

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**Diseño de un molde de fundición de aluminio y su sistema de refrigeración  
mediante CFD.**

**Memoria**

**SERGIO SOLÍS GARCÍA**

**PONENTE: KLÁRA VÉKONY JARECSNY**

PRIMAVERA 2021



## **Dedicatoria**

A Rocío Solís, para inspirarla en la consecución de metas de estudio en el ámbito de la ciencia y la ingeniería.



## **Agradecimientos**

A todo el profesorado de la *Escola Superior Politècnica TecnoCampus* por su dedicación durante toda la carrera. En particular a Klára Vékony que me ha guiado y dedicado todo el tiempo posible para poder desarrollar este proyecto.

Agradecer la información y el soporte que ha cedido el *Centre Tecnològic de Catalunya – Eurecat* para el desarrollo de este proyecto.



## **Resum**

Aquest projecte és un primer pas per a l'estudi de la simulació computacional de dinàmica de fluids (CFD) aplicat a un motlle on el procés de fosa a alta pressió (HPDC) és present. El projecte comença a estudiar els processos HPDC i la simulació computacional. Després, començant per alguns càlculs que inclouen l'efecte de transferència de calor, es dissenya un sistema de refrigeració convencional i un optimitzat per a un motlle. Seguidament, la modelització del motlle, la peça i el sistema de refrigeració es simulat en un software CFD. Les simulacions del motlle amb els diferents sistemes de refrigeració varien diferents paràmetres per veure quins afecten positivament la refrigeració.

## **Resumen**

Este proyecto es un primer paso para el estudio de la simulación computacional de la dinámica de fluidos (CFD) aplicada en un molde donde la fundición a alta presión (HPDC) está presente. El proyecto comienza estudiando los procesos HPDC y la simulación computacional. Entonces, comenzando con algunos cálculos que engloba la transferencia de calor, se diseña un sistema de refrigeración convencional y uno optimizado para un molde. Seguidamente, la modelización del molde, pieza y sistema de refrigeración es simulado en un software CFD. Las simulaciones del molde con los diferentes sistemas de refrigeración varían diferentes parámetros para ver cuáles afectan positivamente a la refrigeración.

## **Abstract**

This project is a first step for the study of the computational fluid dynamics simulation (CFD) applied in a mould where high pressure die casting (HPDC) process is present. The project starts studying HPDC process and the computer simulation. Then, starting with some calculations that includes the heat transfer effect, a conventional and optimized cooling system for a mould is designed. After that, the modeling of the mould, piece and cooling system is simulated in a CFD software afterwards. The simulations of the mould with the different cooling systems vary different parameters to see which ones affect positively in the refrigeration.



# Índice

Índice de figuras .....	V
Índice de tablas.....	XIII
Glosario de términos .....	XV
Glosario de acrónimos.....	XVII
Nomenclatura .....	XIX
1. Objetivos .....	1
1.1. Propósito .....	1
1.2. Finalidad .....	1
1.3. Objeto.....	1
1.4. Alcance .....	1
1.5. Contexto en las líneas de investigación del TecnoCampus .....	2
2. Objeto y alcance del proyecto .....	3
2.1. Objeto.....	3
2.2. Alcance .....	3
2.3. Objetivos de detalle y especificaciones técnicas .....	4
3. Introducción al proceso de inyección de aluminio .....	7
3.1. Producción del aluminio .....	7
3.2. Procesos de conformación del aluminio .....	10
3.3. Fundición del aluminio. ....	11
3.4. Transferencia de calor.....	17
4. Introducción a la simulación numérica .....	25
4.1. Funcionamiento de la simulación numérica .....	25
4.2. Computational fluid dynamics.....	28

4.2.1. Preprocesamiento .....	30
4.2.2. Solucionador .....	32
4.2.3. Postprocesamiento .....	33
4.3. Estado del arte de los softwares .....	37
<b>5. Diseño de un molde para una máquina de inyección de aluminio.....</b>	<b>41</b>
5.1. Pieza de partida.....	41
5.2. Dimensionamiento de los utillajes.....	42
5.2.1. Diseño del tiempo de llenado del molde.....	43
5.2.2. Cálculo del caudal de llenado .....	44
5.2.3. Diseño del espesor y de la velocidad de ataque .....	45
5.2.4. Sección de ataque.....	47
5.2.5. Diámetro y velocidad del pistón .....	47
5.3. Diseño del molde .....	49
<b>6. Diseño del sistema de refrigeración para el molde .....</b>	<b>51</b>
6.1. Diseño del sistema de refrigeración convencional .....	51
6.1.1. Proceso de refrigeración .....	52
6.1.2. Cálculo de los parámetros del circuito.....	53
6.1.3. Cálculo de la temperatura de salida de las tuberías .....	63
6.2. Diseño del sistema de refrigeración optimizado.....	67
<b>7. Simulación.....</b>	<b>71</b>
7.1. Software escogido.....	71
7.2. Preparación de los modelos .....	71
7.2.1. Subida del modelo CAD .....	71
7.2.2. Determinación de las condiciones iniciales .....	73
7.2.3. Estudio del mallado.....	79

7.2.4. Mallado de la geometría.....	84
7.2.5. Configuración de la simulación.....	96
7.3. Simulación del modelo convencional con una tubería .....	105
7.3.1. Simulación con una tubería y velocidad del fluido de 1.5 m/s .....	106
7.3.2. Simulación con una tubería y velocidad del fluido de 2 m/s .....	109
7.3.3. Simulación con una tubería y velocidad del fluido de 3.5 m/s .....	112
7.3.4. Análisis de resultados.....	115
7.4. Simulación del modelo convencional con tres tuberías.....	117
7.4.1. Simulación con tres tuberías y una velocidad del fluido de 1.5 m/s .....	118
7.4.2. Simulación con tres tuberías y velocidad del fluido de 2 m/s.....	121
7.4.3. Simulación con tres tuberías y una velocidad del fluido de 3.5 m/s .....	124
7.4.4. Análisis de resultados.....	127
7.5. Simulación del modelo convencional con cinco tuberías.....	129
7.5.1. Simulación con cinco tuberías y una velocidad del fluido de 1.5 m/s .....	130
7.5.2. Simulación con cinco tuberías y velocidad del fluido de 2 m/s.....	133
7.5.3. Simulación con cinco tuberías y una velocidad del fluido de 3.5 m/s .....	136
7.5.4. Análisis de resultados.....	139
7.6. Simulación del modelo optimizado con una tubería.....	140
7.6.1. Simulación con una tubería y una velocidad del fluido de 1.5 m/s.....	141
7.6.2. Simulación con una tubería y velocidad del fluido de 2 m/s .....	144
7.6.3. Simulación con una tubería y una velocidad del fluido de 3.5 m/s.....	147
7.6.4. Análisis de resultados.....	150
7.7. Simulación del modelo optimizado con tres tuberías .....	152
7.7.1. Simulación con tres tuberías y una velocidad del fluido de 1.5 m/s .....	153
7.7.2. Simulación con tres tuberías y velocidad del fluido de 2 m/s.....	156
7.7.3. Simulación con tres tuberías y una velocidad del fluido de 3.5 m/s .....	159

7.7.4. Análisis de resultados .....	162
7.8. Simulación del modelo optimizado con cinco tuberías .....	164
7.8.1. Simulación con cinco tuberías y una velocidad del fluido de 1.5 m/s .....	165
7.8.2. Simulación con cinco tuberías y velocidad del fluido de 2 m/s.....	168
7.8.3. Simulación con cinco tuberías y una velocidad del fluido de 3.5 m/s .....	171
7.8.4. Análisis de resultados .....	174
7.9. Resultados generales.....	175
8. Planificación .....	179
8.1. Planificación inicial .....	179
8.2. Retrasos y desviaciones .....	182
9. Impacto medioambiental .....	187
10. Perspectiva de género .....	189
11. Conclusiones .....	191
11.1. Diseño del sistema de refrigeración.....	191
11.2. Simulación numérica .....	191
11.3. Enfriamiento del molde .....	192
11.4. Desarrollo del proyecto .....	193
12. Referencias .....	195

# Índice de figuras

Fig. 3.1 Esquema de la célula electrolítica de reducción. [1].....	9
Fig. 3.2 Esquema de una cámara fría de una máquina de HPDC. [1] .....	12
Fig. 3.3 Esquema del proceso LPDC. [4] .....	14
Fig. 3.4 Esquema del proceso de fundición por molde de arena. [1] .....	15
Fig. 3.5 (a) esquema de flujo laminar. (b) esquema de flujo turbulento. ....	23
Fig. 4.1 (a) Malla desestructurada en FEM; (b) malla estructurada en FDM. [8].....	26
Fig. 4.2 Movimiento de mallas. [9] .....	27
Fig. 4.3 Diagrama de flujo clasificando los tipos de fluidos posibles en CFD. [10].....	31
Fig. 4.4 Vectores de velocidad de un fluido pasando por dos cilindros. [10] .....	34
Fig. 4.5 Líneas de corriente de un fluido pasando por dos cilindros. [10] .....	34
Fig. 5.1 Vista de la pieza con elementos para una correcta solidificación de la pieza. ....	41
Fig. 5.2. Ilustración de la pieza a calcular. ....	42
Fig. 5.3 Cotas de la bandeja para el cálculo. ....	42
Fig. 5.4 Ampliación de la sección de ataque. ....	45
Fig. 5.5 Gráfico presión-caudal para diferentes diámetros con la selección usada. [11] ....	48
Fig. 5.6 Cotas del molde.....	49
Fig. 5.7 Vista isométrica del molde.....	49
Fig. 6.1 Molde con una tubería simple. ....	51
Fig. 6.2 Molde con tres tuberías simples. ....	51
Fig. 6.3 Molde con cinco tuberías simples. ....	52
Fig. 6.4 Bandeja de aleación de aluminio.....	66
Fig. 6.5 Transferencia de temperatura en el molde en $t = 8s$ .....	67
Fig. 6.6 Modelo optimizado de una tubería.....	68
Fig. 6.7 Molde optimizado de tres tuberías. ....	69

Fig. 6.8 Molde optimizado de cinco tuberías. ....	70
Fig. 6.9 Tuberías laterales .....	70
Fig. 7.1 Modelo CAD con operaciones de reconocimiento de volumen y de superficies. .	72
Fig. 7.2 Modelo CAD con operaciones de reconocimiento de volúmenes y superficies....	72
Fig. 7.3 Distintas simulaciones que ofrece Simscale. ....	73
Fig. 7.4 Menú ara configurar la transferencia de calor conjugada. ....	75
Fig. 7.5 Malla generada por la aproximación de funciones de pared para $D = 50$ mm. ....	81
Fig. 7.6 Valores de la distancia de pared óptima para un diámetro de 50 mm. ....	81
Fig. 7.7 Malla generada por la aproximación de funciones de pared para $D = 30$ mm. ....	82
Fig. 7.8 Valores de la distancia de pared óptima para $D = 30$ mm. ....	82
Fig. 7.9 Malla generada por la aproximación de funciones de pared para $D = 20$ mm. ....	83
Fig. 7.10 Valores de la distancia de pared óptima para $D = 20$ mm. ....	83
Fig. 7.11 Sección transversal de la malla con $D = 50$ mm. ....	84
Fig. 7.12 Sección transversal de la malla con $D = 30$ mm. ....	84
Fig. 7.13 Sección transversal de la malla con $D = 20$ mm. ....	84
Fig. 7.14 Ventana de configuración de mallado para la configuración con una tubería. ....	85
Fig. 7.15 Mallado general del molde convencional con una tubería. ....	86
Fig. 7.16 Mallado de la bandeja .....	87
Fig. 7.17 Mallado de detalle de esquina y contacto del molde para una tubería. ....	87
Fig. 7.18 Mallado del alzado del molde. ....	88
Fig. 7.19 Mallado interior del molde para una tubería. ....	89
Fig. 7.20 Mallado general del molde convencional con tres tuberías. ....	89
Fig. 7.21 Mallado de detalle de esquina y contacto del molde para tres tuberías. ....	90
Fig. 7.22 Mallado interior del molde para tres tuberías. ....	90
Fig. 7.23 Mallado general del molde convencional con cinco tuberías. ....	91
Fig. 7.24 Mallado de detalle de esquina y contacto del molde para cinco tuberías. ....	91

Fig. 7.25 Mallado interior del molde para cinco tuberías.....	92
Fig. 7.26 Calidad de la malla para la configuración con una tubería. ....	93
Fig. 7.27 Calidad de la malla para la configuración con tres tuberías.....	94
Fig. 7.28 Calidad de la malla para la configuración con cinco tuberías.....	95
Fig. 7.29 Ventana de numerics con los factores de relajación. ....	96
Fig .7.30 Ventana de numerics con solvers y tolerancias.....	97
Fig. 7.31 Resultados del solver con con la entalpía no resuelta. ....	98
Fig. 7.32 Menú de numerics con cambios en las tolerancias de las entalpías sólidas.....	98
Fig. 7.33 Menú de simulation control para CHT transitorio. ....	99
Fig. 7.34 Esquema comparativo del número de Courant en una malla. ....	101
Fig. 7.35 Resultado de la longitud de la malla para una tubería.....	103
Fig. 7.36 Resultado de la longitud de la malla para tres tuberías.....	104
Fig. 7.37 Resultado de la longitud de la malla para cinco tuberías. ....	104
Fig. 7.38 Modelo convencional de una tubería. ....	105
Fig. 7.39 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo. ....	106
Fig. 7.40 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos.....	106
Fig. 7.41 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.....	107
Fig. 7.42 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos. ....	107
Fig. 7.43 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.....	108
Fig. 7.44 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.....	108
Fig. 7.45 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo. ....	109
Fig. 7.46 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos.....	109
Fig. 7.47 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.....	110
Fig. 7.48 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos. ....	110
Fig. 7.49 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo. ....	111
Fig. 7.50 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.....	111

Fig. 7.51 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo.....	112
Fig. 7.52 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos. ....	112
Fig. 7.53 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.....	113
Fig. 7.54 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos. ....	113
Fig. 7.55 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.....	114
Fig. 7.56 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos. ....	114
Fig. 7.57 Temperatura del agua en función de la longitud de la tubería en $t = 1$ s. ....	115
Fig. 7.58 Temperatura del agua en función de la longitud de la tubería en $t = 8$ s. ....	116
Fig. 7.59 Modelo convencional de tres tuberías.....	117
Fig. 7.60 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo.....	118
Fig. 7.61 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos. ....	118
Fig. 7.62 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.....	119
Fig. 7.63 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos. ....	119
Fig. 7.64 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.....	120
Fig. 7.65 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos. ....	120
Fig. 7.66 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo.....	121
Fig. 7.67 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos. ....	121
Fig. 7.68 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.....	122
Fig. 7.69 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos. ....	122
Fig. 7.70 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.....	123
Fig. 7.71 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos. ....	123
Fig. 7.72 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo.....	124
Fig. 7.73 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos. ....	124
Fig. 7.74 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.....	125
Fig. 7.75 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos. ....	125
Fig. 7.76 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.....	126

Fig. 7.77 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.....	126
Fig. 7.78 Temperatura del agua en función de la longitud para $t = 1s$ . .....	127
Fig. 7.79 Temperatura del agua en función de la longitud para $t = 8s$ . .....	128
Fig. 7.80 Modelo convencional de cinco tuberías .....	129
Fig. 7.81 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo. ....	130
Fig. 7.82 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos.....	130
Fig. 7.83 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.....	131
Fig. 7.84 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos. ....	131
Fig. 7.85 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo. ....	132
Fig. 7.86 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.....	132
Fig. 7.87 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo. ....	133
Fig. 7.88 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos.....	133
Fig. 7.89 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.....	134
Fig. 7.90 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos. ....	134
Fig. 7.91 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo. ....	135
Fig. 7.92 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.....	135
Fig. 7.93 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo. ....	136
Fig. 7.94 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos.....	136
Fig. 7.95 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.....	137
Fig. 7.96 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos. ....	137
Fig. 7.97 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo. ....	138
Fig. 7.98 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.....	138
Fig. 7.99 Temperatura del agua en función de la longitud para $t = 1s$ . .....	139
Fig. 7.100 Temperatura del agua en función de la longitud para $t = 8s$ . .....	140
Fig. 7.101 Modelo optimizado de una tubería.....	141
Fig. 7.102 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo. ....	141

Fig. 7.103 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos. ....	142
Fig. 7.104 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.....	142
Fig. 7.105 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos. ....	143
Fig. 7.106 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.....	143
Fig. 7.107 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos. ....	144
Fig. 7.108 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo.....	144
Fig. 7.109 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos. ....	145
Fig. 7.110 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.....	145
Fig. 7.111 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos. ....	146
Fig. 7.112 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.....	146
Fig. 7.113 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos. ....	147
Fig. 7.114 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo.....	147
Fig. 7.115 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos. ....	148
Fig. 7.116 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.....	148
Fig. 7.117 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos. ....	149
Fig. 7.118 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.....	149
Fig. 7.119 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos. ....	150
Fig. 7.120 Temperatura del agua en función de la longitud para $t = 1s$ .....	151
Fig. 7.121 Temperatura del agua en función de la longitud para $t = 8s$ .....	151
Fig. 7.122 Modelo optimizado de una tubería. ....	152
Fig. 7.123 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo.....	153
Fig. 7.124 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos. ....	153
Fig. 7.125 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.....	154
Fig. 7.126 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos. ....	154
Fig. 7.127 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.....	155
Fig. 7.128 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos. ....	155

Fig. 7.129 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo. ....	156
Fig. 7.130 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos.....	156
Fig. 7.131 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.....	157
Fig. 7.132 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos. ....	157
Fig. 7.133 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo. ....	158
Fig. 7.134 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.....	158
Fig. 7.135 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo en Kelvin.....	159
Fig. 7.136 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos en Kelvin. ....	159
Fig. 7.137 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.....	160
Fig. 7.138 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundo.....	160
Fig. 7.139 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo. ....	161
Fig. 7.140 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.....	161
Fig. 7.141 Temperatura del agua en función de la longitud para $t = 1s$ . ....	162
Fig. 7.142 Temperatura del agua en función de la longitud para $t = 1s$ . ....	163
Fig 7.143 Modelo optimizado de una tubería.....	164
Fig. 7.144 Resultado térmico de la tubería a 1 segundo en Kelvin. ....	165
Fig. 7.145 Resultado térmico de la tubería a 8 segundos en Kelvin. ....	165
Fig. 7.146 Resultado térmico de la bandeja a 1 segundo en Kelvin.....	166
Fig. 7.147 Resultado térmico de la bandeja a 8 segundos en Kelvin. ....	166
Fig. 7.148 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo. ....	167
Fig. 7.149 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.....	167
Fig. 7.150 Resultado térmico de la tubería a 1 segundo en Kelvin. ....	168
Fig. 7.151 Resultado térmico de la tubería a 8 segundos en Kelvin. ....	168
Fig. 7.152 Resultado térmico de la bandeja a 1 segundo en Kelvin.....	169
Fig. 7.153 Resultado térmico de la bandeja a 8 segundos en Kelvin. ....	169
Fig. 7.154 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo. ....	170

Fig. 7.155 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos. ....	170
Fig. 7.156 Resultado térmico de la tubería a 1 segundo en Kelvin.....	171
Fig. 7.157 Resultado térmico de la tubería a 8 segundos en Kelvin. ....	171
Fig. 7.158 Resultado térmico de la bandeja a 1 segundo en Kelvin. ....	172
Fig. 7.159 Resultado térmico de la bandeja a 8 segundos en Kelvin.....	172
Fig. 7.160 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.....	173
Fig. 7.161 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos. ....	173
Fig. 7.162 Temperatura del agua en función de la longitud para $t = 1s$ . ....	174
Fig. 7.163 Temperatura del agua en función de la longitud para $t = 1s$ . ....	175
Fig. 7.164 Residuales en la simulación del molde convencional de tres tuberías a 2 m/s. ....	177
Fig. 8.1 Diagrama de Gantt programado inicialmente. ....	181
Fig. 8.2 Diagrama de Gantt del proyecto. ....	185
Fig. 9.1 Porcentaje de fuente de energía generadora en España en 2020. Fuente: REE... ..	187

## Índice de tablas

Tabla 3.1 Regímenes de un fluido según el número de Mach. Fuente: propia. ....	24
Tabla 4.1 Softwares comerciales CFD con su código y dirección web. [10].....	29
Tabla 5.2 Valor de las constantes de la fórmula empírica de Wallace. [11] .....	43
Tabla 6.1 Razón de transferencia de calor por tubería .....	55
Tabla 6.2 Caudal másico por tubería .....	56
Tabla 6.3 Diámetros en función de la velocidad y el caudal másico.....	57
Tabla 6.4 Diámetros seleccionados según número de tuberías. ....	58
Tabla 6.5 Número de Reynolds para los distintos diámetros y velocidades. ....	59
Tabla 6.6 Coeficiente de fricción y número de Nusselt para los distintos diámetros y velocidades. ....	62
Tabla 6.7 Coeficiente de transferencia de calor para los distintos diámetros y velocidades. ....	63
Tabla 6.8 Caudal másico y temperatura de salida de las tuberías para ambos diámetros y distintas velocidades. ....	66
Tabla 7.1 Valores de la intensidad de turbulencia y energía cinética turbulenta para ambos diámetros y distintas velocidades. ....	77
Tabla 7.2 Ratios de disipación para ambos diámetros a distintas velocidades.....	79
Tabla 7.3 Configuración de la capa límite para las diferentes geometrías. ....	85
Tabla 8.1 Tareas con las horas, prelación y recursos planificadas inicialmente.....	180
Tabla 8.2 Tareas con las horas, prelación y recursos del proyecto. ....	184



## Glosario de términos

Alúmina	Forma mineral del hidróxido de aluminio.
Bauxita	Pérdidas de conducción.
Capa límite	Capa de contacto entre un fluido en circulación y una superficie sólida que es influida por dicha superficie.
Criolita	Mineral usado para la producción de aluminio.
Delta t	Incremento de tiempo por el cual las ecuaciones transitorias se resuelven.
<i>End Time</i>	Tiempo final de simulación.
Estequimetría	Procedimiento para determinar las cantidades de elementos químicos que intervienen en una reacción química.
Floculante	Substancia que elimina partículas en un fluido.
Gibbsita	Una de las formas minerales del hidróxido de aluminio o forma en la que se encuentra en la naturaleza el aluminio.
Hidróxido de aluminio	Forma más estable del aluminio. Proviene de la Gibbsita.
<i>Imprint</i>	Operación de Simscale consistente en el reconocimiento de contactos y superficies.
Isobára	Línea que refleja las mismas propiedades en cada uno de sus puntos.

Laterita	Tipo de suelo arcilloso que se encuentra en zonas cálidas con poco sílice y gran cantidad de hierro, alúmina y otros minerales
Oxihidróxidos	Compuesto químico formado por oxígeno e hidrógeno.
Silicato	Compuesto químico compuesto por silicio y oxígeno.
<i>Streamline</i>	En el contexto del proyecto; se refiere a líneas de circulación del flujo.
<i>Time step</i>	Unidad temporal que especifica el tiempo entre cada intervalo de simulación.
Tixotropía	Efecto que tienen algunos fluidos a cambiar su viscosidad según los esfuerzos de cizalla a los que se le someta.
Zirconio	Elemento número 40 de la tabla periódica

## Glosario de acrónimos

ATM	<i>Advanced Tixotropy Metallurgy</i> ; Metalúrgia de tixotropía avanzada.
CAD	<i>Computer Aided-Design</i> ; Diseño asistido por ordenador.
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> ; Dinámica de fluidos computacional.
CHT	<i>Conjugate Heat Transfer</i> ; Transferencia de calor conjugada.
DOF	<i>Degree of Freedom</i> ; Grado de libertad.
ECTS	<i>European Credit Transfer System</i> ; Sistema de transferencia de créditos europeo.
FDM	<i>Finite Difference Method</i> ; Método de las diferencias finitas.
FEM	<i>Finite Element Method</i> ; Método de los elementos finitos.
FVM	<i>Finite Volume Method</i> ; Método de los volúmenes finitos.
GUI	<i>Graphic User Interface</i> ; Interfaz gráfica de usuario.
HPDC	<i>High pressure die casting</i> ; Fundición a alta presión.
LPDC	<i>Low pressure die casting</i> ; Fundición a baja presión.
PDE	<i>Partial Differential Equation</i> ; Ecuaciones diferenciales parciales.
REE	Red Eléctrica de España



# Nomenclatura

$A$	Superficie [ $m^2$ ]
$\beta$	Porcentaje del factor de contracción por solidificación
$C$	Constante del modelo de turbulencia
$c_p$	Calor específico [ $J/kg \cdot ^\circ K$ ]
$D$	Diámetro [ $m$ ]
$E$	Energía [ $J$ ]
$e$	Espesor [ $mm$ ]
$\varepsilon$	Ratio de disipación [ $m^2/s^2$ ]
$F$	Fuerza [ $N$ ]
$f$	Coefficiente de fricción
$\phi$	Fracción de gas que no afecta a la contracción
$h$	Coefficiente de transferencia de calor [ $W/m^2 \cdot ^\circ K$ ]
$I$	Intensidad turbulenta
$J$	Factor de atomización
$k$	Conductividad térmica [ $W/m \cdot ^\circ K$ ]

$L_c$	Longitud característica [m]
$l$	Longitud [m]
$m$	Masa [kg]
$\dot{m}$	Caudal másico [kg/s]
$Ma$	Número de Mach
$Nu$	Número de Nusselt
$P$	Presión [Pa]
$Pr$	Número de Prandtl
$Q$	Transferencia de calor [J]
$\dot{Q}$	Razón de transferencia de calor [J/s]
$\dot{q}$	Caudal volumétrico [J/s · m <sup>2</sup> ]
$Re$	Número de Reynolds
$S$	Sección de ataque [mm <sup>2</sup> ]
$\sigma$	Constante de Stephan-Boltzmann [W/m <sup>2</sup> · °K <sup>4</sup> ]
$T$	Temperatura [K]
$t$	Tiempo [s]

$u$  Velocidad [ $m/s$ ]

$\nu$  Viscosidad cinemática [ $m^2/s$ ]

$V$  Volumen [ $m^3$ ]

$y^+$  Distancia de pared

$Z$  Factor de conversión



# **1. Objetivos**

## **1.1. Propósito**

Estudio del proceso de inyección de aluminio a alta presión (HPDC) con el estudio térmico del molde de inyección para iniciarse en el ámbito de la simulación numérica. Realización de diversas simulaciones variando los parámetros del sistema para entender en qué maneras afectan a la transferencia de calor.

## **1.2. Finalidad**

Estudio y obtención de los parámetros idóneos para realizar una mejora de la refrigeración de un molde sometido a un proceso de inyección de aluminio a alta presión (HPDC). Iniciarse en el ámbito de la simulación numérica y en concreto en la simulación computacional de fluidos (CFD). Estudiar el funcionamiento de los softwares de simulación numérica e implementar un modelo dentro del software de simulación capaz de realizar simulaciones de la transferencia de calor en el proceso real.

## **1.3. Objeto**

Estudio térmico del proceso de inyección de aluminio a alta presión en un molde de acero con aluminio inyectado y la simulación del mismo dentro de un software de simulación numérica. Realización de dos modelos de molde creando circuitos de refrigeración: uno convencional y otro optimizado; con tal de ver cuál de los dos diseños influye mejor en el enfriamiento del molde.

## **1.4. Alcance**

Este trabajo contiene el estudio previo del proceso de inyección de aluminio a alta presión (HPDC) y del funcionamiento de los softwares de simulación numérica. Además, se realizarán diversas simulaciones con varios modelos de moldes con sistemas de refrigeración distintos para el análisis de la influencia de los mismos en el enfriamiento del molde.

## **1.5. Contexto en las líneas de investigación del TecnoCampus**

Este trabajo se desarrolla sobre las líneas de estudio cursadas en la carrera de ingeniería mecánica de la *Escola Superior Politècnica TecnoCampus*. Este trabajo se enfoca en el ámbito de estudio dedicado a la ingeniería térmica y de fluidos aplicando el conocimiento adquirido sobre transferencia de calor y simulación computacional.

Además, el trabajo se ve apoyado por el *Centre Tecnològic de Catalunya - Eurecat* el cual aporta la información, conocimiento y soporte necesario para el correcto desarrollo del proyecto.

## **2. Objeto y alcance del proyecto**

### **2.1. Objeto**

Este trabajo estudia el comportamiento térmico que tiene un molde en el proceso de producción de una máquina de inyección a alta presión (HPDC). Estas máquinas consisten en la inyección de metal fundido dentro de un molde a alta presión para que posteriormente solidifique consiguiendo así una pieza con la forma deseada y libre de imperfecciones e impurezas.

En estas máquinas es necesario que el control térmico sea lo más óptimo posible para facilitar una reducción del tiempo de ciclo, un aumento de la productividad y para evitar la reducción del tiempo de vida del molde. Por lo tanto, este trabajo pretende adentrarse en el ámbito de la simulación numérica con el diseño dos sistemas de refrigeración: uno optimizado y otro simple; que ayuden a retirar el calor del molde con la creación de un modelo informático mediante una herramienta de simulación numérica que simule la transferencia de calor en el molde, estudiando qué parámetros afectan en el sistema y qué diseño es más adecuado.

### **2.2. Alcance**

En este proyecto se estudiará el comportamiento térmico que tiene el proceso de fundición en un molde mediante un sistema de inyección de aluminio a alta presión (HPDC) y el efecto de su sistema de refrigeración. Se realizará el diseño del molde con el patrón inverso de una pieza determinada para proceder a la realización de simulaciones numéricas. En el proceso de diseño del molde se realizará, además, el cálculo de los utillajes, caudales y velocidades que tendrá que tener el pistón para el proceso de inyección.

Se diseñará dos tipos de sistemas de refrigeración para el molde siguiendo la teoría de la transferencia de calor: uno convencional, basado en tuberías de fluido uniformes; y uno optimizado, con un circuito de recorrido pensado para acelerar el proceso de refrigeración.

Tras esto, se realizará una búsqueda y análisis de los softwares de simulación numérica presentes en el mercado y se escogerá justificadamente aquel que mejor se adapte a las necesidades concretas de este proyecto. Una vez seleccionado el programa que permita la

simulación CFD, se realizará el estudio del comportamiento térmico del molde junto con las variantes del sistema de refrigeración e incluirá:

- Creación de la malla más adecuada para encontrar las áreas más propensas a tener cambios sustanciales en la transferencia de calor, investigar su efecto y mejorarla.
- Establecer los parámetros y las condiciones de frontera más adecuados para simular el proceso de inyección de aluminio a alta temperatura como: materiales, temperaturas, velocidades en fluidos, densidades, solidificación, etc.
- Realización de la simulación para ambos tipos de molde diseñado.
- Estudio de los parámetros que afectan al sistema y modificación de los mismos con tal de mejorar la reacción del molde ante el enfriamiento.
- Razonar cuál de los sistemas de refrigeración es más eficiente y concluir si es ventajoso el uso de uno enfrente otro.

El proyecto no incluye el diseño de la pieza con la que se realiza el molde ni la realización de simulaciones de solidificación. No considera aspectos del proceso productivo de piezas de aluminio por fundición.

### **2.3. Objetivos de detalle y especificaciones técnicas**

Los objetivos y especificaciones técnicas del proyecto son las siguientes:

- Diseño de un molde para una máquina de cámara fría para procesos de conformación basados en la inyección de aluminio.
  - Diseño del patrón para una pieza de referencia determinada previamente. En la Fig. 2.1. se puede observar la pieza que se usará como referencia en todo el trabajo. La pieza trata de una bandeja con diferentes hendiduras pretendiendo realizar un molde para una máquina de inyección de aluminio. En la pieza, como se puede ver, están presentes los conductos de inyección, respiraderos, etc.
  - Dimensionamiento de los utillajes como: el cálculo del tiempo y caudal de llenado, espesor de ataque, velocidad y sección de entrada y de las dimensiones y velocidad del pistón. No se tendrá en cuenta el efecto de la ola que puede generar el pistón en la inyección, ya que requiere una simulación compleja del mismo.

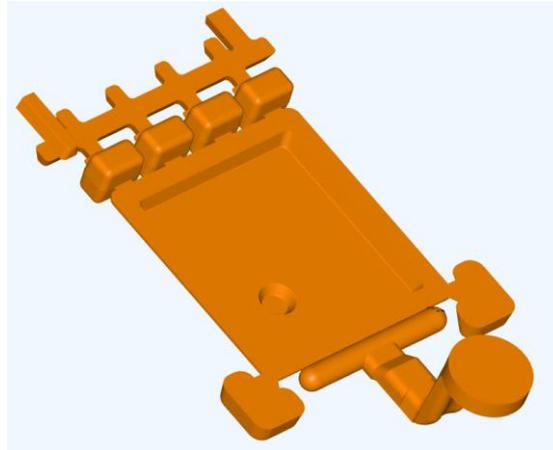


Fig. 2.1 Pieza de referencia con la que se diseñará el molde.

- Diseño de un sistema de refrigeración optimizado y convencional.
  - Diseño del sistema de refrigeración óptimo para el molde mediante unos tubos de refrigeración por los cuales circulará fluido refrigerante el cual realizará un recorrido determinado facilitando la transferencia de calor.
  - Diseño de un sistema de refrigeración convencional y uno óptimo basándose en los efectos de la teoría de la transferencia de calor.
- Simulación numérica del comportamiento térmico
  - Búsqueda de softwares CFD comerciales y libres que permitan realizar las simulaciones deseadas en este proyecto considerando los modelos matemáticos y físicos que aplican, los parámetros disponibles, precio, accesibilidad, complejidad de uso, librerías disponibles en internet. Se valorará el uso de elementos finitos o volúmenes finitos.
  - Realización del modelo CAD del molde en el software y del sistema de refrigeración.
  - Creación de la malla para realizar la simulación. Investigar el efecto de la malla y optimizarlo.
- Justificar el sistema de refrigeración.
  - Cálculo de transferencias de calor, caudales, parámetros de simulación y temperaturas a distintas velocidades del fluido.
  - Comparar temperaturas y flujo de calor del modelo simulado con el cálculo de la temperatura promedio de salida del agua y transferencia de calor.

- Comparación de los resultados de la simulación con el sistema de refrigeración óptimo y convencional.
  - Realizar simulaciones tanto para el sistema de refrigeración convencional como para el más óptimo.
  - Razonar si vale la pena la realización de sistemas de refrigeración óptimo respecto uno convencional.
- Investigación de los parámetros que afectan sobre el sistema.
  - Estudiar realizando diversas simulaciones modificando los parámetros que afectan a la transferencia de calor en el molde ya sea: caudal del fluido refrigerante, temperaturas, diámetros y dimensionamientos (los parámetros a variar se decidirán más adelante).

### 3. Introducción al proceso de inyección de aluminio

El aluminio es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre y el elemento metálico más abundante. El aluminio no se encuentra como elemento, sino que se encuentra combinado con otros componentes químicos como la bauxita.

En la industria es bastante interesante las utilidades y propiedades que tiene el aluminio y sus aleaciones. Tiene la particularidad de ser ligero -siendo sólo una tercera parte de la densidad que tiene el acero- y como el cobre, tiene una gran conductividad tanto de temperatura como de corriente. Además, tiene una gran resistencia a la corrosión en entornos problemáticos. Es muy valorado por su facilidad para ser reciclado. También tiene la ventaja de poder tratarse mediante fundición y ser transformado en una gran cantidad de bienes de consumo. [1]

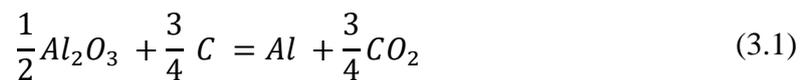
#### 3.1. Producción del aluminio

La bauxita es el elemento químico de la cual se extrae el aluminio. Está compuesta por una mezcla de hidróxidos de aluminio y de oxihidróxidos acompañados de óxidos de hierro, silicatos y otras impurezas. Se estima que en la naturaleza la bauxita se encuentra en 55-75 billones de toneladas repartidas entre continentes como África (33%), Oceanía (24%), Sud América y el Caribe (22%), Asia (15%) y el resto del mundo en un (6%).

Un paso esencial para la extracción de aluminio de la bauxita es la obtención de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Este proceso tiene diversas variaciones, pero todas parten de la patente de Karl Josef Bayer de 1888. El 90% de las industrias de aluminio actuales siguen usando el proceso de Bayer. Partiendo de minerales de suelo de laterita se disuelven en sosa cáustica caliente ( $\text{NaOH}$ ) haciendo que el óxido de hierro y el silicio no se disuelvan creando un lodo rojizo llamando a esto una digestión caustica. Este lodo rojizo pasa a una serie de tanques reductores de presión donde se pasa a presión atmosférica. Seguidamente se pasa a acumular el lodo rojo a la parte inferior de los tanques y se les añade floculante y deshidratante para limitar las impurezas que se puedan arrastrar durante los siguientes procesos. Los sólidos que quedan se lavan. De sodio decantado y licor de aluminato se precipita la gibbsita [ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ] (la gibbsita o también llamada tri-hidrato “*trihydrate*” tiene un mercado propio en el ámbito industrial). Esta gibbsita obtenida del circuito de precipitación mediante un

filtro se calcina y se calienta hasta 1000 °C para producir una gama de alúmina deshidratada. Seguidamente se da una calcinación parcial para producir una gran variedad de alúminas. Existen diversos tipos más de producción de alúmina, pero el más común es el de Bayer.

La alúmina es un polvo blanco que en la industria del aluminio puede ser comprada directamente por el fabricante en vez de ser producida por él mismo. Tiene un punto de fusión de unos 2050 °C y es un compuesto químico muy estable. Por eso, la obtención del aluminio requiere una gran cantidad de energía. Esta alúmina industrial se transporta a fosas de producción electrolítica de aluminio metálico. La producción de aluminio se da gracias a un proceso que dio a conocer Hall-Héroult en 1886 mediante una reacción electroquímica mezclando alúmina disuelta con carbón sólido. La reacción química se puede ver en la siguiente ecuación:



Como se puede observar en (3.1), la reacción que se da con la disolución de alúmina con carbón sólido genera aluminio fundido i dióxido de carbono en forma de gas. Se puede ver que la alúmina bruta en el proceso de Hall-Héroult se consume de manera estequiométrica: 1,89 kg de alúmina por 1 kg de aluminio, reaccionando con 0,33 kg de carbón y produciendo 1,22 kg de dióxido de carbono.

Para realizar el proceso de Hall-Heroult en la industria se realiza una reducción electrolítica. En un área industrial dedicada a la reducción que normalmente se da en edificios enteros encontramos miles de células de reducción en fila y conectadas a la red eléctrica mediante cables. Estas células están compuestas por electrodos configurados a una tensión de 4 a 6 V y una intensidad de 300 – 400 kA o incluso más. La base de la célula de reducción actúa como cátodo y está compuesto de bloques de carbón y criolita. Un conjunto de barras de carbón actúa como ánodo en la parte superior. En la Fig. 3.1 se puede observar la célula de reducción. El procedimiento se basa en llenar la célula de un material electrolítico que permita la conducción de electricidad. La alúmina se va abocando dentro de la célula mediante varios alimentadores volumétricos que van añadiendo 1 kg de alúmina cada minuto para garantizar una mezcla más rápida con el material electrolítico que suele ser criolita. La cantidad de alúmina en el material electrolítico tiene que ser de 2-3 wt% de alúmina, ya que si la cantidad de alúmina es muy alta puede amontonarse el material no mezclado justo en el

cátodo y demasiada poca cantidad puede generar riesgo de un fallo en el proceso del ánodo. Una vez la alúmina es mezclada con el material electrolítico la corriente eléctrica rompe los enlaces del aluminio y el oxígeno haciendo que el aluminio se deposite en el fondo de la célula y formando capas de 10-15 cm de espesor. El oxígeno, en cambio, se une con el carbón en el ánodo formando dióxido de carbono. Finalmente, el aluminio se extrae mediante técnicas de vacío. [1]

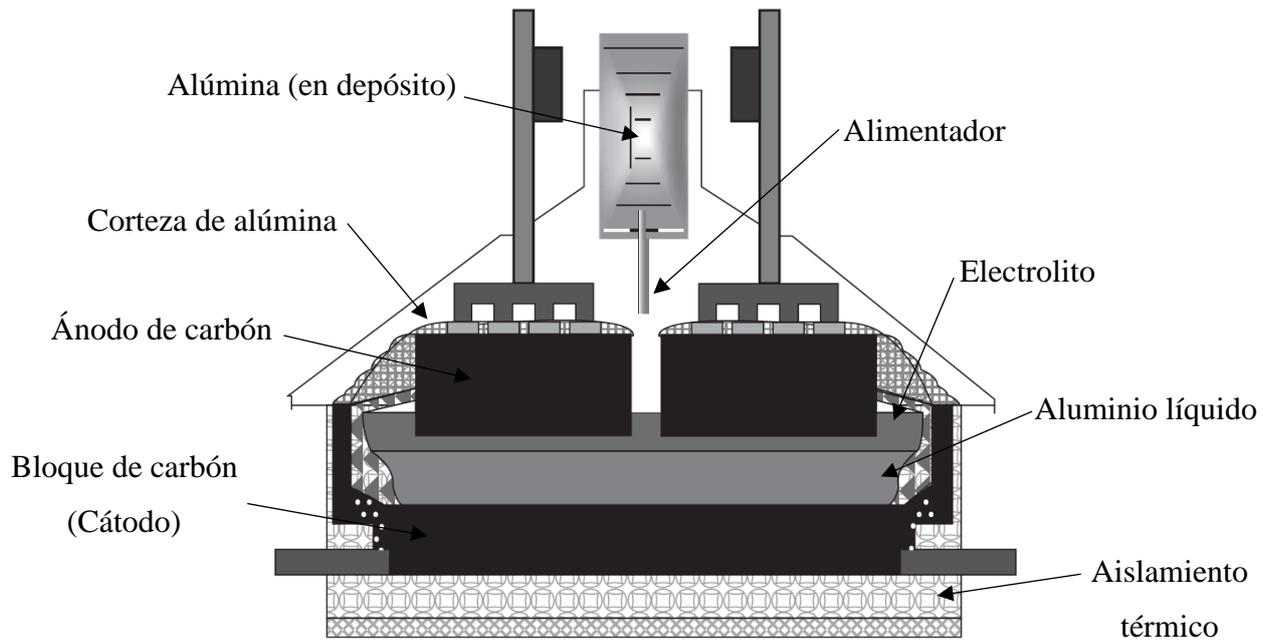


Fig. 3.1 Esquema de la célula electrolítica de reducción. [1]

Se requiere una gran cantidad de alrededor de 13 kWh para producir 1 kg de aluminio es por eso y por las grandes temperaturas necesarias que el aluminio se convirtió en un material de uso común no hace más de 150 años. El 50% del aluminio del mundo se produce mediante energía hidroeléctrica mientras que las demás fuentes de energía son: el carbón, en un 30 %; el gas natural, en un 15 %; y la energía nuclear, menos del 5 %.

Una vez adquirido el aluminio del área de reducción se transporta a la fundición. El aluminio no es del todo puro, ya que contiene algunos materiales como silicio, cobre, etc., que tienen un impacto negativo en las propiedades del aluminio. Con la fundición se eliminan estos elementos y se adquiere un aluminio más puro que finalmente se vierte en moldes y se deja solidificar. [1] [2]

## 3.2. Procesos de conformación del aluminio

Dentro del proceso de conformación de un metal existen diferentes metodologías para llegar a darle al material la forma deseada, ya sea manipulando su ductilidad, maleabilidad o mediante de fusión. El aluminio se caracteriza por ser un material muy maleable y que puede ser sometido a muchos procesos de conformación distinto. Entre otras metodologías están:

- Laminación: se basa en la deformación plástica pasando un material en frío o caliente entre dos cilindros que giran para reducir el espesor del mismo.
- Forja: basada en la deformación plástica y se realiza en caliente haciendo que el material se someta a fuerzas de compresión para cambiar su forma.
- Extrusión/trefilado: conformación del material haciéndolo pasar por un orificio de forma cónica mediante una herramienta llamada mandril.
- Embutición: deformación plástica mediante la presión de una lámina metálica contra una cavidad que la dejará con la forma de la misma.
- Doblado: deformación plástica que se realiza con láminas metálicas mediante su doblado.
- Arranque de viruta: mecanizado de un material separando su sobrante. Este tipo lo engloban:
  - El torneado: giro de la pieza a mecanizar y una o varias herramientas de corte van avanzando contra la pieza y arrancando material sobrante.
  - Fresado: giro de una herramienta de varios dientes que se mueve por la pieza, con la posibilidad de moverse en varios ejes, arrancando material sobrante.
  - Taladrado: giro de una herramienta llamada broca y a su vez avance hacia la pieza con el fin de realizar un agujero en ella.
  - Rectificado: se basa en arrancar el material sobrante mediante materiales abrasivos que giran a gran velocidad pudiendo devastar, rebajar, afilar, etc.
- Fundición: técnica consistente en fundir un material y verterlo en un molde hasta que se enfríe y se solidifique con la forma del molde para finalmente extraerlo. [3]

Para la producción de piezas de aluminio el método principal que se utiliza es la fundición, ya que el aluminio puro tiene una alta fluidez, bajo punto de fusión (660 °C) y una tendencia baja a roturas por cambios de temperatura. La fundición de aluminio se puede producir

mediante prácticamente todos los procesos de conformación de fundición disponibles permitiendo así la producción de piezas con una gran utilidad en la ingeniería.

### **3.3. Fundición del aluminio.**

El proceso de producción más utilizado para la fabricación de grandes volúmenes de piezas de aluminio es la fundición a alta presión (HPDC). Este método se ha ido mejorando bastante en los últimos años. Para volúmenes de producción más bajos encontramos la fundición a baja presión (LPDC).

La capacidad de las máquinas de fundición de alta presión HPDC vienen determinadas según su fuerza de bloqueo que define la cantidad máxima que puede producir. La matriz o molde tiene que estar bien diseñada y optimizada para asegurar una buena calidad de las piezas de fundición. Estos moldes suelen ser bastante caros, pero tienen una vida útil elevada pudiendo llegar a realizarse unas 100.000 piezas con él.

Existen dos tipos de máquinas HPDC: las llamadas máquinas de fundición a presión en cámaras frías y las de cámaras calientes.

En las máquinas de cámaras frías el aluminio se funde en la cámara de la máquina donde el sistema de inyección, basado en un cilindro y un pistón, está en contacto con el metal fundido por un tiempo llamado tiempo de demora para crear un fluido más inmóvil. Las paredes del cilindro, pistón y molde se mantienen a una temperatura de 200 – 300 °C. El pistón empuja al metal fundido lentamente durante unos 1 – 7 segundos y después es acelerado para inyectarlo a alta velocidad de aproximadamente 50m/s para rellenar la cavidad del molde en 0,01 – 0,3 segundos. El contacto de la superficie con el metal fundido genera una transferencia de calor elevada de un rango de  $10^4 - 10^5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ . Se generan agujeros de aire entre el material que se contrae y la transferencia de calor se reduce considerablemente. Después de que la cavidad está completamente llena se aumenta la presión hasta 120 MPa para aumentar la alimentación de metal en el molde y para prevenir la contracción de la solidificación mientras se va solidificando la pieza. Este aumento de presión incrementa la transferencia de calor entre el molde y el metal y por tanto aumenta el ratio de enfriamiento.

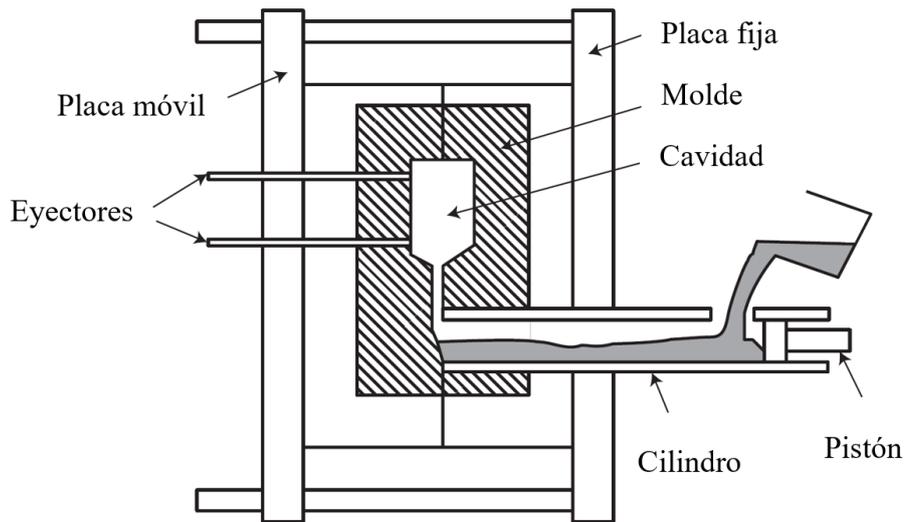


Fig. 3.2 Esquema de una cámara fría de una máquina de HPDC. [1]

En cambio, en las máquinas de fundición en cámara caliente una parte significativa del metal del sistema de inyección no es vertido en él, sino que se sumerge el sistema de inyección en el metal fundido permanentemente lo que ayuda a mantener el ciclo al mínimo, ya que el metal fundido necesita moverse una distancia más corta cada ciclo. En las cámaras calientes los ciclos son muy rápidos varían entre 1 segundo para piezas de pocos gramos a 30 segundos para fundiciones de piezas de grandes quilos. Normalmente éstas se usan para metales con un punto de fusión bajo como el plomo o el zinc. [4]

Una de los defectos en las piezas diseñadas mediante HPDC es la porosidad del material resultante debido a la acumulación de aire durante el llenado (sobre todo si la inyección genera que el metal entre como turbulento) y durante la contracción de la solidificación del material. Esta misma porosidad puede traer problemas como la concentración de tensiones en aplicaciones estructurales que puede crear roturas y la generación de burbujas durante posibles tratamientos térmicos posteriores.

Para evitar este problema es interesante la aplicación de los llamados procesos de alta integridad en los casos de un alto volumen de producción. Estos métodos eliminan o disminuyen notablemente la porosidad y dan unas propiedades mecánicas mejoradas al material debido a la posibilidad de realizarse posteriormente tratamientos térmicos o debido a la generación de microestructuras en el material:

- La fundición en vacío es una técnica que consiste en extraer el gas del molde durante la inyección del metal mediante válvulas de vacío en las cavidades del molde.
- Fundición por compresión donde el material se va inyectando de manera lenta y a alta presión evitando así que el fluido genere un flujo turbulento y por lo tanto la reducción de burbujas en la solidificación.
- Proceso semisólido donde el metal inyectado está parcialmente solidificado y fundido y se inyecta en el molde. De esta manera se evita que la contracción del metal sea agresiva y así reduciendo la generación de burbujas considerablemente. Además, este método genera una microestructura superior a la que se genera con una inyección convencional y alarga la vida útil del molde.
- Técnica de tixotropía en la que la viscosidad del fluido variará. Se basa en la metalurgia de tixotropía avanzada (ATM). Se emplea una sección que restringe el paso del fluido y un pre-condicionador de fundido. En el cilindro de inyección se generan cristales equiaxiales en el metal previamente a ser inyectado en el molde. Se crea una cizalla acelerando el fluido antes de inyectarlo de manera que se genere una estructura más pequeña y globular de los cristales haciendo que la microestructura final sea más libre de porosidad. La viscosidad del metal disminuirá debido a la reducción de los cristales y de la estructura. También permite que la reducción del tiempo de llenado mejore la ventilación de la cavidad expulsando los gases. [1] [4]

La fundición a baja presión (LPDC), como se puede observar en la Fig. 3.3, consiste en un horno o cámara que contiene el metal fundido y un tubo de subida que conecta el metal fundido con la parte inferior del molde. Durante el proceso el metal asciende por el tubo llenando el molde mediante la aplicación de presión mediante un gas. El llenado del molde se hace lentamente para evitar la formación de burbujas debido a la generación de un fluido turbulento. Cuando el metal se ha solidificado la presión en la cámara disminuye devolviendo el metal fundido hacia la parte baja. Se pueden realizar hasta 10 inyecciones sin volver a rellenar de metal. [1] [4]

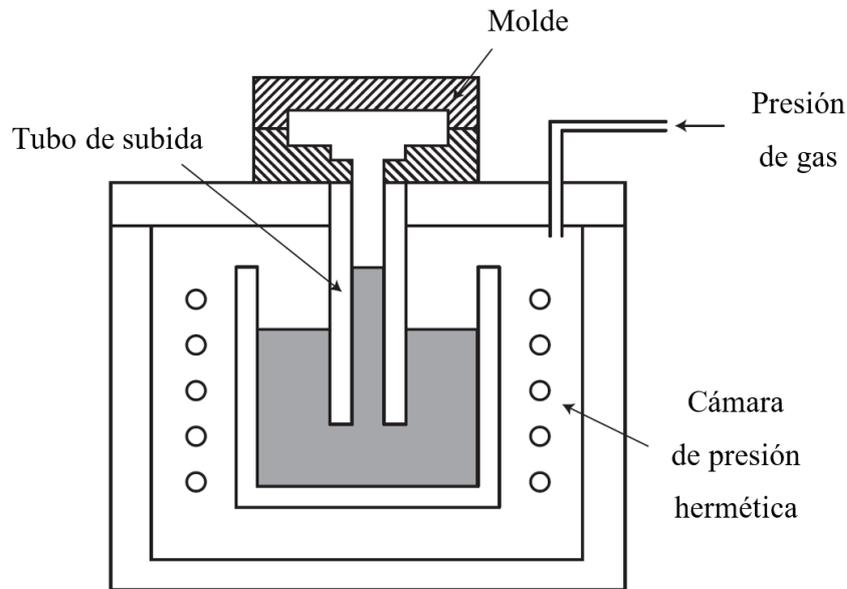


Fig. 3.3 Esquema del proceso LPDC. [4]

También se encuentra la fundición por gravedad en la que al igual que HPDC y LPDC son métodos de molde permanente y tienen un revestimiento de material refractario. En estos el metal se vierte en un molde por gravedad. Se suelen utilizar cuando el volumen de producción es alto en productos metálicos con un grosor en las paredes muy uniforme. Pueden ser manuales y automáticos y el tiempo es de unos 4 – 10 minutos, por lo que es un proceso lento.

La fundición por centrifugado es una variedad que se basa en hacer girar el molde sobre un eje haciendo que la fuerza centrífuga obligue al metal fundido a rellenar todas las cavidades del molde. Tiene la ventaja de poder obtener piezas compactas, pero la segregación por densidades implica que no todas las aleaciones se puedan usar con este método.

La fundición por moldes de arena es otra alternativa que se basa en realizar moldes de arena con el patrón en negativo de la pieza a realizar. El tamaño del molde es algo superior a la pieza deseada para tener en cuenta la contracción del material en la solidificación. Este método antiguamente era muy costoso y se realizaba para pequeños volúmenes de producción, pero en la actualidad es posible la automatización en la realización de los moldes de arena. Estos moldes de arena tienen impurezas y variaciones en la superficie que afectan a la pieza final. Los tipos de arena pueden ser dos:

- Arena verde: resulta ser una mezcla entre arena de sílice, de cromita, arcilla agua y otros aditivos.
- Arena seca: una mezcla entre arena y adhesivo de curado rápido.

Dentro del ámbito de la fundición de arena existe el proceso de Cosworth que se desarrolló para producir el motor con el mismo nombre. Se basa en un molde de arena modificando la sílice por zirconio que tiene unas propiedades de expansión térmica más baja por lo que la precisión es mayor. Este tipo de arena es más cara, pero al igual que la de sílice es reutilizable. La inyección al molde se da mediante una bomba con el mínimo de turbulencia que se encuentra debajo del molde como pasa en el LPDC. [1]

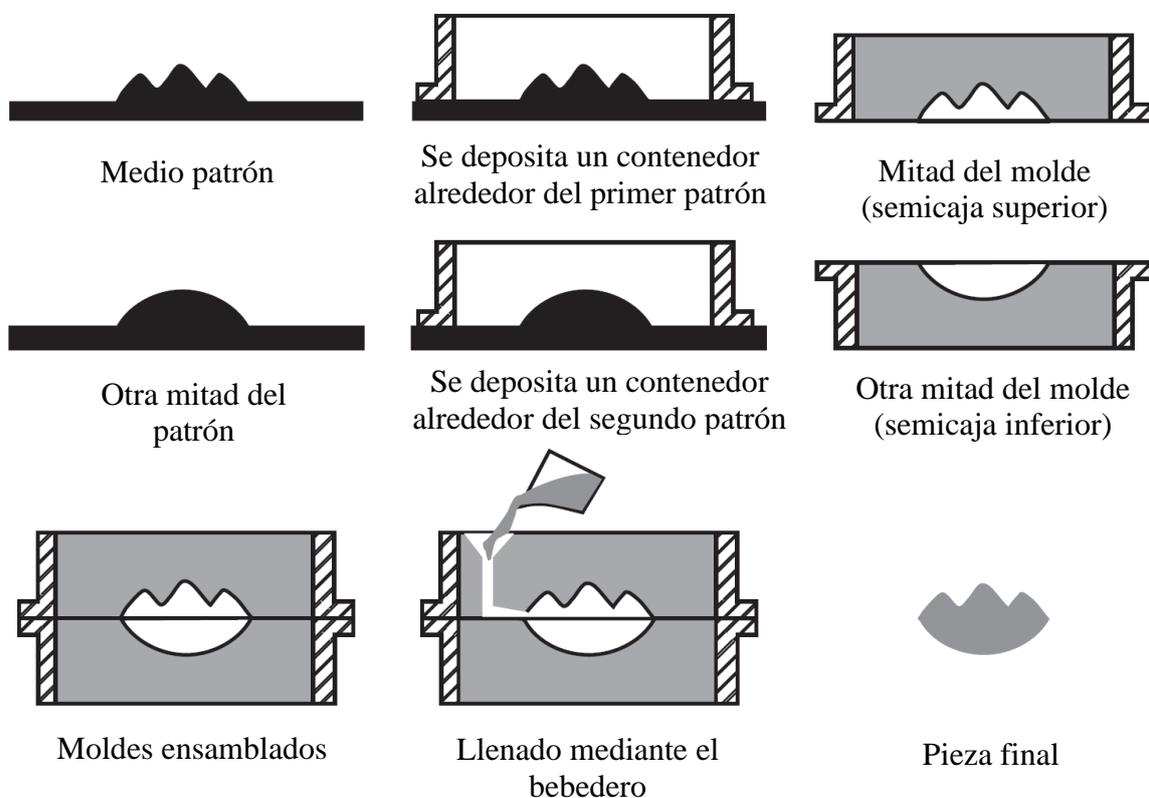


Fig 3.4 Esquema del proceso de fundición por molde de arena. [1]

La porosidad es un aspecto que determina la calidad que tendrá la pieza final, es por eso que limita el uso del proceso de fabricación por fundición y su aplicación a gran escala. La detección de la porosidad es difícil y en muchos casos procesos de mecanización siguientes a la fabricación de la pieza pueden cortar por esa porosidad no detectada haciendo que la integridad de la pieza se vea afectada.

Como se ha comentado anteriormente, algunos metales tienen una mayor densidad en estado sólido que en líquido y es por eso que durante la solidificación se produce una contracción que genera la porosidad dentro del material. A su vez, una entrada del metal al molde de una forma turbulenta puede generar gas atrapado dentro del metal resultando en porosidades en la solidificación. La porosidad, por lo tanto, viene dada por la contracción debida a la solidificación de la pieza y por el gas atrapado. Estudios han intentado entender como la porosidad varía dentro de los procesos de fundición a presión. Hay un método que cuantifica la porosidad en los moldes de fundición:

$$\text{Porosidad [\%]} = (\text{contracción por solidificación}) + (\text{contribución de gas}) \quad (3.2)$$

Que paramétricamente se puede describir como:

$$\text{Porosidad [\%]} = \frac{\beta \cdot V'}{V_c} + \left( \phi \frac{T \cdot \rho L}{(237 \text{ } ^\circ\text{K})P} \right) (v - v') \quad (3.3)$$

Donde:

$\beta$ : Porcentaje del factor de contracción por solidificación.

$V'$ : Volumen de líquido en la cavidad de fundición que no se abastece como líquido durante la solidificación [ $\text{cm}^3$ ].

$V_c$ : Volumen de la cavidad de fundición [ $\text{cm}^3$ ].

$T$ : Temperatura del gas en la cavidad de fundición [K].

$P$ : Presión aplicada al gas durante la solidificación [atm].

$\phi$ : Fracción del gas que no afecta a los poros de la contracción por solidificación

$\rho$ : Densidad del metal en la temperatura de fundido [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ].

$v$ : Cantidad del gas contenido en la fundición en condiciones estándar de temperatura y presión (273 K y 1 atm) [ $\text{cm}^3$  por 100g].

$v'$ : Límite de solubilidad del gas en el sólido en la temperatura sólida en condiciones estándar de temperatura y presión [ $\text{cm}^3$  por 100g]

La ecuación (3.3) describe la porosidad debido al gas atrapado. El gas es atrapado debido a un atrapamiento físico, debido a una descomposición del lubricante y debido al gas disuelto

en la aleación. Se puede describir este efecto en centímetros cúbicos en temperatura y presión estándar por 100 g como:

$$v = v_{arrastrado} + v_{lubricante} + v_{gas\ disuelto} \quad (3.4)$$

Además, hay que destacar que otros factores como las microestructuras surgidas por la fundición a presión que generan imperfecciones en la pieza. Normalmente para alterar la microestructura interna de una pieza se recurre al uso de tratamientos térmicos, pero puede que no sea una solución en este caso, ya que en la pieza pueden aparecer otros defectos como la proliferación de burbujas. Los procesos de producción que generan una porosidad nula son los ya explicados anteriormente procesos de fundición a presión de alta integridad.

### 3.4. Transferencia de calor.

La transferencia de calor se basa en la ciencia que determina las razones por las que la energía se puede transmitir de un sistema a otro a causa de la diferencia de temperatura.

La energía puede existir de diferentes formas: térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, etc. La energía interna de un cuerpo se puede considerar como la suma de energía cinética y potencial de las moléculas que lo conforman. La energía de un cuerpo relacionada con la energía cinética de sus moléculas se le conoce como calor sensible. En cambio, cuando se ejerce una energía sobre las moléculas de un sólido o líquido, se realiza un cambio de fase que conlleva al sistema a volverse a fase gaseosa con un nivel más alto de energía interna. Esta energía relacionada con la fase de un sistema se la conoce como calor latente. Por lo tanto, la transferencia de calor es el intercambio de las formas sensibles y latentes de energía térmica entre dos medios a causa de un diferencial térmico.

La energía se puede transferir mediante el calor (Q) y el trabajo (W). A la energía térmica intrínseca se le llama calor y a la transferencia de energía térmica entre cuerpos se le llama transferencia de calor. La transferencia de calor producida por unidad de tiempo viene a ser la razón de transferencia de calor y viene ligado como:

$$Q = \int_0^{\Delta t} \dot{Q} \cdot dt \quad (3.5)$$

En (3.5) se puede observar que la razón de transferencia de calor puede determinar la cantidad total de transferencia de calor en un intervalo de tiempo  $\Delta t$ . Las unidades de la transferencia de calor son los Joules (J) y la de la razón de transferencia de calor los Joules por segundo o Watts (J/s o W). Si además se obtiene que la razón de transferencia de calor es constante:

$$Q = \dot{Q}\Delta t \quad (3.6)$$

La razón de transferencia de calor por unidad de superficie se llama flujo de calor que se expresa como:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (3.7)$$

Para los sistemas donde hay transferencia de calor cuando no se comprenden cambios en la velocidad, elevación, etc., su energía total viene determinada por la energía interna. El cambio de la energía interna en un cuerpo se refleja en (3.9) y viene determinado por su masa ( $m$ ), su calor específico a volumen constante ( $c_v$ ) o cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura del fluido en un grado, y el incremento de temperatura ( $\Delta T$ ). En cambio, cuando se habla de un sistema que solo sufre de transferencia de calor y no de trabajo la ecuación se simplifica dando lugar solo a la cantidad neta de transferencia de calor que entra o sale del sistema ( $Q$ ).

$$E_{ent} - E_{sal} = \Delta U = mc_v\Delta T \quad (3.8)$$

$$Q = mc_v\Delta T \quad (3.9)$$

En sistemas en los que se implica un flujo de masa, mayormente siempre se analizan en condiciones estacionarias. La masa que fluye a través de una sección o conducto por unidad de tiempo se le llama razón de transferencia de masa por unidad de tiempo y es proporcional a la superficie que atraviesa, la densidad y la velocidad del fluido. Se considera que el flujo por un conducto suele ser unidimensional aproximando la razón de transferencia de masa como:

$$\dot{m} = \rho v A \quad (3.10)$$

Donde la razón de transferencia de masa es directamente proporcional a la densidad ( $\rho$ ), la velocidad promedio ( $v$ ) y la superficie que atraviesa el fluido ( $A$ ). En un sistema de flujo estacionario la razón de transferencia de masa, al igual que la energía en el caso de un sistema cerrado, se tiene que conservar:

$$E_{\text{entrada}} = E_{\text{salida}} \text{ (en sistemas de flujo estacionario)} \quad (3.11)$$

$$\dot{m}_{\text{entrada}} = \dot{m}_{\text{salida}} \text{ (en sistemas de flujo estacionario)} \quad (3.12)$$

Para un sistema de flujo estacionario con una entrada y salida donde no se da trabajo y se desprecian los cambios en energía cinética y potencial, el balance de energía en tal sistema se reduce a:

$$\dot{Q} = \dot{m}\Delta h = \dot{m}c_p\Delta T \quad (3.13)$$

La transferencia de calor siempre se da del medio que tiene más temperatura al de temperatura más baja y se detiene una vez los dos medios consiguen la misma temperatura. La transferencia de calor puede darse de tres modos diferentes:

- **Conducción:** es la transferencia de calor mediante las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas. Suele ocurrir en los sólidos opacos y con radiación en los semitransparentes. Puede darse en elementos líquidos y gaseosos debido a las colisiones de las moléculas durante su movimiento aleatorio y en los sólidos como la combinación de las vibraciones de las moléculas en retícula y al transporte de energía por medio de los electrones libres.

La rapidez de la conducción depende de la geometría del medio, espesor, material y de la diferencia de temperatura. Cuando se duplica la superficie y la diferencia de temperatura, pero se reduce a la mitad el espesor de una pared plana se obtiene que la razón de transferencia de calor es duplicada. Por lo tanto, la razón de conducción de calor en una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura y a la superficie de transferencia, pero inversamente proporcional al espesor de la capa. En

(3.14) se refleja la ley de Fourier de la conducción de calor, donde aparece la constante de proporcionalidad de la conductividad térmica en un material ( $k$ ).

$$\dot{q}_{cond} = -k\nabla T \quad (3.14)$$

El signo negativo en (3.14) garantiza que, en el caso de una transferencia de calor en dirección de la temperatura más baja, sea una cantidad positiva.

- **Convección:** se basa en el modo de transferencia de calor entre una superficie sólida y una líquida o gas adyacente que puede estar en movimiento y combina el efecto de la conducción y el movimiento de fluidos. La transferencia de calor por convección es mayor cuando más rápido es el movimiento del fluido. La convección puede ser forzada, si el fluido es forzado a moverse mediante un efecto externo; o puede ser natural o libre si el movimiento es causado por fuerzas inducidas por la diferencia de densidad debido a la variación de temperatura. Los procesos de cambio de fase que surgen de la transferencia de calor también son considerados como convección resultada del movimiento del fluido inducido durante el proceso. En (3.15) se observa que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y es expresada por la ley de Newton del enfriamiento:

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (3.15)$$

Donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección. El coeficiente de transferencia de calor es un parámetro definido de forma experimental que determinado teniendo en cuenta todas las variables que afectan en el fenómeno de la convección: geometría de la superficie, movimiento del fluido, propiedades del fluido y velocidad del mismo.  $A$  es la superficie donde se da la transferencia de calor,  $T_s$  es la temperatura en la superficie y  $T_\infty$  es la temperatura del fluido alejado a esta superficie.

En convección puede ser recurrente encontrar el número de Nusselt ( $Nu$ ) como número que describe el mejoramiento de la transferencia de calor a través de una capa de un fluido como resultado de la convección en relación a la conducción. El número de Nusselt viene definido como:

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (3.16)$$

Donde  $k$  es la conductividad térmica del fluido,  $L_c$  es la longitud característica y  $h$  el coeficiente de transferencia de calor. Para quitar las dimensiones del coeficiente de transferencia de calor es común utilizar este número.

- Radiación: como la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas resultado de reacciones electrónicas de los átomos y de la temperatura. En este fenómeno y a diferencia de los dos anteriores no son necesarias las presencias de un medio interventor. Es un fenómeno volumétrico por lo que todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación de diversas maneras. La razón máxima que se puede emitir por una superficie y a una temperatura termodinámica se expresa por la ley de Stefan-Boltzmann:

$$\dot{Q}_{m\acute{a}x} = \sigma AT^4 \quad (3.17)$$

En (3.17) se encuentra la constante de Stefan-Boltzmann como  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$ . Se considera como superficie ideal al cuerpo que emite radiación en su razón máxima a un cuerpo negro. Esta es la radiación máxima por lo que todas las superficies reales emitirán menos radiación que la del cuerpo negro a la misma temperatura. En (3.18) se expresa la radiación emitida por un cuerpo real:

$$\dot{Q}_{m\acute{a}x} = \varepsilon \sigma AT^4 \quad (3.18)$$

En esta última ecuación (3.18) se añade la emisividad de la superficie que expresa como de cerca está un cuerpo de ser un cuerpo negro y va comprendida entre 0 y 1. Una radiación en una superficie también puede absorber radiación. Un cuerpo negro absorbe toda la radiación que incide sobre él. En este aspecto aparece la absorptividad ( $\alpha$ ) la cual es la fracción de radiación incidente sobre la superficie de un cuerpo la cual es absorbida por el mismo. Tanto la emisividad como la absorptividad dependen de la temperatura y longitud de onda de la radiación. La ley de Kirchhoff de radiación explica que la emisividad y absorptividad de una superficie a una temperatura y longitud de onda determinadas son iguales. La razón por la cual una superficie absorbe radiación se determina partir de:

$$\dot{Q}_{absorvida} = \alpha \dot{Q}_{incidente} \quad (3.19)$$

Si la absorción de radiación es mayor que la de emisión se dice que la superficie gana energía. De lo contrario, se dice que está perdiendo energía.

Cuando se da el caso que una superficie con emisividad ( $\epsilon$ ) con área superficial ( $A$ ) y a una temperatura determinada está completamente encerrada por una superficie mucho más grande con una temperatura distinta y separadas por un gas que no interfiere en él, se dice que la razón de transferencia de calor viene dada por:

$$\dot{Q}_{m\acute{a}x} = \epsilon \sigma A (T_{superficie}^4 - T_{entorno}^4) \quad (3.20)$$

La radiación suele ser bastante significativa en relación con la conducción o convección natural, pero no con la convección forzada. En aplicaciones de convección forzada se suele descartar la radiación, sobre todo cuando las superficies que intervienen tienen emisividades y temperaturas bajas.

El flujo de calor y la distribución de temperatura en un medio depende de las condiciones de la superficie por lo que la descripción de un problema de transferencia de calor tiene que incluir las condiciones térmicas en las superficies aledañas. Es la expresión matemática de las condiciones térmicas en las fronteras se llama condiciones de frontera.

Existen varios tipos de flujos en un fluido dependiendo si estos son ordenados o más caóticos. Un flujo muy ordenado donde el movimiento se caracteriza por ir en capas suaves se le conoce como flujo laminar. Normalmente este tipo de flujo se da en los fluidos altamente viscosos como el aceite en casos de bajas velocidades. El flujo caracterizado por ser muy desordenado y normalmente en altas velocidades se caracteriza por tener fluctuaciones que lo hacen turbulento. Es común encontrarlos en fluidos de baja viscosidad y a altas velocidades. En cambio, el fluido que se encuentra entre laminar y turbulento se le conoce como transición.

La transición de flujo laminar a turbulento depende de la geometría de la superficie, aspereza superficial, de la velocidad y tipo de flujo y de la temperatura de la superficie. El régimen de flujo, por lo tanto, depende de las fuerzas de inercia a las fuerzas viscosas que tiene el

fluido. Esta razón se puede describir con un número adimensional llamado número de Reynolds ( $Re$ ). Viene determinado por:

$$Re = \frac{F_{inercia}}{F_{viscosas}} = \frac{vL_c\rho}{\mu} \quad (3.21)$$

En (3.21) se puede observar que el número de Reynolds viene determinado por la velocidad de corriente del fluido ( $v$ ), la longitud característica de la configuración geométrica ( $L_c$ ) y de la viscosidad cinemática del fluido ( $\mu/\rho$ ). Cuando el número de Reynolds es grande, las fuerzas de inercia (proporcionales a la densidad y velocidad del fluido) son grandes en relación con las viscosas y por lo tanto no impiden que haya un flujo aleatorio. Sin embargo, cuando el número de Reynolds es pequeño, las fuerzas viscosas pueden impedir las fluctuaciones y mantienen alineado al fluido, es entonces cuando se obtiene un flujo laminar. En aquellas condiciones en las que el fluido está en transición, al número de Reynolds se le llama crítico. [5]

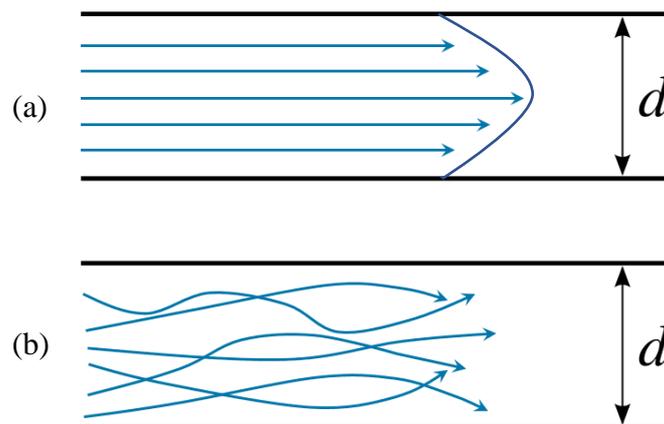


Fig. 3.5 (a) esquema de flujo laminar. (b) esquema de flujo turbulento.

Todos los fluidos se pueden comprimir, pero se considera el flujo de un fluido a bajas velocidades como incompresible. Hay que destacar que normalmente se considera que cuando la velocidad de un flujo es cercana a la velocidad del sonido se crea un salto o variación no gradual de densidad en el mismo y se puede considerar como compresible. Hay un límite en que un fluido fluyendo puede ser compresible o no y viene determinado por el número de Mach ( $Ma$ ) que viene dado por:

$$Ma = \frac{v}{c} \quad (3.22)$$

Como se observa en (3.22), el número de Mach viene determinado por la velocidad del fluido ( $v$ ) y por la velocidad del sonido ( $c$ ) en el fluido que a temperatura ambiente y a 1 atmósfera es de 346 m/s. Los flujos en gases se consideran incompresibles si el número de Mach es  $Ma < 0,3$ . Un flujo puede tener diversos regímenes dependiendo de cuál sea el número de Mach que lo represente. En la Tabla 3.1 se puede apreciar el régimen en el que se encuentra un fluido dependiendo del número de Mach. [5]

<b>Régimen de un fluido según el número de Mach</b>	
$Ma < 0,3$	Flujo incompresible
$0,8 < Ma < 1,2$	Flujo transónico
$1,2 < Ma < 5$	Flujo supersónico
$5 < Ma < 10$	Flujo hipersónico
$10 < Ma < 25$	Flujo altamente hipersónico

Tabla 3.1 Regímenes de un fluido según el número de Mach. Fuente: propia.

## 4. Introducción a la simulación numérica

### 4.1. Funcionamiento de la simulación numérica

La simulación numérica es el estudio de un sistema físico que, mediante herramientas de computación y partiendo de un modelo matemático, es capaz de entender el comportamiento y en torno del sistema a estudiar. La simulación numérica es muy útil para analizar y entender sistemas complejos cuyo modelo matemático es muy difícil de resolver analíticamente.

Durante años, a la hora de diseñar un producto o estudiar el comportamiento de un elemento se ha recurrido a las pruebas mediante un modelo construido, ya sea a escala o no. Esto genera un coste económico y un impacto económico considerable, ya que el modelo es posible que necesite ser ensayado varias veces y, por ende, construido en varias ocasiones. La simulación numérica permite eliminar este procedimiento realizando un testeado mediante simulaciones por ordenador a partir de un modelo matemático del objeto a estudiar. Es normalmente llamado un testeado virtual o prototipo virtual.

El funcionamiento del software dedicado a realizar la simulación numérica se basa en dividir el modelo virtual en pequeños trozos, generando una malla y en cada uno de sus nodos aplicando ecuaciones que resuelven ecuaciones diferenciales parciales (PDE). Algunos de los métodos más utilizados son:

- Método de los elementos finitos (FEM) que normalmente se utiliza para cuerpos de geometrías complejas, materiales combinados y aquellos que sufren grandes deformaciones. Este método discretiza el dominio de un cuerpo en elementos con una forma más simple llamadas elementos con un cierto grado de libertad (DOF). Seguidamente, se formula las ecuaciones en cada uno de los nodos de cada elemento y finalmente se ensambla las ecuaciones que generarán el resultado del modelo total. Es necesario establecer las condiciones de frontera para generar un sistema de ecuaciones resoluble.
- Método de las diferencias finitas (FDM) comúnmente utilizado para resolver problemas de mecánica de fluidos y de transferencia de calor. Este método, a diferencia del de los elementos finitos, se basa en una aproximación a la hora de aplicar la malla la cual tiene una estructura determinada. Entonces resuelve las

ecuaciones mediante una diferenciación finita. No se suele utilizar para geometrías complejas sino para formas rectangulares. En la Fig. 4.1 se puede observar la diferencia entre una malla desestructurada usada en FEM y una malla estructurada usada en FDM.

