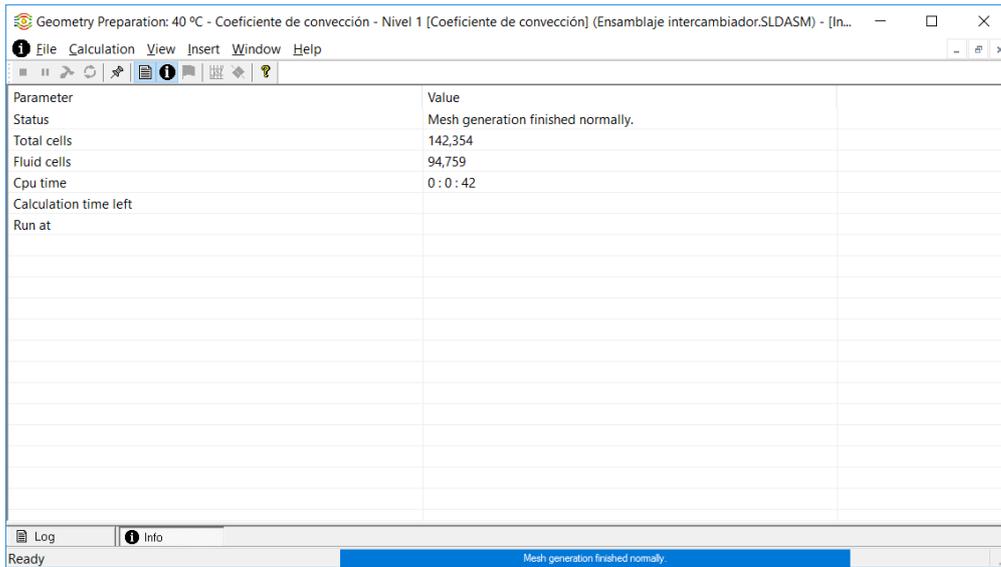


Figura B.54: Ejecutar el mallado.

Aparecerá otra ventana en la que se mostrará información del proceso de mallado. Una vez que haya terminado el proceso, mostrará el número de elementos de la malla y el tiempo de procesamiento (figura B.55). Esta ventana se puede cerrar cuando haya terminado el proceso de mallado.



The screenshot shows a software window titled 'Geometry Preparation: 40 °C - Coeficiente de convección - Nivel 1 [Coeficiente de convección] (Ensamblaje intercambiador.SLDASM) - [In...'. The window contains a table with the following data:

Parameter	Value
Status	Mesh generation finished normally.
Total cells	142,354
Fluid cells	94,759
Cpu time	0 : 0 : 42
Calculation time left	
Run at	

At the bottom of the window, there is a status bar with 'Ready' on the left and 'Mesh generation finished normally.' on the right.

Figura B.55: Información sobre el proceso de mallado.

B.2.9. Opciones de control del cálculo

Mediante estos controles se decide en qué punto se considerará terminada la simulación. Se pueden utilizar varios criterios al mismo tiempo. Para configurarlos, hacer clic en **Calculation Control Options** (figura B.56).

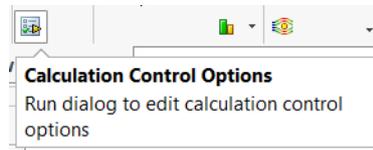


Figura B.56: Opciones de control del cálculo.

El criterio que se utilizará en este trabajo será únicamente el de la convergencia de los objetivos (*Goals convergence*), por lo que es necesario desactivar la condición de *Travels* en la ventana de control (figura B.57).

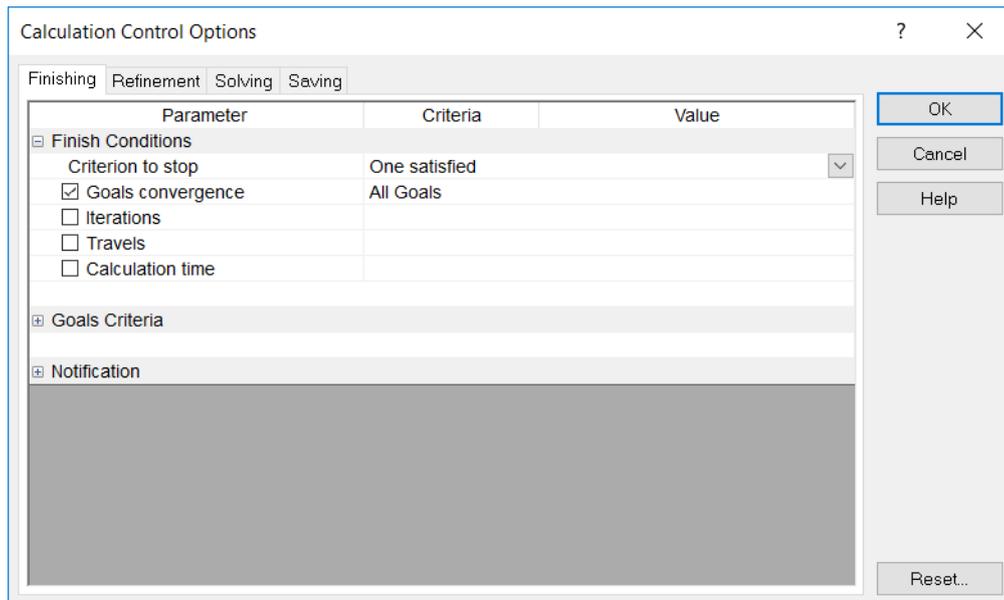


Figura B.57: Casillas activas en el control del cálculo.

B.2.10. Ejecutar simulación

Para ejecutar la simulación, pulsar sobre **Run** en la parte superior (figura B.58). En la ventana que aparece, pulsar **Run** y se iniciará el proceso de cálculo.

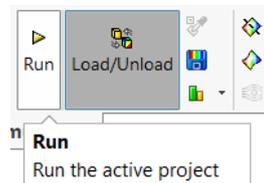


Figura B.58: Ejecutar simulación.

Se puede hacer un seguimiento del cálculo a través de la ventana que aparecerá: la ventana del **Solver**. Entre las herramientas disponibles en la ventana del solver se encuentran las **Goals Plot** y las **Preview**.

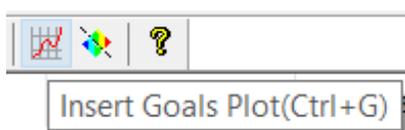


Figura B.59: Insert Goals Plot.

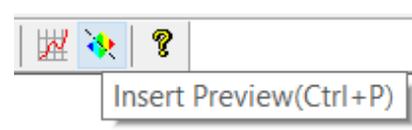
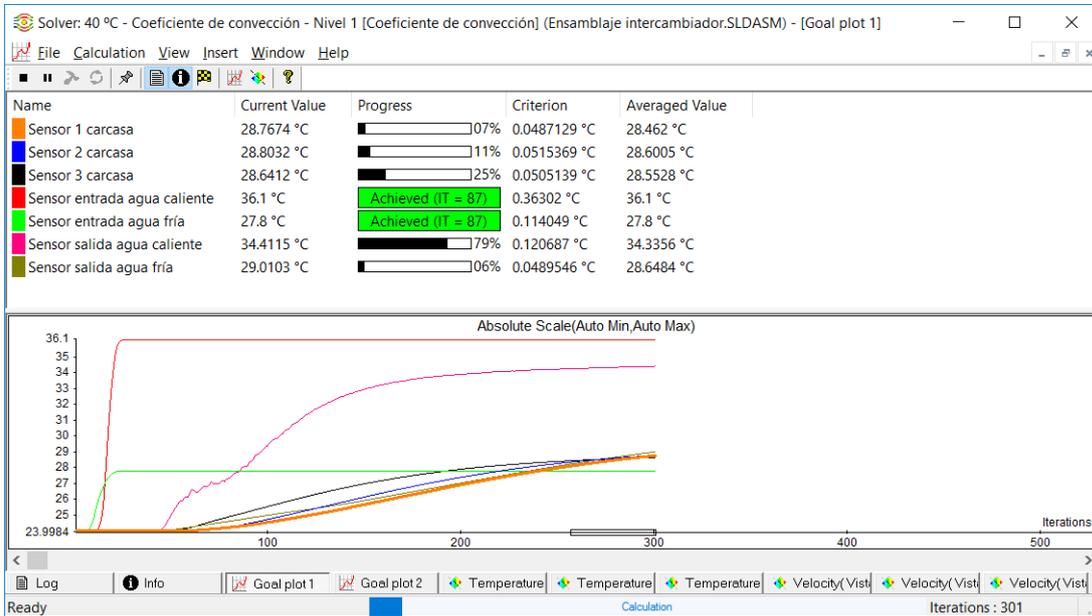


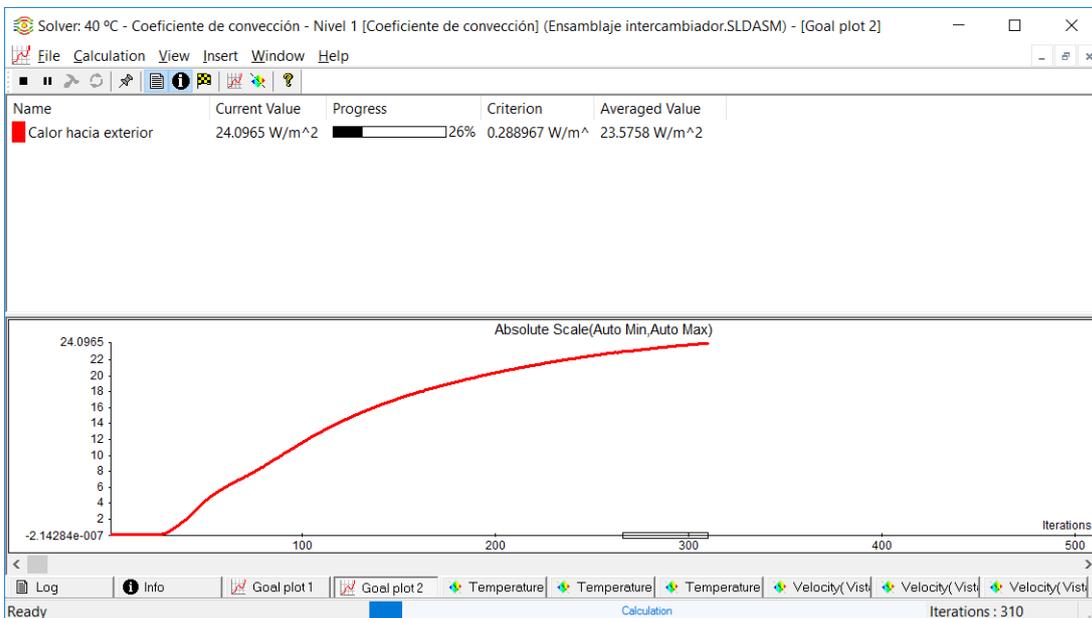
Figura B.60: Insert Preview.

Mediante las **Goals Plot** (figura B.59) se puede ver cómo van evolucionando los valores de los objetivos que se definieron en el apartado B.2.7.

En las figuras B.61a y B.61b se pueden ver las temperaturas de los sensores y el calor cedido al exterior, respectivamente.



(a) Temperaturas en los sensores.

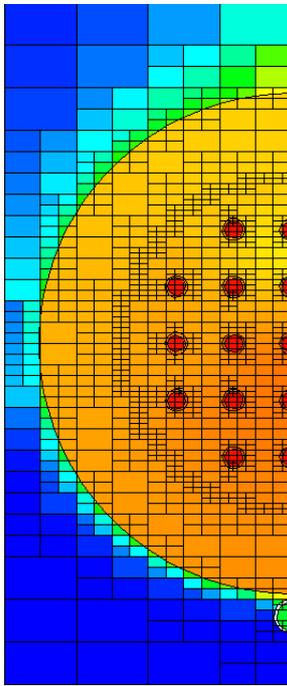


(b) Calor cedido al exterior.

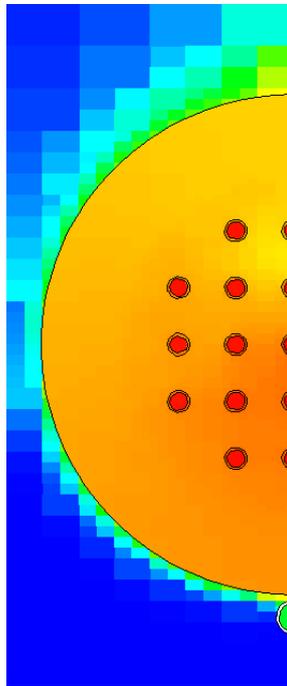
Figura B.61: Ejemplos de Preview.

Por otro lado, gracias a las **Preview** (figura B.60) se puede ir obteniendo, de manera gráfica, el valor de algunas variables según van siendo calculadas. Esta opción de visualización permite superponer en la misma imagen los elementos y los resultados del cálculo e interpolar los resultados entre un elemento y otro, entre varias opciones.

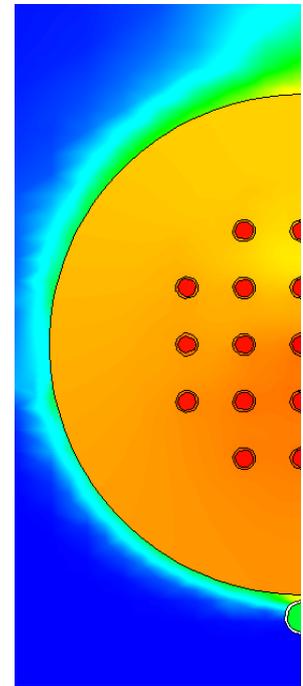
Unos ejemplos de Previews se pueden ver en las figuras B.62a, B.62b y B.62c.



(a) Distribución de temperatura visualizando los elementos.



(b) Distribución de temperatura sin visualizar los elementos.



(c) Interpolación de la distribución de temperatura sin visualizar los elementos.

Figura B.62: Ejemplos de Preview.

B.2.11. Extraer resultados

Una vez finalizada la simulación, el siguiente paso consiste en obtener el valor del coeficiente de convección calculado. Para ello hacer clic con el botón derecho sobre **Surface Parameters**, dentro del desplegable de **Results**, y seleccionar **Insert...** (figura B.63).

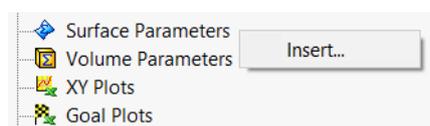


Figura B.63: Insertar *Surface Parameters*.

En el recuadro de **Selection**, seleccionar las mismas caras exteriores del intercambiador que en la figura B.45. En el recuadro de **Parameters** seleccionar la casilla de **Heat Transfer Coefficient**.

Para poder ver el resultado, hacer clic en **Show** y se abrirá una sección en la parte inferior de la pantalla. El valor que se ha considerado en este trabajo es el **valor medio**, que se

corresponde con la columna de *Average*. (figura B.64).

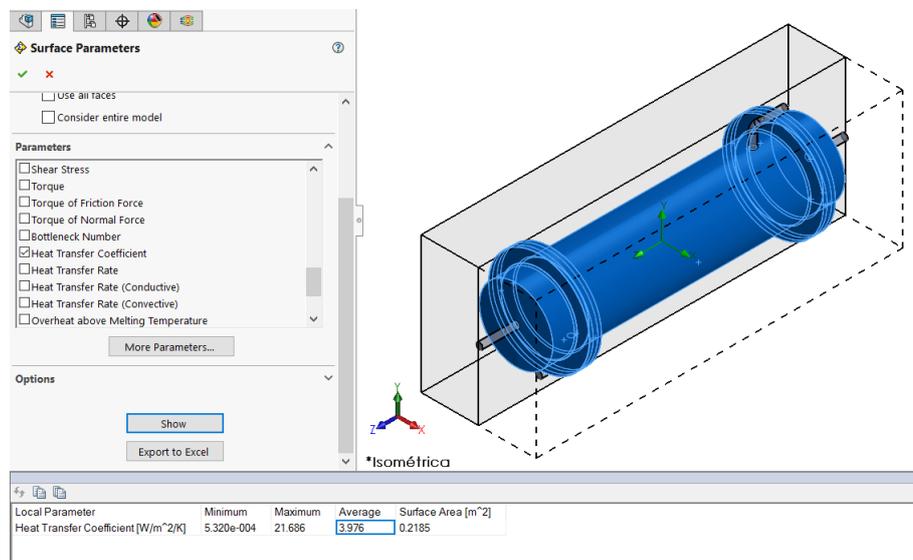


Figura B.64: Mostrar valor del coeficiente de convección.

B.3. Simulaciones internas para la convergencia de malla

B.3.1. Proyecto de Flow Simulation

Para realizar estas simulaciones se podría crear un proyecto nuevo de manera similar a la expuesta en el apartado B.2 con la diferencia de que en la ventana de selección del **Tipo de Análisis** (ver figura B.11) habría que seleccionar en **Analysis type** el tipo **Internal**.

La condición de convección con el exterior se podría definir en un nuevo desplegable que aparecerá disponible en la ventana de **Condiciones de pared**: el desplegable de **Default outer wall thermal condition**. Seleccionar del mismo la opción de **Heat transfer coefficient**. Dentro de la casilla de **Heat transfer coefficient**, introducir el coeficiente de convección exterior de la tabla 4.4 que se corresponda con el caso a simular. En el recuadro de **Temperature of external fluid**, introducir **24 °C** (figura B.65).

La definición del resto de elementos (subdominios, materiales, condiciones de contorno, objetivos, etc.), a excepción del dominio computacional¹⁶, se realiza de igual manera que en el apartado B.2.

La segunda opción consiste en duplicar uno de los proyectos ya definidos al realizar el estudio del coeficiente de convección exterior y modificar una serie de parámetros para adaptarlo a las nuevas simulaciones. Para ello hacer clic con el botón derecho sobre uno de los

¹⁶Al tratarse de una simulación interna, se puede dejar el dominio computacional generado por defecto.

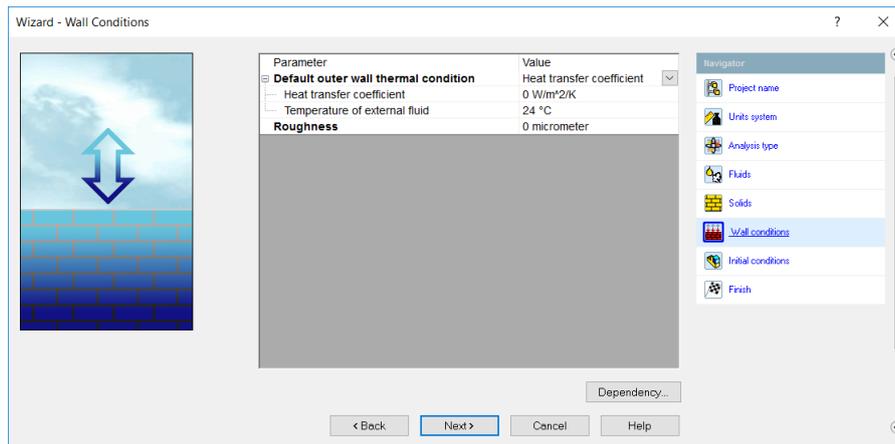


Figura B.65: Nuevo desplegable en la ventana de condiciones de pared.

proyectos definidos en la configuración de *Coefficiente de convección* y seleccionar **Clone...** (figura B.66).

