



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior

Trabajo Fin de Grado

ANÁLISIS 2D Y 3D DE INTERCAMBIADOR DE CALOR ENTERRADO VERTICAL

Alumno: Alejandro Jesús Extremera Jiménez

Tutores: Prof. D. Fernando Antonio Cruz Peragón
Prof. D. Cándido Gutiérrez Montes

Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Junio, 2017



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don Fernando Antonio Cruz Peragón, tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: ANÁLISIS 2D Y 3D DE INTERCAMBIADOR DE CALOR ENTERRADO VERTICAL, que presenta Alejandro Jesús Extremera Jiménez, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Junio de 2017

El alumno:

Alejandro Jesús Extremera Jiménez

Los tutores:

Fernando Antonio Cruz Peragón

Cándido Gutiérrez Montes

Índice

Listado de Figuras	7
Listado de Tablas	13
Glosario	15
Resumen	17
CAPÍTULO 1: MOTIVACIÓN, OBJETIVOS Y ANTECEDENTES.....	19
1.1 Actualidad.....	19
1.2 Motivación	20
1.3 Objetivos del proyecto	21
1.4 Antecedentes.....	22
1.4.1 Introducción a la geotermia.....	22
1.4.2 Historia de la geotermia.....	31
CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS	35
2.1 Materiales	35
2.2 Método experimental	40
2.3 Método de cálculo de características del terreno	42
2.4 Descripción del problema	44
2.5 Método numérico.....	47
2.5.1 Discretización	48
2.5.2 La ecuación de continuidad	50
2.5.3 La ecuación de cantidad de movimiento	50
2.5.4 La ecuación de la energía.....	51
2.5.5 Modelos de turbulencia.....	52
2.5.6 Modelo $k-\omega$ SST	54
2.6 Iniciación del problema físico.....	55
2.7 Post-procesado de los datos	57
CAPÍTULO 3: RESULTADOS.....	59
3.1 Resolución numérica del problema.....	59
3.1.1 Diseño de la geometría.....	59
3.1.2 Generación de la malla.....	62
3.2 Resultados de los modelos 2D	73
3.3 Resultados del modelo 3D	77
3.4 Fiabilidad de los resultados	85
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES.....	87
4.1 Desarrollos futuros.....	88

REFERENCIAS	89
ANEXO A: MÉTODOS DE ACOPLAMIENTO EN ANSYS FLUENT (<i>SOLVER</i>).....	91
ANEXO B: FUNCIONES DEFINIDAS POR EL USUARIO (UDF).....	93
B.1 Definición y estructura	93
B.2 Limitaciones.....	94
B.3 Código de UDFs empleadas.....	95
ANEXO C: COMPARACIÓN DE LA TRANSMISIÓN DE CALOR DE LA ZONA EN U RESPECTO A LA LONGITUD TOTAL.....	97
C.1 Correlaciones empíricas en convección.....	97
C.2 Calor transmitido entre agua y pared exterior del tubo.....	99
ANEXO D: RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES	101

Listado de Figuras

Figura 1.1: Temperaturas subterráneas en una perforación hecha al sur de Wetzlar, sin injerencia de una bomba de calor [20].	23
Figura 1.2: Esquema de una bomba de calor de fuente terrestre [20].	24
Figura 1.3: Bombas para calor de aguas subterráneas (doublette) [20].	26
Figura 1.4: Intercambiador de calor horizontal terrestre (estilo europeo) [20].	27
Figura 1.5: Intercambiador de calor terrestre de tipo espiral (Estados Unidos) [20].	27
Figura 1.6: Intercambiador de calor de perforación (cañería doble tipo U) [20].	28
Figura 1.7: Cortes de diferentes tipos de intercambiadores de calor en perforaciones. [20]	29
Figura 1.8: Pilares energéticos y un corte de un pilar con 3 "loops" [20].	29
Figura 1.9: Bomba de calor utilizando agua de una mina (Ejemplo en Ehrenfriedersdorf, Alemania, una mina de estaño abandonada) [20].	30
Figura 1.10: Principales países productores de energía eléctrica geotérmica (potencia instalada en el año 2000). (Fuente: Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM).	34
Figura 1.11: Producción de calor por países (potencia instalada en el año 2000). (Fuente: Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM).	34
Figura 2.1: Pantalla de control del sistema antes del inicio del ensayo [1].	35
Figura 2.2: Software para obtención del informe final del ensayo [1].	36
Figura 2.3: Esquema de principio del equipo desarrollado [1].	37
Figura 2.4: Sistema electrónico de control y adquisición de datos [1].	38
Figura 2.5: Maquina TRT montada sobre remolque para su transporte [1].	39
Figura 2.6: Página web para la monitorización remota a través de Internet antes del inicio del ensayo [1].	40
Figura 2.7: Representación de la temperatura del terreno inalterado.	41
Figura 2.8: Representación de la temperatura de entrada y salida del agua en función.	42
Figura 2.9: Vistas anterior y posterior del equipo desarrollado mostrando circuitos hidráulico y eléctrico [1].	42
Figura 2.10: Esquema de la instalación.	45
Figura 2.11: Curvas de temperatura de entrada y salida del agua empleando código de la UDF.	46
Figura 2.12: Puntos de temperatura del terreno inalterado empleando código de la UDF.	47
Figura 2.13: Caras y centroides de celdas colindantes.	49
Figura 2.14: Menú <i>Graphics and Animations</i> del menú principal de FLUENT. Imagen obtenida de FLUENT.	57
Figura 2.15: Recorte del menú <i>Plots</i> del menú principal de FLUENT. Imagen obtenida de FLUENT.	58
Figura 2.16: Recorte del menú <i>Reports</i> del menú principal de FLUENT. Imagen obtenida de FLUENT.	58
Figura 3.1: Diseño paso a paso de la geometría en 2D. Imágenes obtenidas de ICEM.	60
Figura 3.2: Diseño paso a paso de la geometría en 3D. Imágenes obtenidas de ICEM.	61

Figura 3.3: Geometría adicional correspondiente al terreno.....	62
Figura 3.4: Bloques empleados para definir la malla.....	64
Figura 3.5: Bloques asociados y dispuestos sobre la geometría.....	64
Figura 3.6: Malla estructurada de 1000 nodos.....	65
Figura 3.7: Malla estructurada de 8500 nodos.....	66
Figura 3.8: Malla triangular de 1000 nodos.....	67
Figura 3.9: Malla triangular de 8500 nodos.....	68
Figura 3.10: Conversión de bloques de 2D a 3D a lo largo del eje z.....	69
Figura 3.11: Bloques del tubo en U.....	70
Figura 3.12: Bloques dispuestos y asociados a la geometría adicional.....	70
Figura 3.13: Malla completa en tres dimensiones.....	71
Figura 3.14: Extremos de la malla en el plano YZ.....	71
Figura 3.15: Detalle de la malla a 130 m de profundidad aproximadamente.....	72
Figura 3.16: Distribución de los casos simulados en el vídeo.....	74
Figura 3.17: Captura de vídeo comparativo de los diferentes modelos 2D transcurridos 6500s.....	74
Figura 3.18: Captura de vídeo comparativo de los diferentes modelos 2D transcurridos 259200s.....	75
Figura 3.19: Puntos situados en zonas clave de la geometría.....	75
Figura 3.20: Error medio calculado a partir de 21 puntos en cada instante de tiempo.....	76
Figura 3.21: Error cuadrático medio calculado a partir de 21 puntos en cada instante de tiempo.....	76
Figura 3.22: Contornos de temperatura de todos los elementos inicialmente.....	78
Figura 3.23: Gráfica con datos experimentales y simulados de la temperatura de salida del agua.....	78
Figura 3.24: Gráfica con datos experimentales y simulados de la temperatura de salida del agua entre 0 y 4000s.....	79
Figura 3.25: Gráfica con datos experimentales y simulados de la temperatura de salida del agua entre 50000 y 230000s.....	79
Figura 3.26: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, Z = 0m), t = 7175s.....	80
Figura 3.27: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, Z = 0m), t = 53200s.....	80
Figura 3.28: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, Z = - 40m, t = 7175s.....	81
Figura 3.29: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, Z = - 40m, t = 53200s.....	81
Figura 3.30: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, Z = - 80m, t = 7175s.....	81
Figura 3.31: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, Z = - 80m, t = 53200s.....	82
Figura 3.32: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, Z = - 120m, t = 7175s.....	82
Figura 3.33: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, Z = - 120m, t = 53200s.....	82
Figura 3.34: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, t = 7175s.....	83
Figura 3.35: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, t = 53200s.....	83

Figura 3.36: Distribución de temperaturas en la mitad de la pieza (Plano YZ, $X=0$), $t = 24000s$	84
Figura 3.37: Distribución de temperaturas en la mitad de la pieza (Plano YZ, $X=0$), $t = 259200s$	84
Figura 3.38: Gráfica con datos experimentales y simulados empleando $\Delta t=1s, 5s$ entre 0 y 1300s.....	85
Figura 3.39: Gráfica con datos experimentales y simulados empleando $\Delta t=1s, 25s$ entre 1400 y 3000s.	86
Figura 3.40: Gráfica con datos experimentales y simulados empleando $\Delta t=1s, 25s$ entre 11000 y 14000s.	86
Figura A.1: Esquema del procedimiento a seguir para la elección de un <i>solver</i> [19]. ..	92
Figura D.1: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, $Z = 0m$), $t = 360s$	101
Figura D.2: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, $Z = 0m$), $t = 1300s$	101
Figura D.3: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, $Z = 0m$), $t = 7175s$	102
Figura D.4: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, $Z = 0m$), $t = 15000s$	102
Figura D.5: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, $Z = 0m$), $t = 24000s$	102
Figura D.6: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, $Z = 0m$), $t = 53200s$	103
Figura D.7: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, $Z = 0m$), $t = 146500s$	103
Figura D. 8: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, $Z = 0m$), $t = 237000s$	103
Figura D.9: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, $Z = 0m$), $t = 259200s$	104
Figura D.10: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -40m$, $t = 360s$	104
Figura D.11: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -40m$, $t = 1300s$	104
Figura D.12: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -40m$, $t = 7175s$	105
Figura D.13: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -40m$, $t = 15000s$	105
Figura D.14: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -40m$, $t = 24000s$	105
Figura D.15: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -40m$, $t = 53200s$	106
Figura D.16: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -40m$, $t = 146500s$	106
Figura D.17: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -40m$, $t = 237000s$	106
Figura D.18: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -40m$, $t = 259200s$	107

Figura D.19: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -80\text{m}$, $t = 360\text{s}$.	107
Figura D.20: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -80\text{m}$, $t = 1300\text{s}$.	107
Figura D.21: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -80\text{m}$, $t = 7175\text{s}$.	108
Figura D.22: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -80\text{m}$, $t = 15000\text{s}$.	108
Figura D.23: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -80\text{m}$, $t = 24000\text{s}$.	108
Figura D.24: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -80\text{m}$, $t = 53200\text{s}$.	109
Figura D.25: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -80\text{m}$, $t = 146500\text{s}$.	109
Figura D.26: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -80\text{m}$, $t = 237000\text{s}$.	109
Figura D.27: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -80\text{m}$, $t = 259200\text{s}$.	110
Figura D.28: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -120\text{m}$, $t = 360\text{s}$.	110
Figura D.29: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -120\text{m}$, $t = 1300\text{s}$.	110
Figura D.30: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -120\text{m}$, $t = 7175\text{s}$.	111
Figura D.31: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -120\text{m}$, $t = 15000\text{s}$.	111
Figura D.32: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -120\text{m}$, $t = 24000\text{s}$.	111
Figura D.33: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -120\text{m}$, $t = 53200\text{s}$.	112
Figura D.34: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -120\text{m}$, $t = 146500\text{s}$.	112
Figura D.35: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -120\text{m}$, $t = 237000\text{s}$.	112
Figura D.36: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -120\text{m}$, $t = 259200\text{s}$.	113
Figura D.37: Distribución de temperaturas en la mitad de la pieza (Plano YZ, $X=0$), $t = 360\text{s}$.	113
Figura D.38: Distribución de temperaturas en la mitad de la pieza (Plano YZ, $X=0$), $t = 24000\text{s}$.	113
Figura D.39: Distribución de temperaturas en la mitad de la pieza (Plano YZ, $X=0$), $t = 146500\text{s}$.	114
Figura D.40: Distribución de temperaturas en la mitad de la pieza (Plano YZ, $X=0$), $t = 259200\text{s}$.	114
Figura D.41: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, $t = 360\text{s}$.	114
Figura D.42: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, $t = 1300\text{s}$.	115
Figura D.43: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, $t = 7175\text{s}$.	115

Figura D.44: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, $t = 15000s$	115
Figura D.45: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, $t = 24000s$	116
Figura D.46: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, $t = 53200s$	116
Figura D.47: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, $t = 146500s$	116
Figura D.48: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, $t = 237000s$	117
Figura D.49: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, $t = 259200s$	117

Listado de Tablas

Tabla 2.1: Características principales de los sensores de medida [1].	38
Tabla 2.2: Medidas de los elementos dispuestos en el esquema.....	45
Tabla 2.3: Propiedades conocidas de los materiales [2] [9].....	45
Tabla 2.4: Condiciones de contorno en modelo 2D.....	46
Tabla 2.5: Condiciones de contorno en modelo 3D.....	46
Tabla 2.6: Pasos a seguir para iniciar el problema físico en FLUENT.....	56
Tabla 3.1: Características de los segmentos de los bloques copiando éstas a todos los paralelos.....	73

Glosario

Símbolos		
Símbolo	Descripción	Unidad
a	Aceleración	m/s^2
A	Área	m^2
C_p	Calor específico volumétrico o capacitancia a presión constante	$J/kg\ K$
c_p	Calor específico a presión constante	$J/kg\ K$
c_v	Calor específico a volumen constante	$J/kg\ K$
D	Diámetro	m
e	Energía interna	J
F	Fuerza	N
f_m	Fuerzas volumétricas y de gravedad por unidad de masa	N/kg
g	Gravedad	m/s^2
h	Coeficiente de película	$W/m^2\ K$
k	Energía cinética turbulenta Coeficiente de conducción	m^2/s^2 $W/m\ K$
L	Longitud	N
m	Masa	kg
p	Presión	Pa
P	Presión media	Pa
p'	Presión fluctuante	Pa
Q	Calor aportado	W
q	Calor transferido	W
q_g	Calor generado por unidad de tiempo	W
r_b	Radio de la sonda	m
R_b	Resistencia térmica del terreno	m^2K/W
t	Tiempo	s
T	Temperatura	K
T'	Temperatura fluctuante	K
T_f	Temperatura media del fluido	K
T_{sur}	Temperatura media del suelo inalterado	K
v	Velocidad	m/s
V	Velocidad media	m/s
v'	Velocidad fluctuante	m/s
V_{celda}	Volumen de una celda computacional	m^3
x, y, z	Coordenadas rectangulares del espacio	m
v_x, v_y, v_z	Velocidad en la dirección x, y, z respectivamente	m/s
Δt	Intervalo de tiempo	s
Δx	Intervalo espacial	m
$\beta, \gamma, \beta^*, \sigma_{k1}, \sigma_{\omega1}, \sigma_{\omega2}$	Constantes del modelo $k - \omega$	
$\sigma_k, \sigma_\epsilon, C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$	Constantes del modelo $k - \epsilon$	

Símbolos griegos

ρ	Densidad	kg/m^3
μ	Viscosidad dinámica	kg/m s
μ_t	Viscosidad turbulenta	kg/m s
ν	Viscosidad cinemática	m^2/s
ω	Tasa de disipación específica	s^{-1}
ε	Disipación de la energía cinética	m^2/s^3
θ	Temperatura media	K
α	Difusividad	m^2/s
α_T	Difusividad viscosa	m^2/s
γ	Constante de Euler	
$\emptyset$	Magnitud fluida	
$\emptyset_f$	Flujo de $\emptyset$ a través de la cara f	
$\emptyset_v$	Disipación viscosa	
$\bar{\tau}'$	Tensor de esfuerzos viscosos	

Numeros adimensionales

CFL	Número de Courant	
Nu	Número de Nusselt	
Pr	Prandtl	
Re	Número de Reynolds	

Siglas/Abreviaturas

2D	Dos dimensiones	
3D	Tres dimensiones	
CAD	Computer-Aided Design	
CFD	Computational Fluid Dynamics	
GHE	Geothermal Heat Exchanger	
ICEM	Integrated Computer Engineering and Manufacturing	
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes	
STL	Standard Triangle Language	
UDF	User-Defined Function	
UDS	User-Defined Scalar	
TRT	Thermal Response Tests	

Resumen

El presente trabajo está basado en la utilización de un código comercial de fluidodinámica computacional (CFD) para la simulación de un intercambiador de calor geotérmico vertical. Este trabajo se centra en simular la transferencia térmica a partir de la capacitancia y conductividad del terreno y de modelos computacionales que emplean datos experimentales como condiciones de contorno, tomados por un equipo que permite realizar ensayos de respuesta térmica del terreno (TRT).