- Método de los volúmenes finitos (FVM) en vez de cada nodo las características del objeto se calculan en cada celda o volumen de control. En este caso, las ecuaciones diferenciales parciales que se aplican se expresan como ecuaciones de conservación, por lo tanto, la aplicación de ecuaciones diferenciales parciales en los volúmenes resulta como ecuaciones de equilibrio y lo que entra en una celda determinada debe liberarse por la celda adyacente. Normalmente este método es usado para problemas de mecánica de fluidos donde existe flujo. [6] [7]

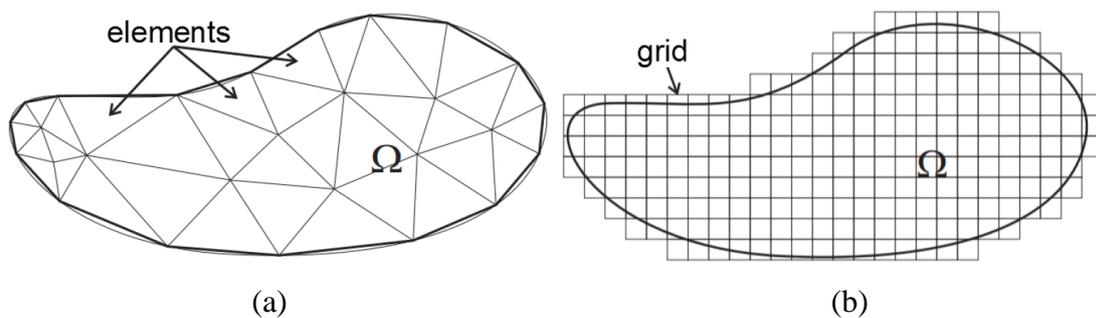


Fig. 4.1 (a) Malla desestructurada en FEM; (b) malla estructurada en FDM. [8]

En la simulación numérica es de gran importancia la densidad o el tamaño de los elementos en la generación de la malla, ya que estos es uno de los factores que determinan cuan preciso será el cálculo. La división del dominio de toda la geometría del objeto en elementos es al que se conoce como mallado. En el método de los elementos finitos es en los nodos de esta malla donde se realiza el cálculo de las ecuaciones diferenciales parciales (PDE) por lo que cuántos más nodos se tengan, más densa será la malla y más cálculos se realizarán generando un resultado muy preciso. Cabe destacar que cuántos más fina es la malla y más nodos tiene el objeto, más cálculos tiene que hacer el software conllevando a un incremento del tiempo de cálculo. Por lo tanto, el número de elementos de una malla tiene que ser razonable. Para tener un mallado más óptimo se suele recurrir a un mallado refinado con más número de elementos en zonas del objeto donde se prevea que puede haber grandes cambios en las variables a estudiar y en las zonas menos relevantes realizar un mallado menos denso. Las mallas suelen clasificarse como:

- Mallas estructuradas: la estructura permite una fácil identificación de las celdas vecinas. Se pueden enumerar las celdas o nodos de tal manera que sirvan como unas coordenadas. La numeración se reduce de tal manera que la celda  $n$  tenga a su derecha una celda con la numeración  $n + 1$ . De esta forma siempre se conoce la numeración de las celdas adyacentes. Se suelen utilizar para objetos con una estructura cúbica o similar que permitan una estructura regular.
- Mallas desestructuradas: es una estructura más arbitraria y suele adaptarse a cualquier tipo de geometría. A diferencia de las mallas estructuradas estas necesitan una estructuración de los datos como una matriz de adyacencia o una lista de nodos, ya que la numeración de sus celdas es arbitraria. En este tipo de estructuras se pueden dividir según si son de 2 dimensiones i 3 dimensiones.
- Mallas híbridas: este tipo de mallas combina en las zonas más regulares una malla estructurada y en las zonas más complejas, una malla desestructurada. Con esto se consigue realizar un mallado lo más óptimo posible. [6]

Hay que destacar que existen softwares para la generación de mallas y algunos ya son incluidos en los softwares de simulación. En estos softwares puede existir la posibilidad de hacer un refinamiento de la malla consistente en añadir puntos a las celdas para recortar la longitud de los elementos de la malla. Esto permite aumentar la resolución de la malla haciendo a su vez que aumenten las ecuaciones a resolver. También es posible un desrefinamiento en el cual se reducen el número de celdas en regiones poco relevantes. Además, existe la posibilidad de realizar movimientos en las mallas llevando a una alta densidad a aquellas zonas relevantes del cuerpo para que se generen más cálculos con la ventaja de no variar el número de celdas total de la malla (véase Fig. 4.2). [6] [9]

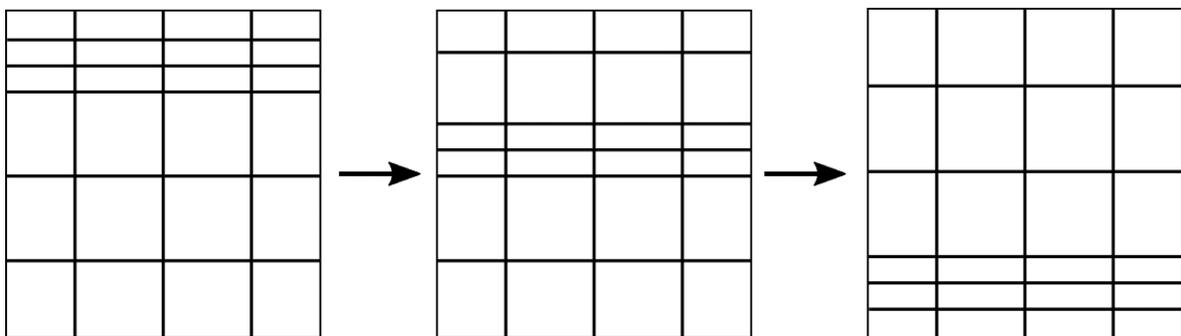


Fig. 4.2 Movimiento de mallas. [9]

En una simulación transitoria el tiempo de procesado se divide en “*time steps*” dentro del cálculo del desarrollo dinámico de las variables a estudiar. Este es otro parámetro que tiene influencia dentro de la precisión en el resultado de la simulación; cuanto menor sea, más preciso será el resultado para las variables cambiantes en el tiempo. Por consiguiente, un tiempo pequeño de “*time step*” conllevará a más cantidades de cálculo en el tiempo y a un tiempo de computación más elevado. [6]

## **4.2. Computational fluid dynamics**

Esta rama de la simulación numérica ha acabado siendo una de las disciplinas más utilizadas para resolver problemas complejos en la ingeniería moderna. *Computational fluid dynamics* (CFD) o la dinámica de fluidos computacional trata principalmente la simulación numérica de fluidos en movimiento y transferencia de calor. Con herramientas de CFD se consigue adquirir un gran conocimiento del comportamiento y reacción de los sistemas a estudiar, los cuales pueden ser mejorados en su diseño. Debido a la eficacia que ofrece la computación a la hora de hacer cálculos y la gran aceptación que tiene esta herramienta CFD en la industria y en la educación, esta disciplina continúa abriéndose camino en diferentes ámbitos como la investigación, la ingeniería química, civil, medioambiental, aeronáutica, biomédica, etc. [10]

Algunas de las ventajas de la técnica de CFD son:

- Permite estudiar detalladamente las ecuaciones gobernantes de un cuerpo y abrir nuevos caminos en el desarrollo teórico de estas disciplinas que no hubieran sido posibles sin la ayuda de la computación.
- Es una alternativa a realizar un estudio experimental y analítico reduciendo considerablemente el tiempo y coste de diseñar y producir un prototipo.
- Tiene la capacidad de simular condiciones de flujo muy duras que no son posibles de recrear experimentalmente como recrear escenarios geofísicos o biológicos. Por ejemplo, es posible realizar pruebas de seguridad nuclear o simular los efectos de un accidente.
- Puede ofrecer una respuesta detallada, visual y comprensible de la información.
- Permite realizar alternativas en el diseño a evaluar cambiando la dirección del flujo o modificando rangos de parámetros adimensionales como el número de Reynolds, Mach o Rayleigh.

El aumento de la accesibilidad a muchos softwares comerciales de CFD para uso doméstico hacen posible que los usuarios necesiten un conocimiento de código distinto al que había anteriormente. Los usuarios que se inician a la simulación de CFD pueden aprender a simular sin la necesidad de conocer el funcionamiento o el código de programación. Estos códigos se han vuelto más fáciles de usar, ya que funcionan mediante una interfaz que da la posibilidad de empezar a operar con problemas de fluidos, problemas numéricos o manipular representaciones gráficas sin necesidad tener que realizar un estudio previo ni conocer el código de programación. Sin embargo, sí es necesario un conocimiento para poder analizar e interpretar los resultados.

Algunos de los softwares comerciales de CFD se han desarrollado para crear una interfaz gráfica para los usuarios (GUI) y así facilitar el uso de esta aplicación llegando a poder resolver grandes problemas complejos. Algunas de estas interfaces gráficas junto con su código se pueden observar en la Tabla 4.1.

<b>Desarrollador</b>	<b>Código usado</b>	<b>Dirección web</b>
ANSYS, Inc	CFX	<a href="http://www.ansys.com/">http://www.ansys.com/</a>
ANSYS, Inc	FLUENT	<a href="http://www.fluent.com/">http://www.fluent.com/</a>
CD-adapco	STAR-CCM+	<a href="http://www.cd-adapco.com/">http://www.cd-adapco.com/</a>
CHAM	PHOENICS	<a href="http://www.cham.co.uk/">http://www.cham.co.uk/</a>
COMSOL, Inc	COMSOL	<a href="http://www.comsol.com/">http://www.comsol.com/</a>
ESI Group	CFD-ACE+	<a href="http://www.esi-group.com/">http://www.esi-group.com/</a>
Flow Science	FLOW-3D	<a href="http://www.flow3d.com/">http://www.flow3d.com/</a>

Tabla 4.1 Softwares comerciales CFD con su código y dirección web. [10]

Estos softwares comerciales CFD, aunque también pueden ser sharewares, se estructuran mediante algoritmos numéricos que abordan una gran cantidad de problemas, pero posiblemente muchos se incluyen en aplicaciones donde aparece una interfaz gráfica de usuario (GUI) que les permiten ser más sencillos e interactivos. En estas aplicaciones es

necesario introducir parámetros previos a la simulación. Aun así, los códigos CFD constan de los siguientes elementos:

- Preprocesamiento: creación de una geometría, generación de mallas, determinar las propiedades del material, condiciones de contorno, etc.
- Solucionador: inicialización de propiedades del flujo, selección del solucionador, comprobación de convergencias, etc.
- Postprocesamiento: vectores de velocidad, gráficos, contornos, etc.

Seguidamente se analizará más profundamente estos aspectos determinantes para una correcta simulación en CFD.

#### **4.2.1. Preprocesamiento**

Primeramente, se hace necesario definir una geometría para el flujo conocida como dominio computacional para el cálculo. Es necesario identificar si el escenario a simular representa un problema de flujo interno o externo. El fluido es posible que circule dentro de los límites del cuerpo, es decir, que se encuentre cerrado totalmente o que se encuentre en un contorno abierto. Es por eso, que en casos donde el fluido se encuentre externamente al objeto y sea necesario un encapsulamiento del objeto y del volumen por donde circulará el fluido. En el momento de definir el contorno del fluido externo es necesario ir con precaución, ya que el contorno también afectará al comportamiento del fluido y por lo tanto influir en el resultado. Por eso, cuando se defina este dominio se tiene que hacer con suficiente holgura para asegurar que no influirá en el resultado.

Es necesario tener en cuenta, como se ha explicado en el apartado (4.1), la construcción de la malla en todo el dominio computacional. El flujo del fluido se resuelve numéricamente en cada uno de los nodos de la malla por lo que el número de celdas que tenga la malla es directamente proporcional a la precisión del resultado. Hay que destacar que existen tipos de mallas estructuradas y desestructuradas siendo estas últimas más útiles para casos de geometrías complejas. Es posible realizar refinamientos de las mallas y movimiento de ellas para designar aquellas zonas más interesantes de la pieza.

Previamente a la simulación es necesario identificar el tipo de flujos y la física del fluido que se va a analizar. Por ejemplo, en el caso de modelos de combustión y radiación, ya que

estos influyen en la dinámica y en la transferencia de calor del fluido. En la Fig. 4.3 se observan las diversas variantes que puede tener un fluido.

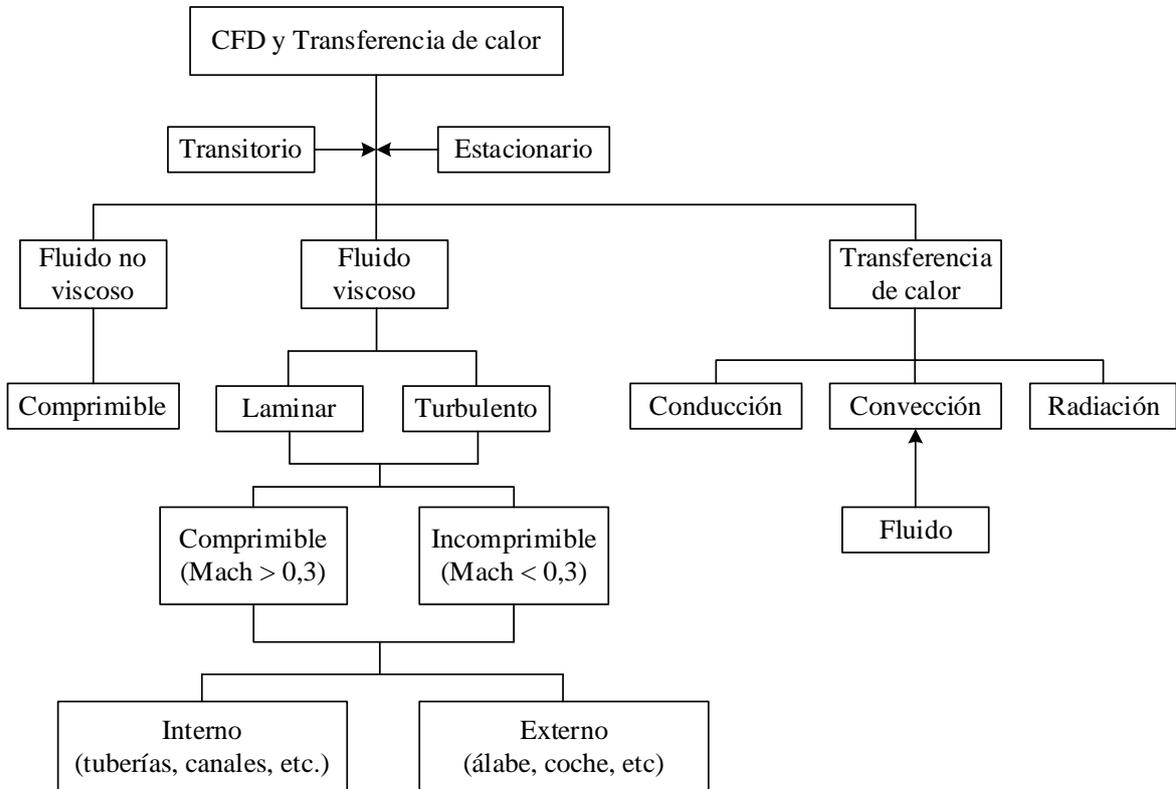


Fig. 4.3 Diagrama de flujo clasificando los tipos de fluidos posibles en CFD. [10]

A su vez, para un correcto preprocesamiento es necesario definir correctamente las condiciones que harán que se imiten las condiciones físicas reales. Para ello, es necesario definir las condiciones de contorno que permitan realizar la simulación satisfactoriamente. Es imprescindible definir las entradas y salidas que tendrá el flujo dentro del dominio y condiciones de frontera en las paredes que limiten y obstaculicen la geometría del flujo. Además, definir la velocidad de entrada para determinar qué entra un fluido y definir una presión relativa en la salida que describa la salida del flujo. Algunos softwares permiten definir también el caudal másico del fluido. En las paredes del dominio es necesario definir la temperatura o el flujo de calor distribuido y zonas donde la velocidad sea cero. También, la densidad del fluido que fluye por todo el dominio tiene que ser determinada. Las condiciones de contorno deben de aportar el máximo de información posible al sistema, ya que cuánta más información se le aporte, más soluciones posibles tendrá el sistema de ecuaciones a resolver en cada nodo de la malla y más facilidad tendrá el programa para resolverlo.

### 4.2.2. Solucionador

Dentro del solucionador CFD se describen varios procedimientos previos a la resolución de la simulación. Estos procedimientos previos deben de ser conocidos por cualquier usuario que usen un software comercial o código avanzado de manera que puedan utilizar la mayor cantidad posible de operaciones del solucionador. Estos prerrequisitos previos a la solución están basados en:

- **Inicialización:** en los fluidos reales de carácter complejos y no lineal generalmente requieren un tratamiento resolutivo usando métodos iterativos de las propiedades del flujo (velocidad, presión, temperatura, etc.). Estas deben de ser inicializadas antes de calcular la solución. Es necesario determinar unas condiciones iniciales del sistema de manera que estén cerca del estado estacionario para que las iteraciones sean menores y se llegue al resultado en el menor tiempo posible. En caso contrario podría llegar a haber mucho esfuerzo computacional para llegar a una solución o podría acabar divergiendo sin llegar a un resultado concreto.
- **Control de la solución:** es necesario especificar las interpolaciones y la selección de los solucionadores iterativos más adecuados. Normalmente los softwares comerciales de propósito general adoptan el método de volúmenes finitos (FVM) como técnica de resolución basada en que las ecuaciones de diferencia finitas se aplican a las celdas. Con la interpolación es posible determinar los flujos de las variables en las superficies de cada celda.
- **Monitorización de la solución, cálculo CFD y comprobación de convergencias:** uno de los factores que determinan una correcta simulación en CFD es la convergencia. La convergencia se evalúa normalmente como el corregimiento de los desequilibrios que se aparecen durante el proceso de cálculo numérico en cada iteración. Los desequilibrios o también llamados residuales miden la conservación de las propiedades del flujo. Estos se suelen ver en el software. Una solución convergente se consigue cuando los residuales bajan por debajo de una tolerancia que se predeterminan en los parámetros de control de softwares. Por lo tanto, es necesario que esos residuales se manipulen mediante las variables de monitorización del sistema para que la respuesta converja. Algunos softwares usan factores que permiten llegar a una solución convergente y mejorar la estabilidad del sistema. [10]

### 4.2.3. Postprocesamiento

Una vez procesados los datos de CFD, los resultados son presentados mediante curvas y gráficos coloridos para ofrecer la mayor cantidad de información posible. Los softwares CFD presentan los resultados de diferentes categorías según como los presente la interfaz gráfica. Existen diversos softwares dedicados específicamente a desarrollos de postprocesamiento y otros de propósito general dedicados tanto a la simulación como al postprocesamiento. El rápido avance de las técnicas gráficas permite nuevas maneras de representar los resultados CFD que puede que en un momento dado sea más adecuado un software que otro. El resumen de todas estas categorías ayuda a entender como la solución de CFD se visualizan en un software comercial justo acabada la simulación.

- Gráficos X-Y: son gráficos de dos dimensiones que representan la variación de una variable dependiente con otra variable independiente. Es una de las maneras cuantitativas más precisas de representar datos numéricos. Son usados para comparar datos numéricos con valores medidos experimentalmente. Escalas logarítmicas permiten identificar efectos de flujo que pueden aparecer en los extremos del sólido. Suele usarse para presentar perfiles de velocidad y gráficos de superficies como presiones, coeficientes de fricción, etc.
- Gráficos de vectores: se basan en diagramas que mediante flechas muestran una cantidad de vectores cuya orientación y tamaño indican la dirección y magnitud. En dos dimensiones, representa la perspectiva del campo de flujo; en tres dimensiones, se pueden generar cortes con planos para ver las cantidades vectoriales en el flujo global. En la Fig. 4.4 se puede observar el gráfico de vectores de velocidad en un fluido que circula sobre dos cilindros separados. Se pueden ver los tres distintos fluidos que representan una aceleración, desaceleración y difusión.
- Gráficos de contornos: estos gráficos también son comúnmente utilizados para las representaciones gráficas de CFD. El contorno es dibujado por una línea llamada isobaras que describe aquellos puntos con la misma propiedad y constante en el espacio. En contraste con los gráficos X-Y, pueden proveer una descripción total del flujo de fluido. Aquellas zonas donde las isobaras están muy juntas aportan información de cambios bruscos en las propiedades del fluido. De este tipo existe otra

variante llamada gráficos de contorno inundado donde la intensidad del color sombreado en una escala ilustra la distribución adimensional de una variable.

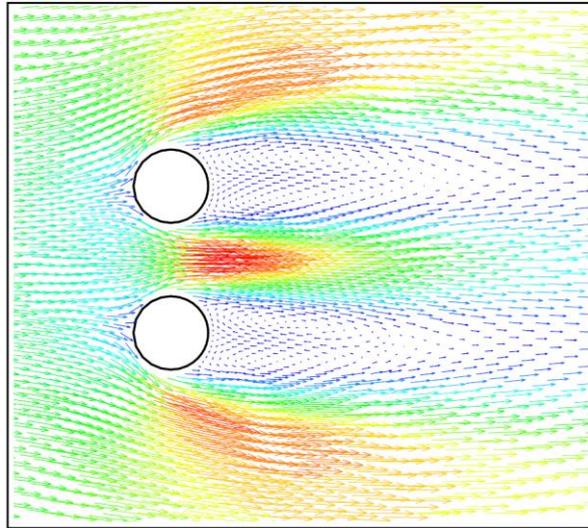


Fig. 4.4 Vectores de velocidad de un fluido pasando por dos cilindros. [10]

- Otros gráficos: otra aplicación útil es realizar gráficos de líneas de corriente o “streamlines”. Estas líneas son paralelas al vector de velocidad media donde trazan el flujo utilizando partículas sin masa. Estas son líneas de ruta del fluido y caminos de las partículas. Estos aportan información del tiempo que pasan las partículas en ciertas zonas, de la velocidad u otras propiedades. En otros gráficos no es posible ver la generación de vórtices en un gráfico de vectores. En la Fig. 4.5 es posible ver un gráfico de líneas de corriente basado en un fluido circulando por dos cilindros donde es posible observar la creación de vortices.

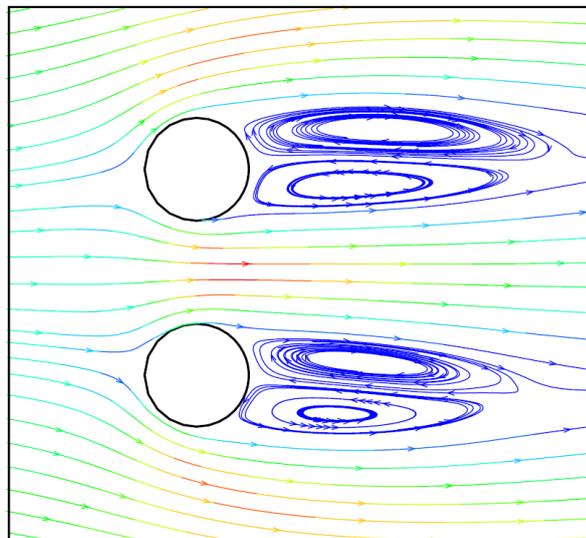


Fig. 4.5 Líneas de corriente de un fluido pasando por dos cilindros. [10]

- Animaciones: las animaciones son otra variante de la representación de datos en CFD. Además de ser una herramienta de representación de resultados cualitativos es un trabajo de representación artística. Un ejemplo de ellos sería la representación del movimiento en un fluido multifase moviéndose a través de geometrías, mezclándose e impactándose a alta velocidad. Es una buena herramienta para propósitos de márketing o para educación.
- Informe de datos y salidas: es una manera de evitar ver todas los miles o millones de datos de la simulación de CFD por punto. Aproximaciones alfanuméricas hacen posible para generar informes que permiten verificar los resultados y extraer información relevante para análisis posteriores. Algunos de los datos que se pueden extraer son variables de los flujos en las superficies, fuerzas, flujos de masa en los límites de la geometría, etc. Estos datos de variables pueden ser extraídas en un formato de archivo determinado o sin formato concreto. [10]



### 4.3. Estado del arte de los softwares

En la actualidad existen multitud de softwares dedicados a CFD, algunos con diferentes enfoques según la aplicación; otros, para propósito más general. Entre muchos otros encontramos algunos de uso libre, pero con limitadas opciones o algunos comerciales que tienen un amplio abanico de funcionalidades.

En la Tabla 4.1. se pueden observar diferentes soluciones CFD, pero en este subapartado se pretende explicar más en las soluciones que ofrecen estos softwares u otros más frecuentemente usados con tal de justificar cuál es el más conveniente para la ejecución de este proyecto.

- ANSYS (FLUENT/CFX): Software CFD comercial con un algoritmo con propiedades muy potentes dando unas soluciones mucho más confiables. Capacidad de modelar flujos, turbulencias, transferencias de calor y reacciones en aplicaciones industriales. Tiene capacidad de simular sistemas de combustión o aspectos de turbomaquinaria, así como optimizar el ahorro energético y acelerando el proceso de fabricación de procesos difíciles de acelerar. Acelera el trabajo mediante la generación de mallas a partir del CAD importado. Actualmente es uno de los más conocidos.
- OpenFOAM: Es un software CFD de acceso libre que va siendo renovado cada seis meses para incluir desarrollos y contribuciones realizadas por la comunidad. Permite realizar soluciones de problemas de flujos, reacciones químicas, turbulencias, transferencia de calor, acústica, etc. Incluye la funcionalidad de mallar en el propio programa y en zonas y geometrías complejas del modelo. Además, Debido al gran impacto económico que puede conllevar la adquisición de licencias de uso comercial, este tipo de software libre ha conseguido ser desarrollado por usuarios del mundo llegando a formar parte de una competencia directa con los softwares comerciales de hoy en día.
- PowerFLOW: Software CFD comercial basado en la tecnología Lattice-Boltzmann que presenta una ligera ventaja sobre los métodos tradicionales de CFD. Esta solución genera celdas cúbicas que generan una malla en el dominio del fluido con los objetos sólidos que se inmergen dentro del mallado del fluido representando la

simulación. Se enfoca en simulaciones de aerodinámica, transferencia de calor o aeroacústica.

- **SimScale:** Software comercial CFD, de análisis térmico y de esfuerzos mecánicos. Tiene la particularidad de ser un software en línea y de simulación en la nube haciendo así que la capacidad computacional de un PC no sea algo tan relevante a la hora de realizar una simulación. Puede simular flujos turbulentos y laminares, flujos multifase, transporte de masa, etc. Además, permite realizar análisis estructurales tanto estáticos como dinámicos con cargas. Posibilita el análisis térmico incluyendo cargas térmicas y sólidos simulando el estrés que supone una carga térmica, así como transferencia de calor con sólidos y líquidos ya sea por convección o conducción. Tiene la ventaja de poseer una licencia gratis con unas horas de procesamiento y funcionalidades limitadas, pero abierto a un extenso número de simulaciones de diferentes tipos.
- **COMSOL:** Es un software comercial de simulaciones de propósito general con una gran amplitud de simulaciones en electromagnetismo, mecánica estructural, ingeniería química y en el estudio del flujo y la transferencia de calor. La plataforma funciona con diferentes expansiones compuestas por módulos para cada uno de los propósitos mencionados. En el caso del módulo destinado al estudio de fluidos habilita la posibilidad de simular flujos compresibles e incompresibles, laminar y turbulentos, multifase, flujos en dominios abiertos y en superficies porosas.
- **Autodesk CFD:** Software comercial que provee de simulaciones de flujo en movimiento y de análisis térmico. Algunas de las funcionalidades que tiene son la simulación de flujos tanto compresibles como incompresibles, transferencia de calor, humedad, radiación, erosión, así como análisis mecánicos de turbomáquinas rotativas, disipación de calor, etc. Además, tiene la posibilidad de realizar un mallado en el mismo software con opciones de mallado inteligente.
- **FLOW-3D:** Software comercial que se enfoca en aplicaciones de superficies libres y multifase para aplicaciones de ingeniería civil, hidráulica, productos de consumo, inyección de tinta, soldadura láser, etc. Permite la simulación de fluidos en medios cerrados y simular la interacción entre fluidos y estructuras. Presenta un sistema de mallado intuitivo que permite tener una gran productividad.

Como se puede observar en cada uno de los análisis de estos softwares, casi todas las funcionalidades están disponibles en cada uno de ellos. Aunque la mayoría tienen una gran variedad de funcionalidades que permitiría cumplir con los objetivos de este proyecto, algunas de ellas requieren un coste económico para adquirir una licencia de uso.

En el caso de este proyecto se ha seleccionado Simscale para la ejecución del mismo. Debido a que a la vez que permite el uso gratuito mediante licencia de prueba, existe la posibilidad de escoger una licencia gratuita destinada a estudiantes con más funcionalidades que la gratuita estándar. Las funcionalidades que están presentes son bastante extensas y su interface es muy intuitiva. Está presente la funcionalidad para generar mallas y refinamientos en las zonas más importantes. El software presenta una parte de postprocesamiento que permite analizar los datos. Además, el software está presente en la nube y no es necesario descargar ningún aplicativo en el ordenador por lo que también el esfuerzo computacional del ordenador pasa a no ser relevante para realizar simulaciones.



## 5. Diseño de un molde para una máquina de inyección de aluminio

### 5.1. Pieza de partida

La pieza a diseñar parte de un modelo CAD cedido por la empresa *Eurecat* como modelo a estudiar en el proceso de inyección de aluminio a alta presión. En la Fig. 5.1. se puede observar la pieza dada con diferentes elementos como mazarotas, canal de entrada y distribución y sección de ataque.

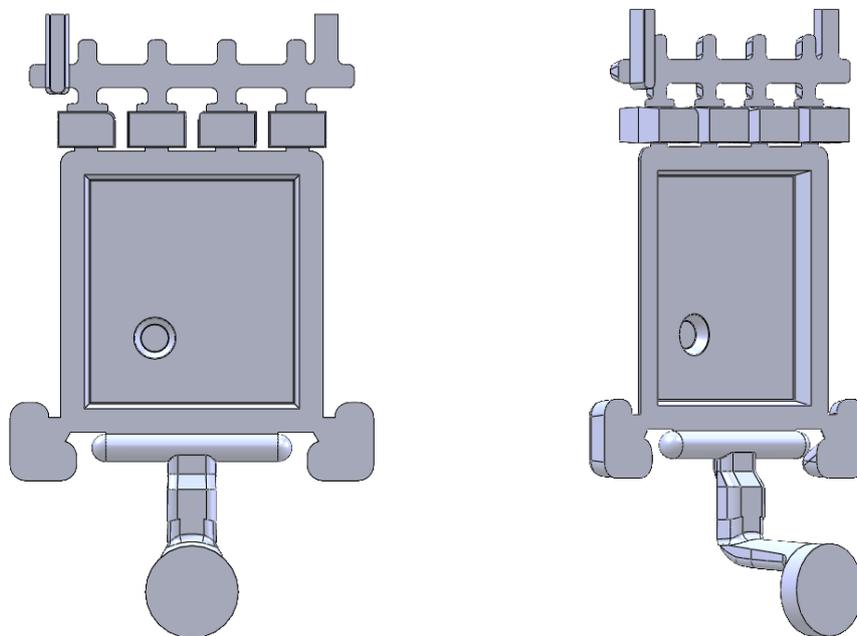


Fig. 5.1 Vista de la pieza con elementos para una correcta solidificación de la pieza.

Aunque estos elementos vienen dados desde el modelo CAD, en este apartado se usará la parte de la pieza intrínseca para el cálculo de los utillajes del molde tal y como se observa en la Fig. 5.2. Esta pieza representa una bandeja metálica de aplicación general con forma rectangular con una profundidad en su superficie y otra profundidad circular para el propósito de sujeción de recipientes. Por la otra cara se pueden apreciar varios nervios para dar robustez a la profundidad circular.

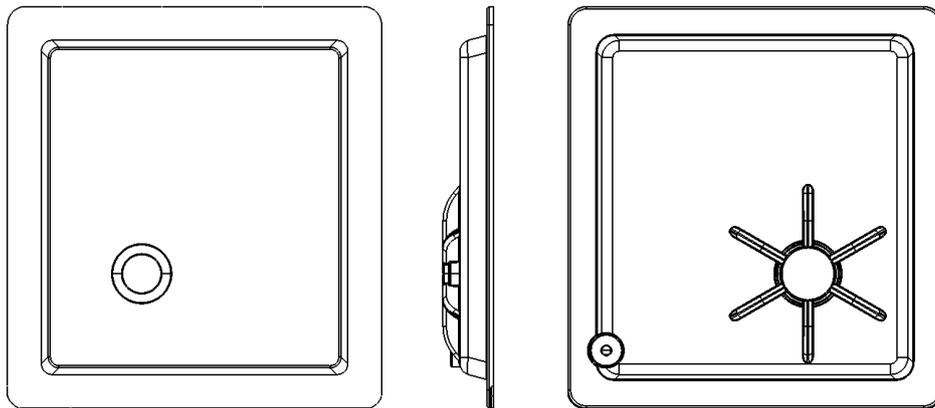


Fig. 5.2. Ilustración de la pieza a calcular.

## 5.2. Dimensionamiento de los utillajes

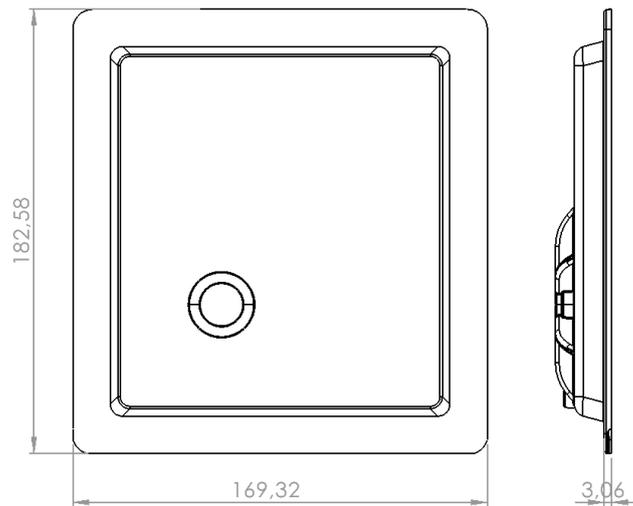
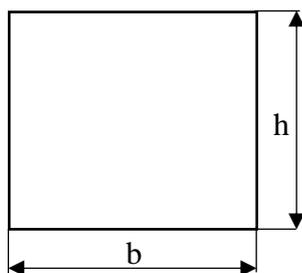


Fig. 5.3 Cotas de la bandeja para el cálculo.

Las dimensiones de la pieza que irá dentro del molde y, por lo tanto, la cavidad del molde son las siguientes (obtenidas a partir de mediciones del modelo CAD y de la Fig. 5.3.):



$$b = 16,932 \text{ cm}$$

$$h = 18,258 \text{ cm}$$

$$\varepsilon = 3,06 \text{ mm}$$

$$V = 114,5654 \text{ cm}^3$$

### 5.2.1. Diseño del tiempo de llenado del molde

Se va a calcular el tiempo de llenado del molde, necesario para determinar a qué velocidad es necesaria la inyección del metal para que este no solidifique antes de la cuenta y para que no genere porosidades. Para el cálculo del tiempo de llenado del molde es necesario aplicar una fórmula empírica que depende de valores como la temperatura del metal a inyectar, el espesor de la pieza y una constante que depende de la aleación y material del molde.

$$t = k \cdot \left( \frac{T_i - T_f + S \cdot Z}{T_f - T_m} \right) \cdot e \quad (5.1)$$

Donde:  $k$ : Constante en función de la aleación y material del molde (tabulado)

$T_i$ : Temperatura del caldo a la entrada del molde (tabulado)

$T_f$ : Temperatura mínima de flujo del metal (tabulado)

$T_m$ : Temperatura del molde (tabulado)

$S$ : Porcentaje de fase sólida permitido al final de la inyección (tabulado)

$Z$ : Factor de conversión (tabulado)

$e$ : Espesor de la pieza

Cada uno de los valores correspondientes de (5.1) se pueden obtener a partir de la Tabla 5.1 que corresponde a diferentes valores según el material utilizado. En el caso de este proyecto se escoge como material para la pieza la aleación Al 390.

Aleación	Constante k		Temperatura metal	Temp. mínima de flujo	Temp. cavidad	Factor sólido
	1,2738	1,2344	$T_i$	$T_f$	$T_m$	$Z$
	s/mm	s/mm	°C	°C	°C	°C
Mg		0,025	650	510	340	2,5
Al 360, 380, 384		0,035	650	570	340	3,8
Al 390		0,035	720	595	355	3,8
Zn 12, 27	0,031	0,035	565	445	260	3,2
Zn 3, 5, 7	0,031	0,035	405	382	230	2,5

Tabla 5.2 Valor de las constantes de la fórmula empírica de Wallace. [11]

Según el aluminio Al 390 de la tabla, se obtiene:

$$k = 0.035 \text{ s/mm} \quad (5.2)$$

$$T_i = 720 \text{ }^\circ\text{C} = 993,15 \text{ }^\circ\text{K} \quad (5.3)$$

$$T_f = 595 \text{ }^\circ\text{C} = 868,15 \text{ }^\circ\text{K} \quad (5.4)$$

$$T_m = 355 \text{ }^\circ\text{C} = 628,15 \text{ }^\circ\text{K} \quad (5.5)$$

$$Z = 3,8 \quad (5.6)$$

El valor  $S$  viene determinado por ser:

$$10 \% < S < 15 \% \text{ para piezas delgadas} \quad (5.7)$$

$$30 \% < S < 40 \% \text{ para piezas gruesas} \quad (5.8)$$

En este caso tenemos una pieza bastante delgada por lo que escogemos un término medio

$$e = 3,06 \text{ mm} \longrightarrow S = 12,5 \% = 0,125 \quad (5.9)$$

Por lo tanto:

$$t = 0,035 \text{ s/mm} \cdot \left( \frac{993,15 \text{ }^\circ\text{K} - 868,15 \text{ }^\circ\text{K} + 0,125 \cdot 3,8}{868,15 \text{ }^\circ\text{K} - 628,15 \text{ }^\circ\text{K}} \right) \cdot 3,06 \text{ mm} = 0,0553 \text{ s} \quad (5.10)$$

Se obtiene un tiempo de llenado del molde de 55,3 ms.

### **5.2.2. Cálculo del caudal de llenado**

El caudal ( $Q$ ) no es más que el volumen de fluido, es decir, el volumen de la pieza dividido entre el tiempo de llenado del mismo. Como ya se conoce el volumen de la pieza y el tiempo de inyección:

$$Q = \frac{V}{t_{\text{llenado}}} \quad (5.11)$$

$$V = 114,56539 \text{ cm}^3 \quad (5.12)$$

$$Q = \frac{V}{t_{\text{llenado}}} = \frac{114,56539 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3}{0,0553 \text{ s}} = 0,002072 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (5.13)$$

### 5.2.3. Diseño del espesor y de la velocidad de ataque

El espesor de ataque es la dimensión que debe de tener el ultimo canal que conecta la cavidad del molde de la pieza con el canal usado para distribuir la colada. Para determinar el espesor de ataque es necesario tener 3 cosas en cuenta:

- 1- Asegurar la continuidad del flujo en la solidificación. Normalmente en aluminio esto se consigue haciendo que el espesor sea superior al 25 % del espesor de la pieza.
- 2- Que asegure el flujo pulverizado durante el llenado de la pieza.
- 3- Que garantice la integridad de la colada durante la expulsión de la pieza.

Suponiendo que la temperatura del molde será de 250 °C y que el espesor de ataque tiene que ser > 25 %:

$$T_g > 0,25 \cdot e$$

$$\text{Espesor de la pieza } e = 3,06 \text{ mm} \longrightarrow T_g > 0,25 \cdot 3,06 \text{ mm} = 0,765 \text{ mm}$$

$$\text{Se escoge: } T_g = 0,8 \text{ mm}$$

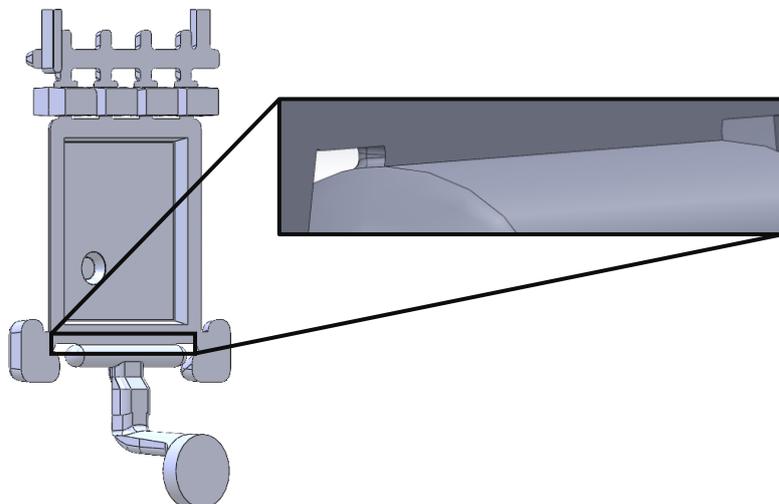


Fig 5.4 Ampliación de la sección de ataque.

Es necesario asegurar el flujo pulverizado durante el llenado con tal de evitar que haya defectos en la fundición o incluso erosiones entre la cavidad y la puerta. Según ensayos empíricos es necesario utilizar la ecuación del flujo pulverizado aportada por Wallace:

$$v_g^{1,71} \cdot T_g \cdot \rho \geq J \quad (5.14)$$

Donde:  $v_g$ : Velocidad de ataque ( $in/s$ )

$T_g$ : Espesor de ataque ( $in$ )

$\rho$ : Densidad del metal ( $lb/in^3$ )

$J$ : Factor de atomización (se recomienda un valor de 900 por parte de ensayos prácticos)

Para el uso de (5.5) es necesario cambiar las unidades a sistema imperial. Por lo tanto:

$$T_g = 0,8 \text{ mm} = 0,03149 \text{ in} \quad (5.15)$$

$$\rho = 2,7 \frac{g}{cm^3} = 0,0983 \frac{lb}{in^3} \quad (5.16)$$

$$J = 750 \text{ (mínimo recomendado en unidades imperiales)} \quad (5.17)$$

Entonces, si sustituimos en (5.14) se obtiene:

$$v_g \geq \sqrt[1,71]{\frac{800}{0,03149 \text{ in} \cdot 0,0983 \frac{lb}{in^3}}} = 1462,5981 \frac{in}{s} = 37,1499 \frac{m}{s} \quad (5.18)$$

La velocidad es bastante alta por lo que hay que reducirla mediante el aumento del espesor de ataque. Se considera, entonces, que el espesor de ataque será un 60% del espesor de la pieza:

$$T_g > 0,6 \cdot 3,06 = 1,836 \text{ mm} \longrightarrow \text{Se selecciona: } 1,8 \text{ mm} = 0,07086 \text{ in}$$

$$v_g \geq \sqrt[1,71]{\frac{J}{T_g \cdot \rho}} = \sqrt[1,71]{\frac{800}{0,07086 \text{ in} \cdot 0,0983 \frac{lb}{in^3}}} = 910,2138 \frac{in}{s} = 23,1194 \frac{m}{s} \quad (5.19)$$

Por lo tanto, se obtiene un espesor de ataque de 1,836 mm y una velocidad mínima de ataque de 23,12 m/s.

#### 5.2.4. Sección de ataque

Si se tiene en cuenta el caudal y la velocidad mínima de ataque calculadas es posible calcular la sección de entrada, ya que:

$$Q = v_g \cdot S \quad (5.20)$$

Si se substituyen los valores calculados en (5.8):

$$S = \frac{Q}{v_g} = \frac{0,002072 \text{ m}^3/\text{s}}{23,12 \text{ m/s}} = 89,61 \text{ mm}^2 \quad (5.21)$$

#### 5.2.5. Diámetro y velocidad del pistón

Para seleccionar el diámetro del pistón que empujará el metal a la cámara hay que tener en cuenta:

- Que el caudal necesario sea viable para una velocidad del pistón razonable.
- Que garantice una presión del metal correcta para un buen llenado de la pieza
- Que el porcentaje de llenado del contenedor del pistón sea adecuado.

El caudal calculado es de  $2072 \text{ cm}^3/\text{s}$ . El caudal al cuadrado es  $4 \left(\frac{dm^3}{s}\right)^2$ . En la Fig. 5.5 se encuentran diferentes curvas para diámetros distintos según la presión y caudales cuadráticos idóneos. En este caso el caudal cuadrático es muy bajo por lo que puede llegar a permitirse altas presiones de llenado como 600 bars. Por lo tanto, se selecciona un diámetro de pistón de 60 mm.

Para el porcentaje de llenado no es recomendable que sea bajo porque puede implicar en problemas de enfriamiento. Las dimensiones de la cámara del pistón vienen predeterminadas por 400 mm de longitud y 149 mm de diámetro del pistón. Para el cálculo del volumen del contenedor:

$$V_c = L_{ca} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \varnothing_c \quad (5.22)$$

Donde:  $V_c$ : Volumen contenedor ( $cm^3$ )

$\varnothing_c$ : Diámetro contenedor ( $mm$ )

$L_{ca}$ : Longitud cámara activa ( $m$ )

Considerando las medidas ya proporcionadas previamente siendo la longitud de la cámara del pistón como  $L_{ca} = 400 \text{ mm}$ , i el diámetro del contenedor de  $\varnothing_c = 149 \text{ mm}$ . El volumen del contenedor será pues:

$$V_c = 40 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 14,9^2 = 6974,6499 \text{ cm}^3 \quad (5.23)$$

Para el metal será adecuado disponer de:

$$6974,6499 \cdot 0,4 = 2789,8599 \text{ cm}^3 \quad (5.24)$$

$$6974,6499 \cdot 0,6 = 4184,7899 \text{ cm}^3 \quad (5.25)$$

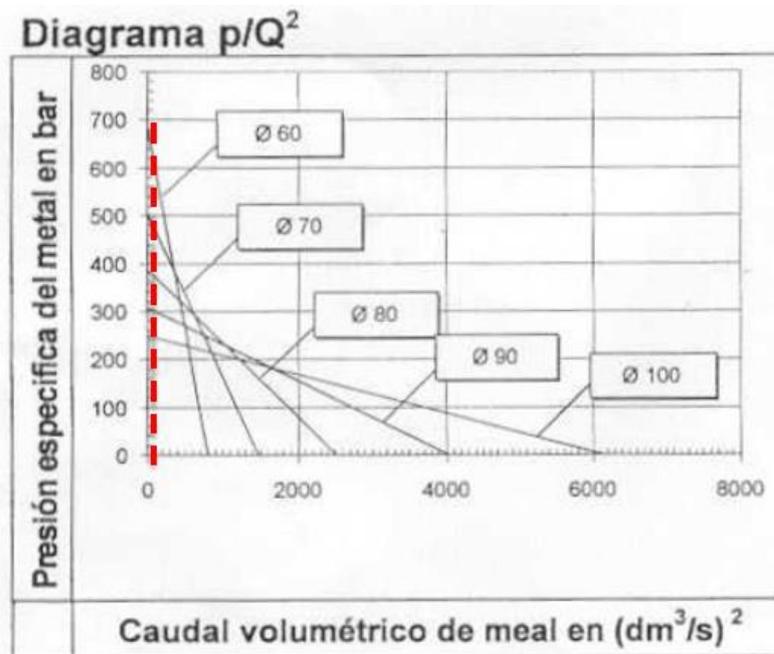


Fig. 5.5 Gráfico presión-caudal para diferentes diámetros con la selección usada. [11]

### 5.3. Diseño del molde

El molde diseñado es consecutivo de las simulaciones que se realizarán para el estudio del comportamiento de la transferencia de calor en el mismo. Las medidas estaban predefinidas por lo que el molde constaba de las siguientes cotas.

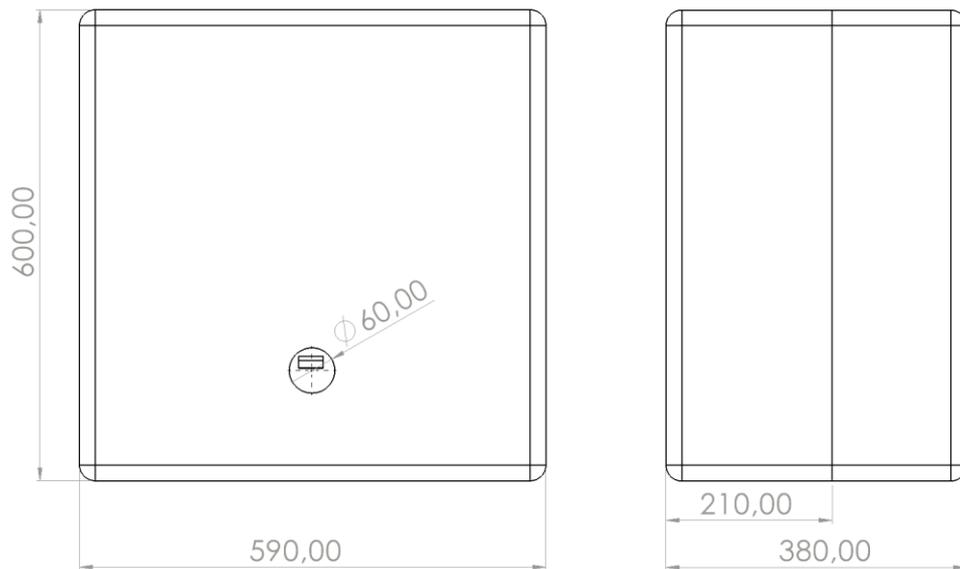


Fig. 5.6 Cotas del molde.

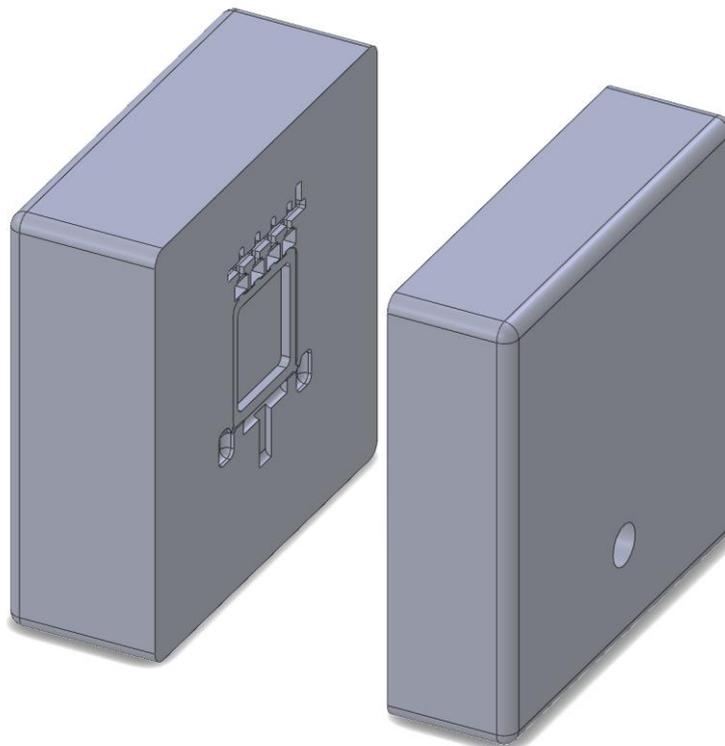


Fig. 5.7 Vista isométrica del molde.

Como se puede observar en la Fig. 5.7 el molde tiene una cavidad correspondiente al volumen de una bandeja de aluminio considerando los elementos correspondientes a bebederos, mazarotas y canales (Fig. 5.1.) que comprende un volumen total de 464,1243 cm<sup>3</sup>. El material de esta cavidad está establecido como una aleación de aluminio Al 390. La geometría de la cavidad se ha simplificado debido a que la geometría del archivo CAD de la bandeja de la Fig. 5.1 presentaba problemas que no se han podido solventar mediante un reconocimiento de operaciones y de superficies haciendo que el software de simulación no le fuera posible detectar los contactos entre caras imposibilitando en parte la simulación y provocando un tiempo de cálculo desmesurado.

Cabe destacar que en el molde es de un material de acero y se realizarán unos canales transversales por los laterales del molde donde se diseñarán los diferentes circuitos de refrigeración del molde.

## **6. Diseño del sistema de refrigeración para el molde**

### **6.1. Diseño del sistema de refrigeración convencional**

Para el sistema de refrigeración convencional se han realizado tres modelos con diferentes circuitos de refrigeración basados en tuberías que circulan transversalmente por los laterales.

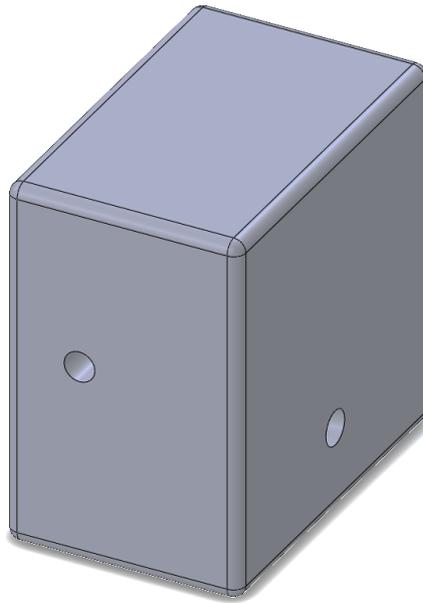


Fig. 6.1 Molde con una tubería simple.

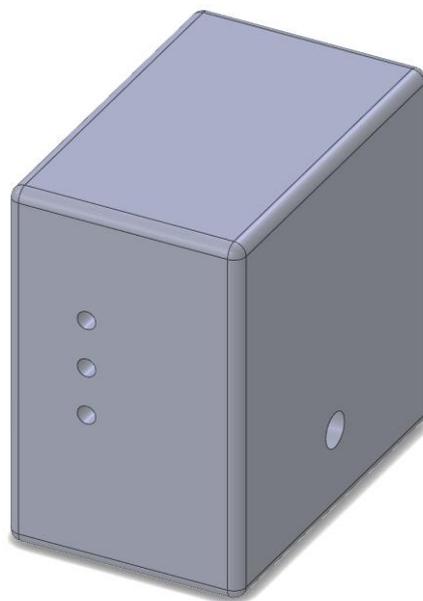


Fig. 6.2 Molde con tres tuberías simples.

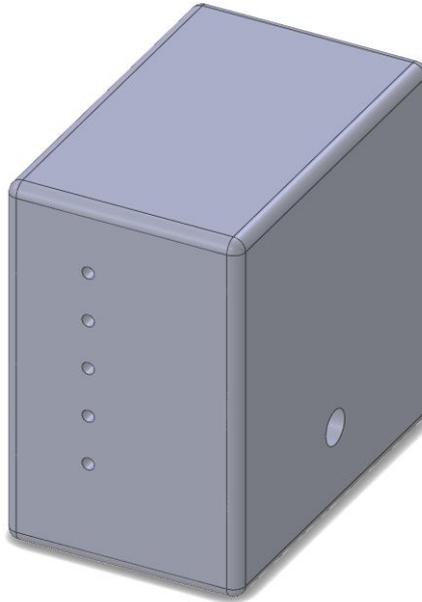


Fig. 6.3 Molde con cinco tuberías simples.

### **6.1.1. Proceso de refrigeración**

Según datos empíricos el proceso de inyección de aluminio se da a una temperatura superior a la de fusión. El estado del aluminio al ser inyectado es en forma líquida, pero durante el proceso de moldeo se da un proceso de cambio de fase provocando la solidificación del mismo. Cuando un fluido pasa por un cambio de fase libera o absorbe una gran cantidad de calor a temperatura constante. En el caso del aluminio inyectado se le debe de retirar una gran cantidad de calor para que solidifique. Este proceso de solidificación no es posible realizarlo mediante Simscale debido a que, a día de hoy, no incluye la opción de considerar cambios de fases. Para tener en consideración este proceso de cambio de fase y la energía liberada por el aluminio en su solidificación se calcula la transferencia de calor por cambio de fase además de la transferencia de calor por cambio de temperatura.

En el caso de la aleación de aluminio Al390 la temperatura de fusión es de 580 °C y la inyección es realizada a 600 °C. La solidificación del aluminio 390 se da a una temperatura de 480 °C por lo que es a esta temperatura donde hay que calcular el calor transferido por cambio de fase. Finalmente, el proceso de inyección cesa a los 8 segundos a una temperatura final de 100 °C. Por lo tanto, el incremento de temperatura de todo el proceso es:

$$\Delta T = 600 \text{ }^{\circ}\text{C} - 100 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (6.1)$$

### 6.1.2. Cálculo de los parámetros del circuito

Para el cálculo de la transferencia de calor en todo el proceso es necesario conocer la masa y el calor específico a presión constante del aluminio Al390.

Para calcular la masa es necesario conocer la densidad del aluminio Al390 y el volumen, el cual se ha medido anteriormente.

$$V = 464,12438 \text{ cm}^3 \quad (6.2)$$

$$\rho_{Al390} = 2,72 \text{ g/cm}^3 \quad (6.3)$$

Por lo tanto, la masa de la bandeja en estado sólido:

$$m_b = V \cdot \rho_{Al390} = 464,12438 \text{ cm}^3 \cdot 2,72 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 1262,4183 \text{ g} \quad (6.4)$$

Para el cálculo de la transferencia de calor en todo el proceso es necesario recurrir a las ecuaciones de transferencia de calor según la variabilidad de la temperatura (6.5) y a la de la transferencia de calor por cambio de fase (6.6)

$$Q = m_b \cdot c_{p_{Al390}} \cdot \Delta T \quad (6.5)$$

$$Q = m \cdot h_{fg} \quad (6.6)$$

Por lo que el proceso total vendrá dado por la suma de las diferentes transferencias de calor:

$$Q_T = m_b \cdot c_{p_{Al390\_liquido}} \cdot \Delta T_1 + m \cdot h_{fg} + m_b \cdot c_{p_{Al390\_sólido}} \cdot \Delta T_2 \quad (6.7)$$

Por lo que es necesario conocer el calor específico a presión constante de la aleación de aluminio tanto en estado sólido (6.8) como en estado líquido (6.9). Además, para el cambio de fase es necesario conocer la entalpía de solidificación (6.10).

$$c_{p_{Al390\_sólido}} = 963 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{K} \quad (6.8)$$

$$c_{p_{Al390\_líquido}} = 1180 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{K} \quad (6.9)$$

$$h_{fg} = 394 \text{ kJ/kg} \quad (6.10)$$

Como se observa en (6.7) el incremento de temperatura se ve diferenciado en cada caso por:  $\Delta T_1$ , en el caso de estado líquido;  $\Delta T_2$ , en el caso de estado sólido. En el caso del estado líquido, como se ha comentado, es de 600 °C a 480 °C como previo al cambio de fase. En el caso del estado sólido va de 480 °C a 600 °C como posterior al cambio de fase. Por lo tanto, si se calculan las tres transferencias de calor:

$$Q_L = 1,2624 \text{ kg} \cdot 1180 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} \cdot (600 - 480) ^\circ\text{C} = 178,7584 \text{ kJ} \quad (6.11)$$

$$Q_{L-S} = 1,2624 \text{ kg} \cdot 394 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 497,3928 \text{ kJ} \quad (6.12)$$

$$Q_S = 1,2624 \text{ kg} \cdot 963 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} \cdot (480 - 100) ^\circ\text{C} = 461,9694 \text{ kJ} \quad (6.13)$$

Por lo tanto, la transferencia de calor en todo el proceso es:

$$\begin{aligned} Q_T &= Q_L + Q_{L-S} + Q_S = 178,7584 \text{ kJ} + 497,3928 \text{ kJ} + 461,9694 \text{ kJ} = \\ &= 1,13812 \text{ MJ} \end{aligned} \quad (6.14)$$

Además, la razón de transferencia de calor vendrá dada por el calor cedido durante el tiempo que está el aluminio dentro del molde. En este cálculo se aproxima el valor medio del tiempo de ciclo de una bandeja de aluminio es de 8 segundos:

$$\dot{Q} = \frac{Q_T}{\Delta T} = \frac{1,13812 \text{ MJ}}{8 \text{ s}} = 142,2651 \text{ kJ/s} \quad (6.15)$$

Cabe destacar que el software utilizado para realizar la simulación no tiene la capacidad de considerar cambios de fase por lo que la solidificación no la tendrá en cuenta. Para solucionar esto y que tenga en cuenta la transferencia de calor total calculada en (6.14) se ha considerado calcular una temperatura equivalente. El programa tendrá en cuenta todos los materiales como sólidos independientemente de la temperatura. Por lo que se procede a

calcular una temperatura equivalente con la transferencia de calor calculada como si no hubiera cambio de fase. Sabiendo que la energía total en el sistema es:

$$Q_T = 1,13812 \text{ MJ} \quad (6.16)$$

Y de la misma manera que se calcula la transferencia de calor para una única fase, se calcula la variación de temperatura que se necesita para llegar a tener esa cantidad de calor sin cambio de fase. Por lo tanto, aislando la temperatura de (6.5):

$$\Delta T = \frac{Q}{m_b \cdot c_{p_{Al390}}} \quad (6.17)$$

Y conociendo la masa de la bandeja, el calor específico del aluminio y la temperatura final a la que estará el molde:

$$T_{inicial} = \frac{1,13812 \text{ MJ}}{1,2624 \text{ kg} \cdot 963 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{K}} + 100 \text{ }^\circ\text{C} = 1036,1786 \text{ }^\circ\text{C} \quad (6.18)$$

Por lo tanto, para que el programa tenga en cuenta la transferencia de calor total como si hubiera cambio de fase, se realizará una simulación con un intervalo de temperatura inicial del aluminio a 1036 °C, ya que esto equivaldría a establecerla como 600 °C considerando el cambio de fase.

Como la simulación se realizará sobre un molde con varios números de tuberías, la razón de transferencia de calor se repartirá por el número de tuberías que tenga el molde. Por lo tanto:

	<b>1 tubería</b>	<b>3 tuberías</b>	<b>5 tuberías</b>
<b><math>\dot{Q}</math> [J/s]</b>	1138120,606	379373,5355	227624,1213

Tabla 6.1 Razón de transferencia de calor por tubería

Con estos valores de razón de transferencia de calor según el número de tuberías posibilita el cálculo del diámetro adecuado de las tuberías que posibilita una transferencia de calor como la calculada. Es decir, tras calcular la transferencia de calor y la razón de transferencia de calor que emite el molde en un decremento de temperatura de 600 °C a 100 °C, estos mismos valores serán los necesarios que las tuberías tendrán que absorber para eliminar el calor del molde.

Según datos experimentales aportados por *Eurecat*, el agua que circula por la refrigeración de los moldes entra a una temperatura de unos 15 °C aproximadamente. En cambio, al final el incremento de temperatura del agua es de unos 75 °C.

Conociendo la razón de transferencia de calor en cada tubería según el número de tuberías disponibles en el molde, es posible calcular el caudal másico por cada tubería en cada caso con la ecuación (6.17). Primeramente, es necesario calcular el calor específico y densidad del agua a 15 °C.

$$c_{p_{H_2O_{15^{\circ}C}}} = 4186 \text{ J/kg} \cdot ^{\circ}K \quad (6.19)$$

$$\rho_{H_2O_{15^{\circ}C}} = 999,1 \text{ kg/m}^3 \quad (6.20)$$

Por lo tanto, si se calcula para 3 tuberías:

$$\dot{m}_{3t} = \frac{\dot{Q}_{3t}}{c_{p_{Al390}} \cdot \Delta T} \quad (6.21)$$

$$\dot{m}_{3t} = \frac{379373,5355 \text{ J/s}}{4186 \text{ J/kg} \cdot ^{\circ}K \cdot 70 ^{\circ}C} = 1,2947 \text{ kg/s} \quad (6.22)$$

El caudal másico para cada uno de los casos con varias tuberías:

	1 tubería	3 tuberías	5 tuberías
$\dot{m}$ [kg/s]	3,8841	1,2947	0,7768

Tabla 6.2 Caudal másico por tubería

Sabiendo que el caudal másico viene determinado por (6.23) se puede calcular cuál será el diámetro de cada tubería aislándolo en el cálculo de su superficie. La velocidad de un fluido en una tubería suele rondar los 2 m/s si esta aumenta, las pérdidas aumentan; si disminuye, no tiene tanto efecto la transferencia de calor. Por eso, se escogen velocidades del fluido alrededor de este valor: 0.3 m/s, 1.5 m/s, 2m/s y 3.5 m/s.

$$\dot{m} = v \cdot A \cdot \rho \quad (6.23)$$

Por lo tanto, si de (6.24) se calcula para cada velocidad y caudal másico según el número de tuberías se llega a obtener el diámetro que deben de tener las tuberías en cada caso. Por lo tanto:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{m}}{v \cdot \pi \cdot \rho}} \quad (6.24)$$

Si se calcula el diámetro con el caudal másico de 3 tuberías a una velocidad de 0.3 m/s:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,2947 \text{ kg/s}}{0,3 \text{ m/s} \cdot \pi \cdot 999,1 \text{ kg/m}^3}} = 0,0742 \text{ m} \quad (6.25)$$

Por lo tanto, para cada uno de los caudales másicos y diferentes velocidades:

Velocidad [m/s]	Diámetro [m]		
	1 tubería	3 tuberías	5 tuberías
0,3 m/s	0,1285	0,0742	0,0574
1,5 m/s	0,0574	0,0332	0,0257
2 m/s	0,0497	0,0287	0,0222
3,5 m/s	0,0376	0,0217	0,0168

Tabla 6.3 Diámetros en función de la velocidad y el caudal másico.

Como se ha expresado, la velocidad óptima del fluido es 2 m/s la cual tiene que servir como referencia a la hora de establecer un diámetro para las tuberías. En la Fig. 6.3 se puede observar que a más velocidad menos diámetros es requerido. No es favorable escoger un diámetro para grandes velocidades, ya que genera pérdidas. Además, cuantos más tubos menos caudal másico es necesario por tubería para absorber calor. El incremento de temperatura con el cual se diseña el circuito de refrigeración afecta proporcionalmente al tamaño de los diámetros.

Considerando que el molde tiene unas dimensiones de 600x590x480 mm las dimensiones calculadas son factibles. Por eso, se escogen como diámetros de las tuberías las calculadas para una velocidad de 2 m/s:

	1 tubería	3 tuberías	5 tuberías
<b>D [mm]</b>	50	30	20

Tabla 6.4 Diámetros seleccionados según número de tuberías.

Tras esto, se ha realizado un cálculo para conocer la naturaleza del fluido por las tuberías diseñadas. Para ello se ha comenzado por determinar cuál es el número de Reynolds con tal de conocer el movimiento del fluido, en este caso, agua a 15 °C. Cabe destacar que se van a realizar distintas simulaciones con 4 velocidades del fluido siendo estas 0.3, 1.5, 2 y 3.5 m/s. Por lo tanto, el número de Reynolds se tiene que calcular para las cuatro velocidades. Además, el cálculo debe realizarse para los tres diferentes diámetros de tuberías de los diferentes circuitos. Se va a realizar el cálculo solo para una velocidad de 0.3 m/s, pero los resultados para todas las velocidades se reflejan en la Tabla 6.5.

$$Re = \frac{u \cdot L_c}{\nu} \quad (6.26)$$

Para el cálculo del número de Reynolds (6.1) es necesario encontrar la viscosidad cinemática ( $\nu$ ) del agua a 15 °C:

$$\nu_{H_2O_{15^\circ C}} = 1,1345 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (6.27)$$

La longitud característica ( $L_c$ ) necesaria para el cálculo del número de Reynolds viene determinada por la geometría por donde circula el fluido. En este caso el flujo es interno en una tubería circular por lo que la longitud característica es el diámetro hidráulico.

Para un diámetro de 20 mm:

$$Re_{0.3 \text{ m/s}} = \frac{u \cdot D_h}{\nu} = \frac{0,3 \text{ m/s} \cdot 0,02 \text{ m}}{1,1345 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 5288,67 \quad (6.28)$$

Para un diámetro de 30 mm:

$$Re_{0.3 \text{ m/s}} = \frac{u \cdot D_h}{\nu} = \frac{0,3 \text{ m/s} \cdot 0,03 \text{ m}}{1,1345 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 7933,01 \quad (6.29)$$

Y para un diámetro de 50 mm:

$$Re_{0.3 \text{ m/s}} = \frac{u \cdot D_h}{\nu} = \frac{0,3 \text{ m/s} \cdot 0,05 \text{ m}}{1,1345 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 13221,68 \quad (6.30)$$

Como se puede observar, en el caso de un diámetro de 20 mm el fluido se encuentra en estado transitorio; entre laminar y turbulento. El umbral entre ambos estados se encuentra en un valor del número de Reynolds de entre 2300 y 4000.

En la siguiente tabla se resume el cálculo del número de Reynolds para los dos diámetros y distintas velocidades:

Velocidad [m/s]	<i>D</i> = 50 mm	<i>D</i> = 30 mm	<i>D</i> = 20 mm
<b>0,3 m/s</b>	13221,6836	7933,0101	5288,6734
<b>1,5 m/s</b>	66108,4178	39665,0507	26443,3671
<b>3 m/s</b>	88144,5571	52886,7342	35257,8228
<b>4,5 m/s</b>	154252,9749	92551,7849	61701,19

Tabla 6.5 Número de Reynolds para los distintos diámetros y velocidades.

Como se puede observar en la Tabla 6.5 todos los valores son superiores a 4000 por lo que se puede llegar a la conclusión de que el fluido está en régimen de turbulencia en esas velocidades. Cabe destacar que, aunque con un diámetro de 20 mm y a 0.3 m/s el número de Reynolds es superior a 4000, podría ser que el fluido se encontrara todavía ligeramente en fase transitoria.

Con esto, se conoce que a todas las velocidades y diámetros el régimen del fluido es turbulento por lo cual aventajará la transferencia de calor dentro del molde debido a las fluctuaciones que realiza el fluido turbulento. Estas fluctuaciones consiguen que la transferencia de calor no solo se dé mediante conducción, como pasa con el flujo laminar donde se da por la capa límite, sino que también se dé mediante convección debido al desplazamiento aleatorio de las partículas del fluido.

El hecho de que el fluido sea turbulento indica que la longitud de entrada térmica ( $L_t$ ) e hidráulica ( $L_h$ ) son iguales, siendo aproximadamente de diez veces el diámetro de la tubería. Por lo tanto, para ambos diámetros:

$$L_t = L_h = 10 \cdot D = 10 \cdot 0.02 \text{ m} = 0.2 \text{ m} \quad (6.31)$$

$$L_t = L_h = 10 \cdot D = 10 \cdot 0.03 \text{ m} = 0.3 \text{ m} \quad (6.32)$$

$$L_t = L_h = 10 \cdot D = 10 \cdot 0.05 \text{ m} = 0.5 \text{ m} \quad (6.33)$$

Teniendo en cuenta que la longitud de la tubería es igual a la altura del molde, siendo esta de 600 mm, se sabe que la longitud que debe de recorrer el fluido para que se desarrolle completamente de 0.2 m, 0.3 m y 0.5 m para un diámetro de 20 mm, 30 mm y 50 mm respectivamente. Esto indica que una vez el fluido entra en la tubería hará que sus características cambien hasta dicho recorrido para que una vez llegue a esa distancia se formen los perfiles de velocidad y de temperatura fijos que acompañarán al sistema por todo su trayecto.

Con esto, se puede llegar a calcular el número de Nusselt como correlación entre la transferencia de calor por convección en relación con la conducción a través de una capa de fluido. Para el cálculo es necesario recurrir a la ecuación del número de Nusselt para fluidos turbulentos a través de cilindros con superficies no rugosas.

$$Nu = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12,7(f/8)^{0,5}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (6.34)$$

Donde  $f$  equivaldría a el coeficiente de fricción calculado mediante la ecuación de Swamee y Jain:

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{1}{3,7(D/\varepsilon)} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (6.35)$$

Donde  $Pr$  es el número de Prandtl y  $\varepsilon$  la rugosidad. En este caso ambos valores vienen tabulados.

El número de Prandtl para el agua a 15°C es:

$$Pr_{H_2O,15^\circ C} = 8,09 \quad (6.36)$$

Y la rugosidad tiene que ser del material de la tubería, en este caso es el material del que está compuesto el molde: acero:

$$\varepsilon_{acero} = 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ m} \quad (6.37)$$

Se realizará el cálculo para ambos diámetros a una velocidad de 0.3 m/s, el resultado para diferentes velocidades se refleja en la Tabla 6.6.

Para un flujo de 0.3 m/s en una tubería de diámetro de 20 mm:

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{1}{3,7((0,02 \text{ m})/(0,05 \cdot 10^{-3} \text{ m}))} + \frac{5,74}{5288,67^{0,9}} \right) \right]^2} = 0,0403 \quad (6.38)$$

$$Nu = \frac{(0,0403/8)(5288,67 - 1000) \cdot 8,09}{1 + 12,7(0,0403/8)^{0,5}(8,09^{2/3} - 1)} = 46,8518 \quad (6.39)$$

Para un flujo de 0.3 m/s en una tubería de diámetro de 30 mm:

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{1}{3,7((0,03 \text{ m})/(0,05 \cdot 10^{-3} \text{ m}))} + \frac{5,74}{5288,67^{0,9}} \right) \right]^2} = 0,0355 \quad (6.40)$$

$$Nu = \frac{(0,0355/8)(7933,0101 - 1000) \cdot 8,09}{1 + 12,7(0,0355/8)^{0,5}(8,09^{2/3} - 1)} = 69,8919 \quad (6.41)$$

Y para un flujo de 0.3 m/s en una tubería de diámetro de 50 mm:

$$f = \frac{0,25}{\left[ \log \left( \frac{1}{3,7((0,05 \text{ m})/(0,05 \cdot 10^{-3} \text{ m}))} + \frac{5,74}{5288,67^{0,9}} \right) \right]^2} = 0,0306 \quad (6.42)$$

$$Nu = \frac{(0,0306/8)(13221,6836 - 1000) \cdot 8,09}{1 + 12,7(0,0306/8)^{0,5}(8,09^{2/3} - 1)} = 111,9884 \quad (6.43)$$

Finalmente, el coeficiente de fricción y el número de Nusselt para los dos diámetros y distintas velocidades queda reflejado en la siguiente tabla:

Velocidad [m/s]	<i>D</i> = 40 mm		<i>D</i> = 30 mm		<i>D</i> = 20 mm	
	<i>f</i>	<i>Nu</i>	<i>f</i>	<i>Nu</i>	<i>f</i>	<i>Nu</i>
<b>0,3 m/s</b>	0.0306	111.9884	0.0355	69.8919	0.0403	46.8518
<b>1,5 m/s</b>	0.0233	499.2065	0.0267	323.6716	0.0299	229.2317
<b>2 m/s</b>	0.0226	654.3686	0.0258	425.1358	0.0289	301.9359
<b>3,5 m/s</b>	0.0216	1114.5522	0.0246	725.9928	0.0274	517.4349

Tabla 6.6 Coeficiente de fricción y número de Nusselt para los distintos diámetros y velocidades.

Mediante el número de Nusselt es posible obtener el coeficiente de transferencia de calor por conducción  $h$ . Este coeficiente cuantifica la velocidad de transferencia de calor por convección entre una superficie sólida y un fluido por unidad de superficie y unidad de temperatura. Es una manera de cuantificar las propiedades del fluido y del sólido en cuanto a la transferencia de calor en el mismo.

Mediante la fórmula general de cálculo del número de Nusselt (6.44) es posible obtener el coeficiente de transferencia de calor por conducción.

$$Nu = \frac{h \cdot L_c}{k} \quad (6.44)$$

Se ha dicho que la longitud característica es el diámetro de tubería y la conductividad térmica del agua a 15 °C es:

$$k = 0,589 \text{ W/m} \cdot \text{°K} \quad (6.45)$$

Por lo tanto, se obtiene un coeficiente de transferencia de calor para una velocidad de 0.3 m/s y para 20 mm:

$$h_{0.3 \text{ m/s}} = \frac{Nu \cdot k}{D} = \frac{46,8518 \cdot 0,589 \text{ W/m} \cdot \text{°K}}{0.02 \text{ m}} = 1379,7852 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°K} \quad (6.46)$$

Para una velocidad de 0.3 m/s y un diámetro de 30 mm:

$$h_{0.3 \text{ m/s}} = \frac{Nu \cdot k}{D} = \frac{69,9225 \cdot 0,589 \text{ W/m} \cdot \text{°K}}{0.03 \text{ m}} = 1372,2104 \text{ W/m}^2\text{°K} \quad (6.47)$$

Y para una velocidad de 0.3 m/s y un diámetro de 50 mm:

$$h_{0.3 \text{ m/s}} = \frac{Nu \cdot k}{D} = \frac{111,9884 \cdot 0,589 \text{ W/m} \cdot \text{°K}}{0.05 \text{ m}} = 1319,2231 \text{ W/m}^2\text{°K} \quad (6.48)$$

En la Tabla 6.7. se puede observar el resultado del coeficiente de transferencia de calor para ambos diámetros y las distintas velocidades.

Velocidad [m/s]	Coeficiente de transferencia de calor $h$ [ $\text{W/m}^2 \cdot \text{°K}$ ]		
	$D = 50 \text{ mm}$	$D = 30 \text{ mm}$	$D = 20 \text{ mm}$
<b>0,3 m/s</b>	1319,2231	1372,2104	1379,7852
<b>1,5 m/s</b>	5880,6526	6354,7522	6750,8722
<b>2 m/s</b>	7708,4621	8346,8331	8892,0151
<b>3,5 m/s</b>	13129,4256	14253,6591	15238,4591

Tabla 6.7 Coeficiente de transferencia de calor para los distintos diámetros y velocidades.

Seguidamente, se procede a calcular la temperatura de salida del agua de las tuberías teniendo en cuenta el cálculo del calor que aporta el núcleo de aluminio. Como se explicó anteriormente, el molde está formado por acero y el núcleo de aluminio que conforma la bandeja es de una aleación de aluminio Al 390. [12]

### 6.1.3. Cálculo de la temperatura de salida de las tuberías

Se considera que en el proceso de inyección el aluminio se encuentra inicialmente a 600 °C en su estado líquido siendo inyectado en el molde a alta presión y por lo tanto siendo solidificado. El proceso de inyección de aluminio tiene un ciclo de unos 6 a 10 segundos por pieza por lo que el molde se ve rápidamente enfriado haciendo que los eyectores pudieran llegar a extraer la pieza todavía con una temperatura de unos 100 °C.