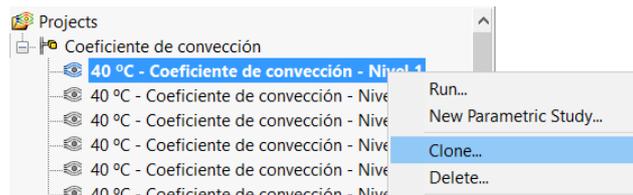


Figura B.66: Duplicar proyecto.

Se activará una pestaña para duplicar el proyecto. En el primer recuadro, escribir el nombre del nuevo proyecto. Dentro del desplegable de **Configuration**, seleccionar la configuración en la que se definirá el proyecto. Como primero se va a llevar a cabo el estudio de convergencia, seleccionar **Select** y activar la casilla de la configuración **Convergencia de malla** (ver figura B.67).

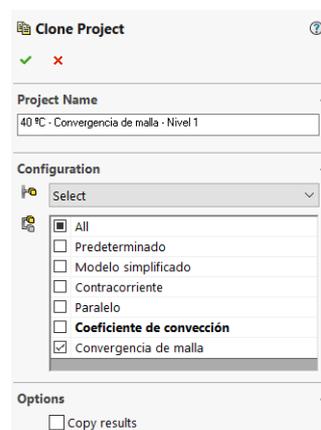


Figura B.67: Pestaña de duplicado de proyecto.

Una vez duplicado el proyecto, hace falta configurarlo de manera que se adapte a las nuevas simulaciones. Hacer clic con el botón derecho sobre **Input Data** y seleccionar la opción de **General Settings...** (figura B.68).

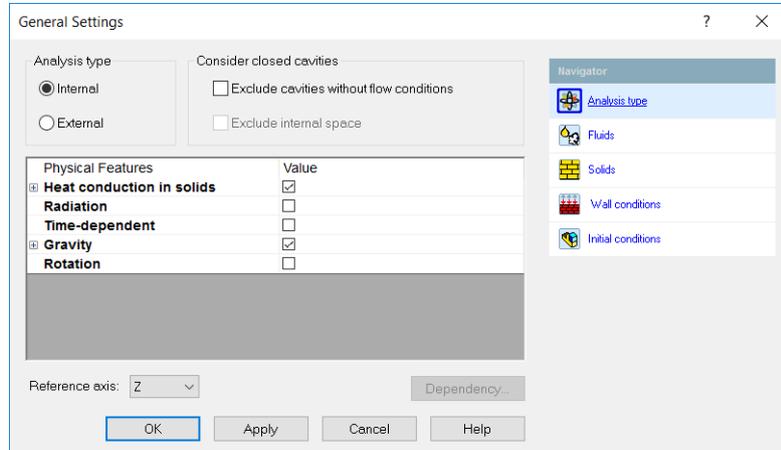


Figura B.68: Estudio interno.

En la ventana que se abrirá, seleccionar en el apartado de **Analysis type** el tipo **Internal**. De esta manera se modifica el tipo de estudio que se va a realizar (ver figura B.69).

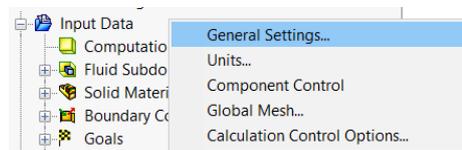


Figura B.69: Modificar el tipo de estudio.

En la ventana de **Condiciones de pared** proceder de igual manera que la planteada anteriormente en este apartado (ver figura B.65). Al aceptar los cambios aparecerá un mensaje de aviso sobre el dominio computacional. Pulsar sobre **Sí** para que se reinicie el dominio computacional y se establezca el mismo que se generó por defecto¹⁷ (figura B.70).

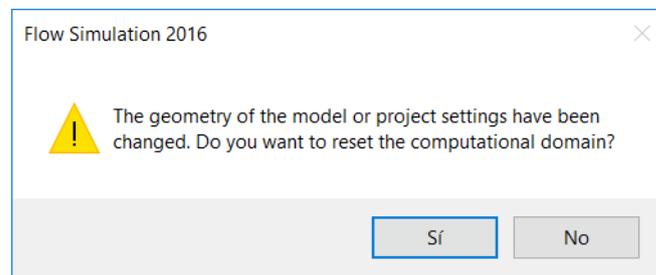


Figura B.70: Mensaje de aviso sobre el dominio computacional.

¹⁷Sin eliminar la simetría que se definió en el apartado B.2.2.

Anexo C

Datos y resultados

C.1. Datos de los ensayos realizados en laboratorio

En la figura C.1 se puede ver la posición y el nombre de los sensores dispuestos en el intercambiador y en la tabla C.1, la correspondencia entre las variables estudiadas y los sensores de la maqueta que proporcionan sus medidas en los ensayos experimentales.

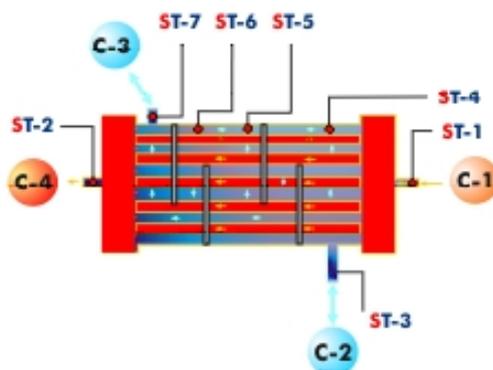


Figura C.1: Posición y nombre de los sensores en el intercambiador.

A continuación, se muestran unas gráficas representando los datos medidos en los ensayos del laboratorio. En el apartado C.1.2 se facilitan los datos en forma de tablas.

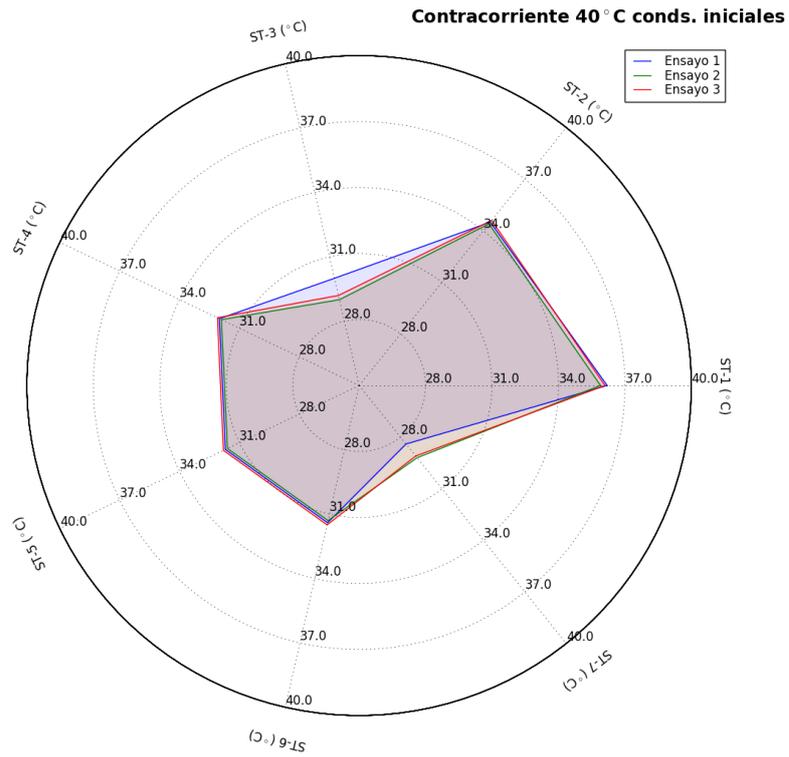
Las gráficas mostradas en las figuras C.2 a la C.7 representan de forma conjunta los datos de las condiciones iniciales y finales de los tres ensayos realizados en cada caso. Cuanto más parecidas sean las áreas delimitadas por los datos, mejor será la calidad de los ensayos. De las figuras C.8 a la C.13 se muestran las medias de los tres ensayos.

Tabla C.1: Correspondencia entre variables y los sensores de la maqueta del intercambiador.

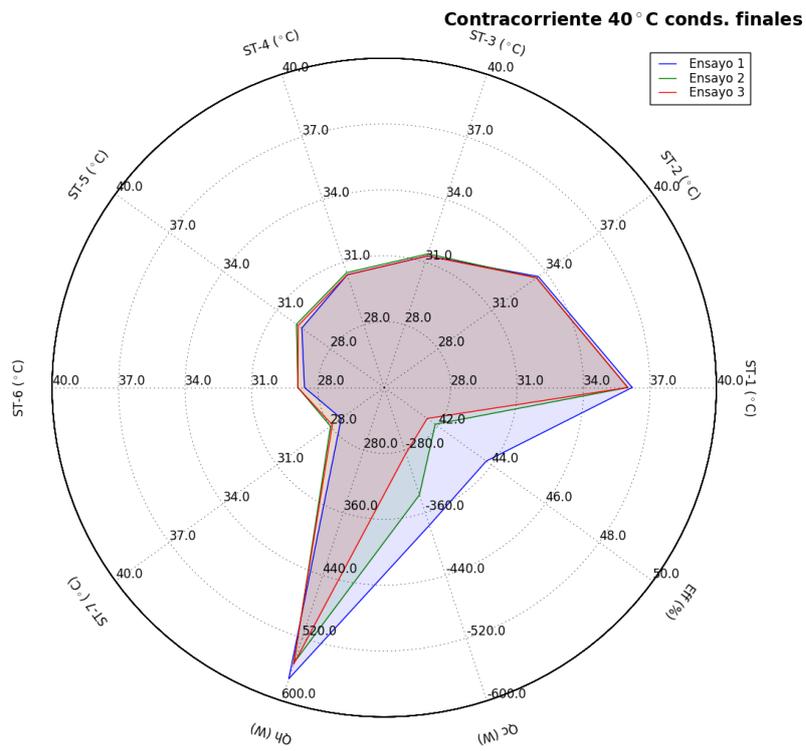
<i>Variable</i>	<i>Contrac.</i>	<i>Paralelo</i>
$T_{h,i}$	ST-1	ST-1
$T_{c,i}$	ST-7	ST-3
$T_{h,o}$	ST-2	ST-2
$T_{c,o}$	ST-3	ST-7
T_1	ST-4	ST-4
T_2	ST-5	ST-5
T_3	ST-6	ST-6

C.1.1. Gráficas

C.1.1.1. Ensayos con flujo en contracorriente

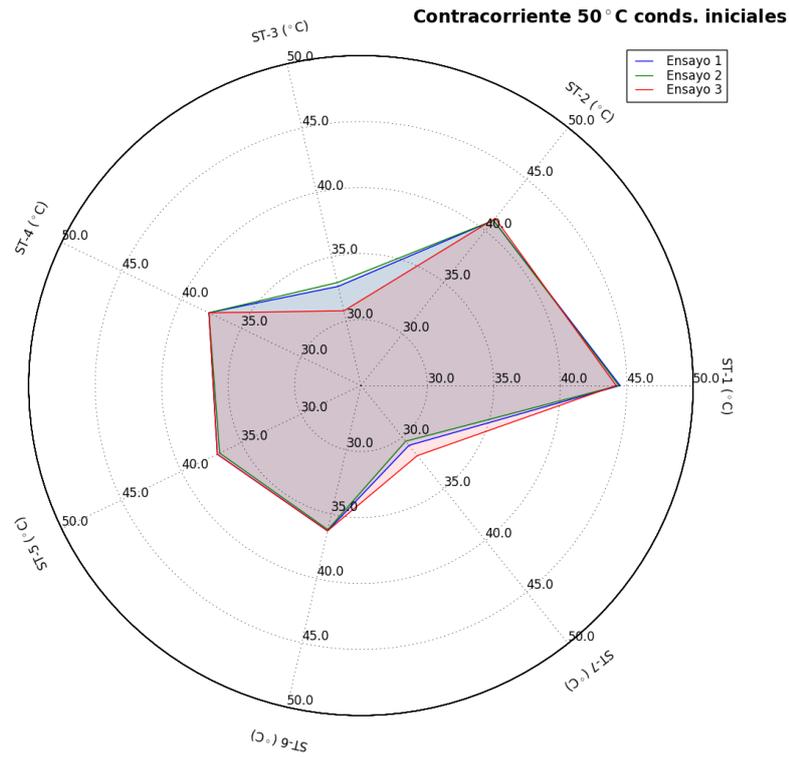


(a) Condiciones iniciales.

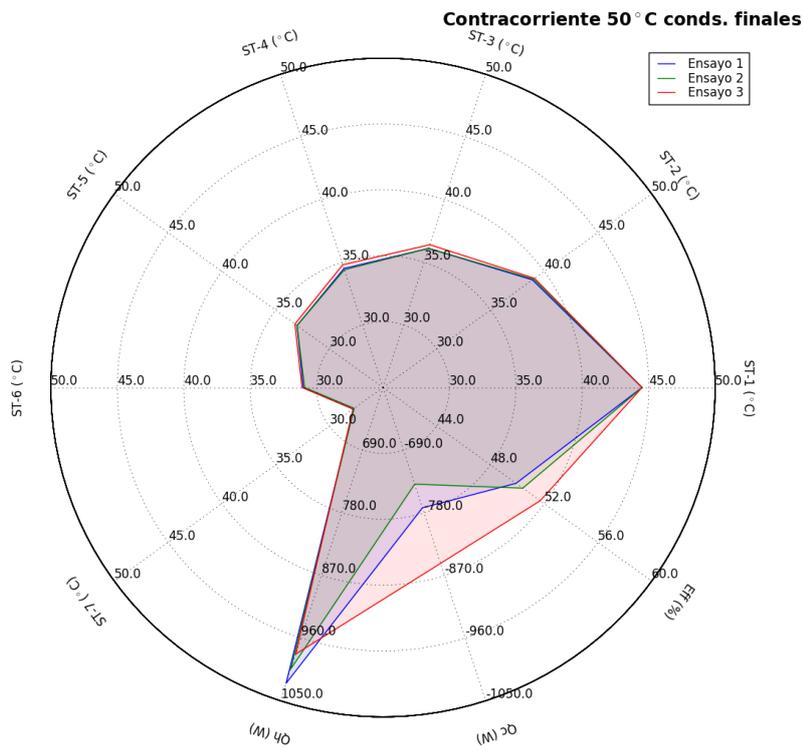


(b) Condiciones finales.

Figura C.2: Datos superpuestos de los ensayos a 40 °C en contracorriente.

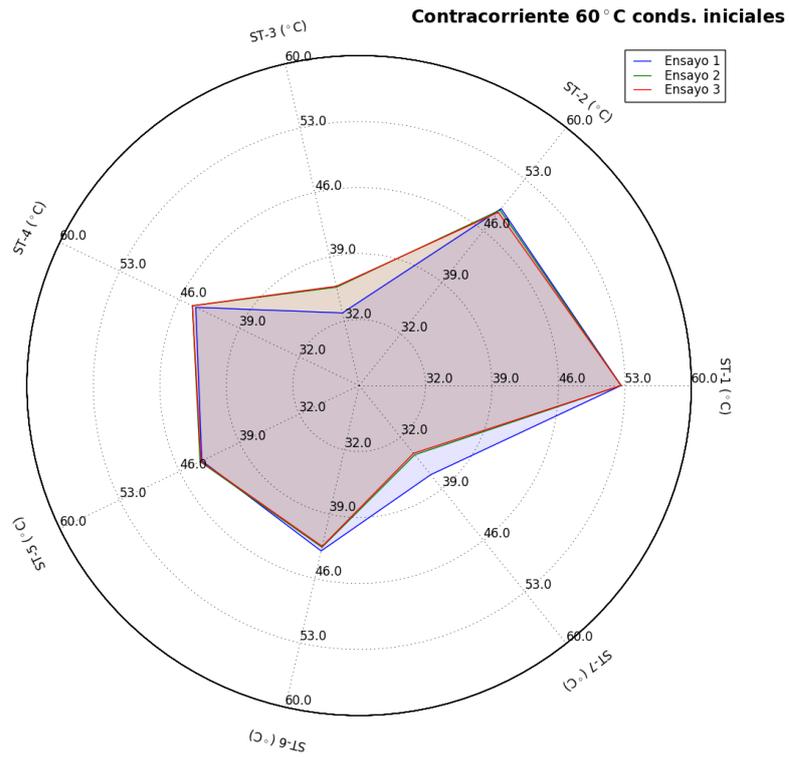


(a) Condiciones iniciales.

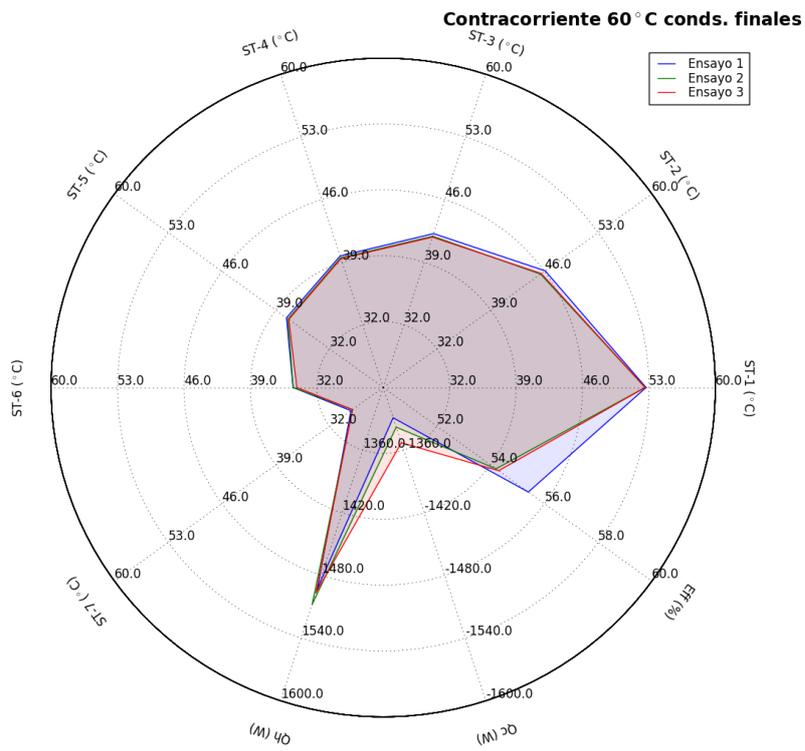


(b) Condiciones finales.

Figura C.3: Datos superpuestos de los ensayos a 50 °C en contracorriente.