El lector encontrará dentro de este trabajo una breve explicación de las ecuaciones matemáticas que gobiernan el intercambio de calor y el comportamiento de los fluidos, así como la mención de algunos modelos, métodos y estrategias que los programas de cálculo tienen implementados para predecir los efectos que produce la turbulencia.

Una gran parte del tiempo dedicado a la realización de este proyecto se destinó a la comparación de diferentes modelos a aplicar, empleando mallas con celdas triangulares y cuadrangulares así como variando el número de nodos.

Una vez elegida la malla en 2D, se aplicó una extrusión de ésta y otras operaciones para realizar el modelo en 3D y se hicieron muchas simulaciones para determinar que la temperatura de salida del agua se correspondía con los datos experimentales de los que se dispone. El modelo en tres dimensiones permite caracterizar el terreno y se podrá emplear para realizar todo tipo de cálculos, por ejemplo, la eficiencia con el paso de los años o la comparación del rendimiento estacional con un sistema aire-aire.

En resumen, el empleo de CFD resulta muy interesante para el diseño en ingeniería. Es una herramienta fácil de usar, con la que se puede abordar un amplio número de problemas y que garantiza, en general, buenos resultados.

CAPÍTULO 1

MOTIVACIÓN, OBJETIVOS Y ANTECEDENTES

1.1 Actualidad

En las sociedades más avanzadas, el ser humano ha estado utilizando una gran cantidad de energías no renovables provocando un cambio muy rápido en el clima y agotando los recursos energéticos disponibles.

Tras darse cuenta de esta amenazante realidad, se ha iniciado la búsqueda de energías renovables que no pongan en peligro el frágil equilibrio existente en nuestro planeta.

En la actualidad, se ha encontrado un recurso inagotable, limpio y respetuoso con el medio ambiente, la Energía Geotérmica. A diferencia de la mayoría de las fuentes de energía renovables, la geotérmica no depende del clima, del viento ni de la radiación del sol, sino que radica en la diferencia de temperatura que existe entre el interior de la tierra y su superficie. Por tanto, está disponible 24 horas al día, 365 días al año.

La definición más sencilla y precisa de Energía Geotérmica sería la energía almacenada en forma de calor bajo la corteza terrestre.

Se pueden distinguir distintos tipos de energía geotérmica con base en la temperatura a la que se encuentra la corteza terrestre.

La energía geotérmica de baja y muy baja temperatura (entre 17º y 90º). Como su propio nombre indica, se basa en el aprovechamiento no tanto de las altas temperaturas de la tierra que sólo se dan en lugares muy concretos sino en la estabilidad térmica del terreno a profundidades superiores a 20 m, cercana a los 17º. Su contenido de calor es insuficiente para producir energía eléctrica pero este tipo de energía de baja temperatura puede ser aprovechada para climatizar un edificio y obtener agua caliente sanitaria gracias a que mantiene una temperatura estable tanto en invierno como en verano. Para el diseño de instalaciones que aprovechen este recurso es necesario conocer las

características térmicas del suelo (conductividad, difusividad y temperatura del suelo inalterado, entre otras), a partir de las cuales se dimensiona el intercambiador geotérmico (profundidad, diámetro y número de sondas).

También existe la geotérmica de media y alta temperatura (entre 90° y más de 150°). Sólo es posible en zonas del planeta con condiciones especiales de actividad tectónica, en las que se aprovecha la alta temperatura de las rocas y del agua de los acuíferos para la obtención de electricidad mediante el uso de ciclos combinados.

1.2 Motivación

La fluidodinámica computacional es una herramienta muy potente para el análisis, cálculo y diseño de sistemas en donde hay transporte de masa, energía y cantidad de movimiento, teniendo, por tanto, múltiples campos de aplicación, como por ejemplo: cálculo estructural, cinemática y dinámica de mecanismos, cálculos térmicos, cálculos electrostáticos, análisis de fluidos, análisis de vibraciones, análisis de impacto, etc. El uso de los métodos numéricos para resolver problemas complejos de ingeniería presenta una serie de ventajas muy interesantes:

- Se pueden simular geometrías muy complejas.
- Se pueden resolver una amplia gama de problemas donde a veces las restricciones son bastante severas.
- Es posible optimizar unidades de proceso sin necesidad de construir prototipos.
- Ahorro de tiempo y dinero.

No todo son ventajas en la utilización de la fluidodinámica computacional. Los principales inconvenientes asociados al uso de CFD son:

- Errores por el propio método de cálculo.
- Se necesita experiencia y buen criterio para construir un buen modelo.

- Es indispensable tener un ordenador potente y software fiable.
- Algunas simulaciones (sobre todo si se simula en transitorio) pueden durar semanas e incluso meses.
- Puede ser largo y laborioso preparar e interpretar los resultados.

En el caso de un intercambiador de calor enterrado habrá transporte de energía entre el fluido y el terreno, así como transporte de masa, cantidad de movimiento y de energía del fluido refrigerado en la tubería.

Las aplicaciones de bomba de calor agua-agua unidas a intercambiadores enterrados es una práctica habitual en países centroeuropeos, no así en los países de la cuenca mediterránea, donde las temperaturas más suaves permiten el uso de equipos que emplean el aire en la unidad exterior. Sin embargo, este tipo de instalaciones permiten el uso de una energía limpia y considerada como renovable.

1.3 Objetivos del proyecto

El objetivo de este trabajo es modelar el funcionamiento de un intercambiador de calor geotérmico vertical (GHE) para una configuración determinada mediante técnicas computacionales. Para ello, se introduce a una geometría mallada los datos experimentales de entrada de un ensayo TRT, obteniéndose como resultado la temperatura del flujo de salida a lo largo del tiempo. El ajuste de la salida del modelo con dichos datos indicará si los coeficientes característicos (conductividad, capacidad calorífica y densidad del terreno y relleno, resistencia térmica del relleno) son adecuados o no. Para la ejecución de este trabajo es fundamental el mallado de la geometría y la imposición de las condiciones de contorno.

En resumen, se pretende simular un intercambiador de calor enterrado vertical para determinar si los coeficientes característicos del terreno son adecuados.

Para cumplir con este propósito es necesario cumplir con los objetivos específicos tales como:

- a) Adquirir un buen manejo de programas malladores y para simular.
- b) Realizar varios modelos en 2D como iniciación a modelos computacionales y estimación de la malla que mejor se adecúe al problema.
- c) Realizar el modelo en 3D a partir del cual se obtiene la temperatura de salida del fluido.
- d) Introducir los datos experimentales de entrada al modelo computacional.
- e) Comparar y valorar los datos de salida obtenidos con los experimentales.

1.4 Antecedentes

1.4.1 Introducción a la geotermia

Aproximadamente los primeros 100 m bajo tierra son muy aptos para proveer y almacenar energía térmica. El cambio de la temperatura climática de las estaciones se reduce a una temperatura constante entre 10 y 20 metros de profundidad (Figura 1.1), y a una mayor profundidad las temperaturas aumentan de acuerdo a la gradiente geotérmica con un promedio de 3°C por cada 100 m de profundidad [20].

Los métodos principales para hacer uso de esta energía son:

- Bombas para calor de fuente terrestre (Bombas de calor geotérmicas)
- Almacenamiento de energía térmica subterránea (UTES)

Esta representación dará una visión general de estos métodos, su posible aplicación y sistemas, y algunos ejemplos de realizaciones exitosas.

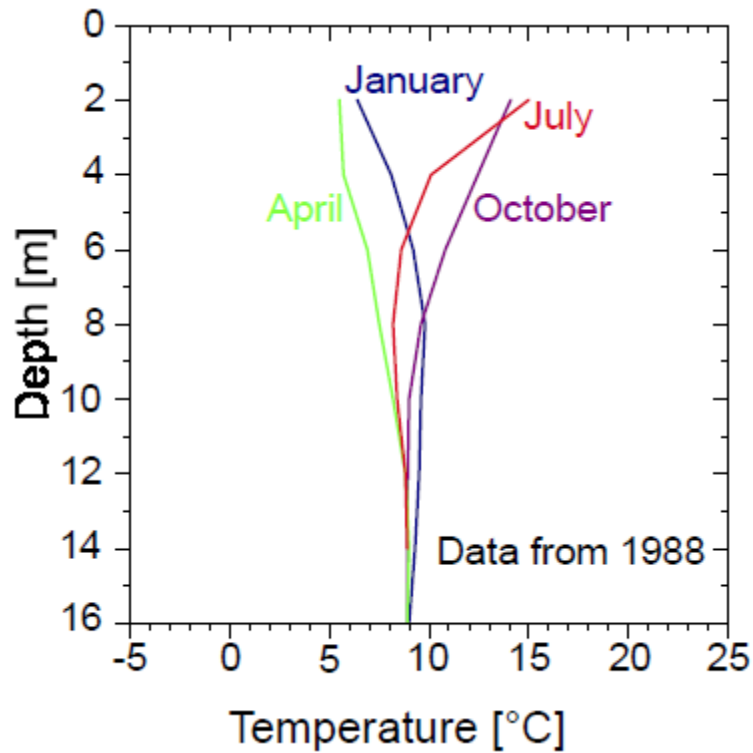


Figura 1.1: Temperaturas subterráneas en una perforación hecha al sur de Wetzlar, sin injerencia de una bomba de calor [20].

La eficiencia de una instalación que emplea el calor existente en el subsuelo como intercambiador de calor está condicionada por la temperatura de éste según una función “f”, tal que:

$$T_{sp} = f(T_{ss}, z, k, C_e, t) \quad (1-1)$$

Donde

$T_{sp} \equiv$ Temperatura del suelo a una determinada profundidad

$T_{ss} \equiv$ Temperatura del suelo en superficie

$z \equiv$ Profundidad bajo la superficie

$k \equiv$ Conductividad térmica del terreno

$C_e \equiv$ Calor específico del terreno

$t \equiv$ Tiempo de intercambio de calor

De este modo, las aplicaciones van a depender de la temperatura del terreno y de la capacidad del mismo de transmitir o absorber el calor que absorberá o cederá el espacio a climatizar. Este calor será conducido, desde o hasta el terreno, por un agente intercambiador de calor que, en la inmensa mayoría de los casos, es un fluido con unas características especiales como su bajo punto de congelación y su capacidad de mantener el calor, es decir, una baja inercia térmica.

La Figura 1.2 muestra el principio básico de una bomba de calor de fuente terrestre. Se puede extraer el calor del subsuelo a una temperatura relativamente baja. La bomba de extracción de este calor aumenta la temperatura que es utilizada en un sistema de calefacción. Para cada kWh de calefacción, se requiere sólo 0,25-0,3 kWh de electricidad para operar el sistema. Para refrigerar durante el verano se puede invertir el sistema, y el calor proveniente de la refrigeración de edificios se puede inyectar en la tierra para refrigerar con un alto grado de efectividad el espacio.

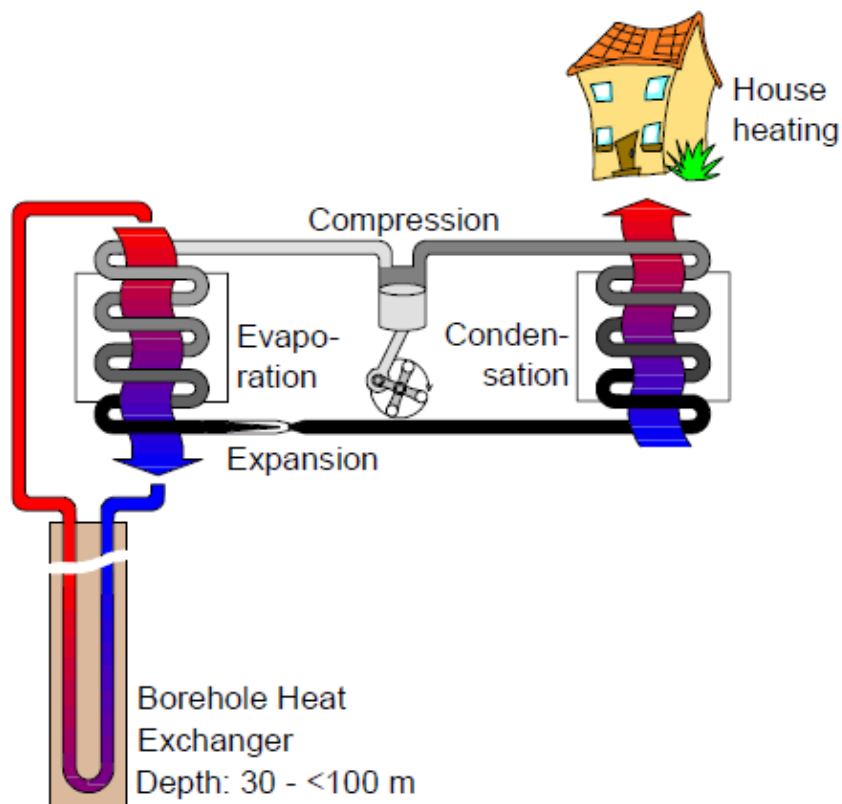


Figura 1.2: Esquema de una bomba de calor de fuente terrestre [20].