Para encontrar la temperatura de salida del agua hay que recurrir al caso de una tubería con flujo de calor constante en la superficie (6.49). La temperatura de salida del agua proviene

de la suma de la temperatura de entrada del fluido y del cociente entre el flujo de calor de la tubería por su superficie y del producto del caudal másico y el calor específico del fluido.

$$T_{salida} = T_{entrada} + \frac{\dot{q}_s A_s}{\dot{m} c_p} \quad (6.49)$$

Para esto, es necesario encontrar el flujo de calor que pasa del núcleo de aluminio al molde y a su vez a las tuberías diseñadas para la disipación de calor. Para ello, es necesario encontrar la superficie perpendicular por donde el flujo de energía térmica se transferirá. Esta superficie no es más que el producto del perímetro de las tuberías con la longitud:

$$A_s = n \cdot \pi \cdot D \cdot l \quad (6.50)$$

Se ha añadido a la ecuación el parámetro  $n$  que no es más que el número de tuberías en el molde. Como se ha explicado, el diseño del molde convencional consta de una tubería de 50 mm de diámetro y, además, otras variantes con tres tuberías de 30 mm y cinco tuberías de 20 mm de diámetro.

Si se realiza el cálculo de estas superficies:

$$A_{s\phi 20} = 5 \cdot \pi \cdot 0,02 \cdot 0,59 = 0,1854 \text{ m}^2 \quad (6.51)$$

$$A_{s\phi 30} = 3 \cdot \pi \cdot 0,03 \cdot 0,59 = 0,1668 \text{ m}^2 \quad (6.52)$$

$$A_{s\phi 50} = \pi \cdot 0,05 \cdot 0,59 = 0,0927 \text{ m}^2 \quad (6.53)$$

Por lo tanto, el flujo de calor para el molde de cinco tuberías de 20 mm de diámetro y para el molde de una tubería de 30 mm de diámetro:

$$\dot{q}_{\phi 20} = \frac{\dot{Q}}{A_{s\phi 20}} = \frac{142,2651 \cdot 10^3 \text{ J/s}}{0,1854 \text{ m}^2} = 767531,8659 \text{ J/s} \cdot \text{m}^2 \quad (6.54)$$

$$\dot{q}_{\phi 30} = \frac{\dot{Q}}{A_{s\phi 30}} = \frac{142,2651 \cdot 10^3 \text{ J/s}}{0,1668 \text{ m}^2} = 852813,1843 \text{ J/s} \cdot \text{m}^2 \quad (6.55)$$

$$\dot{q}_{\phi 50} = \frac{\dot{Q}}{A_{s\phi 50}} = \frac{142,2651 \cdot 10^3 \text{ J/s}}{0,0927 \text{ m}^2} = 1535063,732 \text{ J/s} \cdot \text{m}^2 \quad (6.56)$$

Además, se puede calcular el caudal másico para cada una de las tuberías con los dos diámetros y a distintas velocidades. Se realiza el cálculo para todos los diámetros y a una velocidad de 0.3 m/s, para las demás velocidades el resultado queda reflejado en la Tabla 6.8.

$$A_{\emptyset 20} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 0,02^2 = 0,0003142 \text{ m}^2 \quad (6.57)$$

$$A_{\emptyset 30} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 0,03^2 = 0,0007068 \text{ m}^2 \quad (6.58)$$

$$A_{\emptyset 50} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 0,05^2 = 0,0019635 \text{ m}^2 \quad (6.59)$$

Conociendo la densidad del agua a 15°C es posible encontrar el caudal másico para los diámetros de tuberías que se han seleccionado anteriormente. Por lo tanto, si se calcula el caudal másico para todos los diámetros a una velocidad de 0.3 m/s:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\emptyset 20} &= v \cdot A \cdot \rho_{H_2O_{-15^\circ C}} = 0,3 \text{ m/s} \cdot 0,0003142 \text{ m}^2 \cdot 999,1 \text{ kg/m}^3 = \\ &= 0,09416 \text{ kg/s} \end{aligned} \quad (6.60)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\emptyset 30} &= v \cdot A \cdot \rho_{H_2O_{-15^\circ C}} = 0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,0007068 \text{ m}^2 \cdot 999,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \\ &= 0,21187 \text{ kg/s} \end{aligned} \quad (6.61)$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\emptyset 50} &= v \cdot A \cdot \rho_{H_2O_{-15^\circ C}} = 0,3 \text{ m/s} \cdot 0,0019635 \text{ m}^2 \cdot 999,1 \text{ kg/m}^3 = \\ &= 0,58852 \text{ kg/s} \end{aligned} \quad (6.62)$$

Y si se recurre a (6.49) para el cálculo de la temperatura de salida del agua en ambos diámetros de tubería y con una velocidad de 0.3 m/s se obtiene:

$$T_{salida_{\emptyset 20}} = 15^\circ C + \frac{767531,8659 \text{ J/s} \cdot \text{m}^2 \cdot 0,1885 \text{ m}^2}{0,09416 \text{ kg/s} \cdot 4186 \text{ J/kg} \cdot ^\circ K} = 72,75^\circ C \quad (6.63)$$

$$T_{salida_{\emptyset 30}} = 15^\circ C + \frac{852813,1843 \text{ J/s} \cdot \text{m}^2 \cdot 0,1696 \text{ m}^2}{0,21187 \text{ kg/s} \cdot 4186 \text{ J/kg} \cdot ^\circ K} = 68,47^\circ C \quad (6.64)$$

$$T_{salida_{\emptyset 50}} = 15^\circ C + \frac{1535063,732 \text{ J/s} \cdot \text{m}^2 \cdot 0,0943 \text{ m}^2}{0,58852 \text{ kg/s} \cdot 4186 \text{ J/kg} \cdot ^\circ K} = 87,19^\circ C \quad (6.65)$$

Por conclusión, el cálculo del caudal másico y de la temperatura de salida para ambos diámetros y a diferentes velocidades del flujo queda reflejado en la Tabla 6.8.

Velocidad [m/s]	D = 50 mm		D = 30 mm		D = 20 mm	
	$\dot{m}$ [kg/s]	$T_{salida}$ [°C]	$\dot{m}$ [kg/s]	$T_{salida}$ [°C]	$\dot{m}$ [kg/s]	$T_{salida}$ [°C]
0,3 m/s	0,5885	72,7483	0,2119	68,4706	0,0942	87,1853
1,5 m/s	2,9426	26,5497	1,0593	25,6941	0,4708	29,4371
2 m/s	3,9235	23,6622	1,4124	23,0206	0,6278	25,8278
3,5 m/s	6,8660	19,9499	2,4718	19,5832	1,0986	21,1873

Tabla 6.8 Caudal másico y temperatura de salida de las tuberías para ambos diámetros y distintas velocidades.

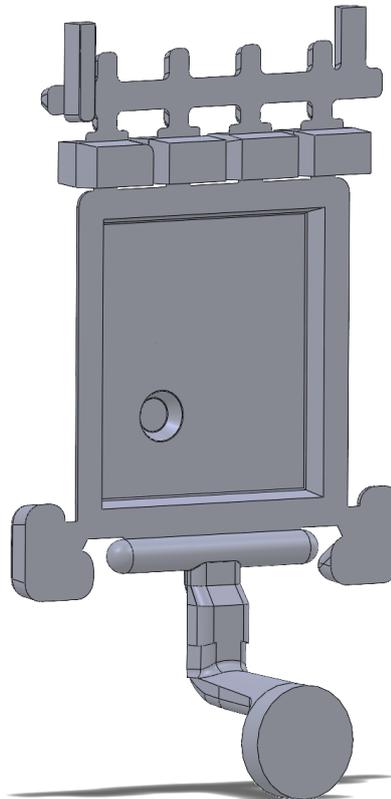


Fig. 6.4 Bandeja de aleación de aluminio.

## 6.2. Diseño del sistema de refrigeración optimizado

Este apartado se realiza posteriormente a los apartados 7.3, 7.4 y 7.5 que corresponden a la simulación de las tipologías convencionales. Una vez se analizan las partes de la bandeja, donde más calor se emite son en aquellas partes con más volumen de aluminio concentrado, es decir, el contenedor del cilindro de inyección, mazarotas volúmenes de distribución.

Es por esto, que se ha considerado realizar tres modelos de molde optimizando el emplazamiento y dirección de los tubos de refrigeración. Al igual que en el modelo convencional se realizan versiones de 1, 3 y 5 tuberías con 50, 30 y 20 mm de diámetro respectivamente, pero variando su forma o posicionamiento dentro el molde.

Como se observa en la Fig. 6.5, el calor transmitido en el molde a los ocho segundos es menor en la bandeja, debido a su poco volumen, y más alto en las partes más voluminosas de la cavidad del molde.

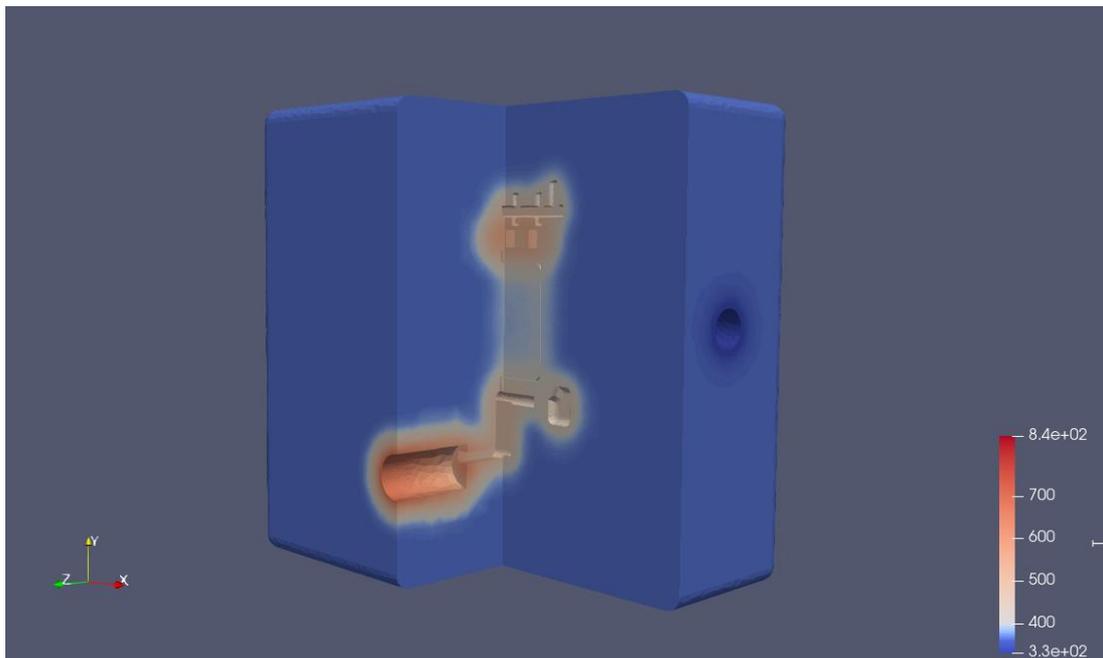


Fig. 6.5 Transferencia de temperatura en el molde en  $t = 8s$ .

Para paliar los efectos de este reparto de calor más eficientemente se propone empezar diseñando un modelo optimizado de una tubería donde la transversalidad de tubería sea vertical. Además, se propone acercar la tubería aún más a la bandeja con tal de obtener más contacto directo con las altas temperaturas.

Como se observa en la Fig. 6.6 este modelo optimizado ha sido diseñado con una inclinación que aumente el acercamiento al molde a medida que el agua circule por el tubo. La transversalidad lateral del convencional circulaba mayormente por áreas donde la temperatura del molde no era tan presente por lo que no aprovechaba correctamente el espacio. Esta inclinación permite que el agua fría de entrada tenga contacto progresivamente con las altas temperaturas. La verticalidad permite tener más contacto superficial con zonas donde la bandeja emite calor. El acercamiento máximo que se da de la superficie del tubo a la bandeja es de 16 mm.

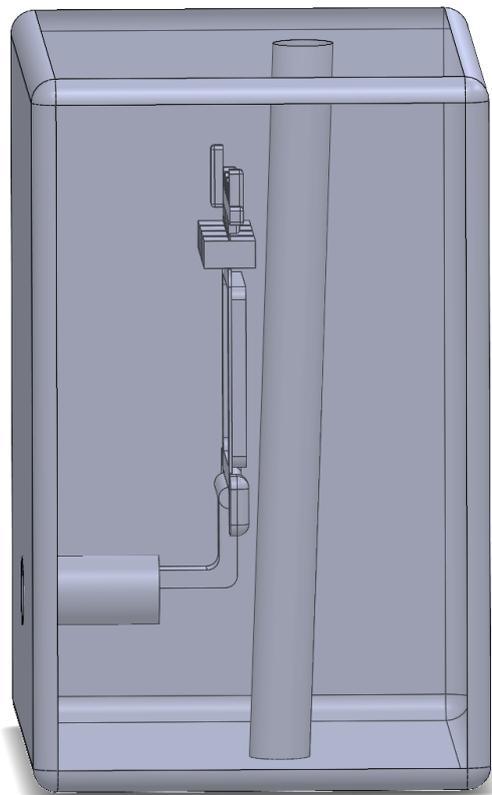


Fig. 6.6 Modelo optimizado de una tubería.

Este diseño se ha realizado teniendo en cuenta que las tuberías no pueden travesar en profundidad al molde, ya que este debe dividirse en dos para extraer la pieza.

El segundo modelo basado en tres tuberías conserva la verticalidad. En la Fig. 6.7 se observan tres tuberías verticales de 30 mm de diámetro: una trasera a la bandeja, como en el caso anterior; y dos delante, para que afecten sobre el calor emitido por el contenedor donde de inyección. La distancia de la superficie de las dos tuberías delanteras a la superficie del

depósito es de 30 mm. En cambio, la distancia de la tubería trasera a las paredes de la bandeja es de unos 40 mm.

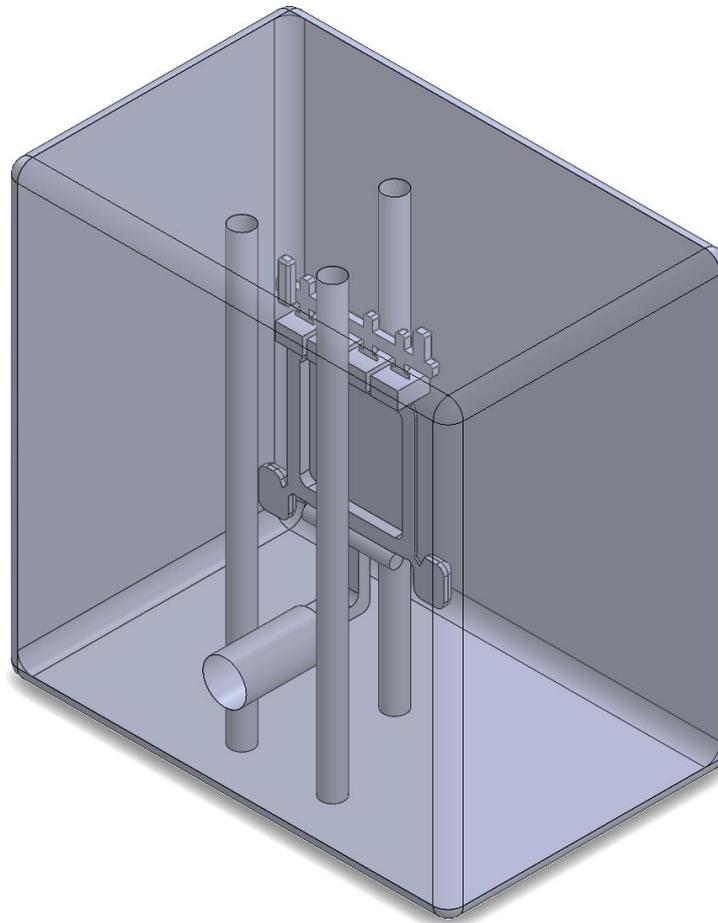


Fig. 6.7 Molde optimizado de tres tuberías.

Finalmente, como se verá en el apartado de simulaciones, el buen rendimiento de este diseño será mejorado con la adición de dos tuberías adicionales para crear el modelo con cinco tuberías. Las tuberías pasan a tener un diámetro menor de 20 mm y esta vez se añaden las dos tuberías adicionales horizontales. Esta horizontalidad circulará por la parte superior e inferior de la bandeja, aquellas zonas donde se encuentran otros grandes volúmenes. En la Fig. 7.8 se observa el modelo optimizado con cinco tuberías.

La distancia de las tuberías verticales no varía respecto a las descritas en el modelo de tres tuberías. Las tuberías laterales están separadas 30 mm en línea recta de la pared más cercana a la bandeja como se ve en la Fig. 6.9.

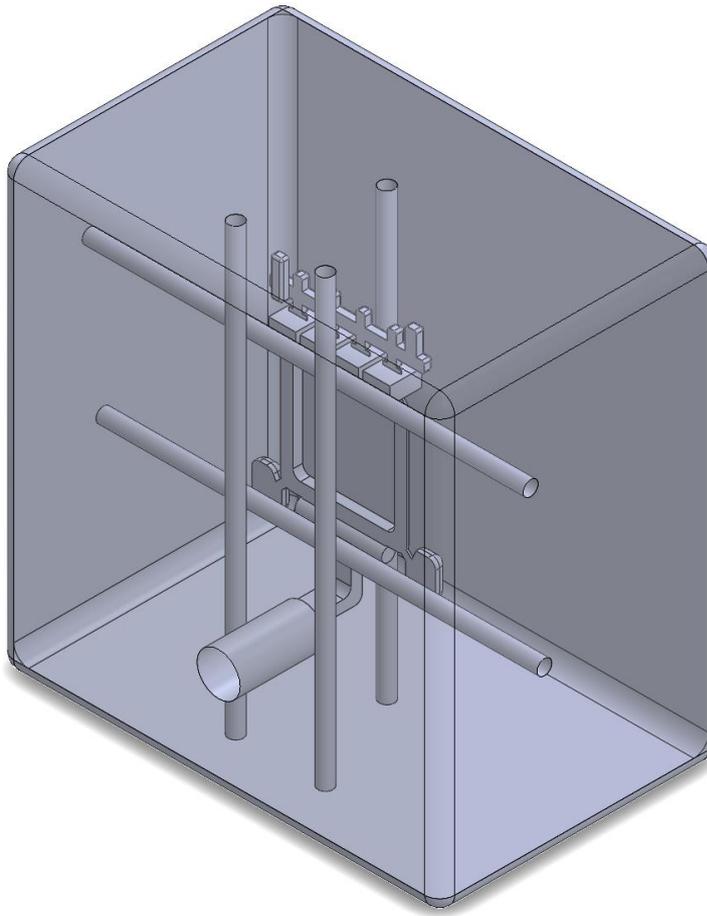


Fig. 6.8 Molde optimizado de cinco tuberías.

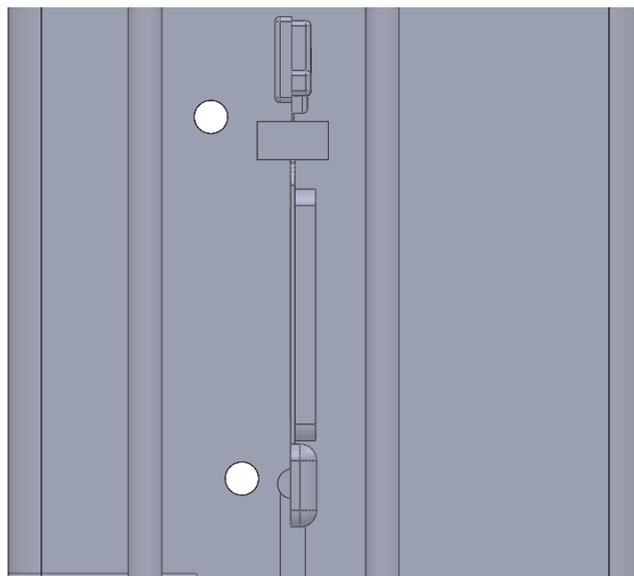


Fig. 6.9 Tuberías laterales

## 7. Simulación

### 7.1. Software escogido

Como se ha analizado en el apartado 4.3, entre muchas de las soluciones disponibles en el mercado se ve necesario escoger aquella que se adapte más a los requerimientos de este proyecto. Analizando los distintos programas analizados se llega a la conclusión que Simscale es una buena herramienta que permitirá realizar simulaciones de transferencia de calor entre fluidos y sólidos de una manera adaptativa a un perfil de principiante en la simulación computacional. Las principales ventajas que aporta Simscale y las cuales han servido para la selección del mismo son:

- Acceso a una gran variedad de tutoriales, guías de usuario para la iniciación y soporte en varios tipos de simulaciones.
- Soporte técnico por foro con la publicación de consultas e intercambio de ideas.
- Software en la nube por lo que los requerimientos computacionales pasan a segundo plano debido a que la simulación se realiza online.
- Acceso gratuito con horas limitadas de simulación y posibilidad de plan académico con horas de simulación y funcionalidades adicionales.
- Posibilidad de realizar simulaciones de transferencia de calor entre sólidos y líquidos.

### 7.2. Preparación de los modelos

#### 7.2.1. Subida del modelo CAD

Para comenzar la simulación es necesario subir al programa el modelo CAD compuesto por dos sólidos ensamblados: el molde de acero y la bandeja. De esta manera el programa reconoce que son dos sólidos distintos y permite definirlos con materiales distintos.

Una vez subido el modelo CAD es necesario establecer algunas operaciones en la geometría. Con tal que el programa reconozca un volumen de fluido dentro de las tuberías es necesario establecer una opción como región interior abierta. Con la opción de “open inner region” se establece un espacio cerrado con oberturas al exterior seleccionando como superficie de contorno la superficie perpendicular al exterior. Este debe de realizarse para todas las

tuberías que existan en el modelo. Además, es necesario un reconocimiento de superficies del modelo llamado “imprint” con tal que el programa lo asigne como contactos que posteriormente sirvan para transferir calor entre las partes del modelo.

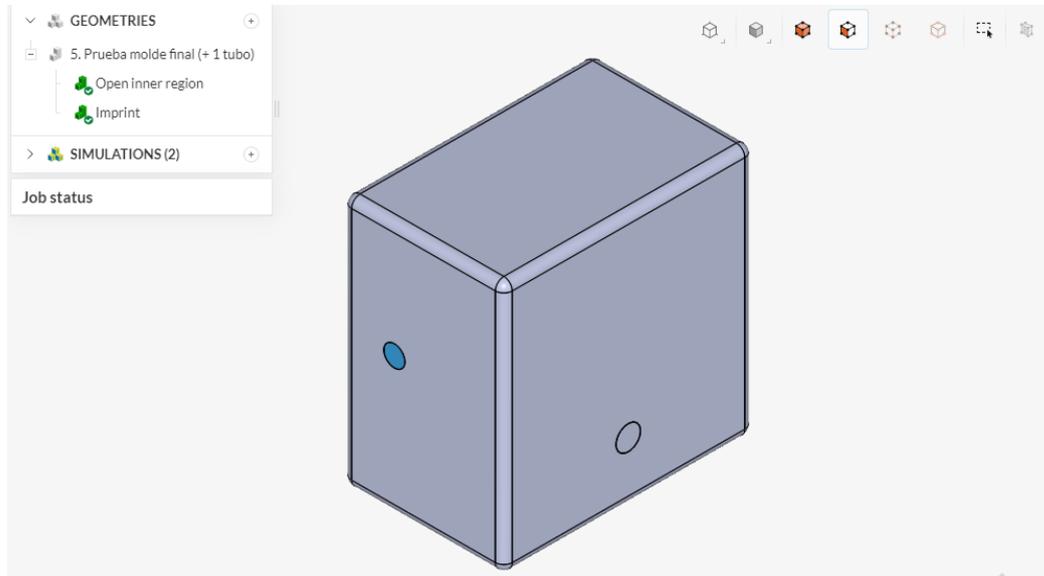


Fig. 7.1 Modelo CAD con operaciones de reconocimiento de volumen y de superficies.

Como se puede apreciar en la Fig. 7.1 el modelo ha sido procesado por el programa para el reconocimiento de volúmenes interiores y de superficies. En el caso de tener más de un volumen interior como varias tuberías el proceso de reconocimiento de volúmenes debe repetirse para cada una tal y como se observa en la Fig. 7.2.

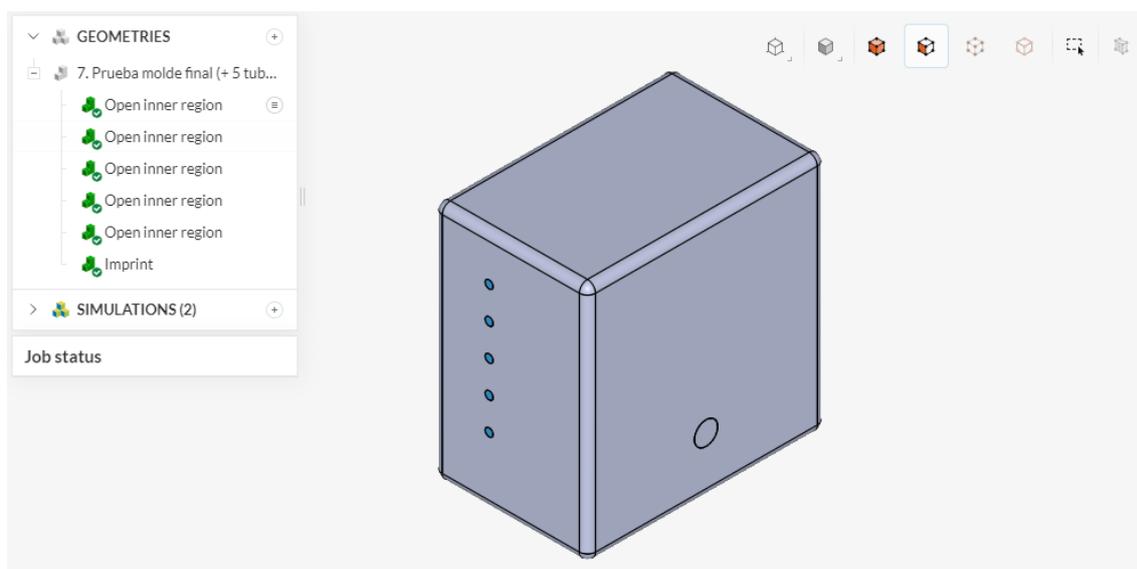


Fig. 7.2 Modelo CAD con operaciones de reconocimiento de volúmenes y superficies.

Tras esto, es posible pasar a la creación de la simulación. Simscale permite realizar distintos tipos de simulaciones para un sólido, ya sea de esfuerzo mecánico, análisis frecuencial o basados en la interacción de un flujo con el sólido, entre otros (Fig. 7.3.). En los requerimientos de este trabajo se hace necesario simular la transferencia de calor entre un sólido, que es la pieza y el molde; y el líquido, como el agua de las tuberías. Además, es necesario que se permita una simulación en estado transitorio, ya que la temperatura irá variando durante el tiempo. Por lo tanto, la simulación más adecuada es la transferencia de calor conjugada. La versión dos de “Conjugate Heat Transfer” ofrece una variante que produce el cálculo de la energía entre regiones de una manera más meticulosa llegando a que la solución converja más rápidamente, pero esta no es escogida porque no permite simulaciones transitorias.

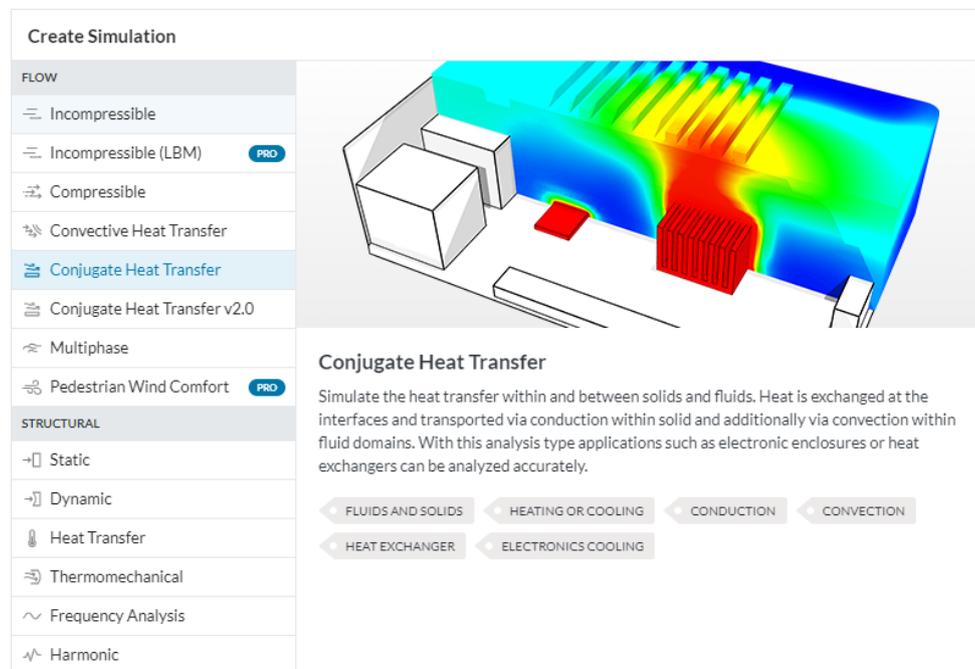


Fig. 7.3 Distintas simulaciones que ofrece Simscale.

### 7.2.2. Determinación de las condiciones iniciales

Como se ha calculado en el apartado (6.1) el flujo en ambos modelos y a distintas velocidades es en totalmente turbulento por lo que es necesario definir qué modelo de turbulencia se usará en la simulación. Dentro de los modelos de turbulencia que existen, las soluciones que Simscale ofrece son:

- LES Smagorinsky: basado en la resolución mediante la teoría de la autosemejanza resuelve mediante la separación de campo de velocidad los remolinos pequeños por medio de un modelo a escala de subcuadrícula y los grandes basados en el cálculo de la geometría. Es más adecuado para casos de fatiga térmica, vibración y flujos flotantes. Tiene dificultades para regiones cercanas a paredes.
- K-epsilon: es el más comúnmente utilizado. Se basa en la ecuación de la energía cinética turbulenta y la ecuación de la disipación. Existe la posibilidad del uso de paredes. Tiene unos bajos requerimientos de memoria y facilita la convergencia hacia una solución. Es adecuado para simulaciones compresibles e incompresibles y de flujos externos que interactúan con geometrías complejas.
- K-omega: utiliza la ecuación de energía cinética turbulenta y la disipación. Tiene la ventaja de ser más resoluble que k-epsilon. Es posible usar funcionalidades de paredes. Tiene baja necesidad de memoria y una buena convergencia. En definitiva, es similar a k-epsilon, tiene mejor precisión en flujos internos y curvaturas.
- K-omega SST: también basado en la ecuación de energía cinética turbulenta y en la de disipación. Es una combinación del método k-omega y k-epsilon, ya que facilita la simulación en flujos externos y en las capas límites interiores. [12]

Valorando estos aspectos, se ha seleccionado para aplicar en la simulación de este proyecto el modelo turbulento de k-epsilon debido a que es el comúnmente usado y el método k-omega no se encuentra disponible para el tipo de simulación que se seleccionará más adelante. Además, el modelo k-omega SST requiere una carga computacional mayor.

Una vez seleccionado el tipo de simulación el programa automáticamente reconoce los contactos del modelo. Seguidamente es necesario definir cuáles son las características físicas del modelo. En el caso del molde es necesario definir los materiales de cada parte estableciendo como acero el sólido del molde y aluminio en la bandeja. En cambio, hay de que establecer como líquido el volumen (o volúmenes en caso de varias tuberías) reconocido anteriormente. Además, se tiene que establecer el eje en donde la gravedad tiene efecto.

Seguidamente es necesario definir las condiciones iniciales de la simulación. En el caso de esta simulación es necesario definir solamente la velocidad inicial del fluido que circula por la tubería, la temperatura global, la del fluido y la temperatura de la bandeja de aluminio. Por eso se establece como:

- Velocidad inicial del fluido: Se establecerán diferentes velocidades para el fluido para ver el efecto de la refrigeración en los diferentes caudales. La velocidad del fluido generalmente es de alrededor de  $2 \text{ m/s}$  por lo que se realizarán simulaciones con:  $1.5, 2$  y  $3.5 \text{ m/s}$
- Temperatura inicial del fluido: la temperatura del fluido es determinada según la temperatura de red del agua. La temperatura es generalmente de  $15 \text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura global del molde: se considera que el molde está sometido a diversos ciclos de trabajo por lo que la temperatura global después de varios procesos de inyección continuos a tan altas temperaturas suele ser elevada. Se determina según datos experimentales como  $90 \text{ }^\circ\text{C}$
- Temperatura inicial de la bandeja: la inyección del aluminio fundido se da a temperaturas mayores que las de su temperatura de fusión ( $580 \text{ }^\circ\text{C}$ ) por lo que en el instante inicial se determina una temperatura de  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  para varios cálculos. Hay que destacar que en la simulación se establecerá una temperatura equivalente que provoque una transferencia de calor igual a la que habría en el molde en caso de considerarse el calor transferido por la solidificación. Véase la ecuación (6.18).

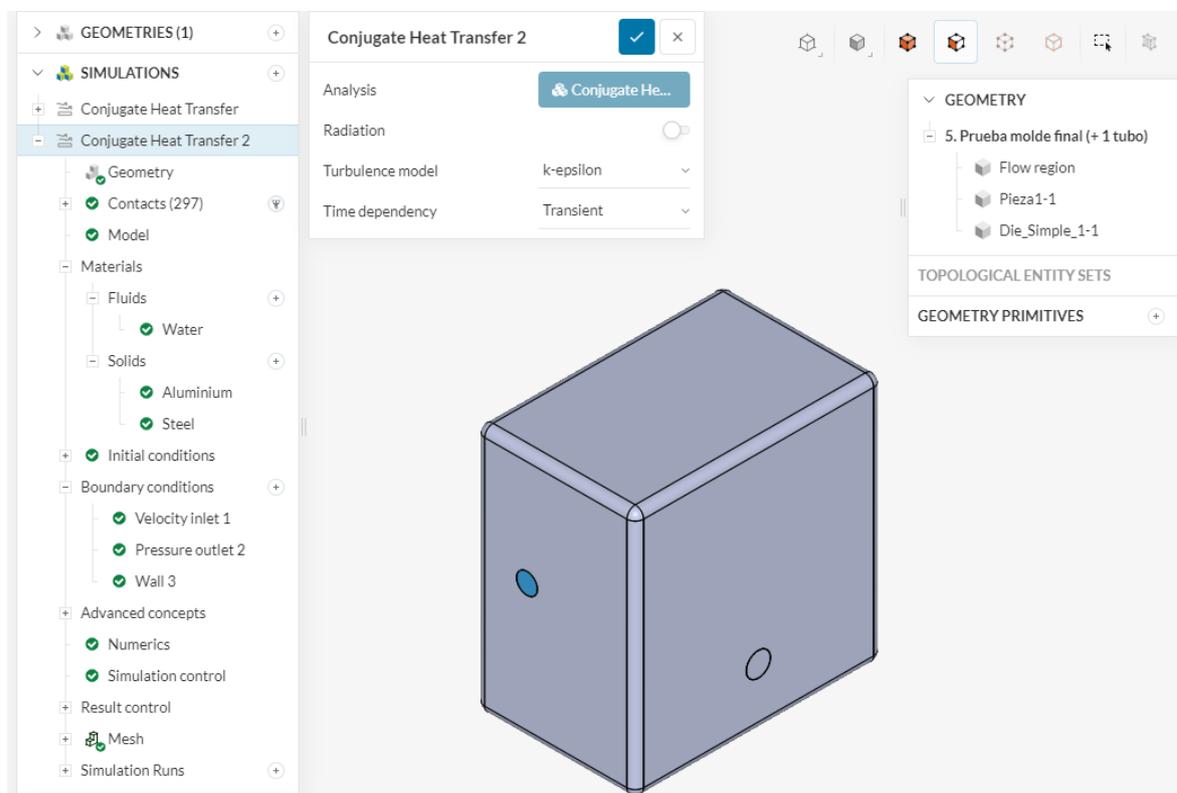


Fig. 7.4 Menú ara configurar la transferencia de calor conjugada.

Como se puede observar en la parte izquierda de la Fig. 7.4 se encuentra el menú donde se configura toda la simulación. Además de los parámetros iniciales como presión, temperatura y velocidad que se acaban de definir, existen unos parámetros no físicos que necesariamente se tienen que declarar para simular el efecto de la turbulencia en el fluido. Estos parámetros son la energía cinética turbulenta y la ratio de disipación los cuales son parámetros inexistentes físicamente, pero necesarios para la correcta configuración de la simulación.

La representación matemática de la energía cinética turbulenta viene representada como:

$$k = \frac{3}{2}(v \cdot I)^2 \quad (7.1)$$

Donde entra en juego la velocidad media del fluido  $v$  y la intensidad de turbulencia  $I$ . Esta última es bastante importante a la hora de modelizar un sistema de manera realista. La intensidad de la turbulencia es un aspecto que se debe de definir rigurosamente en las entradas. Para ello, se hace alguna estimación de la intensidad:

- Turbulencia alta (entre 5 y 20 %): Se suele dar en casos donde la velocidad del fluido es alta y las geometrías es muy compleja.
- Turbulencia media (entre 1 y 5 %): El flujo no tiene una velocidad alta y la geometría no es muy compleja.
- Turbulencia baja (por debajo del 1 %): En casos de fluidos en reposo o con viscosidad alta dentro de un entorno cerrado. Para tipos de fluidos dentro de túneles de velocidad. [12]

Sin embargo, es posible calcular la intensidad turbulenta de una tubería mediante:

$$I = 0,16 \cdot Re_{dh}^{-\frac{1}{8}} \quad (7.2)$$

Donde  $Re_{dh}$  es el número de Reynolds para el diámetro hidráulico de una tubería. Como se ha calculado en el apartado (6.1) el número de Reynolds es el equivalente al de (7.2), ya que el diámetro hidráulico de la tubería es el equivalente al usado en el cálculo realizado, es decir: el diámetro de la tubería. Por lo tanto, si se realiza el cálculo para ambos diámetros de tuberías a velocidad de 1.5 m/s:

$$Re_{\phi 20} = 26443,3671 \quad (7.3)$$

$$Re_{\phi 30} = 39665,0507 \quad (7.4)$$

$$Re_{\phi 50} = 66108,4178 \quad (7.5)$$

Si se calcula la intensidad de turbulencia para cada uno:

$$I_{\phi 20} = 0,16 \cdot 26443,3671^{-\frac{1}{8}} = 0,0448 \quad (7.6)$$

$$I_{\phi 30} = 0,16 \cdot 39665,0507^{-\frac{1}{8}} = 0,0426 \quad (7.7)$$

$$I_{\phi 50} = 0,16 \cdot 66108,4178^{-\frac{1}{8}} = 0,04 \quad (7.8)$$

Como se puede observar en (7.5) y (7.6) la intensidad de turbulencia se encuentra entre turbulencia media y alta. Con esto, ya es posible calcular la energía cinética turbulenta.

$$k_{\phi 20} = \frac{3}{2} (0,3 \cdot 0,0448)^2 = 0,006775 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (7.9)$$

$$k_{\phi 30} = \frac{3}{2} (0,3 \cdot 0,0426)^2 = 0,006122 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (7.10)$$

$$k_{\phi 50} = \frac{3}{2} (0,3 \cdot 0,04)^2 = 0,005388 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (7.11)$$

Con esto se obtiene el valor de la energía cinética turbulenta para ambos diámetros, pero solo para una velocidad del fluido de 1.5 m/s. La energía cinética turbulenta para las distintas velocidades en los diferentes diámetros se ha calculado y representado en la Tabla 7.1. [12]

Velocidad [m/s]	<i>D</i> = 20 mm		<i>D</i> = 30 mm		<i>D</i> = 50 mm	
	<i>I</i>	<i>k</i> [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	<i>I</i>	<i>k</i> [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	<i>I</i>	<i>k</i> [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
<b>0,3 m/s</b>	0,0548	0,000405	0,0521	0,000366	0,0489	0,000322
<b>1,5 m/s</b>	0,0448	0,006775	0,0426	0,006122	0,0400	0,005388
<b>2 m/s</b>	0,0432	0,011209	0,0411	0,010129	0,0385	0,008914
<b>3,5 m/s</b>	0,0403	0,029847	0,0383	0,026969	0,0359	0,023736

Tabla 7.1 Valores de la intensidad de turbulencia y energía cinética turbulenta para ambos diámetros y distintas velocidades.

Finalmente, es necesario calcular el otro parámetro que requiere la configuración del sistema: la ratio de disipación. Para ello, Simscale requiere el uso de esta fórmula:

$$\varepsilon = C_{\mu}^{\frac{3}{4}} \cdot \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (7.12)$$

Cabe destacar que dependiendo de que código CFD se esté utilizando esta fórmula puede cambiar. En el caso de Simscale, ellos establecen que tiene que ser (7.9).

Como se ve en (7.9) el cálculo depende de la constante del modelo de turbulencia  $C_{\mu}$  que suele ser de 0.09,  $k$  es la energía cinética de turbulencia calculada anteriormente y  $l$  es la longitud de escala de turbulencia. Esta última, en el caso de tuberías, se puede aproximar mediante el diámetro hidráulico siendo esta de alrededor del 3.8 % del diámetro hidráulico. Como se conoce que el diámetro hidráulico es igual al diámetro de la tubería en casos de tuberías circulares:

$$l = 0.038 \cdot d_h \quad (7.13)$$

$$l_{\emptyset 20} = 0.038 \cdot 0,02 = 0,00076 \text{ m} \quad (7.14)$$

$$l_{\emptyset 30} = 0.038 \cdot 0,03 = 0,00114 \text{ m} \quad (7.15)$$

$$l_{\emptyset 50} = 0.038 \cdot 0,05 = 0,0019 \text{ m} \quad (7.16)$$

Con esto es posible encontrar la ratio de disipación con los cálculos de la Tabla 7.1 y los calculados en (7.11) y (7.12). Se realiza el cálculo para ambos diámetros a una velocidad de 0.3 m/s.

$$\varepsilon_{\emptyset 20} = 0,09^{\frac{3}{4}} \cdot \frac{0.000405^{\frac{3}{2}}}{0,00076} = 0,00176 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (7.17)$$

$$\varepsilon_{\emptyset 30} = 0,09^{\frac{3}{4}} \cdot \frac{0.000366^{\frac{3}{2}}}{0,00114} = 0,00101 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (7.18)$$

$$\varepsilon_{\emptyset 50} = 0,09^{\frac{3}{4}} \cdot \frac{0.000322^{\frac{3}{2}}}{0,0019} = 0,0005 \text{ m}^2/\text{s}^2 \quad (7.19)$$

El resultado de las demás ratios de disipación para ambos diámetros a distintas velocidades queda reflejado en la Tabla 7.2. [12]

Velocidad [m/s]	<i>D</i> = 20 mm	<i>D</i> = 30 mm	<i>D</i> = 50 mm
	$\varepsilon$ [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]		
0,3 m/s	0,0005	0,0010	0,0018
1,5 m/s	0,0342	0,0690	0,1206
3 m/s	0,0728	0,1469	0,2566
4,5 m/s	0,3163	0,6384	1,1148

Tabla 7.2 Ratios de disipación para ambos diámetros a distintas velocidades.

### 7.2.3. Estudio del mallado.

Una vez calculados y definidos todos los parámetros de las condiciones iniciales es necesario definir las condiciones de contorno. En el caso del molde solo hay que definir la velocidad de la tubería y las paredes del sistema.

Normalmente en simulación numérica, en los casos donde simulaciones en las cuales se conocen las condiciones del flujo, se recomienda una combinación de condiciones de frontera de velocidad de entrada y presión de salida con tal de proporcionar estabilidad a la simulación.

Para la generación de la malla es necesario tener en cuenta qué requerimientos pide la simulación que se está utilizando. Simscale tiene la particularidad de poder generar mallas dentro del mismo programa basándose en dos tipos de algoritmos: el estándar y el hexagonal.

El algoritmo estándar genera una malla tridimensional usando elementos tetraédricos o hexaédricos. En cambio, el hexagonal tal y como su nombre indica, se basa en la generación de mallas tridimensionales de forma hexaédrica y hexaédrica partida. Este último requiere refinamiento en los bordes de la geometría para conseguir un mallado más óptimo. Ambos algoritmos son útiles para todo tipo de simulaciones excepto para aquellas basadas en simulaciones estructurales las cuales se requiere únicamente el mallado estándar.

En el caso de flujos turbulentos hay que realizar una representación rigurosa de las paredes del modelo, ya que es en estas donde el fenómeno tiene lugar. Los modelos solo suelen servir

en aquellas zonas donde la turbulencia ya está desarrollada pero no en las paredes. Es por eso, que es necesaria una representación lo más precisa posible con tal que la predicción del flujo en los contornos de las paredes del modelo sean lo más satisfactorias. Para ello existen dos maneras:

- Integrar la turbulencia a la pared mediante la modificación del modelo para permitir que la región afectada por los gradientes de viscosidad altos se resuelva con toda la malla hasta la pared. Requiere una carga computacional elevada. Este método se suele utilizar cuando las fuerzas en las paredes son relevantes.
- Uso de funciones de pared que modelan las regiones cercanas a la pared. Estas son ecuaciones derivadas empíricas que unen la región interior cercana de la pared con la región completamente desarrollada por la turbulencia del fluido. Con este tipo es posible dejar de resolver la capa límite y por lo tanto reducir el tamaño de la malla y la carga computacional. Este tipo de función se basa en la ley de pared en flujos turbulentos cuyo parámetro más importante es el adimensional llamado distancia de pared ( $y^+$ ).

$$y^+ = \frac{y \cdot u_\tau}{\nu} \quad (7.20)$$

Donde  $u_\tau$  es la velocidad de fricción;  $y$  es la distancia absoluta desde la pared y  $\nu$  es la viscosidad cinemática. En este caso es conveniente que la distancia de pared esté en un rango de entre 30 y 300 haciendo que en el caso que sea mayor o menor a este rango podría darse que el modelo es inválido o que no se pudiera resolver.

En el caso de este sistema, las funciones de pared tienen que estar presentes con tal de resolver la problemática de la turbulencia en paredes. Para los distintos diámetros de tubería se ha realizado un mallado específico para cada uno con tal de estudiar cuál era el valor de la distancia de pared óptima. Al requerir una distancia de pared de entre 30 y 300 la malla generada es de tal manera como se aprecia en la Fig. 7.5. [9] [14]

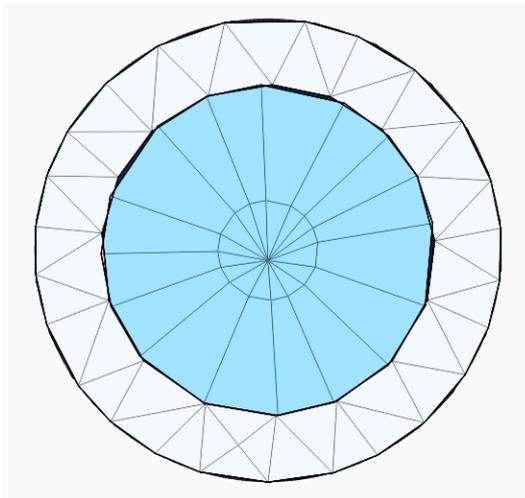


Fig. 7.5 Malla generada por la aproximación de funciones de pared para  $D = 50$  mm.

En la Fig. 7.5. se observa la malla de la tubería para un diámetro de 50 mm. Se ve una distancia desde la pared al centro suficiente como para simular el flujo en su capa límite con suficiente holgura. Si se realiza la simulación del mismo para apreciar en qué valores se encuentra la distancia de pared óptima resulta en:

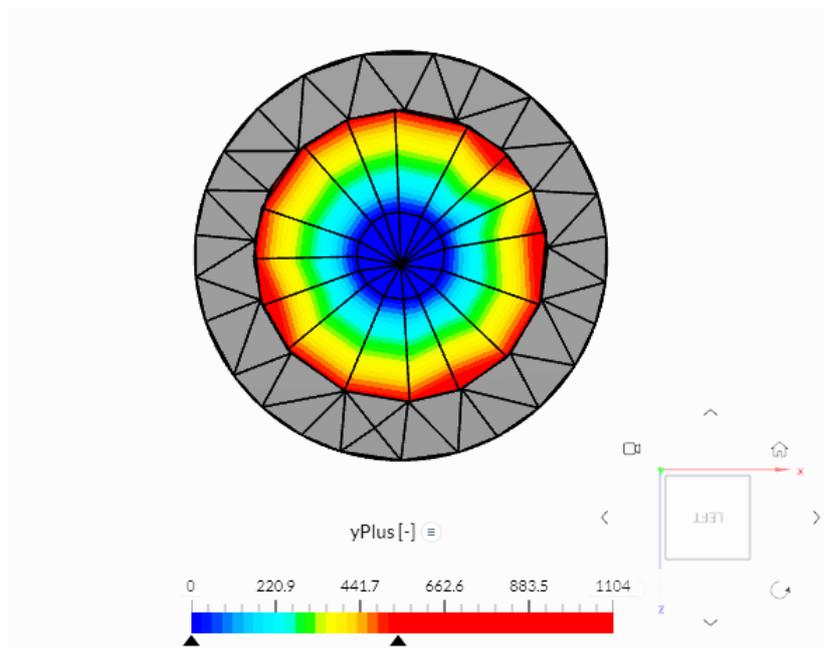


Fig. 7.6 Valores de la distancia de pared óptima para un diámetro de 50 mm.

Se observa en la escala de la Fig. 7.6 que los valores de la distancia de pared se encuentran por encima de 300 cerca de la pared la cuál cosa no es deseable, pero no se ha encontrado una malla más óptima. En el centro de la tubería se puede apreciar una distancia de pared

inferior a 30, lo cual no es relevante, ya que es la parte que no pertenece a la capa límite del fluido.

En cuanto al diámetro correspondiente a las tuberías de 30 mm, la malla queda reflejada en la Fig. 7.7. Los valores correspondientes a la distancia de pared óptima quedan plasmados en la Fig. 7.8 donde se observa que no hay valores por encima de 300 y los inferiores a 30 se concentran en el centro de la circunferencia interior de la malla y ligeramente en sus alrededores.

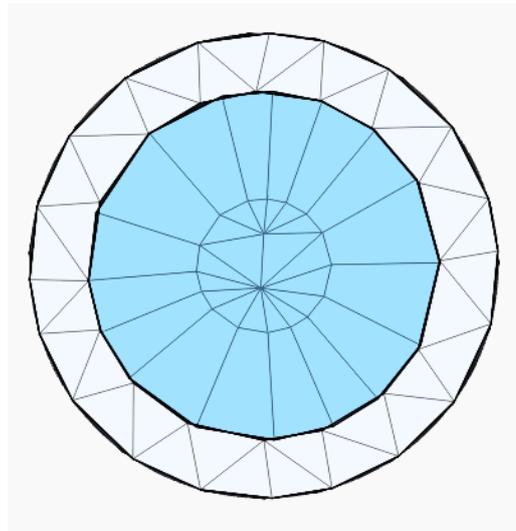


Fig. 7.7 Malla generada por la aproximación de funciones de pared para  $D = 30$  mm.

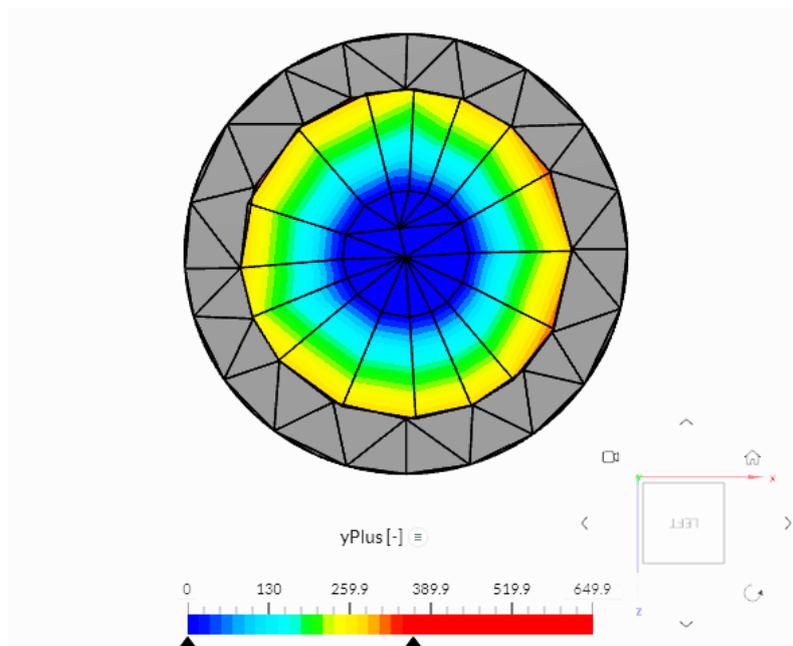


Fig. 7.8 Valores de la distancia de pared óptima para  $D = 30$  mm.

Ocurre lo mismo para un diámetro de 20 mm. Se observa en la Fig. 7.9 la malla correspondiente y en la Fig. 7.10 los valores de distancia de pared óptima donde no hay valores por encima de 300 y los inferiores a 30 son aquellos que circunvalan la circunferencia central mallada.

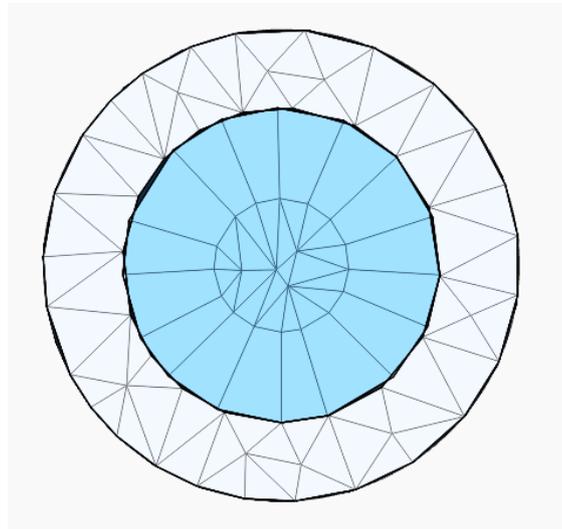


Fig. 7.9 Malla generada por la aproximación de funciones de pared para  $D = 20$  mm.

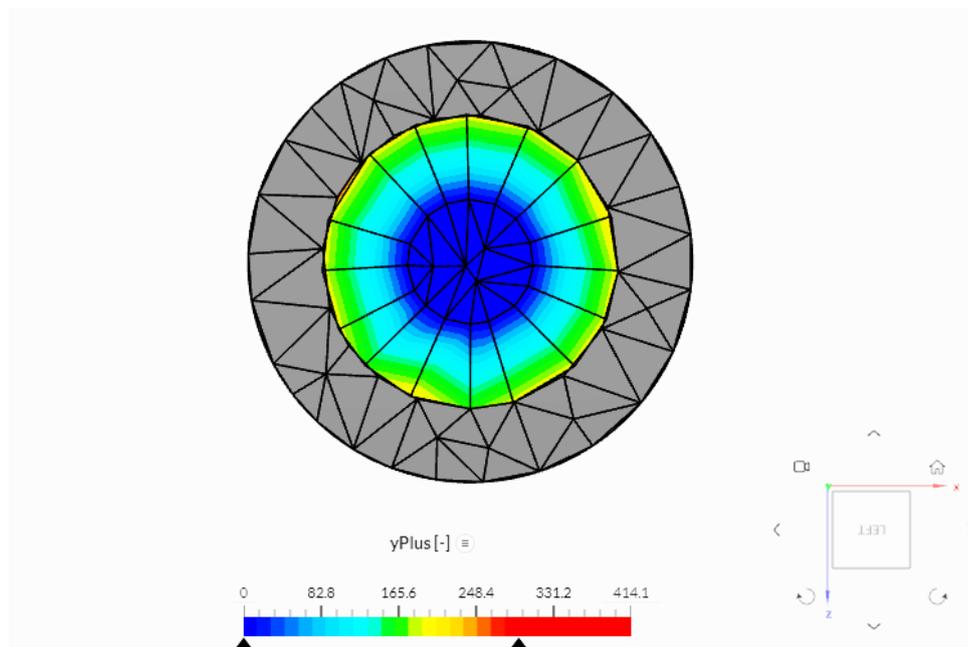


Fig. 7.10 Valores de la distancia de pared óptima para  $D = 20$  mm.

Además, se han realizado cortes para observar la transición de las celdas de la malla a lo largo de su sección transversal, ya que dependiendo de la configuración de malla podía haber

en el interior zonas más anárquicas que no siguieran el patrón que se veía desde los extremos o estrecheces en la longitud de la pared al centro en algunos rangos. En la Fig. 7.11, 7.12 y 7.13 se observa una sección transversal de la tubería para 20, 30 y 50 mm de diámetro respectivamente.



Fig. 7.11 Sección transversal de la malla con  $D = 50$  mm.



Fig. 7.12 Sección transversal de la malla con  $D = 30$  mm.



Fig. 7.13 Sección transversal de la malla con  $D = 20$  mm.

Como se observa en las figuras anteriores, las dimensiones se conservan en todos los casos, aunque hay rangos a lo largo de todo el eje longitudinal en los que la malla varia.

#### **7.2.4. Mallado de la geometría**

Tras esto, se ha pasado a mallar el molde completo con las dimensiones encontradas con tal de conservar las dimensiones de la distancia de pared. Con esto se han realizado el mallado teniendo en cuenta las dimensiones consideradas anteriormente.

Simscale tiene la facilidad de mallar geometrías de manera muy simple mediante una interfaz muy intuitiva la cual genera automáticamente la malla según el algoritmo escogido explicado anteriormente (hexaédrico o estándar). Además, te da a escoger un dimensionamiento automático, especificando el nivel de finura; o uno manual, especificando las longitudes

mínimas y máximas de los bordes de la geometría. Es ésta última la escogida en las tres geometrías aplicando una longitud máxima de 0.02 m y una mínima de 0 m.

Es en cada una de las diferentes geometrías que se ha variado otro parámetro correspondiente a las condiciones de las capas límites. En la Tabla 7.3 se observan los diferentes parámetros configurados para las diferentes geometrías convencionales. En la Fig. 7.14 se muestra el menú de configuración para el mallado dentro de Simscale.

	<i>D = 20 mm</i>	<i>D = 30 mm</i>	<i>D = 50 mm</i>
Número de capas	1	1	1
Grosor relativo global	1,9	1,7	1,7
Ratio de crecimiento	1	1	1

Tabla 7.3 Configuración de la capa límite para las diferentes geometrías.

Mesh 1

Algorithm Standard ▾

Sizing Manual ▾

Maximum edge length 0.02 m ▾

Minimum edge length 0 m ▾

Automatic boundary layers

Number of layers 1

Overall relative thickness 1.9

Layer gradation control Specify growth rate ▾

Growth rate 1

Physics-based meshing

Hex element core

Number of processors **PRO** Automatic (up to 16) ▾

Fig. 7.14 Ventana de configuración de mallado para la configuración con una tubería.

Además, en la configuración de la simulación se activan las opciones de mallado basado en física (“physics-based meshing”) la cual habilita al programa a tener en cuenta información de las propiedades del material, condiciones de contorno y otros parámetros para la realización de la malla. El hecho de activar esta opción crea un refinamiento de la malla en las entradas y salidas y en los muros especificados en las condiciones de contorno. A su vez, se activa la opción núcleo hexaédrico (“hex element core”) el cual genera una malla hexaédrica en la malla interior de la geometría.

El mallado global del molde convencional con una tubería de 50 mm de diámetro se puede observar en la Fig. 7.15. Si se aumenta la vista en aquellas zonas más propensas a estar compuestas por bordes y esquinas poco redondeadas se observa que el programa automáticamente ha realizado un refinamiento de la malla, ya que estas son zonas de interés por sus detalles. En la Fig. 7.16 se ve la parte del mallado de la bandeja donde se aprecia que en sus bordes i esquinas el mallado es más fino.

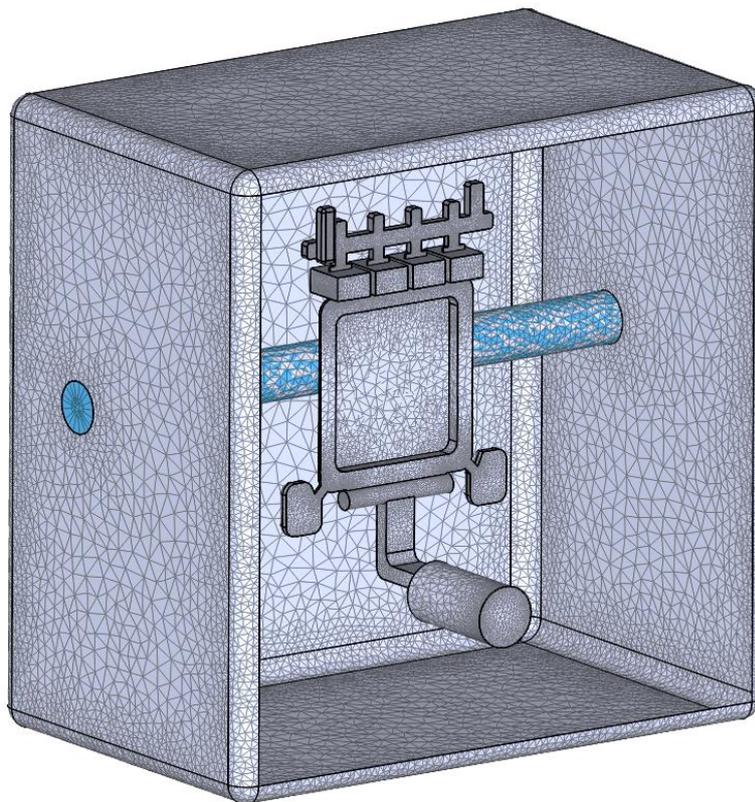


Fig. 7.15 Mallado general del molde convencional con una tubería.

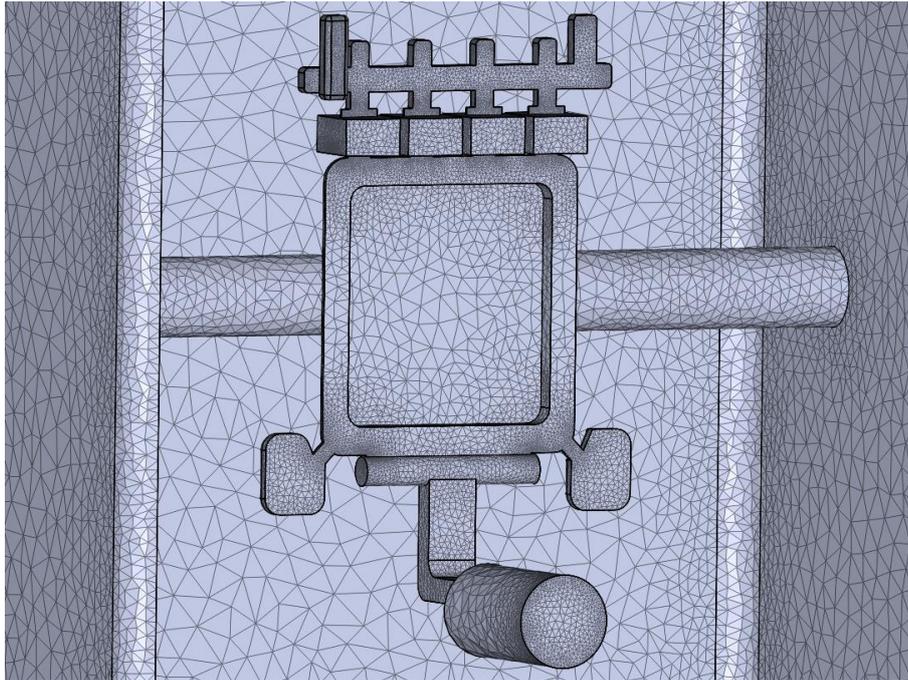


Fig. 7.16 Mallado de la bandeja

En cuanto a los contactos entre superficies y esquinas del modelo, el programa también realiza un refinamiento como se ve en la Fig. 7.17. En la Fig. 7.18 se observa el refinamiento de mallado del contacto entre el molde y el volumen del contenedor del pistón de inyección.

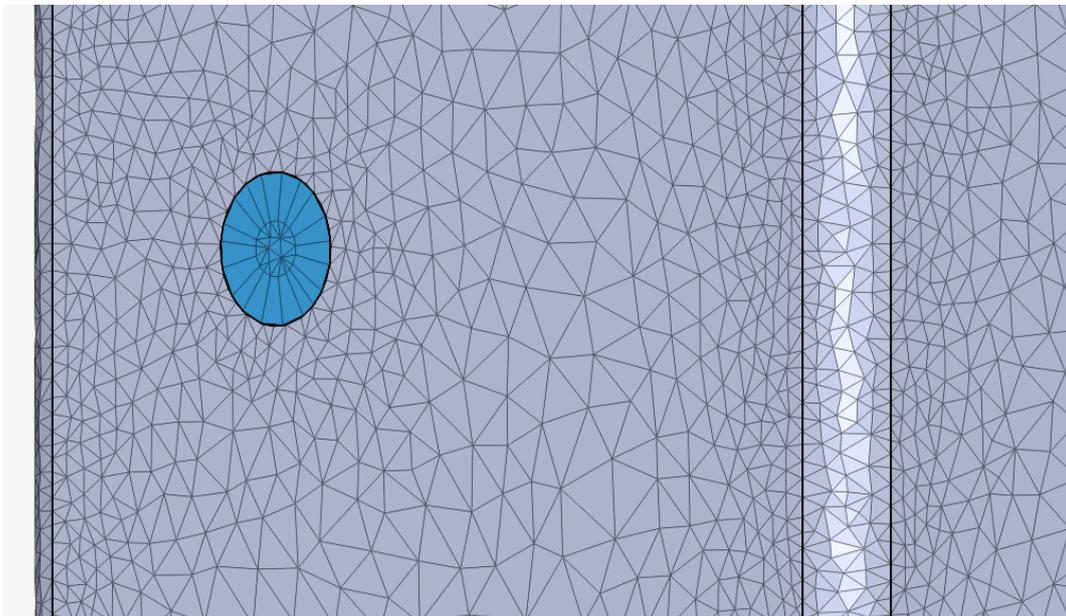


Fig. 7.17 Mallado de detalle de esquina y contacto del molde para una tubería.

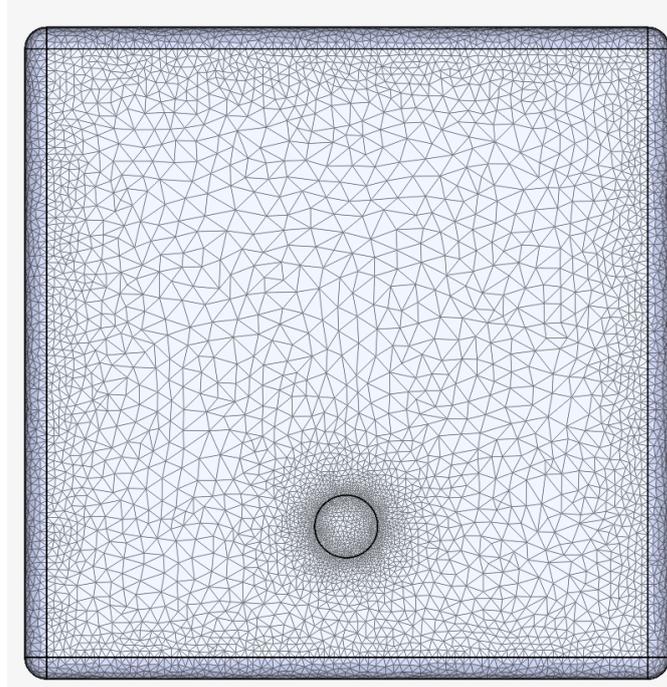


Fig. 7.18 Mallado del alzado del molde.

Como se ha explicado anteriormente, con la función de “hex element core” activada, en la malla interior del molde se realiza un mallado hexaédrico por lo que si se realiza un corte en la malla como el que aparece en la Fig. 7.18 se observa dicho. Además, se puede visualizar como se conserva a lo largo de todo su eje longitudinal la distancia entre la pared de la tubería hasta el centro como constante consiguiendo así que la distancia de pared óptima se mantenga en dicho intervalo explicado en el subapartado anterior.

En el subapartado anterior la prueba se realizó con un cilindro hueco con una simpleza que generaba una malla determinada. Cabe destacar que la malla del molde realizada en este apartado puede no coincidir con el desarrollado en el subapartado anterior debido a que, en este caso, el software tiene que tener en cuenta una geometría mayor, una mayor cantidad de puntos a unir y por lo tanto una malla distinta. Además, el mallado se ha realizado estableciendo manualmente la longitud máxima del borde como 0.02, lo cual generará una malla distinta con unos entramados distintos a los vistos en el ejemplo anterior, que se hizo de forma automática.

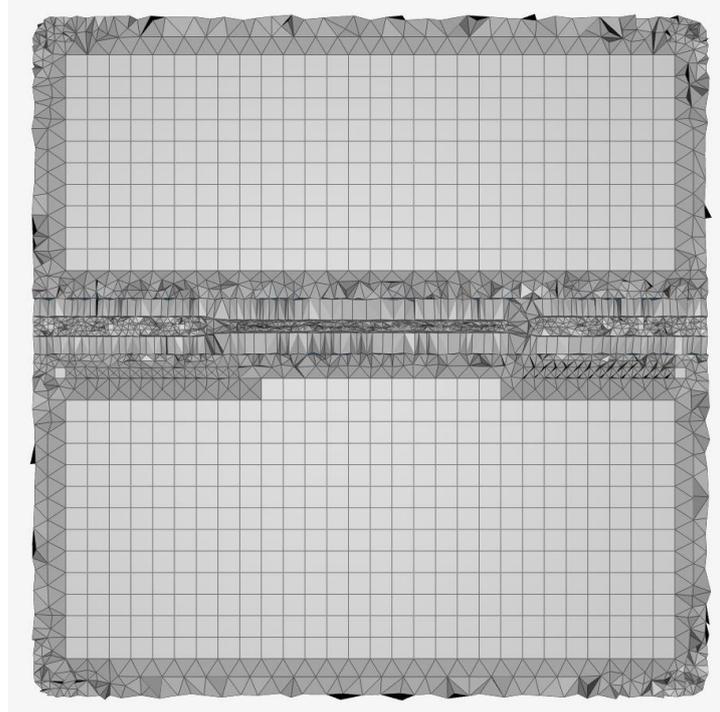


Fig. 7.19 Mallado interior del molde para una tubería.

Los mallados para los diferentes moldes convencionales con 3 y 5 tuberías son los siguientes:

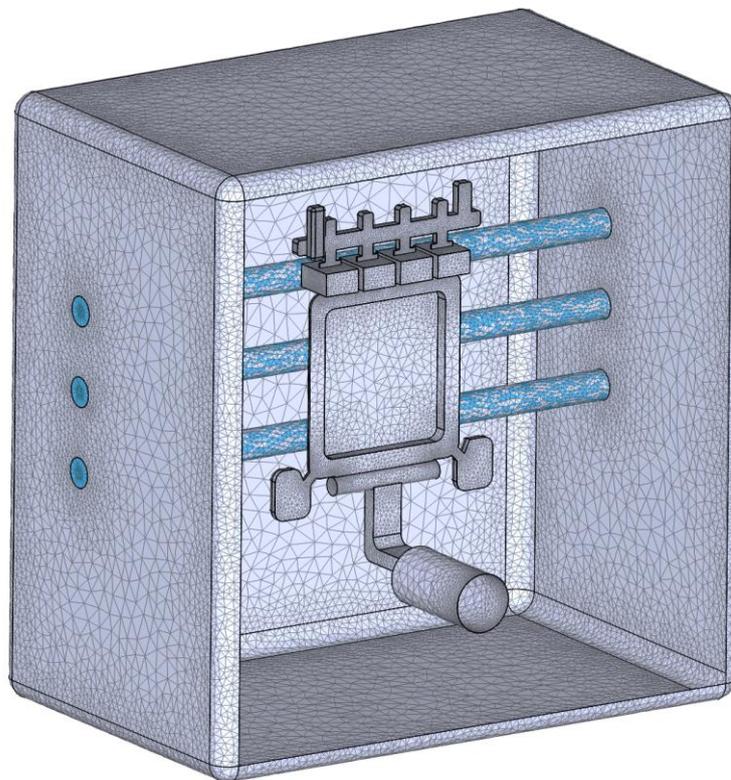


Fig. 7.20 Mallado general del molde convencional con tres tuberías.

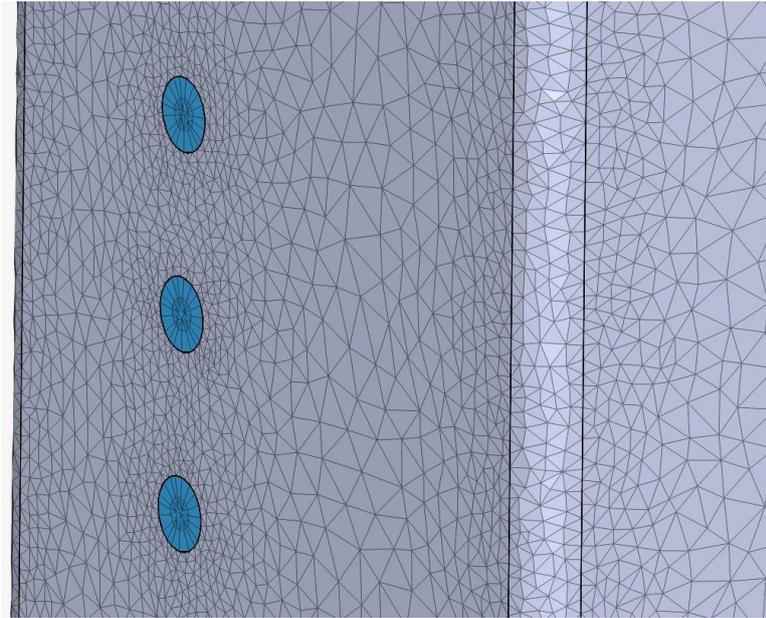


Fig. 7.21 Mallado de detalle de esquina y contacto del molde para tres tuberías.

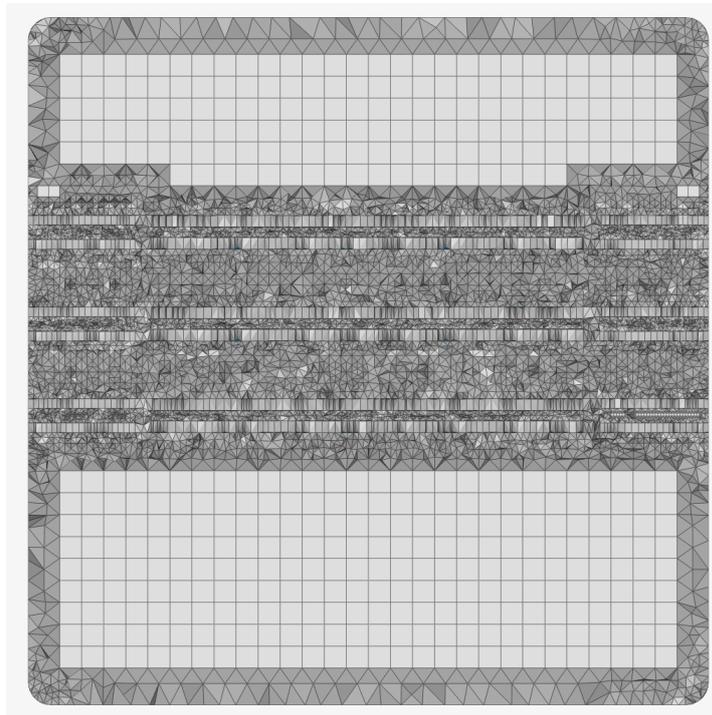


Fig. 7.22 Mallado interior del molde para tres tuberías.

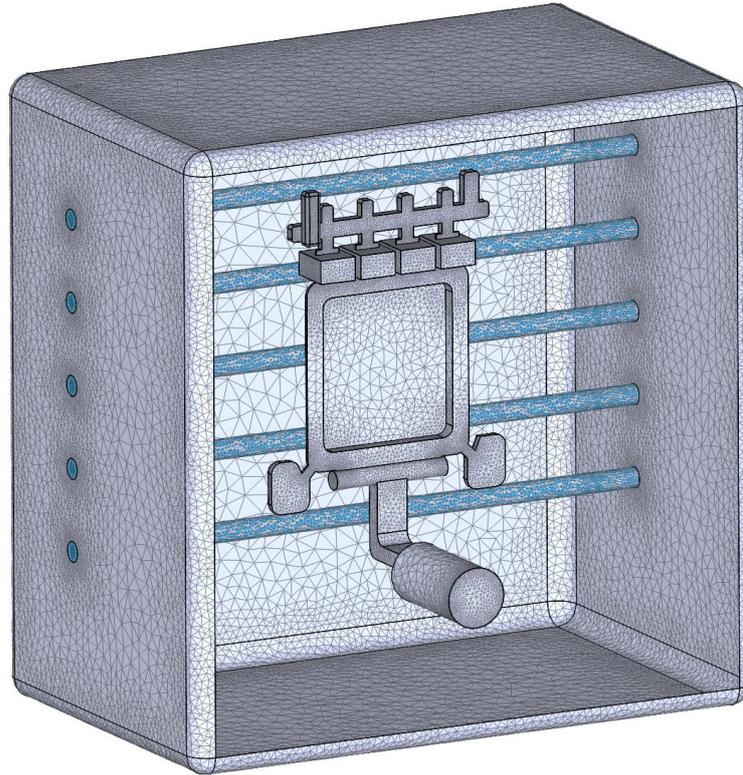


Fig. 7.23 Mallado general del molde convencional con cinco tuberías.

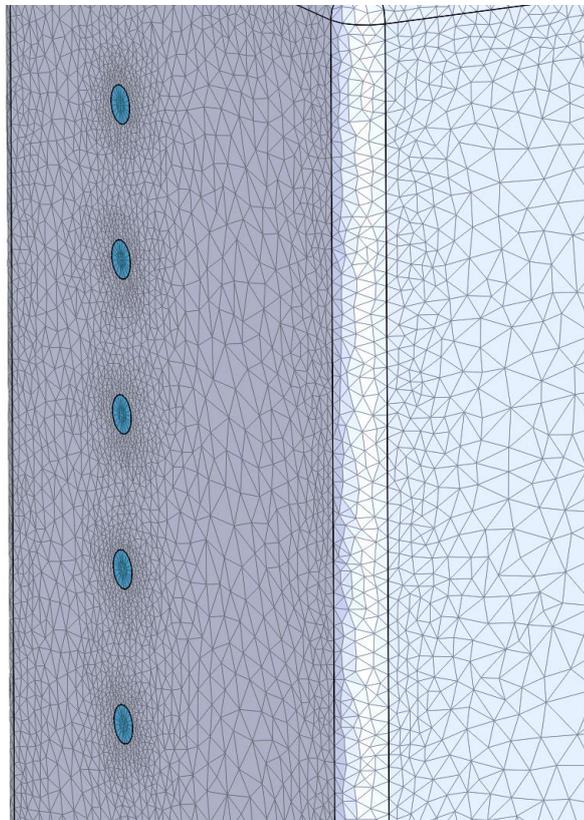


Fig. 7.24 Mallado de detalle de esquina y contacto del molde para cinco tuberías.