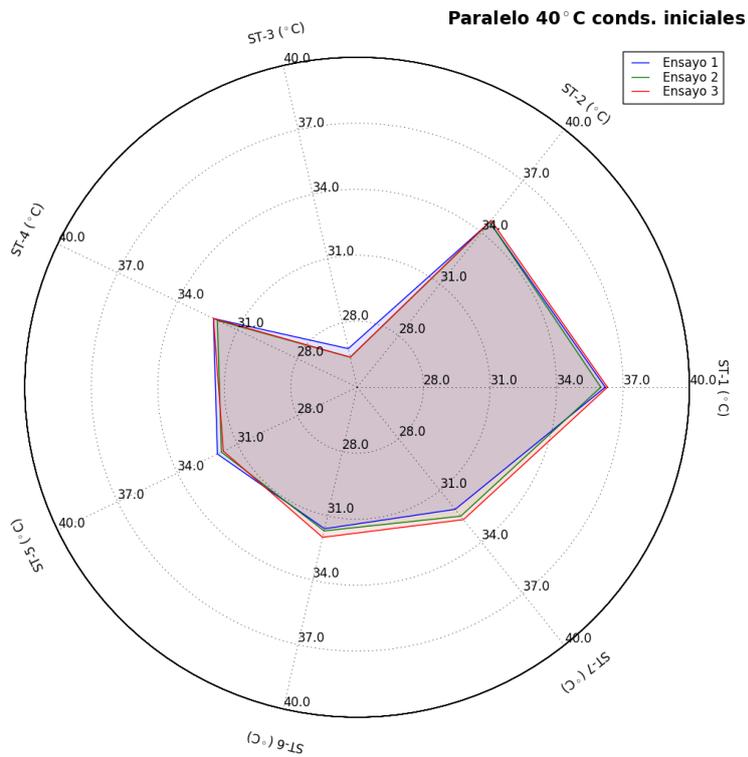
(a) Condiciones iniciales.



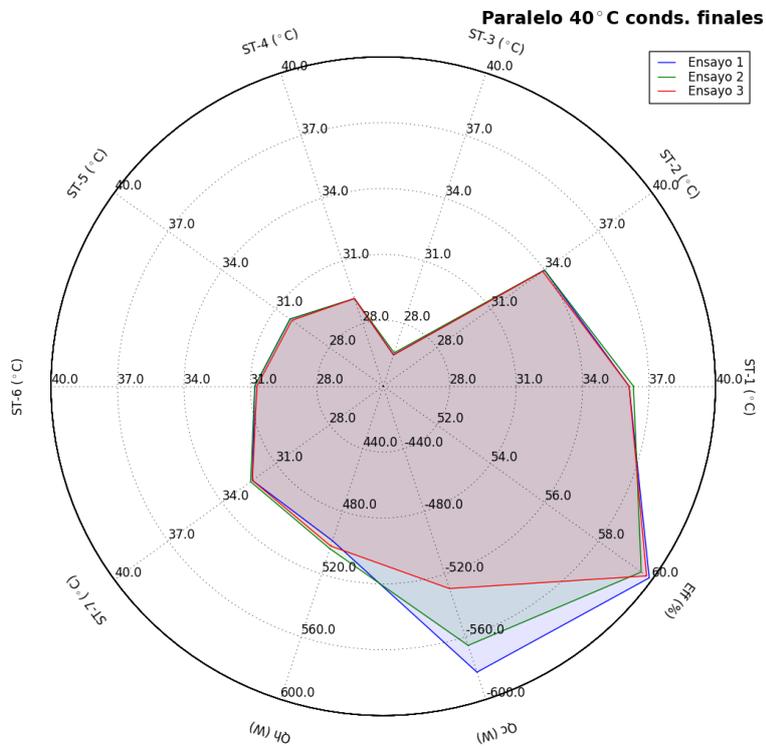
(b) Condiciones finales.

Figura C.4: Datos superpuestos de los ensayos a 60 °C en contracorriente.

C.1.1.2. Ensayos con flujo en paralelo

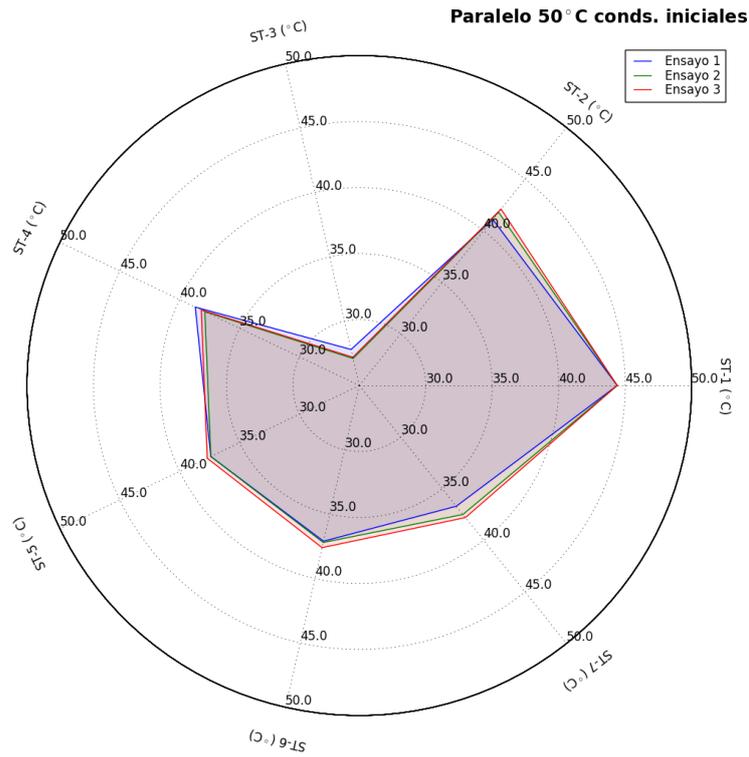


(a) Condiciones iniciales.

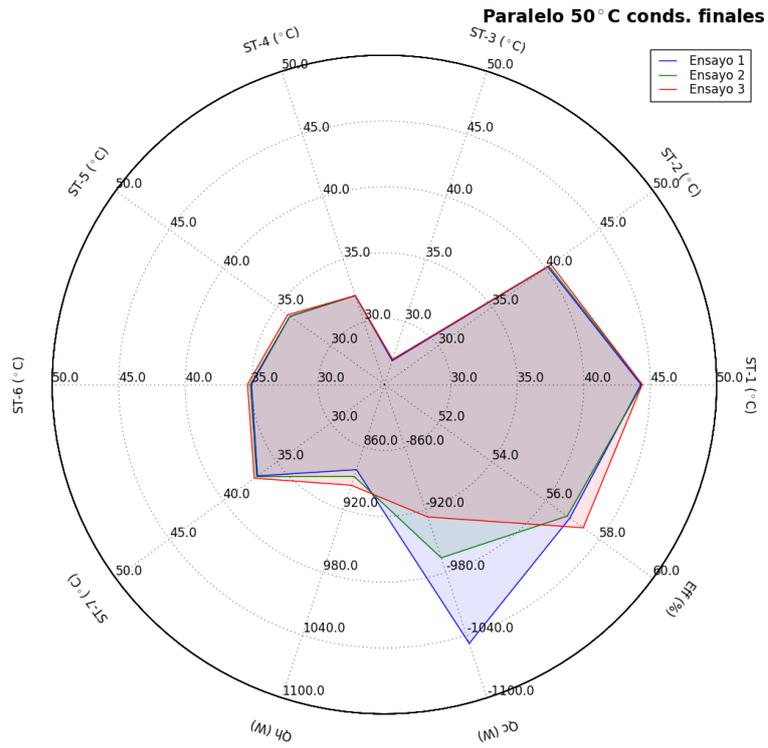


(b) Condiciones finales.

Figura C.5: Datos superpuestos de los ensayos a 40 °C en paralelo.

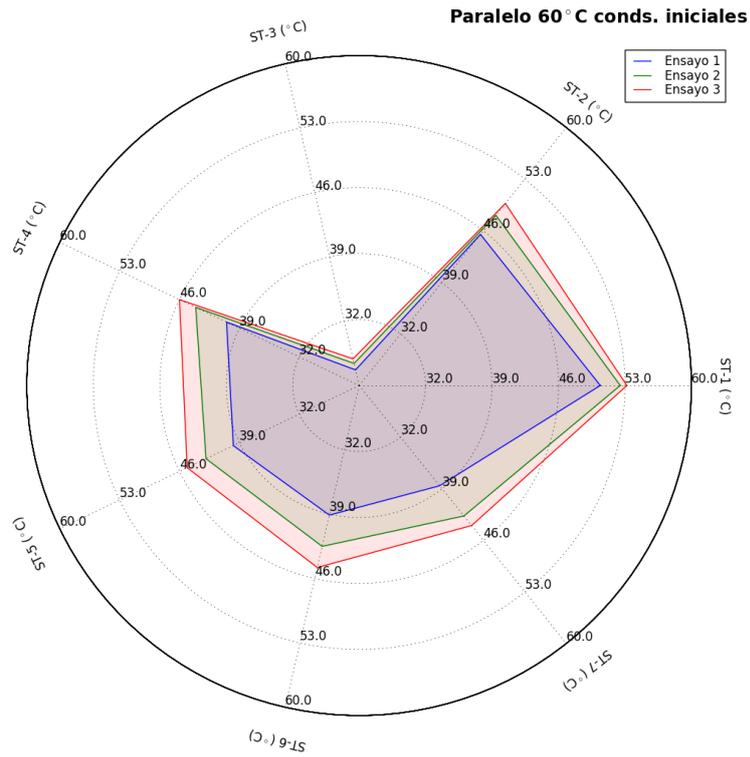


(a) Condiciones iniciales.

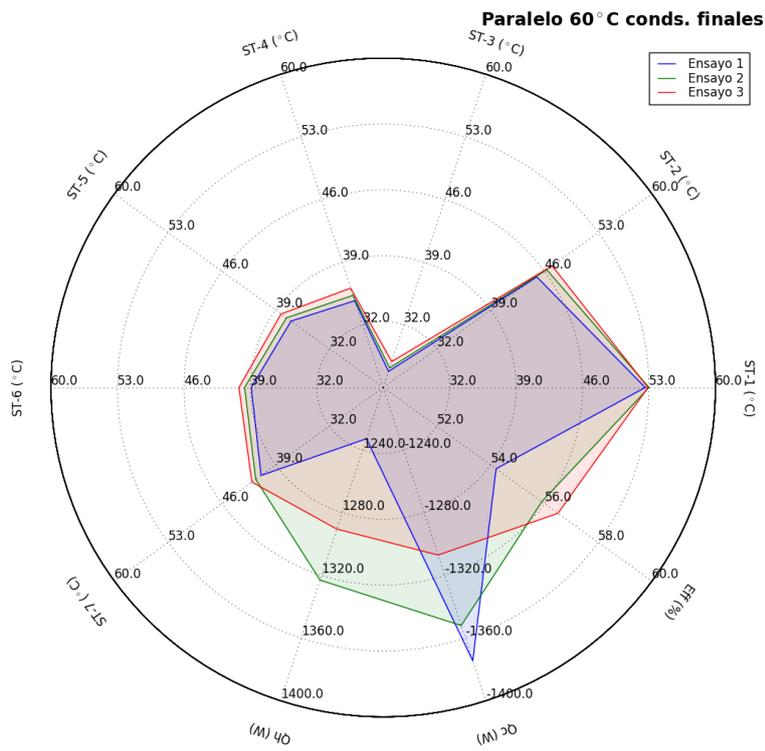


(b) Condiciones finales.

Figura C.6: Datos superpuestos de los ensayos a 50 °C en paralelo.



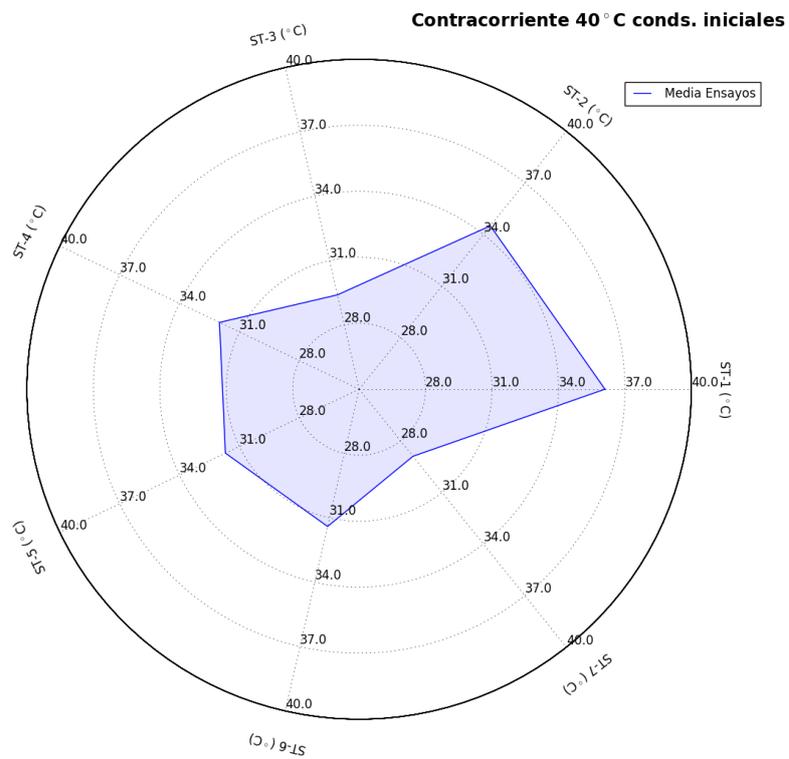
(a) Condiciones iniciales.



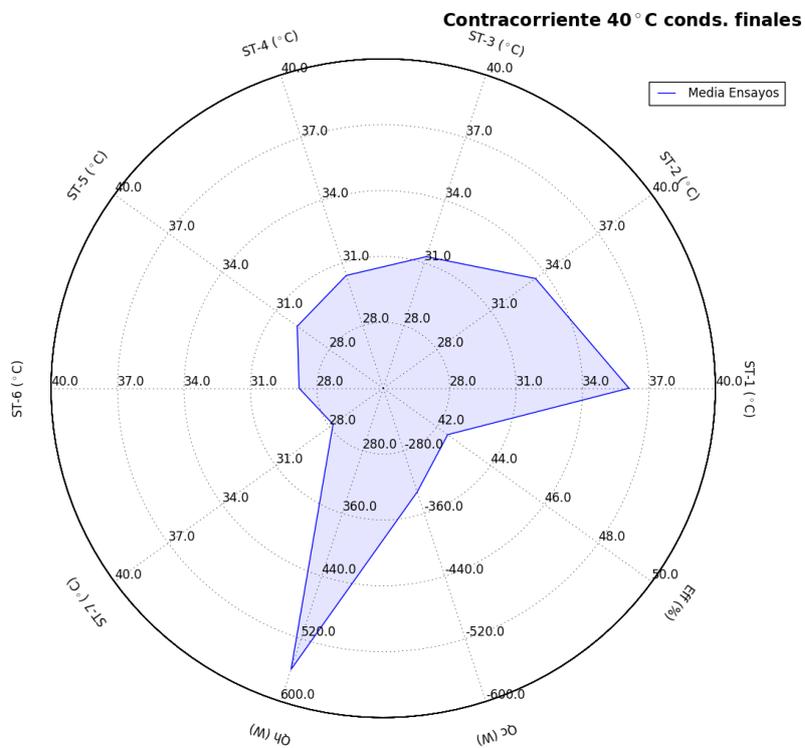
(b) Condiciones finales.

Figura C.7: Datos superpuestos de los ensayos a 60 °C en paralelo.

C.1.1.3. Media ensayos con flujo en contracorriente

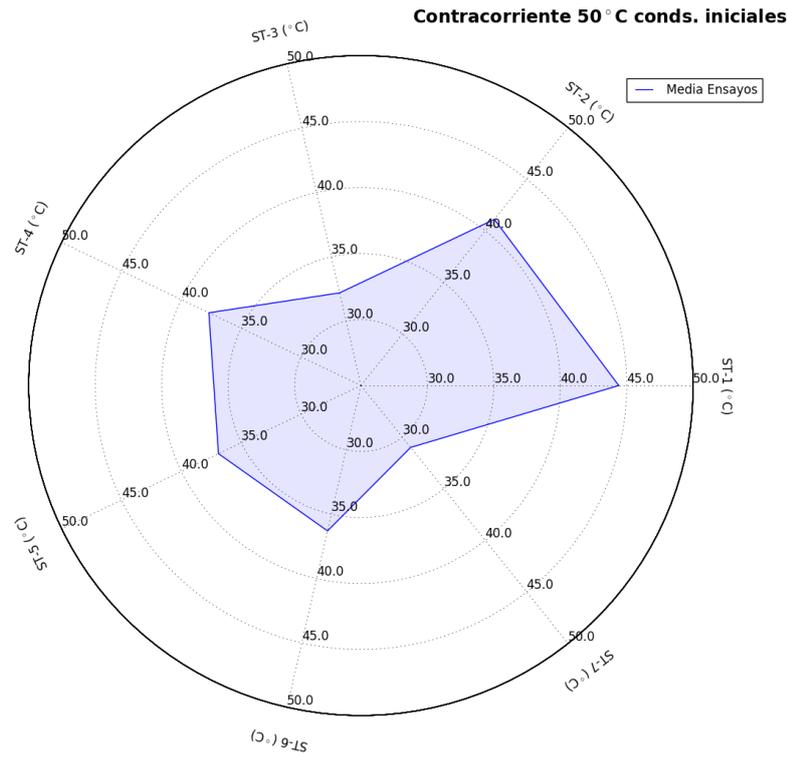


(a) Condiciones iniciales.

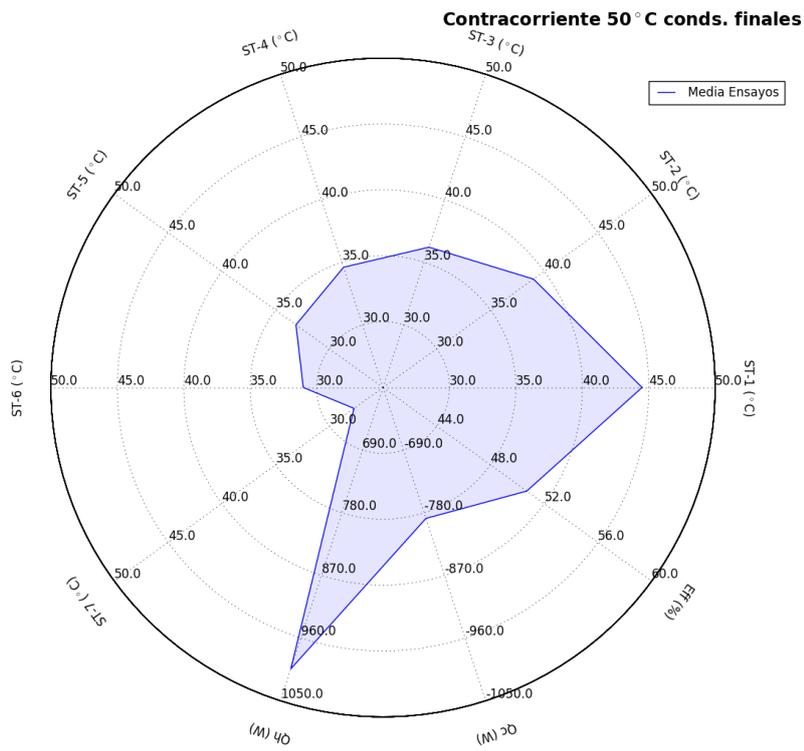


(b) Condiciones finales.

Figura C.8: Media de los ensayos a 40 °C en contracorriente.