El sistema de tierra une a la bomba de calor con el subsuelo y permite la introducción o la extracción de calor a la tierra. Estos sistemas se pueden clasificar generalmente como sistemas abiertos y cerrados:

- Sistemas abiertos: se utiliza agua subterránea como portador de calor y se lleva directamente a la bomba de calor.
- Sistemas cerrados: intercambiadores de calor son ubicados en el subsuelo (ya sea en forma horizontal, vertical u oblicua) y un medio portador de calor circula dentro de los intercambiadores de calor, transportando el calor de la tierra a la bomba y viceversa.

El sistema no siempre se puede atribuir exactamente a una de las categorías anteriormente mencionadas; hay ejemplos como agua en minas, aguas en túneles o pozos en forma de columnas. Para elegir el sistema más apropiado para una instalación específica, hay que considerar varios factores: las características geológicas e hidrogeológicas del subsuelo (para los sistemas abiertos debe haber suficiente permeabilidad), área y utilización en la superficie (sistemas horizontales y cerrados requieren de un cierto área), la existencia de fuentes potenciales de calor como las minas, y las características de calefacción y refrigeración de los edificios. En la fase del diseño se requieren datos más exactos para seleccionar uno de los sistemas mencionados. Hay que medir el sistema de tierra de tal forma que se obtenga un rendimiento óptimo con costos mínimos.

1.4.1.1 *Sistemas abiertos*

El aspecto técnico más importante de los sistemas abiertos son pozos de agua subterráneos para extraer o introducir agua de/hacia capas productoras de agua en el subsuelo ("aquifers"). En la mayoría de los casos, se requieren dos pozos ("doublette", figura 1.3), uno para extraer el agua subterránea y otro para volver a introducir el agua al mismo "aquifer" del cual fue extraído.

Con sistemas abiertos se puede explotar una fuente poderosa de calor a un costo comparativamente bajo. En cambio, pozos con agua subterránea

requieren cierto mantenimiento y, generalmente, los sistemas abiertos son ubicados en lugares con "acuíferos" apropiados. Los requisitos principales son:

- Suficiente permeabilidad para permitir la obtención de la cantidad deseada de agua subterránea a poca profundidad.
- Una buena característica química del agua subterránea, es decir, poco contenido de hierro, para evitar problemas de sarro, obstrucción y corrosión. Se suele utilizar sistemas abiertos para instalaciones de mayor envergadura.

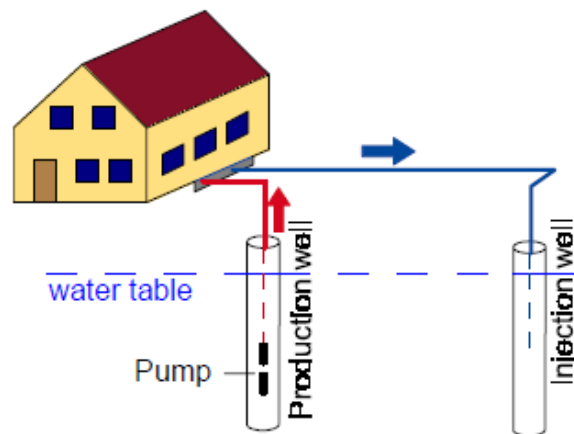


Figura 1.3: Bombas para calor de aguas subterráneas (doublette) [20].

1.4.1.2 Sistemas cerrados

a) Horizontal

El sistema cerrado más fácil de instalar es el intercambiador de calor terrestre horizontal (sinónimo: colector de calor horizontal, 'loop' horizontal). Debido a restricciones en el área disponible, en Europa Central y Occidental se instalan las cañerías individuales en forma relativamente densa, conectadas en serie o en paralelo (Figura 1.4).

Se han desarrollado algunos intercambiadores de calor de fuente terrestre especiales para ahorrar espacio con los colectores de calor de fuente terrestre explotando un área más pequeña con el mismo volumen. Estos colectores son

los más apropiados para sistemas de bombas de calor para calefaccionar o refrigerar, donde la recarga de temperatura natural de la tierra no es vital. Formas en espirales (Figura 1.5) son muy populares en los EE.UU., principalmente colectores "ondulantes", colocados en forma horizontal en una amplia zanja o en forma vertical en una zanja reducida.

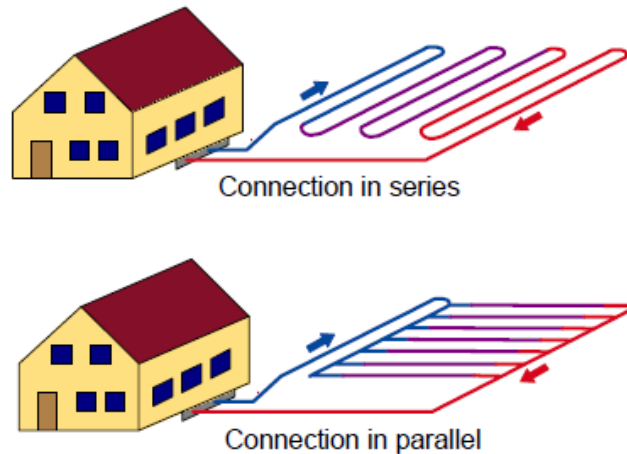


Figura 1.4: Intercambiador de calor horizontal terrestre (estilo europeo) [20].

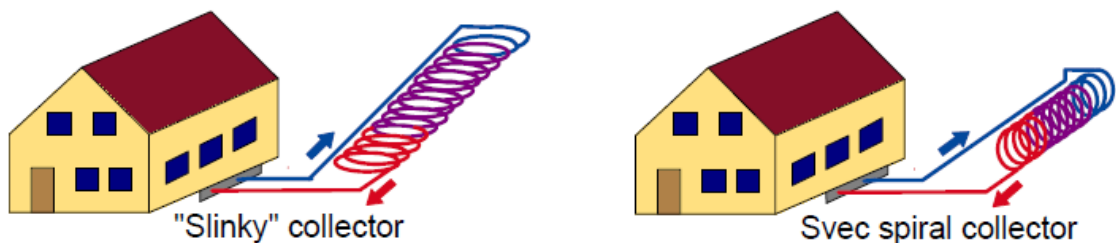


Figura 1.5: Intercambiador de calor terrestre de tipo espiral (Estados Unidos) [20].

La recarga térmica principal para todos los sistemas horizontales la provee principalmente la radiación solar sobre la superficie de la tierra. Es importante no cubrir la superficie sobre el colector de calor de tierra.

b) Vertical

Debido a que la temperatura a cierta profundidad (cerca de 15 a 20 m) permanece constante durante el año y debido a la necesidad de instalar una capacidad suficiente de intercambio de calor bajo un área específica, los intercambiadores de calor terrestres verticales (intercambiadores de calor en perforaciones) son ampliamente favorecidos. En un intercambiador de calor de tipo estándar en una perforación, se instalan las cañerías plásticas de polietileno o polipropileno en perforaciones y el espacio restante en la perforación se llena con material que se pueda bombear.

Se han utilizado y evaluado distintos tipos de intercambiadores de calor en perforaciones. Hay dos conceptos básicos posibles (fig. 1.7):

- Cañerías en forma de U, que consisten de un par de cañerías rectas unidas por una curva de 180° en el fondo. Una, dos o incluso tres de este tipo de cañerías en forma de U se instalan en una perforación. La ventaja de esta cañería tipo U es su bajo costo. En Europa, las cañerías tipo doble U son los intercambiadores de calor usados más frecuentes en perforaciones.
- Cañerías coaxiales (concéntricas), ya sea simples o con dos conductos rectos de diferente diámetro, o en una configuración compleja.

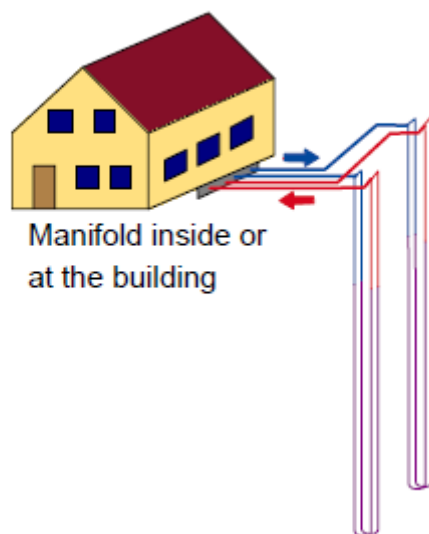


Figura 1.6: Intercambiador de calor de perforación (cañería doble tipo U) [20].

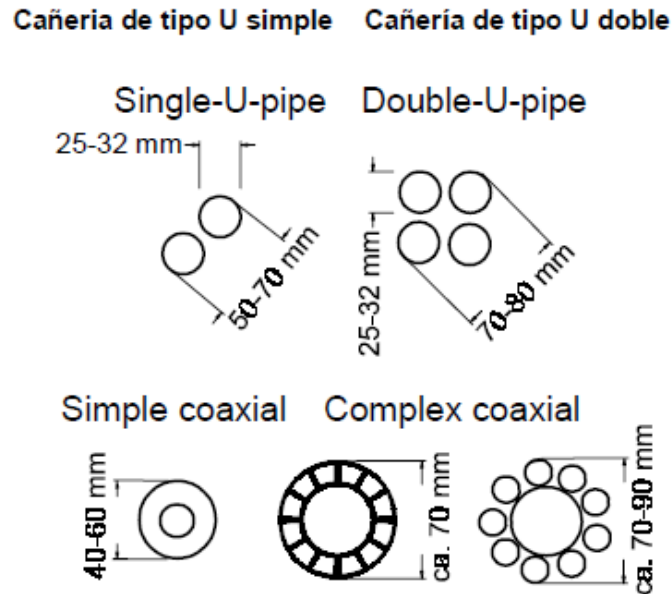


Figura 1.7: Cortes de diferentes tipos de intercambiadores de calor en perforaciones [20].

El material de relleno de la perforación y las paredes del intercambiador de calor provocan una bajada de la temperatura, que se puede resumir como una resistencia térmica de la perforación. Para evitar estas bajadas se han desarrollado materiales térmicos de relleno.

Un caso especial de sistemas cerrados verticales son los "pilares energéticos", es decir, pilares con función de fundamento de una casa con cañerías para el intercambiador de calor (fig. 1.8). Se puede utilizar todo tipo de pilares (prefabricados) y su diámetro puede variar entre 40 cm y un metro.

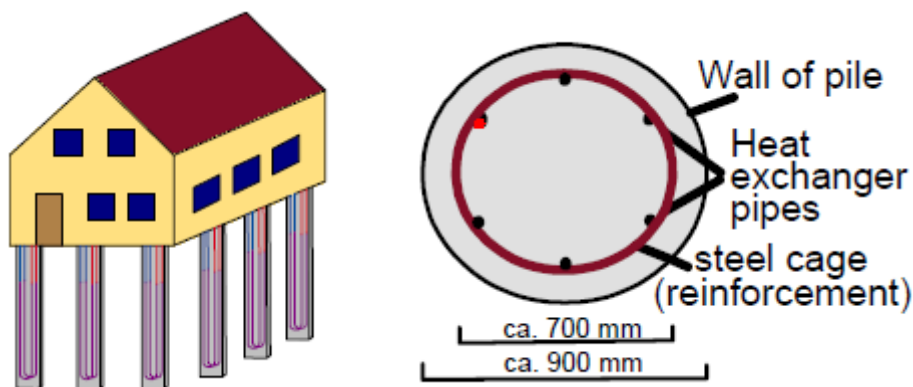


Figura 1.8: Pilares energéticos y un corte de un pilar con 3 "loops" [20].

1.4.1.3 Otros sistemas

Hay una cantidad de sistemas terrestres que no se pueden clasificar ni como cerrados ni como abiertos.

En un pozo de tipo columna se bombea el agua desde el fondo y, después de pasar por la bomba de calor, se filtra a través de la grava en la corona circular del pozo. Pozos de tipo columna requieren de cierta profundidad para proveer suficiente energía sin que el agua se congele, no obstante, muchas plantas tienen perforaciones de varios cientos de metros de profundidad. En Europa se conocen algunos casos (Suiza y Alemania), y también en los EE.UU. Cuando la perforación es cara, no se recomienda la tecnología para instalaciones pequeñas.

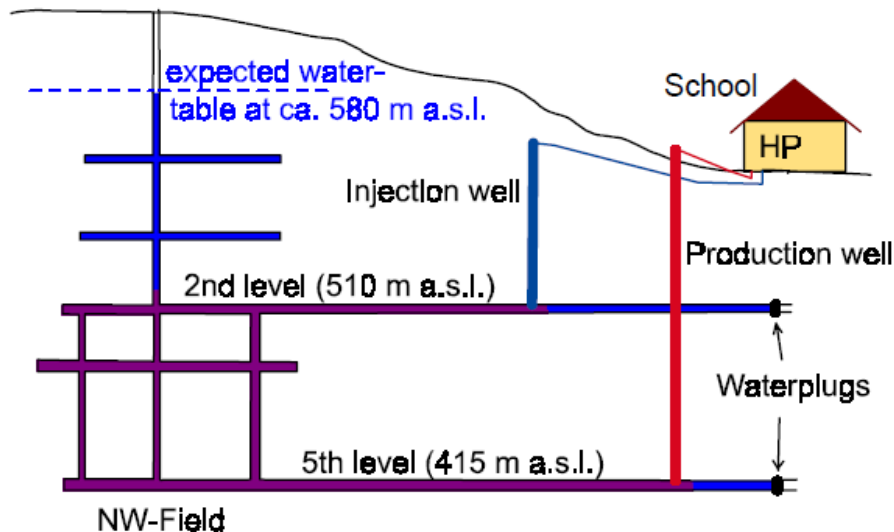


Figura 1.9: Bomba de calor utilizando agua de una mina (Ejemplo en Ehrenfriedersdorf, Alemania, una mina de estaño abandonada) [20].

Un concepto muy promisorio es la utilización del agua de las minas y los túneles. La temperatura de esta agua es todo el año uniforme y se puede acceder fácilmente a ella. Ejemplos utilizando el agua de una mina hay en Alemania (Sajonia, fig 1.9) y en Canadá. El agua de túnel se utiliza en el pueblo de Oberwald y en el acceso occidental del túnel ferroviario de Furka en Suiza y en Airolo. Aquí el agua del túnel carretero Gotthard provee la fuente calórica a una bomba de calor en las instalaciones para el mantenimiento de la carretera.

En las construcciones que se están realizando en los grandes túneles en los Alpes, se está desarrollando un nuevo potencial para este tipo de fuente calórica.