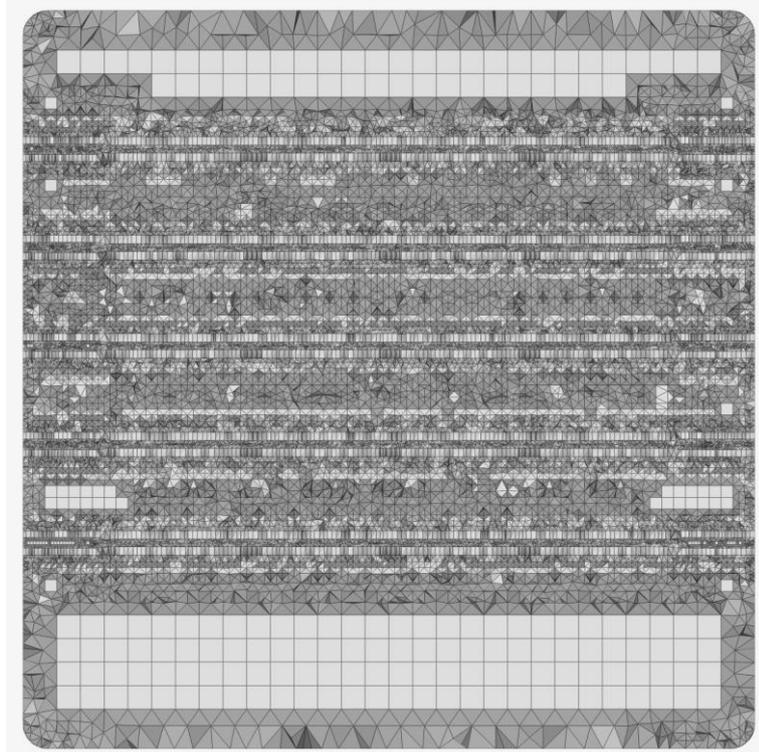


Fig. 7.25 Mallado interior del molde para cinco tuberías.

Se observa en los tres casos distintos que el software ha generado refinamientos en aquellos bordes y contactos del molde. Además, ha realizado un mallado interior de forma hexaédrica generando así un mallado interior menos fino en las zonas menos relevantes provocando así una disminución de la carga computacional en la simulación.

En el menú de configuración del mallado existe un apartado llamado “meshing log” donde se pueden revisar resultados estadísticos correspondientes a la calidad de la malla. Es un apartado que vale la pena estudiar para comprobar el resultado del mallado ya que estos afectarán al resultado de la simulación. Hay unos parámetros dentro de este menú que Simscale recomienda que estén por debajo de algunos valores:

- $\text{testAspectRatio} \ll 100$
- $\text{Non-orthogonality} \ll 75$
- $\text{tetEdgeRatio} \ll 100$
- $\text{VolumeRatio} \ll 100$

Si se observa la calidad de la malla para las distintas geometrías de este proyecto:

```

Mesh quality metrics:
tetEdgeRatio
  min: 1.0000755085514437
  max: 31.681217868334933
  average: 1.7253479923514115
  standard deviation 0.33434243103627764
  median: 1.710299300479717
  99.9-th percentile: 3.7692316674704758
  99.99-th percentile: 11.897875342688444
  99.999-th percentile: 20.185691844976848
quadMaxAngle
  min: 89.69046400970221
  max: 114.60777622829
  average: 90.42387218753717
  standard deviation 1.8566546371356065
  median: 90
  99.9-th percentile: 107.0834794811641
  99.99-th percentile: 112.0428246498729
  99.999-th percentile: 114.60777622829
triMaxAngle
  min: 60.00000000000001
  max: 174.1462862795064
  average: 80.15809735192258
  standard deviation 11.83405143235358
  median: 78.33088577800673
  99.9-th percentile: 117.34136799299294
  99.99-th percentile: 137.87286497620116
  99.999-th percentile: 153.95793669266592
triMinAngle
  min: 1.331306687469797
  max: 60.00000000000001
  average: 44.000672714326306
  standard deviation 7.708705028413523
  median: 44.05055089456397
  99.9-th percentile: 59.997502165788234
  99.99-th percentile: 59.99750216578853
  99.999-th percentile: 60.00000000000001
volumeRatio
  min: 1
  max: 461.0476218855667
  average: 1.393766940273027
  standard deviation 1.0724935829312348
  median: 1.223964614546694
  99.9-th percentile: 8.274960978414283
  99.99-th percentile: 43.97451529400694
  99.999-th percentile: 86.3548736721619
tetAspectRatio
  min: 1.000050347271163
  max: 23.079296158952392
  average: 1.547231865510336
  standard deviation 0.23340788859478157
  median: 1.5569176586035947
  99.9-th percentile: 3.0845631600714536
  99.99-th percentile: 5.775939194468177
  99.999-th percentile: 10.110980235962364
nonOrthogonality
  min: 0
  max: 85.68404202161204
  average: 17.444476148720696
  standard deviation 10.27253791418202
  median: 16.76050886348187
  99.9-th percentile: 58.591374306051755
  99.99-th percentile: 78.87009365755775
  99.999-th percentile: 83.26631114436805

```

Fig. 7.26 Calidad de la malla para la configuración con una tubería.

En la Fig. 7.26 se observa parte del menú de resultados de “meshing log” donde se puede apreciar que todos los valores están por debajo de 100. Se destaca que la malla tiene problemas de no ortogonalidad que se suelen solucionar refinando la malla cosa que no es posible porque esto requiere una mayor capacidad computacional y un incremento considerable del tiempo de simulación.

```

Mesh quality metrics:
tetEdgeRatio
  min: 1.0000755085514386
  max: 31.70555279867614
  average: 1.7253513305366643
  standard deviation 0.3463109424490926
  median: 1.7045674243834124
  99.9-th percentile: 4.2054411114055075
  99.99-th percentile: 11.85841125987266
  99.999-th percentile: 22.077596176253376
quadMaxAngle
  min: 89.75889426615274
  max: 107.79684346848644
  average: 91.32733654534739
  standard deviation 2.8107208365698795
  median: 90
  99.9-th percentile: 104.91250164656127
  99.99-th percentile: 106.74152362315165
  99.999-th percentile: 107.00754045451217
triMaxAngle
  min: 60.00000000000001
  max: 172.29237188779973
  average: 79.99398797992221
  standard deviation 11.761791641645502
  median: 78.05628981363627
  99.9-th percentile: 123.22427471576405
  99.99-th percentile: 136.55555417047182
  99.999-th percentile: 143.98214233525474
triMinAngle
  min: 2.011463754222927
  max: 60.00000000000001
  average: 43.971949427874506
  standard deviation 7.757069001546491
  median: 44.0857208810471
  99.9-th percentile: 59.9975021657882
  99.99-th percentile: 59.99750216578853
  99.999-th percentile: 59.99999999999992
volumeRatio
  min: 1
  max: 109.25696230841243
  average: 1.4373470826909995
  standard deviation 1.2793008100727838
  median: 1.2252919693522715
  99.9-th percentile: 21.630575235403686
  99.99-th percentile: 37.360185266467155
  99.999-th percentile: 52.867955238882175
tetAspectRatio
  min: 1.0000503472711553
  max: 13.569209214805024
  average: 1.5421443218628863
  standard deviation 0.2362253411926846
  median: 1.5462505670421995
  99.9-th percentile: 2.9745073141702996
  99.99-th percentile: 5.631056848492075
  99.999-th percentile: 9.837368974840293
nonOrthogonality
  min: 0
  max: 86.62658246680324
  average: 17.596631966442672
  standard deviation 10.40153446830794
  median: 16.91128862951614
  99.9-th percentile: 59.667079054476645
  99.99-th percentile: 78.85511872977192
  99.999-th percentile: 83.47194354600754

```

Fig. 7.27 Calidad de la malla para la configuración con tres tuberías.

Al igual que en la figura anterior, en la Fig. 7.27 los valores son bastante semejantes. Los valores están por debajo de 100 en todos los casos, pero el mallado también presenta no ortogonalidad. No es un valor verdaderamente malo, se sabe que estos valores cuando comprenden de entre 75 a 90 pueden ser tratados posteriormente con la configuración de simulación que se explicará en el apartado siguiente.

```

Mesh quality metrics:
tetEdgeRatio
  min: 1.0000755085514386
  max: 31.740210365015326
  average: 1.7306572984043302
  standard deviation 0.34276309049549086
  median: 1.706082415838494
    99.9-th percentile: 4.134521699953768
    99.99-th percentile: 11.142600628971401
    99.999-th percentile: 19.24363936052127
quadMaxAngle
  min: 89.48608460317226
  max: 108.67218348439344
  average: 92.2848537416347
  standard deviation 3.403642175972657
  median: 90.36676889434396
    99.9-th percentile: 105.76743220593661
    99.99-th percentile: 107.0026320790135
    99.999-th percentile: 108.52417286340365
triMaxAngle
  min: 60.000000000000001
  max: 163.2124991348703
  average: 80.15568500349506
  standard deviation 11.967921036906889
  median: 78.15059497931685
    99.9-th percentile: 126.84681713314637
    99.99-th percentile: 137.83782018873276
    99.999-th percentile: 145.7808370269273
triMinAngle
  min: 2.0643271339878315
  max: 60.000000000000001
  average: 43.95883418368218
  standard deviation 7.858097062293009
  median: 44.16929868580653
    99.9-th percentile: 59.997502165788184
    99.99-th percentile: 59.99750216578841
    99.999-th percentile: 59.999999999999992
volumeRatio
  min: 1
  max: 111.50372726565688
  average: 1.5067887048855084
  standard deviation 1.858714835093397
  median: 1.221722807085847
    99.9-th percentile: 28.709303223089837
    99.99-th percentile: 46.75122981474763
    99.999-th percentile: 63.93665635092008
tetAspectRatio
  min: 1.0000503472711553
  max: 13.583380624662416
  average: 1.5517885415528307
  standard deviation 0.2452448337452074
  median: 1.5537068950348891
    99.9-th percentile: 2.962943250759297
    99.99-th percentile: 5.367782482673376
    99.999-th percentile: 8.838157801030865
nonOrthogonality
  min: 0
  max: 86.2714445062648
  average: 17.48129862619982
  standard deviation 10.621221215505907
  median: 16.622384779759134
    99.9-th percentile: 59.61198315121517
    99.99-th percentile: 77.89590026193696
    99.999-th percentile: 82.94346664138314
    
```

Fig. 7.28 Calidad de la malla para la configuración con cinco tuberías.

Se observan resultados semejantes que en las otras geometrías con el mismo tipo de malla (Fig. 7.28). En el siguiente apartado se hablará de factores de corrección que harán que este problema de no ortogonalidad que tiene la malla sean reparados y no puedan ser un inconveniente a la hora de realizar la simulación.

### 7.2.5. Configuración de la simulación

Tras todos los materiales, condiciones iniciales y condiciones de contorno establecidos es necesario pasar a configurar los parámetros de simulación. En Simscale aparecen dos menús dedicados a este fin: “numerics” y “simulation control”.

En la parte de “numerics” se establecen los parámetros dedicados a resolver la simulación. Se pueden cambiar diversos valores relacionados con la convergencia y valores que ayudan a la eficiencia y estabilidad de la simulación. Normalmente los valores que vienen por defecto suelen ser adecuados para la mayoría de aplicaciones.

La primera parte de este menú corresponde a la parte de factores de relajación los cuales ayudan a la simulación a converger de manera más rápida y a conseguir estabilidad. Estos valores quedan por defecto como los que se observan en la Fig. 7.29. Como se ha comentado en el apartado anterior, las mallas que tienen un problema de no ortogonalidad se pueden corregir mediante correctores para dicho propósito.

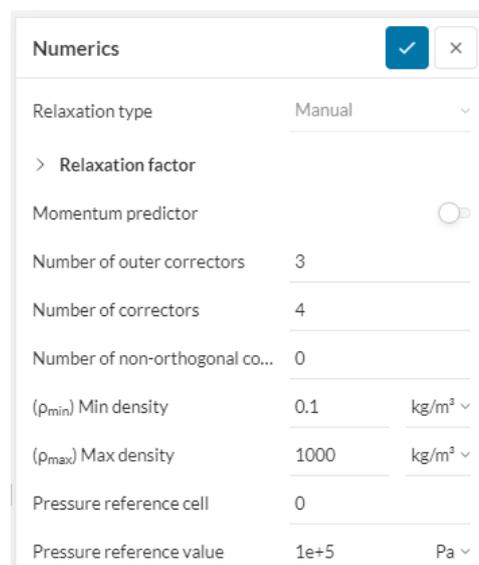


Fig. 7.29 Ventana de *numerics* con los factores de relajación.

La otra parte relevante del menú de “numerics” es donde se escogen todos los “solvers” para resolver cada variable (Fig. 7.30). Además, se pueden determinar diferentes tolerancias disponibles. Por defecto no se ha considerado modificar ninguno excepto las tolerancias correspondientes a la entalpía sólida.

Solvers		
> (U) Velocity	Smooth solver	▼
> (U) Velocity final	Smooth solver	▼
> (ρ) Density	GAMG	▼
> (ρ) Density final	GAMG	▼
> (P) Modified pressure	GAMG	▼
> (P) Modified pressure final	GAMG	▼
> (h <sub>s</sub> ) Solid enthalpy	PCG	▼
> (h <sub>s</sub> ) Solid enthalpy final	PCG	▼
> (h) Enthalpy	Smooth solver	▼
> (h) Enthalpy final	Smooth solver	▼
> (e) Internal energy	Smooth solver	▼
> (e) Internal energy final	Smooth solver	▼
> (k) Turb. kinetic energy	Smooth solver	▼
> (k) Turb. kinetic energy final	Smooth solver	▼
> (ε) Dissipation rate	Smooth solver	▼
> (ε) Dissipation rate final	Smooth solver	▼

Fig .7.30 Ventana de *numerics* con *solvers* y tolerancias.

En las primeras simulaciones se vio que la temperatura del núcleo caliente del molde (correspondiente a la bandeja de aluminio líquido recién inyectado) no se repartía en su totalidad por todo el molde y se quedaba estancada en algún momento en la simulación. Esto era debido a que las tolerancias del solucionador eran demasiado bajas por lo que, al simular, la entalpía escalar (que se usa para calcular temperaturas) no estaba siendo solucionado.

Por esto, se vio necesario retocar las entalpías sólidas haciéndolas mucho más pequeñas con tal de que el programa pudiera trabajar a más precisión. En la Fig. 7.31 se observa un código que refleja los cálculos hechos por el “solver” donde se puede apreciar que para la entalpía no se realiza ninguna iteración. Por ello, se ha decidido aumentar a  $1 \cdot 10^{-8}$  la tolerancia absoluta de la entalpía sólida y a  $1 \cdot 10^{-9}$  la tolerancia absoluta de la entalpía sólida final. Finalmente, con este cambio en la entalpía se pudo solucionar para todas las simulaciones el problema de la poca conducción de calor por el molde.



Fig. 7.31 Resultados del solver con con la entalpía no resultada.

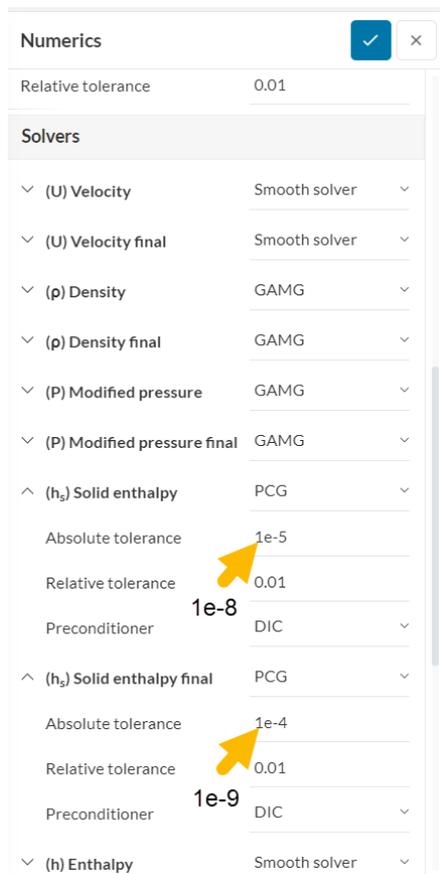


Fig. 7.32 Menú de numerics con cambios en las tolerancias de las entalpías sólidas.

En la parte de “simulation control” el usuario puede ajustar los parámetros globales correspondientes al proceso de simulación. Cada tipo de análisis tiene unas propiedades en concreto a modificar. Como se ha mencionado anteriormente, la simulación se realiza para observar el comportamiento térmico del molde donde entra en juego la transferencia de calor entre fluido y sólido, por lo que la simulación será de transferencia de calor conjugada. Además, el objetivo es analizar el comportamiento térmico a lo largo del tiempo, por lo que la simulación es transitoria.

Simulation control		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
End time	10	s	∨
Delta t	0.5	s	∨
Adjustable time step	True		∨
Maximal Courant number	5		
Maximal step	1		
Write control	Runtime		∨
Write interval	1	s	∨
Number of processors	Automatic (up to 16)		∨
Maximum runtime	3e+4	s	∨
Decompose algorithm	Scotch		∨

Fig. 7.33 Menú de *simulation control* para CHT transitorio.

En la Fig. 7.33 se observan los valores de los parámetros que se utilizarán para realizar todas las simulaciones de este proyecto. Entre estos parámetros existe el “end time” como tiempo final de la simulación y “delta t” como el incremento de tiempo en el que el programa resuelve las ecuaciones del sistema. En el caso de las simulaciones de este proyecto, como el tiempo de ciclo del moldeo son 8 segundos, se considera realizar una simulación de 10 segundos con un tiempo “delta t” de 0.5 segundos.

En cuanto al parámetro de ajustar el “time step” se puede activar si se quiere que este valor se adapte a las especificaciones máximas del número de Courant. Ésta última opción cuando está activada permite restringir al programa el “step time” máximo que puede adaptar declarándolo en el “maximal step”. Seguidamente, el programa permite configurar el modo

y la frecuencia de escritura de los resultados de la simulación mediante el “write control” con las opciones de:

- “Time step”: Adapta la escritura mediante la especificación de los “time step” que tiene que saltar el sistema para realizar una escritura. Si se declara un “write interval” de 3 con un “delta t” de 2, el resultado se escribirá cada 6 segundos.
- “Clock time”: Se especifica mediante el “write interval” el tiempo real entre dos escrituras consecutivas.
- “Runtime”: Se especifica mediante el “write Interval” el tiempo de simulación entre dos escrituras consecutivas.
- “CPU time”: Representa la cantidad de tiempo por la que la CPU se usa para procesar instrucciones durante la simulación. En este caso, el “write Interval” estará especificado en tiempo de la CPU.
- “Adjustable runtime”: Parecido al “runtime” pero habilita la posibilidad de tener un “write Interval” igual al “delta t”.

Otros parámetros de simulación son el número de procesadores que se desean usar en la simulación. Como es normal, cuántos más procesadores trabajen más rápida será la simulación, pero en este caso no es posible. Por defecto, Simscale escoge la opción en la que el número de núcleos se adapte automáticamente de manera más óptima a las necesidades de la simulación. Cabe destacar que el plan escogido de Simscale es el de prueba por lo que hay un máximo de núcleos disponibles por simulación que son 16. Es posible aumentar estos mediante la suscripción al plan académico el cual permite incrementar los núcleos hasta 32 por simulación.

El parámetro de “maximun runtime” es el tiempo real máximo que una simulación puede estar realizándose. Una vez alcanzado ese valor la simulación se detiene en el punto en el que esté. Simscale también restringe el tiempo máximo que puede establecerse en la simulación siendo este de 30.000 segundos en el plan de prueba y hasta 1.200.000 segundos con el plan académico.

El “Decompose algorithm” es el algoritmo encargado de descomponer el dominio de la malla en un número de partes paralelas. Este tiene sentido cuando el número de procesadores es mayor a uno. Por defecto el sistema escoge el algoritmo “Scotch” y es

este el que se utiliza en las simulaciones de este trabajo, pero además de este hay otros algoritmos disponibles:

- “Scotch”: Basado en intentar minimizar el número de límites entre dominios/procesadores. Cuantos menos límites, menor comunicación requerida entre procesadores y, por lo tanto, una simulación más rápida.
- “Simple”: Separa el dominio geométrico dependiendo del número de subdominios en cada dirección del espacio. Es necesario determinar el parámetro delta como factor de sesgo que normalmente es mantenido por debajo de 0.1.
- “Hierarchical”: Similar al algoritmo simple, pero facilitando el orden de descomposición.

Finalmente, el número de Courant es un valor que hay que tener en cuenta a la hora de hacer simulaciones transitorias. El número de Courant es un valor adimensional que representa el número de células que una partícula puede atravesar en un “time step”.

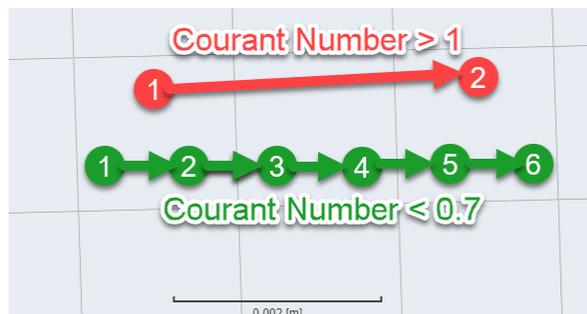


Fig. 7.34 Esquema comparativo del número de Courant en una malla.

La condición de Courant-Friedrich-Lewy (o CFL) explica que la distancia de una información que viaja cada “time step” a lo largo de una malla debe de ser menor a la distancia de la distancia de los elementos. El número de Courant está ligado a la precisión de la simulación, es por eso que en las simulaciones transitorias donde sea necesaria una gran densidad y una gran estabilidad el número de Courant suele establecerse como menor a 1 e idealmente menor a 0.7. En (7.21) se puede ver que el número de Courant viene determinado por la velocidad ( $u$ ), el “time step” ( $\Delta t$ ) y por la longitud entre elementos de la malla ( $\Delta x$ ).

$$C = u \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (7.21)$$

Como se observa en la Fig. 7.34 cuando el número de Courant es inferior a 0.7, la partícula puede permanecer en la célula por lo menos en dos “time steps”. En cambio, cuando el número de Courant es superior a la unidad, el “time step” puede ser muy grande como para que una partícula salte una célula de la malla y es posible que aparezcan inestabilidades provocando la divergencia en la simulación. Para ello, la mejor manera de decrementarlo es reducir el valor del “time step” ( $\Delta t$ ) o agrandar la longitud de los elementos de la malla ( $\Delta x$ ).

Cabe destacar que hay casos en los que no es esencial establecer un número de Courant del valor inferior a la unidad, ya que esto genera un aumento considerable del tiempo de simulación. En casos donde se analizan grandes flujos, pueden llegar a haber lugares donde existan un alto número de Courant como en aquellas zonas donde el flujo es muy rápido y el tamaño de la célula es pequeño. Por eso, en esas zonas en particular es posible considerar un número de Courant máximo superior a la unidad.

Se hace necesario valorar hasta qué punto se puede llegar a incrementar el número de Courant máximo a la hora de configurar una simulación. Es por eso, que en cada uno de los casos a simular se calcula, mediante (7.21), el número de Courant máximo como aquel que para cada velocidad tiene la longitud de celda más grande de la geometría. Para ello, Simscale permite obtener una visión de la calidad de la malla con la que se pueden obtener un esquema visual de la magnitud de las longitudes de celdas.

Si se observan las Fig. 7.35, 7.36 y 7.37 se pueden ver cromáticamente las longitudes de celda de cada variante de los moldes viéndose en la escala el valor máximo para cada uno. Aunque el valor máximo de longitud de celda varía ligeramente en los tres casos, es bastante similar y se ha considerado hacer el considerando un valor máximo de longitud de celda de unos 0.0245 m. Además, sabiendo que el “time step” en todas las simulaciones es de 0.5 s y considerando cuatro velocidades se llega a obtener un número de Courant máximo de:

$$C_{0.3m/s} = 0,3 \text{ m/s} \cdot \frac{0,5 \text{ s}}{0,0245 \text{ m}} = 6,1224 \quad (7.22)$$

$$C_{1.5m/s} = 1,5 \text{ m/s} \cdot \frac{0,5 \text{ s}}{0,0245 \text{ m}} = 30,6122 \quad (7.23)$$

$$C_{2m/s} = 2 \text{ m/s} \cdot \frac{0,5 \text{ s}}{0,0245 \text{ m}} = 40,8163 \quad (7.24)$$

$$C_{3.5m/s} = 3,5 \text{ m/s} \cdot \frac{0,5 \text{ s}}{0,0245 \text{ m}} = 71,4286 \quad (7.25)$$

El número de Courant máximo más restrictivo es a una velocidad de 0.3 m/s, por eso, para todas las velocidades y todas las variantes de los moldes convencionales se ha establecido un número de Courant máximo de 5.

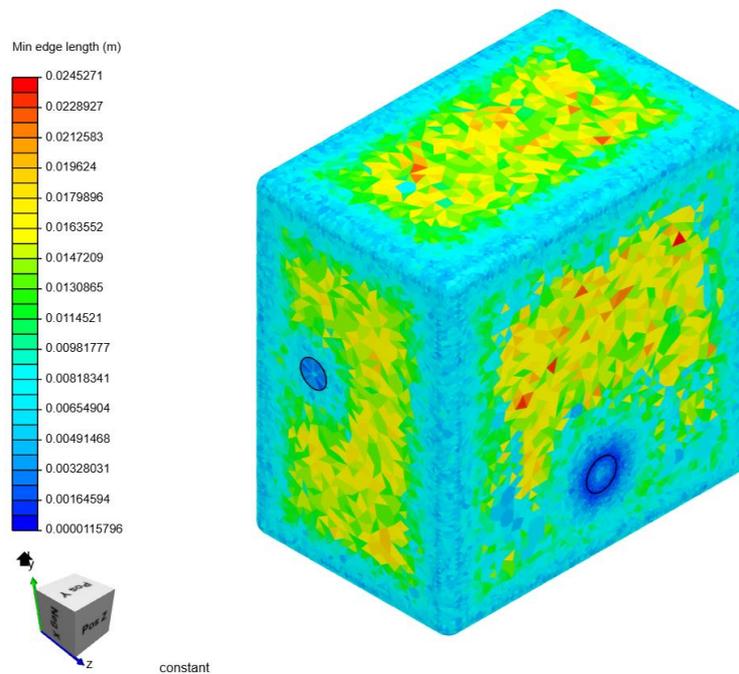


Fig. 7.35 Resultado de la longitud de la malla para una tubería.

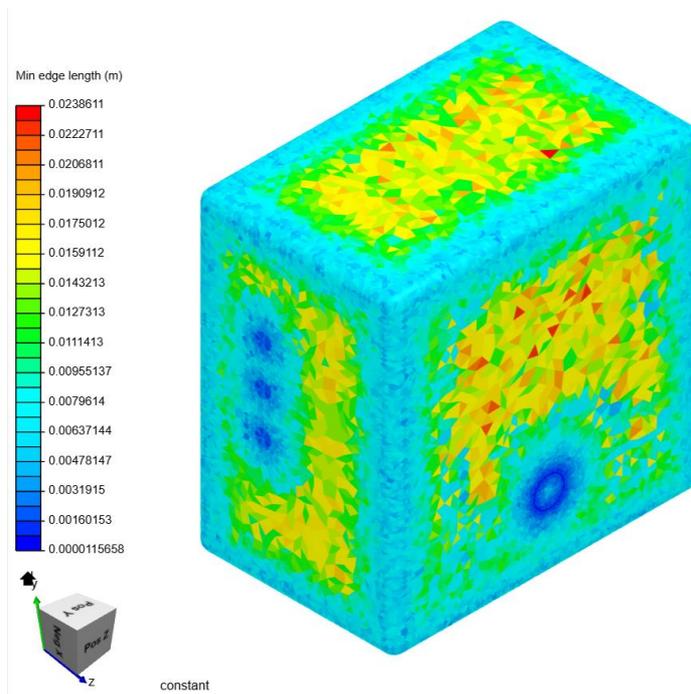


Fig. 7.36 Resultado de la longitud de la malla para tres tuberías.

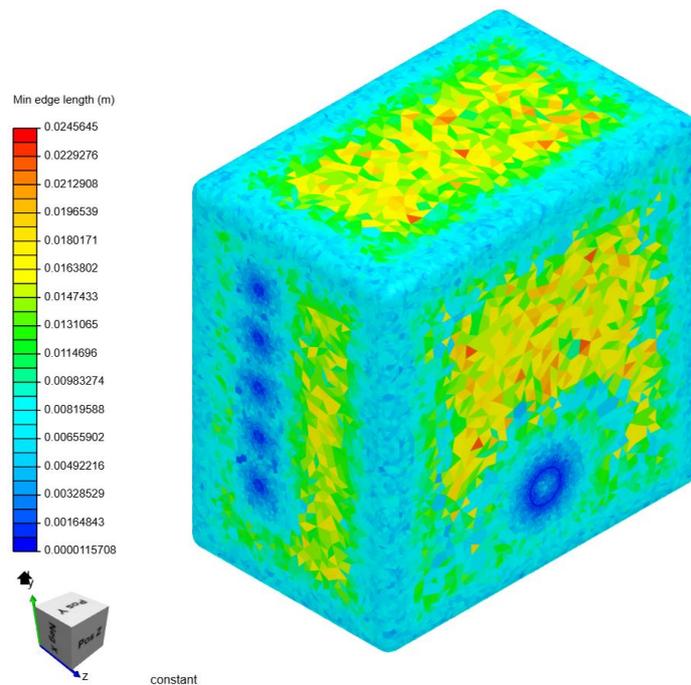


Fig. 7.37 Resultado de la longitud de la malla para cinco tuberías.

### 7.3. Simulación del modelo convencional con una tubería

En este apartado se plasmarán todas las simulaciones correspondientes al modelo convencional con una tubería a distintas velocidades. En él, se analizarán los aspectos más relevantes de la transferencia de calor y los efectos de estos parámetros.

En el cálculo realizado en el apartado 6.1.2 se puede observar que para un diámetro de 20 mm y a una velocidad del fluido de 0.3 m/s, como es el caso de este apartado, el número de Reynolds es muy cercano a 4000. Por lo que se ha considerado no realizar simulaciones a dicha velocidad.

Las simulaciones realizadas con Simscale han sido descargadas y trasladadas a otro software gratuito y más sofisticado llamado Paraview. Este software se suele usar en aplicaciones de visualización de resultados científicos.

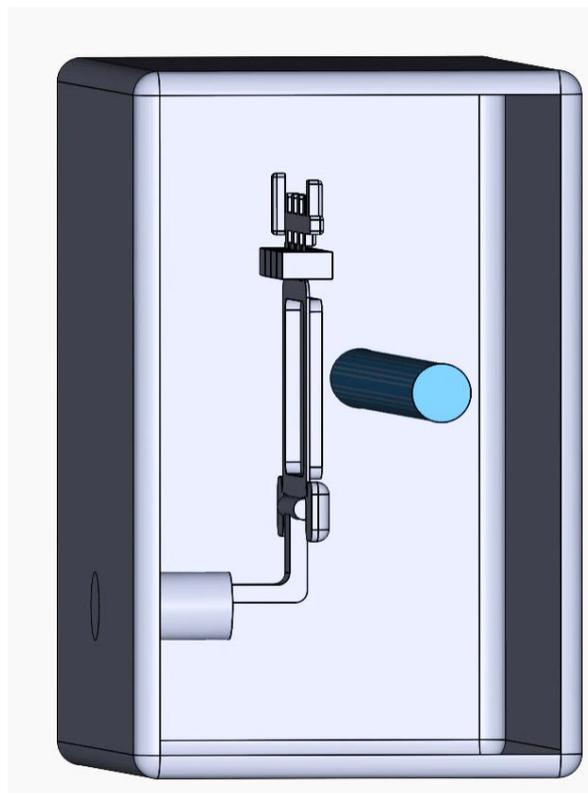


Fig. 7.38 Modelo convencional de una tubería.

En la Fig. 7.38 se observa la variante con una tubería la cual se nos informó que la distancia entre la pared de la tubería y la del molde se encuentra a unos 50 mm de distancia. Al realizar las simulaciones se tiene en cuenta que la circulación de agua va de izquierda a derecha.

### 7.3.1. Simulación con una tubería y velocidad del fluido de 1.5 m/s

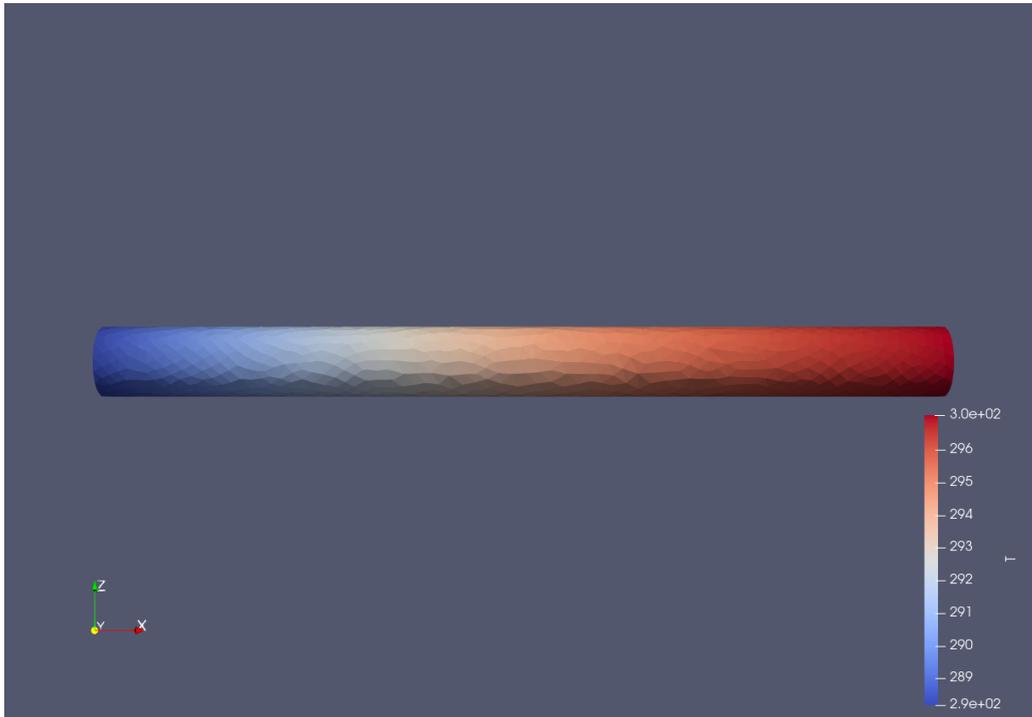


Fig. 7.39 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo.

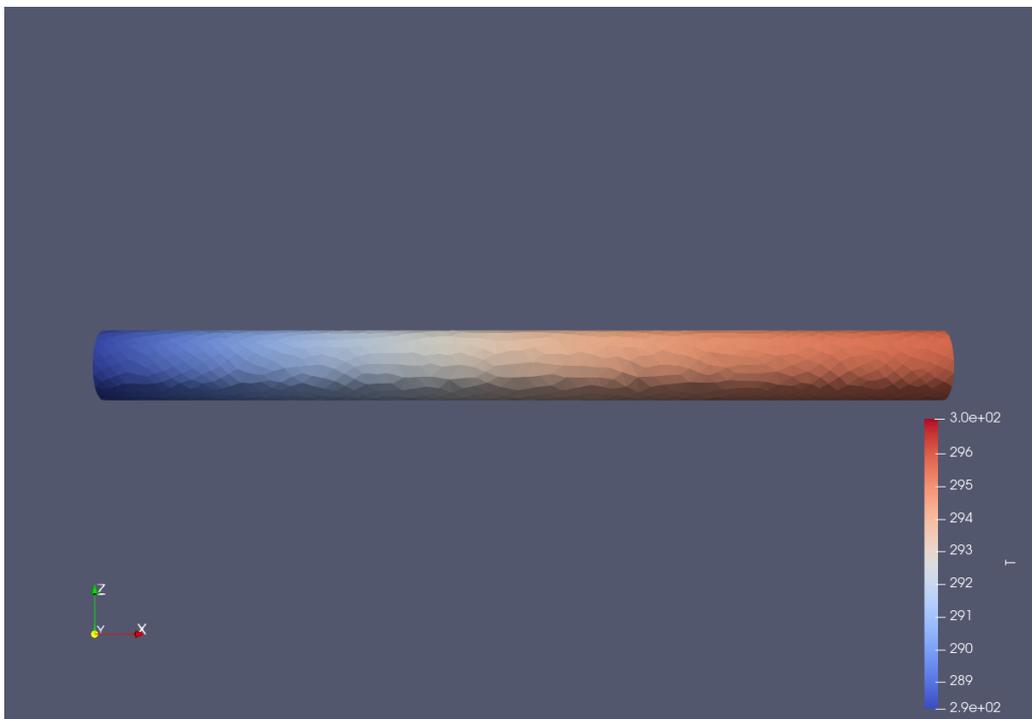


Fig. 7.40 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos.

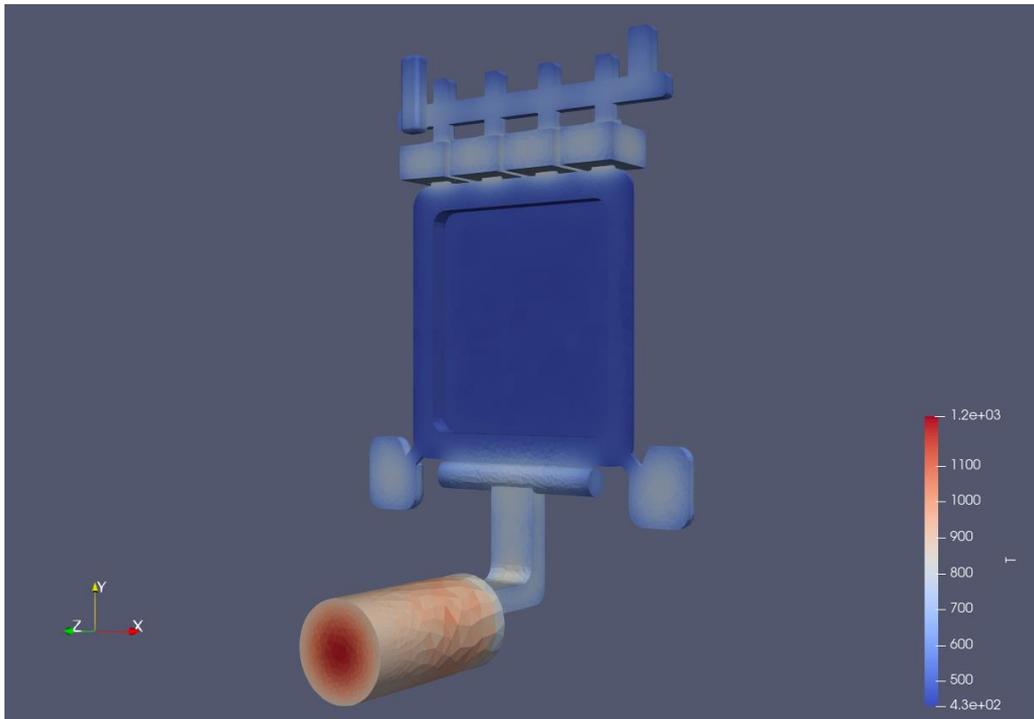


Fig. 7.41 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.

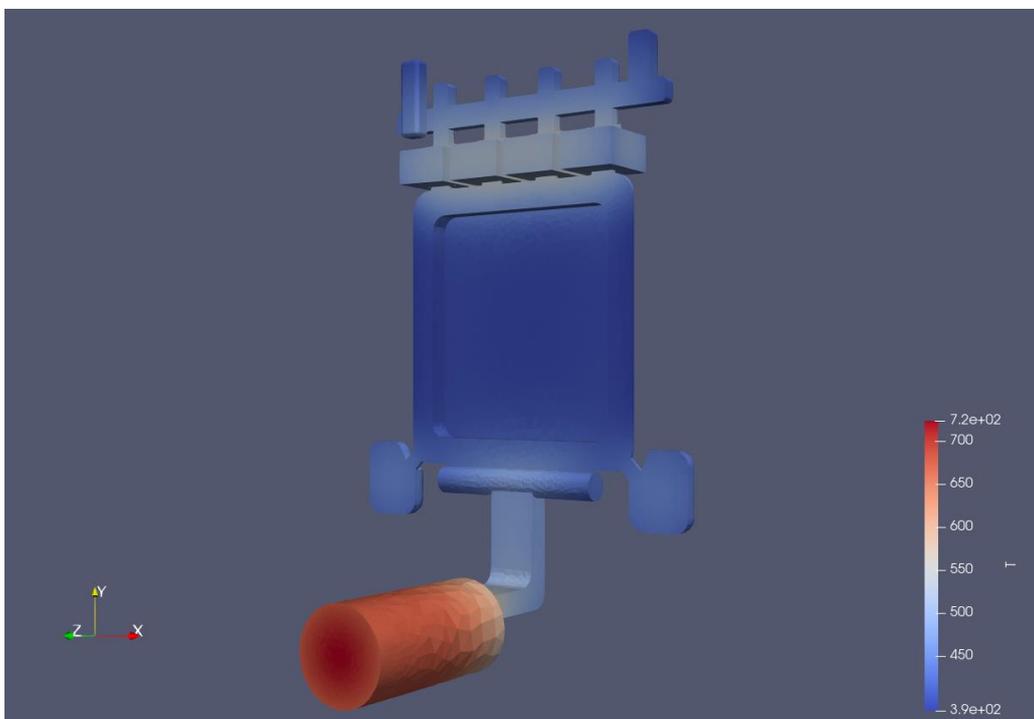


Fig. 7.42 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos.

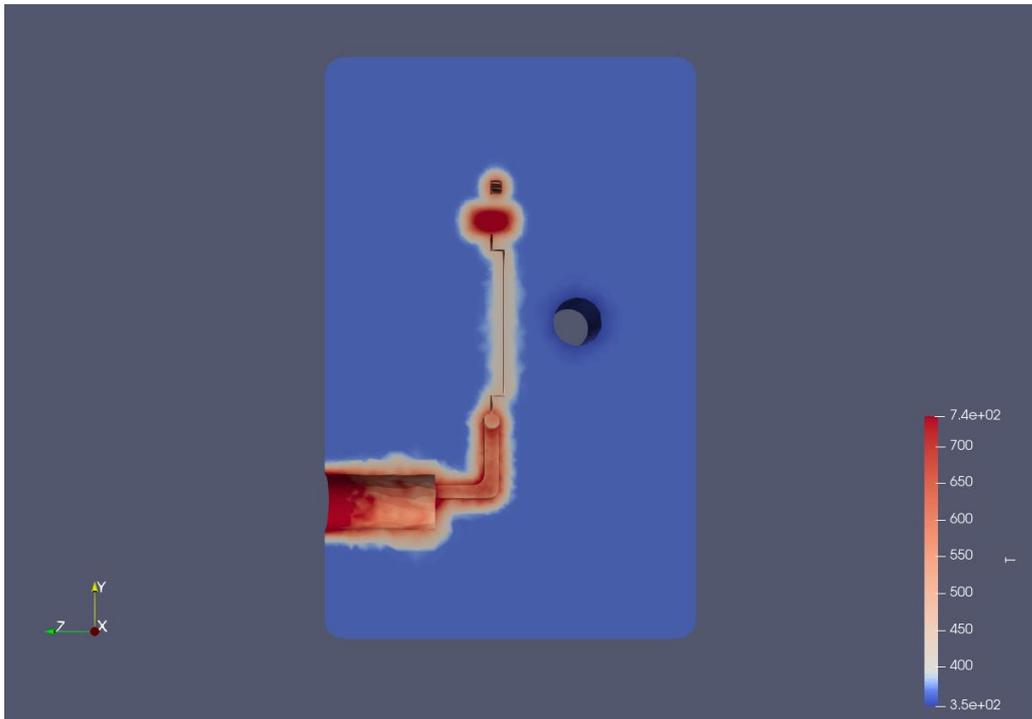


Fig. 7.43 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo

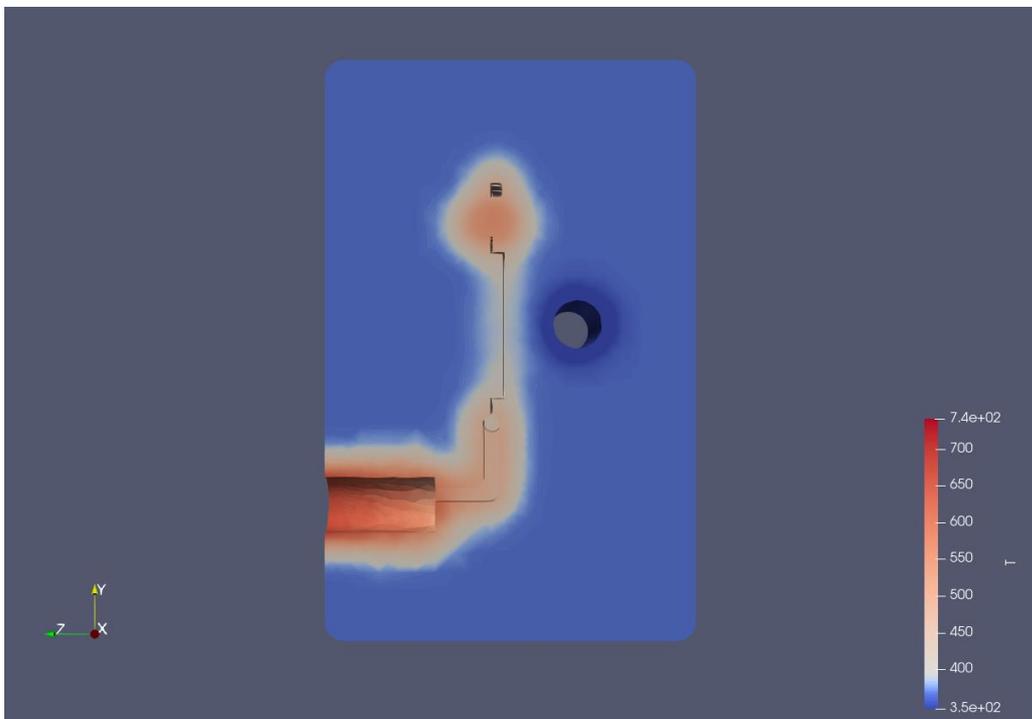


Fig. 7.44 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.

### 7.3.2. Simulación con una tubería y velocidad del fluido de 2 m/s



Fig. 7.45 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo.

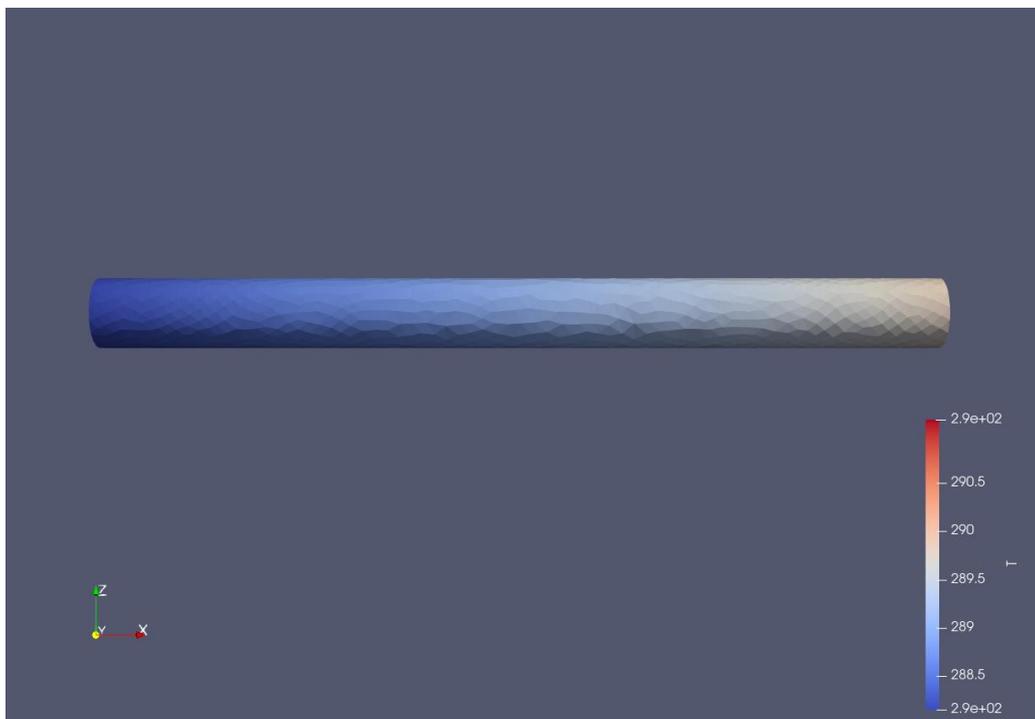


Fig. 7.46 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos.

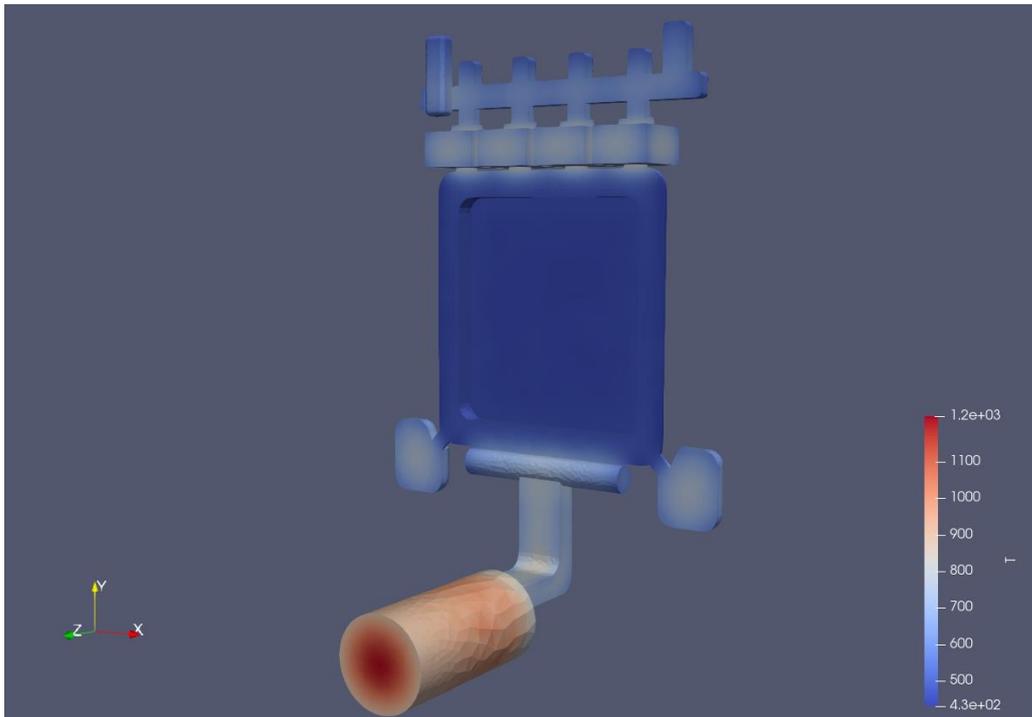


Fig. 7.47 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.

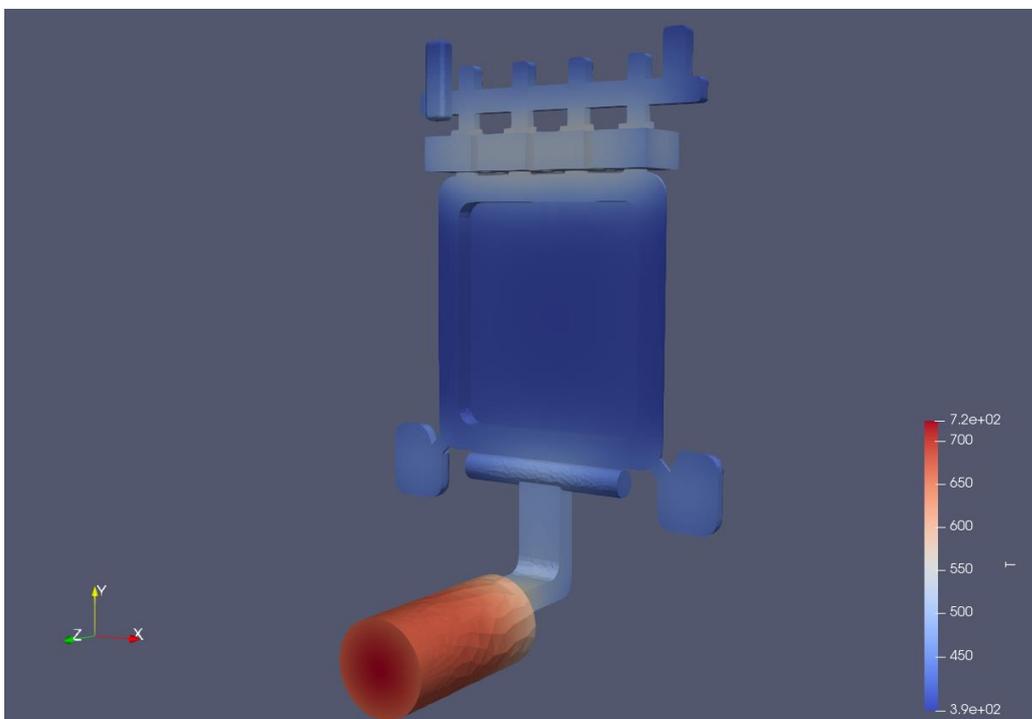


Fig. 7.48 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos.

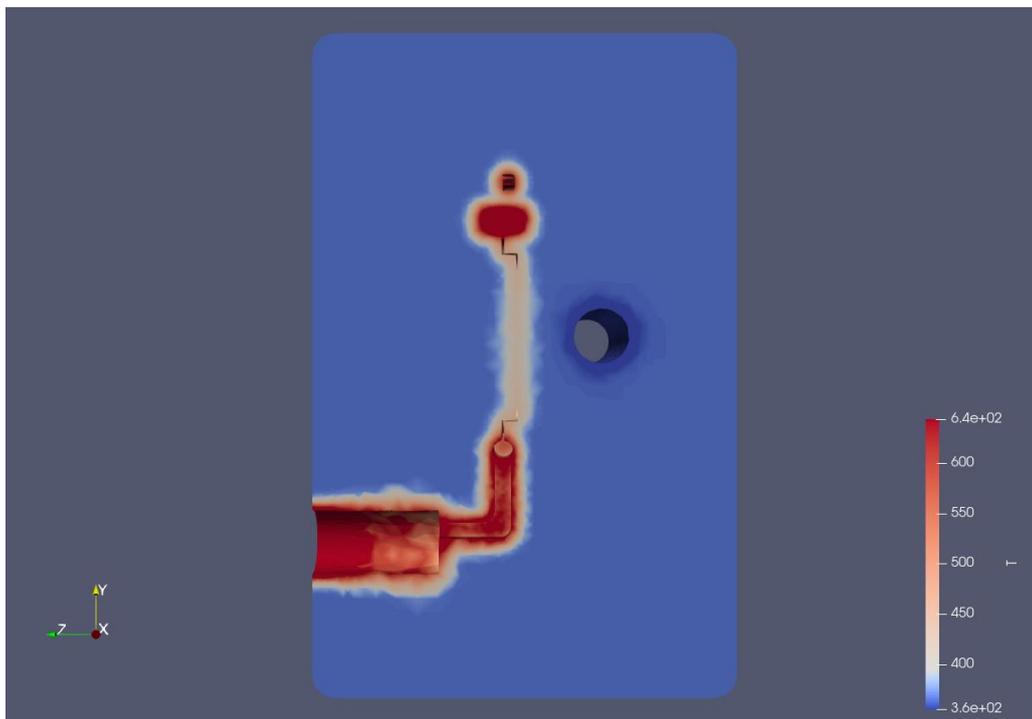


Fig. 7.49 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.

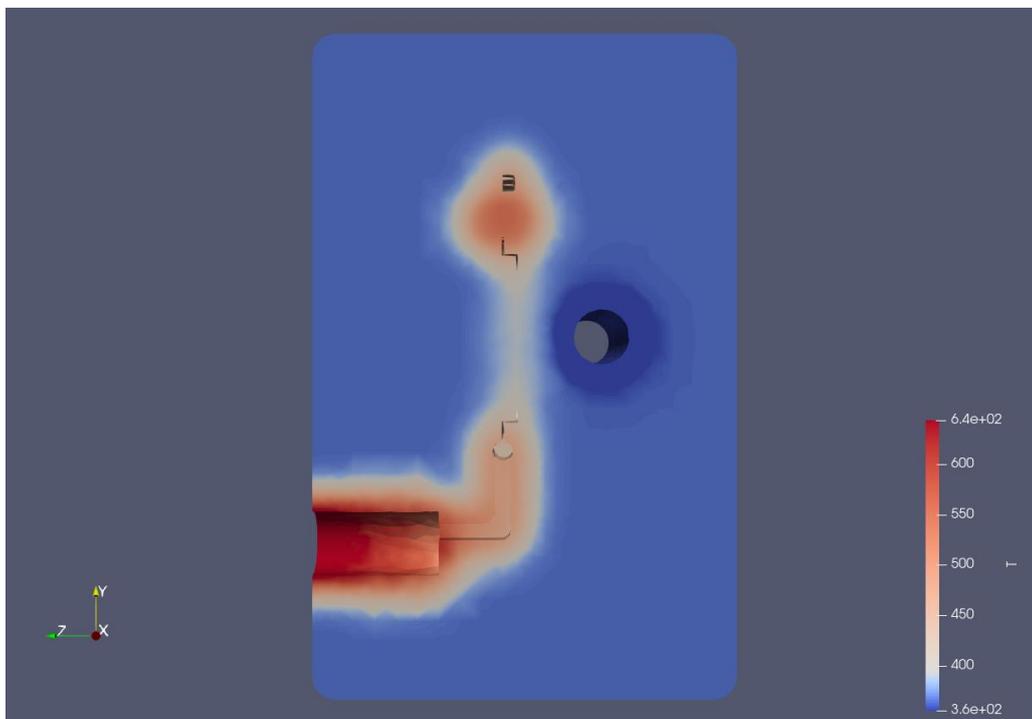


Fig. 7.50 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.

### 7.3.3. Simulación con una tubería y velocidad del fluido de 3.5 m/s

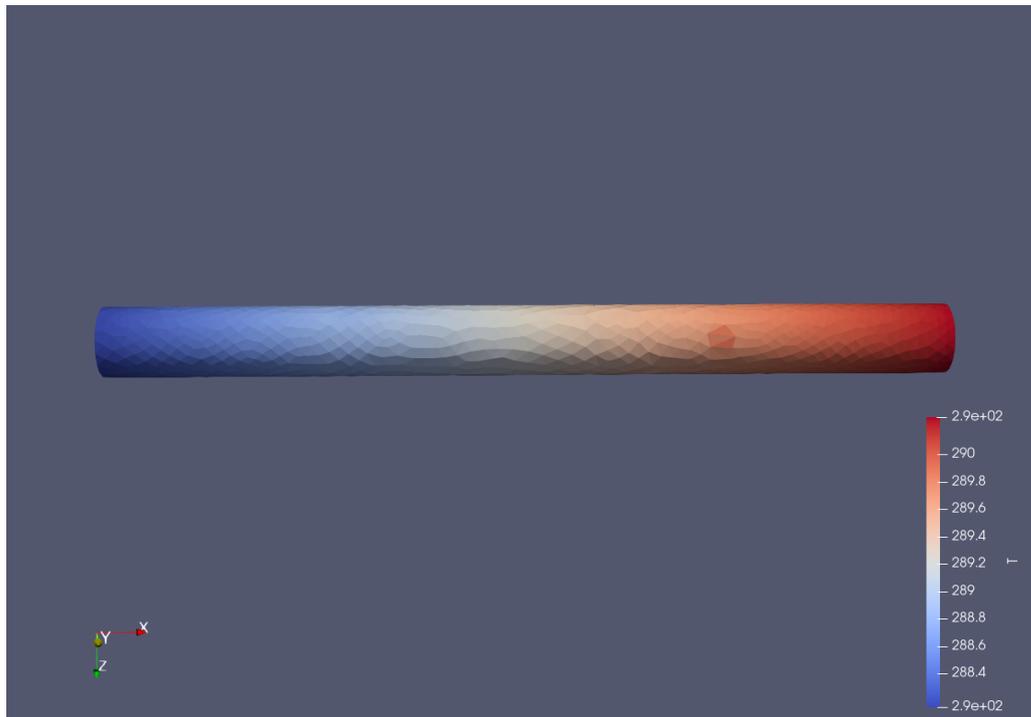


Fig. 7.51 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo.

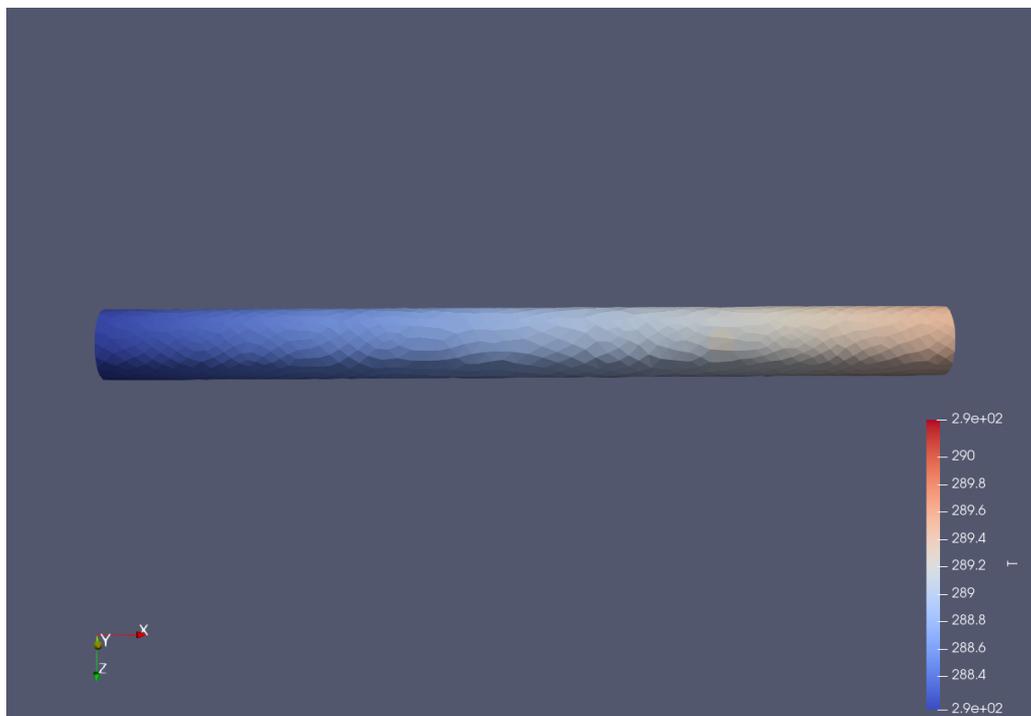


Fig. 7.52 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos.

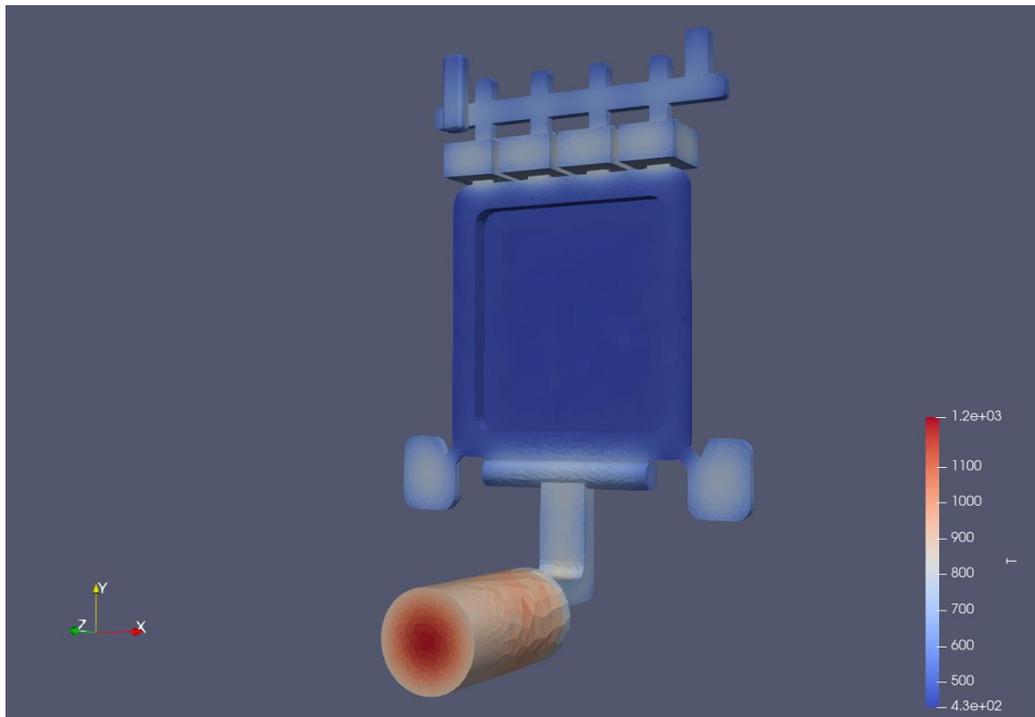


Fig. 7.53 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.

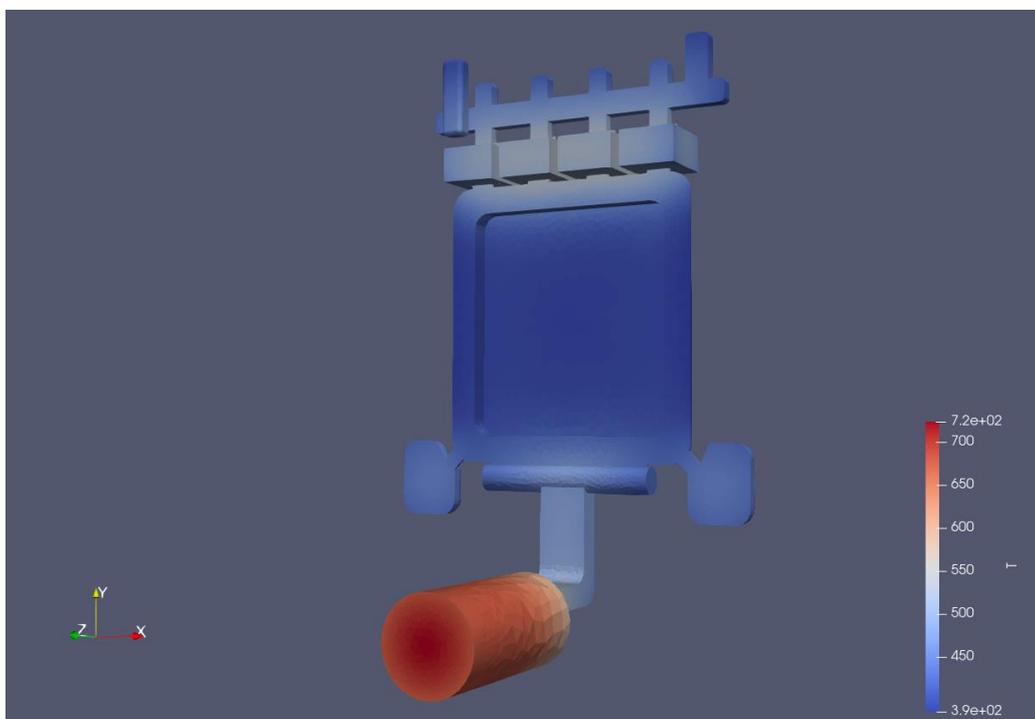


Fig. 7.54 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos.

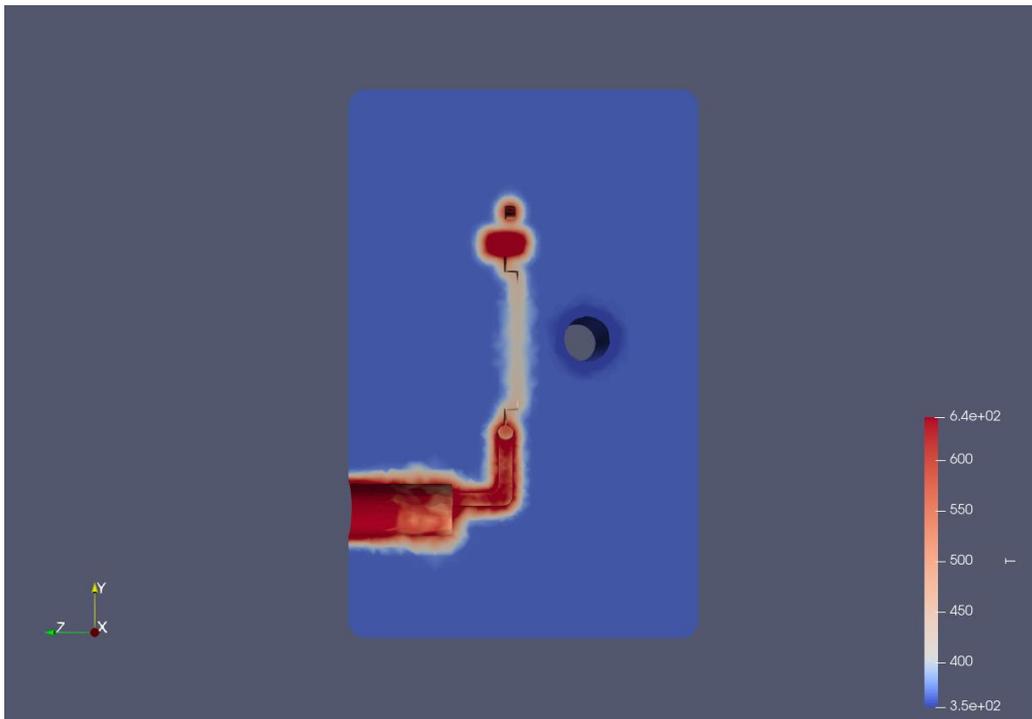


Fig. 7.55 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.

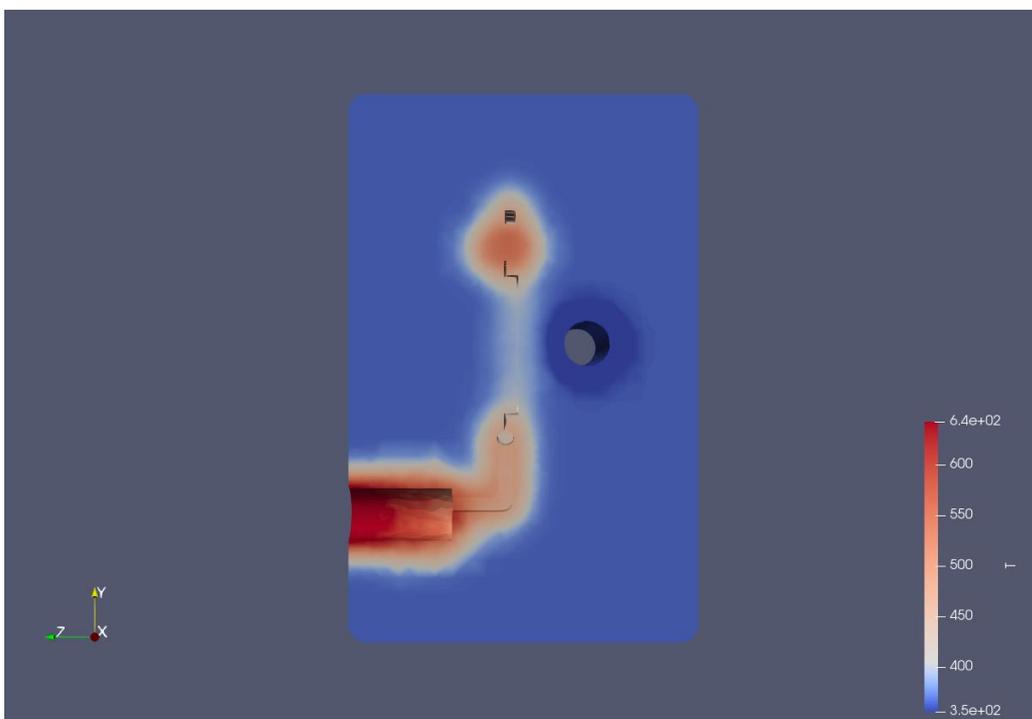


Fig. 7.56 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.

### 7.3.4. Análisis de resultados

En los apartados anteriores se plasman capturas de las diferentes simulaciones variando la velocidad del agua circulando por la tubería. En el Anexo I se pueden encontrar capturas a 1, 3, 5, 8 y 10 segundos de las mismas.

En el caso de la tubería se puede observar como la parte de entrada siempre tiene la misma temperatura: unos 15 °C. En cambio, la temperatura de salida va disminuyendo conforme pasa el tiempo debido al enfriamiento del molde y el enfriamiento causado por el fluido frío en circulación. Se observa que a medida que se aumenta la velocidad del flujo, el fluido pasa menos tiempo dentro del molde y, por lo tanto, no consigue aumentar su temperatura como a más baja velocidad.

Con Paraview se ha podido medir la temperatura promedio en diferentes secciones a lo largo de la longitud de la tubería. En la Fig. 7.89 se aprecia la temperatura del agua en función de la longitud de la tubería en el instante de un segundo. Se puede observar como en las tres variantes la temperatura del agua llega a aumentar desde la entrada a 15 °C, pero no con la misma intensidad. Cuanto más aumenta la velocidad del fluido, menos tiempo tiene para ser obtener temperatura de las paredes del molde y a menos temperatura sale.

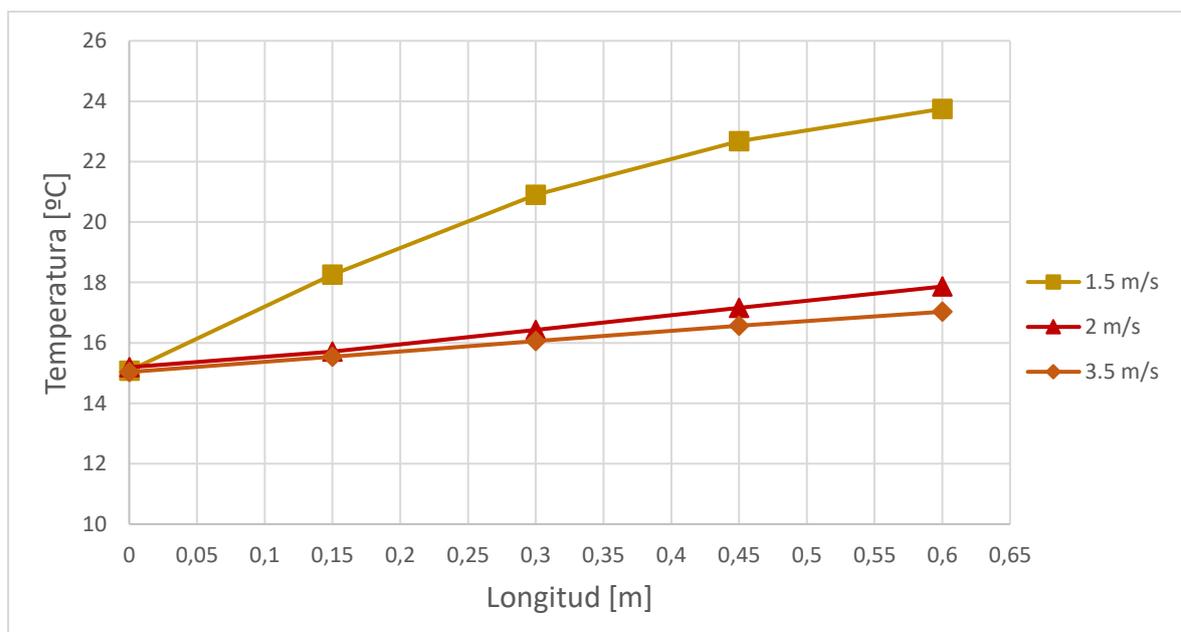


Fig. 7.57 Temperatura del agua en función de la longitud de la tubería en  $t = 1$  s.

En este instante final del moldeo (a los ocho segundos) el molde y bandeja han disminuido su temperatura considerablemente, haciendo que el entorno se encuentra a menor temperatura que al inicio y, por lo tanto, el agua en contacto con las paredes del molde no llega a calentarse a tanta temperatura. En la Fig. 7.58 se puede observar la misma gráfica anterior, pero para el instante de ocho segundos. Se puede ver una disminución de la temperatura en cada una de las medidas realizadas conservando el incremento considerable que realiza la temperatura cuando la velocidad es de 1.5 m/s. En cambio, para las otras dos velocidades se puede observar que sus curvas han perdido pendiente y el agua no llega a incrementar su temperatura como antes. En el Anexo I se pueden ver los datos extraídos de las medidas de la temperatura del fluido.