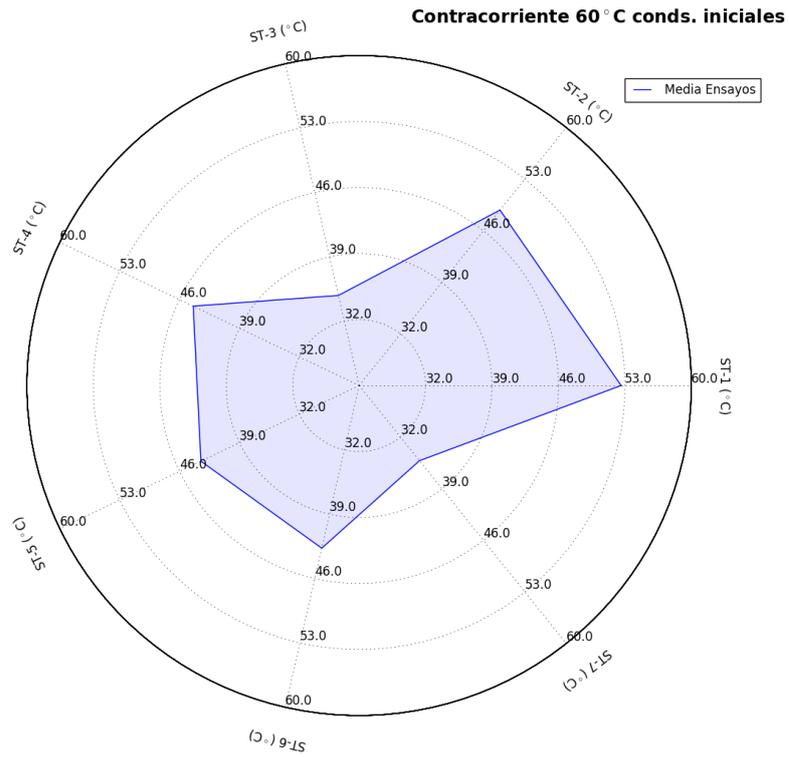


(a) Condiciones iniciales.

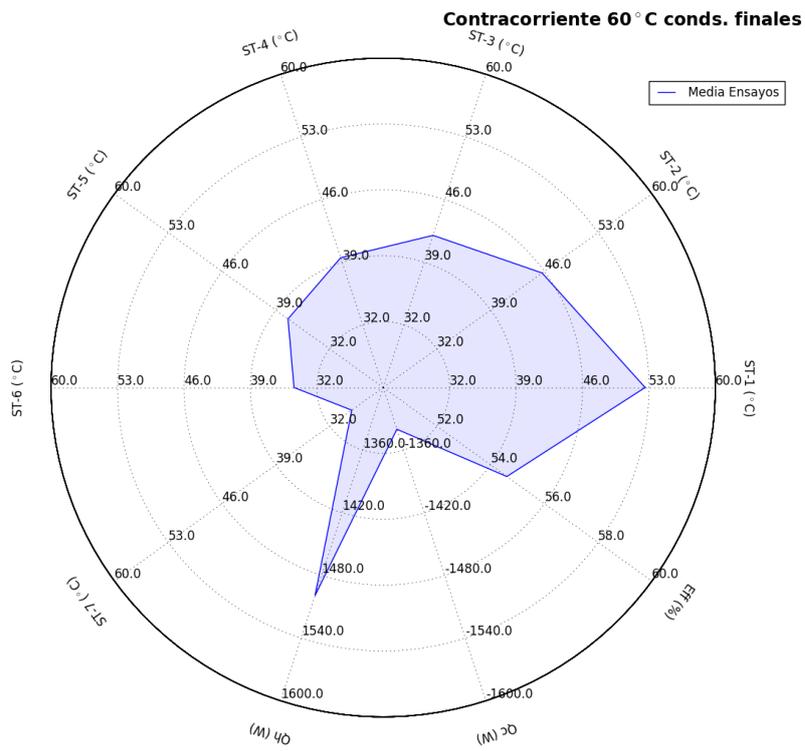


(b) Condiciones finales.

Figura C.9: Media de los ensayos a 50 °C en contracorriente.



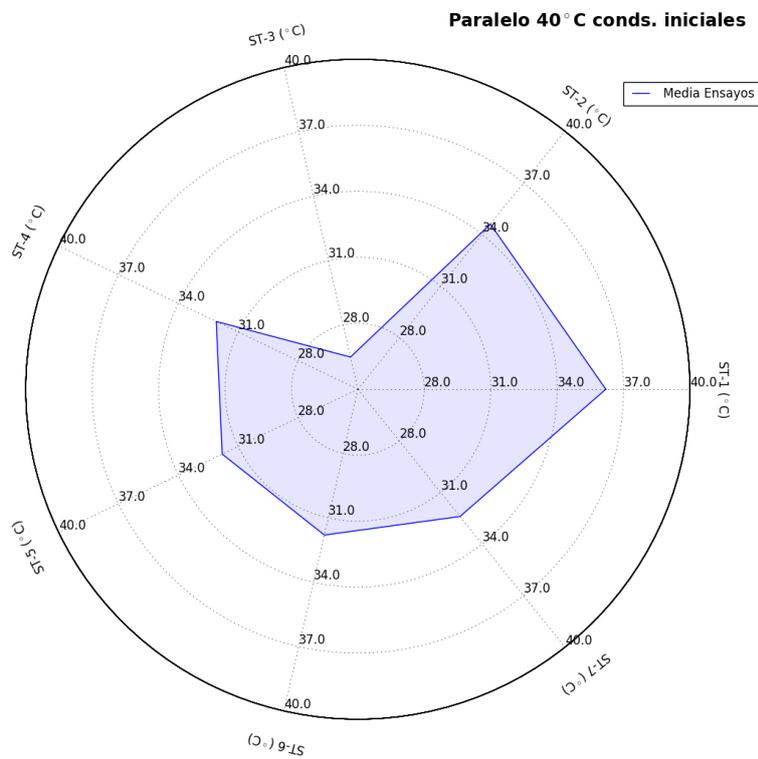
(a) Condiciones iniciales.



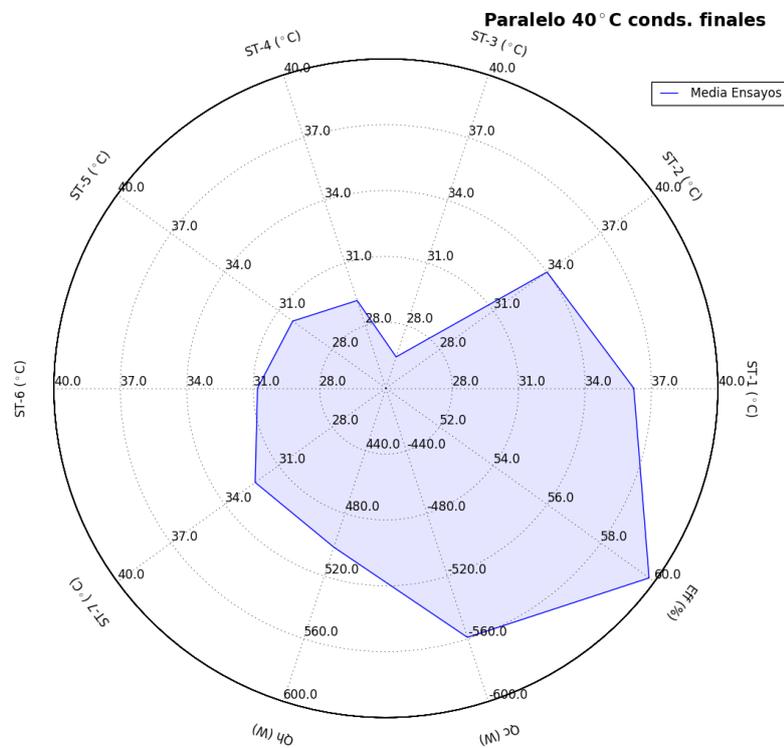
(b) Condiciones finales.

Figura C.10: Media de los ensayos a 60 °C en contracorriente.

C.1.1.4. Media ensayos con flujo en paralelo

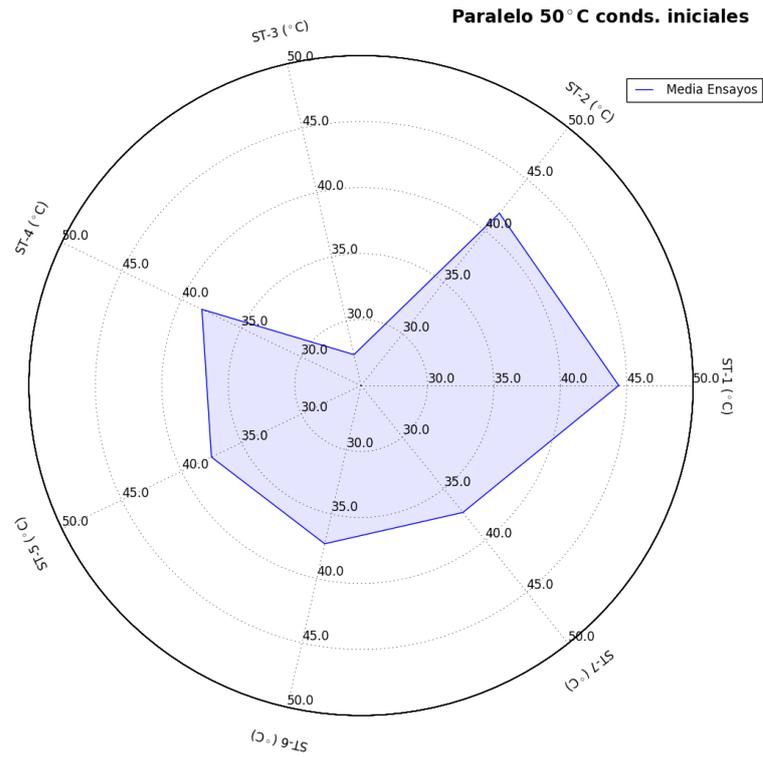


(a) Condiciones iniciales.

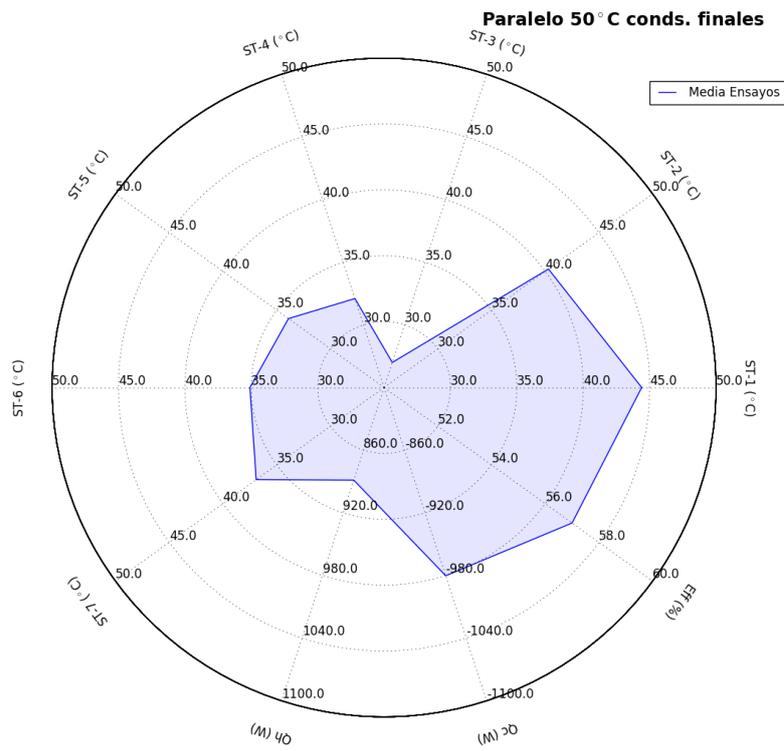


(b) Condiciones finales.

Figura C.11: Media de los ensayos a 40 °C en paralelo.

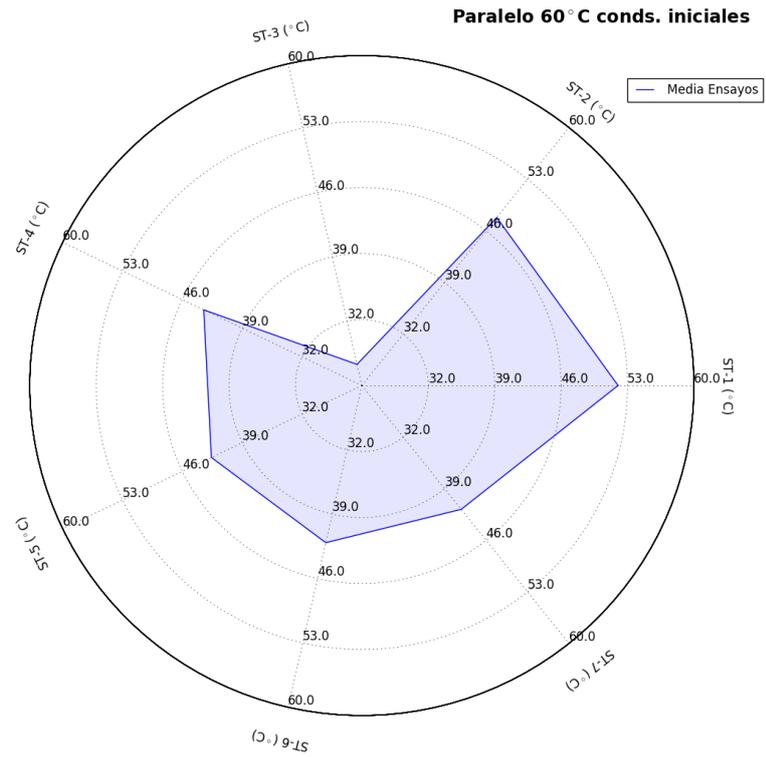


(a) Condiciones iniciales.

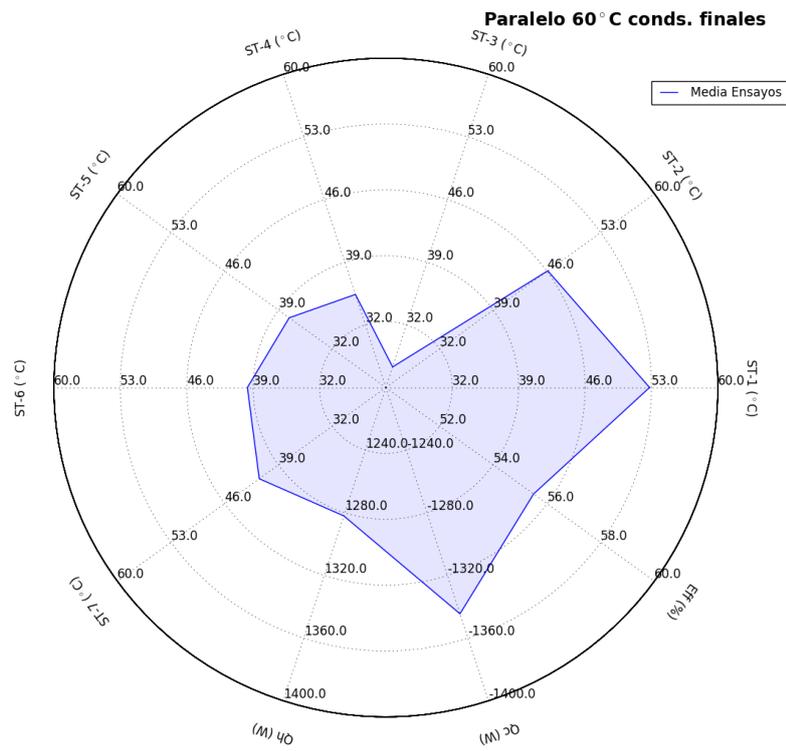


(b) Condiciones finales.

Figura C.12: Media de los ensayos a 50 °C en paralelo.



(a) Condiciones iniciales.



(b) Condiciones finales.

Figura C.13: Media de los ensayos a 60 °C en paralelo.

C.1.2. Tablas

Tabla C.2: Datos y media de los ensayos a 40 °C. Condiciones iniciales.

<i>CONDICIONES</i>	40 °C			
<i>INICIALES</i>	<i>Ensayo 1</i>	<i>Ensayo 2</i>	<i>Ensayo 3</i>	<i>Media</i>
<i>Contracorriente</i>				
<i>ST – 1</i>	36,2	35,9	36,1	36,1
<i>ST – 2</i>	34,5	34,4	34,6	34,5
<i>ST – 3</i>	30,0	29,0	29,2	29,4
<i>ST – 4</i>	32,0	31,9	32,1	32,0
<i>ST – 5</i>	31,7	31,6	31,8	31,7
<i>ST – 6</i>	31,4	31,3	31,5	31,4
<i>ST – 7</i>	28,4	29,2	29,1	28,9
<i>Paralelo</i>				
<i>ST – 1</i>	36,2	36,0	36,3	36,2
<i>ST – 2</i>	34,6	34,6	34,7	34,6
<i>ST – 3</i>	26,8	26,4	26,4	26,5
<i>ST – 4</i>	32,2	32,0	32,2	32,1
<i>ST – 5</i>	32,0	31,8	31,7	31,8
<i>ST – 6</i>	31,6	31,7	32,0	31,8
<i>ST – 7</i>	32,1	32,5	32,7	32,4

ST-X: Sensor de temperatura número X (°C)

Tabla C.3: Datos y media de los ensayos a 40 °C. Condiciones finales.

CONDICIONES FINALES	40 °C			
	<i>Ensayo 1</i>	<i>Ensayo 2</i>	<i>Ensayo 3</i>	<i>Media</i>
<i>Contracorriente</i>				
<i>ST - 1</i>	36,2	36,0	36,0	36,1
<i>ST - 2</i>	33,6	33,5	33,5	33,5
<i>ST - 3</i>	31,3	31,4	31,3	31,3
<i>ST - 4</i>	30,4	30,5	30,4	30,4
<i>ST - 5</i>	29,6	29,9	29,8	29,8
<i>ST - 6</i>	28,6	28,9	28,9	28,8
<i>ST - 7</i>	27,4	28,0	27,9	27,8
<i>Q_h</i>	572,0	551,3	553,8	559,0
<i>Q_c</i>	-375,95	-337,2	-284,4	-332,5
<i>Eff</i>	43,8	41,9	41,6	42,4
<i>Eff_{NTU}</i>	59,0	59,7	66,0	61,6
<i>Paralelo</i>				
<i>ST - 1</i>	36,1	36,3	36,1	36,2
<i>ST - 2</i>	34,0	34,0	33,9	34,0
<i>ST - 3</i>	26,5	26,6	26,5	26,5
<i>ST - 4</i>	29,2	29,2	29,2	29,2
<i>ST - 5</i>	30,2	30,2	30,1	30,2
<i>ST - 6</i>	30,8	30,8	30,7	30,8
<i>ST - 7</i>	32,3	32,4	32,3	32,3
<i>Q_h</i>	498,7	503,8	502,1	501,5
<i>Q_c</i>	-582,6	-565,5	-529,2	-559,1
<i>Eff</i>	59,9	59,6	59,8	59,8
<i>Eff_{NTU}</i>	50,4	51,5	53,8	51,9

ST-X: Sensor de temperatura número X (°C)

Q_h: Calor cedido por el agua caliente (W)

Q_c: Calor absorbido por el agua fría (W)

Eff: Eficiencia (%)

Tabla C.4: Datos y media de los ensayos a 50 °C. Condiciones iniciales.