1.4.2 Historia de la geotermia

Las regiones volcánicas han sido siempre lugares de atracción para los seres humanos, por el hecho de la existencia de fumarolas y de fuentes termales que podían utilizar para calentarse, cocer alimentos o simplemente bañarse [3].

Los restos arqueológicos más antiguos relacionados con la energía geotérmica han sido encontrados en Niisato, en Japón, y son objetos tallados en piedra volcánica que datan de la Tercera Glaciación, hace entre 15.000 y 20.000 años.

Hace más de 10.000 años, los Paleo-Indios de América del Norte, ya usaban las aguas termales para cocinar alimentos y sus minerales con propósitos medicinales. Los manantiales termales eran zonas neutrales donde los miembros de las naciones guerreras debían bañarse juntos en paz.

Las primeras civilizaciones, unos 3.500 años antes de Cristo, apreciaban la práctica de los baños termales y la utilización de barros termominerales, pero fueron griegos y, posteriormente, romanos los que dejaron numerosos ejemplos de la aplicación de la energía geotérmica en la calefacción urbana y en las tradicionales termas y baños públicos, que se convirtieron en gigantescos centros de ocio, salud y negocio. Las termas de Caracola, en Roma, tenían un aforo para 1.600 personas.

La extracción de azufre, travertinos, caolines, limonitas y óxidos de hierro también ha estado ligada tradicionalmente a las fuentes termales.

En 1330 ya existía una red de distribución de agua caliente en algunas casas en Chaudes-Aigues, Francia, y por la misma época, en la región de Volterra, en Toscana, pequeñas lagunas con agua caliente salobre de las que

se escapaba vapor a más de 100°C, eran explotadas para extraer ácido sulfúrico concentrado y alumbre.

Durante mucho tiempo, el hombre se conformó con utilizar el calor que afloraba de forma natural en la superficie del planeta. A partir del siglo XIX, los avances técnicos y el mejor conocimiento del subsuelo permitieron buscar cada vez a mayor profundidad y explotar cada vez mejor el calor de la Tierra.

El descubrimiento en 1818 de sales de boro en Larderello, Toscana (Italia), marcó el inicio de la utilización industrial de los recursos geotérmicos.

En 1827 el fundador de esta industria, el francés Francois Larderel, desarrolló un sistema para utilizar el calor de los fluidos en el proceso de evaporación en lugar de quemar madera de los bosques cercanos, que se encontraban en rápida deforestación.

En Francia, en 1833, en el barrio de Grenelle, en París, se inició el primer sondeo profundo, un pozo artesiano de 548 m de profundidad, que captó agua potable a 30°C. En Estados Unidos la primera red local de calefacción urbana entró en funcionamiento en 1892 en Boise, Idaho.

En el siglo XX, el empleo de la energía geotérmica se incrementa, arrastrado por las necesidades cada vez más elevadas de energía para abastecer a la civilización moderna.

La industria del ácido bórico en Larderello dio paso, en 1904, a la generación de electricidad a partir de vapor geotérmico, entrando en funcionamiento en 1913 una central de 250 kW.

En 1919 se perforaron los primeros pozos en Beppu, Japón, y en 1924 se instaló una planta experimental de 1 kW para producir energía eléctrica.

En 1921, en Estados Unidos, en la zona de The Geysers, en California, se perforaron dos pozos y se instaló una pequeña máquina de vapor que, conectada a una dinamo, producía electricidad para un pequeño establecimiento termal.

La primera red moderna de calefacción urbana alimentada por energía geotérmica se instaló en Reikjavik, Islandia, en 1930. Desde entonces, redes de calefacción que utilizan la energía geotérmica se encuentran en funcionamiento en Francia, Italia, Hungría, Rumanía, Rusia, Turquía, Georgia, China, Estado Unidos e Islandia.

Después de la Segunda Guerra Mundial, muchos países fueron atraídos por la energía geotérmica al considerarla competitiva respecto de otras fuentes de energía.

La primera instalación con bomba de calor geotérmica en una vivienda entró en funcionamiento en 1945 en Indianápolis, EE.UU., en la casa de Robert C. Webber, empleado de Indianápolis Power and Light Co. En 1947, Kemler, E.N., en su publicación "*Methods of Earth Heat Recovery for the Heat Pump*" ya mostraba los esquemas de los diferentes métodos de conexión de bombas de calor al terreno que se siguen utilizando actualmente. En 1948 entró en funcionamiento otra instalación en la Universidad del Estado de Ohio, y en 1949 se instaló otra en una casa experimental en la Universidad de Toronto, Canadá.

A partir de la década de los setenta, como consecuencia de las alzas de los precios del crudo, y más particularmente a partir de la década de los noventa, bajo la presión de las exigencias ambientales, es cuando el empleo de bombas de calor geotérmicas empieza a conocer un desarrollo prometedor a nivel internacional.

En menos de 15 años se ha llegado a la situación actual, con más de un millón de instalaciones, no sólo en América del Norte, Estados Unidos y Canadá, sino también en algunos países europeos, particularmente en Suecia, Suiza, Alemania y Austria. Sólo en Suecia, existen hoy en día más de 400.000 bombas de calor instaladas.

En el año 2000, la capacidad geotermo-eléctrica instalada a nivel mundial era de 8.000 MWe, pasando a 9.000 MWe en el año 2005. Por lo que respecta a los usos no eléctricos de la energía geotérmica, en el año 2000 la capacidad

instalada en 59 países era de unos 15.000 MWt. En 2005, la capacidad instalada en 72 países ascendió a alrededor de 28.000 MWt, de los cuales unos 15.000 MWt correspondían a bombas de calor geotérmicas.

En la Fig. 1.10 se puede apreciar la distribución mundial de los principales países productores de energía eléctrica de origen geotérmico en el año 2000, y en la Fig. 1.11 aquellos otros que aprovechan la energía geotérmica para usos directos del calor, en el mismo año.



Figura 1.10: Principales países productores de energía eléctrica geotérmica (potencia instalada en el año 2000). (Fuente: Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM).

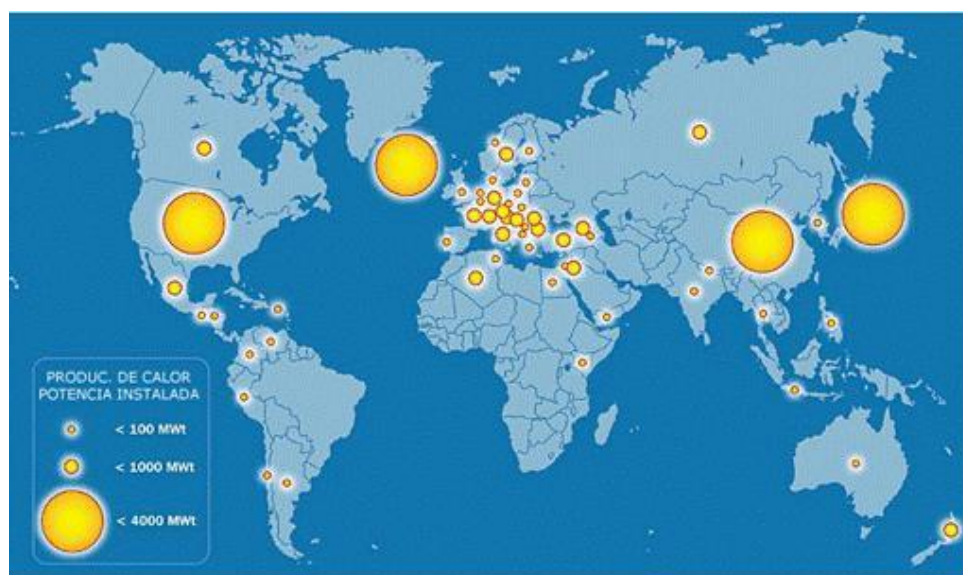


Figura 1.11: Producción de calor por países (potencia instalada en el año 2000). (Fuente: Site Geothermie-Perspectives de l'ADEME et du BRGM).

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Para llevar a cabo los ensayos descritos se han utilizado los datos experimentales del equipo diseñado, el cual consiste en un sistema hidráulico que permite la circulación de fluido por la sonda geotérmica con diferentes caudales tanto en régimen laminar como turbulento. Además, el equipo debe ser capaz de inyectar al terreno distintas potencias caloríficas. Para cada uno de los ensayos, tanto el caudal como la potencia calorífica aportada deben permanecer lo más estables posible a lo largo de todo el tiempo que dure el experimento; esto obliga a incluir reguladores tanto para el caudal como para la potencia. Las variables de interés son las presiones y temperaturas del fluido, tanto en la impulsión hacia la sonda como en el retorno de la misma, así como el caudal circulante. Estas deben ser medidas con una precisión razonable a intervalos regulares de tiempo, en torno a un segundo. En la Figura 2.1 se muestra la pantalla de control del sistema donde aparecen los valores instantáneos de las variables de interés y los controles necesarios para la puesta en marcha y programación de los ensayos [1].



Figura 2.1: Pantalla de control del sistema antes del inicio del ensayo [1].



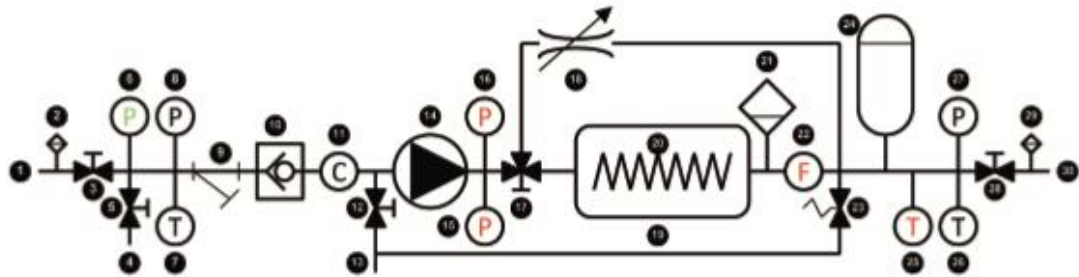
Figura 2.2: Software para obtención del informe final del ensayo [1].

Tras realizar los ensayos se tienen las series de datos que deben ser procesadas adecuadamente para obtener los parámetros del suelo. Estos parámetros servirán de base en el diseño del campo de sondas necesario para cubrir la demanda térmica del edificio a climatizar. El equipo almacena todos estos datos en una memoria tipo SD para facilitar el trasvase de información a un PC donde, con el software desarrollado para esta aplicación (Figura 2.2), se obtiene el informe final del ensayo. Además de lo indicado, el prototipo debe incluir las medidas de seguridad, tanto hidráulicas como eléctricas, para evitar accidentes y daños al equipo por mal funcionamiento. Es importante destacar que, debido a la larga duración de los diferentes ensayos (3 días), el sistema debe funcionar sin supervisión; esto ha sido tenido en cuenta en el diseño incorporando las medidas de seguridad oportunas.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, el prototipo sigue el esquema de principio mostrado en la Figura 2.3.

- Como elementos actuadores consta de una bomba centrífuga, una resistencia eléctrica de potencia inmersa en un depósito y una válvula de 3 vías para hacer pasar el fluido por una válvula de estrangulamiento en los ensayos de bajo caudal, buscando el régimen laminar pero evitando bajos regímenes de funcionamiento de la bomba.

- Como elementos hidráulicos adicionales se incorporan las válvulas de llenado y vaciado, un filtro para evitar la entrada de impurezas a la máquina, una válvula antirretorno que evita la circulación en sentido contrario y un vaso de expansión para absorber las dilataciones del fluido.
- Como elementos de seguridad se dispone de una válvula de sobrepresión hidráulica que descarga el fluido en caso de alcanzarse la presión máxima de trabajo, de presostatos para detectar situaciones de baja y alta presión que deberán impedir el funcionamiento de la bomba, un flujostato detector de caudal mínimo para evitar el aporte de potencia calorífica sin circulación de fluido, y un termostato de seguridad para impedir que el fluido alcance temperaturas superiores a las recomendadas por el fabricante de la sonda.



1	Retorno de sonda	2	Purgador	3	Válvula de retorno
4	Entrada de agua	5	Válvula de llenado	6	Manómetro
7	Sensor de temperatura de retorno	8	Sensor de presión de retorno	9	Filtro
10	Válvula antirretorno	11	Caudalímetro	12	Válvula de vaciado
13	Desagüe	14	Bomba	15	Presostato de baja
16	Presostato de alta	17	Válvula de 3 vías	18	Válvula de estrangulación
19	Depósito de calentamiento	20	Resistencia de calentamiento	21	Purgador
22	Flujostato	23	Válvula de sobrepresión	24	Vaso de expansión
25	Termostato	26	Sensor de temperatura de impulsión	27	Sensor de presión de impulsión
28	Válvula de impulsión	29	Purgador	30	Impulsión a sonda

Figura 2.3: Esquema de principio del equipo desarrollado [1].

El circuito eléctrico de control, que se encarga de accionar tanto la bomba como la resistencia, utiliza los contactos de los elementos de seguridad de forma que sea imposible tanto el funcionamiento de la bomba cuando las presiones no son adecuadas, como el aporte de potencia cuando no exista caudal por el depósito que contiene la resistencia, o cuando se alcancen temperaturas excesivas. En la Tabla 2.1 se incluyen las características principales de los sensores de medida utilizados. Como sensores de

temperatura de utilizan resistencias PT-100, como sensores de presión se utilizan células cerámicas piezo-resistivas y como sensor de caudal se utiliza uno del tipo ultrasónico.

Sensor	Tipo	Mínimo	Máximo	Exactitud
Temperatura	PT-100	0 °C	50 °C	±0,5 °C
Presión	Piezo-resistivo	0 bar	10 bar	±0,03 bar
Caudal	Ultrasonidos	0,5 l/min	25 l/min	±0,75 l/min

Tabla 2.1: Características principales de los sensores de medida [1].

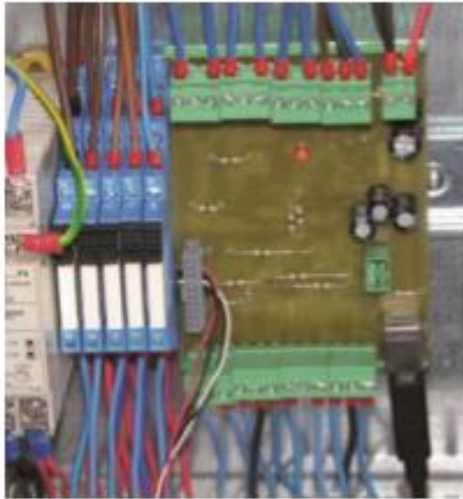


Figura 2.4: Sistema electrónico de control y adquisición de datos [1].