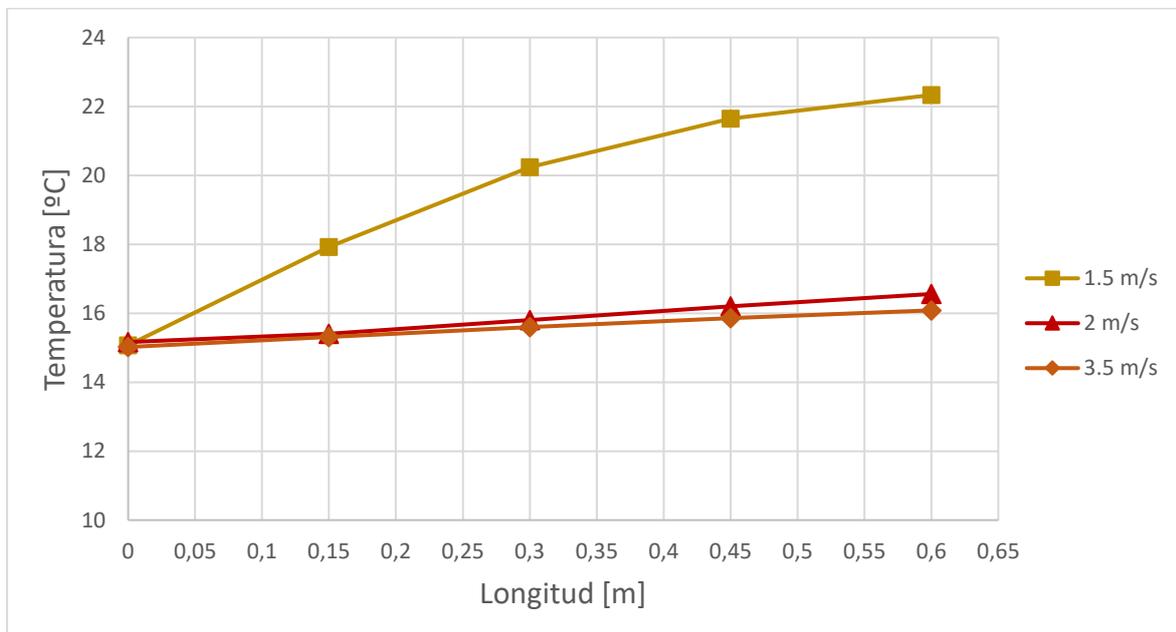


Fig. 7.58 Temperatura del agua en función de la longitud de la tubería en  $t = 8$  s.

En cuanto a medir el enfriamiento de la bandeja se ha observado que en ocho segundos llega pasando de los 1036 °C iniciales, a unos 260 °C finales. Esto concuerda con los datos empíricos que nos aportaron desde *Eurecat*, quienes declaraban que la temperatura final del molde llegaba a estar entre unos 200 y 300 °C. Cabe destacar, que el efecto de la velocidad del agua en esta temperatura no es del todo claro, pero se puede apreciar una ligera disminución a medida que la velocidad del fluido aumenta. Esto puede deberse a que la velocidad del fluido aumenta el número de Reynolds y por lo tanto el fluido se hace más

turbulento. La turbulencia en el fluido es un aspecto que mejora la transferencia de calor por lo que es posible que la turbulencia llegue a mejorar ese enfriamiento de la bandeja.

En cuanto a la temperatura del molde va siendo reducida a medida que el tiempo transcurre. A su vez, en las Fig. 7.55 y 7.56 se observa que a la vez que la temperatura disminuye alrededor del tubo, la temperatura de la bandeja se va expandiendo por todo el molde, llegando a transferir su calor primero al molde y luego este a la tubería.

#### 7.4. Simulación del modelo convencional con tres tuberías.

En esta configuración se realiza el cambio de geometría aumentando a tres el número de tuberías con un diámetro de 30 mm cada una. Además, estas tienen una separación de 80 mm entre centros y una distancia entre superficie de la tubería a la bandeja de 50 mm (véase Fig. 7.59).

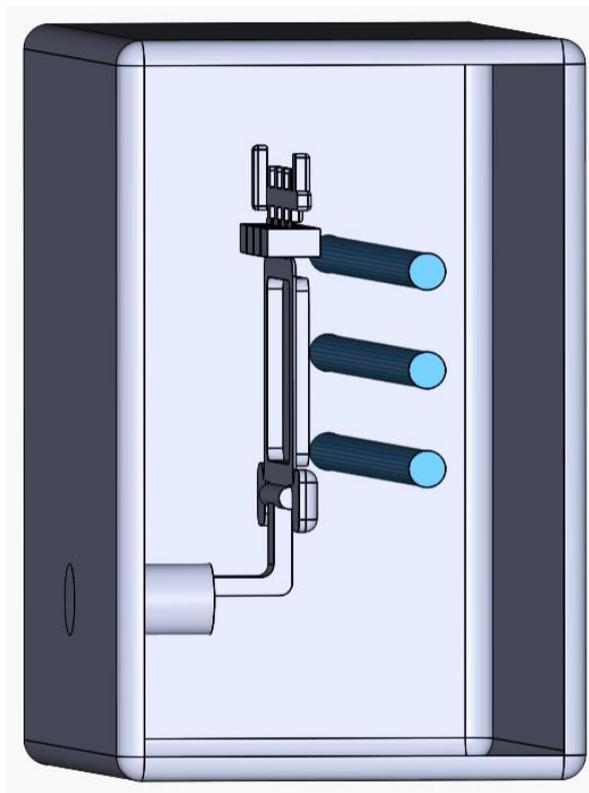


Fig. 7.59 Modelo convencional de tres tuberías.

Los parámetros de simulación son los mismos que en el apartado anterior. Los resultados han sido visionados y tratados con Paraview.

### 7.4.1. Simulación con tres tuberías y una velocidad del fluido de 1.5 m/s

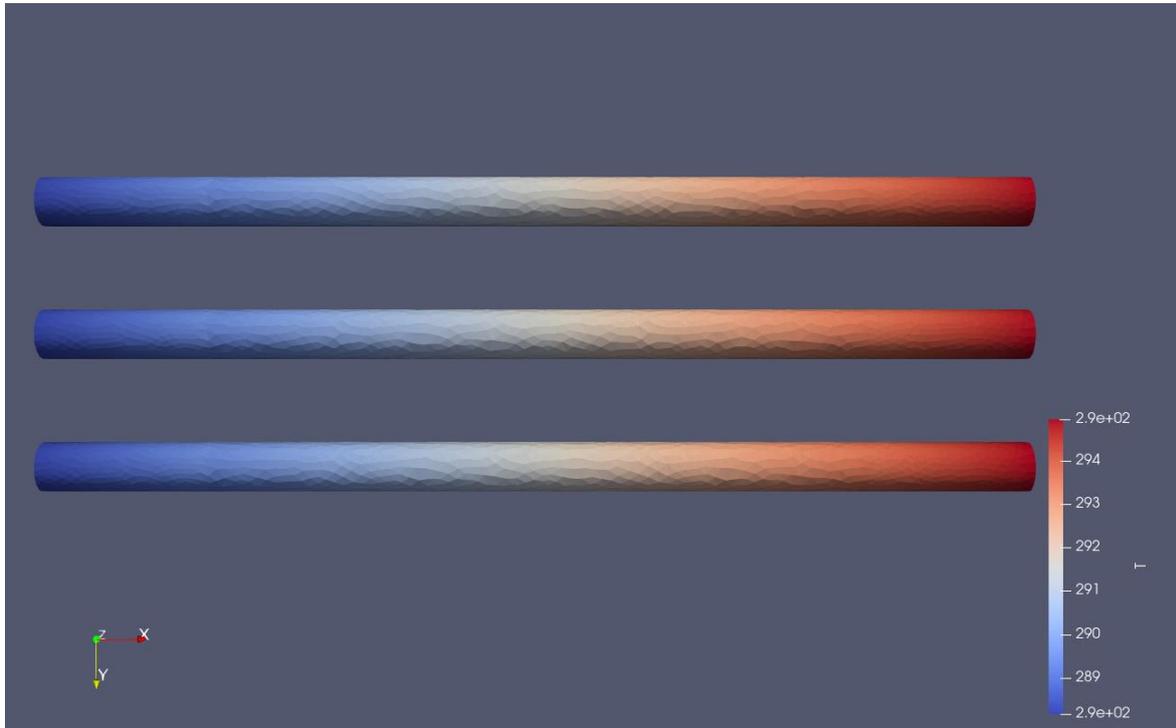


Fig. 7.60 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo.

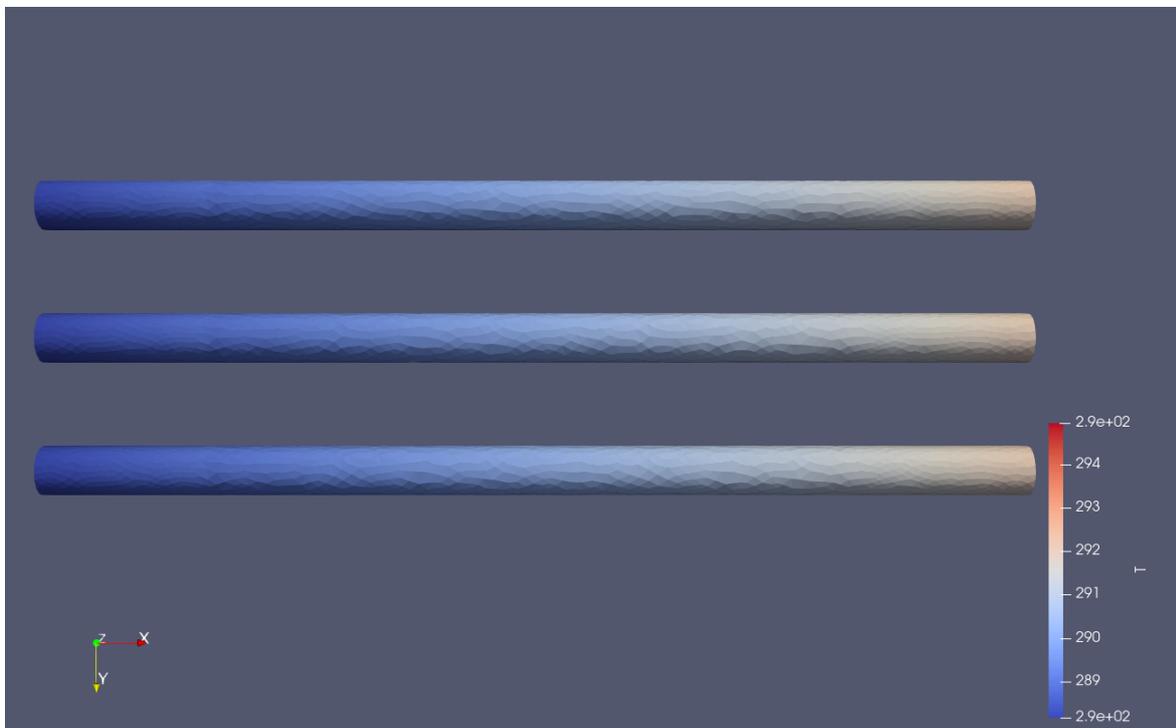


Fig. 7.61 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos.

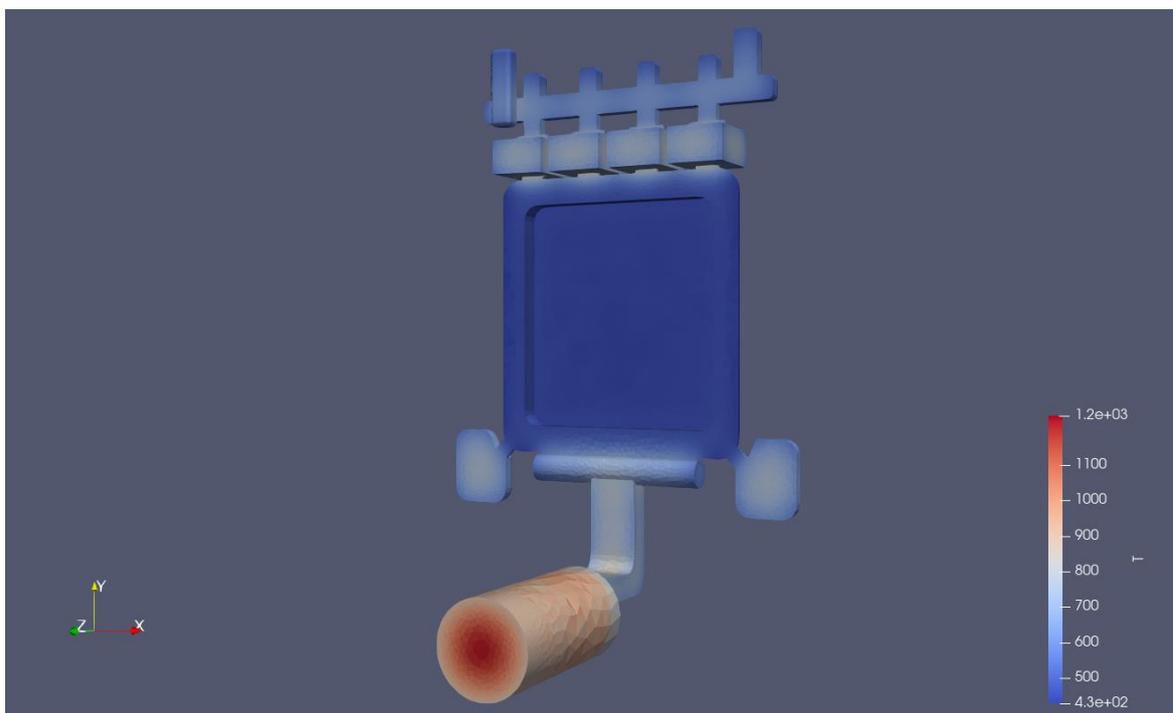


Fig. 7.62 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.

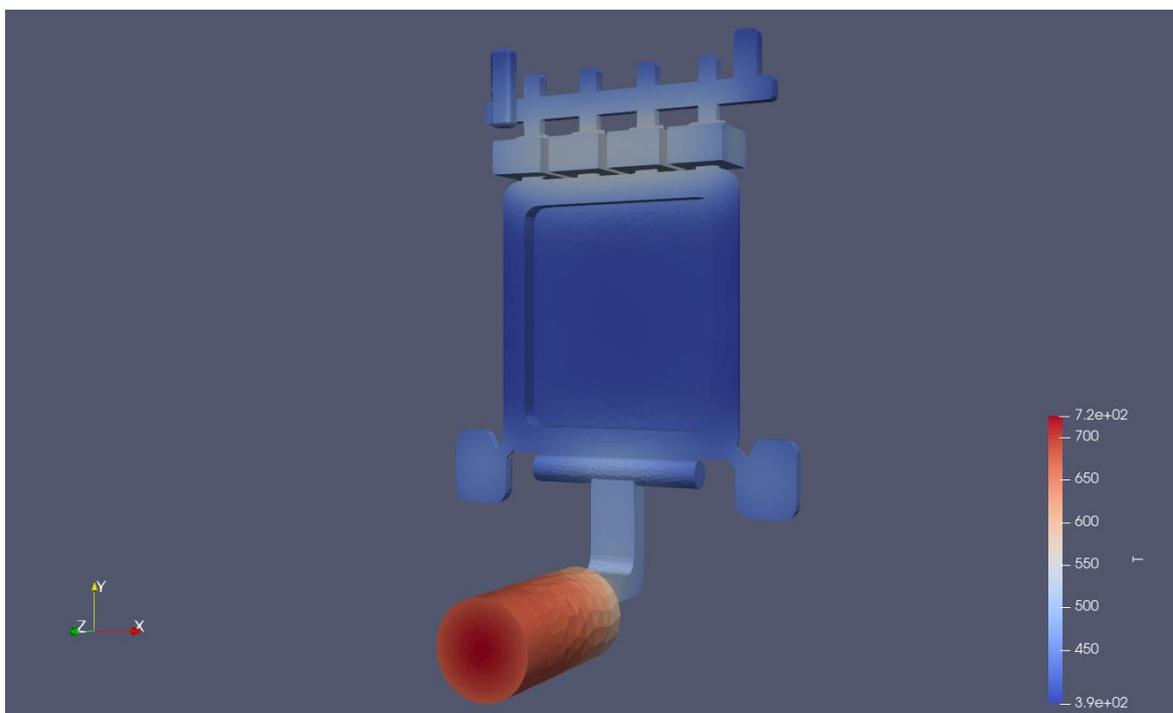


Fig. 7.63 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos.

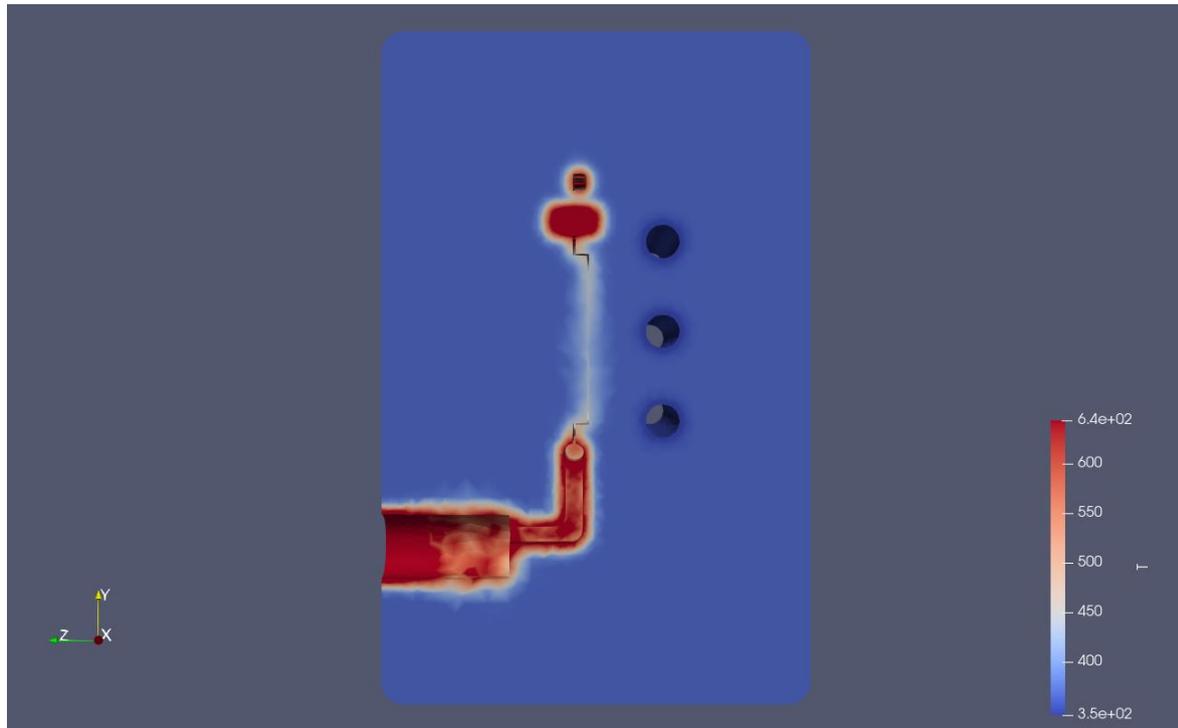


Fig. 7.64 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.

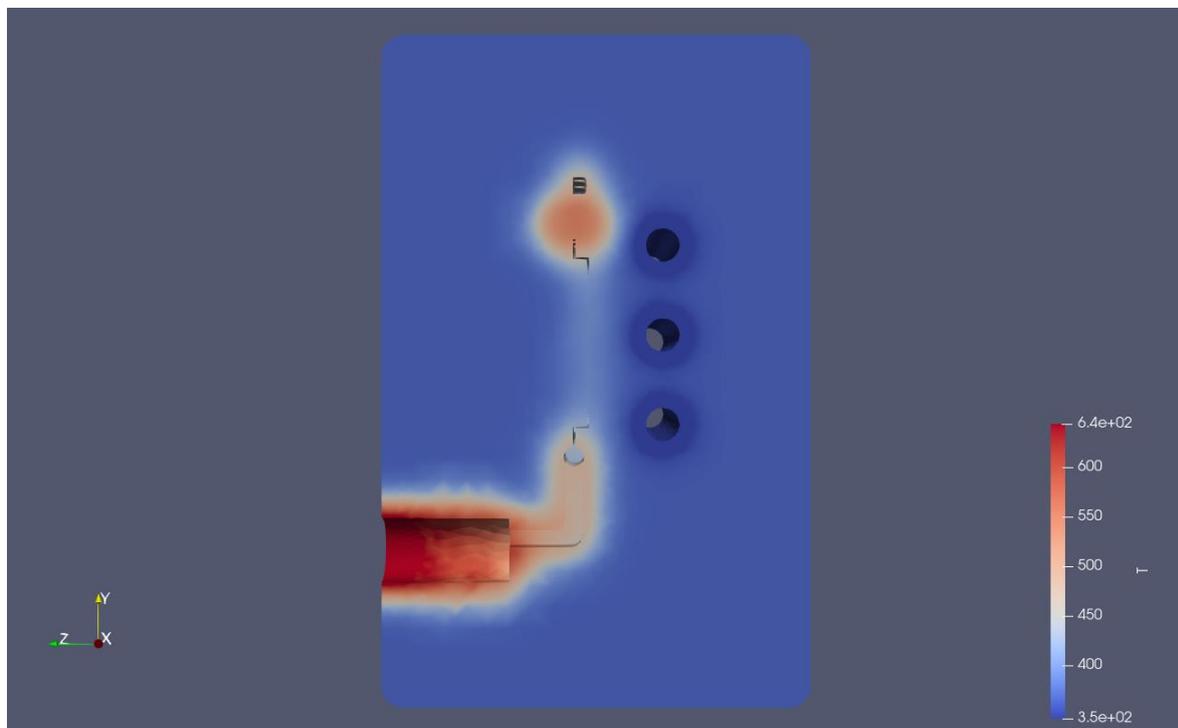


Fig. 7.65 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.

### 7.4.2. Simulación con tres tuberías y velocidad del fluido de 2 m/s

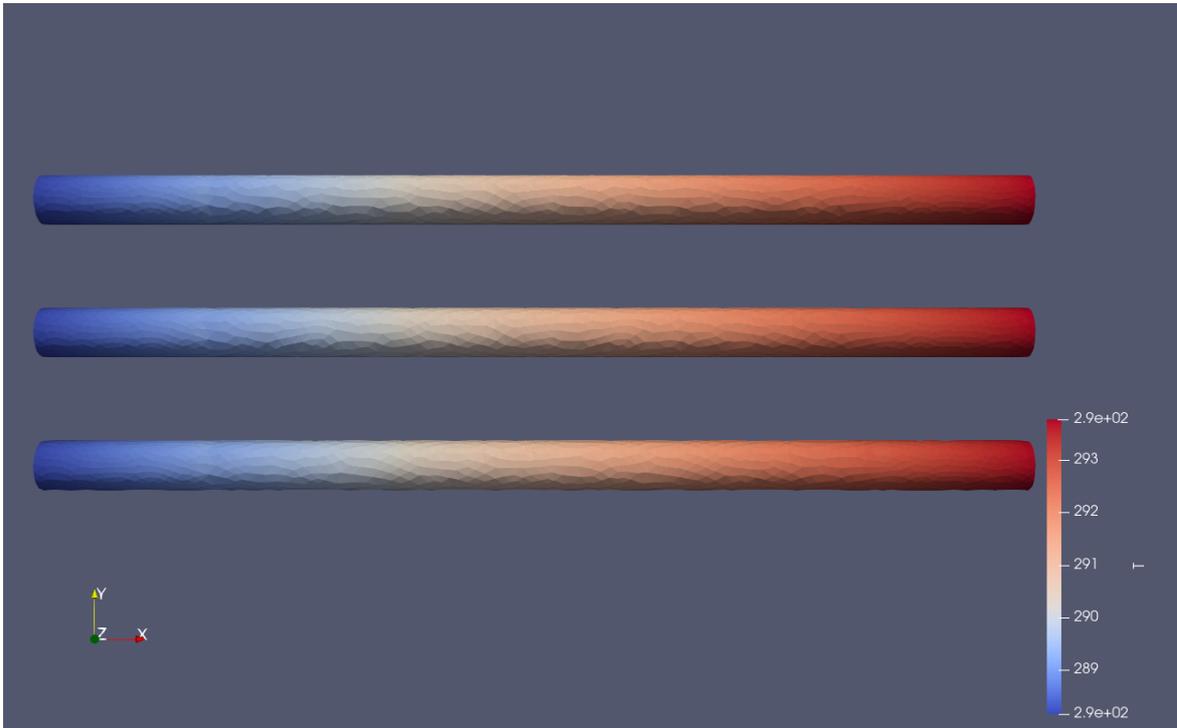


Fig. 7.66 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo.

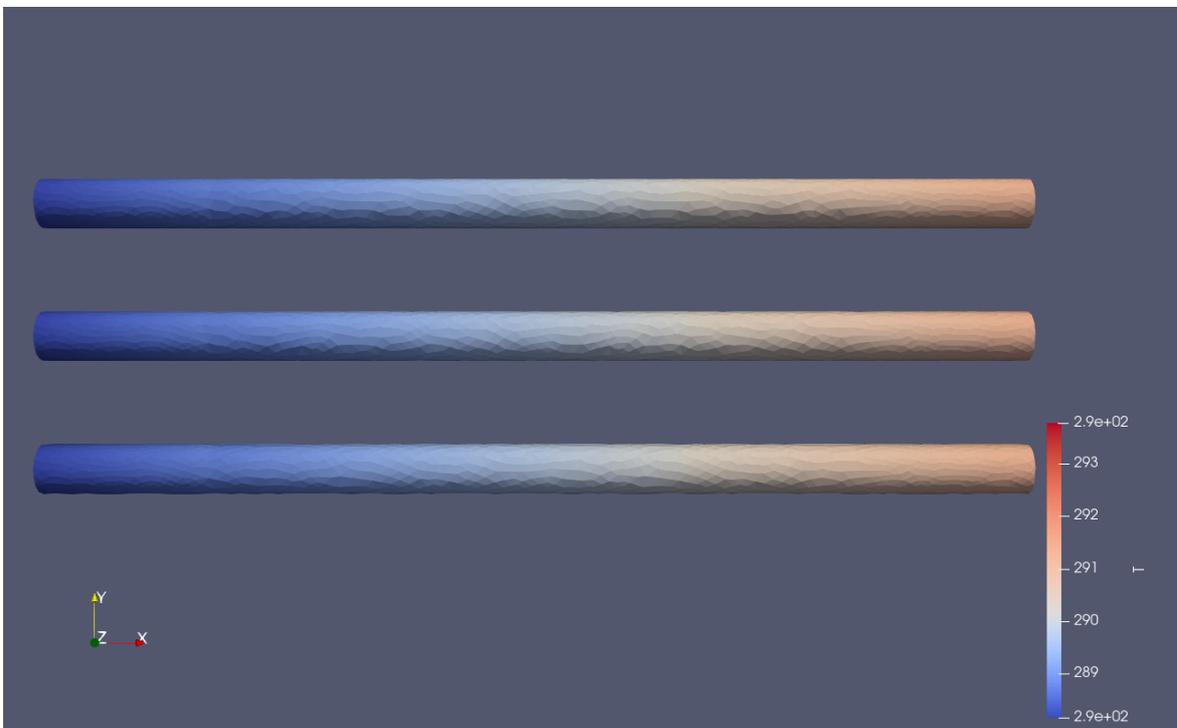


Fig. 7.67 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos.

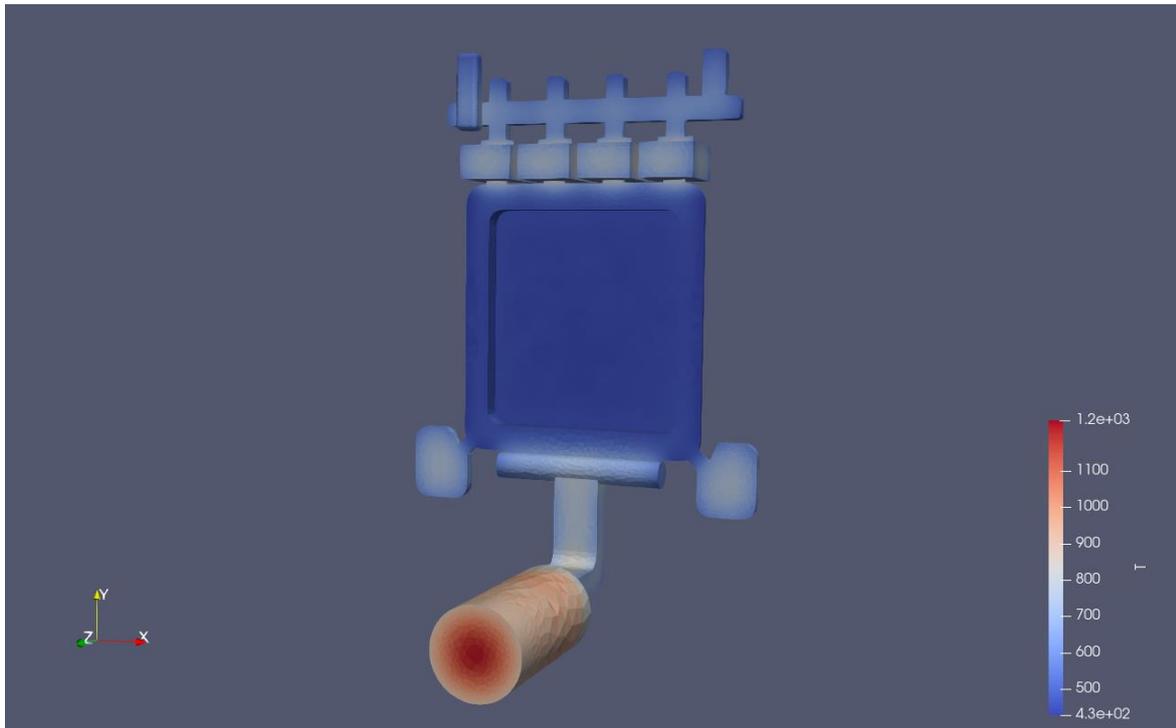


Fig. 7.68 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.

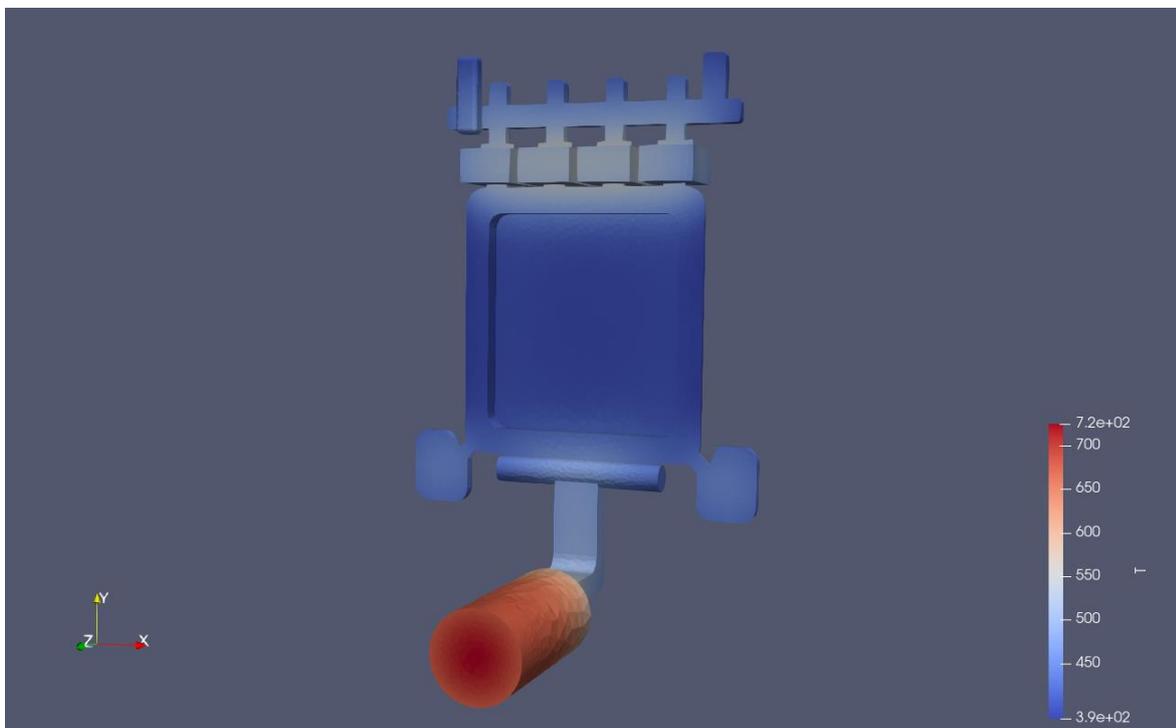


Fig. 7.69 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos.

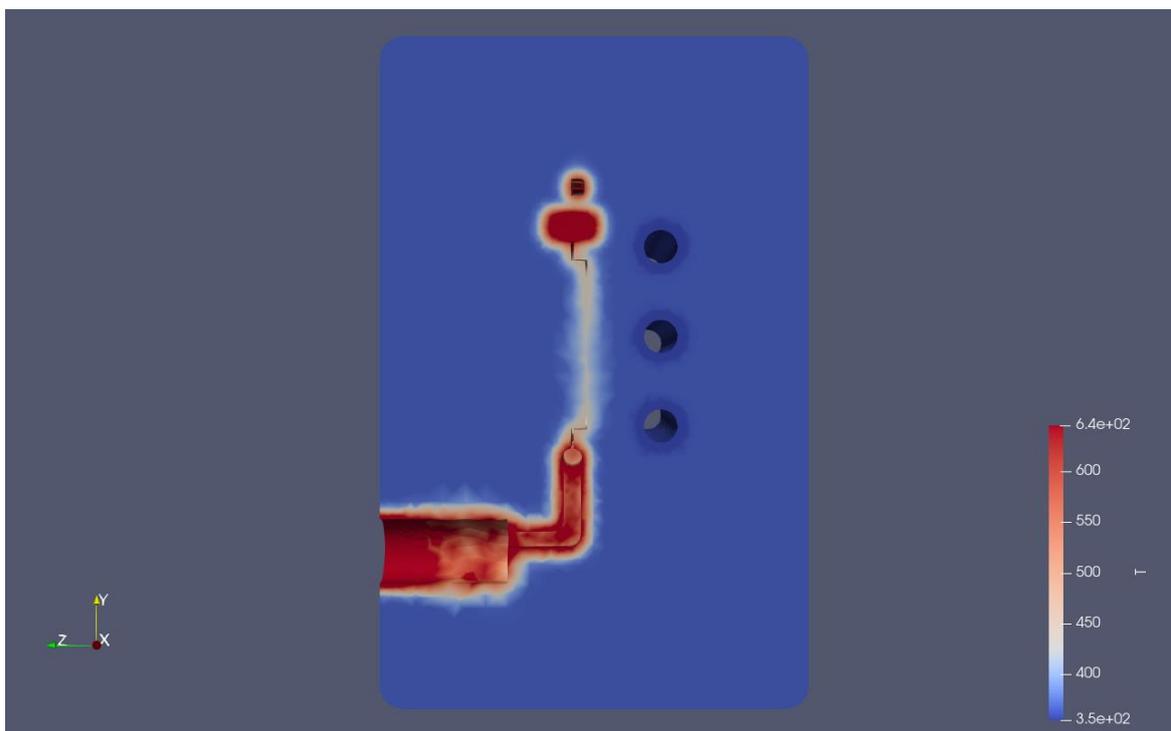


Fig. 7.70 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.

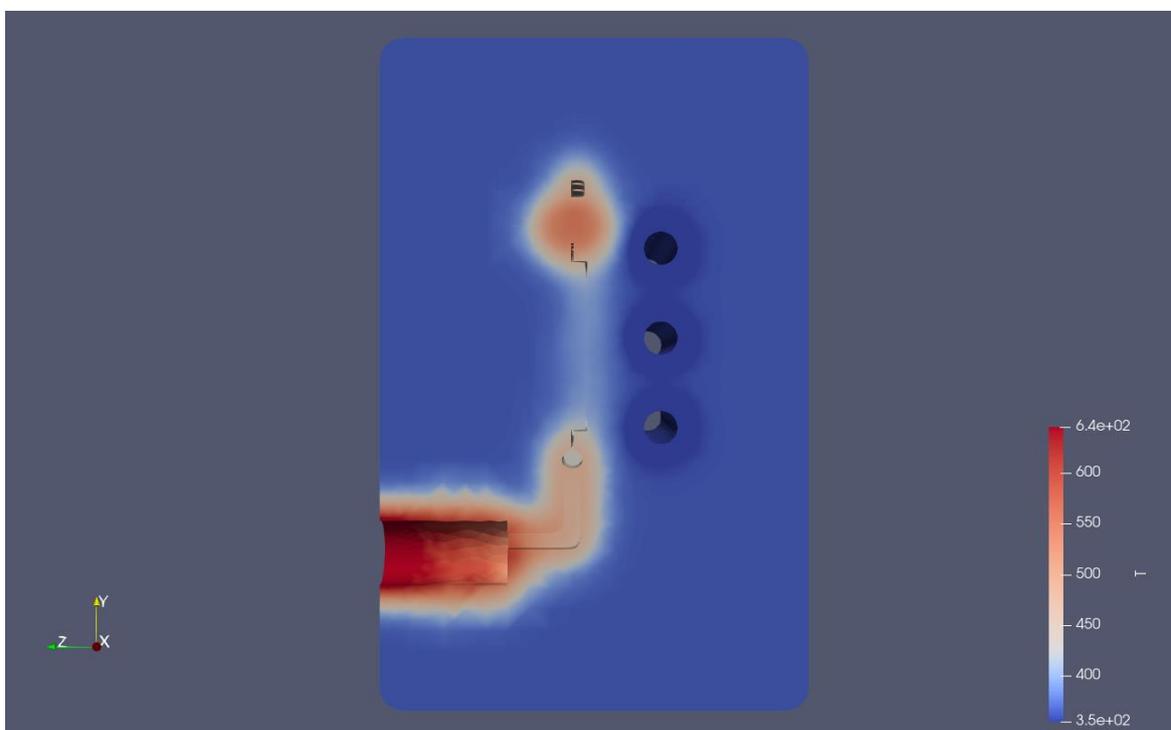


Fig. 7.71 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.

### 7.4.3. Simulación con tres tuberías y una velocidad del fluido de 3.5 m/s

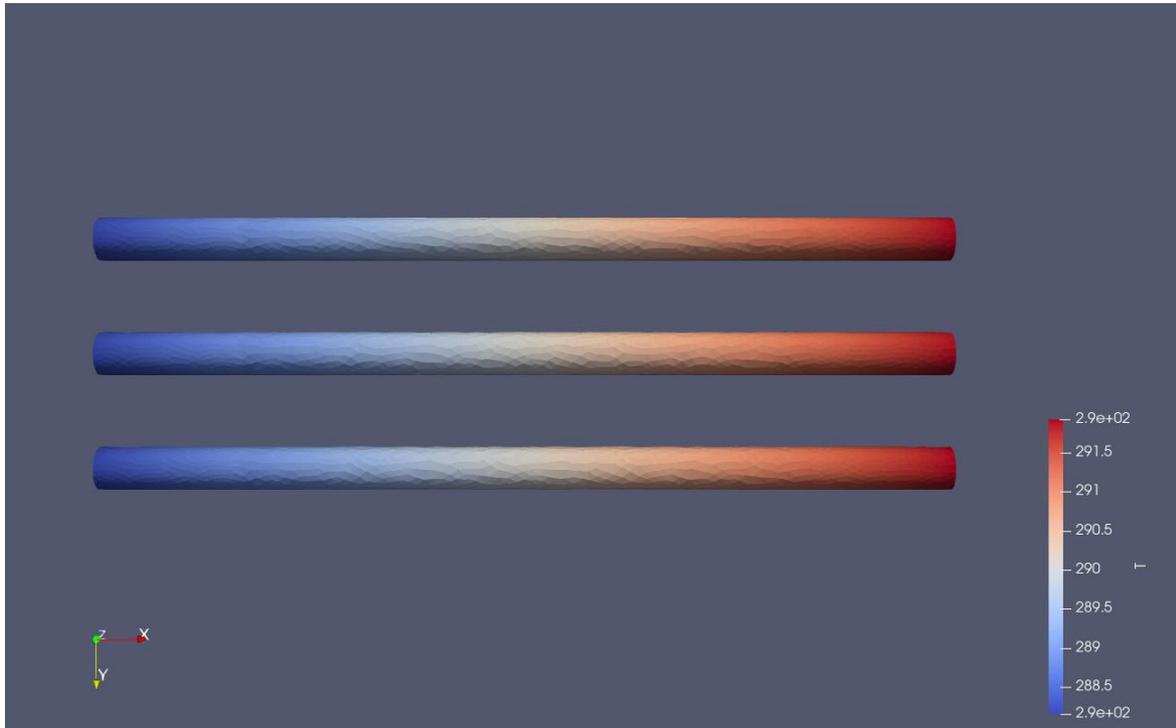


Fig. 7.72 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo.

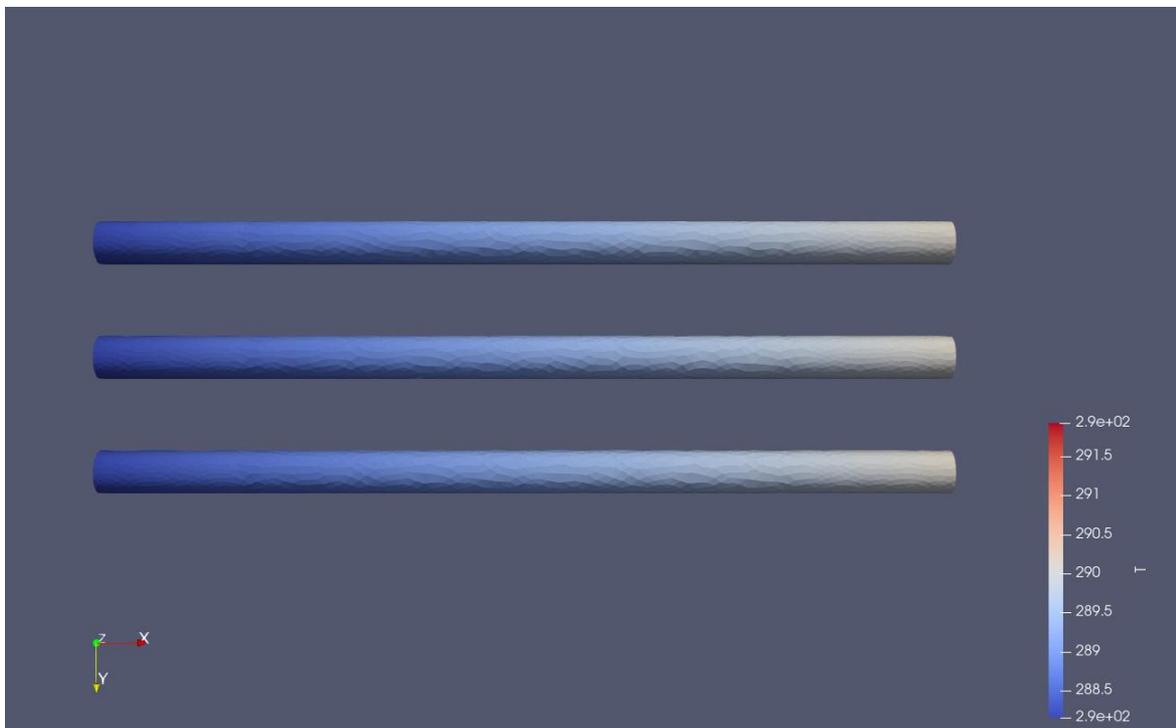


Fig. 7.73 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos.

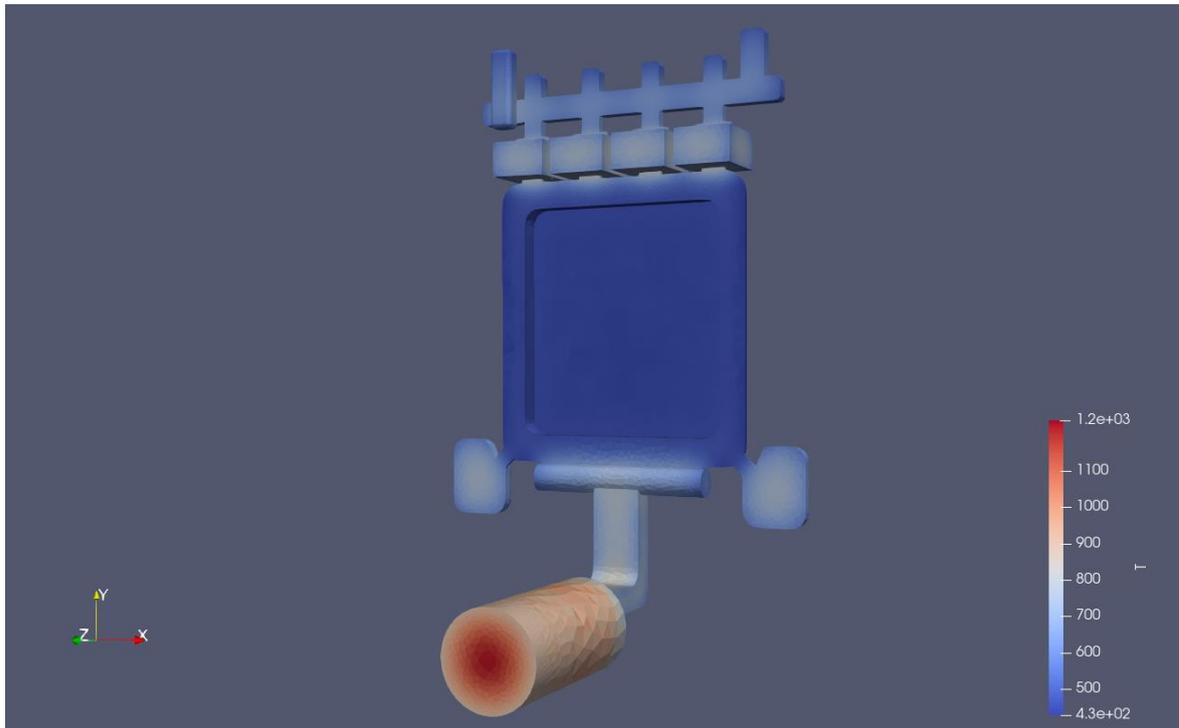


Fig. 7.74 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.

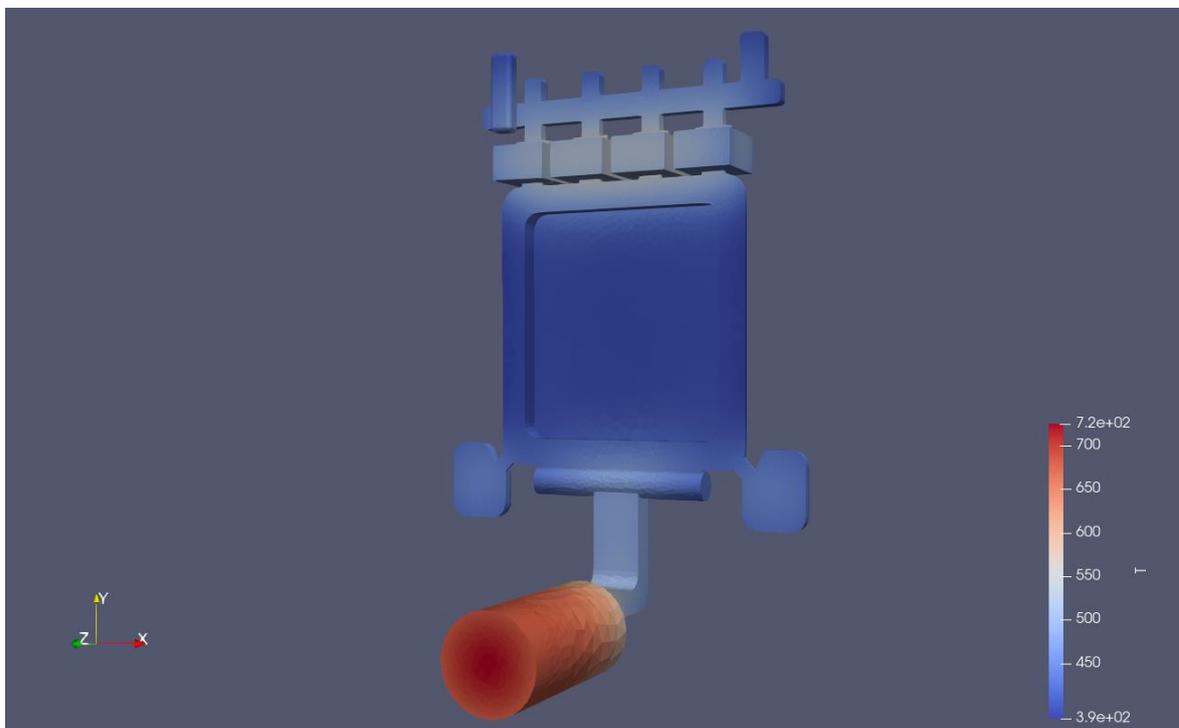


Fig. 7.75 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos.

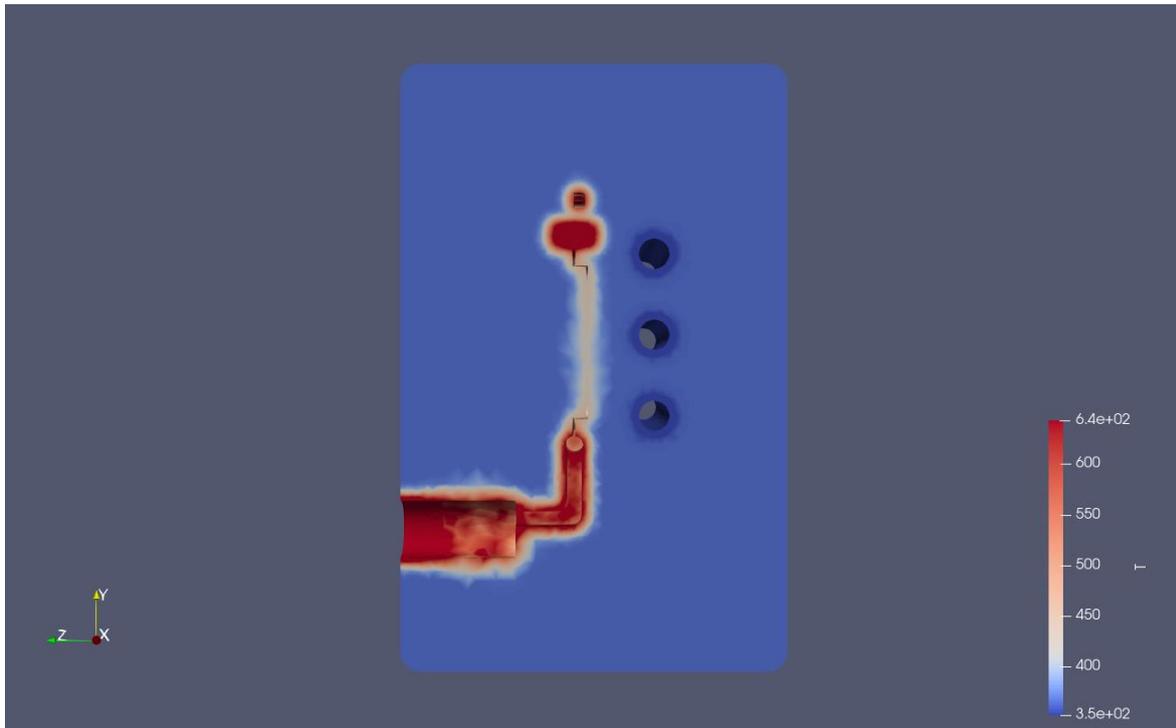


Fig. 7.76 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.

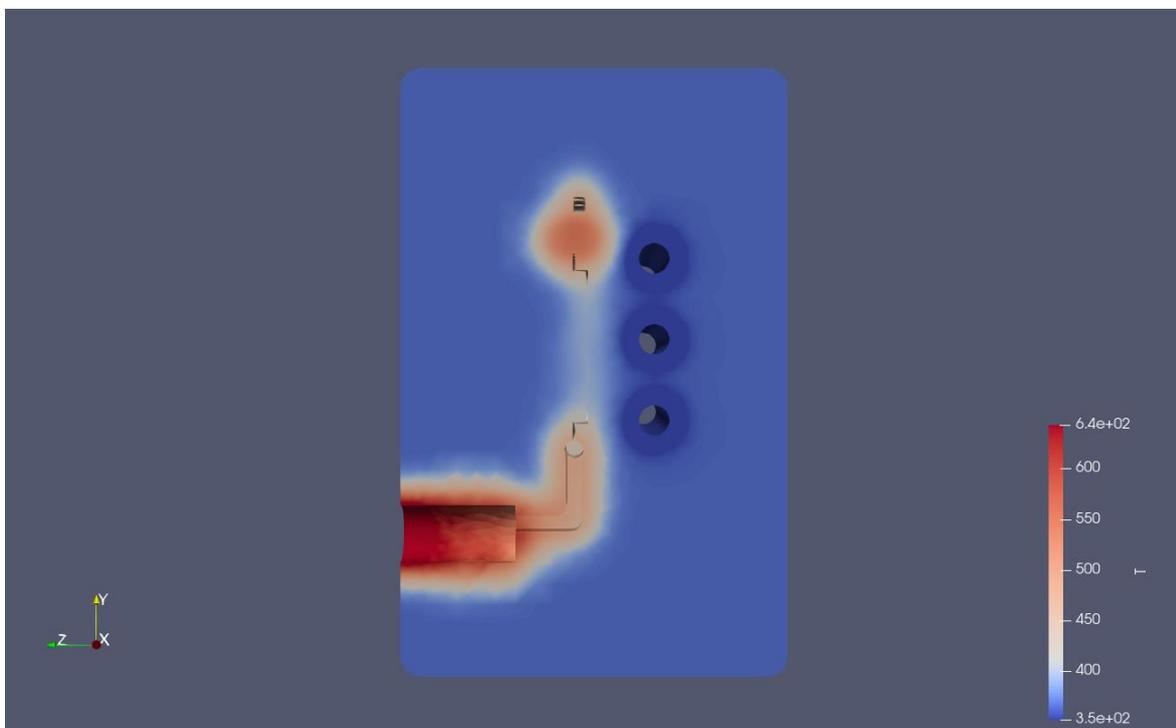


Fig. 7.77 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.

#### 7.4.4. Análisis de resultados

Tras realizar las simulaciones con tres tuberías, se ha podido comprobar mediante medidas realizadas en Paraview algunas las temperaturas a lo largo de la longitud de la tubería. Esta temperatura es el promedio en las tres tuberías. Por lo que queda reflejado en la Fig. 7.78 que la temperatura, a diferencia del modelo de una tubería, crece linealmente a lo largo de su longitud. En el Anexo VIII se puede observar los datos extraídos de las medidas de la temperatura del fluido.

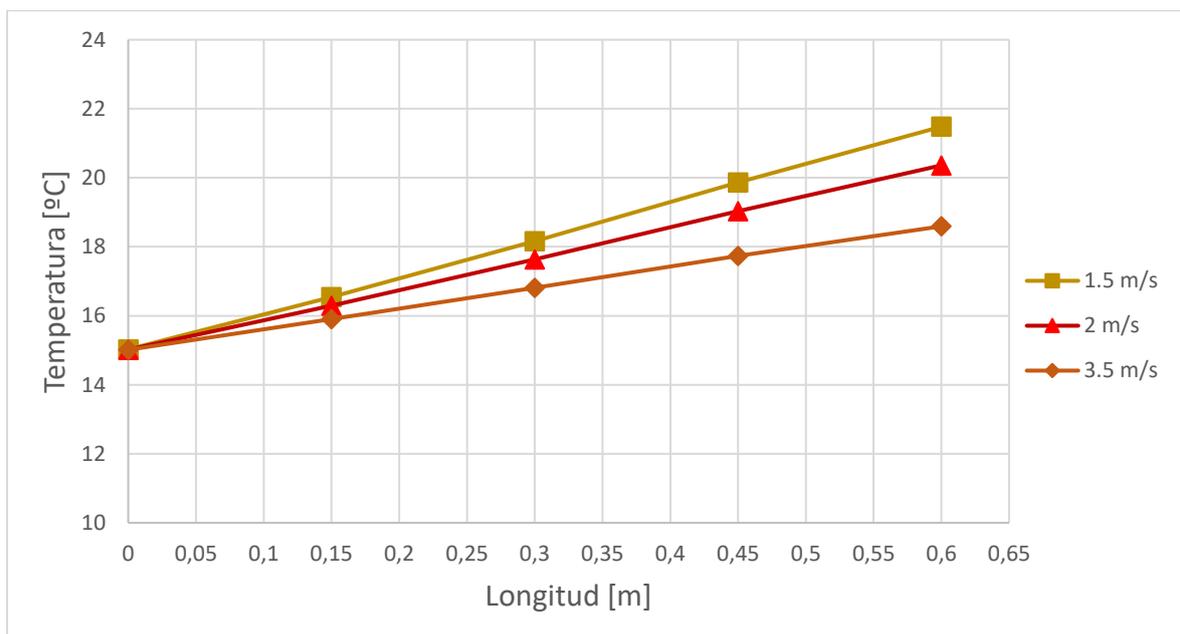


Fig. 7.78 Temperatura del agua en función de la longitud para  $t = 1$  s.

Al igual que en el caso de una tubería, el agua que sale de las tuberías tiene una temperatura mayor cuando la velocidad es menor, debido a que esta pasa más tiempo circulando por el molde y acaba calentándose más.

En el instante final del moldeo, a los ocho segundos, la temperatura se ve que decrementa debido al enfriamiento del sistema. Como se observa en la Fig. 7.79 la pendiente de las rectas disminuye, pero la proporcionalidad entre las diferencias de temperatura se conserva entre las tres.

Como se muestra en los resultados térmicos de la bandeja, ésta comienza a alta temperatura en toda su geometría y va enfriándose conforme avanza el tiempo y cede calor al molde.

Además, se puede observar que en los puntos donde hay más calor, como el volumen del contenedor del pistón, se tiene una temperatura heterogénea en un principio y al final, aparte de haberse enfriado, la temperatura es más homogénea en todo el volumen.

El interior se comporta como en el caso anterior, donde la temperatura se expande al molde y éste a su vez a la tubería. En este caso se puede ver como las tuberías enfrían parte de su entorno llegando a influir en ese calor expandido.

La temperatura final de la bandeja no varía respecto a la simulación de una tubería. Esta consigue disminuir hasta los 260 °C aproximadamente.

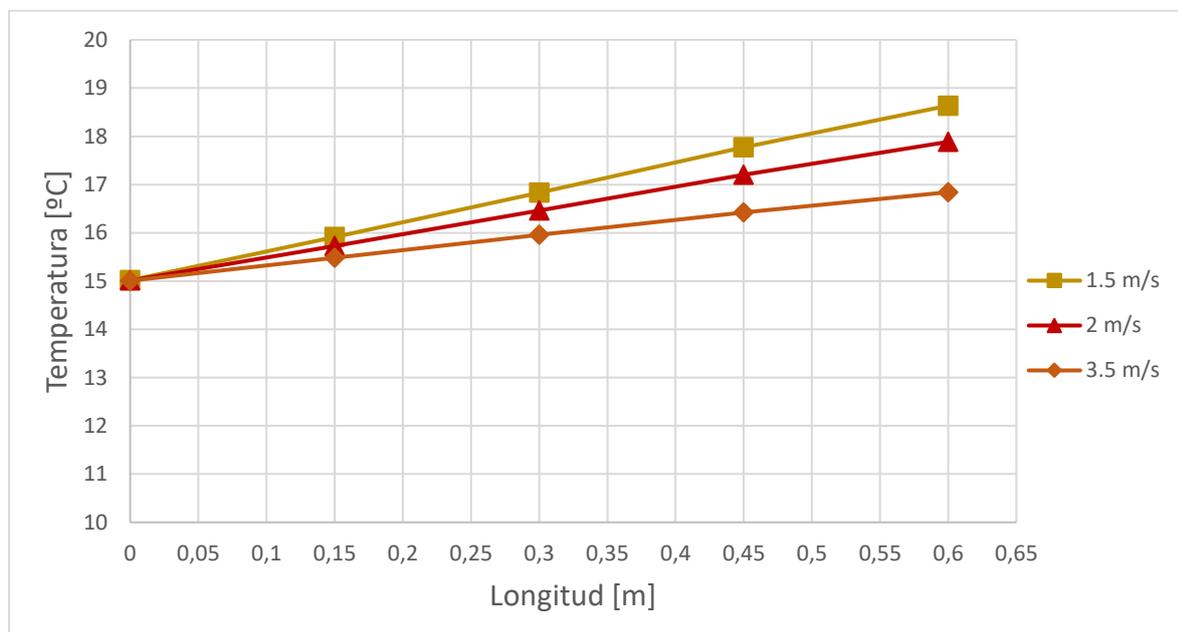


Fig. 7.79 Temperatura del agua en función de la longitud para  $t = 8s$ .

Se ha considerado medir la temperatura en la superficie de la tubería. En Paraview es posible realizar la medición solo en la superficie del tubo para comprobar la temperatura promedio en toda la superficie. Se ha observado que la temperatura promedio en la superficie de cada tubería es de unos 40-50 °C y a medida que transcurre el tiempo este va decreciendo hasta unos 30-35 °C a los ocho segundos. Con esto se consigue ver que es en la superficie del tubo donde más temperatura se tiene y la que se trasmite por lo que se comprueba que esa capa límite tiene un efecto en la transmisión de calor.

## 7.5. Simulación del modelo convencional con cinco tuberías

La siguiente simulación consta de pasar cinco tuberías para la refrigeración del molde. En este caso, las tuberías son de 20 mm de diámetro. Al igual que en la simulación anterior, la separación entre centros de la tubería es de 80 mm y la distancia entre la superficie de la tubería y de la bandeja es de 50 mm.

Debido al alto requerimiento computacional que se necesita para simular tantas tuberías, con flujo turbulento y a tales velocidades se ha debido de subir la el número de Courant de 5 a 15 para poder llegar a simular esta configuración en su totalidad. El poco rendimiento del programa se debe a que la versión gratuita restringe mucho la carga que puede soportar dicho programa.

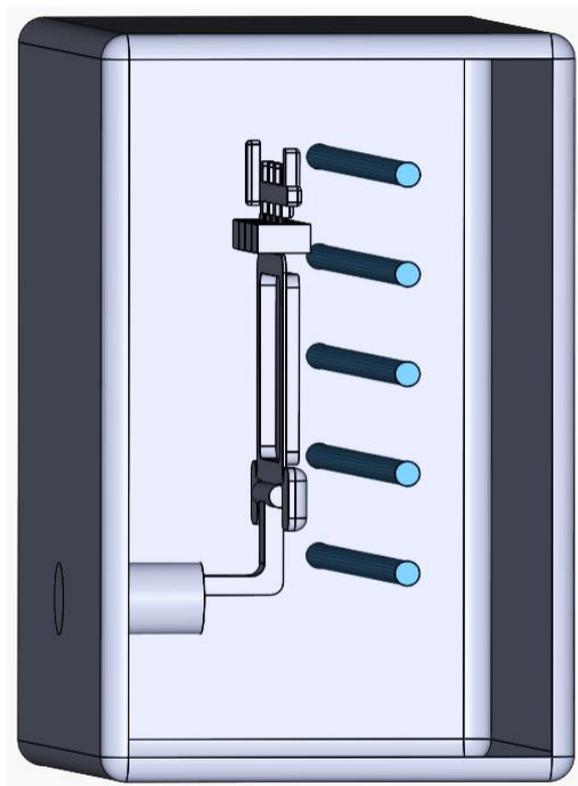


Fig. 7.80 Modelo convencional de cinco tuberías

### 7.5.1. Simulación con cinco tuberías y una velocidad del fluido de 1.5 m/s

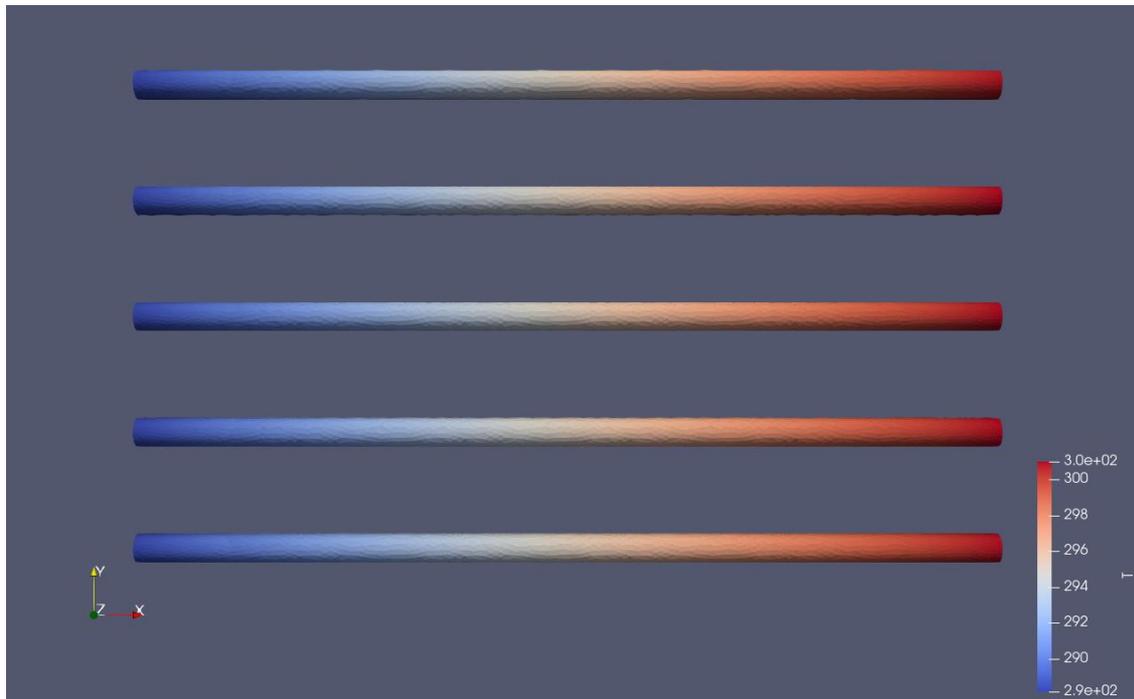


Fig. 7.81 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo.

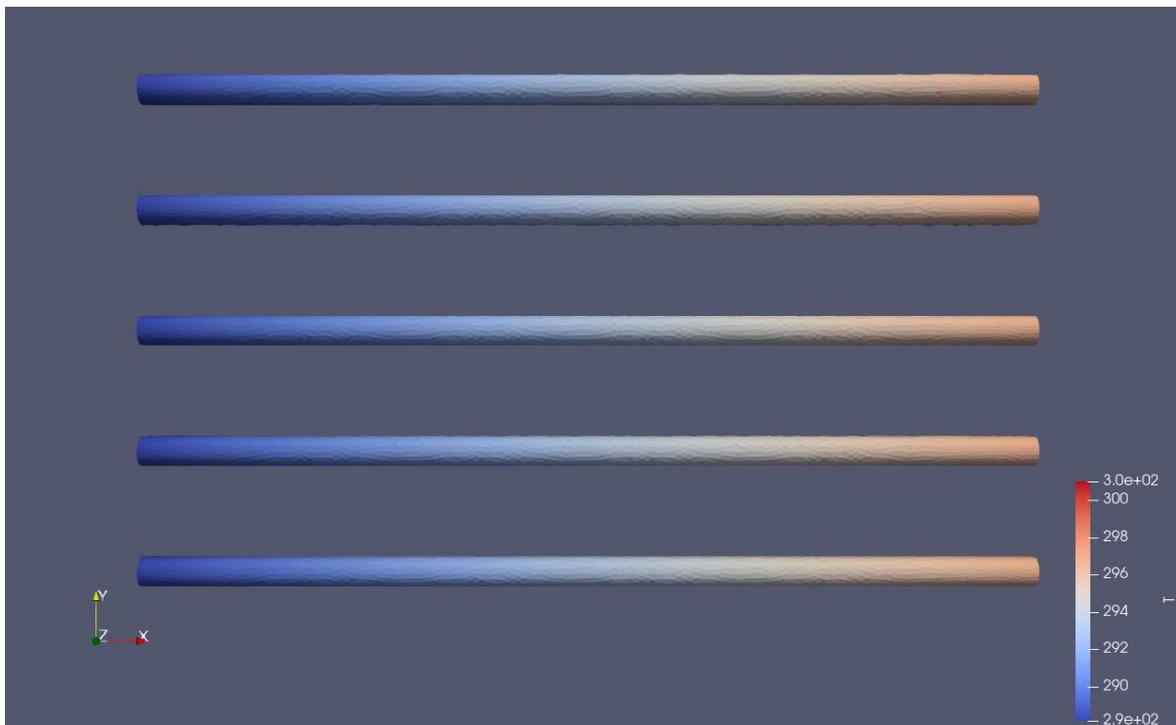


Fig. 7.82 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos.

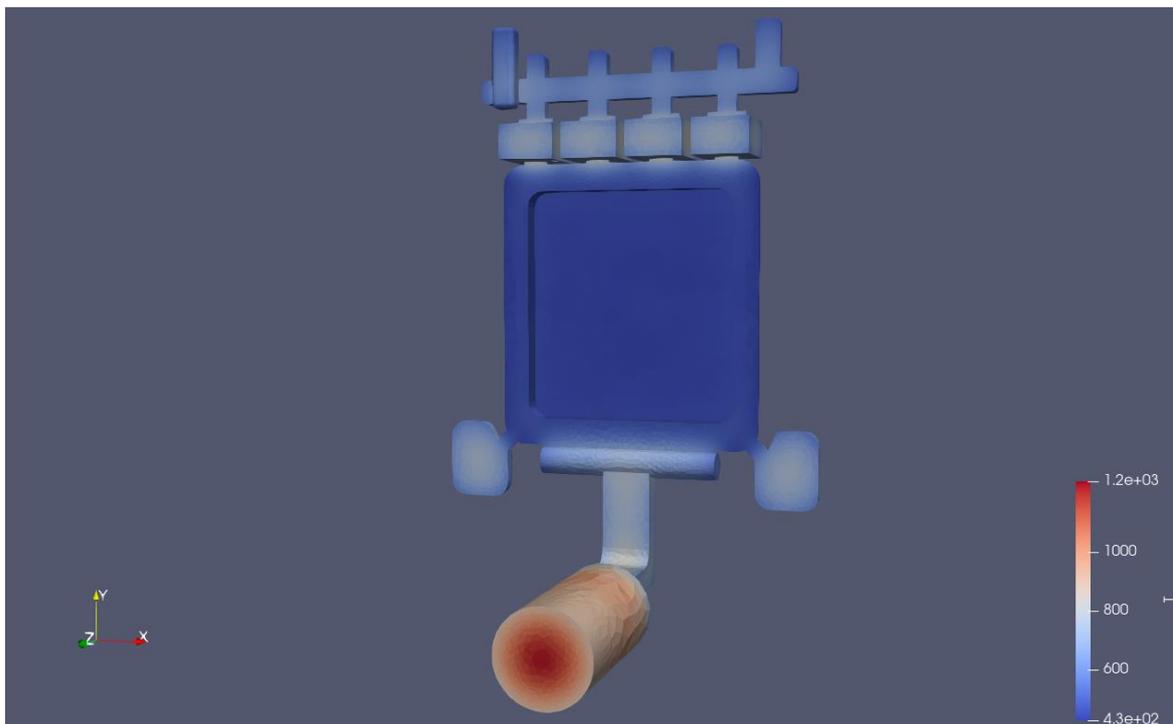


Fig. 7.83 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.

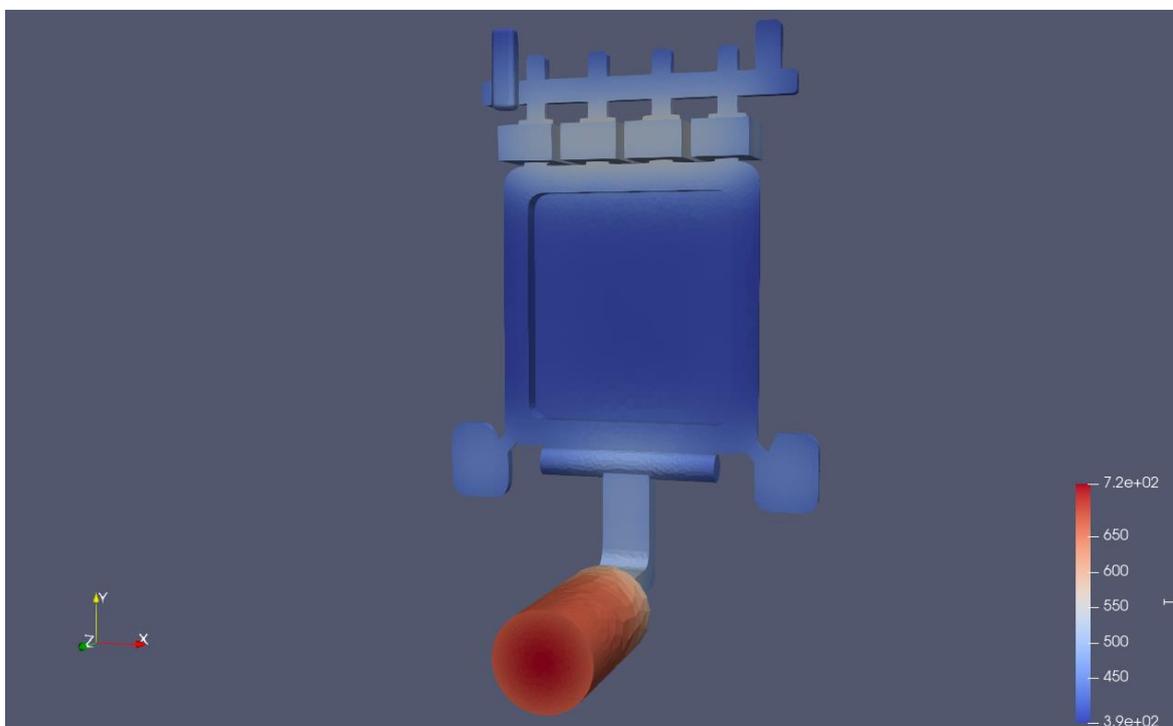


Fig. 7.84 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos.



Fig. 7.85 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.

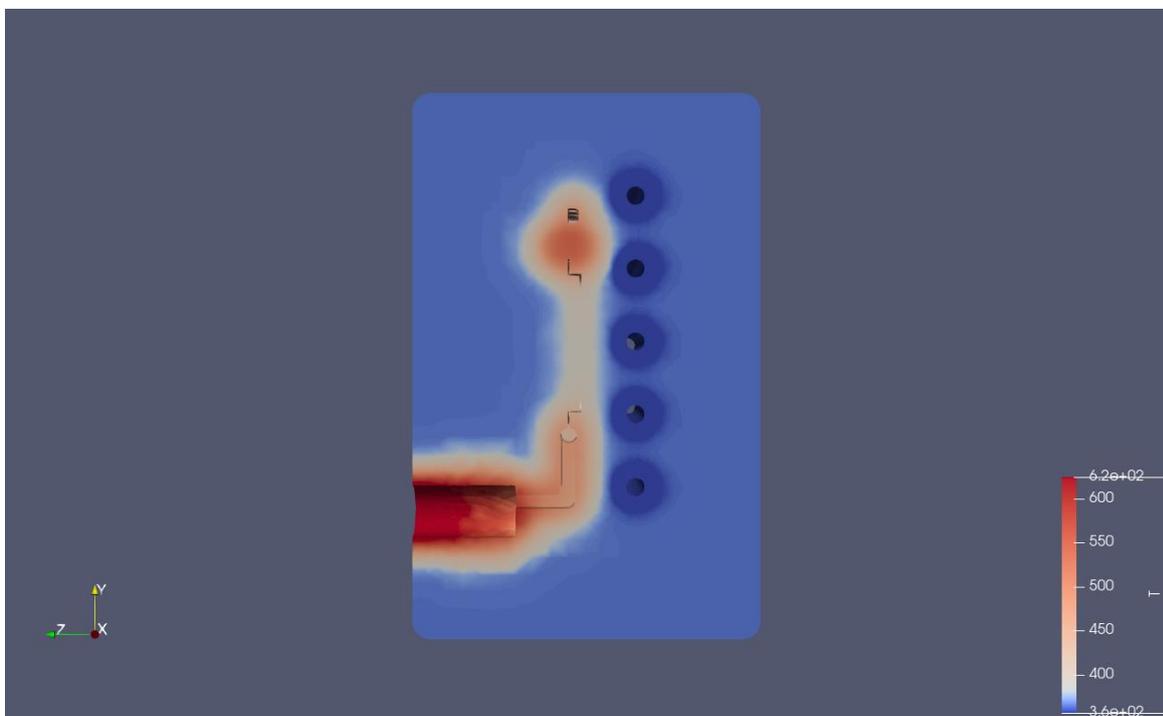


Fig. 7.86 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.

### 7.5.2. Simulación con cinco tuberías y velocidad del fluido de 2 m/s

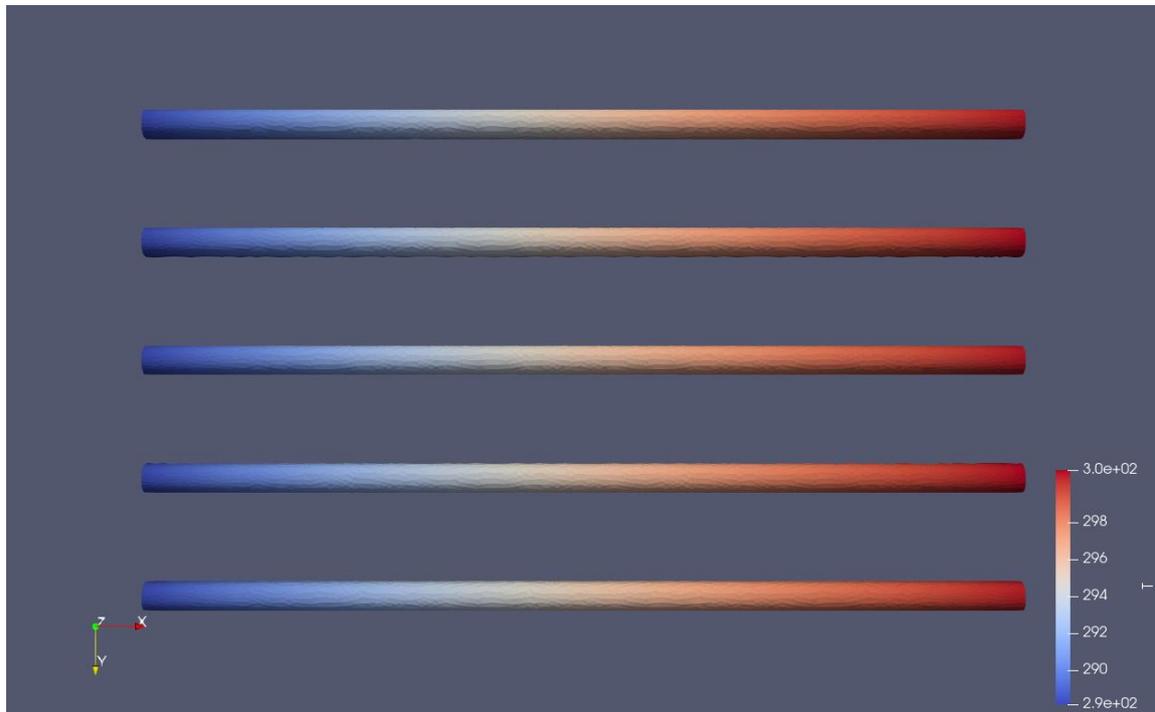


Fig. 7.87 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo.