CONDICIONES	50 °C			
INICIALES	<i>Ensayo 1</i>	<i>Ensayo 2</i>	<i>Ensayo 3</i>	Media
<i>Contracorriente</i>				
<i>ST</i> – 1	44,5	44,4	44,2	44,4
<i>ST</i> – 2	41,0	41,0	41,2	41,1
<i>ST</i> – 3	32,7	33,0	30,8	32,2
<i>ST</i> – 4	37,7	37,7	37,7	37,7
<i>ST</i> – 5	37,0	36,8	37,0	36,9
<i>ST</i> – 6	36,3	36,2	36,3	36,3
<i>ST</i> – 7	30,8	30,4	31,8	31,0
<i>Paralelo</i>				
<i>ST</i> – 1	44,4	44,4	44,4	44,4
<i>ST</i> – 2	41,1	41,8	42,1	41,7
<i>ST</i> – 3	27,8	27,1	27,2	27,4
<i>ST</i> – 4	38,7	37,9	38,2	38,3
<i>ST</i> – 5	37,4	37,4	37,7	37,5
<i>ST</i> – 6	37,1	37,2	37,6	37,3
<i>ST</i> – 7	36,7	37,5	37,8	37,3

ST-X: Sensor de temperatura número X (°C)

Tabla C.5: Datos y media de los ensayos a 50 °C. Condiciones finales.

CONDICIONES FINALES	50 °C			
	<i>Ensayo 1</i>	<i>Ensayo 2</i>	<i>Ensayo 3</i>	<i>Media</i>
<i>Contracorriente</i>				
<i>ST - 1</i>	44,5	44,5	44,5	44,5
<i>ST - 2</i>	38,9	39,0	39,1	39,0
<i>ST - 3</i>	36,1	36,1	36,4	36,2
<i>ST - 4</i>	34,5	34,4	34,8	34,6
<i>ST - 5</i>	33,0	33,0	33,2	33,1
<i>ST - 6</i>	31,0	30,9	31,1	31,0
<i>ST - 7</i>	27,7	27,7	27,8	27,7
<i>Q_h</i>	1025,0	1004,5	983,1	1004,2
<i>Q_c</i>	-772,9	-738,9	-852,6	-788,1
<i>Eff</i>	49,9	50,4	51,7	50,7
<i>Eff_{NTU}</i>	60,7	62,1	57,1	60,0
<i>Paralelo</i>				
<i>ST - 1</i>	44,3	44,4	44,4	44,4
<i>ST - 2</i>	40,2	40,3	40,5	40,3
<i>ST - 3</i>	26,9	27,0	27,0	27,0
<i>ST - 4</i>	32,1	32,1	32,1	32,1
<i>ST - 5</i>	33,8	33,8	34,0	33,9
<i>ST - 6</i>	35,0	35,1	35,3	35,1
<i>ST - 7</i>	36,8	36,9	37,1	36,9
<i>Q_h</i>	881,6	888,14	896,5	888,7
<i>Q_c</i>	-1048,0	-966,0	-926,9	-980,3
<i>Eff</i>	56,9	56,8	57,4	57,0
<i>Eff_{NTU}</i>	47,4	50,2	52,5	50,0

ST-X: Sensor de temperatura número X (°C)

Q_h: Calor cedido por el agua caliente (W)

Q_c: Calor absorbido por el agua fría (W)

Eff: Eficiencia (%)

Tabla C.6: Datos y media de los ensayos a 60 °C. Condiciones iniciales.

CONDICIONES	60 °C			
INICIALES	<i>Ensayo 1</i>	<i>Ensayo 2</i>	<i>Ensayo 3</i>	Media
<i>Contracorriente</i>				
<i>ST – 1</i>	52,6	52,6	52,6	52,6
<i>ST – 2</i>	49,0	48,8	48,5	48,8
<i>ST – 3</i>	32,9	35,7	35,8	34,8
<i>ST – 4</i>	44,1	44,5	44,5	44,4
<i>ST – 5</i>	43,4	43,6	43,5	43,5
<i>ST – 6</i>	43,0	42,6	42,5	42,7
<i>ST – 7</i>	37,1	34,4	34,2	35,2
<i>Paralelo</i>				
<i>ST – 1</i>	50,4	52,5	53,2	52,0
<i>ST – 2</i>	45,5	48,1	49,7	47,8
<i>ST – 3</i>	26,7	27,4	27,9	27,3
<i>ST – 4</i>	40,5	44,1	46,0	43,5
<i>ST – 5</i>	39,7	42,9	45,1	42,6
<i>ST – 6</i>	39,1	42,5	44,8	42,1
<i>ST – 7</i>	38,6	42,7	44,0	41,8

ST-X: Sensor de temperatura número X (°C)

Tabla C.7: Datos y media de los ensayos a 60 °C. Condiciones finales.

CONDICIONES	60 °C			
	<i>Ensayo 1</i>	<i>Ensayo 2</i>	<i>Ensayo 3</i>	<i>Media</i>
FINALES				
Contracorriente				
<i>ST - 1</i>	52,7	52,6	52,6	52,6
<i>ST - 2</i>	46,1	45,5	45,6	45,7
<i>ST - 3</i>	42,2	41,9	41,8	42,0
<i>ST - 4</i>	39,7	39,5	39,4	39,5
<i>ST - 5</i>	37,6	37,4	37,3	37,4
<i>ST - 6</i>	34,5	34,5	34,1	34,4
<i>ST - 7</i>	29,2	29,0	29,0	29,1
<i>Q_h</i>	1493,2	1507,8	1496,7	1499,2
<i>Q_c</i>	-1329,0	-1338,0	-1353,0	-1340,0
<i>Eff</i>	55,4	54,2	54,3	54,6
<i>Eff_{NTU}</i>	59,8	59,0	58,1	59,0
Paralelo				
<i>ST - 1</i>	52,6	53,0	52,9	52,8
<i>ST - 2</i>	45,0	46,3	47,0	46,1
<i>ST - 3</i>	26,8	27,2	27,9	27,3
<i>ST - 4</i>	34,7	35,3	36,1	35,4
<i>ST - 5</i>	37,0	37,6	38,3	37,6
<i>ST - 6</i>	38,9	39,6	40,2	39,6
<i>ST - 7</i>	40,9	41,6	42,1	41,5
<i>Q_h</i>	1232,7	1323,0	1290,4	1282,0
<i>Q_c</i>	-1374,5	-1352,0	-1307,0	-1344,5
<i>Eff</i>	54,2	55,9	56,5	55,5
<i>Eff_{NTU}</i>	46,2	51,0	52,1	49,8

ST-X: Sensor de temperatura número X (°C)

Q_h: Calor cedido por el agua caliente (W)

Q_c: Calor absorbido por el agua fría (W)

Eff: Eficiencia (%)

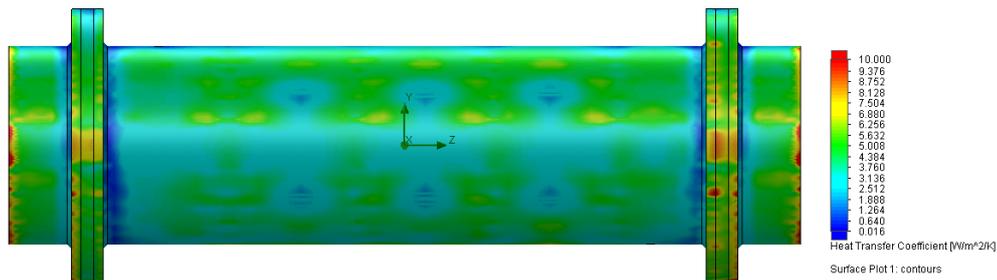
C.2. Resultados de las simulaciones con Flow Simulation

A continuación, se facilitan los resultados obtenidos en las simulaciones para distintos tamaños de malla básica. En el apartado C.2.1 se muestra la distribución del coeficiente de convección exterior en función del nivel de malla básica, para la simulación de 40 °C en contracorriente.

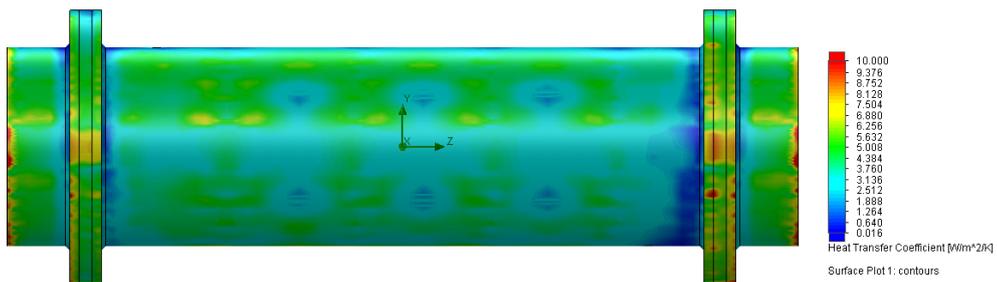
En el apartado C.2.2 se puede ver la distribución de temperaturas en el interior del intercambiador. Esta distribución se muestra en función del nivel de malla básica para una temperatura de entrada de 40 °C y flujo en contracorriente.

Por último, en el apartado C.2.3 se muestra la distribución de temperaturas y velocidades, así como la trayectoria del agua en el interior del intercambiador, obtenidas en las simulaciones con el nivel de malla básica elegida. Los resultados se dan en función de la temperatura de entrada de agua caliente y el tipo de flujo en el intercambiador.

C.2.1. Coeficiente de convección exterior

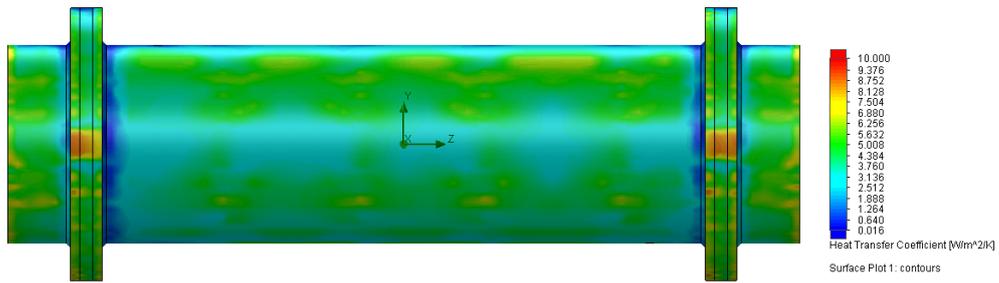


(a) Malla nivel 1. Contracorriente.

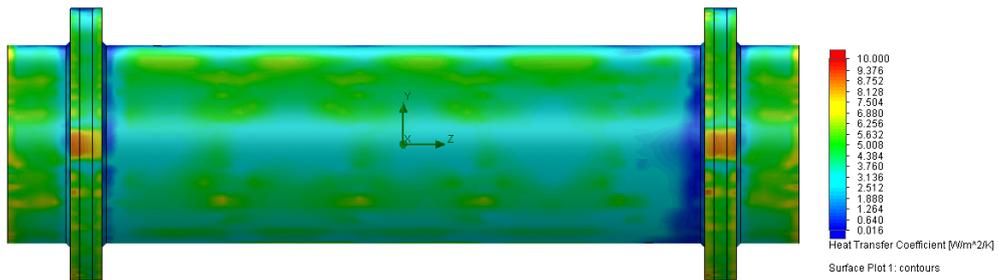


(b) Malla nivel 1. Paralelo.

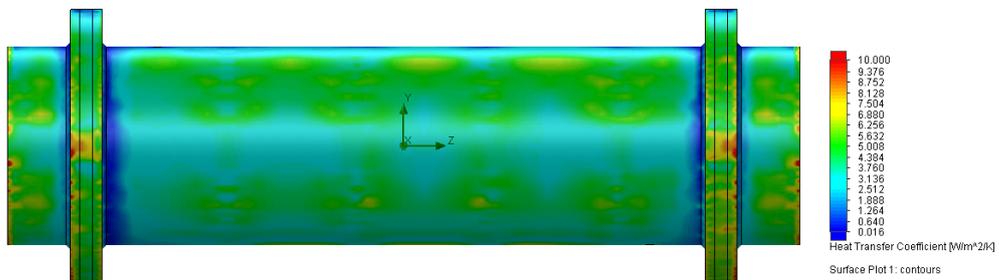
Figura C.14: Distribución de \bar{h}_{ext} . Malla básica nivel 1.



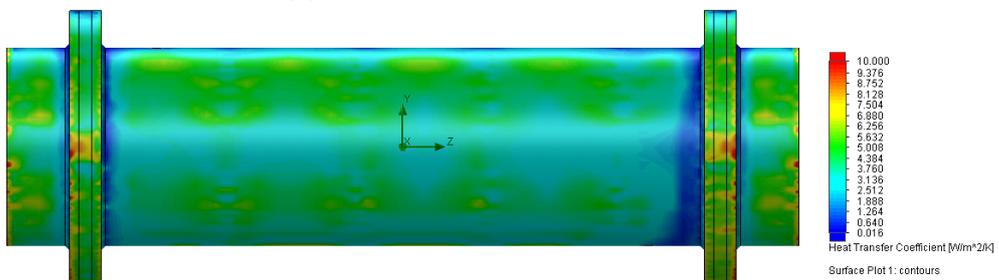
(a) Malla nivel 2. Contracorriente.



(b) Malla nivel 2. Paralelo.

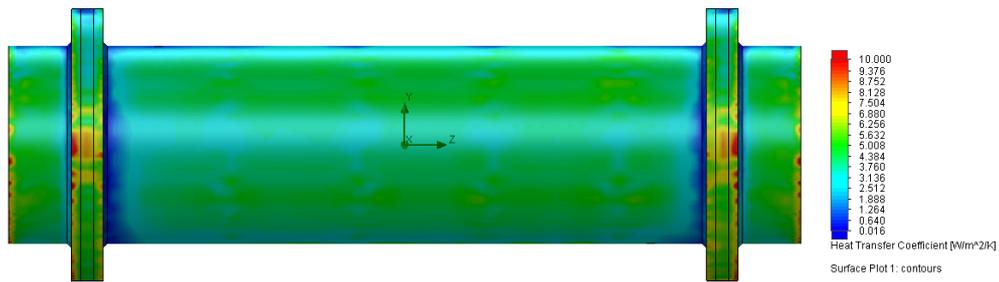
Figura C.15: Distribución de \bar{h}_{ext} . Malla básica nivel 2.

(a) Malla nivel 3. Contracorriente.

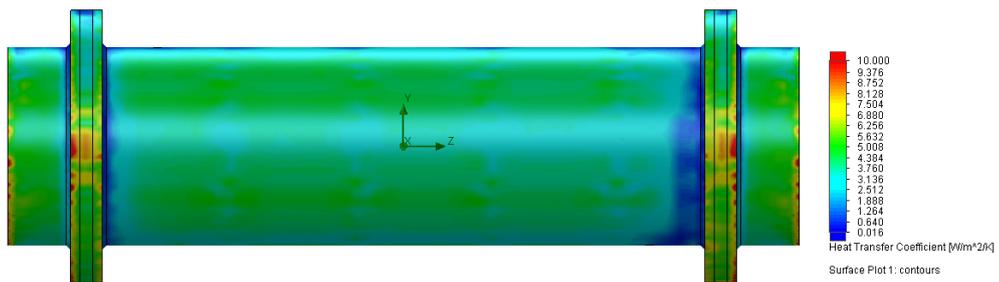


(b) Malla nivel 3. Paralelo.

Figura C.16: Distribución de \bar{h}_{ext} . Malla básica nivel 3.

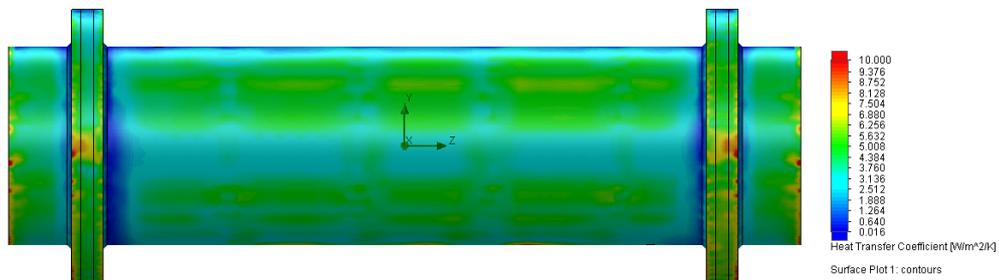


(a) Malla nivel 4. Contracorriente.

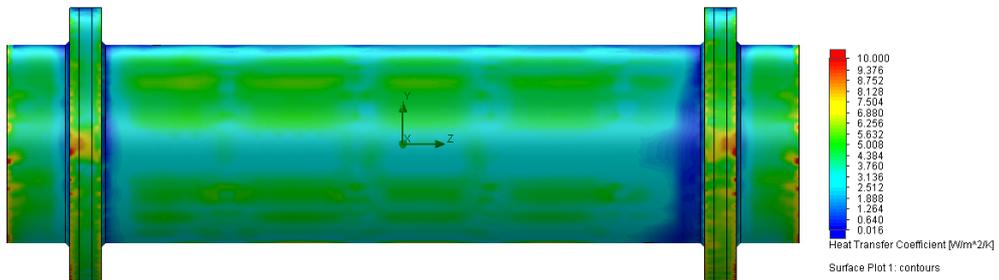


(b) Malla nivel 4. Paralelo.

Figura C.17: Distribución de \bar{h}_{ext} . Malla básica nivel 4.

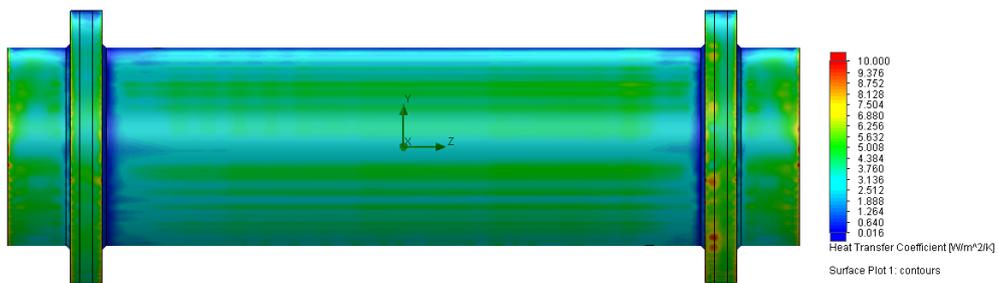


(a) Malla nivel 5. Contracorriente.



(b) Malla nivel 5. Paralelo.

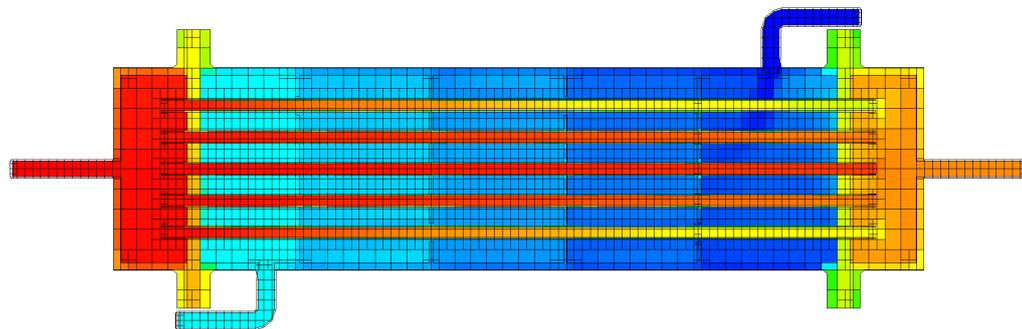
Figura C.18: Distribución de \bar{h}_{ext} . Malla básica nivel 5.