Para el accionamiento de la bomba con diferentes regímenes de caudal se utiliza un variador de frecuencia cuya consigna es establecida mediante un regulador PID implementado en el sistema electrónico de control y adquisición de datos. El accionamiento de la resistencia se realiza mediante un relé de estado sólido que permite variar la potencia entregada, variando el tiempo de encendido y apagado de la misma a intervalos de un semiperiodo de la red eléctrica mediante PWM, controlado mediante otro regulador PID también implementado en el sistema electrónico. El sistema electrónico de control y adquisición de datos (Figura 2.4) se ha diseñado específicamente para este prototipo encargándose tanto de la medida de las variables necesarias para los

experimentos como del control de los actuadores y la detección de situaciones anómalas. La manipulación del sistema se realiza desde una pantalla táctil (Fig. 2.1), desde la que es posible tanto la puesta en marcha del equipo (llenado, purgado y pruebas de estanqueidad y circulación) como la configuración de los parámetros de los experimentos y la realización de los mismos, capturando todas las medidas a lo largo del tiempo del ensayo para su posterior procesamiento en un PC, consiguiendo así los parámetros de respuesta térmica del terreno buscados.



Figura 2.5: Maquina TRT montada sobre remolque para su transporte [1].

Todo el sistema se ha montado sobre una estructura a base de perfiles de aluminio que ha permitido dotarlo de una gran resistencia mecánica. Para evitar la transmisión de vibraciones e impactos, especialmente en el transporte, han sido utilizados elementos silent-blocks. Para poder transportar el equipo, toda la estructura se ha ubicado en un remolque estándar acoplable a un turismo sin superar la carga máxima transportable (Fig.2.5).



Figura 2.6: Página web para la monitorización remota a través de Internet antes del inicio del ensayo [1].

Puesto que los ensayos son de muy larga duración (3 días) y se realizan normalmente en obra, se ha dotado al prototipo de un equipo de comunicaciones basado en tecnología 3G que permite la monitorización y control remotos a través de Internet (Fig. 2.6). De esta forma es posible visualizar el estado del sistema, manipularlo a distancia si fuera necesario e incluso descargar los resultados de los ensayos antes de retirar la máquina por si fuera necesario realizar nuevos experimentos en caso de producirse cualquier fallo.

2.2 Método experimental

En la Figura 2.9 se muestra el equipo desarrollado para realizar estos ensayos, cuyo funcionamiento general es el siguiente [1]:

- 1) Inicialmente hay que realizar una prueba de presión, para garantizar la estanqueidad de la instalación enterrada. Posteriormente se realizan dos tipos de pruebas para la caracterización térmica del terreno: Estimación de la temperatura del terreno a diferentes profundidades (perfil de temperaturas) con el objeto de determinar la temperatura media del suelo

inalterado (TSUR). Para ello se rellena el circuito con agua y se deja reposar un tiempo prudencial. El agua adquiere una temperatura prácticamente igual a la del terreno circundante. Posteriormente, se hace recircular y se mide su temperatura. En este caso, el régimen de circulación del fluido debe ser laminar, para que el error producido sea mínimo.

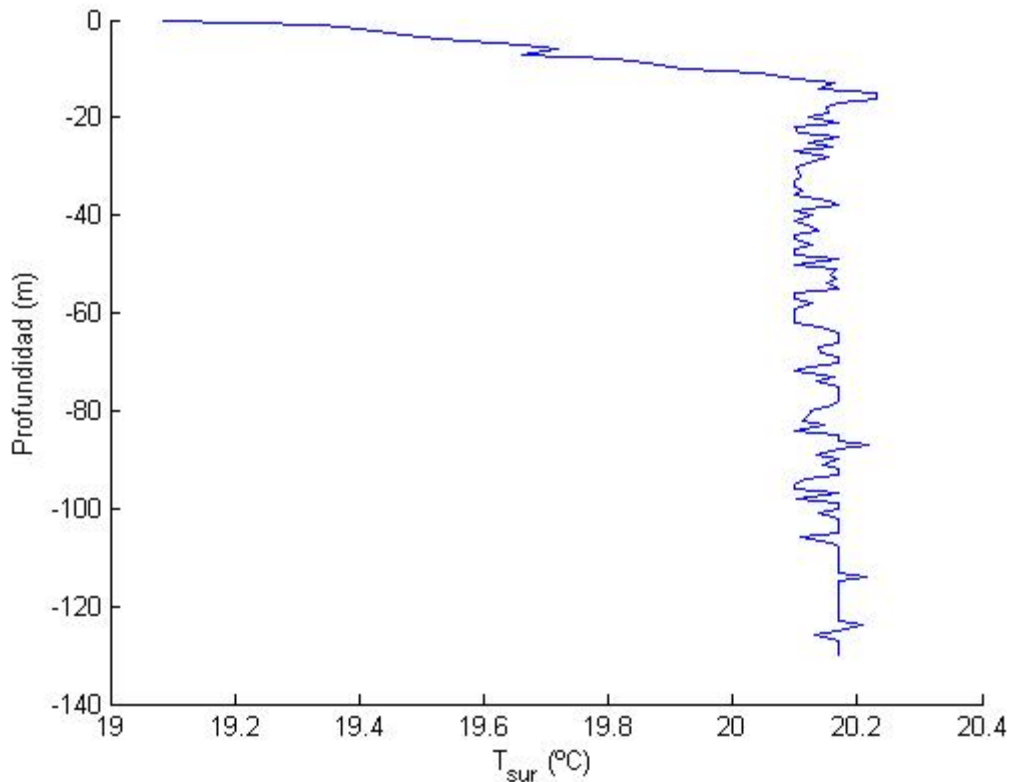


Figura 2.7: Representación de la temperatura del terreno inalterado.

- 2) Determinación de las características de conductividad y difusividad térmicas del terreno y sondeo. Para ello, se hace recircular agua en el circuito enterrado (en este caso con régimen turbulento), manteniendo constante la potencia calorífica aportada de 4000 W y el caudal de 15 L/min y se mide la evolución de la temperatura de impulsión y retorno a lo largo del tiempo. De los resultados de estas mediciones se determinan aquellas características mediante los cálculos matemáticos descritos.

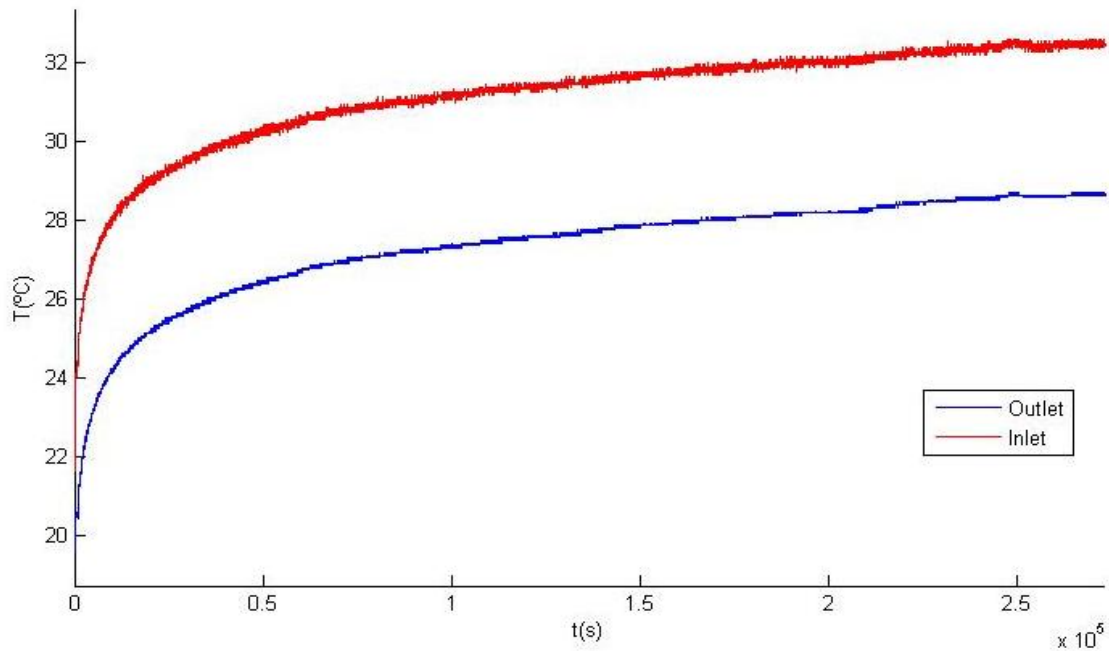


Figura 2.8: Representación de la temperatura de entrada y salida del agua en función.



Figura 2.9: Vistas anterior y posterior del equipo desarrollado mostrando circuitos hidráulico y eléctrico [1].

2.3 Método de cálculo de características del terreno

Para el diseño del campo de sondas será necesario conocer las cargas térmicas del edificio a climatizar y la capacidad de disipación de cada una de las sondas. Para obtener la capacidad de disipación de cada una de las sondas será necesario el análisis y modelado de la transferencia de calor con el terreno a partir de la ley de Fourier [11] y utilizando técnicas experimentales asociadas a su análisis teórico con modelos analíticos. Existen diferentes modelos

analíticos y numéricos para evaluar la respuesta térmica del suelo. En Europa el método más empleado es el de la línea infinita, debido a su simplicidad y a la rapidez de su aplicación [1]. Este método parte de la ecuación general de difusión de calor en coordenadas cartesianas, Ec. (2-1):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q}_g = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2-1)$$

y considerando flujo unidimensional, conductividad constante y que no existe generación de energía, la ecuación se reduce a la Ec.(2-2):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{donde: } \alpha = \frac{k}{\rho c_p} = \frac{k}{C_p} \quad \text{Difusividad térmica} \quad (2-2)$$

Para resolver la ecuación se define la variable $\eta = x^2/(4 \alpha t)$ y se toman una serie de simplificaciones, quedando la ecuación:

$$T_f = T_{sur} + \dot{Q} \frac{1}{4\pi k H} \left[\ln \left(\frac{4 \alpha t}{r_b^2} \right) - \gamma \right] + \dot{Q} \frac{R_b}{H} \quad (2-3)$$

Si $\dot{Q}$ es constante, realizando los cambios oportunos, se puede expresar la Ec.(2-3) como:

$$T_f = m \ln(t) + n \quad (2-4)$$

Donde

$T_f \equiv$ Temperatura media del fluido

$T_{sur} \equiv$ Temperatura del terreno inalterado

$\dot{Q} \equiv$ Potencia calorífica aportada

$k \equiv$ Conductividad térmica del terreno

$H \equiv$ Profundidad de la sonda

$\alpha \equiv$ Difusividad térmica del terreno

$\gamma \equiv$ Constante de Euler

$r_b \equiv$ Radio de la sonda

$R_b \equiv$ Resistencia térmica entre el fluido caloportador y la pared exterior del sondeo

Que presenta una relación lineal entre T_f y $\ln(t)$. Por tanto, realizando un ensayo en la sonda que consistirá en hacer circular un fluido que aporte una potencia calorífica constante al terreno, a partir de la serie de valores de las temperaturas de entrada y salida del fluido a lo largo del tiempo, se obtiene una serie de valores de T_f como la media aritmética entre cada temperatura de entrada y de salida. Mediante una regresión lineal obtendremos los valores m y n de la Ec.(2-4). Las series de datos deberán ser lo suficientemente largas para garantizar un buen ajuste, además, deberán descartarse las primeras horas del ensayo para garantizar la condición que dio lugar a la ecuación (2-3).

De las ecuaciones (2-3) y (2-4) se determina la conductividad, k , y conocida la capacidad calorífica volumétrica, C_p , se podrá obtener la difusividad térmica del terreno y la resistencia térmica entre el fluido caloportador y la pared exterior del sondeo, α y R_b respectivamente.

2.4 Descripción del problema

El caso de estudio ha sido la simulación del flujo del intercambio de calor entre un conducto en forma de U con el terreno circundante. La configuración del equipo era la siguiente: un tubo de polietireno de 40 mm de diámetro exterior y espesor 3,7 mm por el que circula agua, introducido en un agujero de 150 mm de diámetro y 130 m de profundidad, relleno de bentonita.

Dado que existe simetría respecto a un eje, sólo se va a emplear la mitad de la geometría para el estudio, ya que las características térmicas van a ser iguales a ambos lados de dicho eje. Con esto se reduce el coste computacional a la mitad obteniendo los mismos resultados.

En las siguientes tablas también se especifican las propiedades conocidas de los materiales y las condiciones de contorno que consisten en temperaturas medidas experimentalmente mediante un ensayo TRT y la velocidad del agua de entrada (modelo 3D).

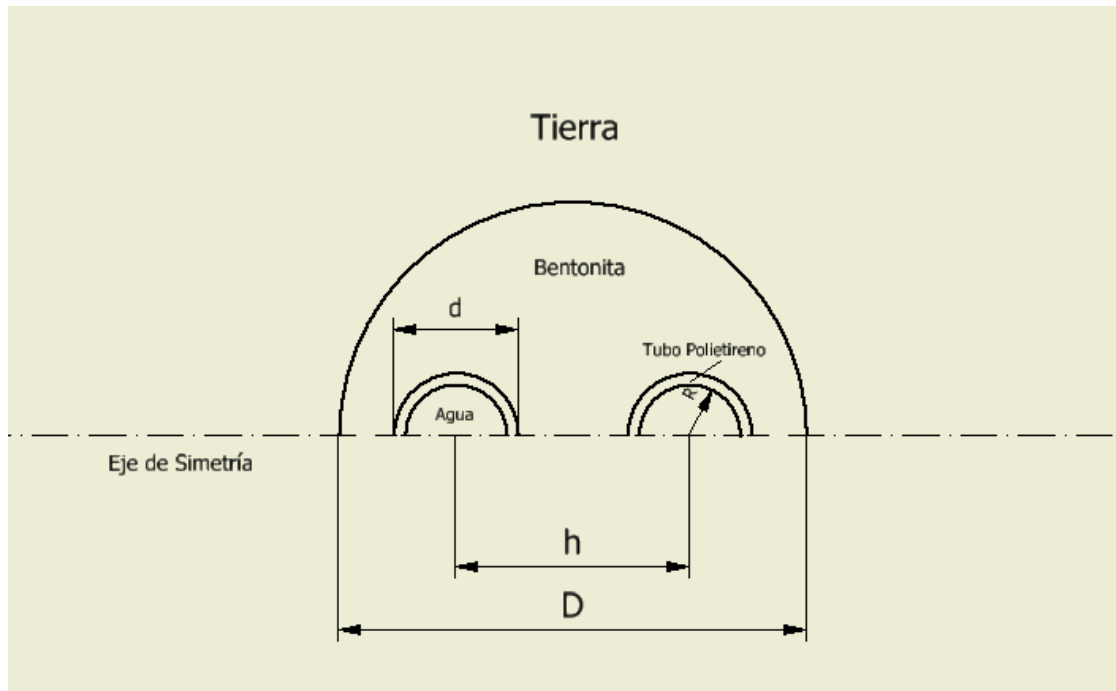


Figura 2.10: Esquema de la instalación.

Parámetros geométricos	Abreviatura	Tamaño (m)
Distancia entre tubos	h	0,075
Radio interior de un tubo	R	0,0163
Diámetro exterior de un tubo	d	0,04
Diámetro del agujero excavado	D	0,15
Profundidad del agujero	-	130
Diámetro de la circunferencia límite de tierra empleada en la simulación (concéntrica al agujero excavado)	-	6

Tabla 2.2: Medidas de los elementos dispuestos en el esquema.