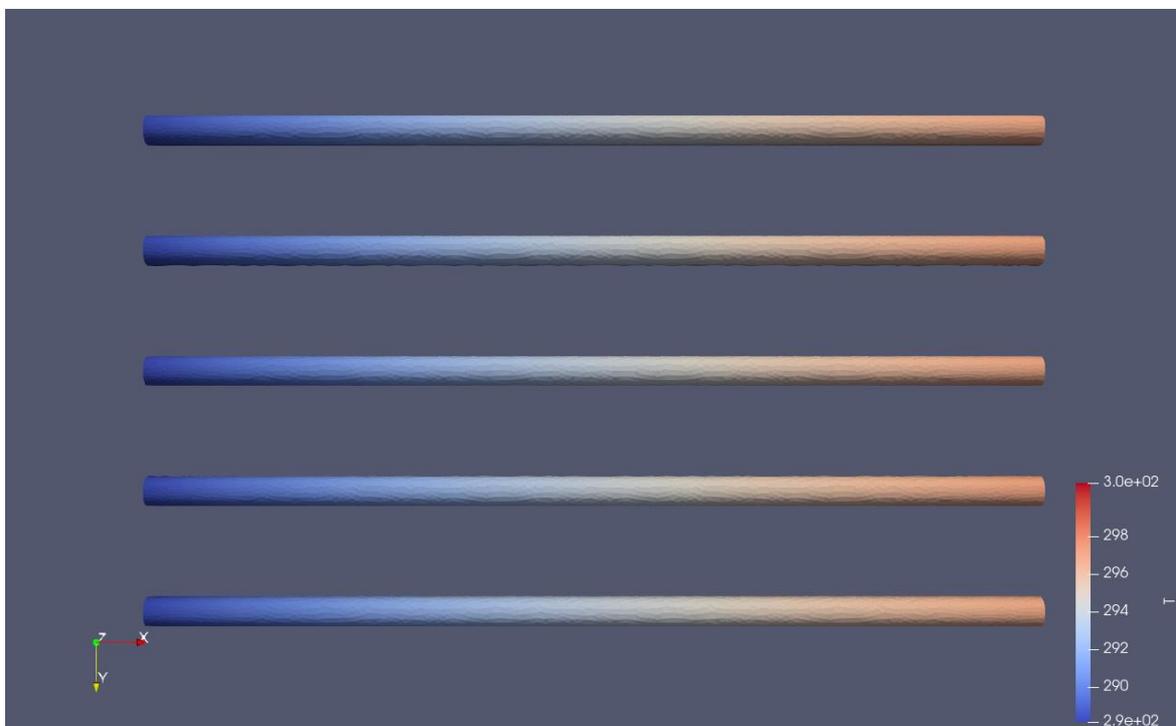


Fig. 7.88 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos.

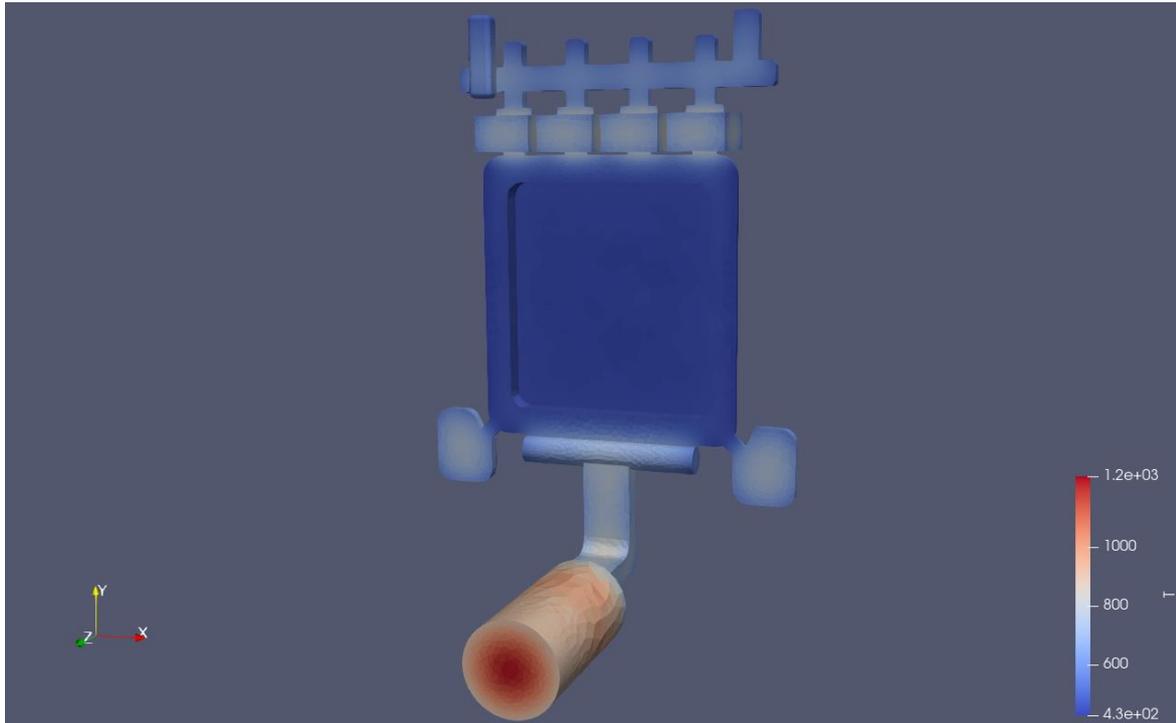


Fig. 7.89 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.

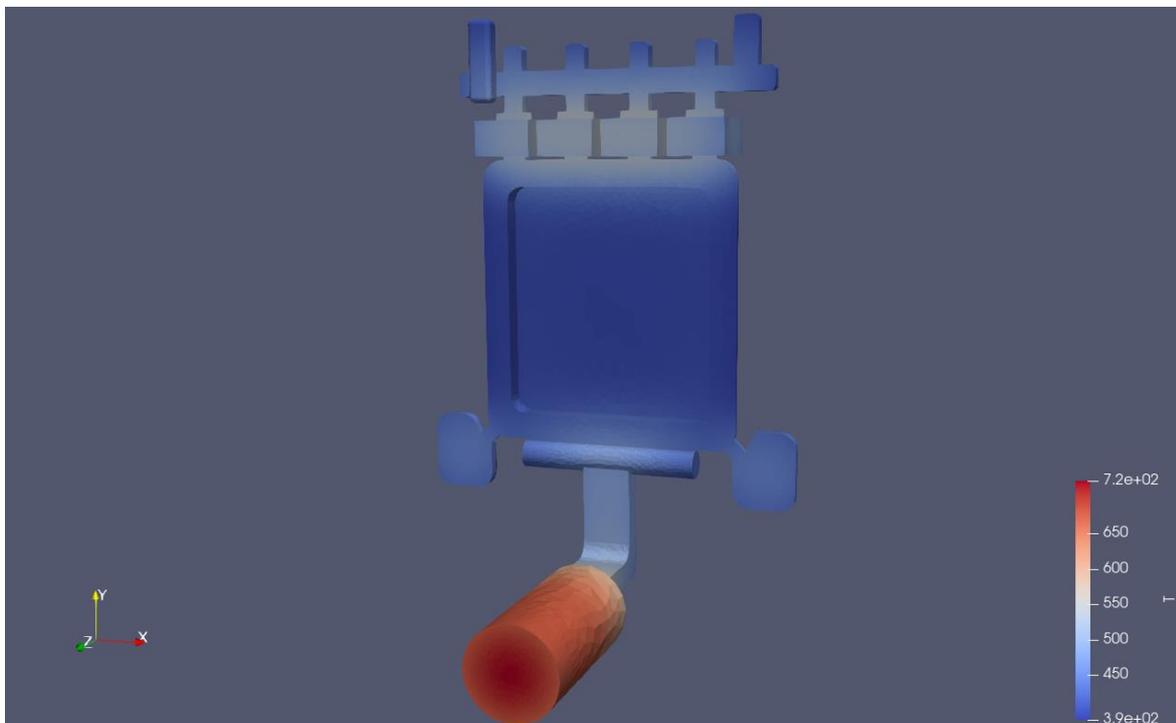


Fig. 7.90 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos.

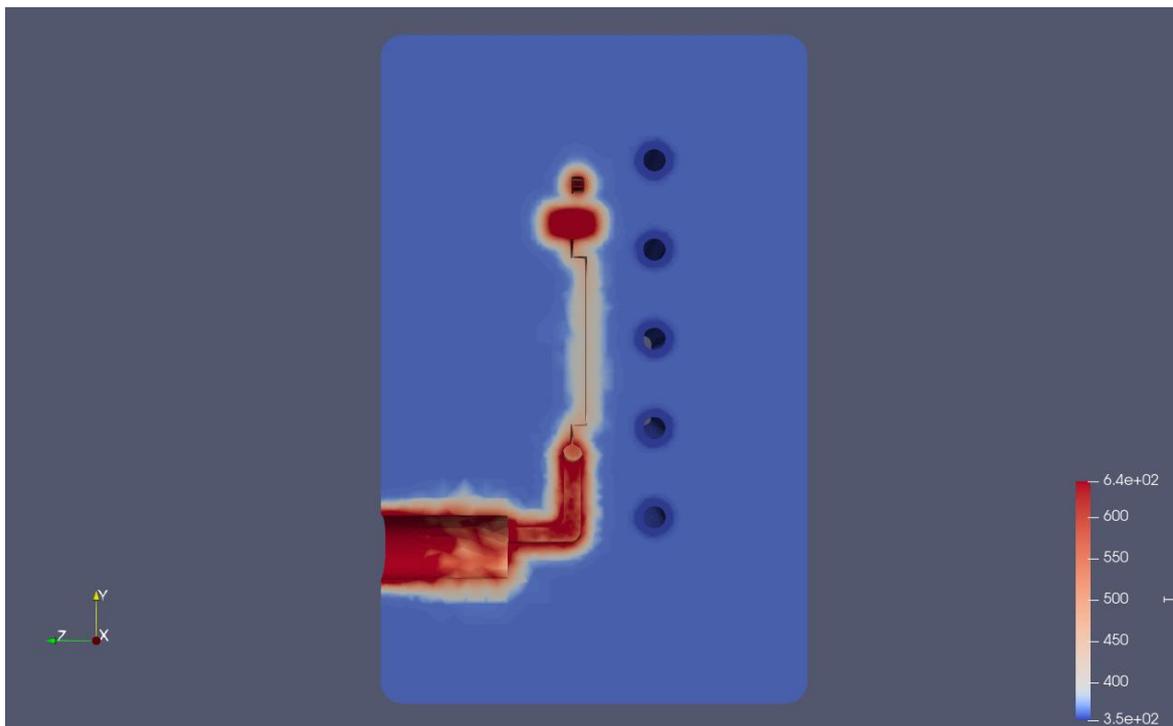


Fig. 7.91 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.

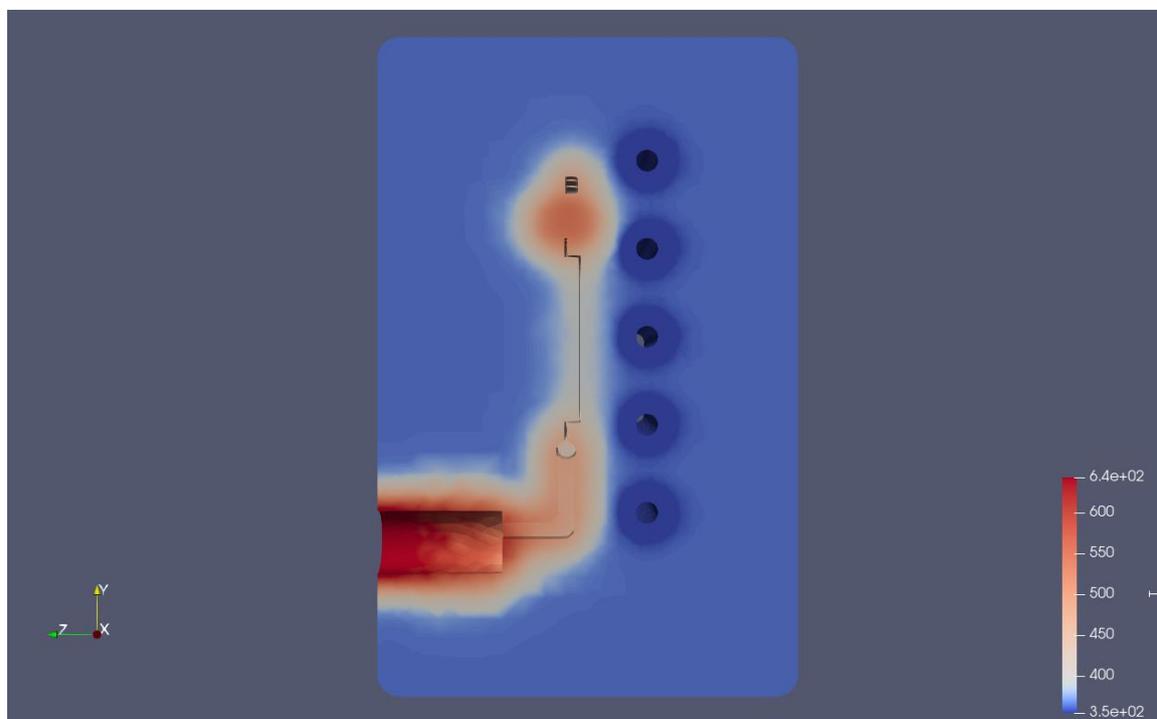


Fig. 7.92 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.

### 7.5.3. Simulación con cinco tuberías y una velocidad del fluido de 3.5 m/s

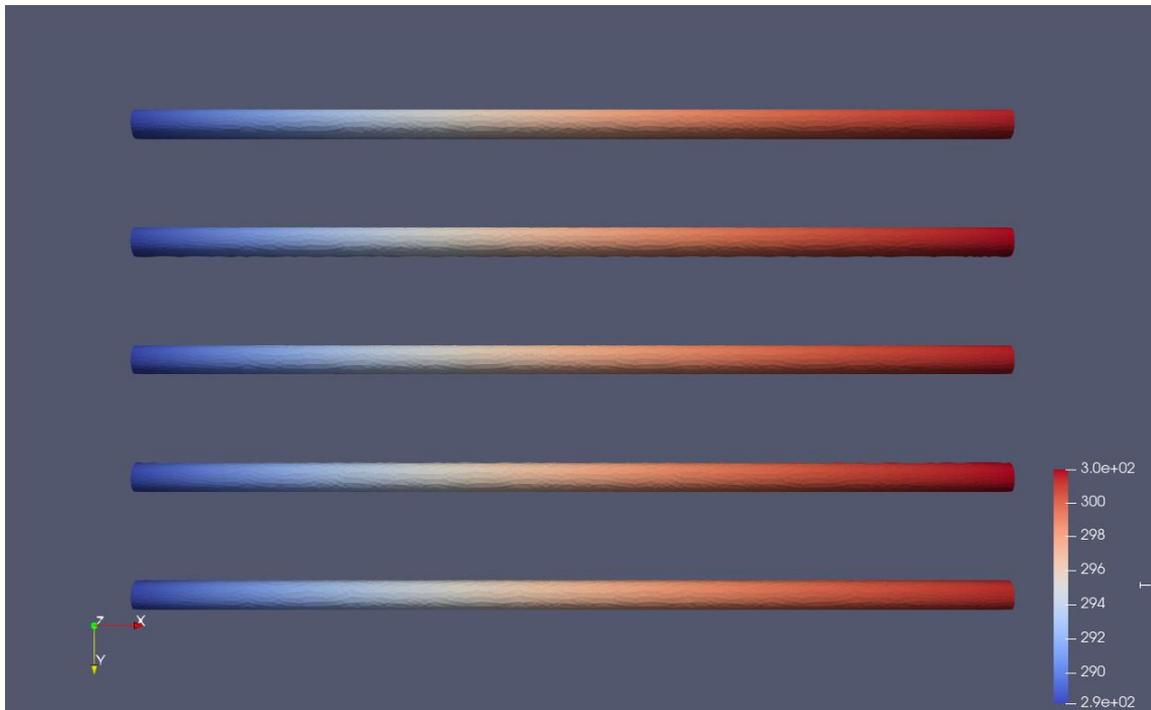


Fig. 7.93 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo.

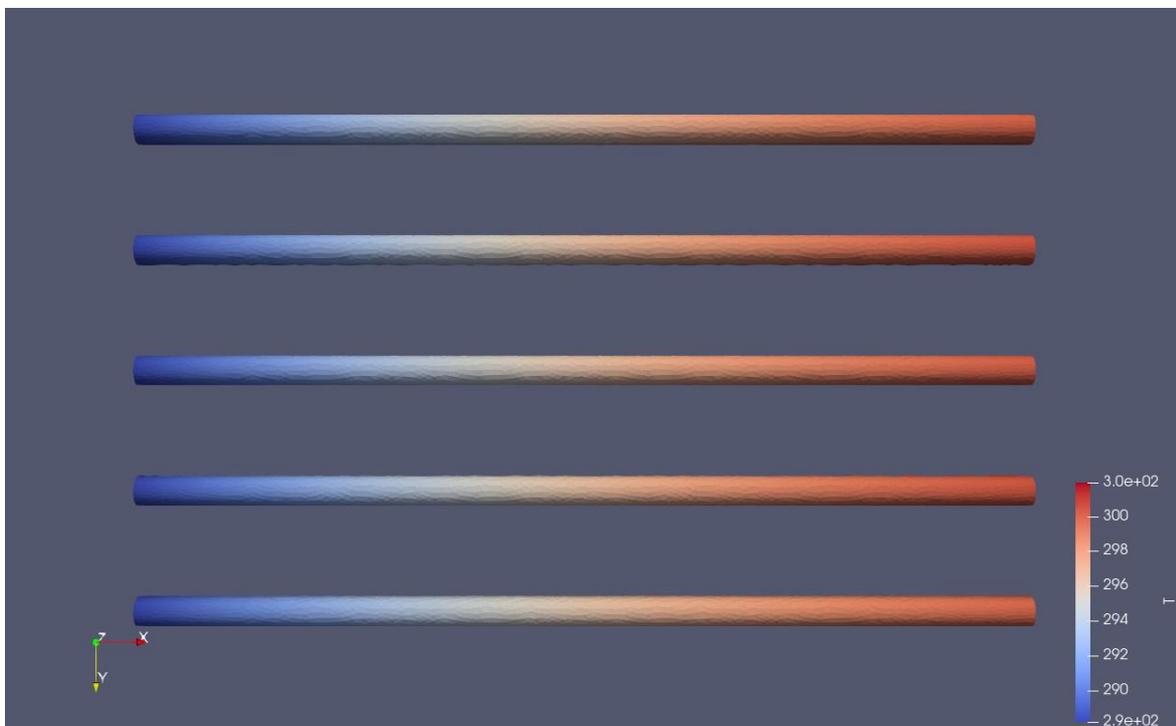


Fig. 7.94 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos.

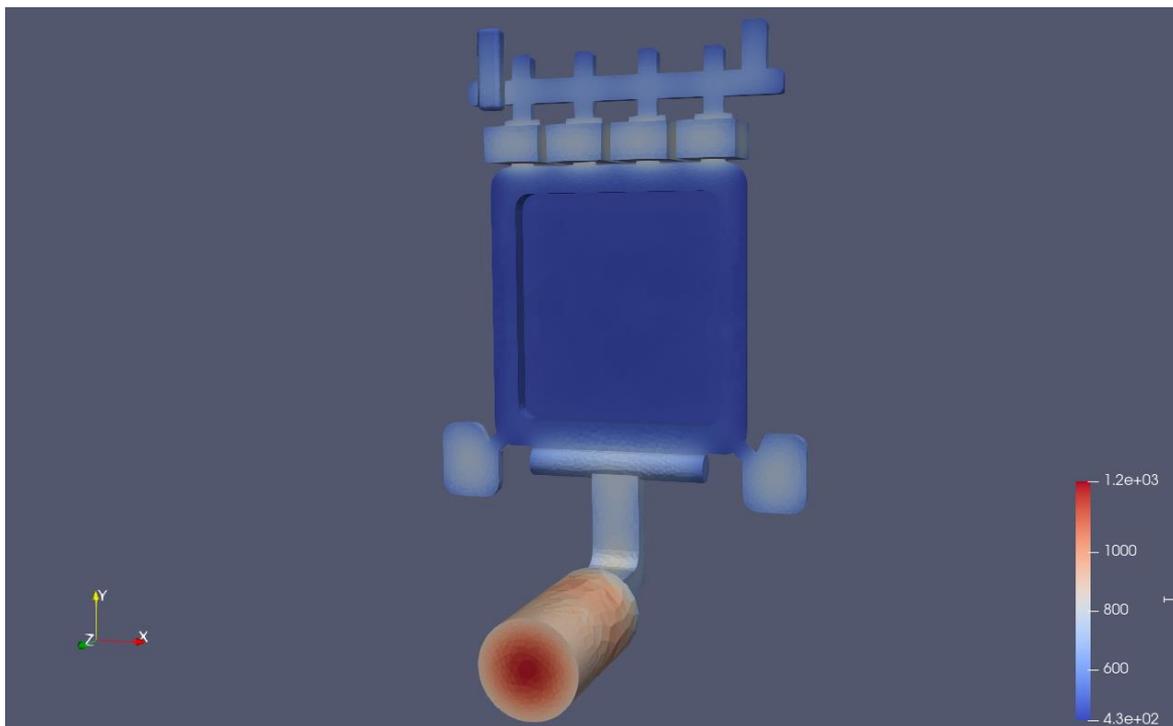


Fig. 7.95 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.

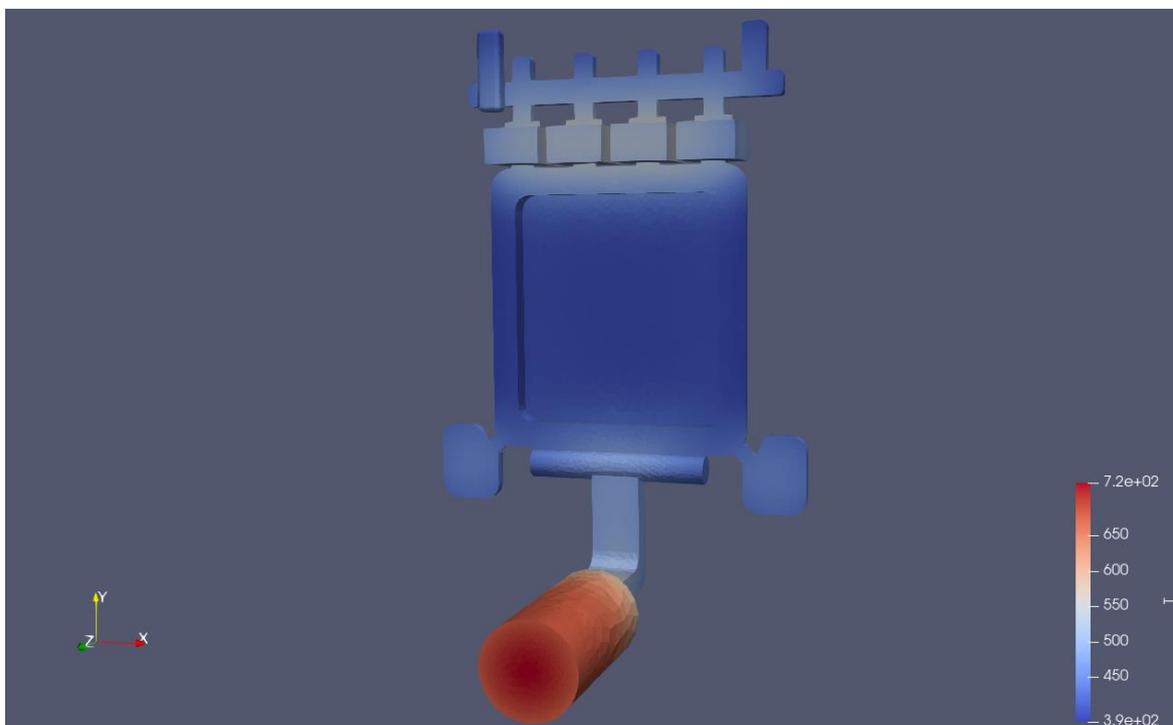


Fig. 7.96 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos.

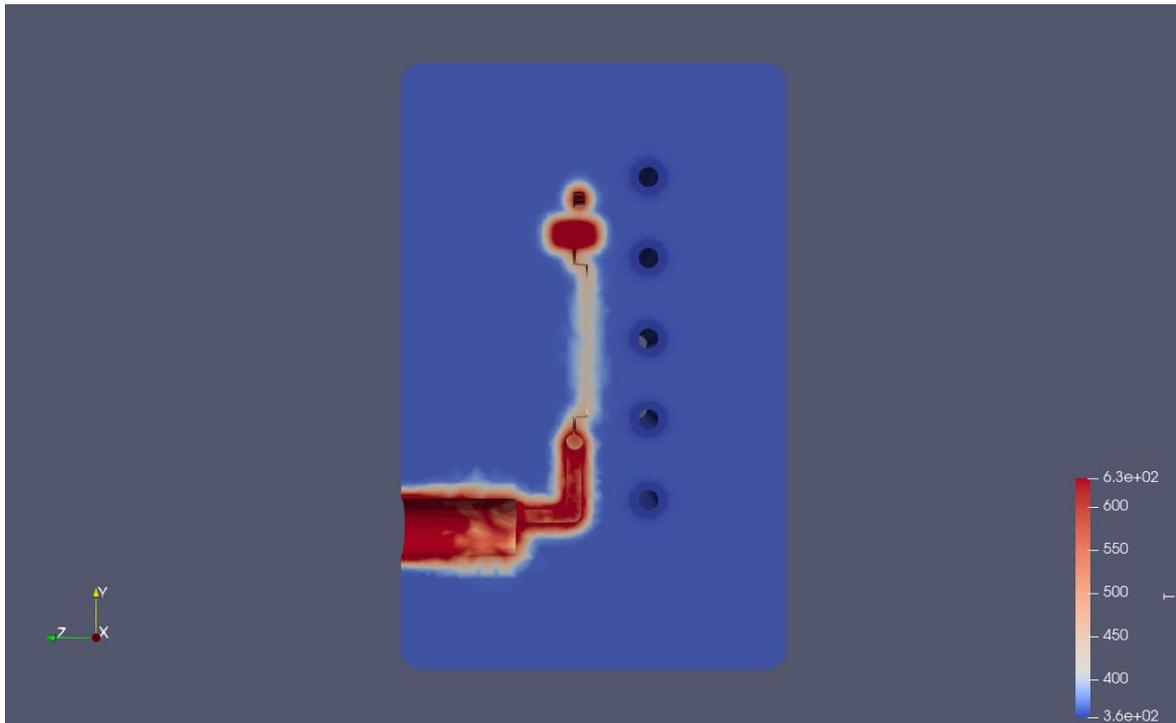


Fig. 7.97 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.

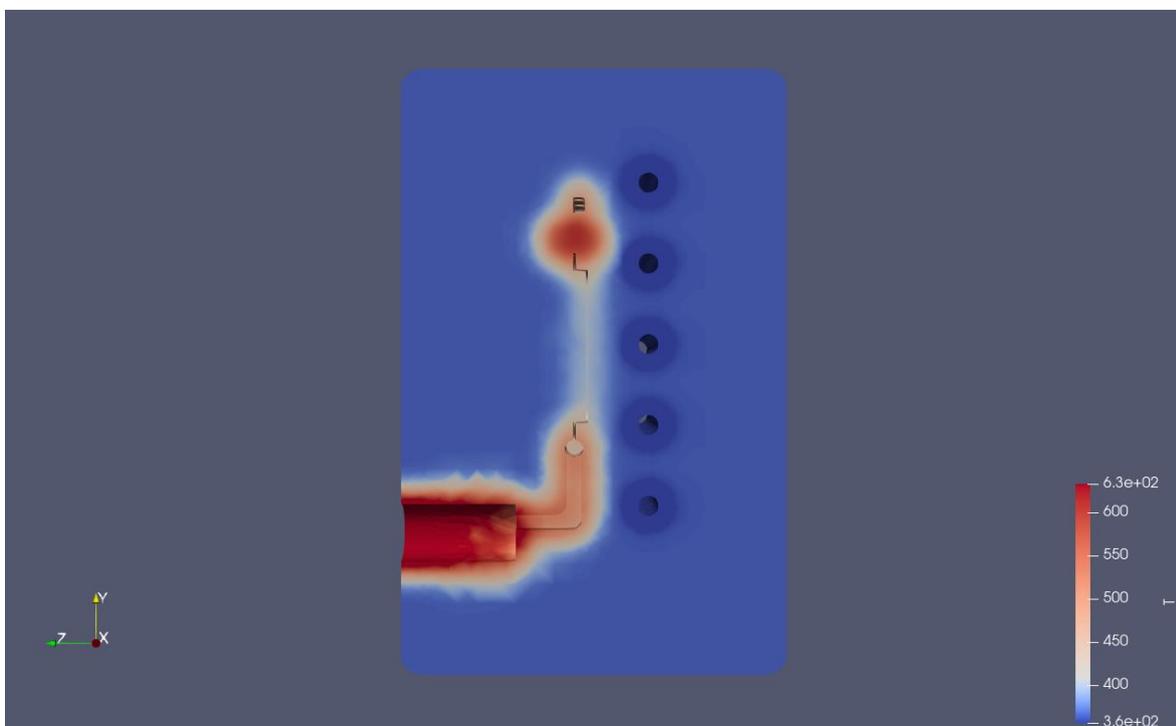


Fig. 7.98 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.

#### 7.5.4. Análisis de resultados

Tras analizar los resultados con Paraview se pudo ver que el comportamiento térmico de la bandeja y del molde seguía siendo el mismo. El hecho de aumentar el número de tuberías se vio que no tenía efecto relevante en el enfriamiento del molde. Éste disminuyó entre uno y dos grados, pero es posible que se deba a diferencias en los cálculos realizados por la simulación.

En cuanto a la medición de la temperatura promedio de salida del agua sí se ha visto que la salida del agua es mayor, pero como en los casos anteriores, es inversamente proporcional a la velocidad del agua en la tubería. En el Anexo IX se puede observar los datos extraídos de las medidas de la temperatura del fluido.

En la Fig. 7.99 se aprecia un aumento de la pendiente en todas las rectas por lo que la temperatura del agua ha aumentado. La temperatura de salida promedio es ahora más elevada por el aumento del número de tuberías que tienen contacto con el molde caliente. A su vez, al disminuir el diámetro se consigue que el número de Reynolds aumente, llegando a tener más turbulencia en el fluido, cosa que facilita el intercambio de calor y el aumento de temperatura.

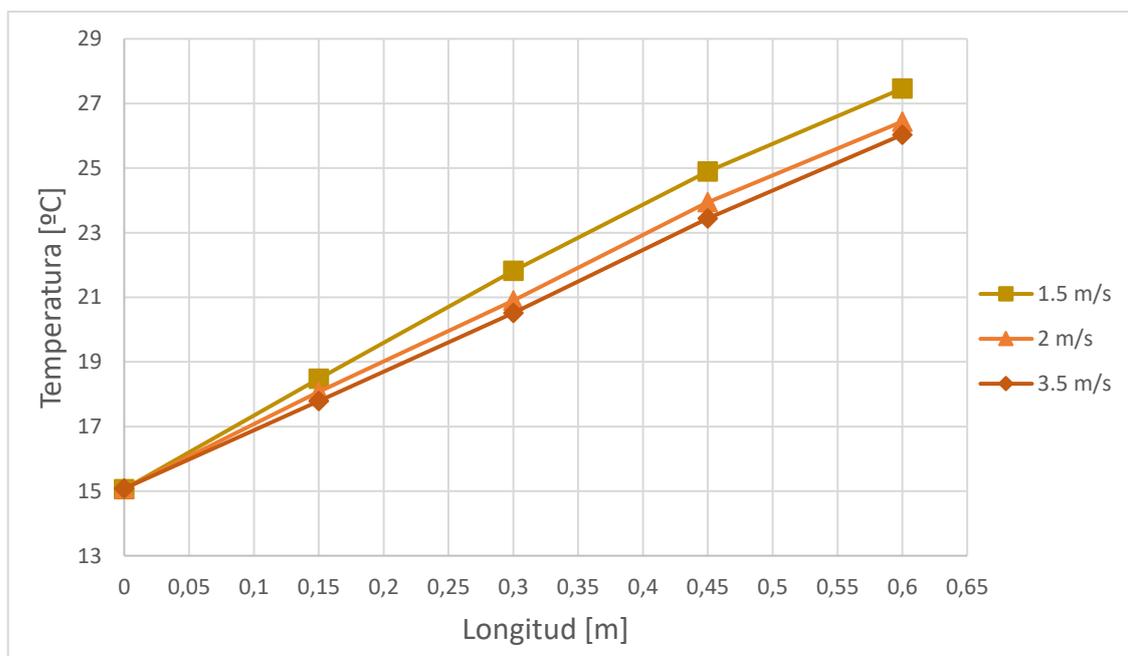


Fig. 7.99 Temperatura del agua en función de la longitud para  $t = 1s$ .

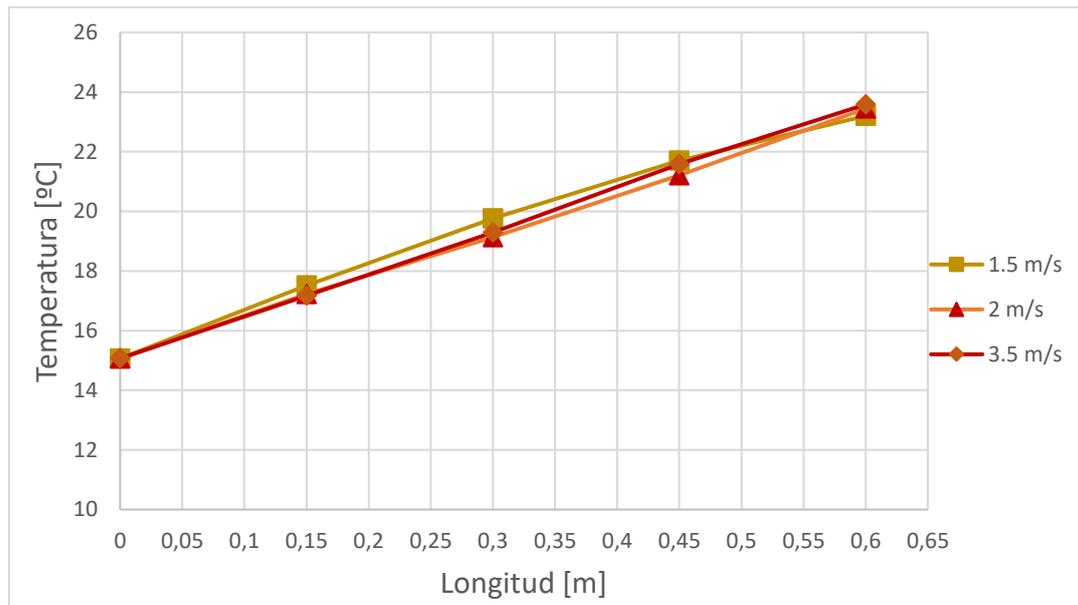


Fig. 7.100 Temperatura del agua en función de la longitud para  $t = 8s$ .

Con el aumento del tiempo la bandeja va perdiendo temperatura, ya que el sistema comienza a equilibrarse e intercambia calor para llegar al equilibrio térmico en todas sus partes. En la Fig. 7.100 se puede observar que a los ocho segundos la temperatura promedio para las distintas velocidades es muy similar en toda la longitud de las tuberías. Esto es posible a que se deba por este fenómeno. En las simulaciones anteriores se veía que a los ocho segundos todavía había diferencia entre las temperaturas de salidas a distintas velocidades

## 7.6. Simulación del modelo optimizado con una tubería

Como se explicó en el apartado 6.2, este primer modelo optimizado con un tubo vertical se ha diseñado con una inclinación que aumente el acercamiento de la tubería al molde facilitando la extracción de calor del mismo. Además, se ha diseñado verticalmente para que este pueda circular más cercano a la bandeja, ya que de manera horizontal solo tenía contacto con zonas del molde donde la temperatura no era tan elevada.

Destacar que el acercamiento máximo que realiza la tubería a la bandeja es en la parte inferior compuesta por el canal de distribución del aluminio. Este acercamiento máximo es a una longitud de 16 mm.

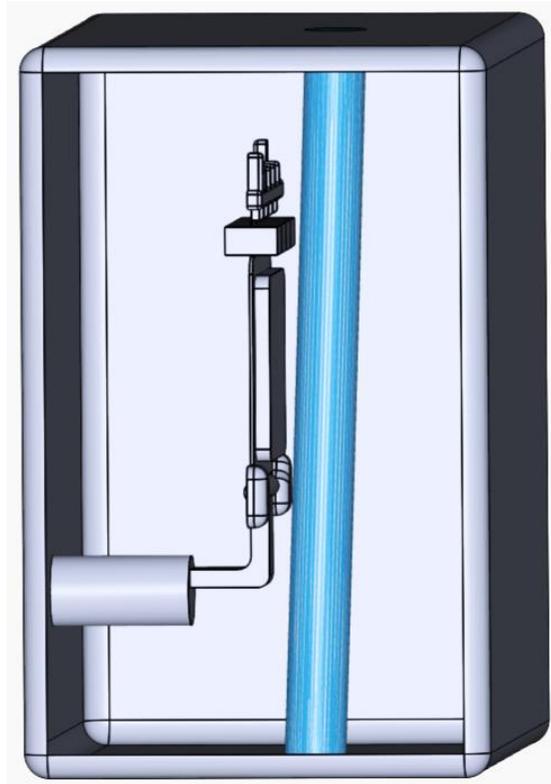


Fig. 7.101 Modelo optimizado de una tubería.

### 7.6.1. Simulación con una tubería y una velocidad del fluido de 1.5 m/s

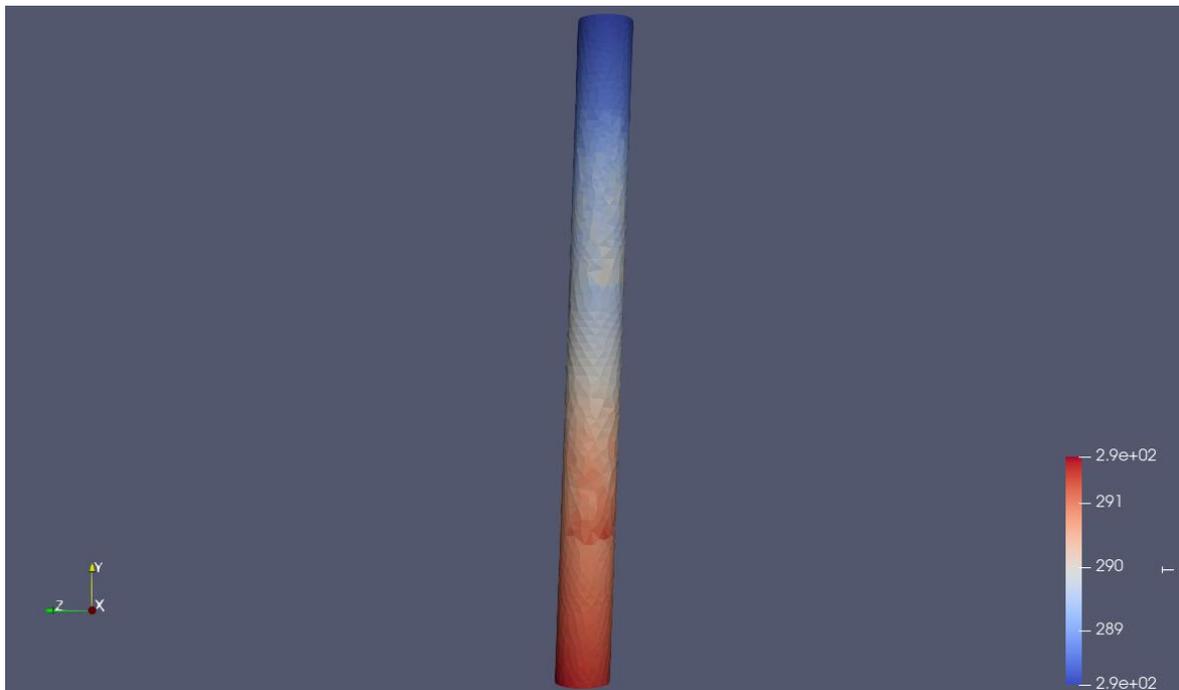


Fig. 7.102 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo.



Fig. 7.103 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos.

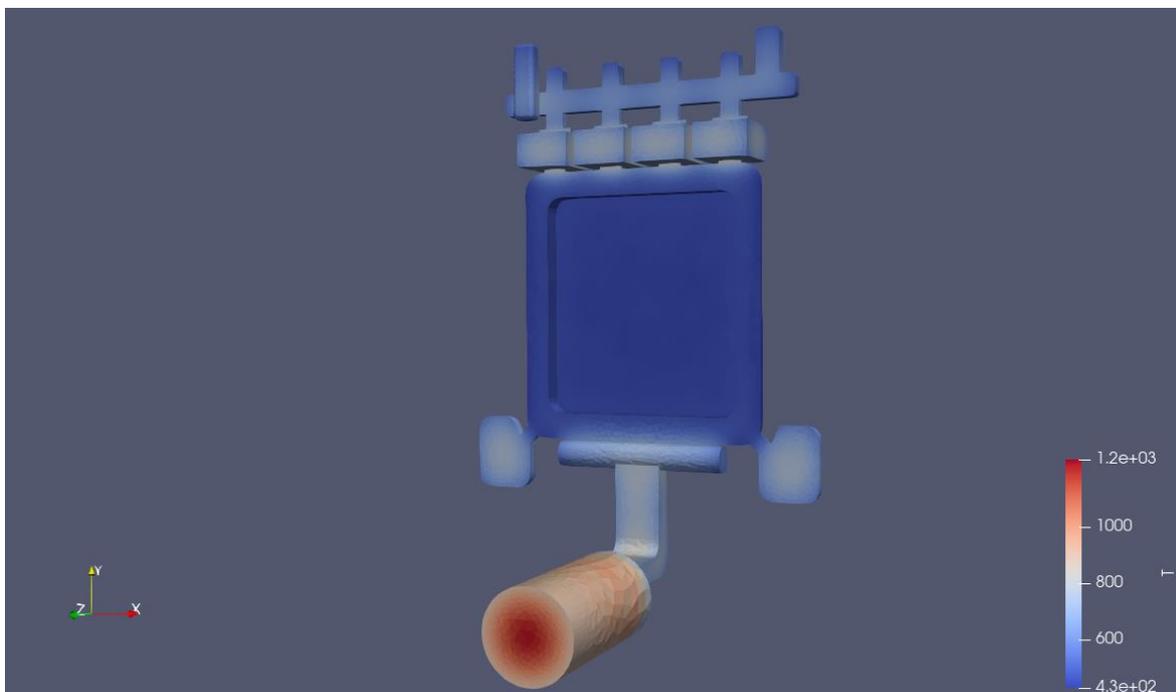


Fig. 7.104 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.

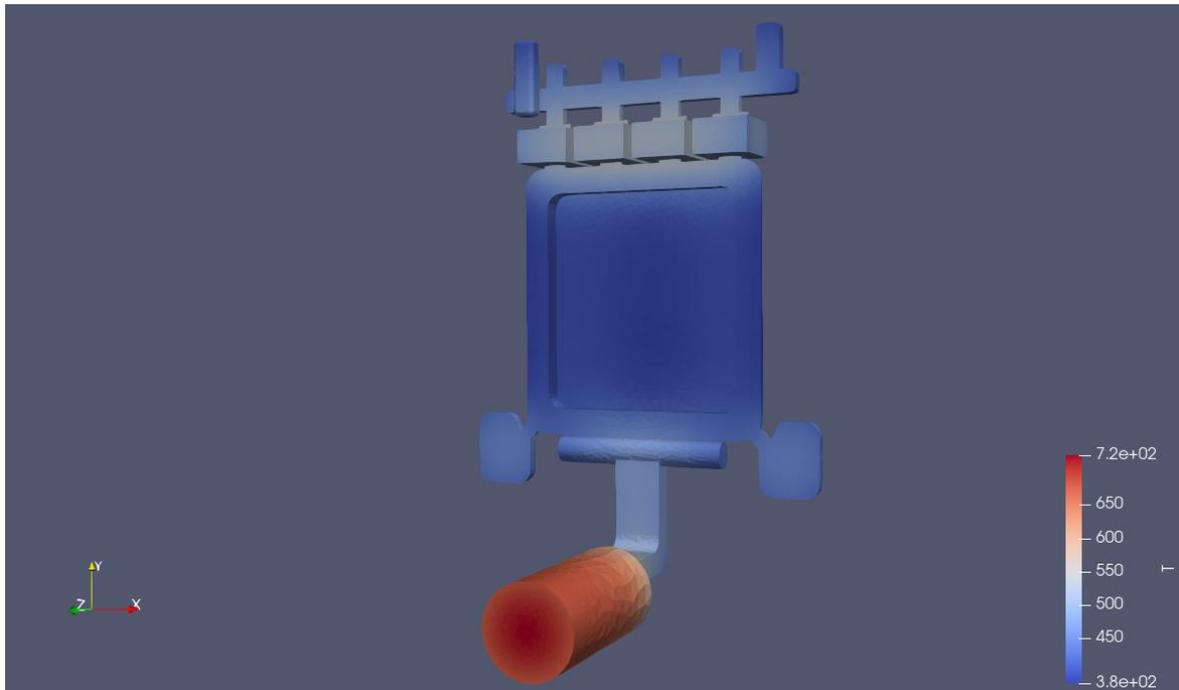


Fig. 7.105 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos.

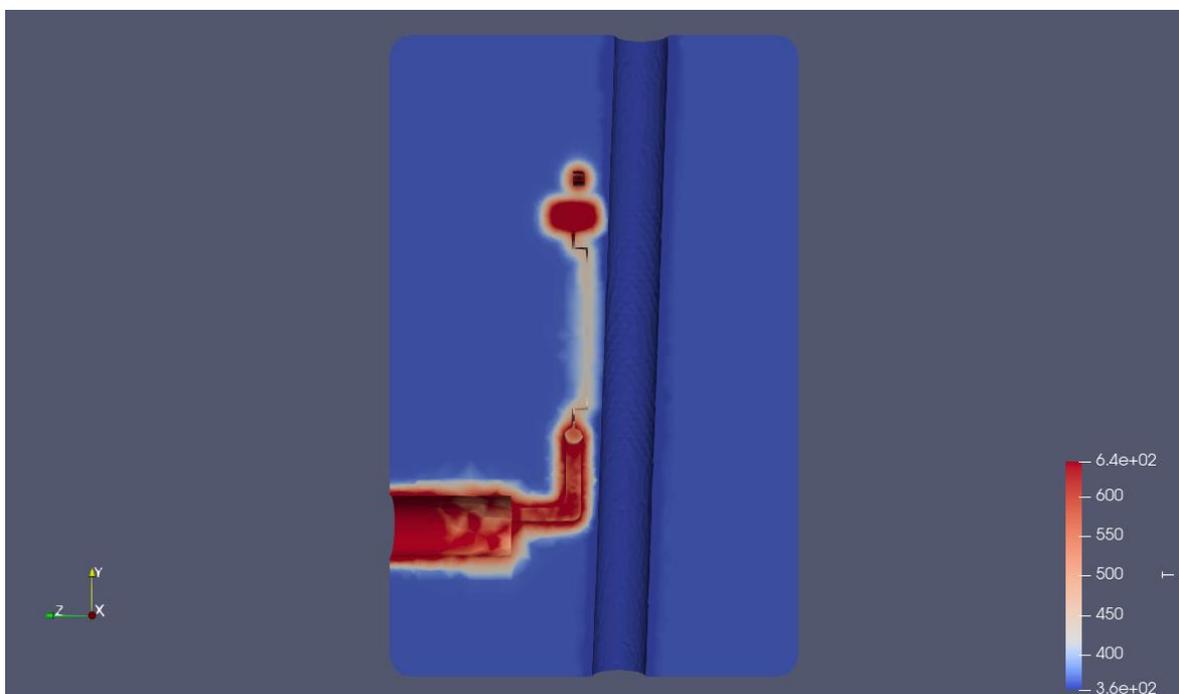


Fig. 7.106 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.

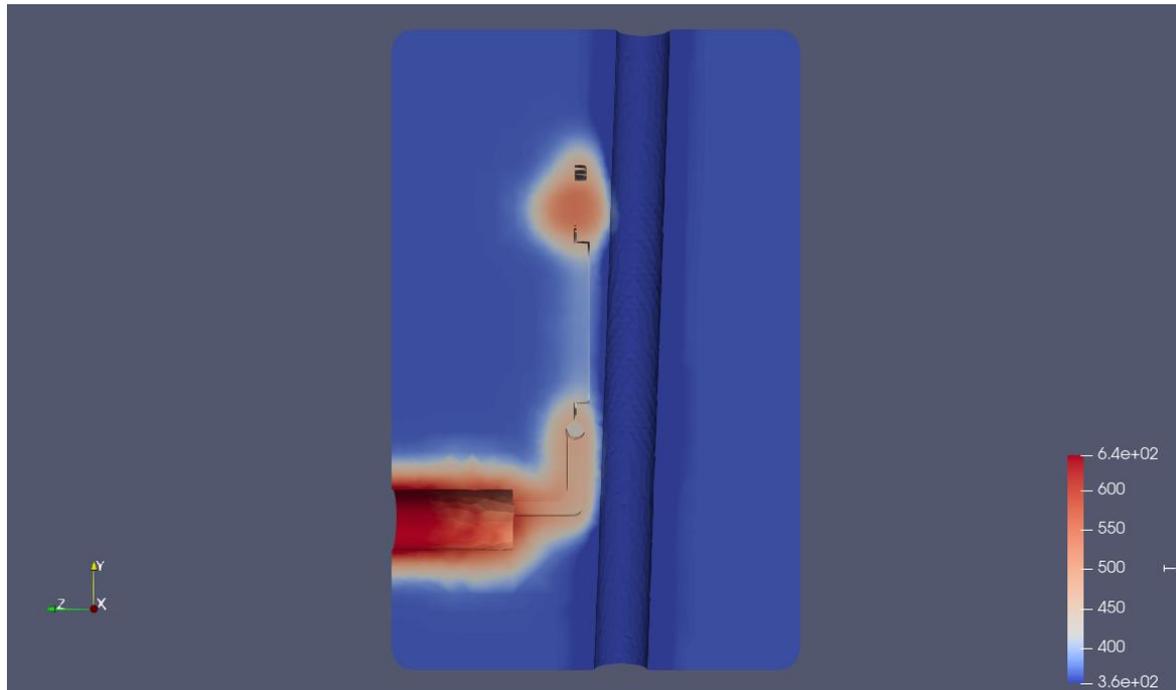


Fig. 7.107 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.

### 7.6.2. Simulación con una tubería y velocidad del fluido de 2 m/s



Fig. 7.108 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo.

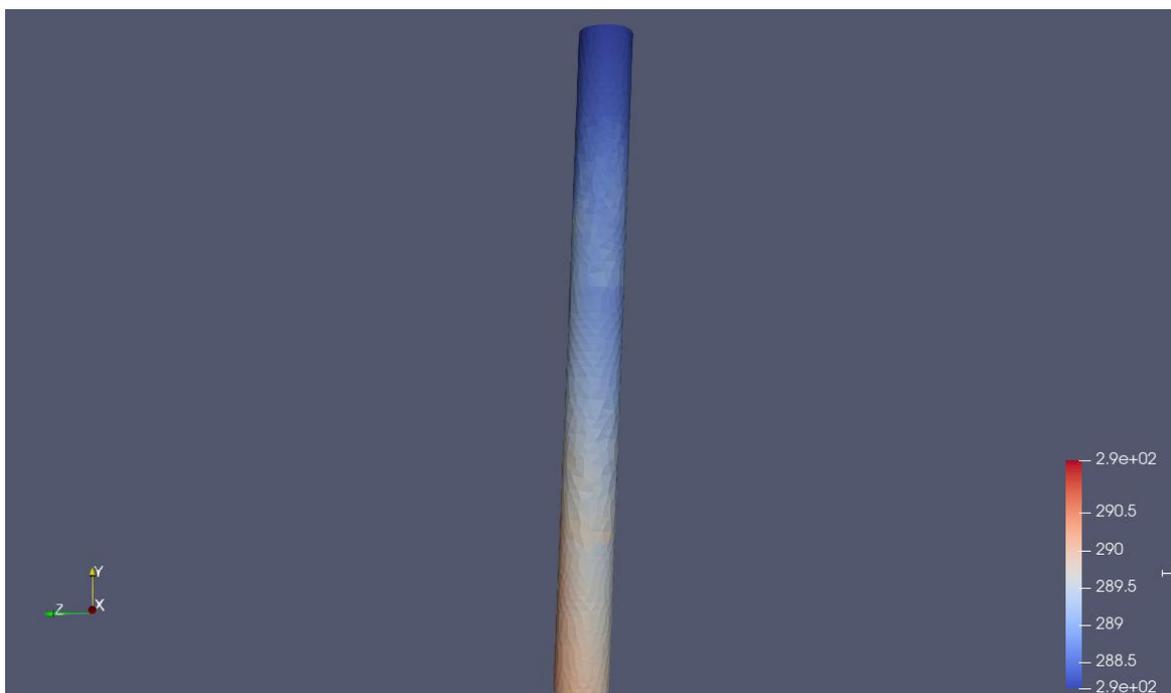


Fig. 7.109 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos.

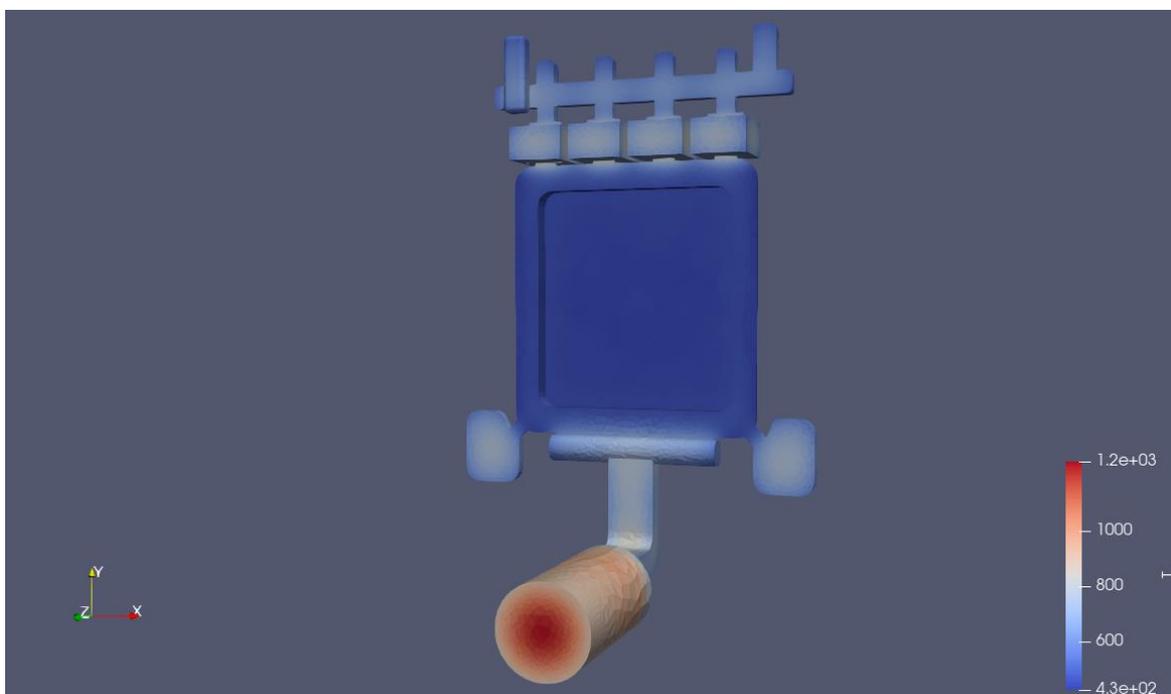


Fig. 7.110 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.

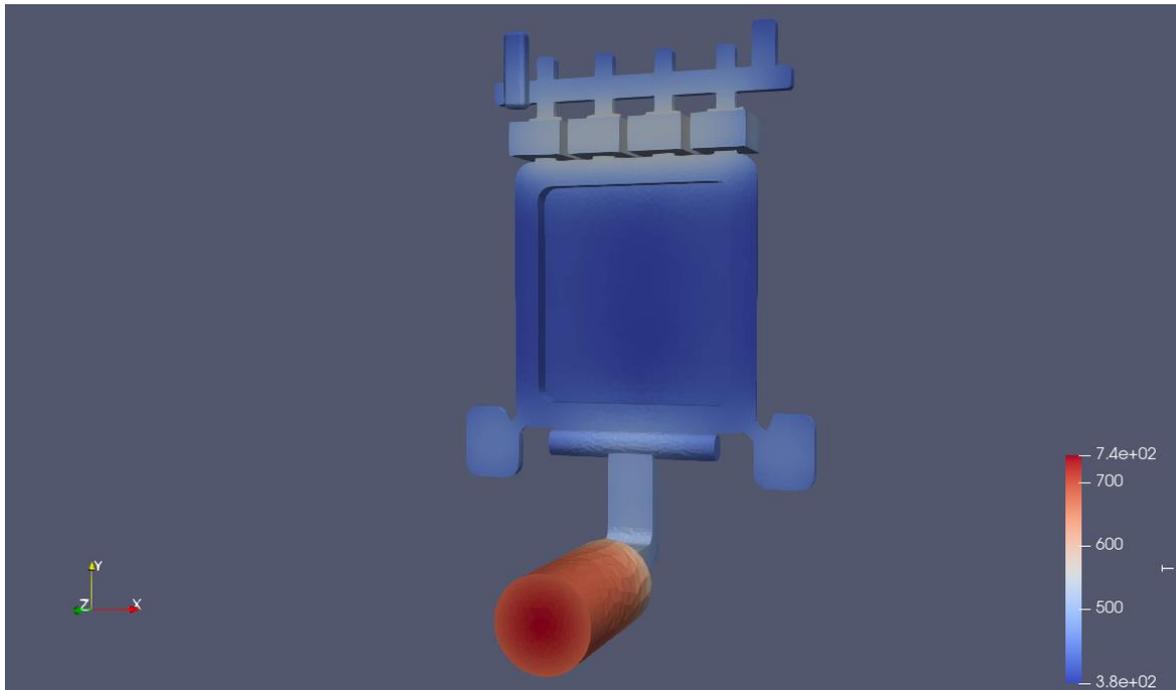


Fig. 7.111 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos.

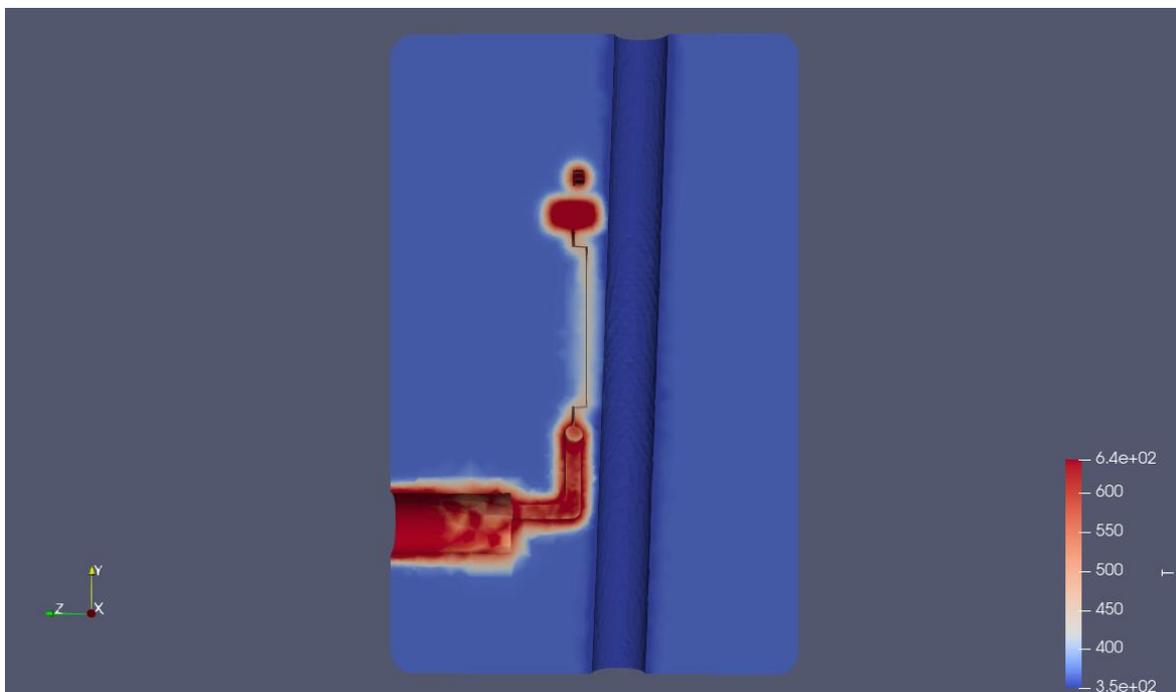


Fig. 7.112 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.

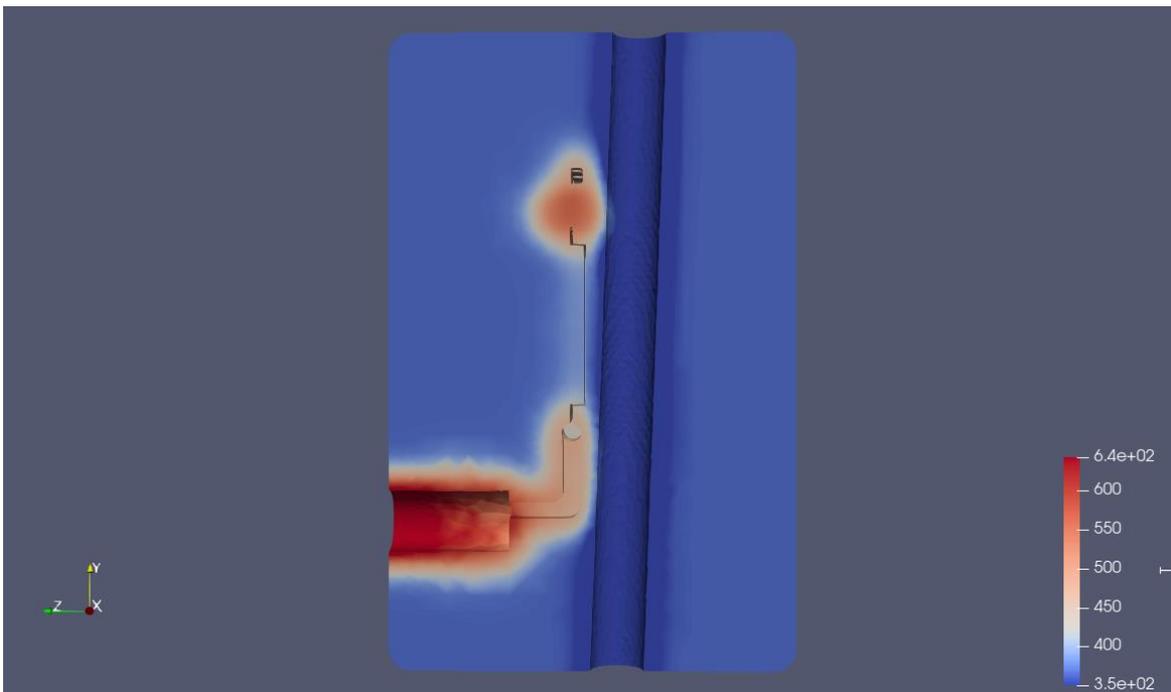


Fig. 7.113 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.

### 7.6.3. Simulación con una tubería y una velocidad del fluido de 3.5 m/s

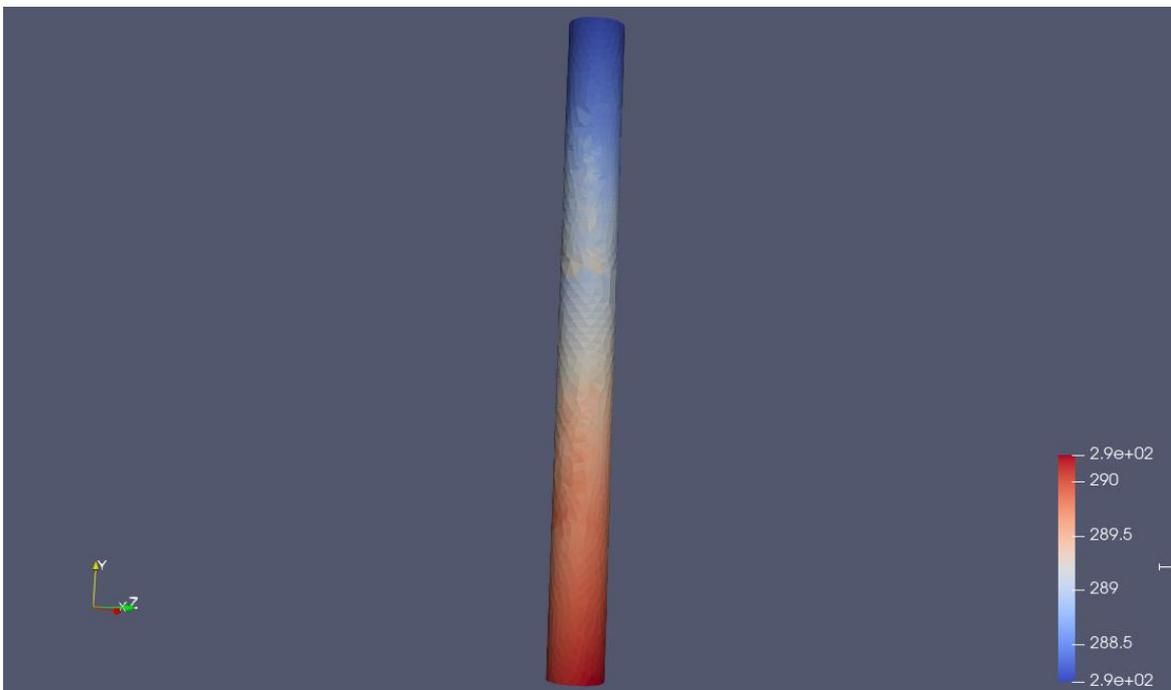


Fig. 7.114 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo.



Fig. 7.115 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos.

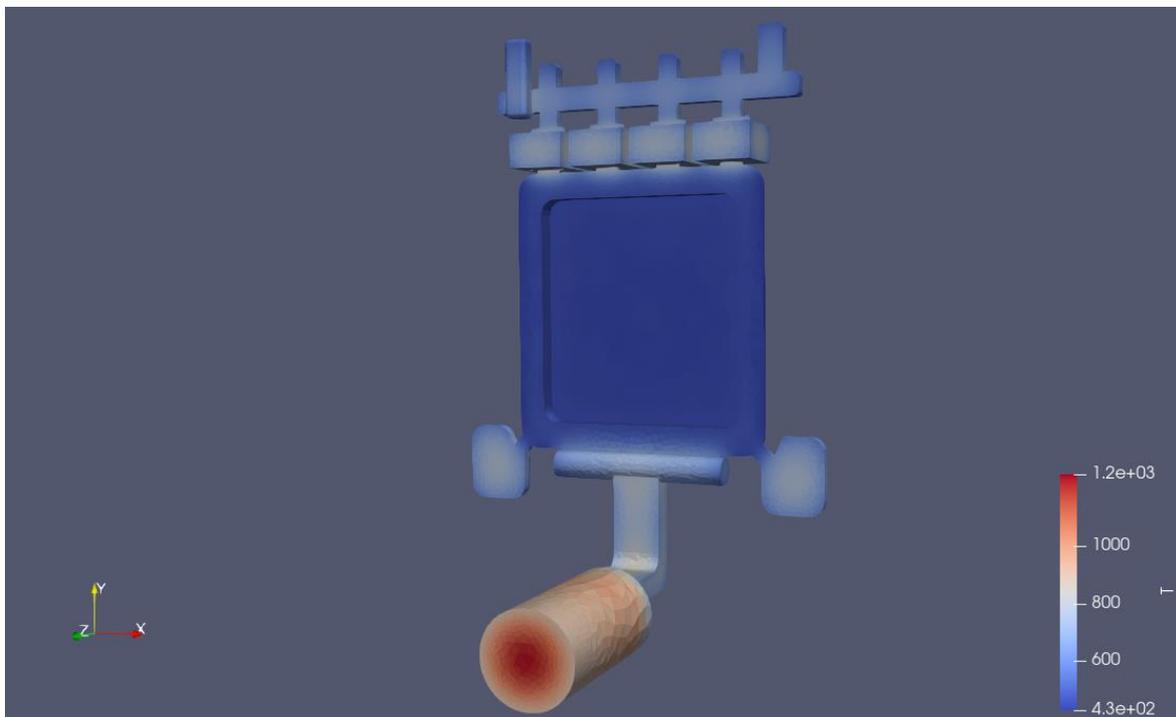


Fig. 7.116 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.

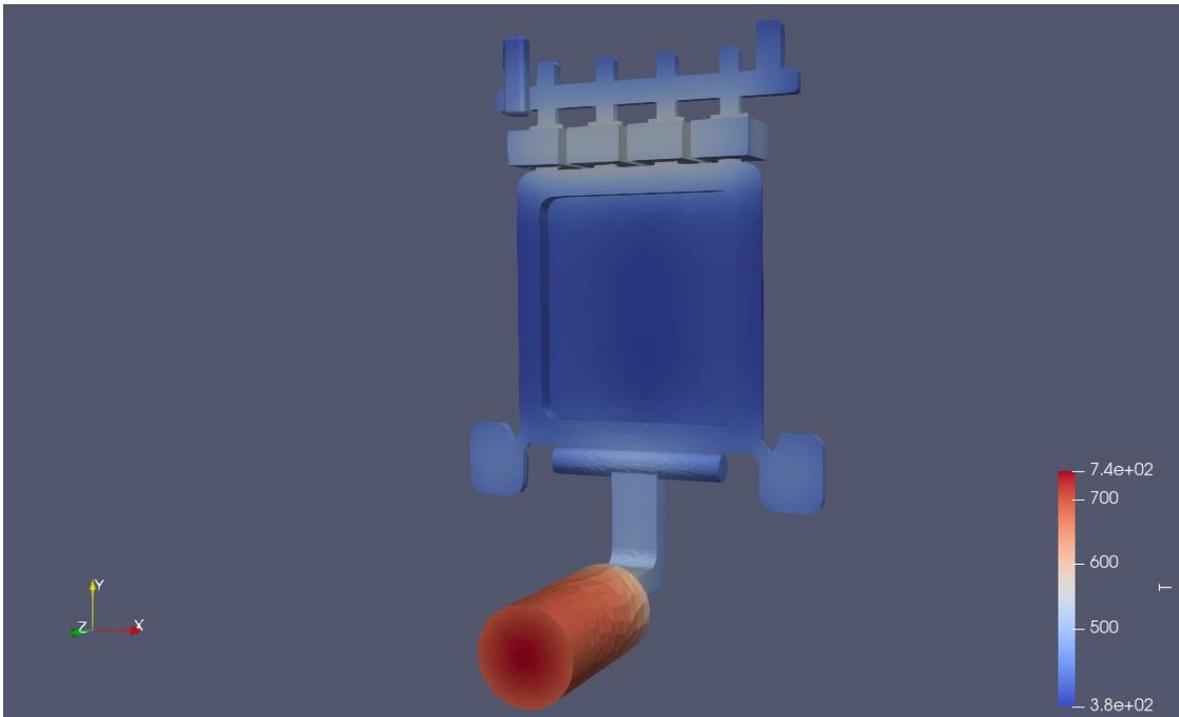


Fig. 7.117 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos.

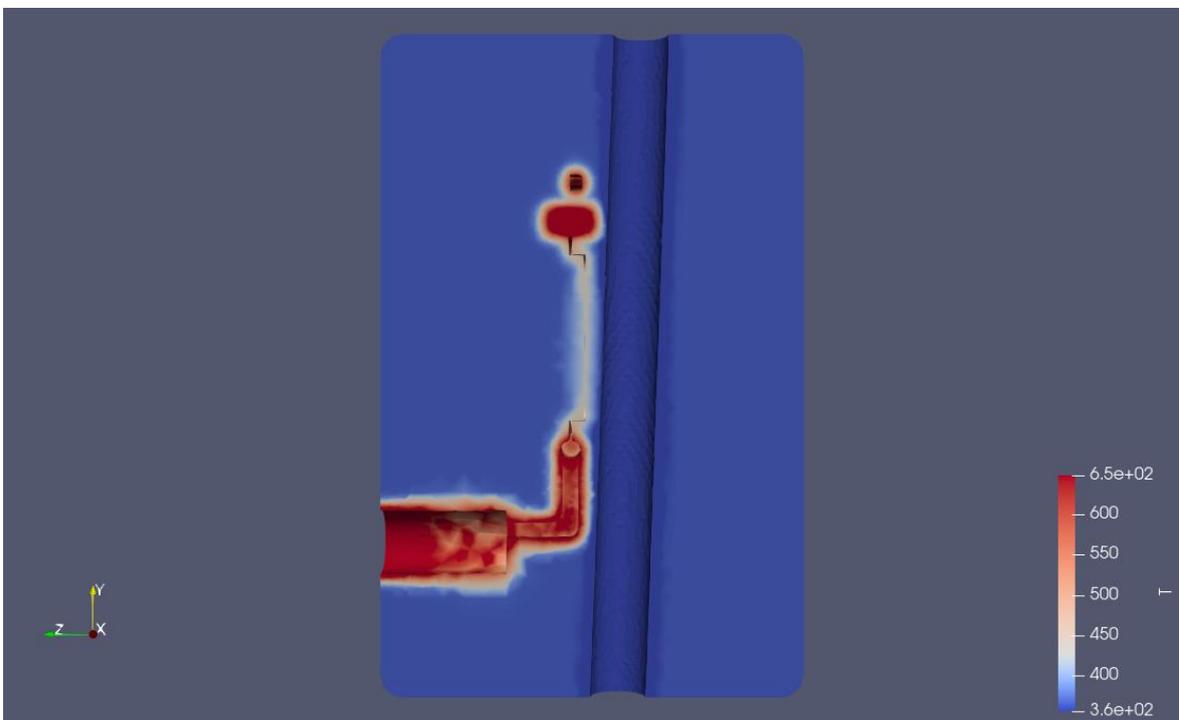


Fig. 7.118 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.

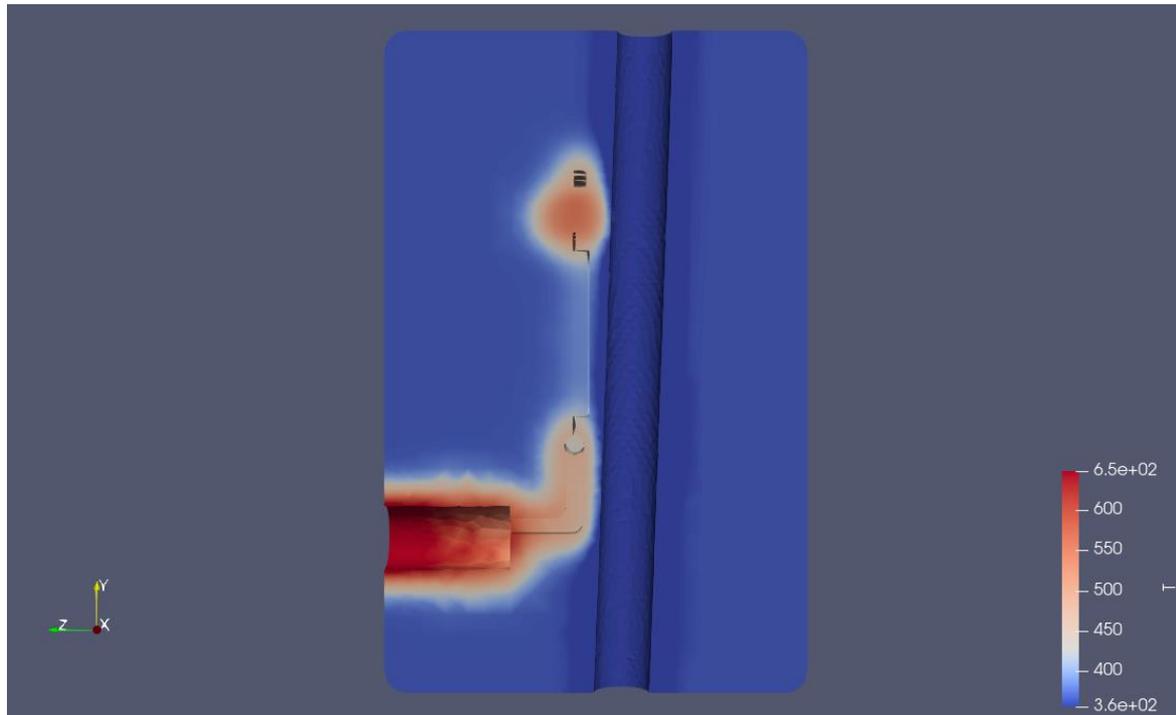


Fig. 7.119 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.

#### 7.6.4. Análisis de resultados.

Como se observa en las imágenes que representan la temperatura interior del molde para distintas velocidades el calor que emite el molde llega a ser barrido por la tubería. La cercanía de esta tubería a la bandeja genera un aumento de la eficiencia a la hora de retirar el calor de la misma, ya que se puede ver que la parte trasera de la bandeja queda refrigerada por la tubería a los ocho segundos. Se pueden encontrar más capturas en el Anexo X.

La temperatura de salida del agua de la tubería, como es lógico, aumenta considerablemente respecto las tipologías convencionales, ya que esta tubería se encuentra mucho más cercana a las paredes de la bandeja. En la Fig. 7.120 se aprecia la temperatura promedio de la tubería a lo largo de su eje longitudinal. Se observa como en este caso vuelve a haber diferencia entre las distintas velocidades que tiene el flujo y la temperatura en cada punto de la longitud. Vuelve a disminuir la temperatura a medida que la velocidad del flujo aumenta. Como se especificó en apartados anteriores esto se debe a que cuanto más rápido circula el agua, menos tiempo está dentro del molde y menos incrementa su temperatura.