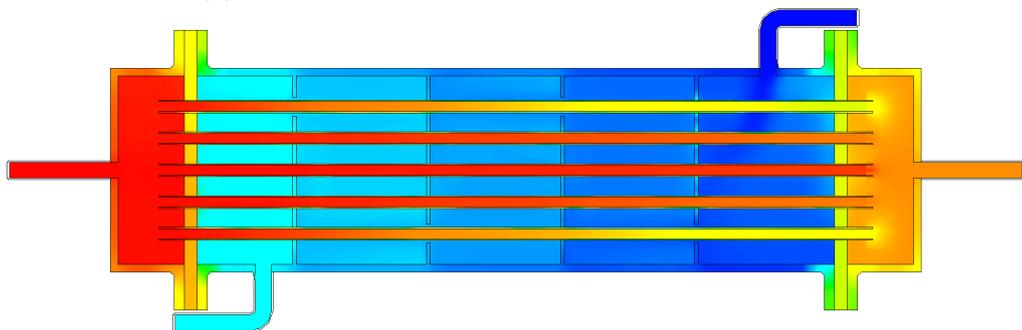
(a) Malla nivel 6. Contracorriente.

Figura C.19: Distribución de \bar{h}_{ext} . Malla básica nivel 6.

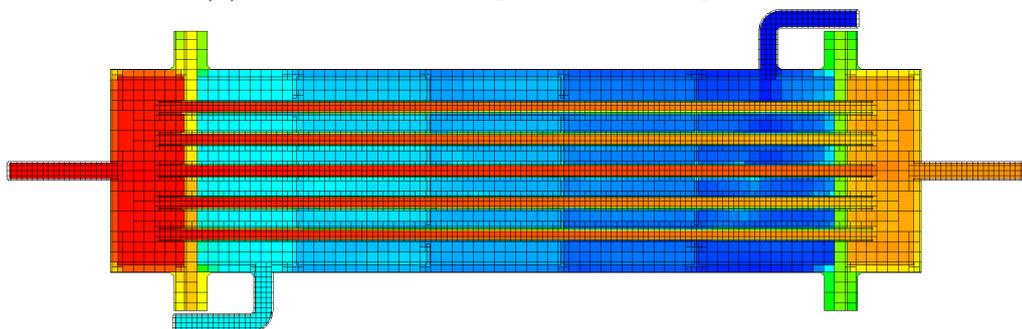
C.2.2. Convergencia de malla. Distribución de temperaturas



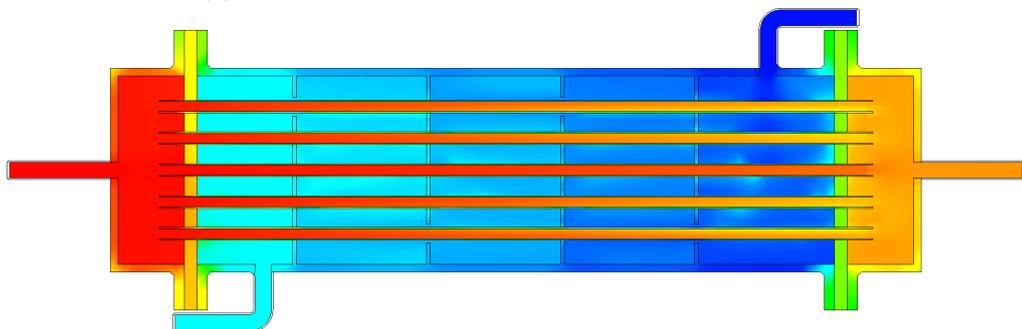
(a) Malla nivel 1. Temperaturas en los elementos.



(b) Malla nivel 1. Interpolación de temperaturas.

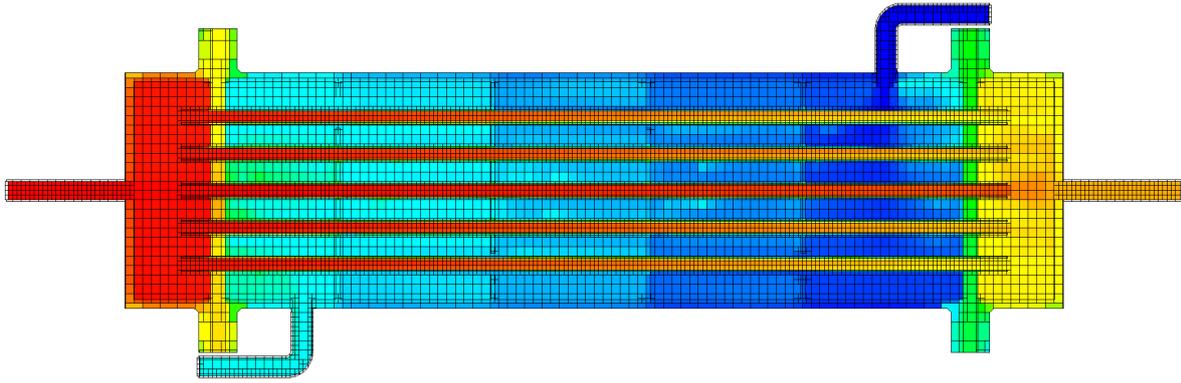


(c) Malla nivel 2. Temperaturas en los elementos.

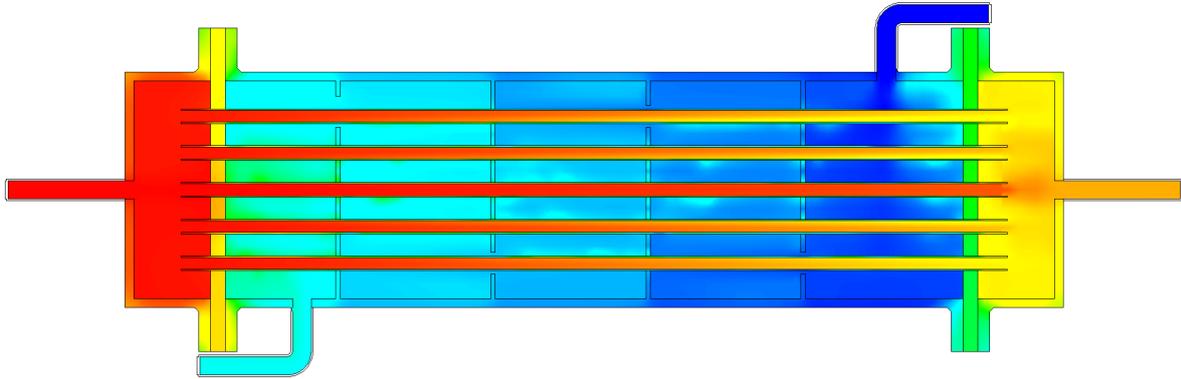


(d) Malla nivel 2. Interpolación de temperaturas.

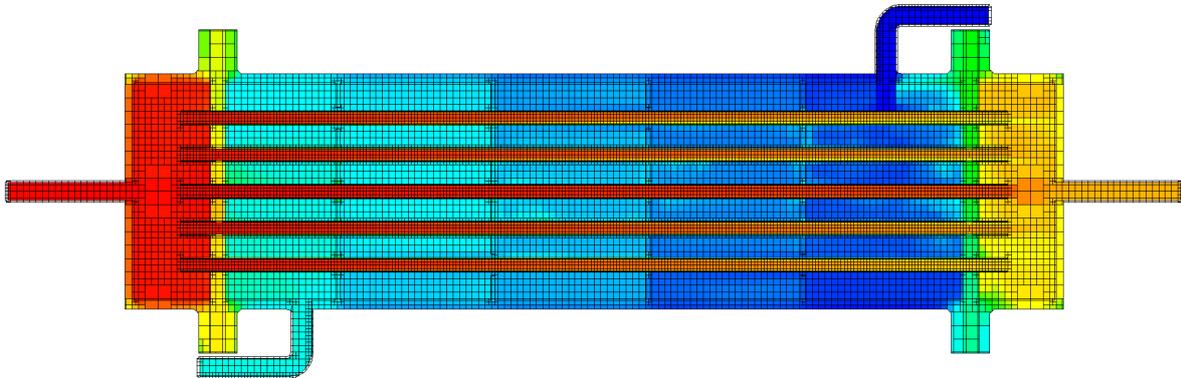
Figura C.20: Distribución de temperaturas en el intercambiador. Niveles 1 y 2 de malla básica. Contracorriente con $T_{h,i} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$.



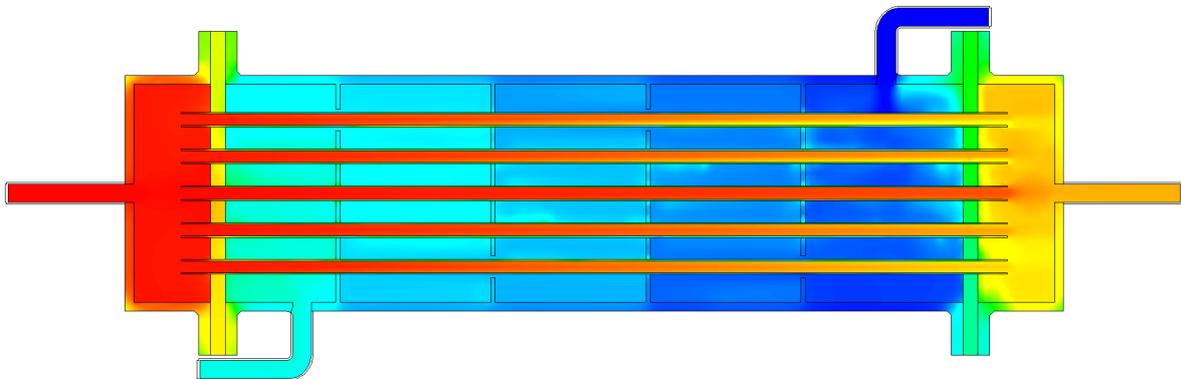
(a) Malla nivel 3. Temperaturas en los elementos.



(b) Malla nivel 3. Interpolación de temperaturas.

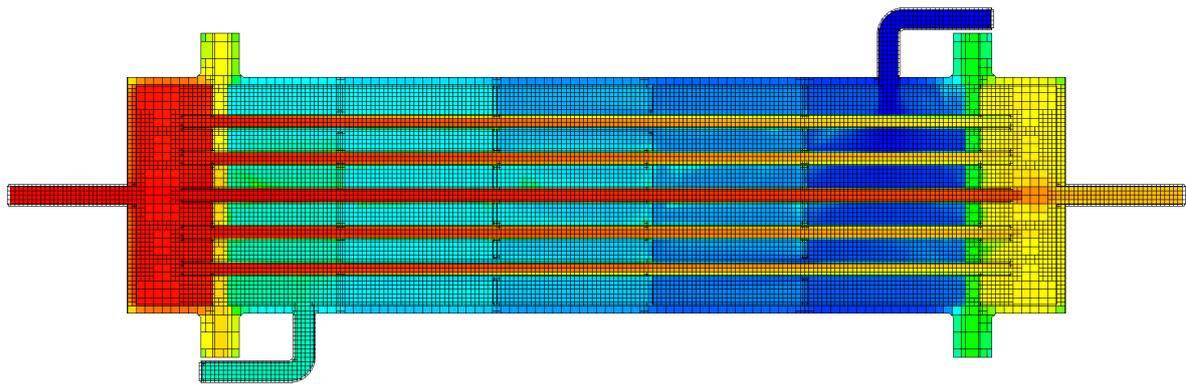


(c) Malla nivel 4. Temperaturas en los elementos.

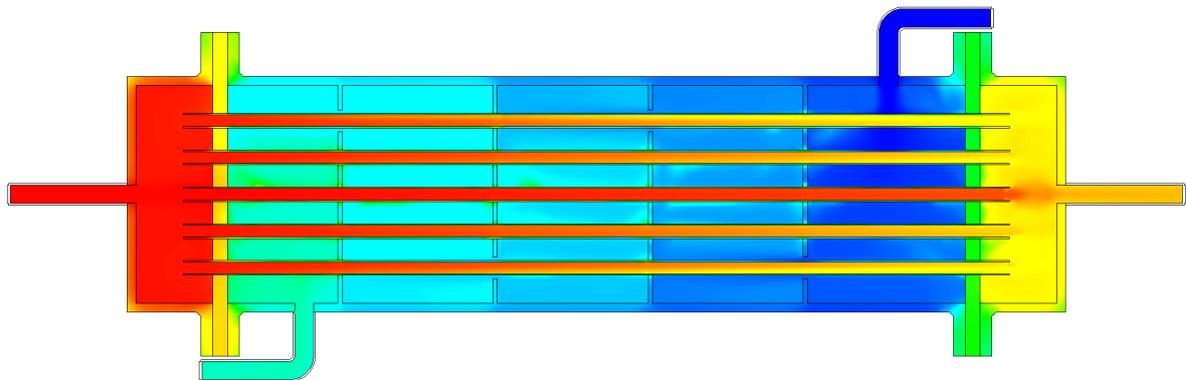


(d) Malla nivel 4. Interpolación de temperaturas.

Figura C.21: Distribución de temperaturas en el intercambiador. Niveles 3 y 4 de malla básica. Contracorriente con $T_{h,i} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$.



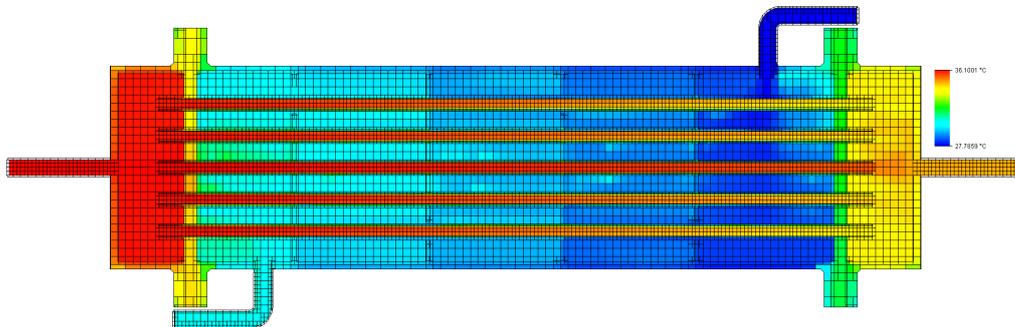
(a) Malla nivel 5. Temperaturas en los elementos.



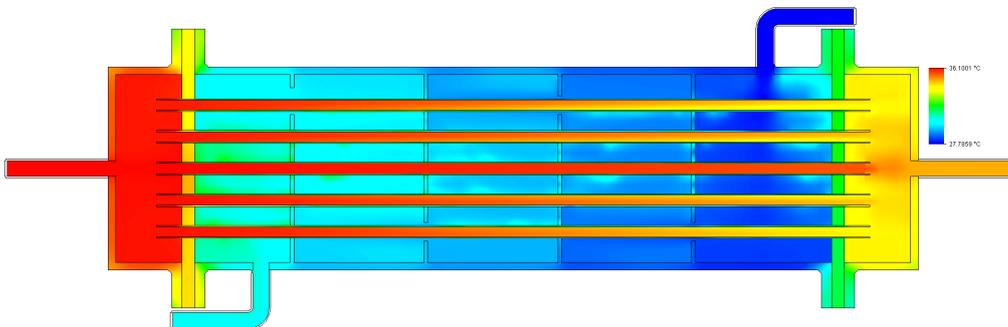
(b) Malla nivel 5. Interpolación de temperaturas.

Figura C.22: Distribución de temperaturas en el intercambiador. Nivel 5 de malla básica. Contracorriente con $T_{h,i} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

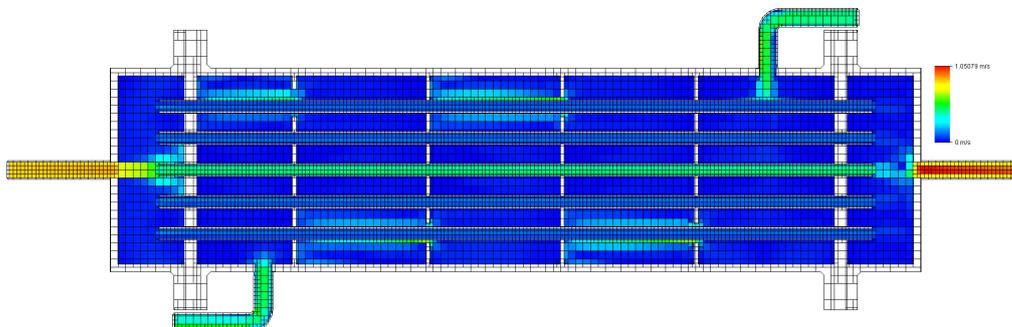
C.2.3. Simulaciones finales. Distribución de temperaturas y velocidades



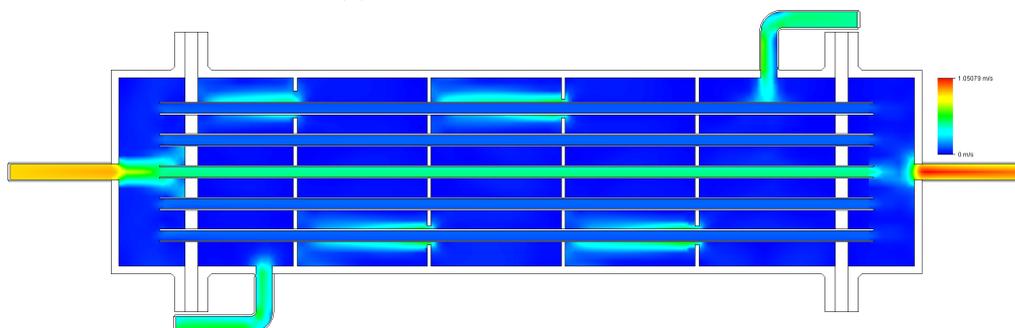
(a) Temperatura con elementos.



(b) Temperatura interpolada.

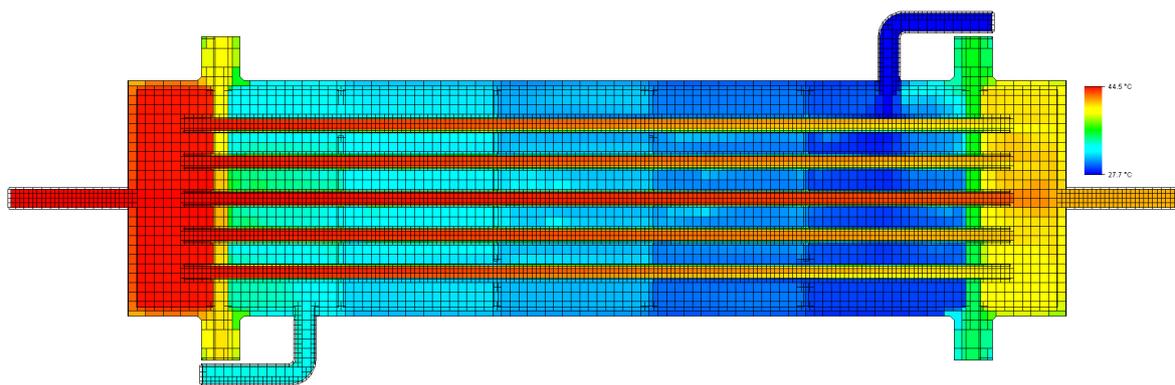


(c) Velocidad con elementos.