Propiedades	Agua	Tubo Polietileno	Relleno*	Terreno*
Densidad (kg/m^3)	1000	940	1100	2200
Capacidad calorífica (J/kg K)	4180	1840	1727,27	568,18
Conductividad	0,61	0,42	1,7	1,84
Viscosidad dinámica (kg/m s)	$0,86 \cdot 10^{-3}$	-	-	-

Tabla 2.3: Propiedades conocidas de los materiales [2] [9].

Segmento	Condición de Contorno
Pared del tubo en contacto con el agua de entrada	UDF con temperatura de entrada del agua en función del tiempo
Pared del tubo en contacto con el agua de salida	UDF con temperatura de salida del agua en función del tiempo
Terreno a una distancia de 3 m del origen	Temperatura constante de 293,2477 K

Tabla 2.4: Condiciones de contorno en modelo 2D.

Superficie	Condición de Contorno
Agua de entrada al tubo	UDF donde la temperatura de entrada del agua varía en función del tiempo Velocidad constante de 0,3 m/s
Terreno a una distancia de 3 m del origen	UDF donde la temperatura del terreno varía en función de la profundidad

Tabla 2.5: Condiciones de contorno en modelo 3D.

(*) Las propiedades térmicas del material son las empleadas para la simulación del modelo pero son las que tienen que modificarse para obtener un mejor ajuste de los resultados.

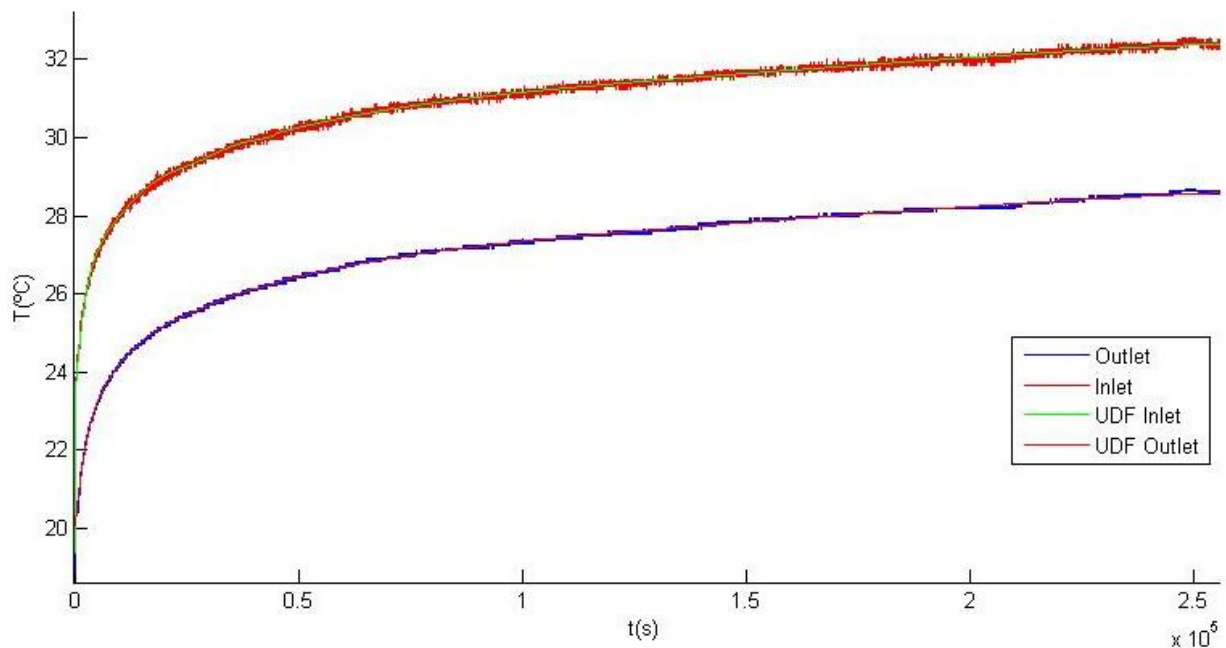


Figura 2.11: Curvas de temperatura de entrada y salida del agua empleando código de la UDF.

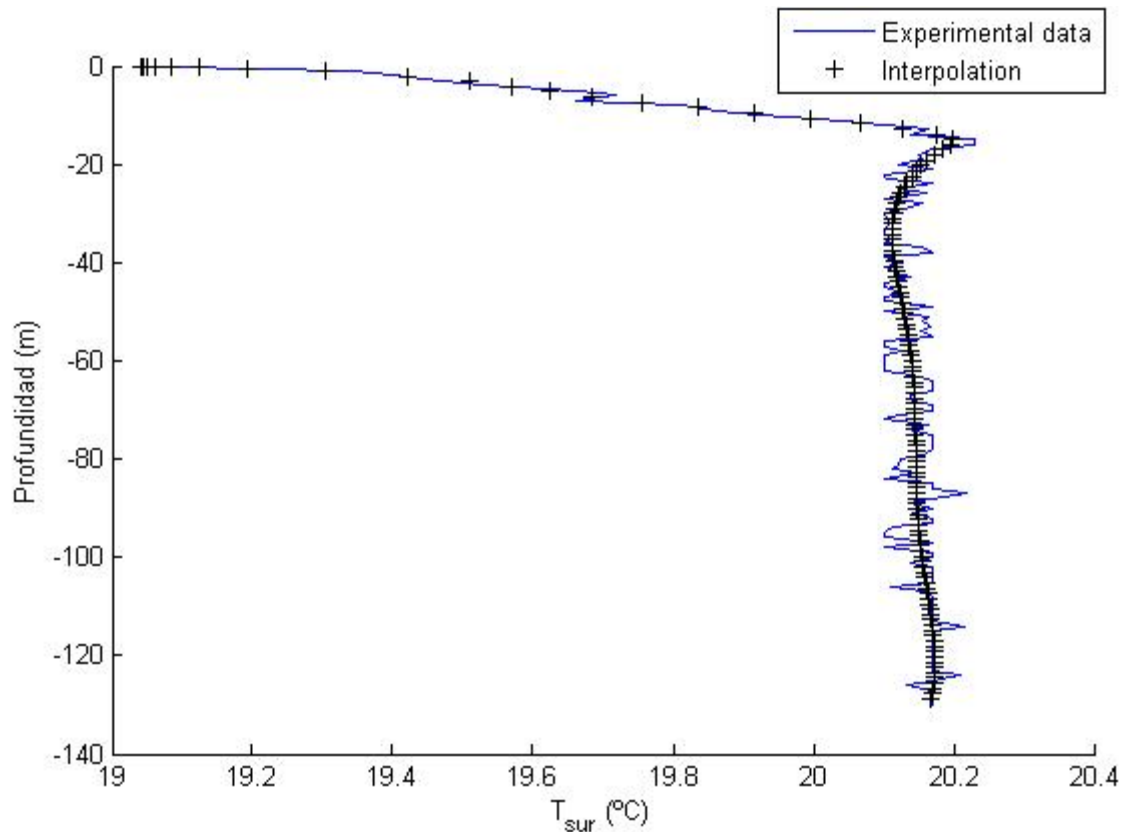


Figura 2.12: Puntos de temperatura del terreno inalterado empleando código de la UDF.

2.5 Método numérico

Los principios físicos fundamentales sobre los cuales se basa toda la dinámica de fluidos son:

- Conservación de la masa.
- Conservación de la cantidad de movimiento.
- Conservación de la energía.

Teniendo en cuenta estos principios se hace necesaria la existencia de modelos de flujo mediante los cuales se puedan resolver las correspondientes ecuaciones de conservación que gobiernan el movimiento de los fluidos. Es necesario remarcar que los modelos de flujo sólo sirven para transformar los conceptos que dictan los principios fundamentales en ecuaciones matemáticas que puedan ser escritas en papel. No hay que confundirlos con los métodos numéricos (el método de los elementos finitos, el método de volúmenes finitos,

etc.) que utilizan programas de fluidodinámica computacional (CFD) como estrategia para discretizar las ecuaciones.

Existen muchos modelos de flujo mediante los cuales se pueden obtener diferentes formas de las ecuaciones de conservación. En esencia, son las mismas pese a tener formas distintas. Se puede demostrar que con algunos desarrollos matemáticos se puede cambiar de una forma a otra con relativa facilidad. Sin embargo, en este trabajo se presentarán las ecuaciones de conservación únicamente en la forma diferencial conservativa. No se profundizará más sobre el tema de los modelos de flujo y las formas de las ecuaciones de conservación porque no entra dentro de los objetivos de este trabajo.

2.5.1 Discretización

Fluent emplea el método de los volúmenes finitos para convertir las ecuaciones de gobierno de un fluido en ecuaciones algebraicas que pueden ser resueltas numéricamente. Este método consiste en integrar las ecuaciones de gobierno sobre cada volumen de control (celda), dando lugar a un sistema de ecuaciones discretas que representan la conservación de las magnitudes fluidas en cada volumen de control.

Si se discretiza la ecuación del transporte obtenida mediante el método de los volúmenes finitos, tomando como volumen de control una celda triangular (bidimensional) como la mostrada en la figura 2.13 se obtiene,

$$V_{\text{celda}} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \sum_f^N \rho_f V_f \phi_f \cdot A_f = \sum_f^N \Gamma_\phi \nabla\phi_f \cdot A_f + S_\phi V_{\text{celda}} \quad (2-5)$$

siendo N el número de caras del contorno de la celda o volumen de control, ϕ_f el flujo de ϕ a través de la cara f debido a la convección, $\rho_f V_f \cdot A_f$ el flujo másico a través de la cara f, A_f es el área de la cara f, $\nabla\phi_f$ el término difusivo en la dirección normal a la cara f y V_{celda} es el volumen de la celda.

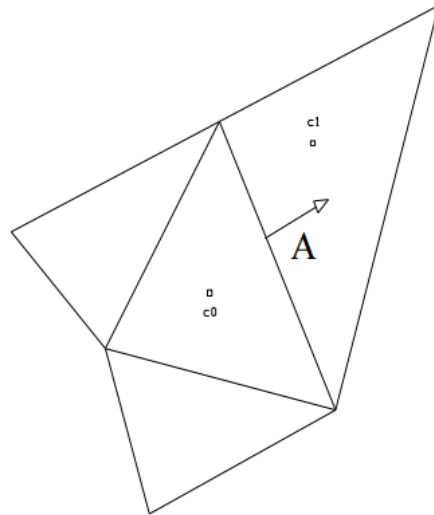


Figura 2.13: Caras y centroides de celdas colindantes.

Por defecto, Fluent almacena los valores discretos de la variable ϕ en los centros de las celdas (c_0 y c_1 de la figura 2.13). Sin embargo, se necesitan los valores de ϕ_f , de modo que estos se obtienen interpolando los valores de los centros de las celdas. Esto se consigue empleando un esquema Upwind de segundo orden con el que se obtiene el valor de ϕ_f a partir de los valores de las celdas que se encuentran aguas arriba en la dirección del vector normal a la cara.

Cuando se trabaja con una precisión de segundo orden, los valores de las variables en las caras de las celdas se obtienen empleando una reconstrucción lineal multidimensional. Con esta aproximación, se consigue una precisión de orden elevado en los valores en las caras de las celdas a través de Taylor centrada en el centroide de la celda. De esta manera, cuando se emplea un esquema de segundo orden, el valor de ϕ en la cara f se obtiene mediante:

$$\phi_f = \phi_{c_0} + (\vec{x} - \vec{x}_p) \nabla \phi_{c_0} \quad (2-6)$$

Para resolver las ecuaciones planteadas el gradiente que se utilizará es *Least Squares Cell Based* el cual asume que la solución varía linealmente [18].

El método de acoplamiento seleccionado es *Pressure-Based SIMPLE*. Inicialmente, el acoplamiento *Pressure-Based* fue desarrollado para baja

velocidad en flujos incompresibles o moderadamente compresibles. La presión se extrae de una ecuación de corrección de presión que se obtiene de manipular las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento. Dentro de este acoplamiento se elige el método *SIMPLE*, el cual emplea una relación entre la velocidad y la correlación de presión para hacer que se cumpla la conservación de la masa y obtener el campo de velocidades (Anexo A).

2.5.2 La ecuación de continuidad

Se cumple el primer principio fundamental: la masa que entra al volumen de control es igual a la que sale.

2.5.2.1 Ecuación general

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2-7)$$

2.5.2.2 Ecuación en coordenadas cartesianas

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0 \quad (2-8)$$

2.5.3 La ecuación de cantidad de movimiento

2.5.3.1 Ecuación general

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}} + \rho \vec{f}_m \quad (2-9)$$

Donde p es la presión estática, $\bar{\bar{\tau}}$ es el tensor de tensiones, y $\rho \vec{f}_m$ son las fuerzas volumétricas de gravedad y externa respectivamente.

El tensor de tensiones $\bar{\bar{\tau}}$ en fluidos newtonianos viene dado por la ley constitutiva de Navier-Poisson:

$$\bar{\bar{\tau}} = 2\mu \bar{\bar{T}}_d + \lambda (\nabla \cdot \vec{v}) \bar{\bar{I}} \quad \text{donde} \quad \bar{\bar{T}}_d = \frac{1}{2} (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) \quad (2-10)$$

$\mu(p, T)$ es el primer coeficiente de la viscosidad o viscosidad dinámica y $\lambda(p, T)$ el segundo coeficiente de la viscosidad.

2.5.3.2 Ecuación en coordenadas cartesianas para un líquido perfecto

Componente x:

$$\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \rho g_x + F_x \quad (2-11)$$

Componente y:

$$\rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + \rho g_y + F_y \quad (2-12)$$

Componente z:

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \rho g_z + F_z \quad (2-13)$$

2.5.4 La ecuación de la energía**2.5.4.1 Ecuación general**

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} e) = -p \nabla \cdot \vec{v} + \vec{\tau} : \nabla \vec{v} - \nabla \cdot \vec{q} + Q_r \quad (2-14)$$

Siendo,

 $e \equiv$ energía interna $\vec{q} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \equiv$ flujo de calor por conducción o ley de Fourier $Q_r \equiv$ aporte exterior de calor**2.5.4.2 Ecuación en coordenadas cartesianas para un líquido perfecto**

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \phi_v + k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_r \quad (2-15)$$

$$\phi_v = \mu \left[2 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (2-16)$$

2.5.5 Modelos de turbulencia

2.5.5.1 Introducción

Los flujos turbulentos se caracterizan por tener campos de velocidades fluctuantes. Estas fluctuaciones provocan a su vez cambios constantes en cantidades transportadas tales como cantidad de movimiento, energía, concentración de especies, etc. Este fenómeno de pequeña escala y alta frecuencia es muy costoso de simular computacionalmente hablando por lo que es necesario hacer algunas simplificaciones para reducir el tiempo de cálculo. Las ecuaciones manipuladas contienen variables desconocidas que necesitan de modelos de turbulencia para determinar éstas en términos de cantidades conocidas [8] [16]. No existe un modelo de turbulencia que sea universalmente aceptado como el mejor para toda clase de problemas. La elección del modelo de turbulencia dependerá de consideraciones tales como los recursos computacionales de que se disponga, la cantidad de tiempo disponible para simular, el nivel de detalle que se desea alcanzar, etc.