En la Fig. 7.121 se observa la temperatura promedio del agua de la tubería a los ocho segundos. Como se ve, la temperatura ha disminuido porque la temperatura global del sistema también ha enfriado. Se puede apreciar que, al igual que en la imagen Fig. 7.120, la temperatura decrece a medida que aumenta la velocidad del fluido.

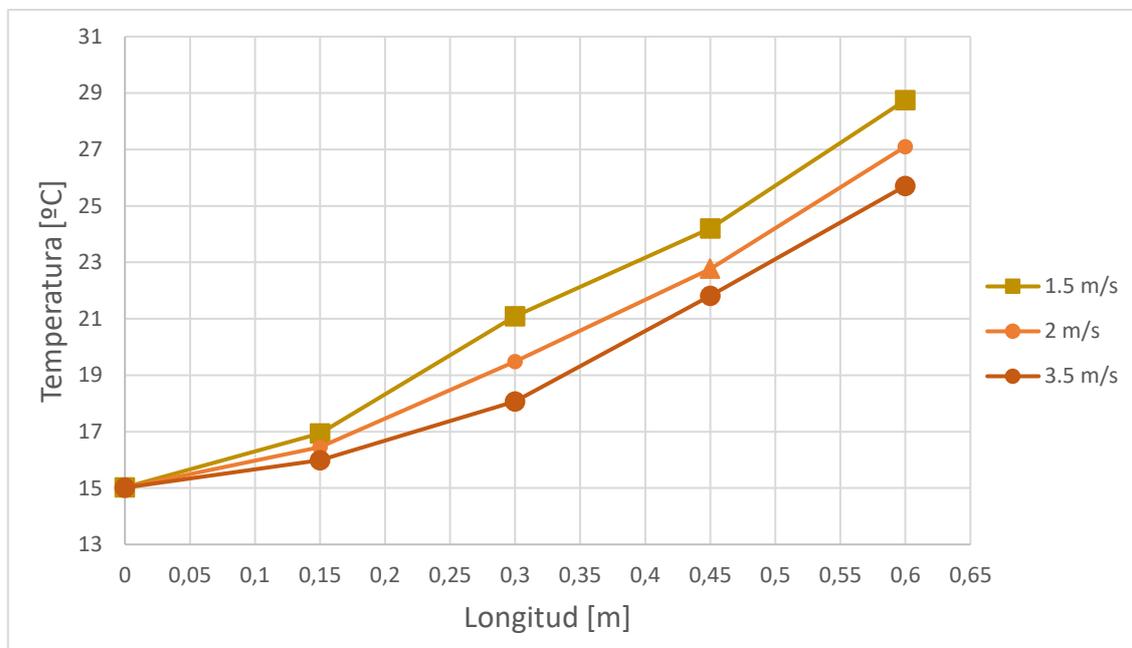


Fig. 7.120 Temperatura del agua en función de la longitud para t = 1s.

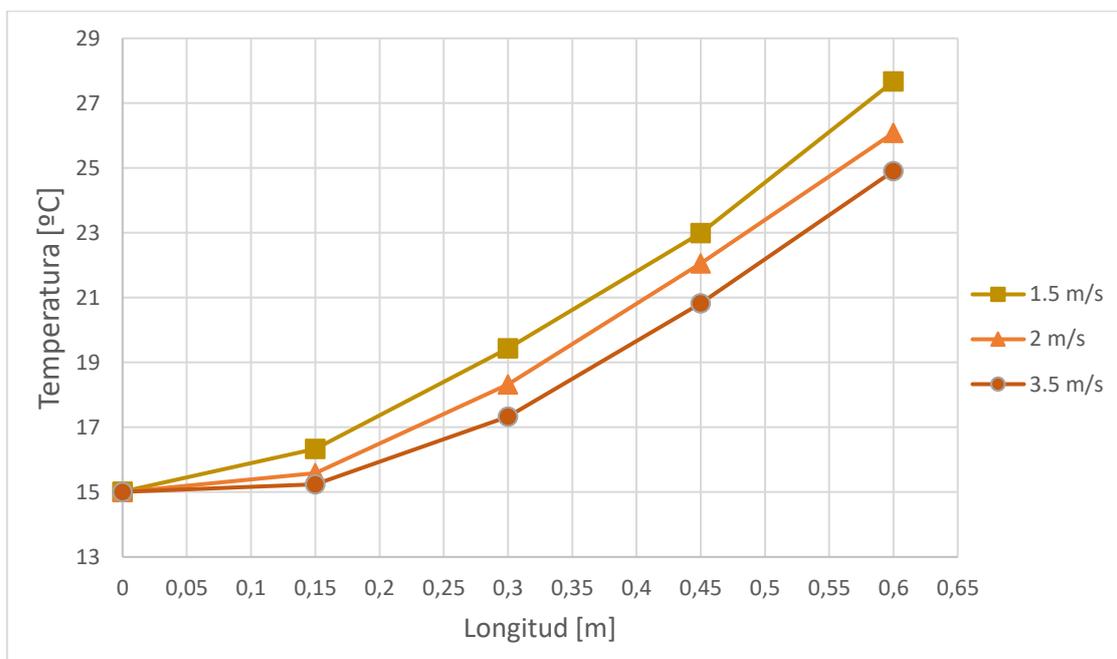


Fig. 7.121 Temperatura del agua en función de la longitud para t = 8s.

En cuanto a la temperatura global de la bandeja no se ve que descienda comparado con los casos convencionales. La temperatura es de alrededor de 260 °C a los ocho segundos, como en los casos anteriores.

## **7.7. Simulación del modelo optimizado con tres tuberías**

Como se ha observado a lo largo de las simulaciones, son aquellos volúmenes de la bandeja los que más calor emiten al molde. Es por eso que el diseño de esta tipología de molde se basa en tres tuberías: una detrás, como en el apartado anterior; y otras dos a los laterales del contenedor donde se realiza la inyección del aluminio.

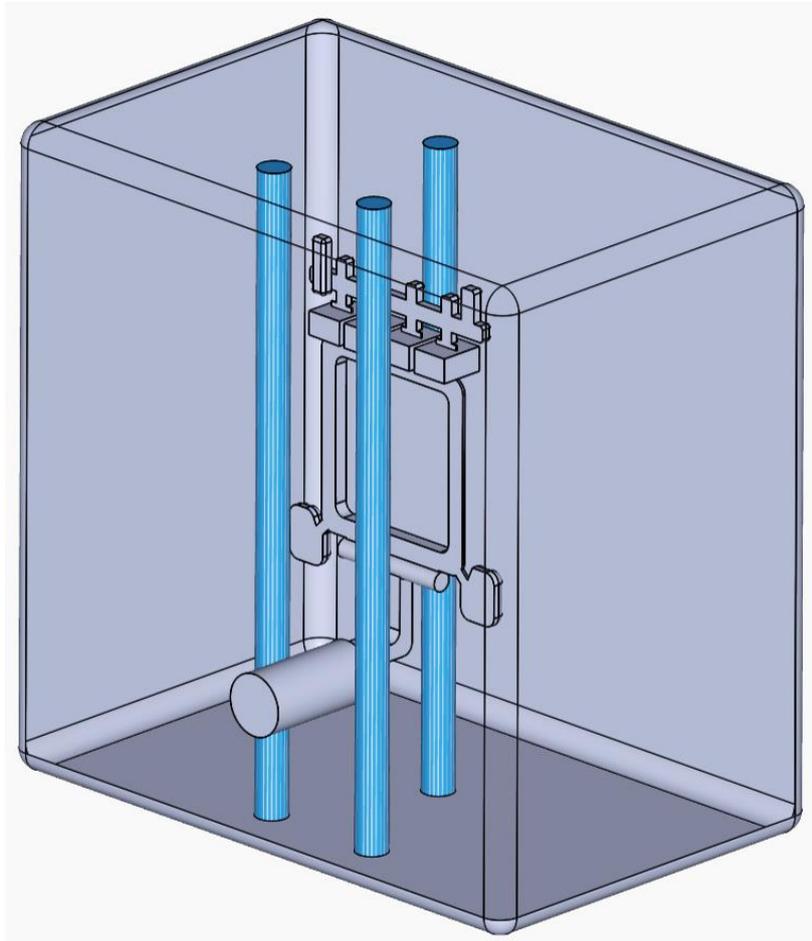


Fig. 7.122 Modelo optimizado de una tubería.

La distancia de la superficie de las dos tuberías delanteras a la superficie del depósito es de 30 mm. En cambio, la distancia de la tubería trasera a las paredes del molde es de unos 40 mm.

### 7.7.1. Simulación con tres tuberías y una velocidad del fluido de 1.5 m/s

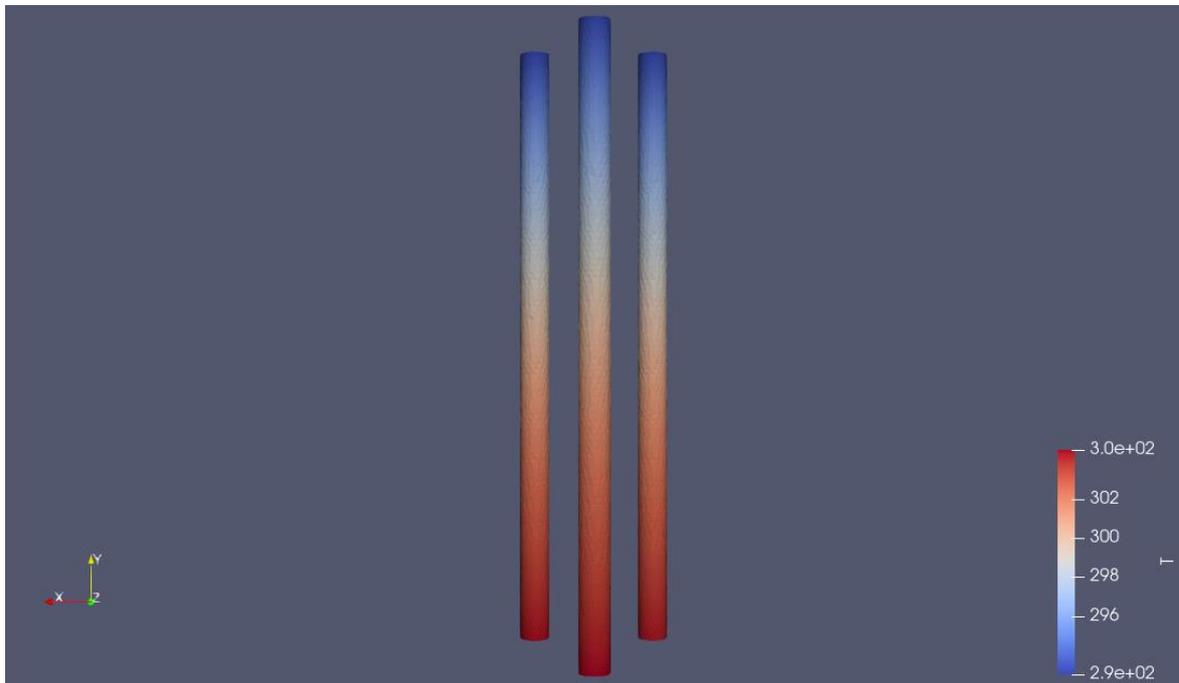


Fig. 7.123 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo.

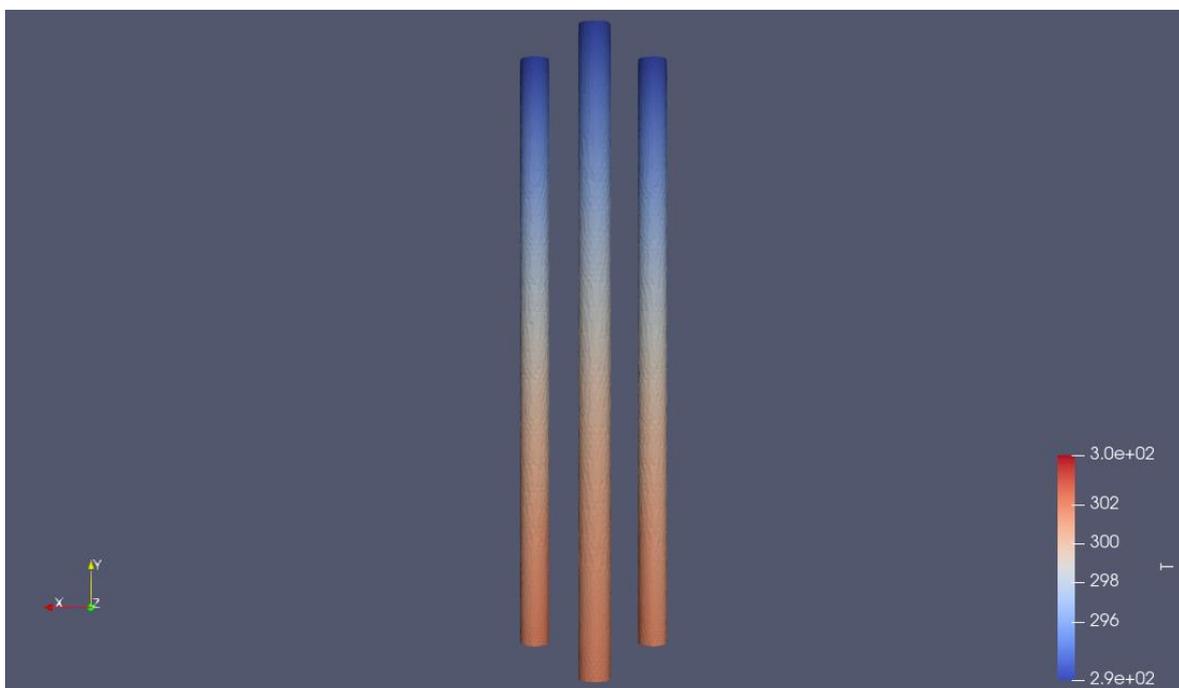


Fig. 7.124 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos.

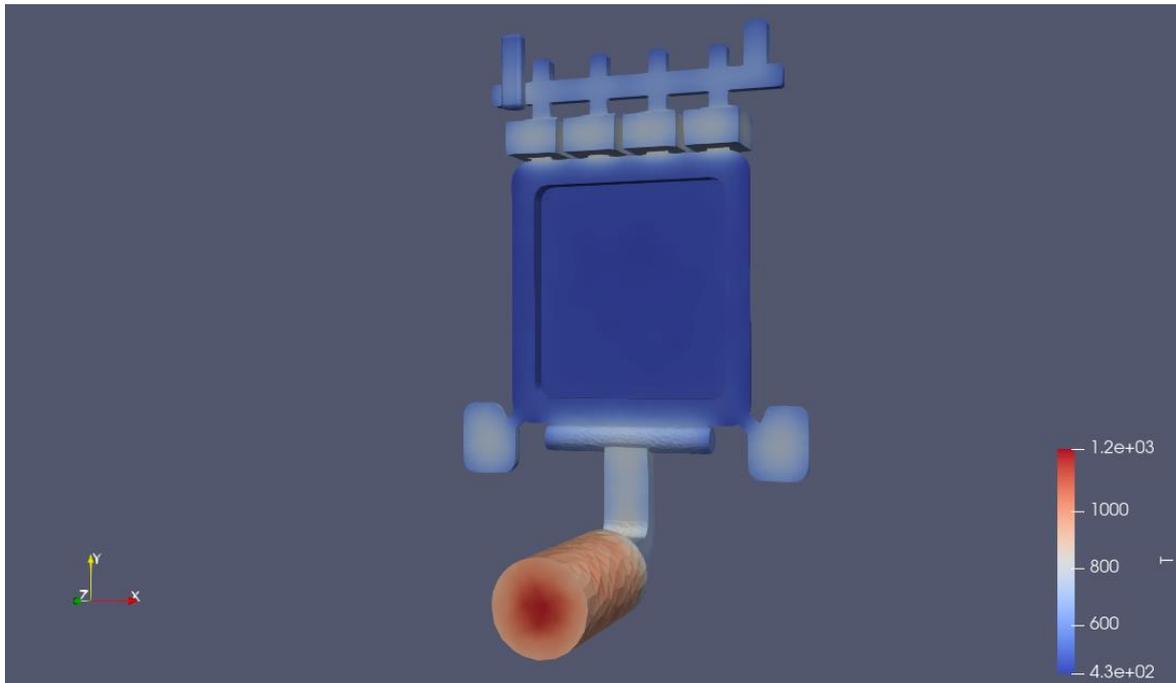


Fig. 7.125 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.

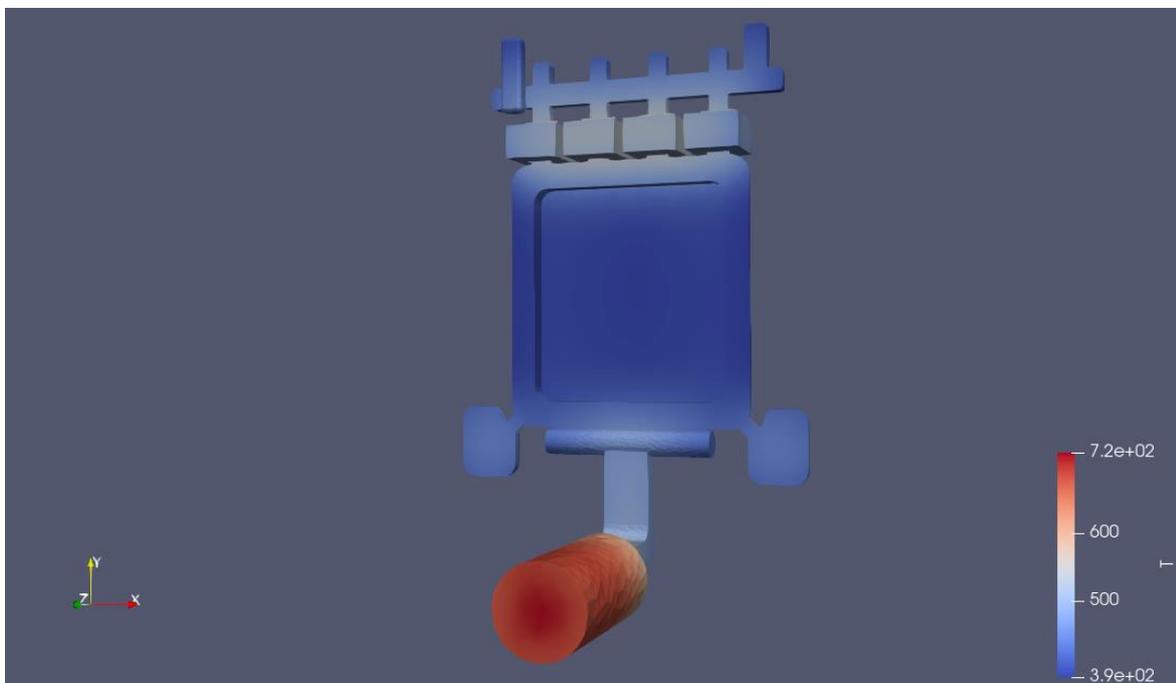


Fig. 7.126 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos.

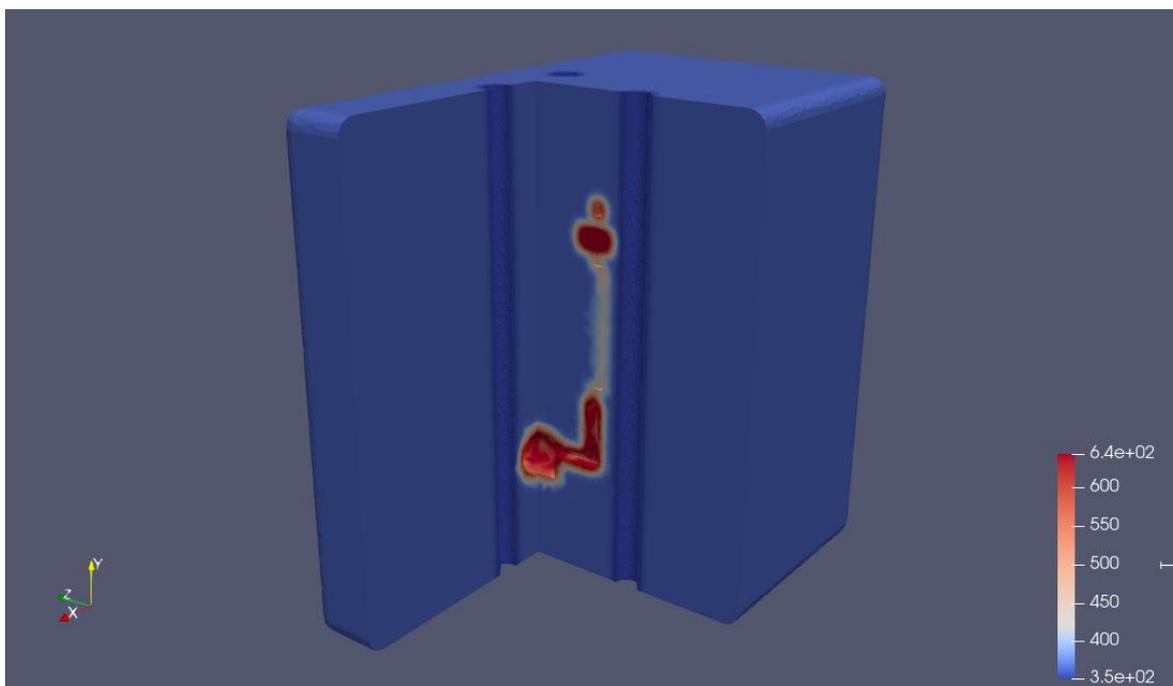


Fig. 7.127 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.

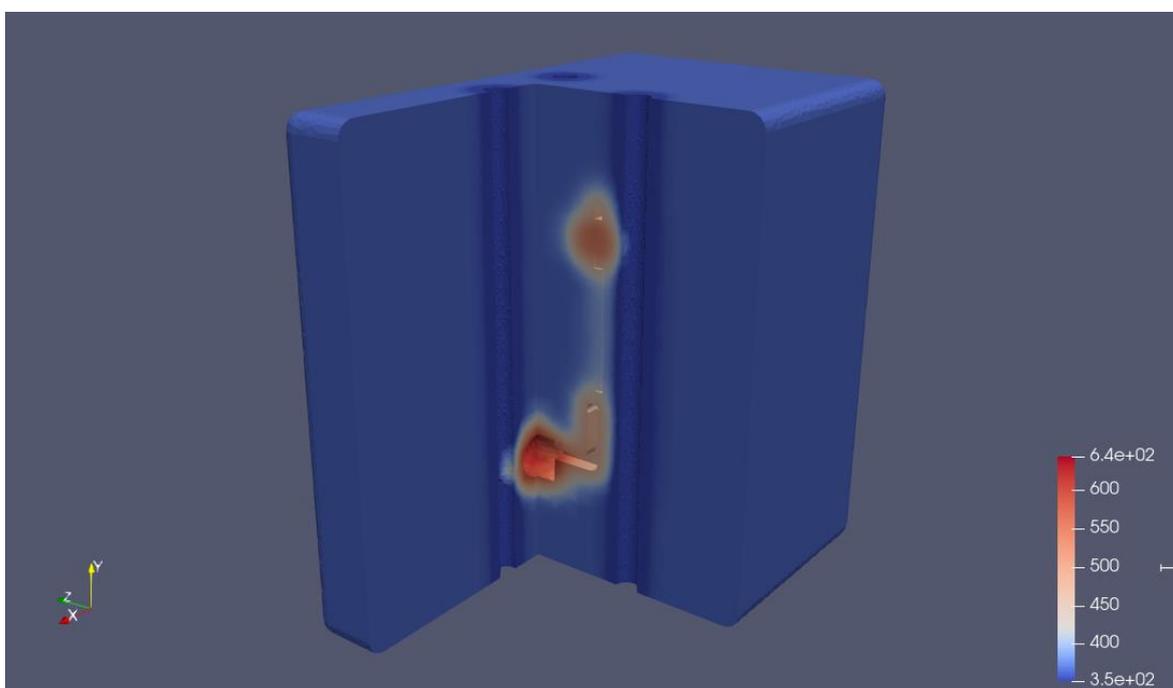


Fig. 7.128 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.

### 7.7.2. Simulación con tres tuberías y velocidad del fluido de 2 m/s

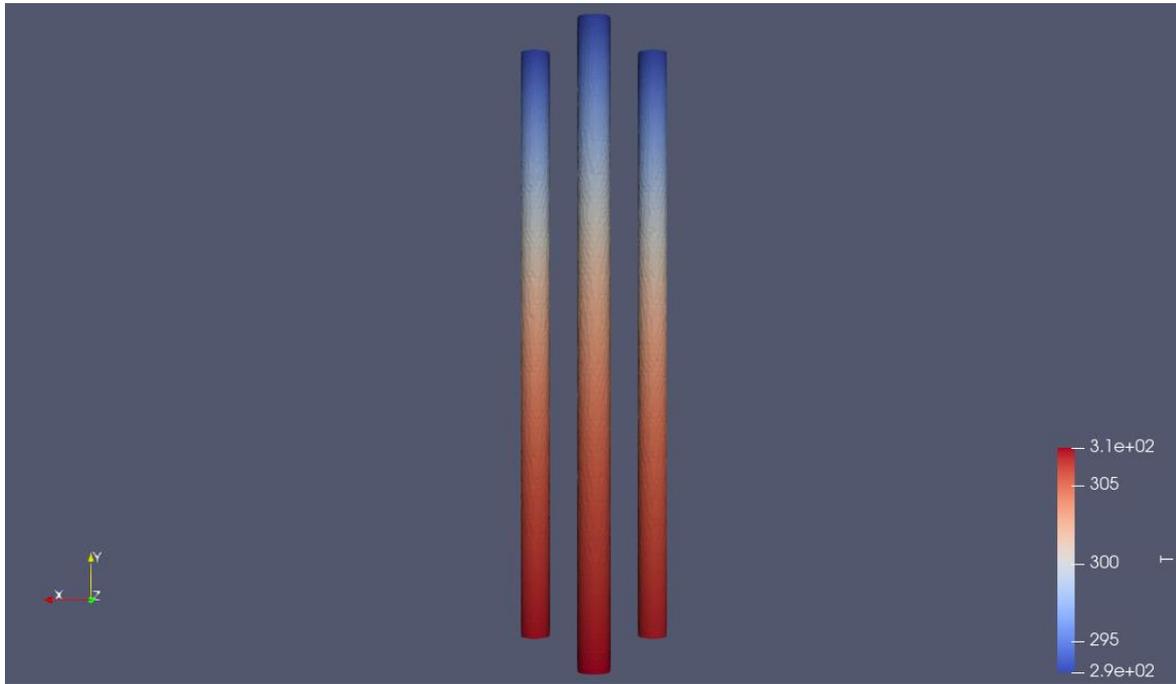


Fig. 7.129 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo.

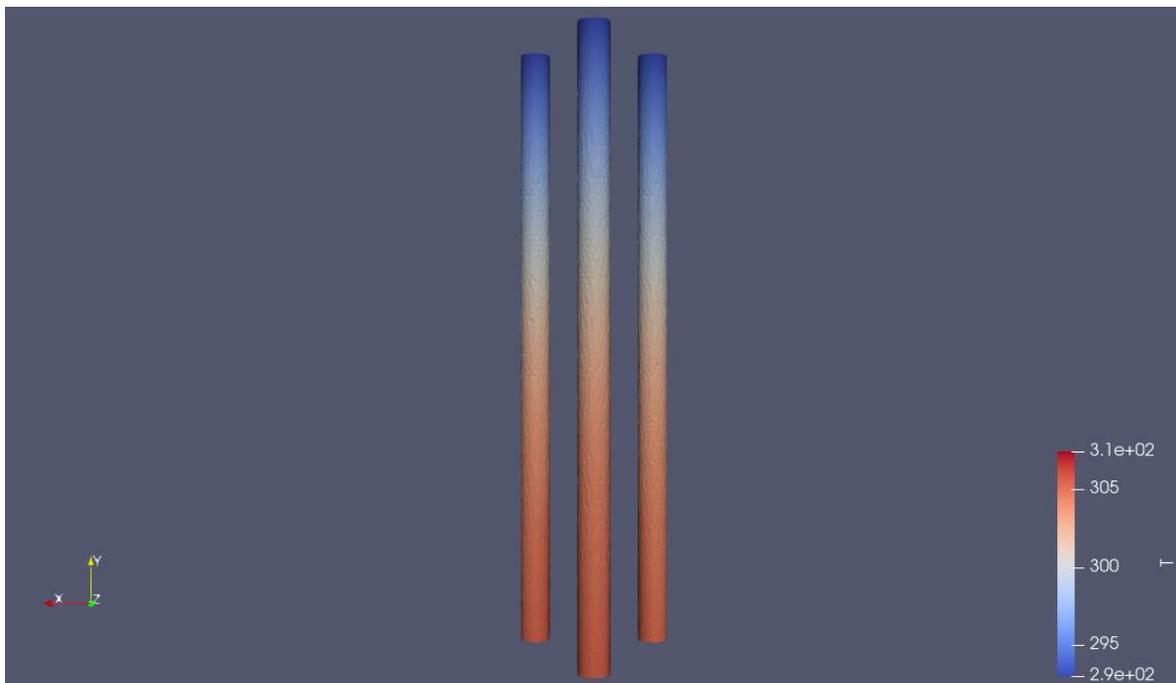


Fig. 7.130 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos.

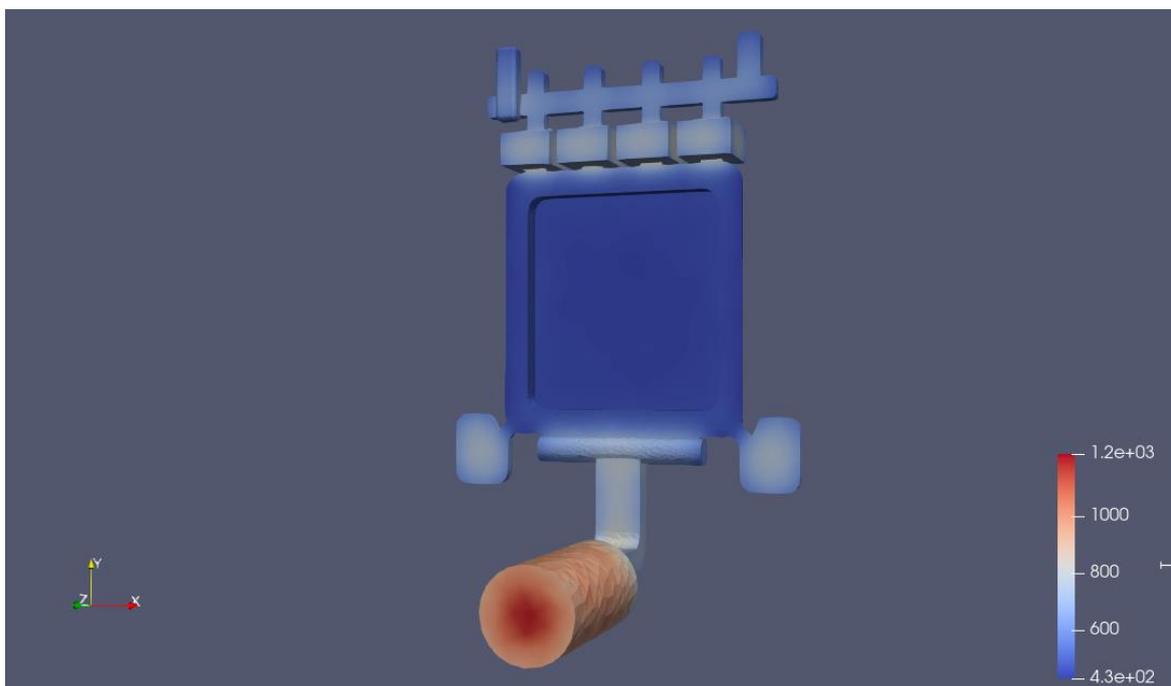


Fig. 7.131 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.

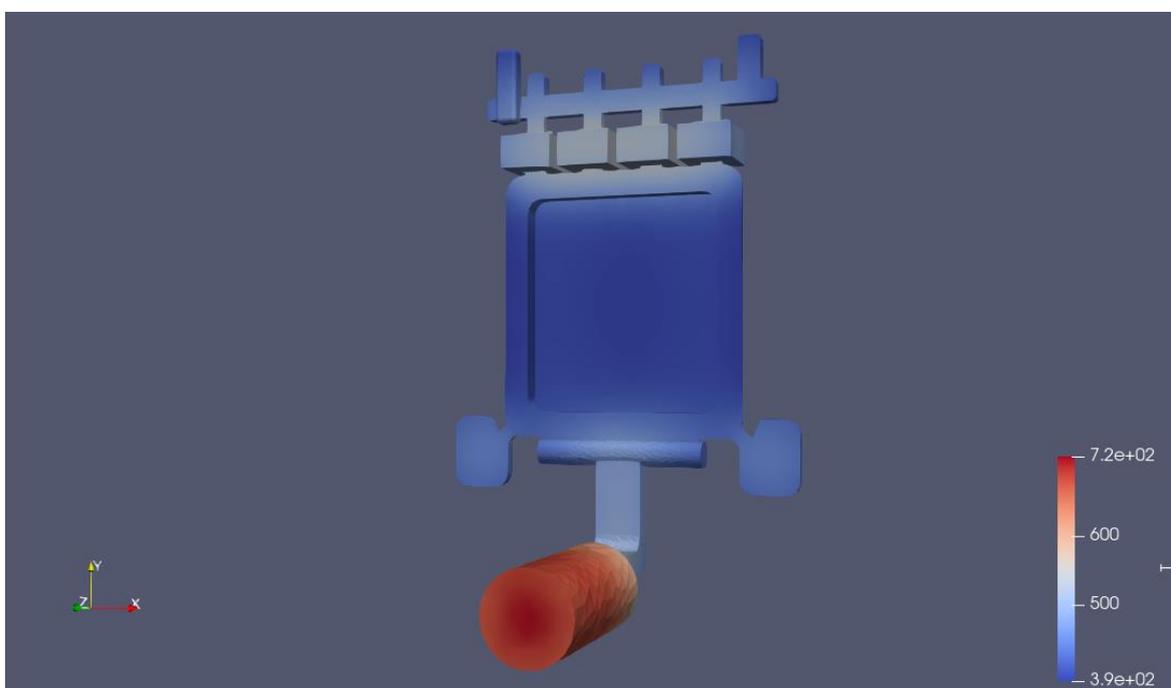


Fig. 7.132 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundos.

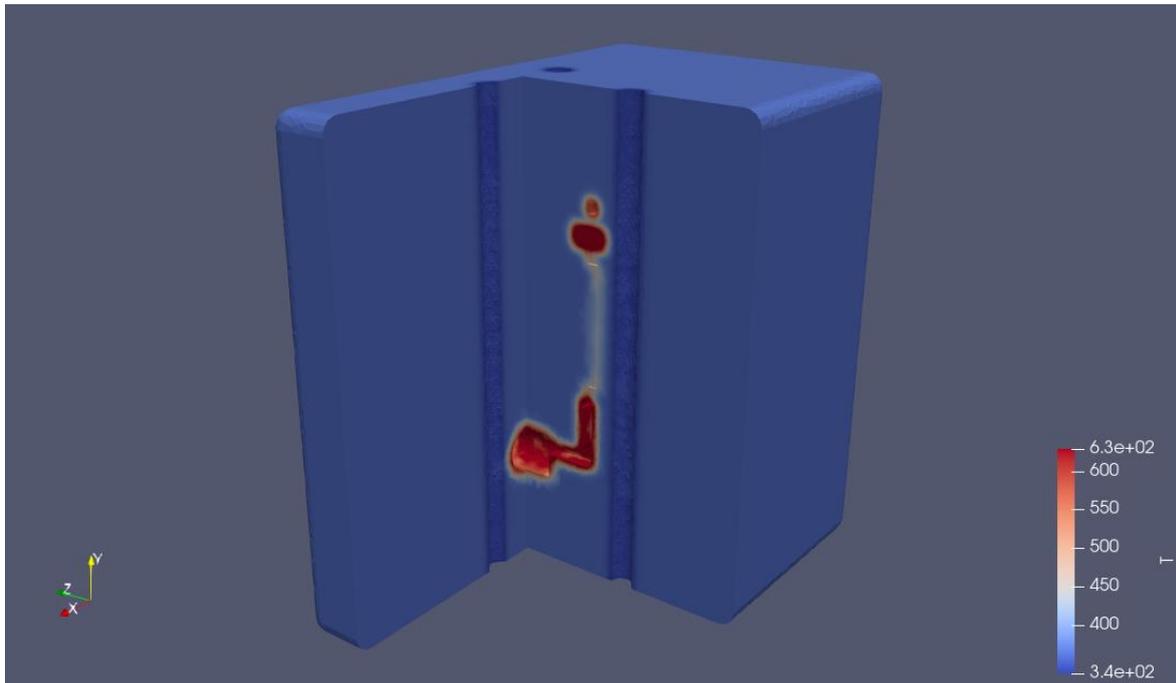


Fig. 7.133 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.

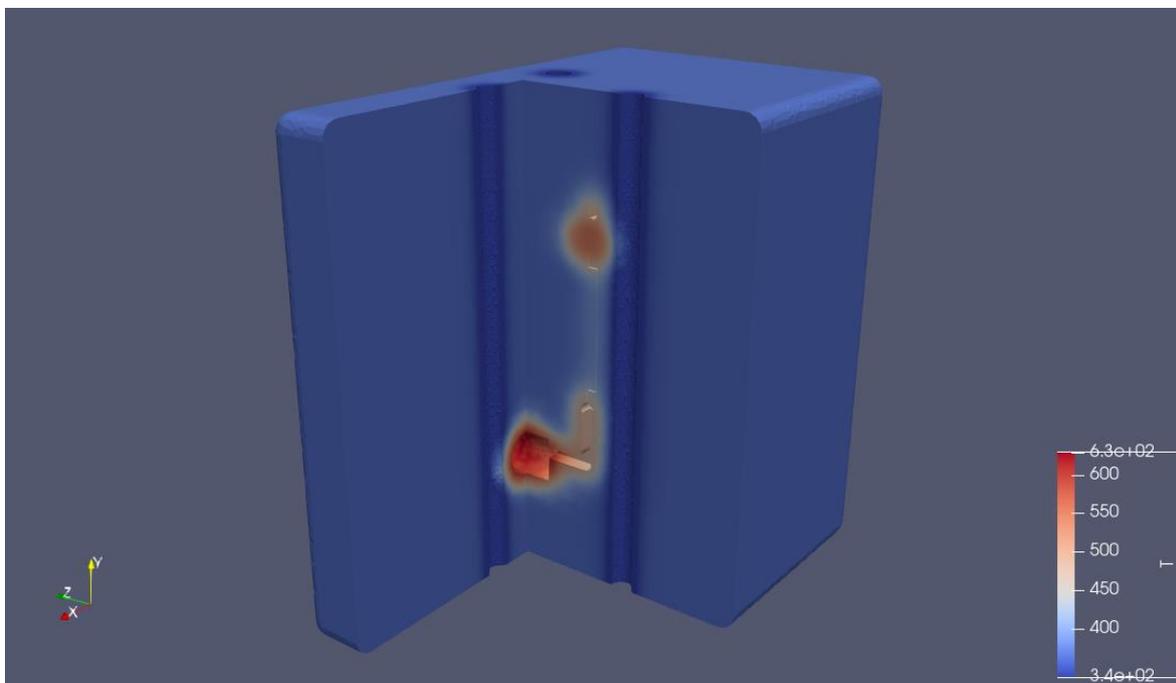


Fig. 7.134 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.

### 7.7.3. Simulación con tres tuberías y una velocidad del fluido de 3.5 m/s

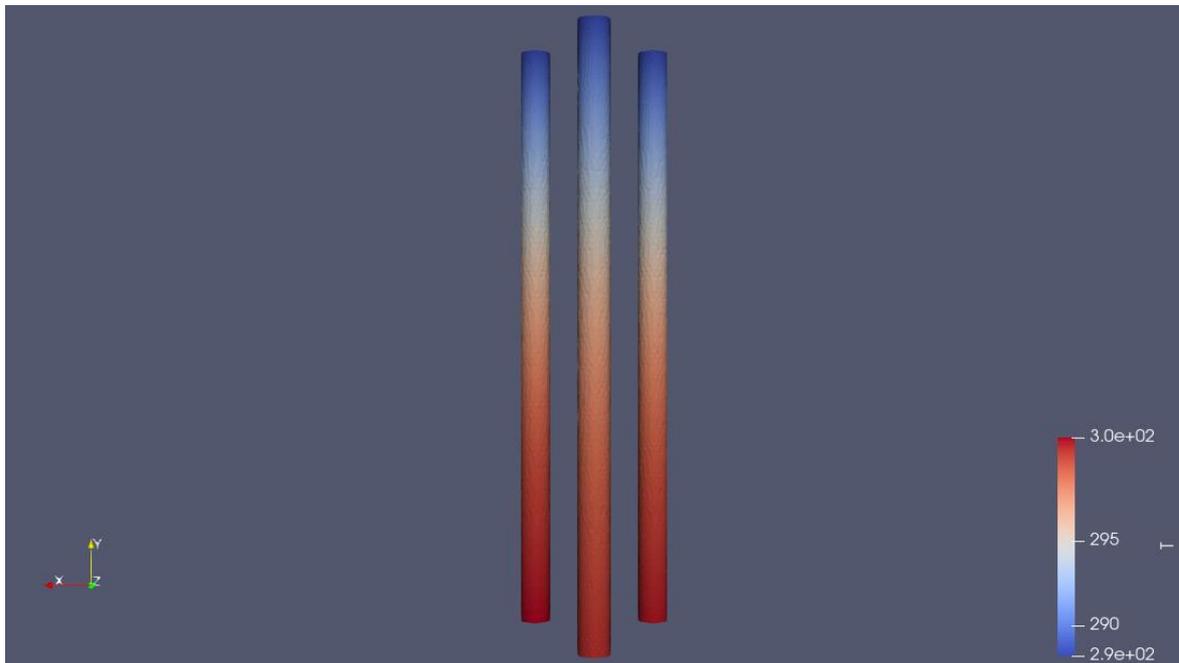


Fig. 7.135 Resultado térmico de la tubería [K] a 1 segundo en Kelvin.

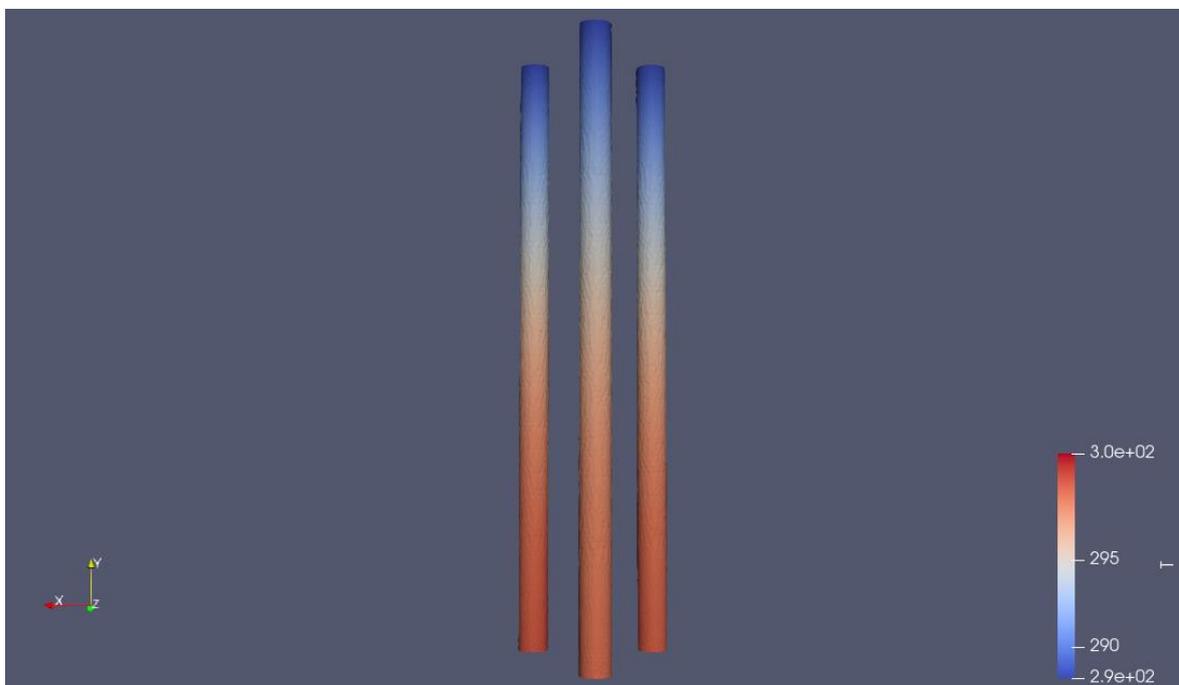


Fig. 7.136 Resultado térmico de la tubería [K] a 8 segundos en Kelvin.

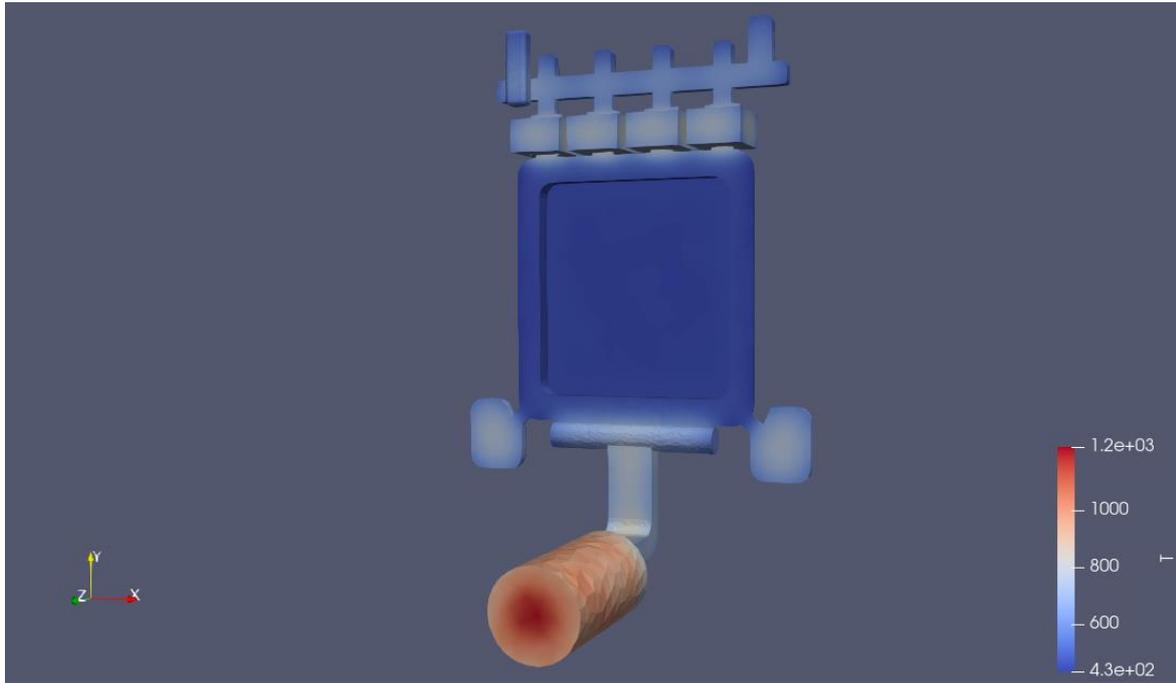


Fig. 7.137 Resultado térmico de la bandeja [K] a 1 segundo.

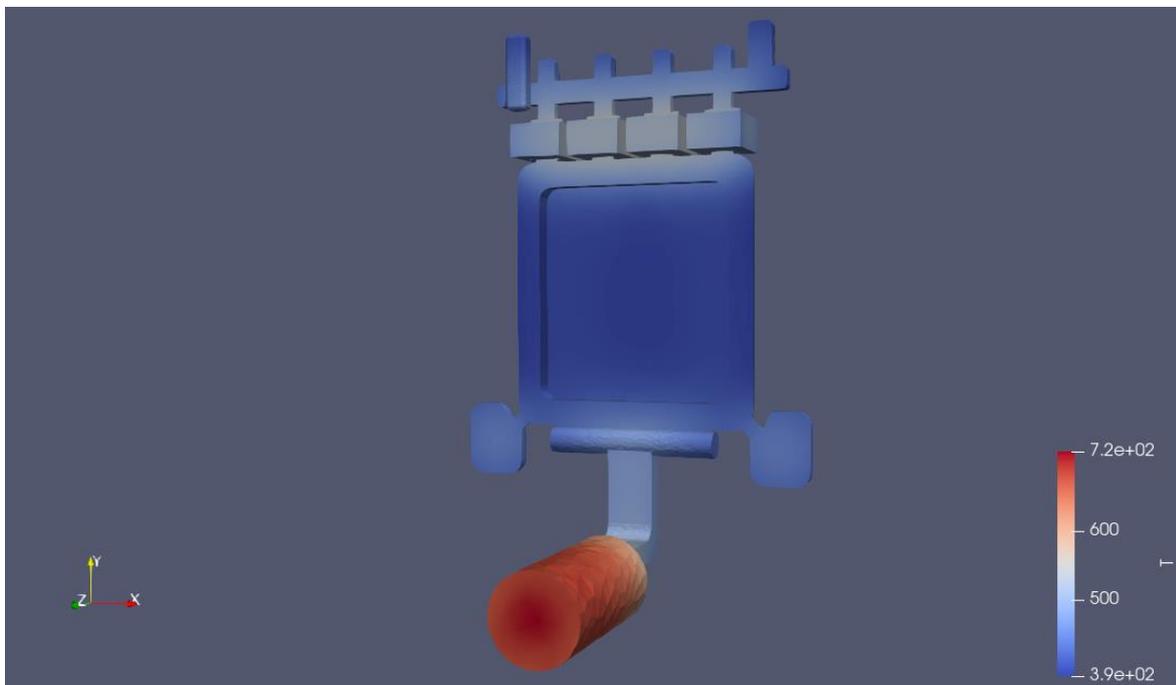


Fig. 7.138 Resultado térmico de la bandeja [K] a 8 segundo.

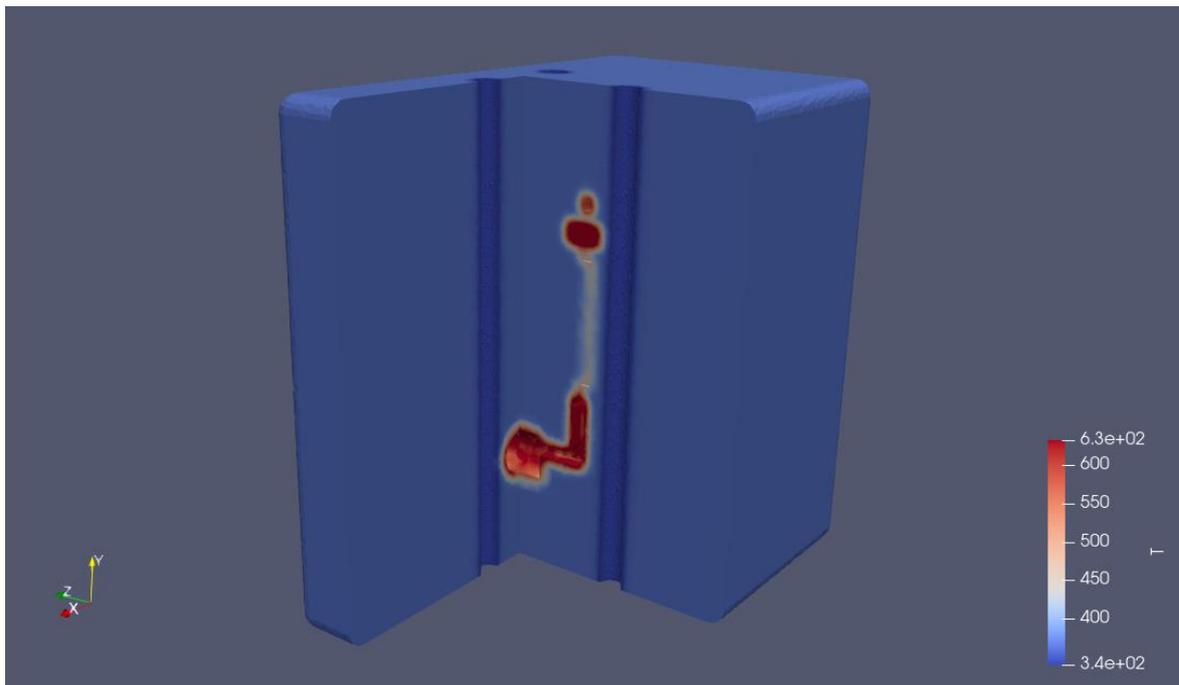


Fig. 7.139 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.

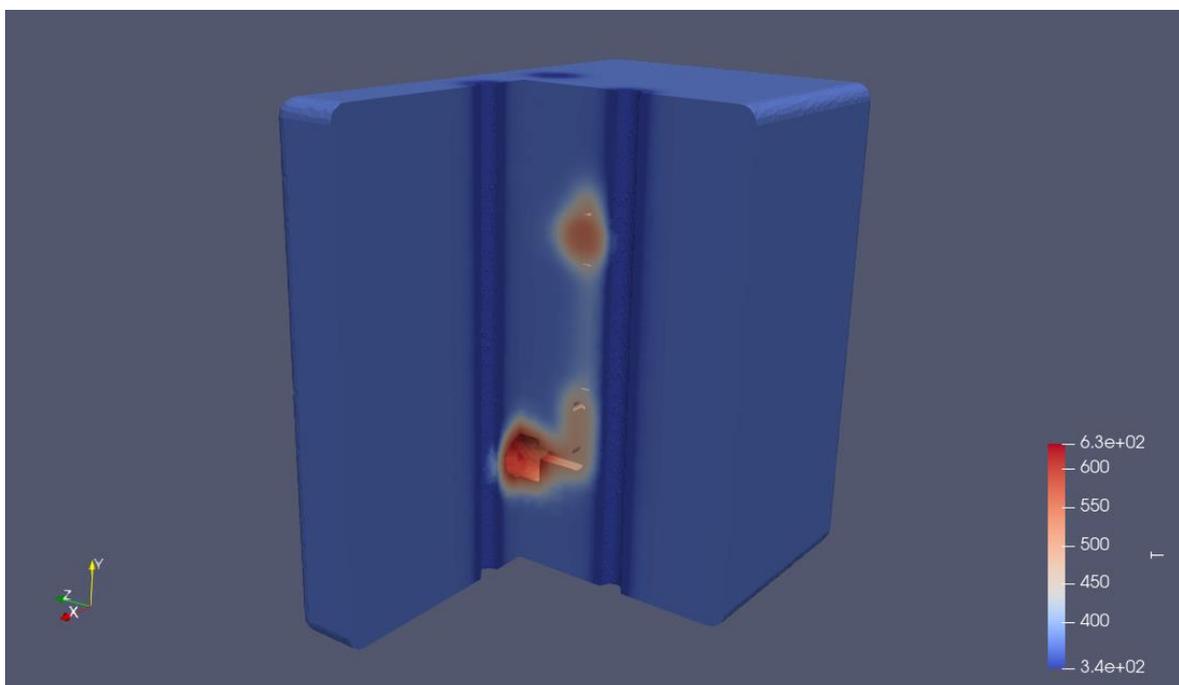


Fig. 7.140 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.

#### 7.7.4. Análisis de resultados

Como se observa en las figuras anteriores, el calor de salida de las tuberías aumenta considerablemente respecto las variantes convencionales. En cuanto a la temperatura interior del molde se puede apreciar que, como en el caso anterior con la tubería trasera, esta barre bastante la temperatura emitida por la bandeja caliente. Además, la adición de dos tuberías laterales al contenedor genera un enfriamiento en esa zona. Se puede observar en la Fig. 7.128, 7.134 y 7.140 a los ocho segundos la tubería tiene una mancha procedente del calor emitido por el volumen del contenedor. Esta mancha tiene menos presencia a la vez que aumenta la velocidad del fluido, ya que el agua tiende a calentarse menos. Se pueden ver más capturas en el Anexo V.

En cuanto a la temperatura del molde, se puede apreciar que disminuye de unos 260 °C, como en los casos convencionales y optimizado con una tubería, a unos 257 °C en este modelo. Seguramente por la disminución de la temperatura en las zonas más críticas, como el contenedor.

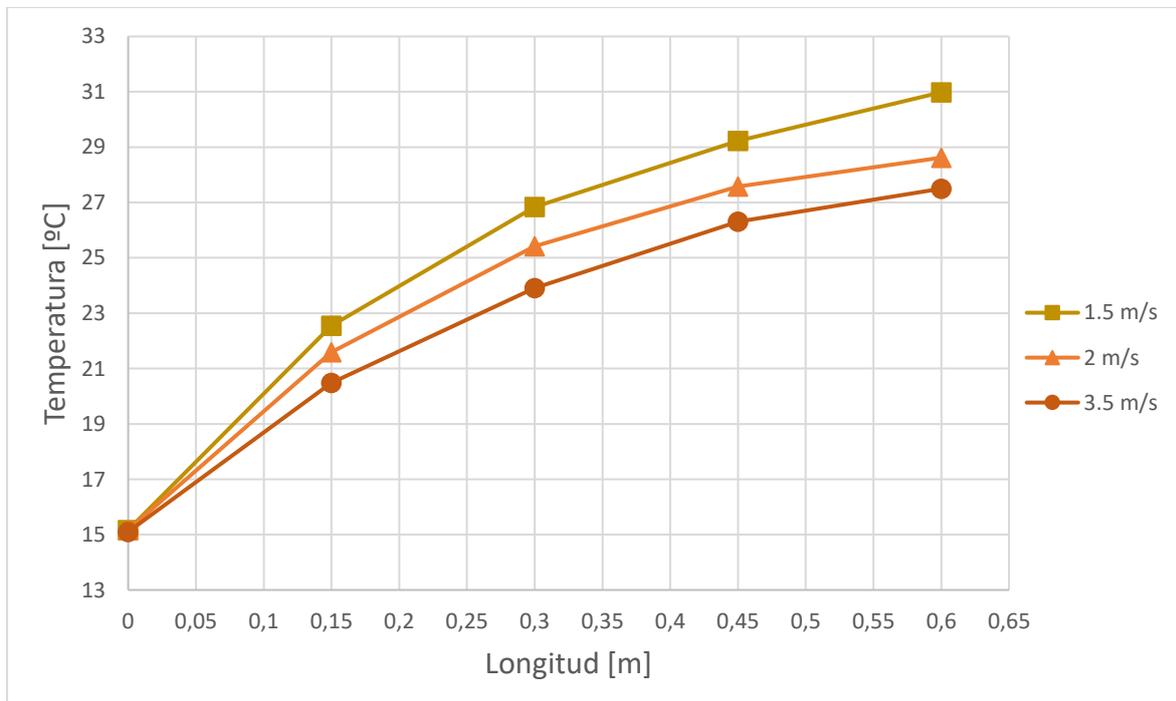


Fig. 7.141 Temperatura del agua en función de la longitud para  $t = 1$  s.

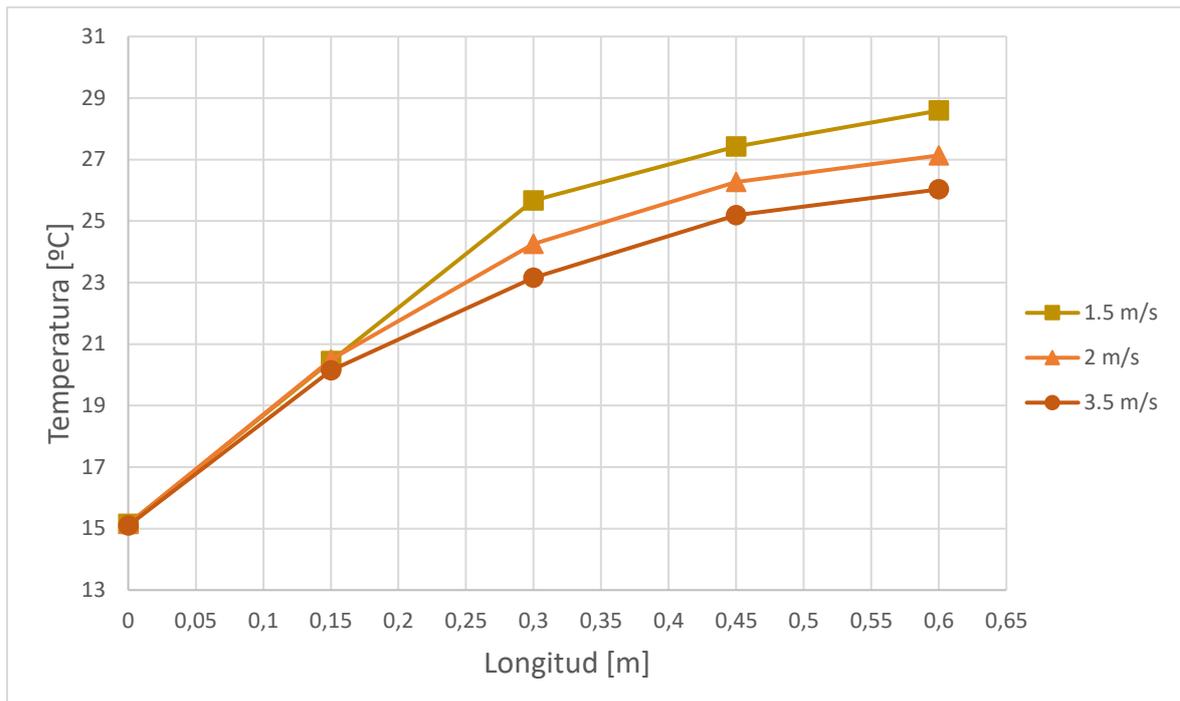


Fig. 7.142 Temperatura del agua en función de la longitud para  $t = 1$  s.

En las Fig. 7.141 se muestra un crecimiento considerable de la temperatura de salida del agua promedio a los 1 segundos, llegando a los 31 °C de salida para una velocidad del agua de 1.5 m/s. En cambio, a medida que se aumenta la velocidad disminuye la temperatura de salida. En este caso las curvas no son tan lineales viéndose que se alcanza un mayor incremento de temperatura al inicio de la tubería que al final, debido a que la temperatura del molde (a unos 95 °C a los 1 segundos según medidas) afecta a este incremento inicial en forma de aumento de la pendiente.

En la Fig. 7.142, la temperatura a los 8 segundos se observa que ha decrecido en comparación al instante inicial. Al final, la temperatura no alcanza los 29 °C para la velocidad de 1.5 m/s. En las otras velocidades se puede ver que se conserva la misma diferencia entre ellas. Al igual que en el instante de un segundo, se conserva un aumento de la pendiente al inicio de la tubería debido al aumento de la temperatura causado al inicio del molde. Generalmente, la temperatura del agua cuando llega a zonas donde está presente la temperatura de la bandeja, ya está más caliente y le dificulta incrementar más.

En general, este modelo parece que ayuda a decrementar la temperatura del molde unos 3 °C aproximadamente. Es por eso que se considera mejor para el propósito de refrigerar el molde.

## 7.8. Simulación del modelo optimizado con cinco tuberías

Viendo los resultados del molde con tres tuberías, para la realización del molde optimizado con cinco tuberías se ha trabajado en el mismo añadiendo dos tuberías más en las áreas más críticas de la geometría. Los volúmenes superior e inferior de la bandeja están compuestos por mazarotas que acumulan mucho volumen de aluminio caliente. Es por eso, que aparte de las tres tuberías verticales anteriores, se han combinado dos más horizontales que circulan muy cerca de esos volúmenes.

La distancia de las tuberías verticales no varía respecto a las descritas en el modelo de tres tuberías. Las tuberías laterales están separadas 30 mm en línea recta de la pared más cercana a la bandeja.

Cabe destacar que, debido a la complejidad de esta simulación y las restricciones del programa, el número de Courant se ha incrementado a 10, 15 y 20 para las simulaciones de 1.5, 2 y 3.5 m/s respectivamente.

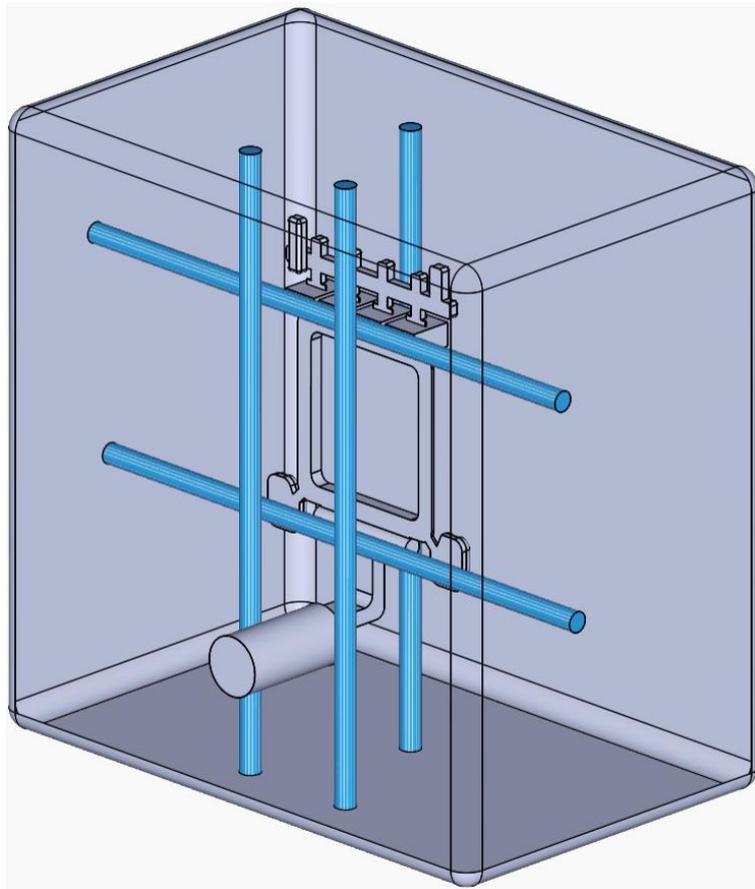


Fig 7.143 Modelo optimizado de una tubería.

### 7.8.1. Simulación con cinco tuberías y una velocidad del fluido de 1.5 m/s

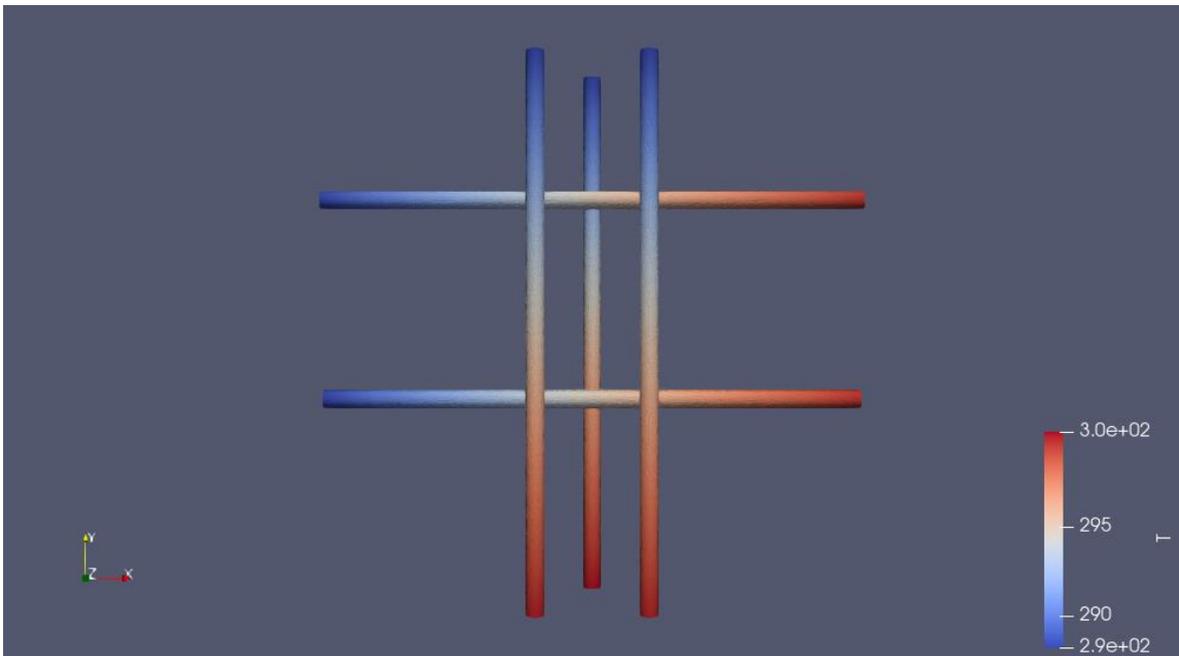


Fig. 7.144 Resultado térmico de la tubería a 1 segundo en Kelvin.

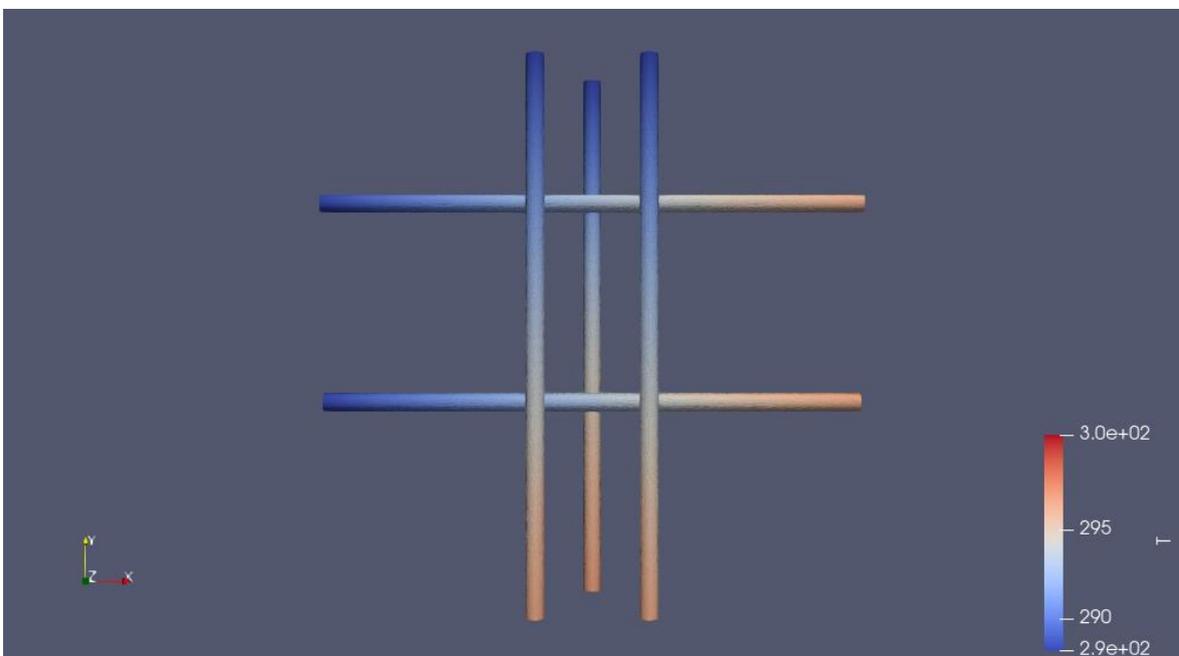


Fig. 7.145 Resultado térmico de la tubería a 8 segundos en Kelvin.

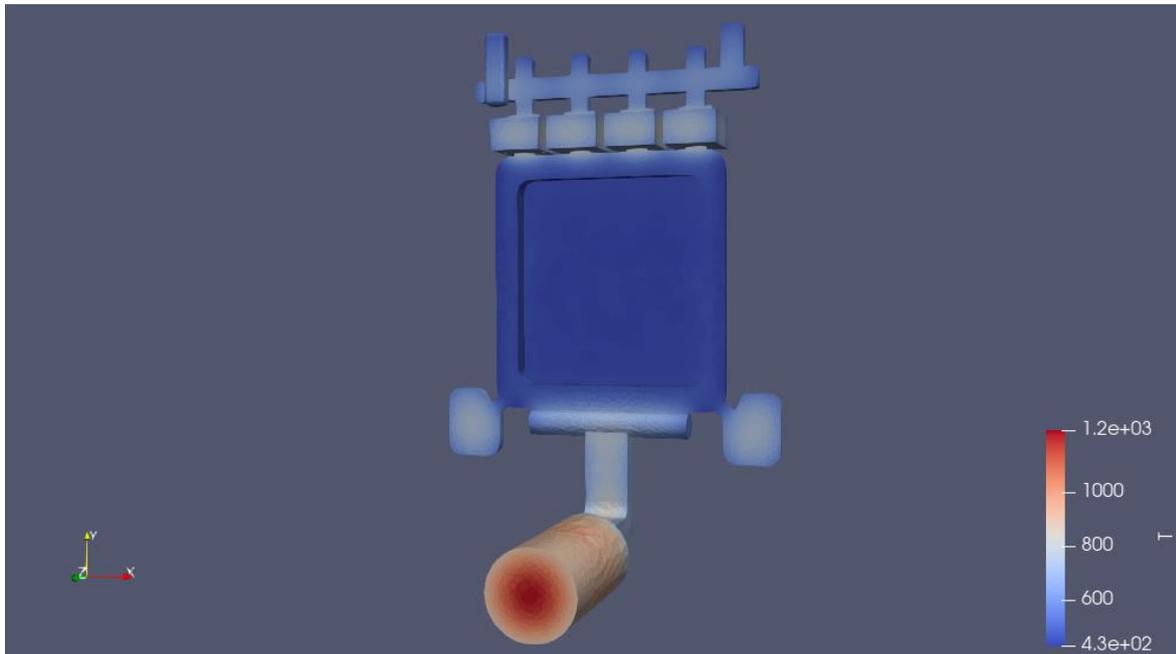


Fig. 7.146 Resultado térmico de la bandeja a 1 segundo en Kelvin.

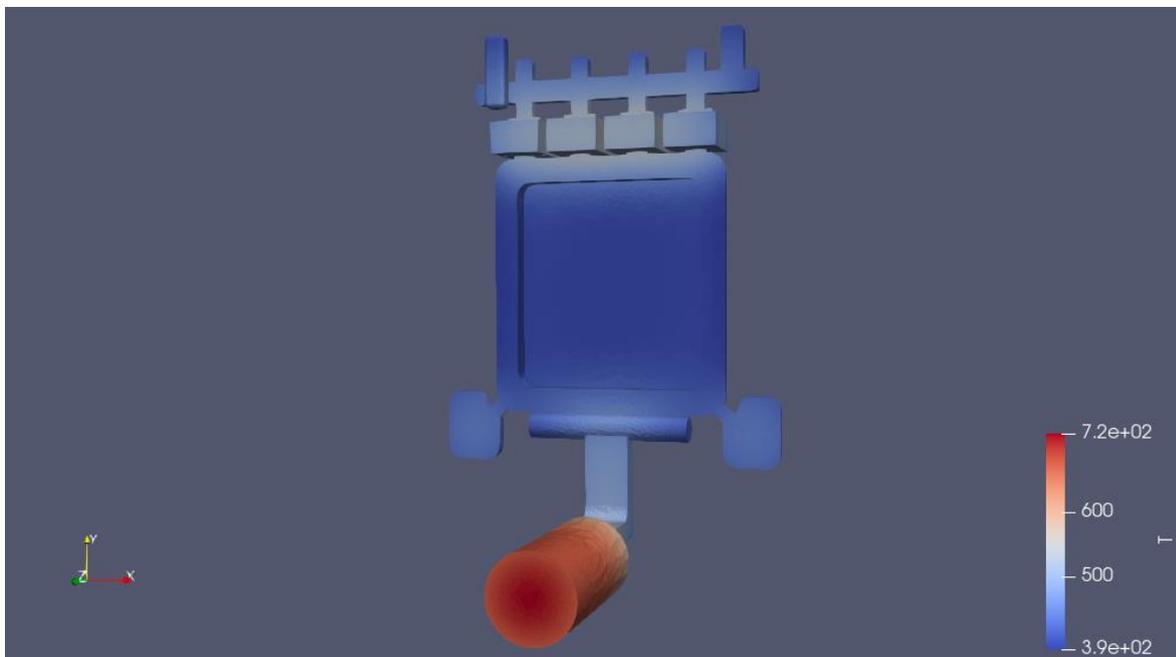


Fig. 7.147 Resultado térmico de la bandeja a 8 segundos en Kelvin.

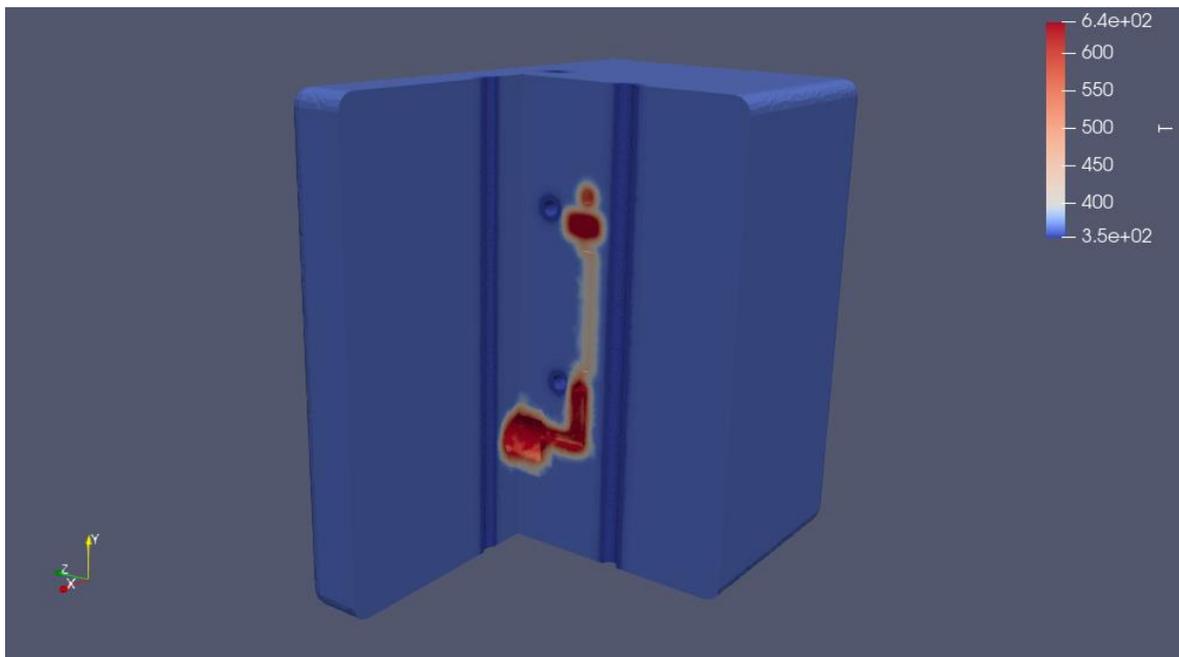


Fig. 7.148 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.