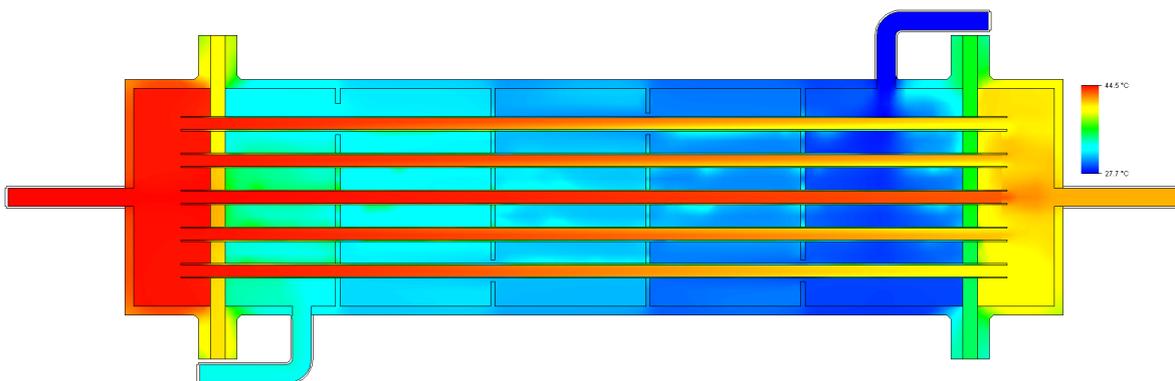


(d) Velocidad con interpolada.

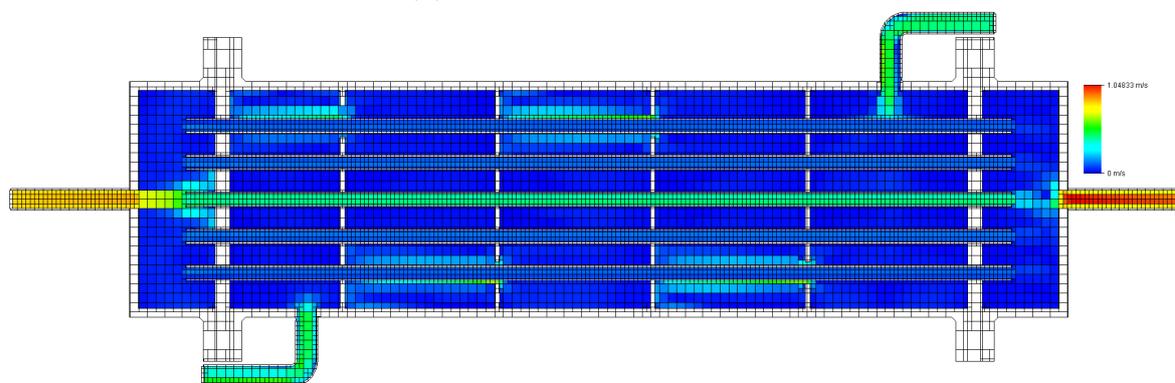
Figura C.23: Distribución de temperaturas y velocidades en el intercambiador. 40 °C y contracorriente.



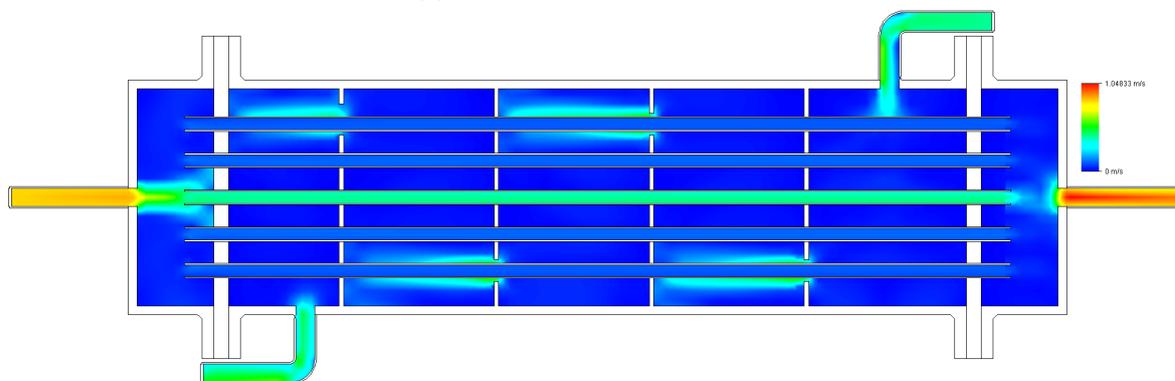
(a) Temperatura con elementos.



(b) Temperatura interpolada.

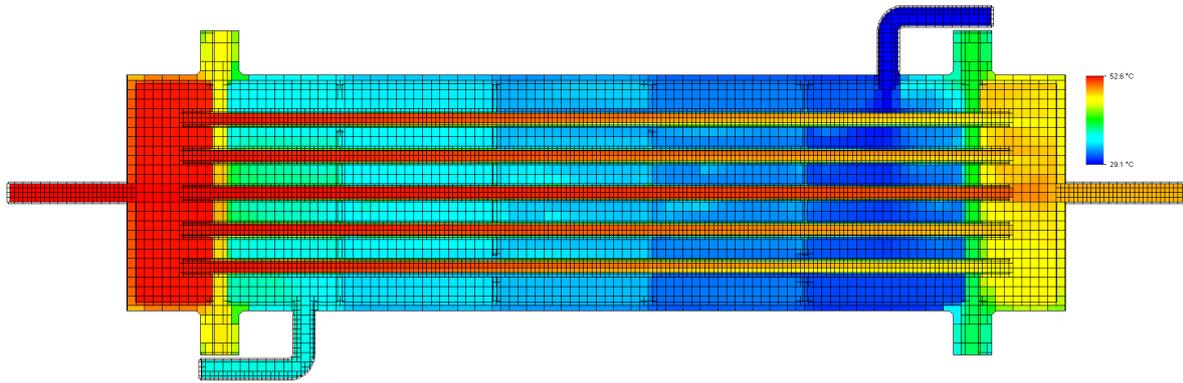


(c) Velocidad con elementos.

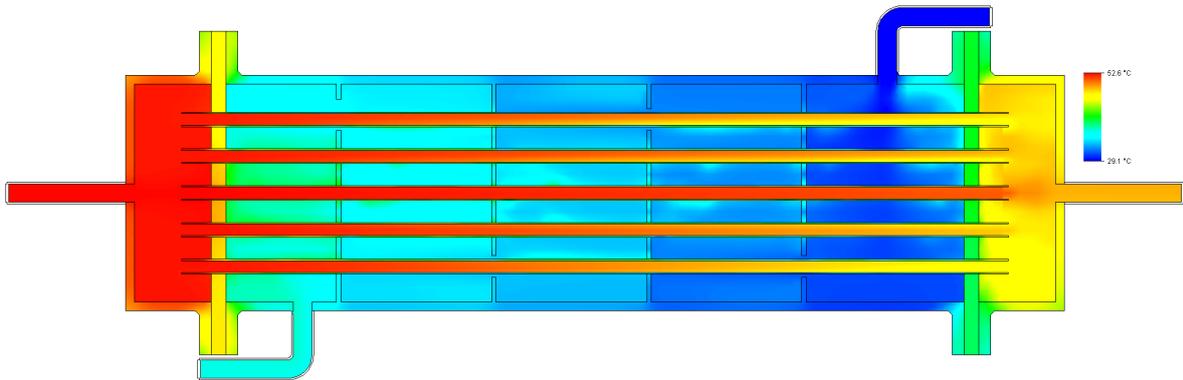


(d) Velocidad con interpolada.

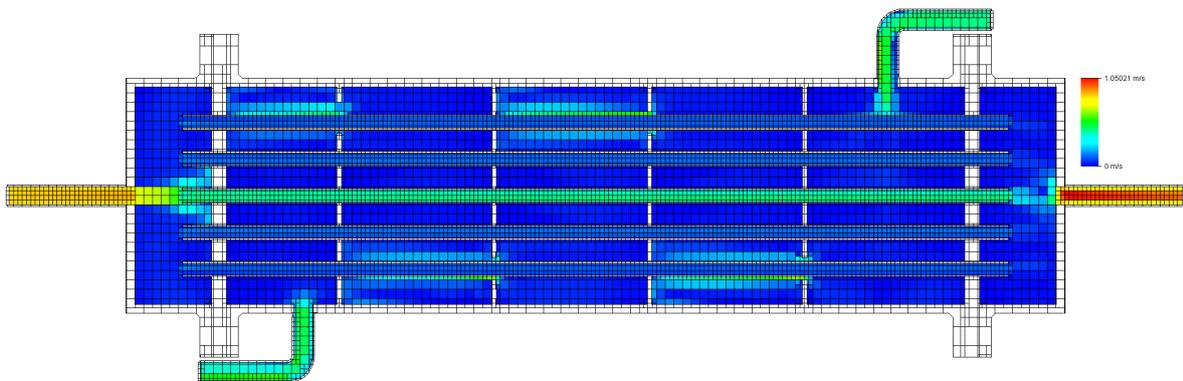
Figura C.24: Distribución de temperaturas y velocidades en el intercambiador. 50 °C y contracorriente.



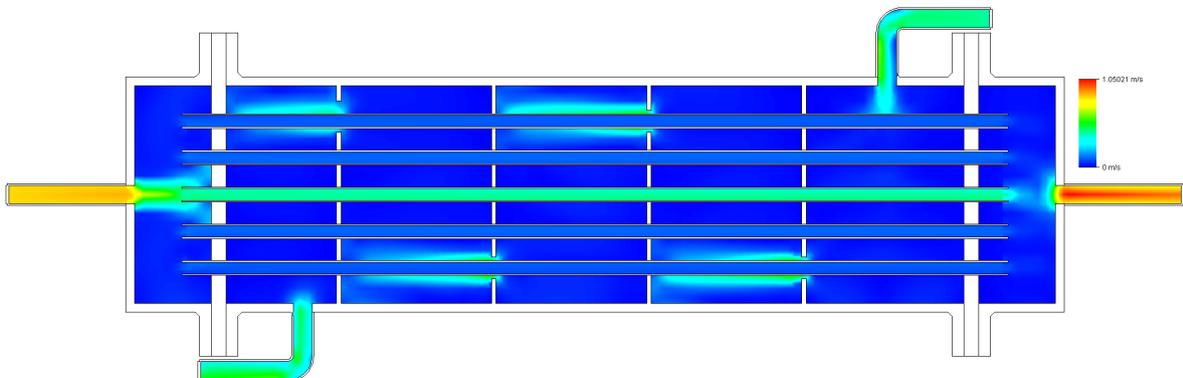
(a) Temperatura con elementos.



(b) Temperatura interpolada.

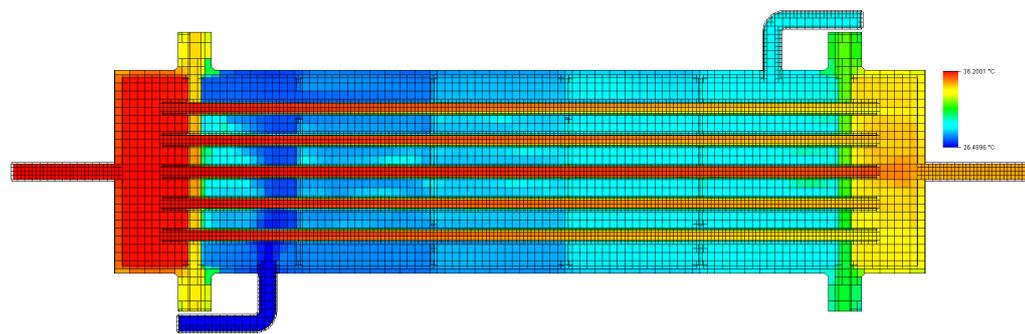


(c) Velocidad con elementos.

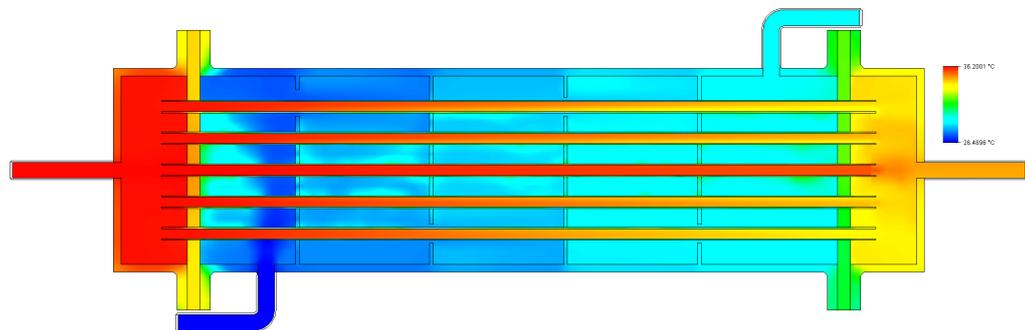


(d) Velocidad con interpolada.

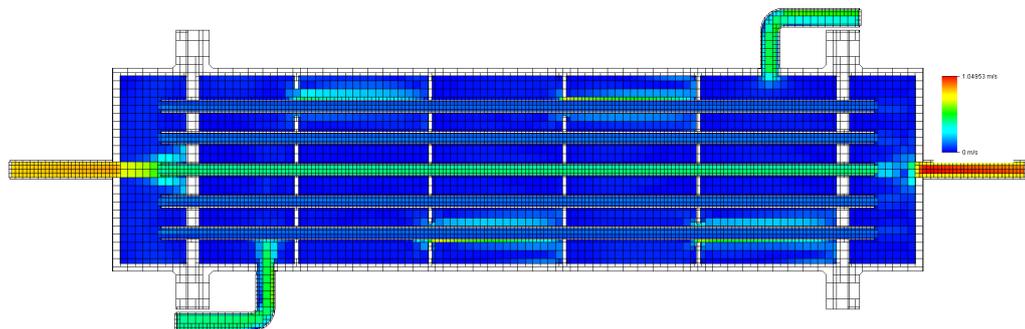
Figura C.25: Distribución de temperaturas y velocidades en el intercambiador. 60 °C y contracorriente.



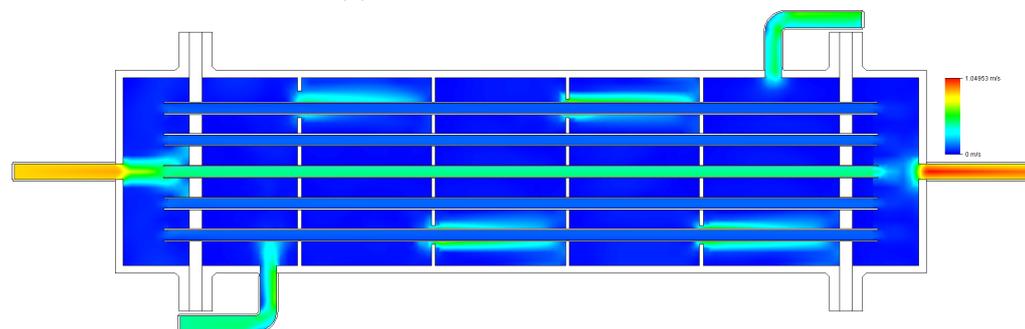
(a) Temperatura con elementos.



(b) Temperatura interpolada.

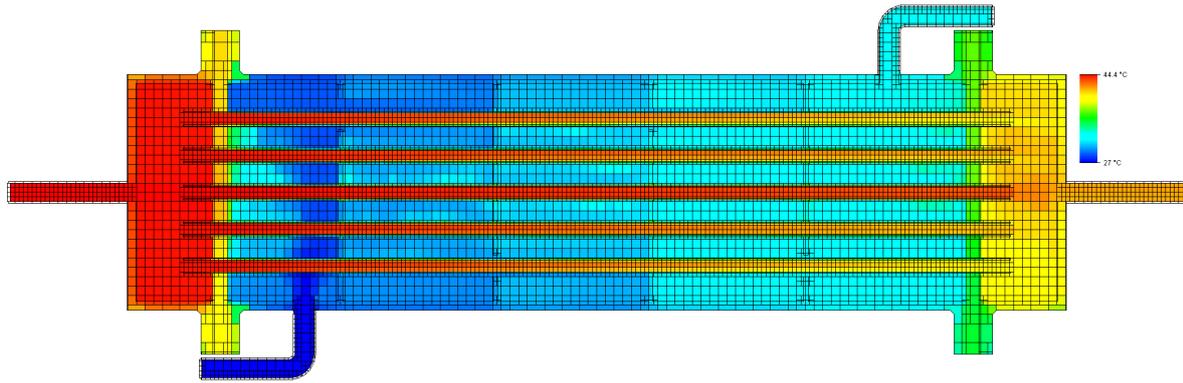


(c) Velocidad con elementos.

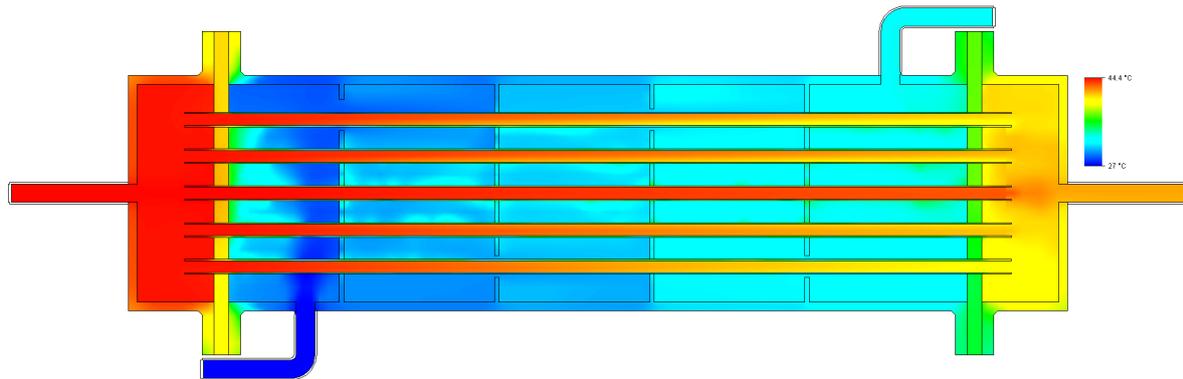


(d) Velocidad con interpolada.