Los modelos de turbulencia que se han utilizado en este trabajo se engloban dentro del conjunto de los modelos RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*). En esta sección se explicará este concepto así como algunas características generales de los modelos de turbulencia.

2.5.5.2 La descomposición de Reynolds

Las fluctuaciones de pequeña escala y alta frecuencia que se producen en flujos turbulentos no pueden ser simuladas de manera directa y eficiente, a día de hoy, por los ordenadores personales más modernos que existen en el mercado, ni siquiera por potentes “work stations” que tienen más velocidad de cálculo que éstos. Por este motivo se hace necesaria la creación de modelos matemáticos que permitan calcular estas fluctuaciones pero no de manera directa.

El método de las ecuaciones de Navier Stokes promediadas (RANS) introduce términos adicionales en las ecuaciones de conservación que necesitan ser modelados para conseguir conocer sus valores, reduciendo

considerablemente el coste computacional. Este método es ampliamente utilizado en aplicaciones ingenieriles.

Las variables que son solución de las ecuaciones instantáneas de Navier-Stokes (N-S) se descomponen en dos componentes: una variable promedio y otra fluctuante.

Las variables promediadas son:

$$v = V + v' ; p = P + p' ; T = \theta + T' \quad (2-17)$$

Continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2-18)$$

Cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot \left[\mu \left(\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T \right) - \rho \overline{\vec{v}' \vec{v}'} \right] \quad (2-19)$$

El término $-\rho \overline{\vec{v}' \vec{v}'}$ se conoce como el tensor de esfuerzos de Reynolds añadiendo seis incógnitas al problema. Se necesita modelar el tensor de Reynolds siendo el modelo más empleado la hipótesis del gradiente difusivo.

$$-\rho \overline{\vec{v}' \vec{v}'} = \mu_T \left(\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_T \nabla \cdot \vec{V} \right) \delta_{ij} \quad (2-20)$$

Siendo en este caso $k = \frac{1}{2} \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) \equiv$ energía cinética turbulenta

Ecuación de la energía:

$$\frac{\partial \rho c_v T}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \theta) = k \Delta \theta + \phi_{\vec{V}} + \phi_{\vec{V}'} - \nabla \cdot (\rho \overline{\vec{v}' T'}) + Q_r \quad (2-21)$$

La disipación viscosa media se denota como $\phi_{\vec{V}}$ y debida a fluctuaciones turbulentas como $\phi_{\vec{V}'}$.

El término $-\overline{\vec{v}'T'}$ es el vector de transporte de calor y también tiene que ser modelado.

$$-\overline{\vec{v}'T'} = \alpha_T \nabla \theta \quad (2-22)$$

Finalmente, después del promedio temporal de las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía han surgido incógnitas adicionales con la aparición del tensor de esfuerzos turbulentos y el vector del transporte de calor. Será necesario aplicar ecuaciones con coeficientes empíricos basadas en las ecuaciones RANS para poder obtener modelos aproximados.

2.5.6 Modelo k- ω SST

El modelo trata de conseguir una mezcla entre la precisa y robusta formulación del modelo k - ω en la zona cercana a la pared por su mejor comportamiento en la modelación de los procesos en capa límite y los buenos resultados que da el modelo k- ϵ en la zona interior del campo fluido [21]. Ambos modelos están basados en dos ecuaciones de transporte para obtener k y ϵ o, en el otro modelo, ω .

Las ecuaciones para el modelo k- ω son:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = -\rho \overline{v'_i v'_j} \frac{\partial V_i}{\partial x_j} - \rho \beta^* f_\beta k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2-23)$$

$$\rho \frac{D\omega}{Dt} = -\alpha \frac{\omega}{k} \rho \overline{v'_i v'_j} \frac{\partial V_i}{\partial x_j} - \rho \beta f_\beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (2-24)$$

Donde k es la energía cinética turbulenta, $\omega \approx \epsilon/k$ es la tasa de disipación específica, $-\rho \overline{v'_i v'_j} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}$ representa la generación de energía cinética turbulenta debida a los gradientes de velocidad y $\rho \beta^* f_\beta k \omega$ su disipación, $-\alpha \frac{\omega}{k} \rho \overline{v'_i v'_j} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}$ es la generación de ω así como $\rho \beta f_\beta \omega^2$ representa la disipación de ω y

$\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)$ y $\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}\right)$ representan la difusividad efectiva para el modelo k y ω respectivamente.

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \equiv \text{viscosidad turbulenta}$$

Las ecuaciones para el modelo k- ϵ son:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t S^2 - \rho \epsilon \quad (2-25)$$

$$\text{siendo } S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}; \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon} \mu_t S^2 - \rho C_{2\epsilon} \epsilon) \quad (2-26)$$

Donde

k es la energía cinética turbulenta y ϵ la disipación de la energía cinética, $\mu_t S^2$ representa la producción de energía cinética turbulenta y $-\rho \epsilon$ su disipación.

$\sigma_k, \sigma_\epsilon, C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$ son coeficientes empíricos constantes

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad \text{siendo } C_\mu \neq \text{constante} \quad (2-27)$$

2.6 Iniciación del problema físico

La tercera fase de la resolución de un problema con CFD es la iniciación del problema físico. Cuando la malla está acabada y se han impuesto correctamente los tipos de contorno en las caras y superficies y el tipo de continuidad en los volúmenes, es momento de exportar la malla de ICEM para importarla a FLUENT, donde tendrá lugar la iniciación de la simulación.

Antes de indicarle a FLUENT que empiece con la simulación es necesario hacer una serie de modificaciones para adaptar el problema físico a nuestras necesidades. A continuación se exponen ordenadamente todos los pasos que

hay que seguir para la iniciación de un problema de transmisión de calor en FLUENT.

Paso	Acción	Descripción/Explicación
1	Abrir FLUENT	Seleccionar dimensión y marcar precisión doble en <i>Fluent Launcher</i> .
2	File\Read\Case	Se importa la malla.
3	Solution Setup\General\Check	Comprobación del estado de la malla.
4	Solution Setup\General\Scale	Se escogen las unidades de la escala geométrica: m, cm, mm, etc. También permite escalar dicha geometría.
5	Solution Setup\General\Solver	Elegir simulación transitoria ya que varía a lo largo del tiempo. Las demás opciones se dejan por defecto y comprobar que el tipo seleccionado es <i>Pressure-Based</i> .
6	Mesh\Smooth-Swap	Se suaviza y homogeneiza la malla. Con esto se eliminan aquellos elementos deformados que podrían afectar a la convergencia del modelo.
7	Solution Setup\Models	Activar la ecuación de la energía (<i>Energy-On</i>).
8	Solution Setup\Materials	Crear los materiales empleados e introducir sus características térmicas.
9	Solution Setup\Cell Zone Conditions	Establecer el material de la zona correspondiente.
10	Define\User-Defined\Functions\Interpreted	Carga las UDFs explicadas en el Anexo B.
11	Solution Setup\Boundary Conditions	Se establece las condiciones de contorno mediante valores constantes o UDFs descritas en las tablas 2.4 y 2.5. También se selecciona el material.
12	Solution\Solution Methods	Dejar la discretización espacial por defecto y en la formulación transitoria seleccionar 2º orden de Upwind para una mayor precisión.
13	Solution\Monitors\Residuals	Se elimina el criterio de convergencia para que se realicen todas las iteraciones establecidas.
14	Solution\Solution Initialization	Se establece el valor inicial de las celdillas.
15	Solution\Run Calculation	Se determina el número de iteraciones por paso de tiempo, el paso de tiempo y el número de pasos de tiempo.

Tabla 2.6: Pasos a seguir para iniciar el problema físico en FLUENT.

2.7 Post-procesado de los datos

Cuando la solución ha convergido, los últimos valores de las variables solución se graban como la solución final. Para ser capaz de interpretar estos datos, es necesario ordenarlos y reducirlos a un tamaño comprensible. La visualización de los datos se llama post-procesado y posibilita comparar diferentes simulaciones entre ellas y con datos externos. La manera más común de visualizar los resultados de la simulación es mediante los gráficos de contornos y los gráficos de vectores de velocidad.

Existen muchas maneras de visualizar los datos y acceder a los resultados numéricos. En el menú principal de FLUENT, las opciones *Graphics and Animations*, *Plots* y *Reports* contienen todas las posibilidades de post-procesado de los datos.

En el menú *Graphics and Animations* del menú principal de ANSYS Fluent se encuentran las opciones *Contours* y *Vectors* que permiten desplegar gráficos de contornos y de vectores respectivamente. Hay más opciones como la opción *Solution Animation Playback* que permite reproducir animaciones, muy útiles sobre todo cuando se simula en transitorio y se quiere ver como evoluciona una variable a cada paso de tiempo.

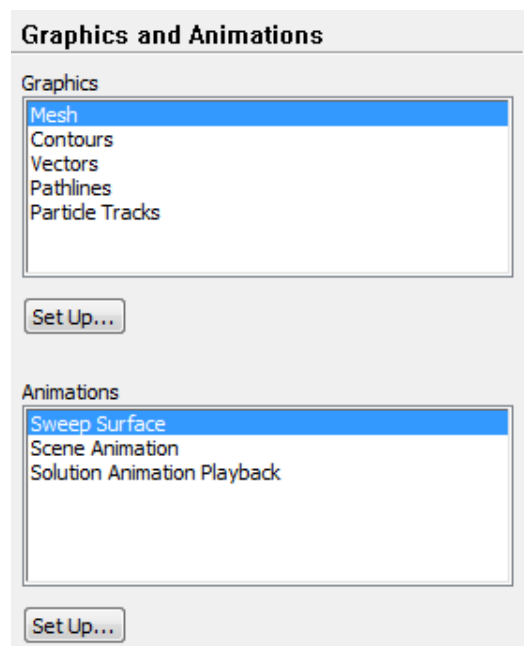
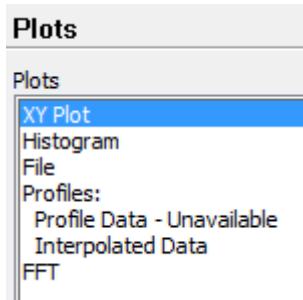
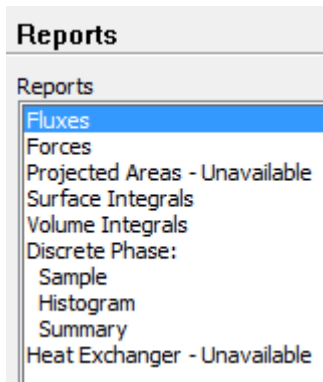


Figura 2.14: Menú *Graphics and Animations* del menú principal de FLUENT. Imagen obtenida de FLUENT.



El menú *Plots* permite crear gráficos XY, es decir, graficar una variable cualquiera en función de otra, permite, además, crear histogramas e incluso ver una gráfica con los residuales.

Figura 2.15: Recorte del menú *Plots* del menú principal de FLUENT. Imagen obtenida de FLUENT.



En el menú *Reports* hay una serie de opciones que nos permiten acceder a los valores numéricos de las simulaciones. Por ejemplo, en la opción *Forces* se puede calcular el momento flector que actúa sobre el agitador en la dirección que se desee. Además, opciones como *Surface Integrals* permiten calcular flujos a través de superficies, muy útil cuando se quiere saber el caudal que mueve el agitador en su funcionamiento.

Figura 2.16: Recorte del menú *Reports* del menú principal de FLUENT. Imagen obtenida de FLUENT.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3.1 Resolución numérica del problema

En la resolución de un problema con CFD se distinguen tres partes:

1. Diseño de la geometría (ICEM)
2. Generación de la malla (ICEM)
3. Iniciación del problema físico (FLUENT) (apartado 2.6)

3.1.1 Diseño de la geometría

Todo problema de CFD empieza por el diseño de la geometría. Para ello, a menudo es necesario disponer de un programa de CAD como SolidWorks®, Autocad®, etc. En este trabajo, sin embargo, se ha optado por la utilización del programa ICEM®, el mismo con el que se generará la malla, que permite elaborar la geometría dibujando nodos y curvas en el escritorio de trabajo. Después será necesario establecer cada superficie y volumen (éste último en una geometría 3D).

3.1.1.1 *Diseño de la geometría en 2D*

La geometría que se necesita para la simulación en 2D se muestra en la Figura 3.1. Su diseño es muy sencillo y viene explicado en el apartado 2.4. El primer paso consiste en la creación de dos semicircunferencias cuyo centro se ha establecido como el origen y cuyas dimensiones se muestran en la Tabla 2.2 (Figura 3.1, paso 1). Para ello, se han dibujado varios puntos coincidiendo con los extremos de cada circunferencia y un punto intermedio. Seguidamente se dibuja una línea horizontal pasando por todos los puntos y que corresponde al eje de simetría. El siguiente paso consiste en dibujar dos semicircunferencias a cada lado separadas 37,5 mm del origen y cuyos centros y extremos cortan al eje de simetría (Figura 3.1, paso 2).

Una vez dibujada la geometría completa se crean las superficies correspondientes seleccionando las curvas que la forman.