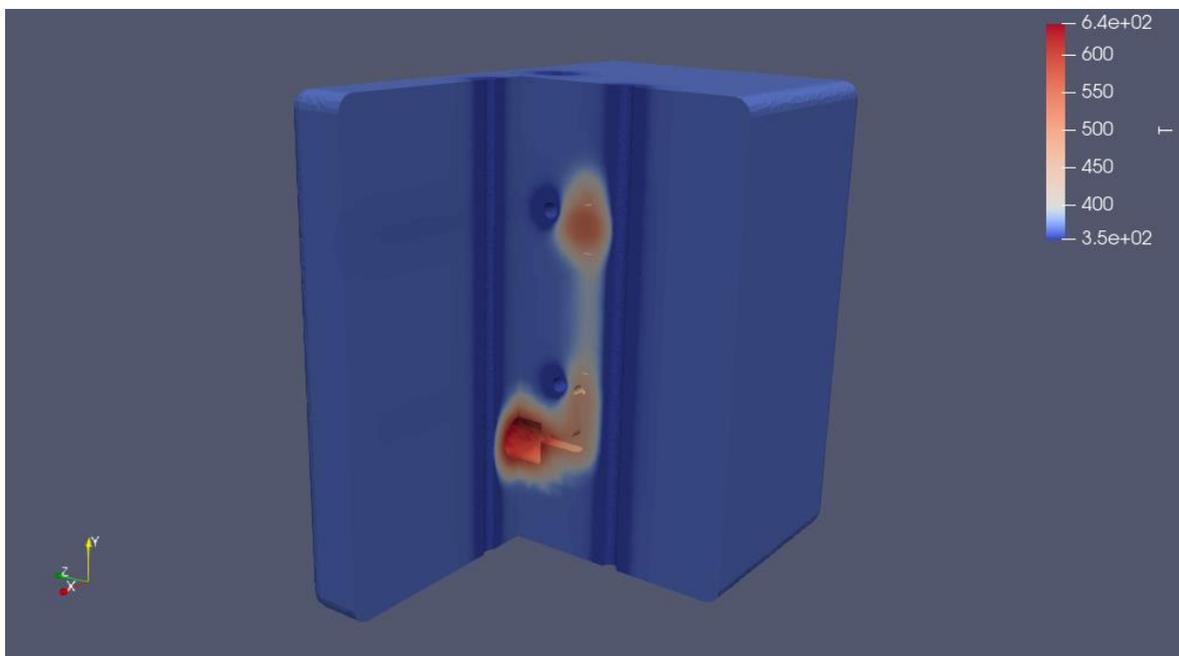


Fig. 7.149 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.

### 7.8.2. Simulación con cinco tuberías y velocidad del fluido de 2 m/s

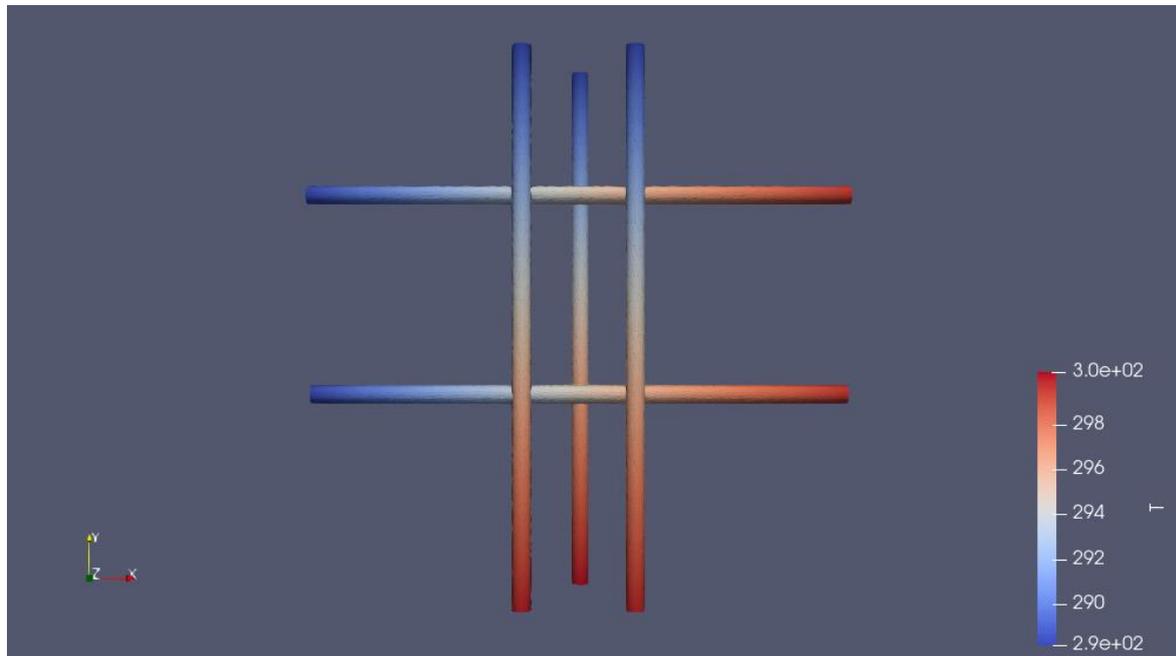


Fig. 7.150 Resultado térmico de la tubería a 1 segundo en Kelvin.

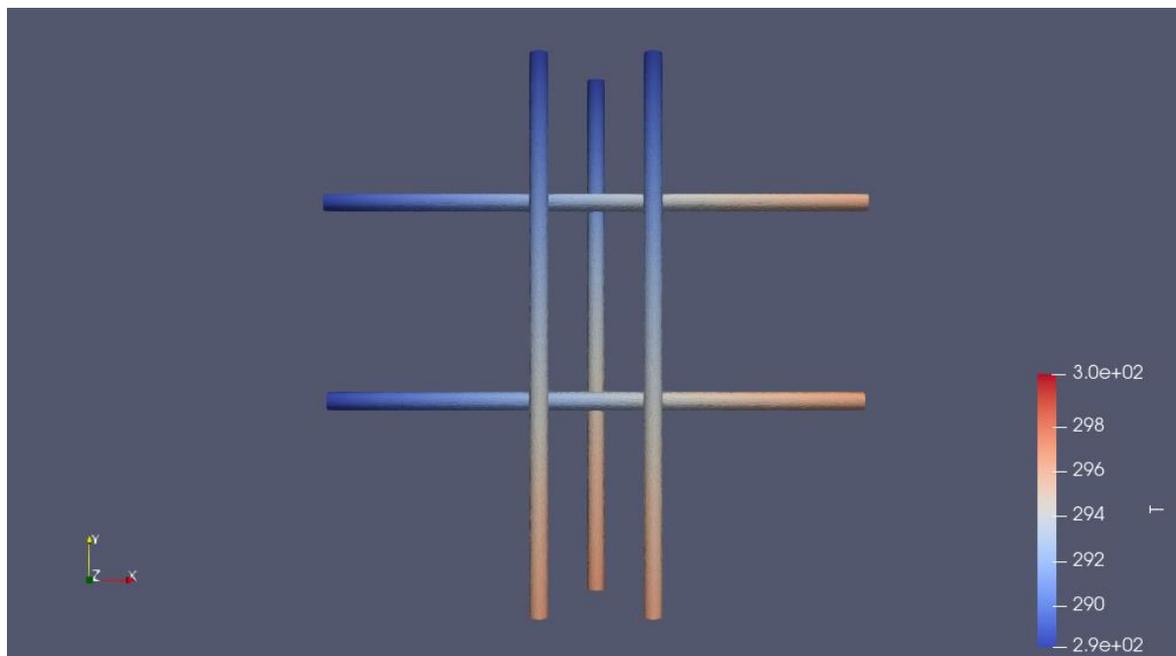


Fig. 7.151 Resultado térmico de la tubería a 8 segundos en Kelvin.

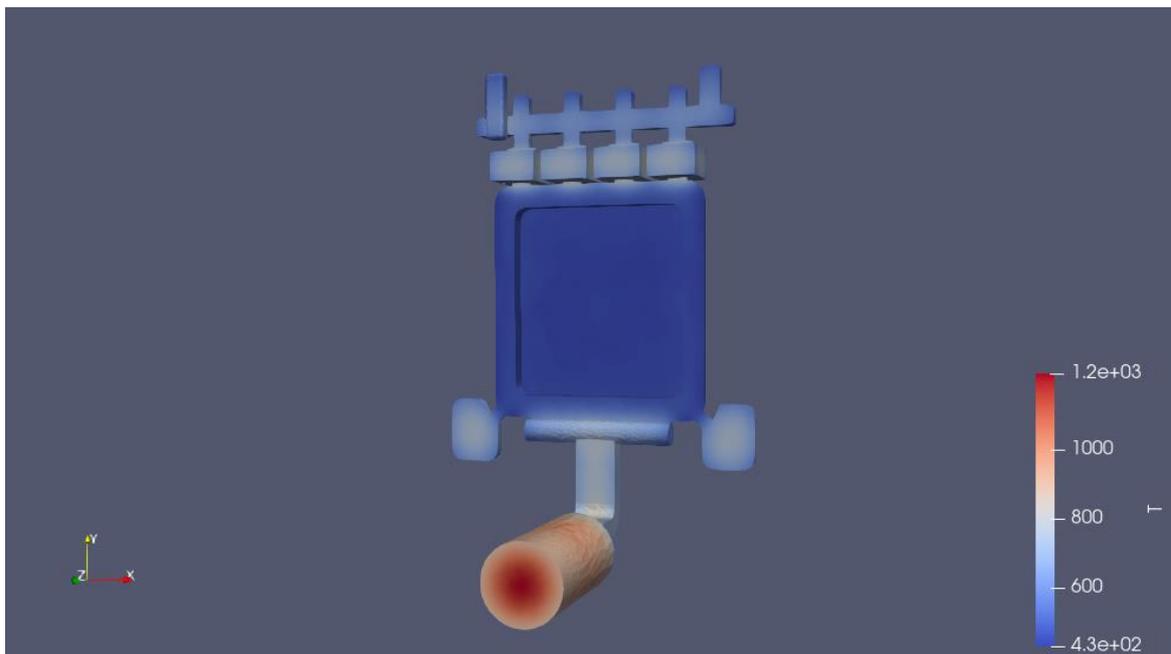


Fig. 7.152 Resultado térmico de la bandeja a 1 segundo en Kelvin.

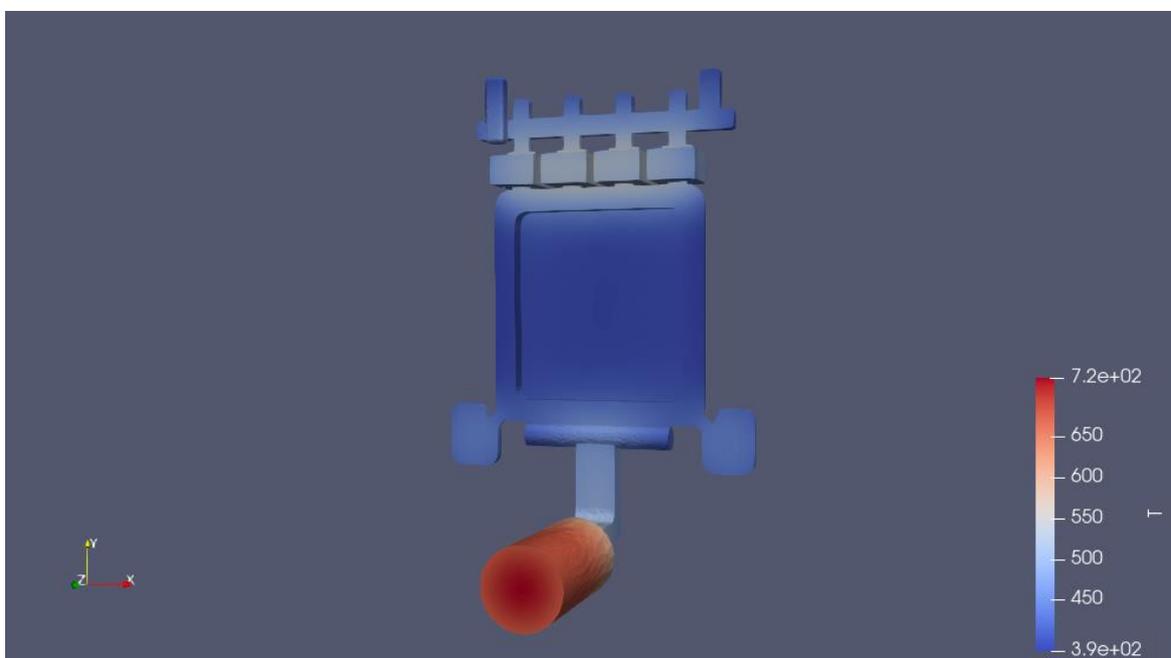


Fig. 7.153 Resultado térmico de la bandeja a 8 segundos en Kelvin.

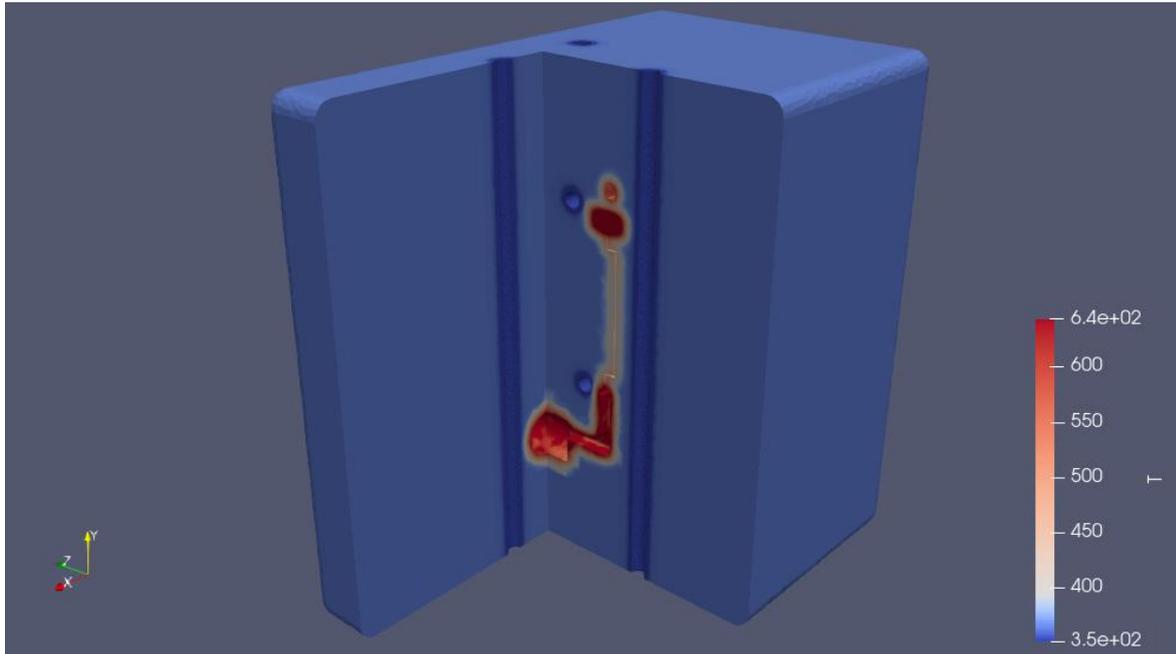


Fig. 7.154 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.

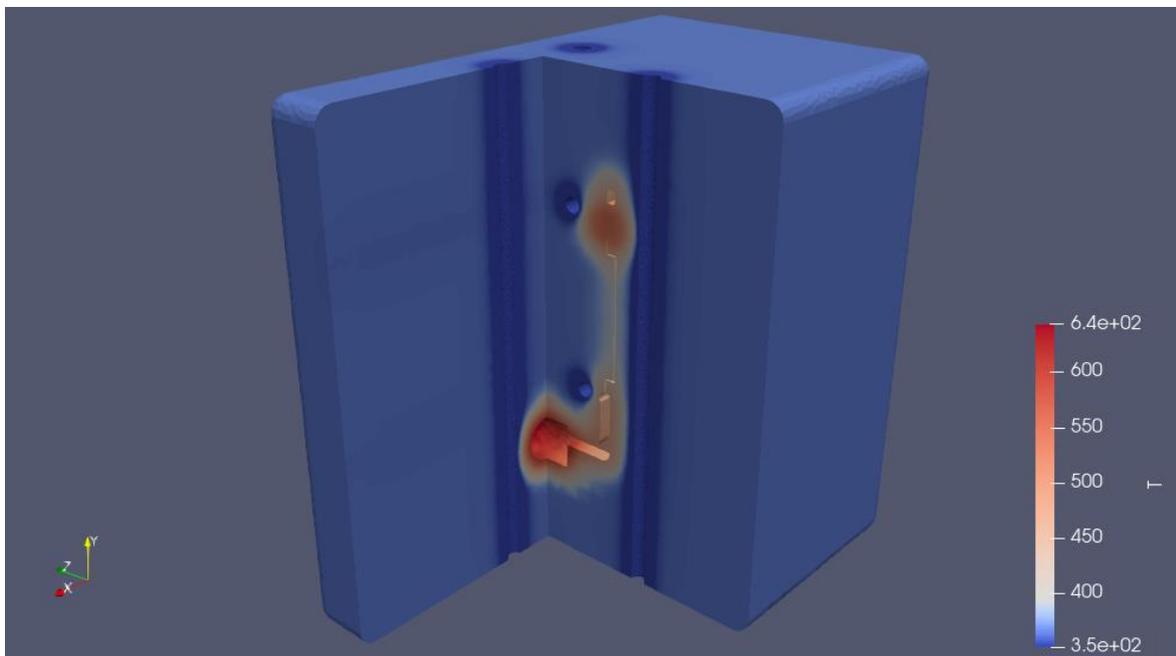


Fig. 7.155 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.

### 7.8.3. Simulación con cinco tuberías y una velocidad del fluido de 3.5 m/s

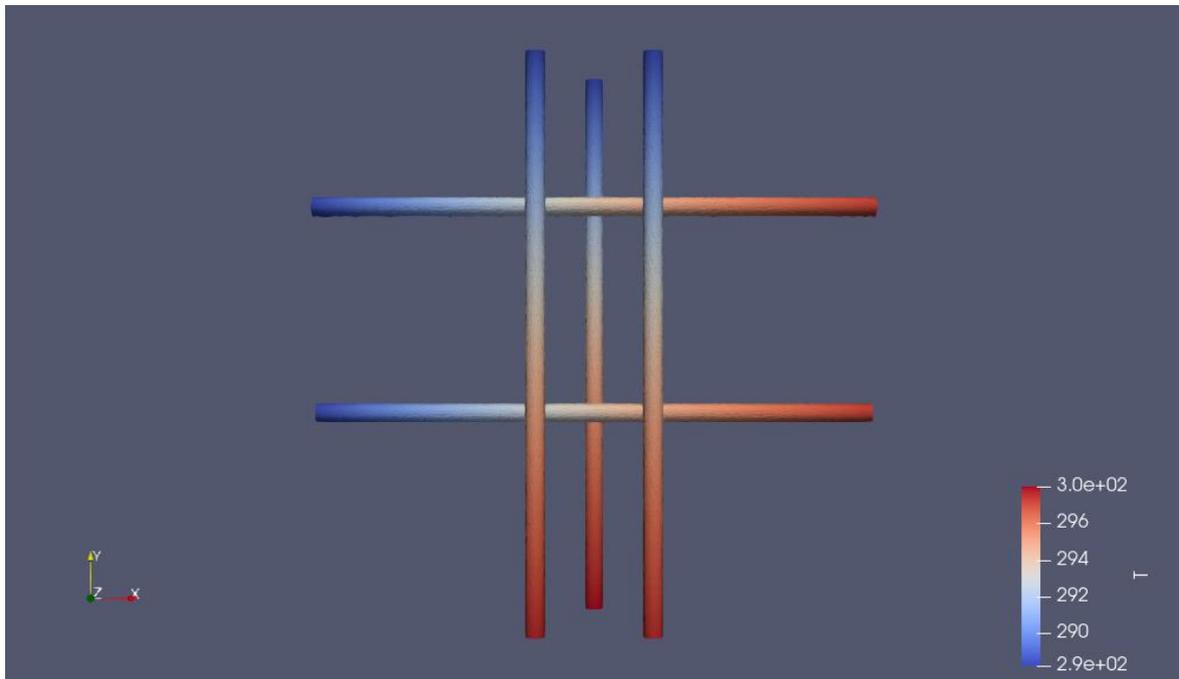


Fig. 7.156 Resultado térmico de la tubería a 1 segundo en Kelvin.

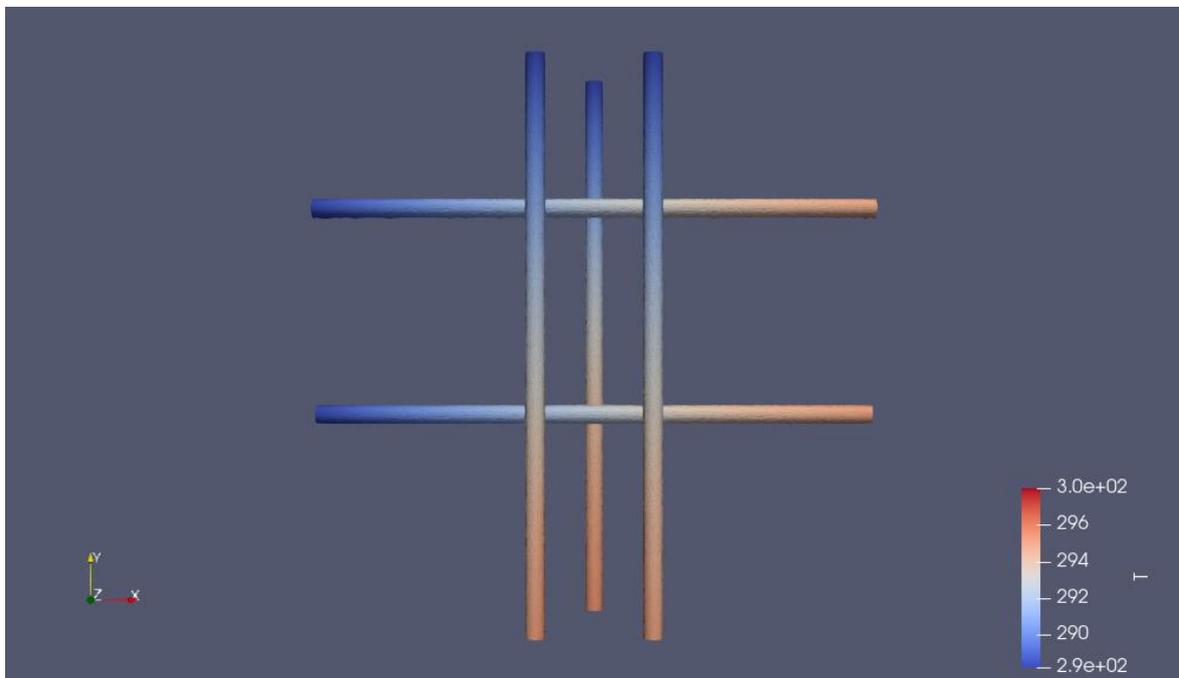


Fig. 7.157 Resultado térmico de la tubería a 8 segundos en Kelvin.

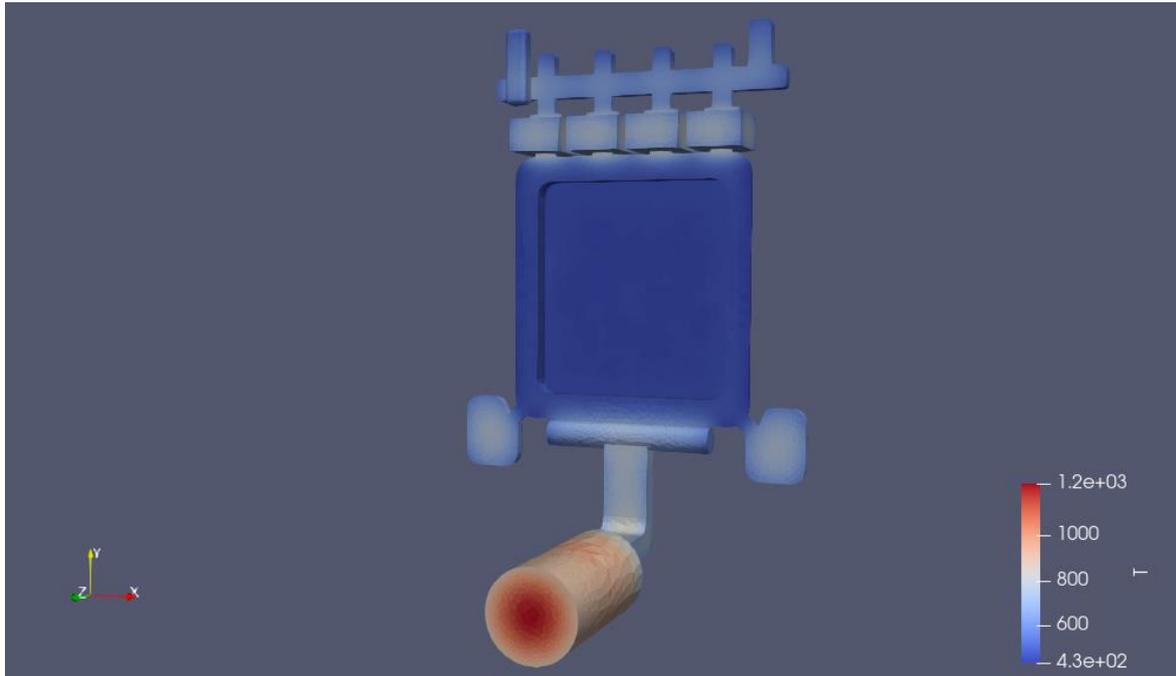


Fig. 7.158 Resultado térmico de la bandeja a 1 segundo en Kelvin.

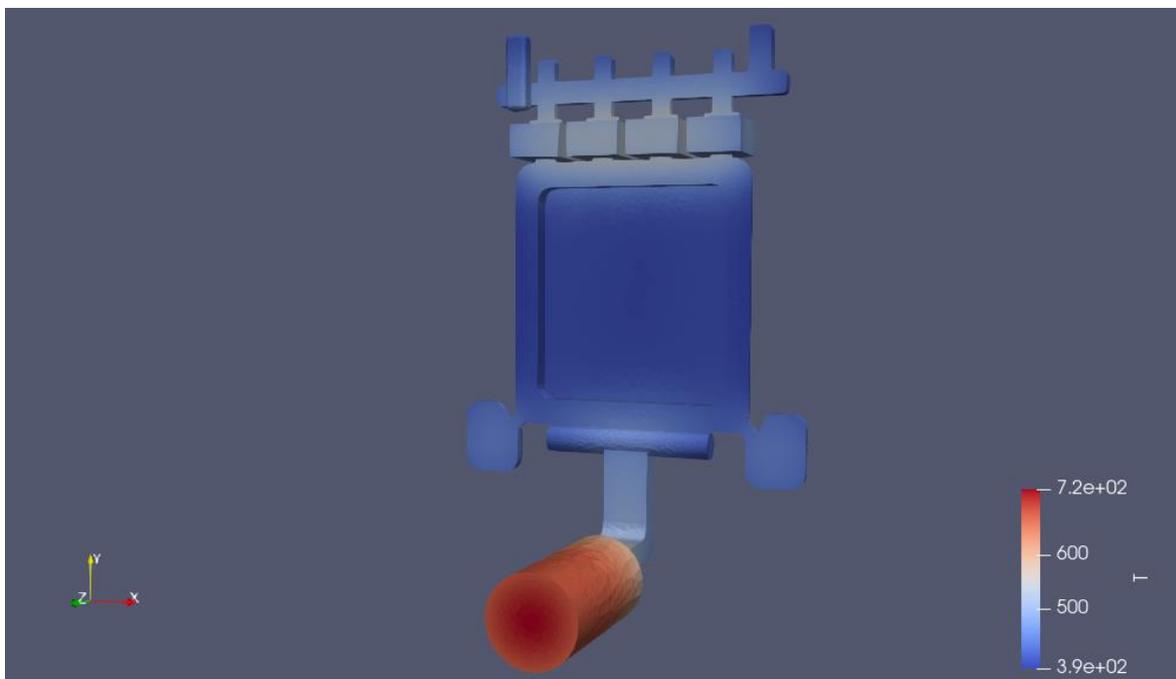


Fig. 7.159 Resultado térmico de la bandeja a 8 segundos en Kelvin.

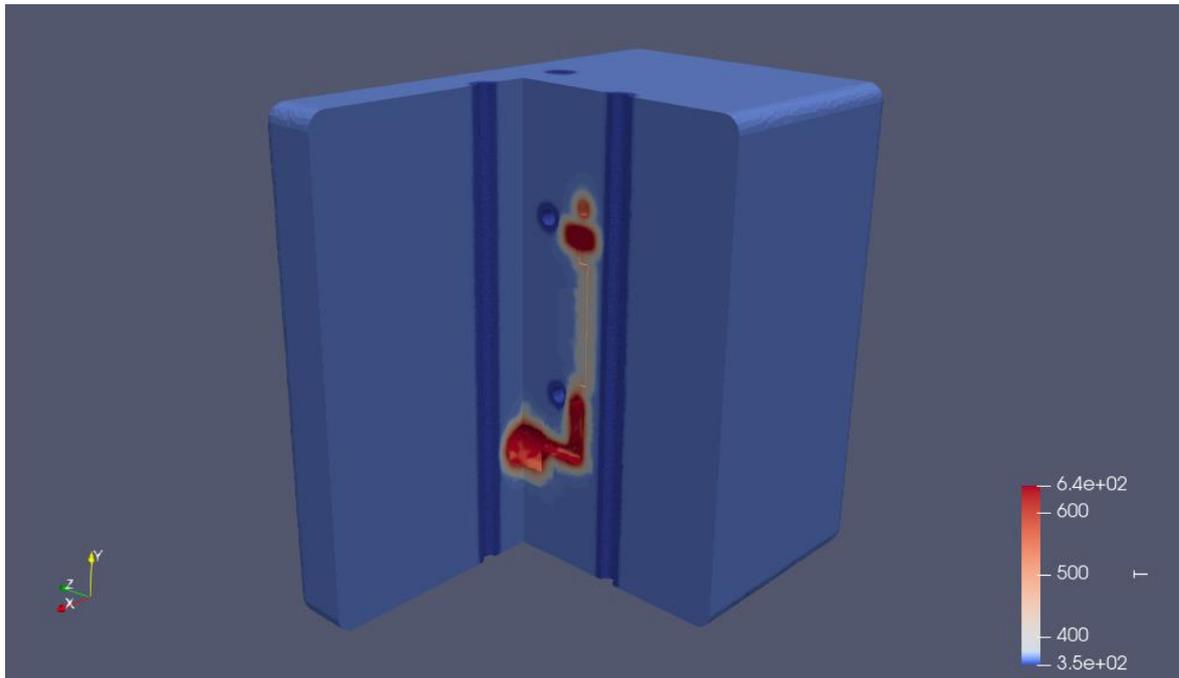


Fig. 7.160 Temperatura interior del molde [K] a 1 segundo.

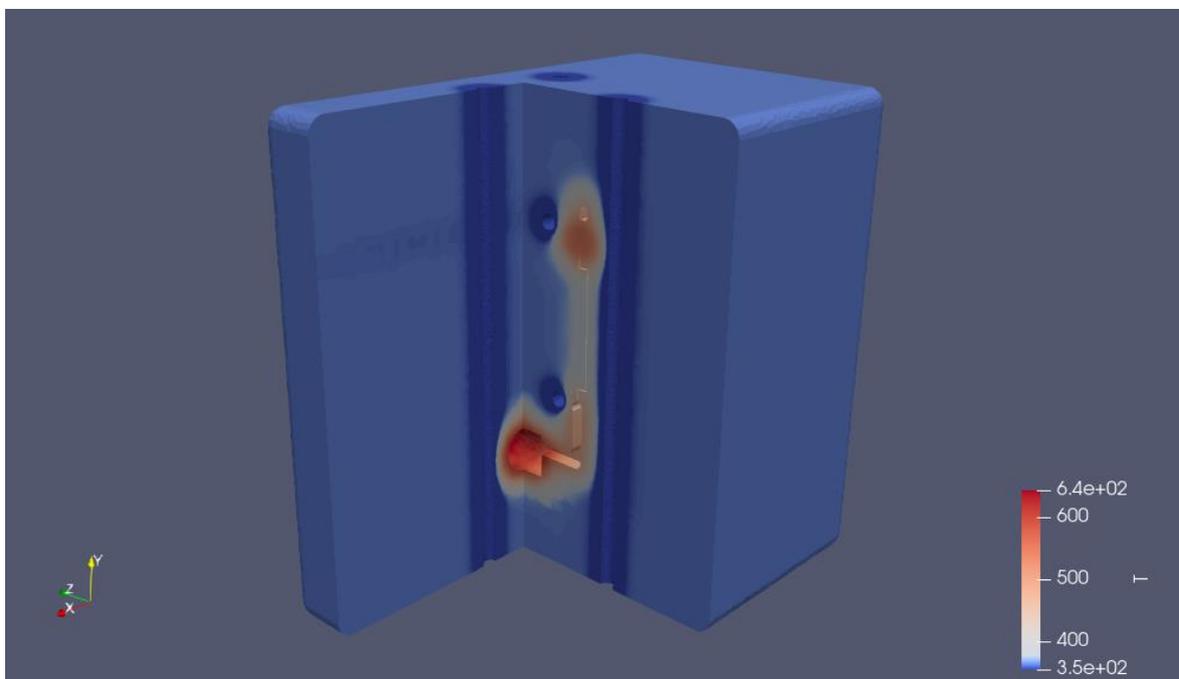


Fig. 7.161 Temperatura interior del molde [K] a 8 segundos.

#### 7.8.4. Análisis de resultados

Como se puede apreciar en los subapartados anteriores, en las figuras correspondientes a la temperatura interior del molde se pueden observar ligeros cambios con la adición de dos tuberías laterales. Estas mitigan los efectos de expansión del calor que tienen los volúmenes superior e inferior de la bandeja. Se puede ver, al igual que las tuberías verticales, como el calor emitido por la bandeja es barrido por el enfriamiento que generan las tuberías en su entorno. En el Anexo VI se pueden encontrar más capturas en diferentes instantes de tiempo.

En la Fig. 7.162 se observa la temperatura por cada velocidad del fluido. Hay reflejadas dos rectas por cada velocidad: una correspondiente a las tres tuberías verticales; otra que corresponde a las dos horizontales. Como se aprecia, la temperatura promedio del agua en las tuberías verticales llega a salir con más calor que las horizontales. Esto se debe a que las horizontales, como en el caso convencional, circulan por zonas del molde que no están tan intensamente calientes. Aun así, al estar más cerca de focos de emisión de calor por parte de la bandeja, se consigue aumentar la temperatura del agua de la tubería en comparación con el molde convencional.

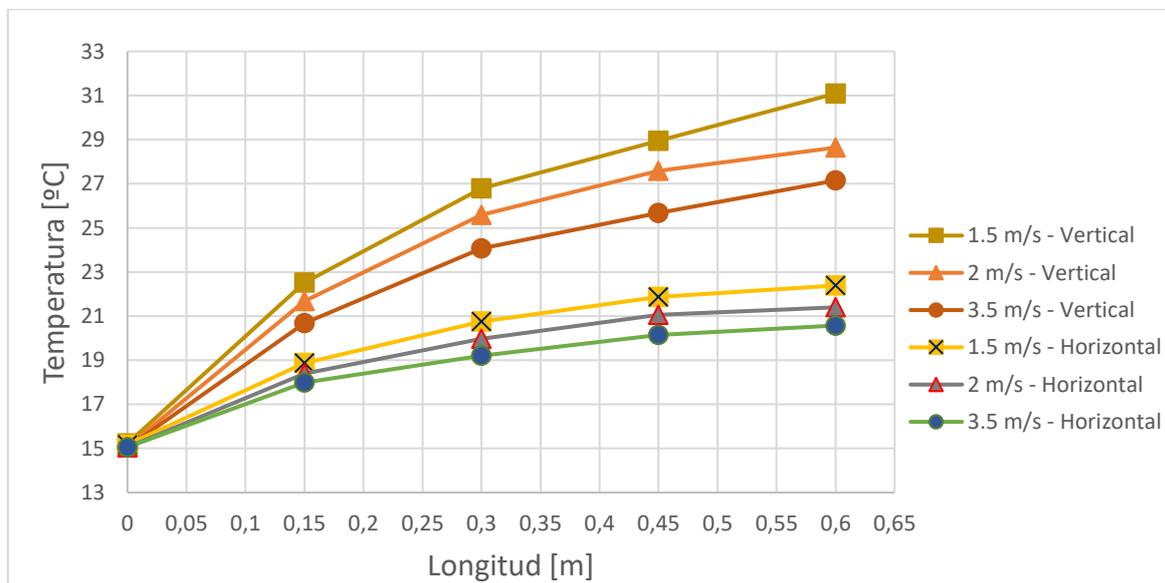


Fig. 7.162 Temperatura del agua en función de la longitud para  $t = 1s$ .

En la Fig 7.163 se observa la misma gráfica, pero con las temperaturas a los ocho segundos. Como se ha analizado en los casos anteriores, la refrigeración del sistema hace que la temperatura de las tuberías también decremente. Se aprecia una ligera disminución de esta

temperatura promedio en cada una, pero conservando la diferencia entre ellas. Todos los datos extraídos de Paraview en cuanto a la temperatura en cada sección de la longitud se encuentran en el Anexo XII.

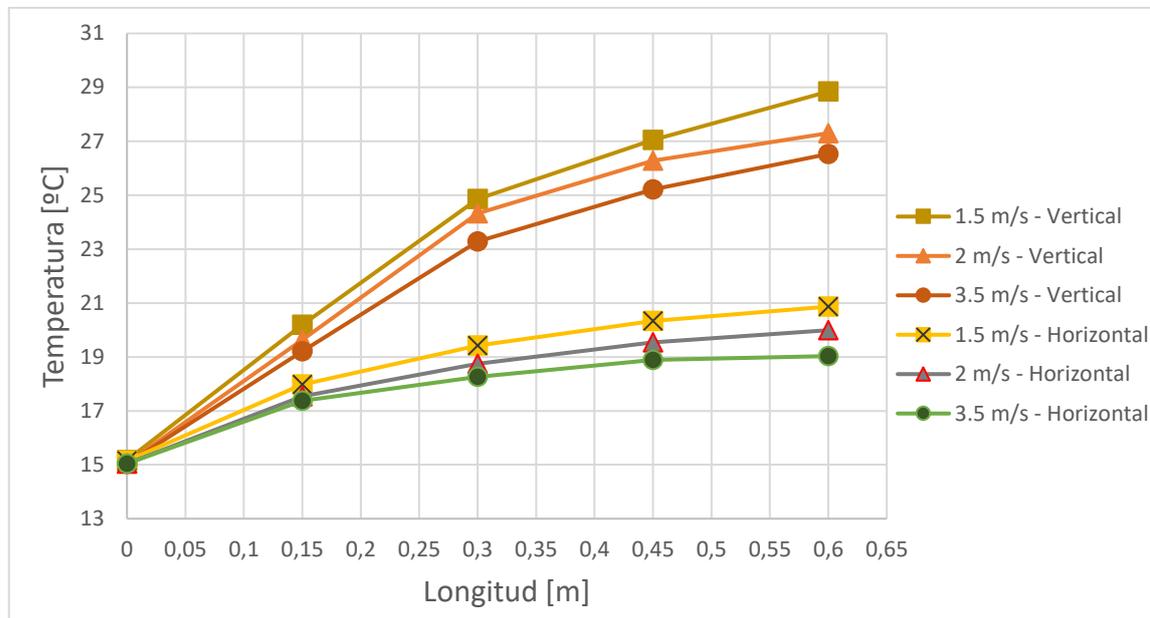


Fig. 7.163 Temperatura del agua en función de la longitud para t = 1s.

En cuanto a la temperatura global de la bandeja no se ve más variación que los tres grados que en el apartado anterior disminuyeron. La temperatura final de la bandeja en el proceso de inyección a los ocho segundos sí que llega a disminuir hasta la temperatura del rango de 200-300 °C, según la información que proveyó *Eurecat*. Por eso, se considera que la disminución de la temperatura final de la bandeja es correcta y sigue rigor empírico, aunque se ve anómalo el hecho de que la temperatura casi no se vea afectada por la refrigeración que producen las tuberías en sus áreas más críticas. Aunque sí se ve una disminución de tres grados en los modelos optimizados respecto los convencionales, esta disminución se considera bastante leve en comparación a lo que un sistema de refrigeración necesitaría.

## 7.9. bResultados generales

Como se puede observar en los pasados subapartados, la temperatura promedio del agua en cada una de las tuberías aumenta en los modelos optimizados. Esto es debido al acercamiento de estas tuberías a la bandeja y la circulación de ellas por las áreas más críticas. Destacar que el hecho de aumentar la velocidad influye en una disminución de esta temperatura de

salida, ya que el agua que circula pasa menos tiempo dentro del molde y no llega a calentarse tanto. En cambio, un aumento de la velocidad influye positivamente en creación de turbulencia en el fluido por lo que aumenta su transferencia de calor. Si se comparan con los cálculos de la temperatura de salida del agua del apartado 6.1.3 se puede observar correlación entre los valores convencionales tal y como se puede ver en la Tabla 7.1. Aunque la temperatura de esta agua no llega a subir de los 31 °C para los modelos optimizados, según estimaciones dadas por *Eurecat* la temperatura de salida puede llegar hasta los 60 °C en algunos casos. Además, el software no tiene en cuenta la solidificación del aluminio en la simulación por lo que es un aspecto que podría influir.

Velocidad [m/s]	<i>D</i> = 50 mm		<i>D</i> = 30 mm		<i>D</i> = 20 mm	
	<i>T</i> <sub>cálculo</sub> [°C]	<i>T</i> <sub>simulación</sub> [°C]	<i>T</i> <sub>cálculo</sub> [°C]	<i>T</i> <sub>simulación</sub> [°C]	<i>T</i> <sub>cálculo</sub> [°C]	<i>T</i> <sub>simulación</sub> [°C]
1,5 m/s	26,5497	23,7491	25,6941	21,4793	29,4371	27,4639
2 m/s	23,6622	17,8660	23,0206	20,3583	25,8278	26,6057
3,5 m/s	19,9499	17,0305	19,5832	18,5924	21,1873	26,0338

Tabla 7.1 Temperatura de salida de la tubería según cálculos y simulación.

La temperatura de la bandeja llega a estar en el rango que se encuentran, según datos empíricos cedidos por *Eurecat*, la mayoría de procesos de este tipo, llegando a unos ocho segundos a 200 – 300 °C. En este proyecto la temperatura de salida ha llegado a unos 260 °C, viéndose reducida en los modelos de refrigeración optimizados a los 257 °C aproximados.

Aunque se ve rigor en la simulación por el hecho de decrementar la temperatura hasta los 257 °C, se ve que la precisión de la simulación podría estar siendo afectada por el hecho de incrementar parámetros con tal de realizar una simulación más rápida. El hecho de que el programa no deje realizar simulaciones más allá de las ocho horas y con un límite máximo de velocidad del procesador, ha provocado que sea necesario un aumento del “time step”, del número de Courant y que la malla realizada no pueda ser lo suficientemente fina para obtener un resultado más preciso. Además, el programa no tiene en cuenta la energía liberada por la solidificación. Aunque se recree esta energía liberada en la solidificación con una temperatura equivalente, es posible que el programa no tenga en cuenta la misma velocidad de transferencia que tendría el sistema real. Es posible que el programa considerando este

efecto pueda contemplar un aumento de la temperatura del agua y un enfriamiento mayor en la bandeja.

En cambio, se sabe que la configuración de la simulación es correcta por lo que si se visualizan los residuales de la simulación se puede observar que convergen rápidamente. Los residuales son parámetros que reflejan las inestabilidades de la simulación. Es por eso que lo ideal es que sean lo más pequeños posibles y se recomiendan que comiencen aproximadamente en los 0.001. Además, la presencia de picos representaría la presencia de inestabilidades en la simulación lo cual generaría unos resultados peores.

Como ejemplo, se plasma en la Fig. 7.163 los residuales correspondientes a la simulación del molde convencional de tres tuberías a una velocidad de 2 m/s. Se puede apreciar el rápido decrecimiento de estos residuales por debajo de 0.001, esto significa que la solución converge rápidamente. En cambio, residuales como la presión estática ( $p\_rgh$ ), el número de Courant máximo y el medio son bastante altos, estos dos últimos declarados así expresamente para acelerar la simulación.

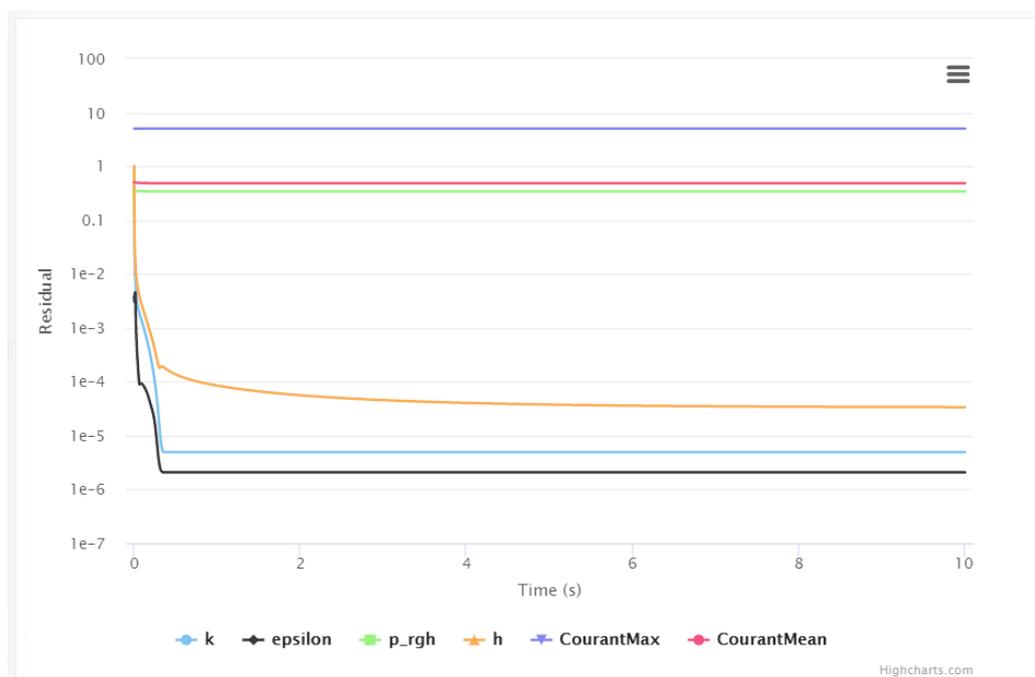


Fig. 7.164 Residuales en la simulación del molde convencional de tres tuberías a 2 m/s.

En general, todas las simulaciones presentan tendencias parecidas en sus residuales, sin presencia de inestabilidades excepto los elevados valores de los parámetros antes

mencionados. Es posible reducir aún más el valor de estos residuales decrementando el valor del “time step”.

Finalmente, aunque los resultados de la simulación son científicamente correctos y concuerdan ligeramente con los cálculos y datos empíricos, estos tienen una falta de precisión que se podría solventar realizando una simulación más larga si Simscale lo permitiese.

## 8. Planificación

El proyecto final de carrera consta de 16 créditos ECTS. Cada crédito son 25 horas de trabajo para el estudiante por lo que se considera que este proyecto ha de constar de 404 horas dedicadas en su totalidad.

En cuanto a los recursos se han identificado 4 tipos dependiendo de a qué se esté dedicando el trabajo. Los recursos no son más que el proyectista realizando labores enfocadas a un ámbito distinto como:

- Recurso 1: Proyectista destinado a tareas de búsqueda de información o investigación.
- Recurso 2: Proyectista destinado a tareas de gestión.
- Recurso 3: Proyectista destinado a tareas técnicas.
- Recurso 4: Proyectista destinado a tareas de adecuación de documentación.

### 8.1. Planificación inicial

La planificación inicial está reflejada en la Tabla 8.1 en la cual se programaron unas horas determinadas para el proyecto de detalle teniendo en cuenta la dificultad que presentaría la realización de una simulación numérica correcta. Inicialmente no se consideró la dificultad ni los posibles problemas que se presentarían en la tarea de realizar simulaciones numéricas. Es por eso, que el número de horas dedicadas a la simulación numérica y a la formación de la misma ha aumentado. El diagrama de Gantt de la planificación inicial queda representado en la Fig. 8.1.

	TAREAS	Horas	Prelaciones	Recursos
	<b>Selección TFG</b>	<b>15</b>		
A	Propuesta TFG	10	-	Selección
B	Validación de la propuesta	5	A	Selección
	<b>Anteproyecto</b>	<b>178</b>		
C	Definición del objeto	4	B	Técnico
D	Alcance	4	C	Técnico
E	Planificación	4	C	Gestión
F	Estudio sobre producción del aluminio	20	C;D	Investigación
G	Estudio sobre procesos de conformación del aluminio	25	F	Investigación
H	Estudio sobre el forjado del aluminio	25	G	Investigación
I	Estudio sobre la transferencia de calor	20	H	Investigación
J	Estudio sobre CFD	20	I	Investigación
K	Objetivos y especificaciones técnicas	5	I	Técnico
L	Estudio de viabilidades	6	J	Técnico
M	Índice proyecto de detalle	3	K	Gestión
O	Formación CFD: "SIMSCALE"	30	-	Técnico
P	Dimensionado de utillajes	10	H;M	Técnico
Q	Adecuación documentación	2	P	Documentación
	<b>Proyecto de detalle</b>	<b>211</b>		
R	Estudio de softwares y justificación del escogido	20	-	Técnico
S	Diseño de dos sistemas de refrigeración	4	P	Técnico
T	Realización modelo CAD del molde convencional	15	S	Técnico
U	Simulaciones con la tipología convencional	30	T	Técnico
V	Realización modelo CAD del molde complejo	40	T	Técnico
W	Simulaciones con la tipología compleja	30	V	Técnico
X	Comparación del cálculo y simulación	8	W	Técnico
Y	Comparación de las simulaciones de los dos sistemas de refrigeración	4	X	Técnico
Z	Adecuación documentación	2	Y	Documentación
AA	Entrega memoria intermedia	0	-	Técnico
AB	Corrección de errores	5	AA	Técnico
AC	Simulación modificando parámetros en cada tipología	40	Z	Técnico
AD	Estudio de los parámetros que afectan al sistema	10	AC	Técnico
AE	Adecuación documentación	3	AD	Documentación
	<b>TOTAL</b>	<b>404</b>		

Tabla 8.1 Tareas con las horas, prelações y recursos planificadas inicialmente.

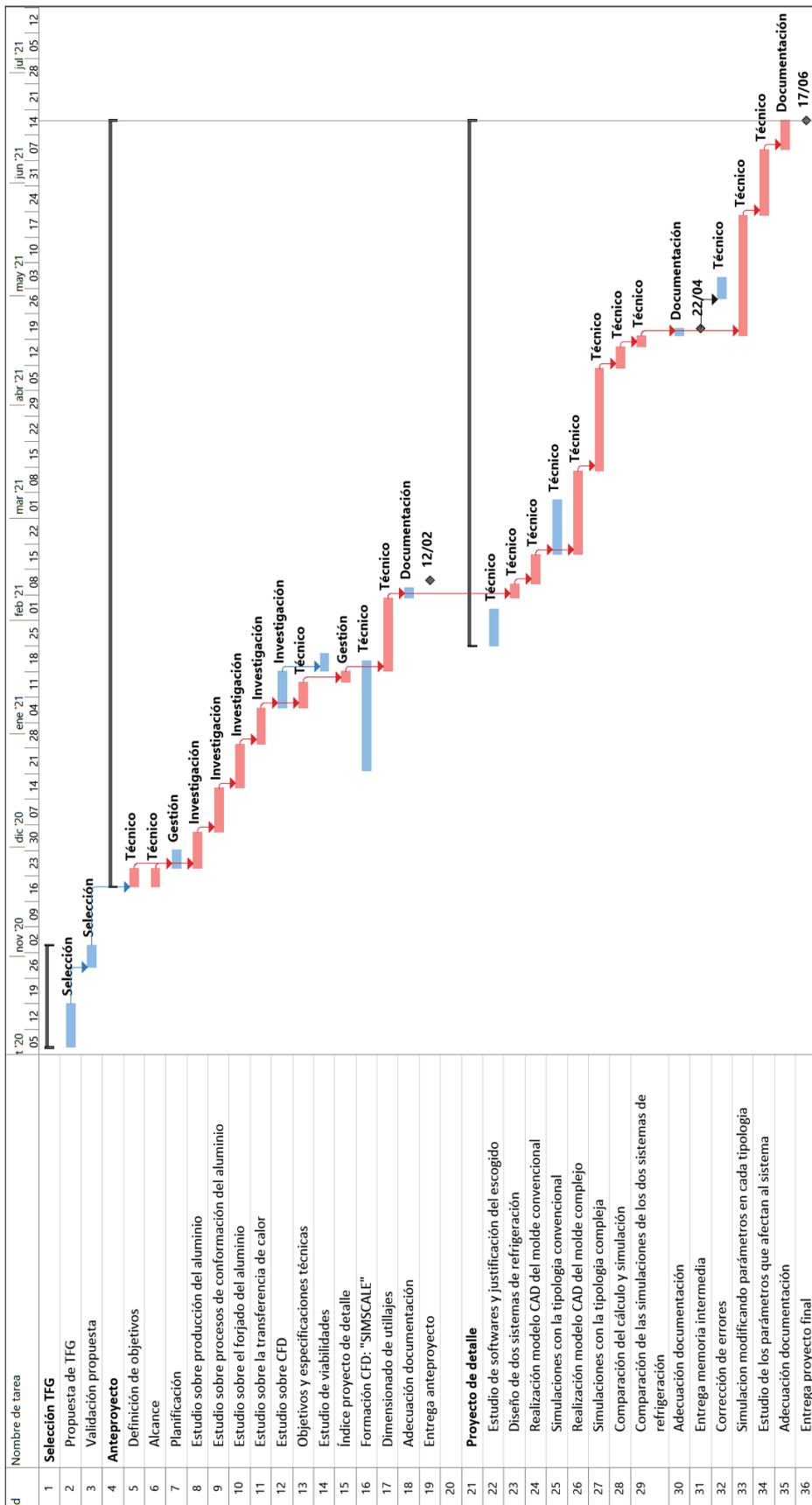


Fig. 8.1 Diagrama de Gantt programado inicialmente.

## **8.2. Retrasos y desviaciones**

Durante el desarrollo del proyecto se vio necesario aumentar el número de horas dedicadas a la formación de simulación CFD debido a que no es una labor fácil el hecho de preparar un modelo para su simulación. En un principio se encontraron problemas en el modelo CAD que no permitieron pasar a la etapa de simulación en el plazo programado, ya que el archivo presentaba problemas. Tras esto, la geometría no estaba correctamente realizada por lo que el programa no conseguía detectar los contactos en las paredes. Una vez solucionado el mismo programa tenía problemas para simular debido al tipo de mallado. Ha sido necesario una formación adicional de mallado además de la búsqueda de información para otros ámbitos para poder proseguir con el desarrollo del proyecto.

Además, hay que tener en cuenta un lapso de tiempo donde las horas de computación del programa se agotaron, ya que la licencia gratuita que se estaba usando tenía horas de simulación limitadas haciendo que el proyecto se demorara por la espera para una renovación de licencia.

El hecho de simular turbulencia hizo necesario también el estudio de parámetros que representaban este régimen dentro del programa, creando la necesidad de dedicar más horas adicionales. Finalmente, cuando se consiguieron los primeros resultados, tuvieron que ser mejorados reiterando en la simulación.

Finalmente, las horas dedicadas al proyecto fueron modificadas tal que:

- Disminución de las horas dedicadas a la realización del modelo CAD: de 15 horas a 5 por el modelo convencional y de 30 a 10 para el modelo optimizado.
- Aumento de horas dedicadas a las simulaciones: de 40 a 65 para la tipología convencional y de 30 a 45 para la tipología optimizada.
- Disminución de las horas de estudio y justificación del software escogido de 20 horas a 2 horas.
- Las horas dedicadas al análisis comparativo entre los dos sistemas pasaron de 12 a 15.
- Disminución de las horas de simulación variando los parámetros de cada tipología de 40 a 10.

- Disminución de las horas de estudio de los parámetros que afectan al sistema: de 10 a 5 horas.
- Aumento de las horas dedicadas a la corrección de errores: de 5 a 20.
- Adición de 4 horas para la realización del estudio económico.
- Aumento de las horas para la redacción de la documentación final a 23 horas.

Como ya se conocía la herramienta de modelización CAD se dedicaron menos horas de las esperadas en la modelización de los modelos. El estudio de softwares disponibles en el mercado es extenso, pero se realizó un estudio general de los más utilizados en ingeniería reduciendo las horas dedicadas. El hecho de realizar una simulación correcta con la configuración idónea hizo posible reducir el tiempo dedicado en variar los parámetros en cada simulación, ya que la variación de parámetros en simulación es rápida cuando se tiene ya una simulación correcta. Finalmente, todas las horas recuperadas se tuvieron que dedicar a solucionar problemas en las simulaciones y en búsqueda de información de soporte para las simulaciones.

En la Tabla 8.2 se observa la tabla con tareas y horas dedicadas para la realización del proyecto. En la Fig. 8.2 se aprecia el diagrama de Gantt resultante del proyecto. Hay que destacar que algunas prelacones se han modificado porque parte del trabajo que se iba a realizar antes de entregar la memoria intermedia fue retrasado y tuvo que hacerse posteriormente.

	TAREAS	Horas	Prelaciones	Recursos
	<b>Selección TFG</b>	<b>15</b>		
A	Propuesta TFG	10	-	Selección
B	Validación de la propuesta	5	A	Selección
	<b>Anteproyecto</b>	<b>178</b>		
C	Definición del objeto	4	B	Técnico
D	Alcance	4	C	Técnico
E	Planificación	4	C	Gestión
F	Estudio sobre producción del aluminio	20	C;D	Investigación
G	Estudio sobre procesos de conformación del aluminio	25	F	Investigación
H	Estudio sobre el forjado del aluminio	25	G	Investigación
I	Estudio sobre la transferencia de calor	20	H	Investigación
J	Estudio sobre CFD	20	I	Investigación
K	Objetivos y especificaciones técnicas	5	I	Técnico
L	Estudio de viabilidades	6	J	Técnico
M	Índice proyecto de detalle	3	K	Gestión
O	Formación CFD: "SIMSCALE"	30	-	Técnico
P	Dimensionado de utillajes	10	H;M	Técnico
Q	Adecuación documentación	2	P	Documentación
	<b>Proyecto de detalle</b>	<b>211</b>		
R	Estudio de softwares y justificación del escogido	2	-	Técnico
S	Diseño de los sistemas de refrigeración	4	P	Técnico
T	Realización modelo CAD del molde convencional	5	S	Técnico
U	Simulaciones con la tipología convencional	65	T	Técnico
V	Realización modelo CAD del molde optimizado	10	U	Técnico
W	Adecuación documentación	3	S;T	Técnico
X	Entrega memoria intermedia		W	-
Y	Simulaciones con la tipología optimizada	45	V	Técnico
Z	Comparación del cálculo y simulación	10	Y	Documentación
AA	Comparación de las simulaciones de los dos sistemas de refrigeración	5	U;Y	Técnico
AB	Corrección de errores	20	AA	Técnico
AC	Simulación modificando parámetros en cada tipología	10	U;Y	Técnico
AD	Estudio económico	4	AC	Gestión
AE	Estudio de los parámetros que afectan al sistema	5	AC	Técnico
AF	Adecuación documentación	23	AB;AD;AE	Documentación
	<b>TOTAL</b>	<b>404</b>		

Tabla 8.2 Tareas con las horas, prelaciones y recursos del proyecto.

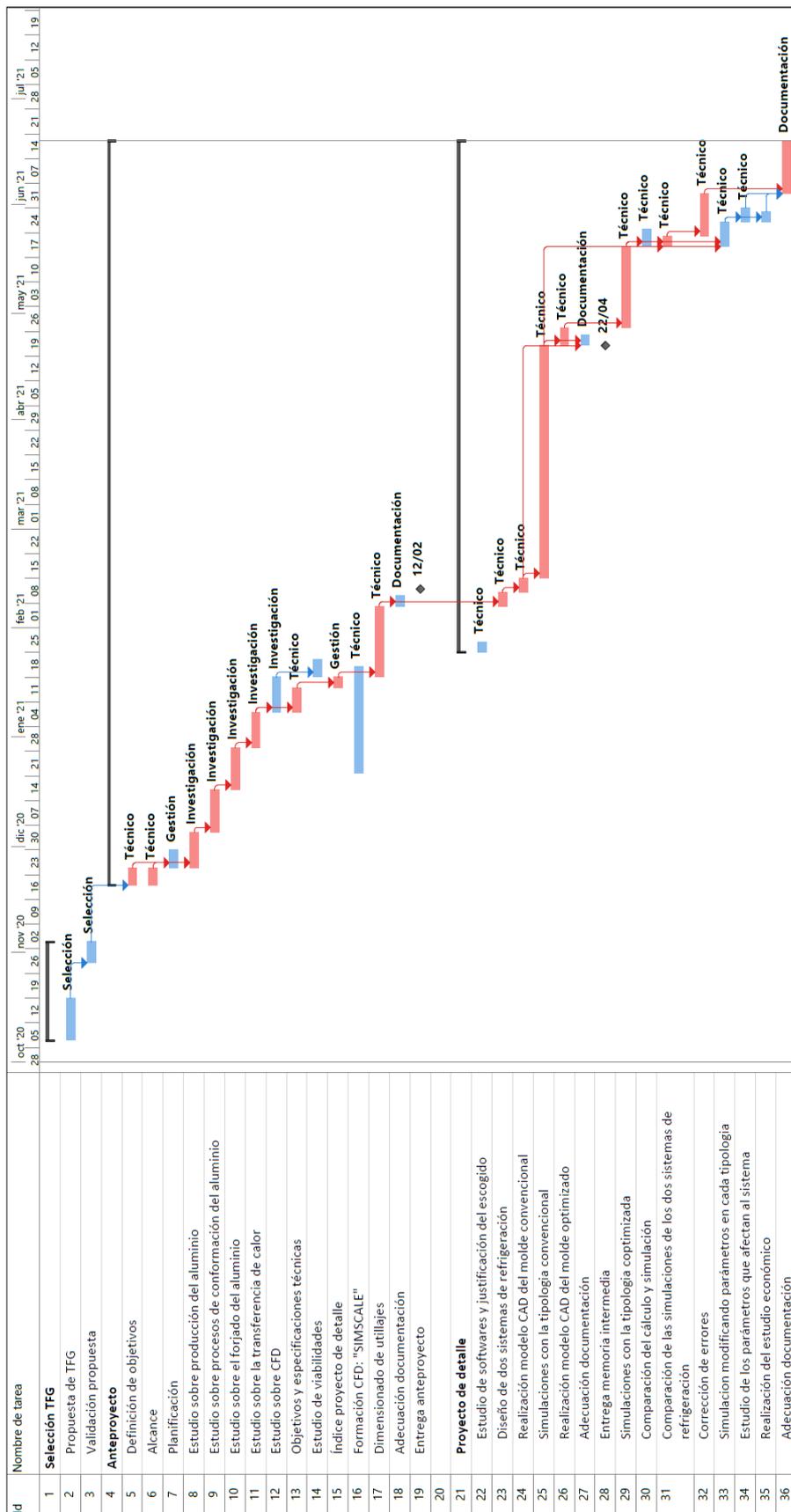


Fig. 8.2 Diagrama de Gantt del proyecto.



## 9. Impacto medioambiental

Este proyecto se basa en estudiar el comportamiento térmico de un molde mediante simulación numérica CFD. Por lo tanto, el impacto medioambiental que puede producir es mínimo.

Hay que tener en cuenta que el uso del ordenador consume energía eléctrica para el almacenaje de la batería y para la realización del trabajo que realizará el procesador, ventiladores, pantalla y todos los componentes que lo conforman. Aunque el ordenador no produce impacto medioambiental hay que tener en consideración aspectos como el proceso productivo del ordenador y qué impacto puede tener. Además, la energía eléctrica producida podría ser de fuentes de energía contaminante y por lo tanto, haciendo que el trabajo realizado tenga una huella ecológica.

Según Red Eléctrica de España (REE), la energía producida en todo el 2020 en el estado español (peninsular) has sido producida por las fuentes de energía que refleja la Fig. 9.1.

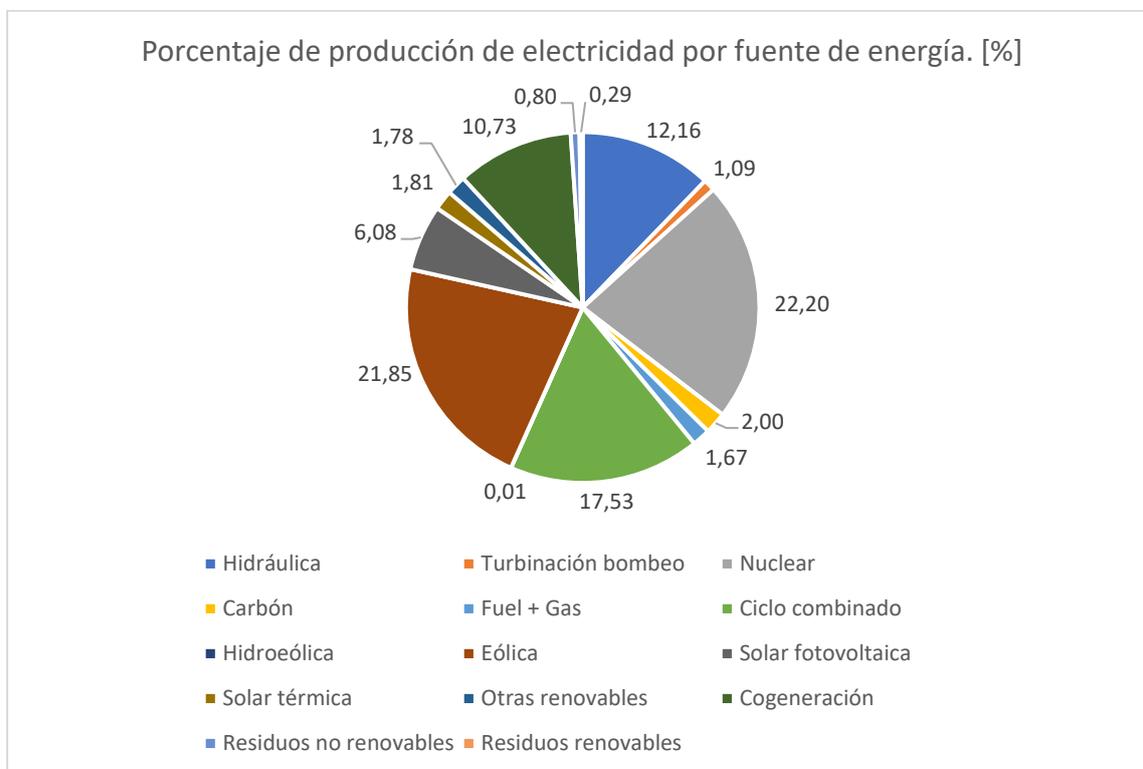


Fig. 9.1 Porcentaje de fuente de energía generadora en España en 2020. Fuente: REE.

Como se puede observar, la generación de energía en 2020 fue de un 31,53 % solo de energía solar y eólica. Este tipo de energía tiene un impacto positivo en el medio ambiente, ya que no generan emisiones ni residuos contaminantes. Además, si se tiene en cuenta que la energía nuclear es un método limpio (no genera emisiones, sino solo residuos nucleares) podríamos considerar que el 53,72 % de la energía eléctrica producida no tuvo impacto en emisiones de gases.

Por lo tanto, aunque es viable medioambientalmente cabe destacar que el consumo de energía que necesita el proyecto proviene de un 31,52 % de energías renovables y si consideramos otras energías limpias como hidráulica o nuclear podríamos llegar a concluir un porcentaje mayor.

## **10. Perspectiva de género**

Este proyecto se basa en el estudio de la simulación computacional de fluidos (CFD) aplicado a una mejora de la refrigeración de un molde sometido a un proceso de inyección de aluminio a alta presión (HPDC). La línea de este trabajo es de investigación donde no tiene aplicación el hecho de analizarlo con perspectiva de género. En cambio, en el resto de áreas de nuestra profesión si se deberían aplicar.

La perspectiva de género no debería ser un apartado más o norma a cumplir, sino más bien, un conjunto de matices que se aplican a nuestros pensamientos y acciones, ya sea dentro de nuestra profesión y fuera de ella. La inclusión y los principios de la igualdad de género son esenciales para la consecución de la igualdad real y el fin de la discriminación por género o cualquier otro motivo que se desvíe de la normatividad.

Se podría generar el debate sobre la relevancia en nuestra profesión, pero sobre todo no hay que olvidar que la desigualdad entre géneros esconde muchas otras más dinámicas de opresión, de relaciones asimétricas e injusticias en lo más profundo de sistema que habitamos.

Si nuestra disciplina persigue facilitar y mejorar la vida de los seres humanos en cierta medida, es imprescindible, por ejemplo, la garantía de acceso a los mejores avances en ingeniería al grueso de la población, no únicamente a un segmento reducido de las ciudadanas y ciudadanos. La igualdad real va mucho más allá de la igualdad salarial o la paridad y así se debe justificar nuestras acciones dentro y fuera de la profesión.



## **11. Conclusiones**

### **11.1. Diseño del sistema de refrigeración**

Los diseños de refrigeración fueron desarrollados a partir del diseño analítico del proceso de solidificación de la pieza, los cuales contemplan un cambio de fase en el aluminio fundido. A partir de la transferencia de calor total realizada en el proceso, se calcularon los caudales máxicos considerando el número de tuberías que se iban a implementar. Con estos, se estableció una velocidad de referencia y otras velocidades cercanas a ella con las que el fluido refrigerante circularía y así obtener el diámetro que necesitaba cada una de las tuberías para extraer todo el calor del molde. Seguidamente se calculó que el número de Reynolds era idóneo, ya que reflejaba un régimen turbulento en el fluido favoreciendo la transferencia de calor y ayudando a la refrigeración. Además, se calculó la temperatura de salida promedio del agua en la salida de las tuberías para todas las combinaciones de velocidad, diámetros y número de tuberías las cuales concuerdan bastante con el resultado de la simulación del molde convencional. Además, se tuvo en cuenta que el software de simulación no contempla cambios de fase, por lo que se decidió calcular una temperatura equivalente que permitiera al programa considerar la misma transferencia de calor que si tuviera en cuenta dicho cambio.

### **11.2. Simulación numérica**

Dentro de la configuración de la simulación se han realizado ajustes como establecer espacio cerrado a las tuberías del sólido y realizar un reconocimiento de los contactos. Dentro de la simulación se han tenido que ir definiendo parámetros como parte del procesamiento. Se ha definido el material de cada parte del sólido (junto con sus propiedades físicas), gravedad, y el tipo de simulación: en este proyecto es de tipo turbulenta y transitoria. Como condiciones iniciales se definen las condiciones de velocidad y temperatura en cada parte del sólido. Además, es necesario definir para la simulación turbulenta la energía cinética turbulenta y la ratio de disipación, los cuales son parámetros inexistentes físicamente, pero necesarios para la correcta configuración de la simulación turbulenta. Tras esto se definen las condiciones de contorno de la simulación, como tipo de paredes y velocidades de cada fluido.

Para realizar el mallado se tuvo en cuenta la necesidad de considerar las funciones de pared, ya que el resultado previo a este estudio no era físicamente correcto. Tras este estudio, se consiguieron las dimensiones de la malla que deberían usarse, aunque una vez analizada presentaba problemas de no ortogonalidad leves que no afectaban gravemente en la simulación.

Se vio que la transferencia de calor por el molde no se realizaba correctamente por lo que en el apartado de “numerics”, donde aparecen valores relacionados con la convergencia y estabilidad de la simulación, se modificaron las tolerancias de las entalpías sólidas haciéndolas mucho más pequeñas con tal de que el programa pudiera trabajar con más precisión.

Al realizar las primeras simulaciones se vio que el tiempo de simulación era muy elevado, llegando a superar el máximo permitido por el programa que son 8 horas. Esto era un inconveniente que hizo retrasar mucho el proyecto, ya que aparte de las horas perdidas en esperar a que la simulación acabara, presentaba problemas si el resultado no era correcto y se debía reiniciar la simulación. Al final, se tuvo que modificar el número de Courant en los parámetros de simulación, lo cual permitió unas simulaciones más rápidas a cambio de perder algo de precisión.

### **11.3. Enfriamiento del molde**

En cuanto a las simulaciones se puede observar que convergen y los residuales llegan a estabilizarse rápidamente para el final de todas las simulaciones. Aunque la simulación está correctamente desarrollada, las restricciones que pone el software de simulación han implicado una reducción de la precisión de la simulación en muchos ámbitos. Además, el software de simulación no contempla la energía liberada por la solidificación, el hecho de calcular una temperatura equivalente contrarrestaba esa energía que no se consideraba, pero es posible que la velocidad de la transferencia de calor no se dé correctamente y pueda influir negativamente en los resultados.

Analizando los resultados, se contempla un aumento considerable de la temperatura de salida en las tuberías de los moldes optimizados respecto los convencionales. La temperatura de salida decreta en función de lo alta que es la velocidad del fluido en su interior. En

cambio, un aumento de la velocidad o del diámetro aumentará la turbulencia y con eso, mejora la transferencia de calor. A primera instancia parecía que este aumento de la turbulencia provocaría un aumento de la temperatura de salida del agua, pero esto también es dependiente de otros parámetros. Realizar un diseño de circuito de refrigeración optimizado colocando las tuberías cercanas a los puntos de más emisión de calor de la bandeja ha conseguido una temperatura final mejorada. Esta temperatura final consigue disminuir unos 3 grados con la variante optimizada de tres y cinco tuberías. Aunque ambas se pueden dar como buenas, si se considera el coste de fabricación se podría decir que la de tres tuberías sería mejor a la de cinco, ya que el mecanizado de esta pieza sería más sencillo.

#### **11.4. Desarrollo del proyecto**

Aunque el manejo del software es muy intuitivo, el realizar una simulación numérica no es algo trivial porque existen muchos parámetros a tener en cuenta. Por esa complejidad y que el programa tiene restricciones con la licencia gratuita, el desarrollo del proyecto se vio afectado demorando su progreso. Aunque se ganó horas de trabajo gracias a la rapidez en la modelización de las geometrías, se perdió tiempo en la configuración de la simulación. Inicialmente la geometría no se cargaba diferenciando los sólidos por lo que se dedicó tiempo hasta saber que dependía de cómo se realizaba la cavidad en el molde. Seguidamente el programa no detectaba contactos entre paredes con lo que se dedicó un tiempo hasta encontrar que el problema era en el formato en el que se cargaba el archivo CAD. Tras esto, las primeras simulaciones presentaban problemas que incrementaban el tiempo de simulación hasta llegar a días. Finalmente, tras conocer los parámetros que incrementaban el tiempo de simulación se pudo corregir y realizar iterativamente simulaciones hasta encontrar soluciones adecuadas.



## 12. Referencias

- [1] R. Lumley, *Fundamentals of aluminium metallurgy*, Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2011.
- [2] S. A. Rusal, «All about aluminium,» 2017. [En línea]. Available: [https://www.aluminiumleader.com/production/how\\_aluminium\\_is\\_produced/](https://www.aluminiumleader.com/production/how_aluminium_is_produced/). [Último acceso: 21 Noviembre 2020].
- [3] J. Gomà, *Processos de Conformació: Apunts de l'assignatura.*, Mataró: Escola Superior Politècnica TecnoCampus, 2018.
- [4] E. J. Vinarcik, *High integrity die casting processes*, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [5] Y. A. Çengel y A. J. Ghajar, *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones*, Mc Graw Hill, 2011.
- [6] S. S. a. Engineering, «Numerical Simulation,» [En línea]. Available: <https://www.swantec.com/technology/numerical-simulation/>. [Último acceso: 30 Enero 2021].
- [7] Caendkölsch, «What is the difference between FEM, FVM and FDM?,» 4 Noviembre 2017. [En línea]. Available: <https://caendkoelsch.wordpress.com/2017/11/04/the-difference-between-fem-fdm-and-fvm/>. [Último acceso: 30 Enero 2021].
- [8] L. A. Ferreira y A. R. Fonseca, *Graphical interface for electromagnetic problem solving using meshless methods*, Minas Gerais (Brazil): Brazilian Microwave and Optoelectronics Society, 2015.

- [9] Simscale, «What is a mesh?,» [En línea]. Available: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/preprocessing/what-is-a-mesh/>. [Último acceso: 01 02 2021].
- [10] J. Tu, G.-H. Yeoh y C. Liu, *Computational Fluid Dynamics: A practical approach*, United Kingdom: Butterworth-Heinemann, 2018.
- [11] R. A. Miller, *Gating Manual*, Arlington Heights, Illinois: North American Die Casting Association, 2016.
- [12] K. Vékony, *Apuntes de Ingeniería de Fluidos*, Mataró, 2018.
- [13] Simscale, «Turbulence: Which Model Should I Select for My CFD Analysis?,» 30 01 2021. [En línea]. Available: <https://www.simscale.com/blog/2017/12/turbulence-cfd-analysis/>. [Último acceso: 14 04 2021].
- [14] D. C. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD*, Anaheim LA: DCW Industries, 1998.
- [15] Simscale, «What is yplus?,» November 20. [En línea]. Available: <https://www.simscale.com/forum/t/what-is-y-yplus/82394>. [Último acceso: 19 04 2021].