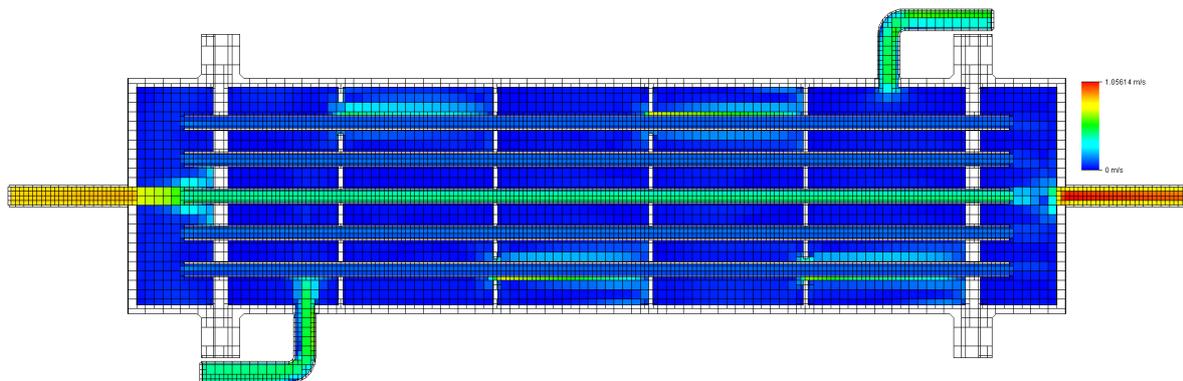
Figura C.26: Distribución de temperaturas y velocidades en el intercambiador. 40 °C y paralelo.



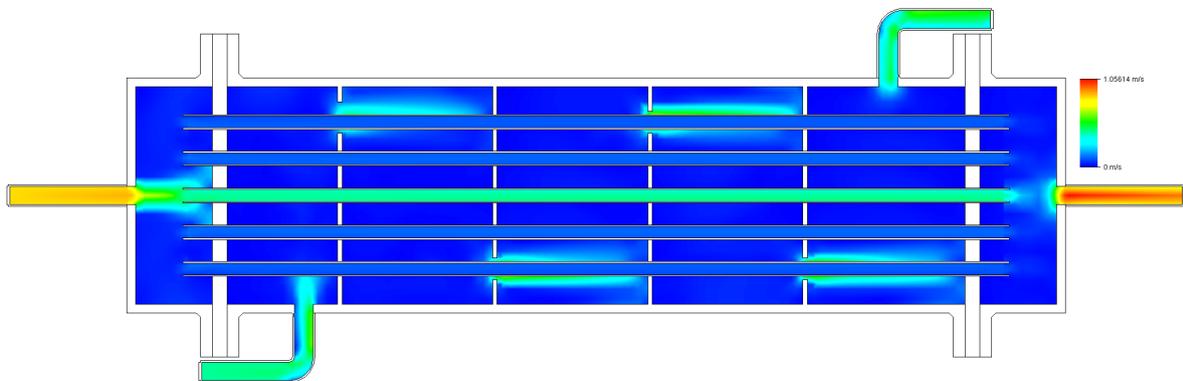
(a) Temperatura con elementos.



(b) Temperatura interpolada.

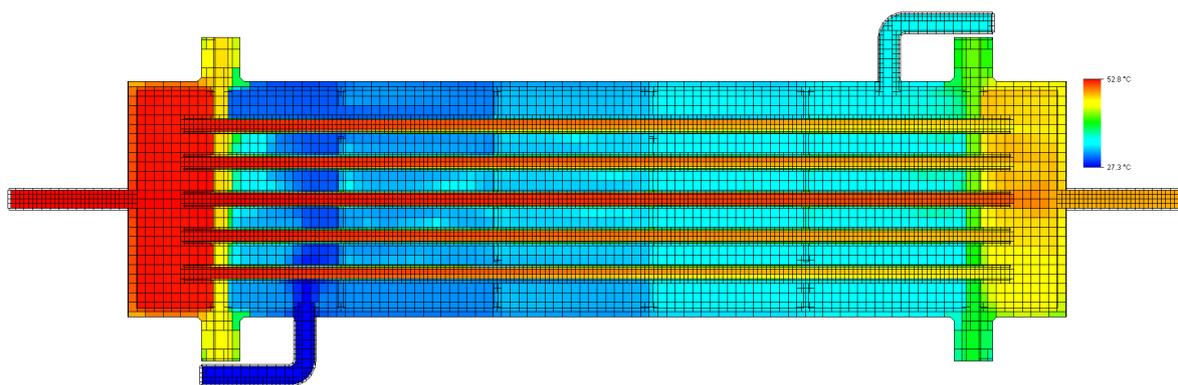


(c) Velocidad con elementos.

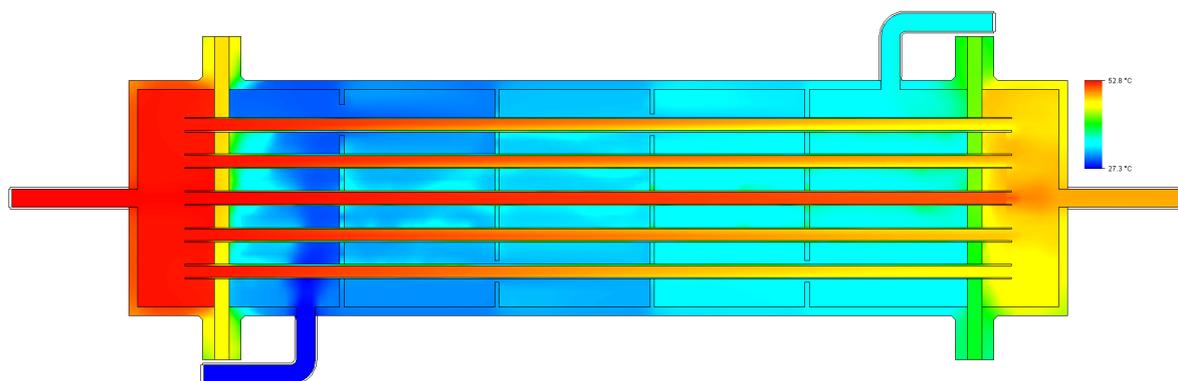


(d) Velocidad con interpolada.

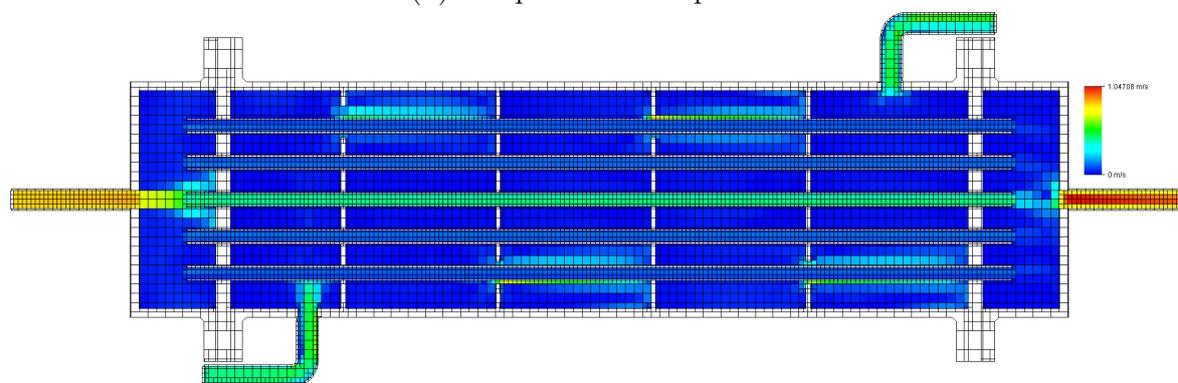
Figura C.27: Distribución de temperaturas y velocidades en el intercambiador. 50 °C y paralelo.



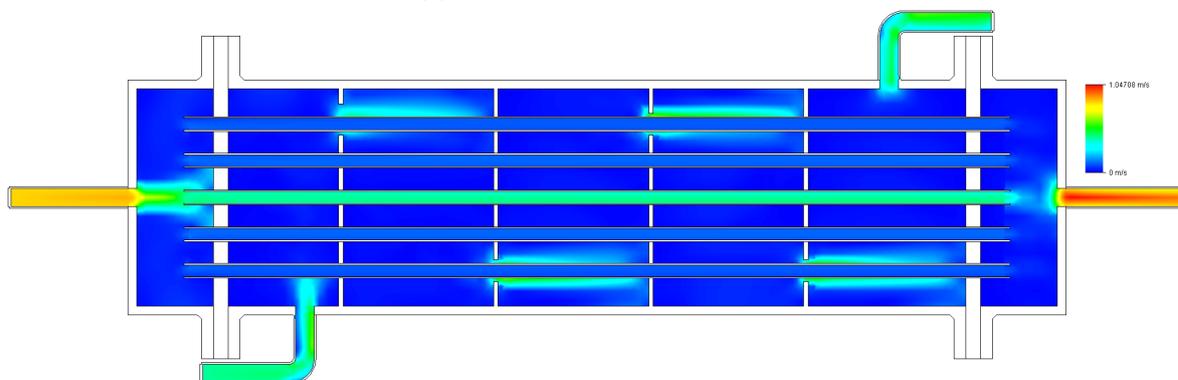
(a) Temperatura con elementos.



(b) Temperatura interpolada.

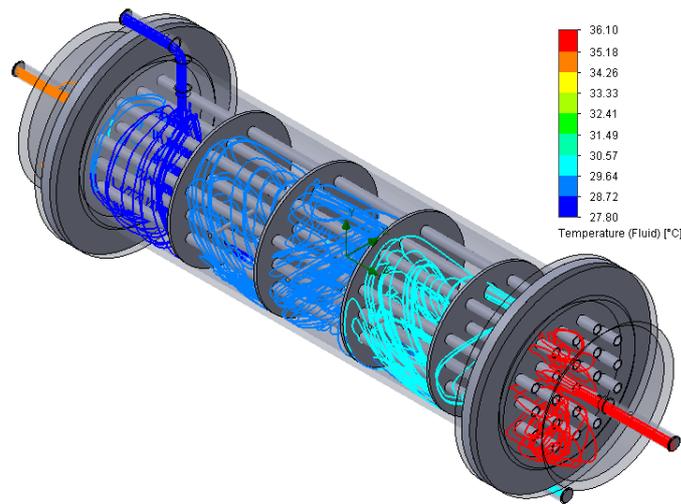


(c) Velocidad con elementos.

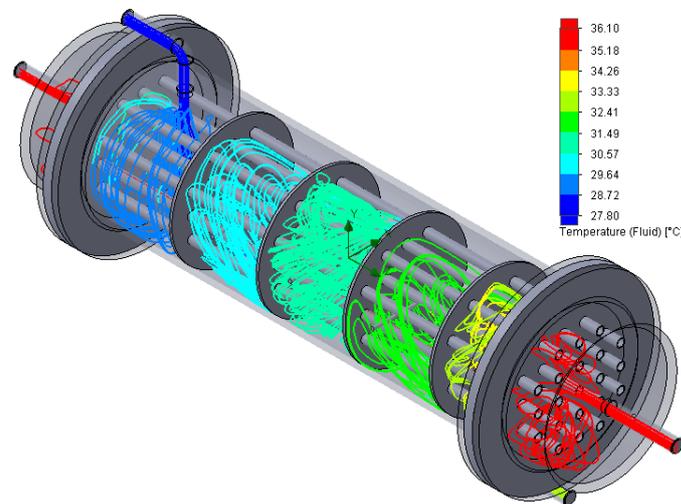


(d) Velocidad con interpolada.

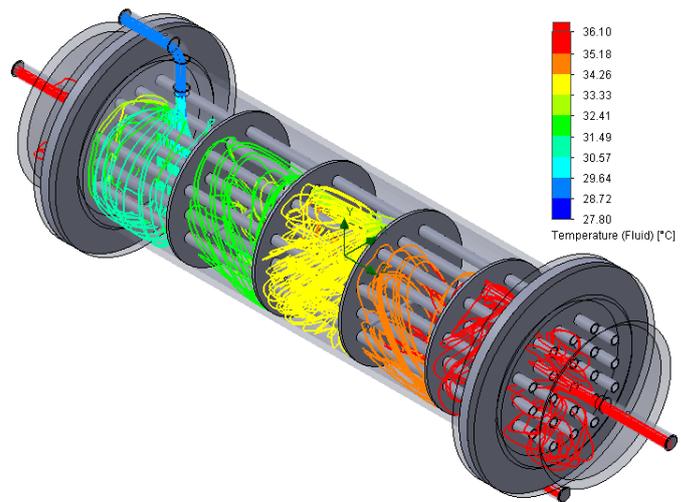
Figura C.28: Distribución de temperaturas y velocidades en el intercambiador. 60 °C y paralelo.



(a) Trayectoria para 40 °C.

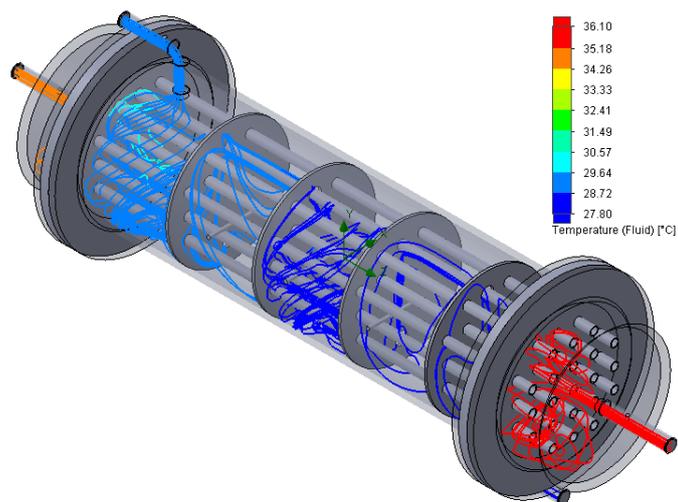


(b) Trayectoria para 50 °C.

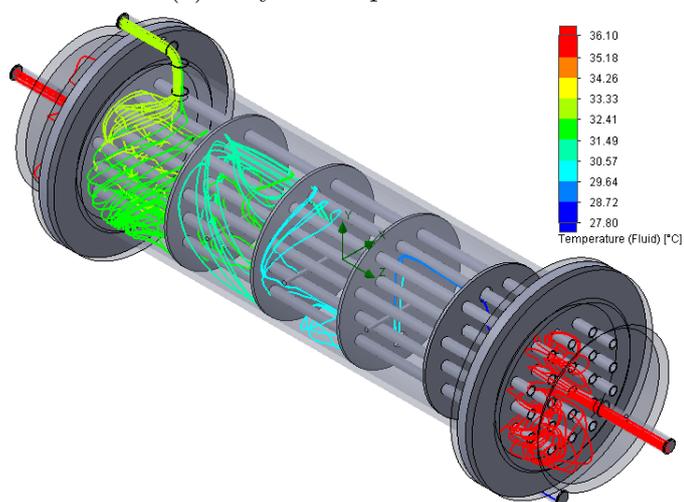


(c) Trayectoria para 60 °C.

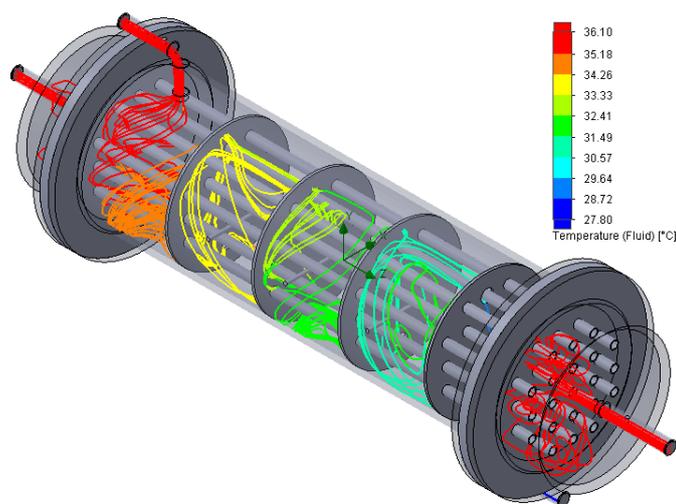
Figura C.29: Trayectorias para flujo en contracorriente.



(a) Trayectoria para 40 °C.



(b) Trayectoria para 50 °C.



(c) Trayectoria para 60 °C.

Figura C.30: Trayectorias para flujo en paralelo.

Nomenclatura

<i>A</i>	Área de transferencia de calor, m^2 .
<i>c</i>	Relación de capacidades.
<i>C</i>	Capacidad calorífica, $\frac{W}{K}$.
<i>C_p</i>	Calor específico a presión constante, $\frac{kJ}{kg \cdot K}$.
<i>g</i>	Aceleración gravitacional, $\frac{m}{s^2}$.
<i>Gr</i>	Número de Grashof.
<i>h</i>	Coefficiente de transferencia de calor por convección, $\frac{W}{m^2 \cdot K}$.
<i>k</i>	Conductividad térmica, $\frac{W}{m \cdot K}$.
<i>L</i>	Longitud, longitud característica, m .
<i>LMTD</i>	Diferencia media logarítmica de temperatura.
<i>m</i>	Gasto másico, $\frac{kg}{s}$.
<i>NTU</i>	Número de unidades de transferencia.
<i>Nu</i>	Número de Nusselt.
<i>Pr</i>	Número de Prandtl.
<i>Q</i>	Transferencia de energía, kJ .
<i>Q̇</i>	Transferencia de calor, kW .
<i>Ra</i>	Número de Rayleigh.
<i>R_f</i>	Factor de incrustación, $\frac{m^2 \cdot K}{W}$.
<i>T_∞</i>	Temperatura ambiental, lejos de la superficie, °C o K.
<i>T_s</i>	Temperatura de la superficie, °C o K.
<i>T_f</i>	Temperatura de película, °C o K.
<i>U</i>	Coefficiente global de transferencia de calor, $\frac{W}{m^2 \cdot K}$.
<i>Ṽ</i>	Gasto volumétrico, $\frac{m^3}{s}$.

Letras griegas

β	Coefficiente de expansión térmica volumétrica, K^{-1} .
ΔT_{lm}	Diferencia media logarítmica de temperatura.
ε	Eficiencia de la transferencia de calor.
ν	Viscosidad cinemática, $\frac{m^2}{s}$.

Bibliografía

- [1] S. Nellis, G. y Klein. *Heat Transfer*. Cambridge University Press, primera edición, 2009.
- [2] Intercambiador en zig-zag. <http://www.jfdcoil.com/images/rfq/Flat-Zig-Zag-Coil-Quote.gif>. Consultado: Julio 2018.
- [3] Intercambiador de serpentín. <https://cdn.comsol.com/wordpress/2014/08/Coil-heat-exchange-model.png>. Consultado: Julio 2018. Figura adaptada.
- [4] Francisco Domingo Molina Aiz. *Termotecnia: Fundamentos y sistemas de transmisión de calor*. Universidad de Almería, primera edición, 2010.
- [5] D.P. Incropera, F.P. y DeWitt. *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson Educación, cuarta edición, 1999.
- [6] Yunus A. Çengel y Afshin J. Ghajar. *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill, cuarta edición, 2011.
- [7] EDIBON. Sistema de entrenamiento de intercambiadores de calor controlado desde computador (pc), con scada y control pid. <http://www.edibon.com/es/files/equipment/TICC/catalog>. Consultado: Julio 2018. Figura adaptada.
- [8] EDIBON. *Manual de prácticas*, 2010.
- [9] Examining spatial (grid) convergence. <https://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/spatconv.html>. Consultado: Julio 2018.
- [10] Dassault Systèmes. *Technical Reference. SolidWorks Flow Simulation 2016*.