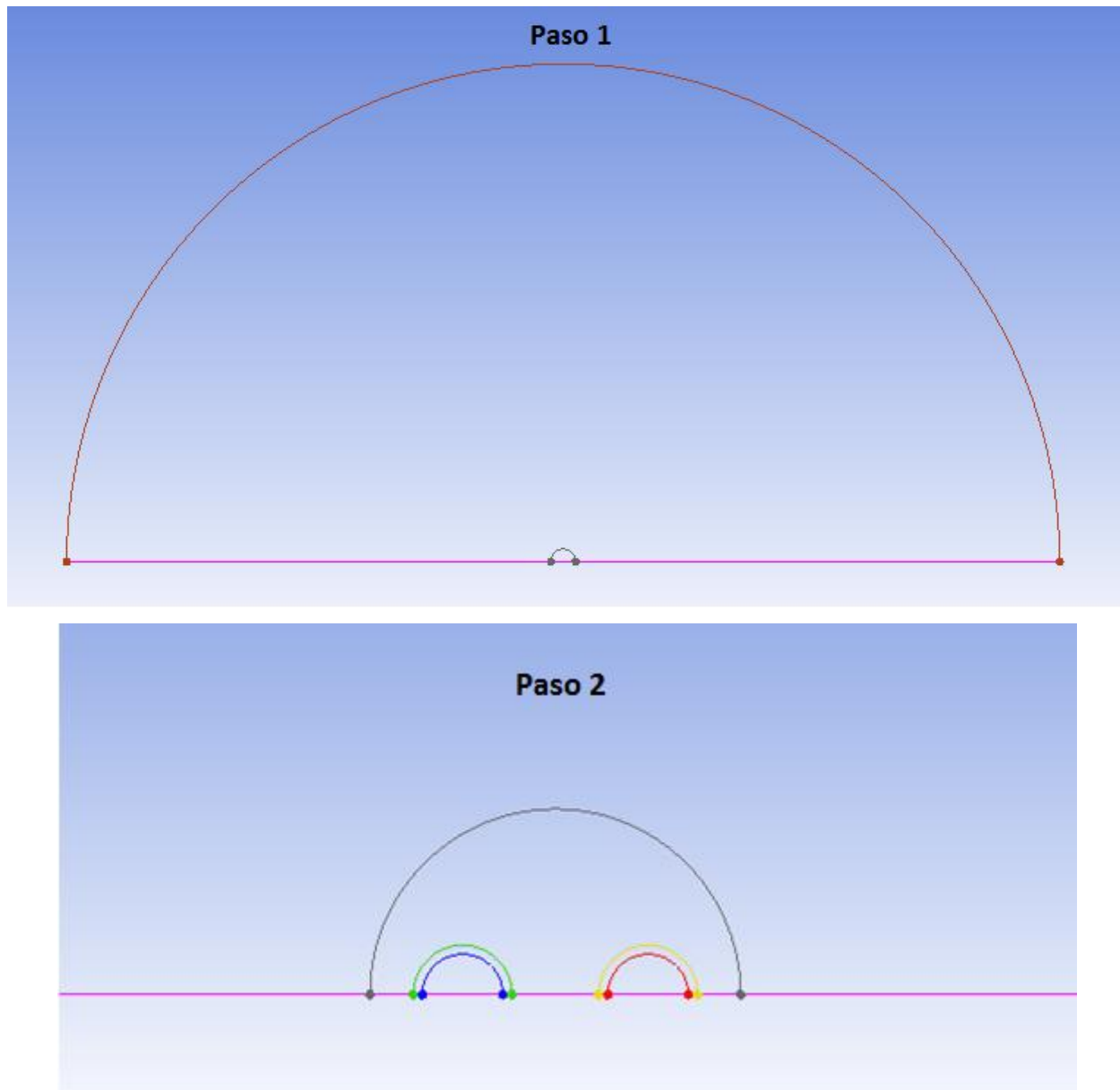


Figura 3.1: Diseño paso a paso de la geometría en 2D. Imágenes obtenidas de ICEM.

3.1.1.2 Diseño de la geometría en 3D

Aunque el modelo en tres dimensiones parece sólo una extrusión del modelo anterior el diseño de la geometría se complica considerablemente. Partiendo del plano en 2D, éste se copia a una distancia de 129,9 m y las caras límite y exterior de la bentonita a 130 m en el eje perpendicular (Figura 3.2, paso 1) con el comando *Translate Geometry* para después unir los extremos de

todas las semicircunferencias mediante rectas (Figura 3.2, paso 2). El siguiente paso es dibujar el tubo en la sección más profunda donde presenta forma en U, siendo necesario dibujar puntos intermedios situados en el plano de simetría, a una distancia apropiada de la cara copiada, para generar más semicircunferencias que permiten la unión del tubo de polietireno con la forma correspondiente (Figura 3.2, paso 3 y 4).

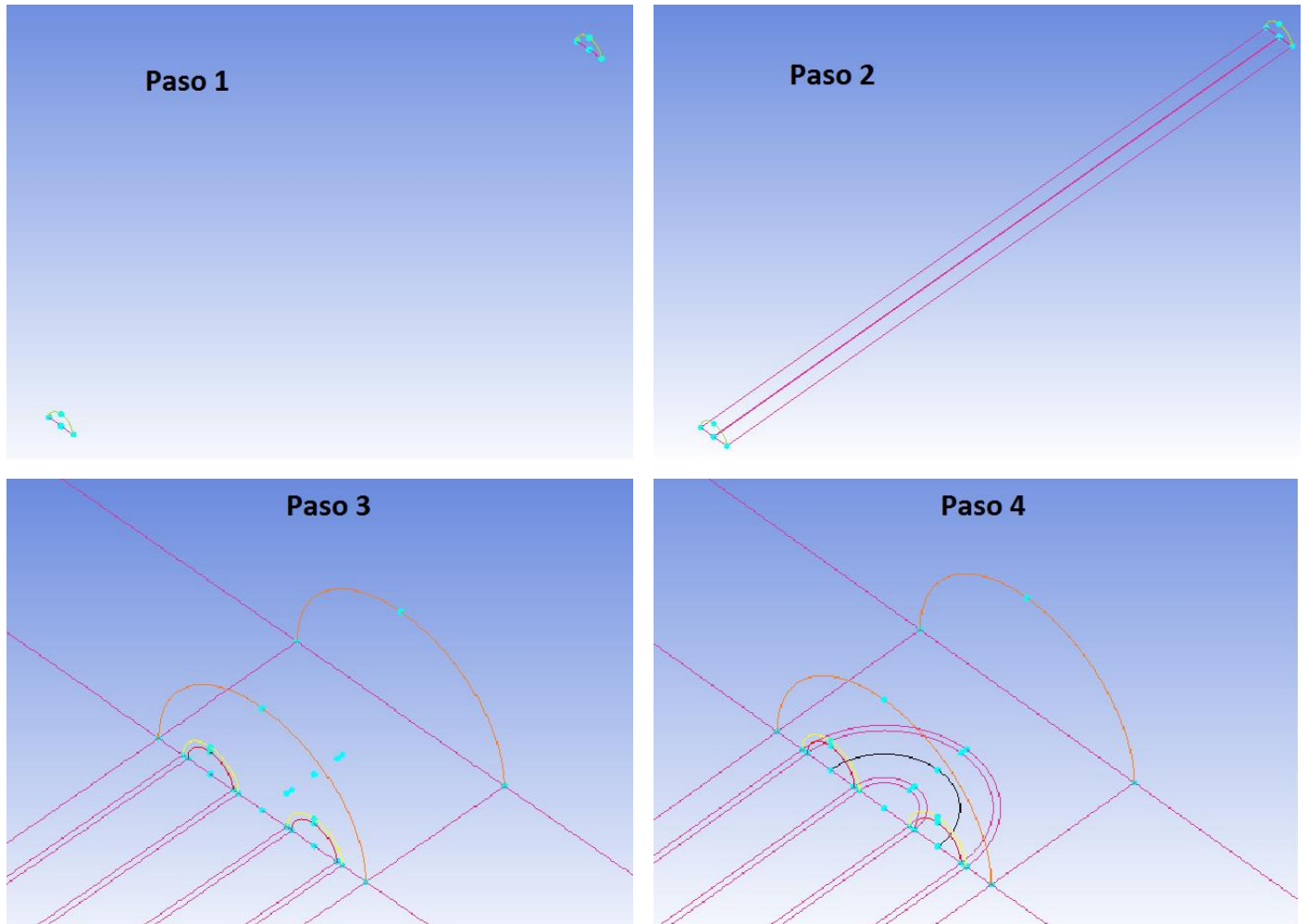


Figura 3.2: Diseño paso a paso de la geometría en 3D. Imágenes obtenidas de ICEM.

Adicionalmente se han añadido 3 m de profundidad donde el volumen completo corresponde al terreno (Figura 3.3). Incluir este volumen es fundamental para obtener unos resultados más precisos ya que hay transmisión de calor por conducción a lo largo de la profundidad, aunque de manera menos significativa.

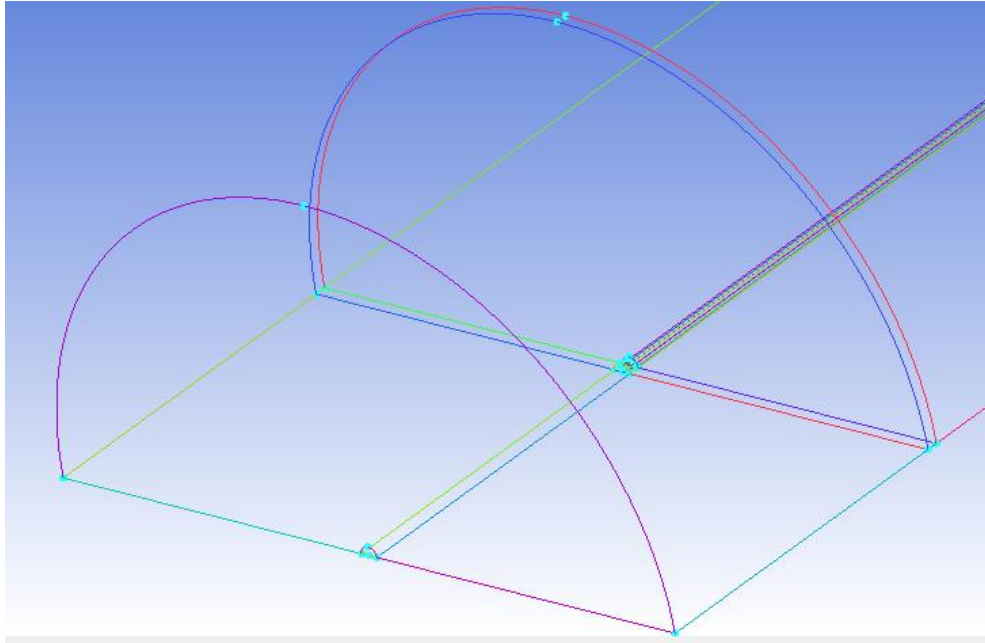


Figura 3.3: Geometría adicional correspondiente al terreno.

De nuevo, son creadas las superficies seleccionando las curvas que las componen una vez dibujada la geometría, teniendo especial cuidado pues se dispone de una cantidad mayor y es fácil olvidar alguna.

3.1.2 Generación de la malla

La generación de la malla es la fase más importante en CFD. La densidad de la malla, es decir, el tamaño de los volúmenes de control, determina la exactitud de la solución. La malla consiste en cuatro conceptos principales: volúmenes, superficies, segmentos y nodos. Estos conceptos están jerarquizados, un volumen está limitado por un conjunto de superficies cerradas, una superficie está limitada por un conjunto de segmentos cerrados y un segmento está limitado por nodos.

Cuando se está generando la malla de una geometría es muy recomendable conocer de antemano algunas características del modelo que se va a simular. De esta manera, si se conoce en que partes de la geometría los gradientes de temperatura varían rápidamente, se puede definir una malla más

densa solamente en esas zonas. Así FLUENT podrá simular mejor el intercambio de energía en esas regiones y conseguir resultados más ajustados.

3.1.2.1 *Generación de las mallas en 2D*

En este apartado se va a describir las diferentes mallas comparadas según el número de nodos, su tipología (estructurada o no estructurada) y la forma de las celdillas (cuadrangular o triangular). También se explicará brevemente el procedimiento seguido ya que se analiza con detalle en la referencia [6] y existen numerosos tutoriales en *Youtube*.

Dicho esto, los modelos generados en este estudio se pueden englobar en dos grupos:

1. Malla cuadrangular y estructurada: compuesta por celdillas de cuatro lados. Al ser estructurada el vector normal a una cara es paralelo al vector que une los centroides de las celdillas que comparten dicha cara, garantizando una mayor precisión aunque también una menor adaptabilidad. Se han generado mediante bloques o de manera semiautomática.
2. Malla triangular y no estructurada: las celdillas son triángulos y el vector normal a una cara de la celdilla y el que une los centroides no son paralelos por ser no estructurada, lo que provoca que requieran más tiempo de cálculo. Se genera de forma automática.

El procedimiento para crear la malla estructurada comienza generando un bloque en 2D que es dividido para formar otros más pequeños que se adapten a las superficies que se quieren mallar y se borrarán aquellos bloques que no hagan falta (Figura 3.4). Después, se tienen que asociar todas las caras exteriores (líneas negras) y las interiores que se requieran (líneas azules). Por último, se moverán o asociarán los vértices (Figura 3.5).

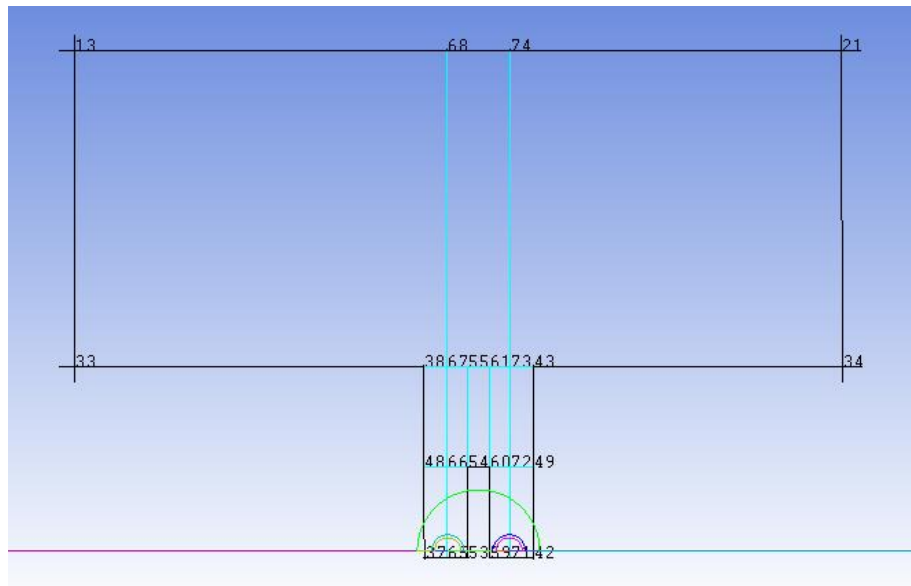


Figura 3.4: Bloques empleados para definir la malla.

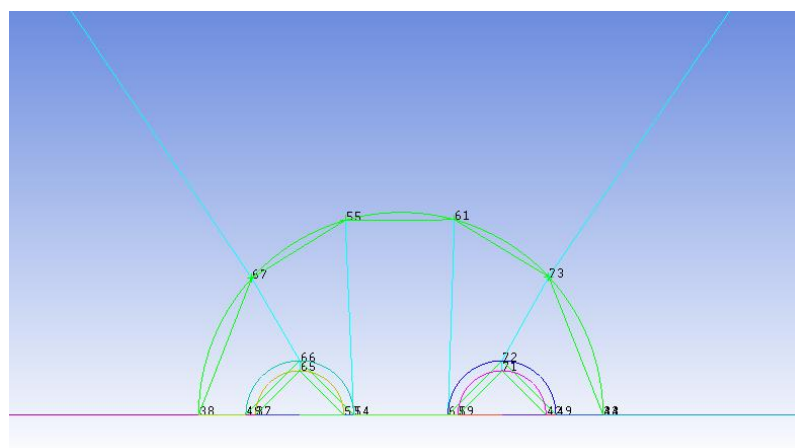
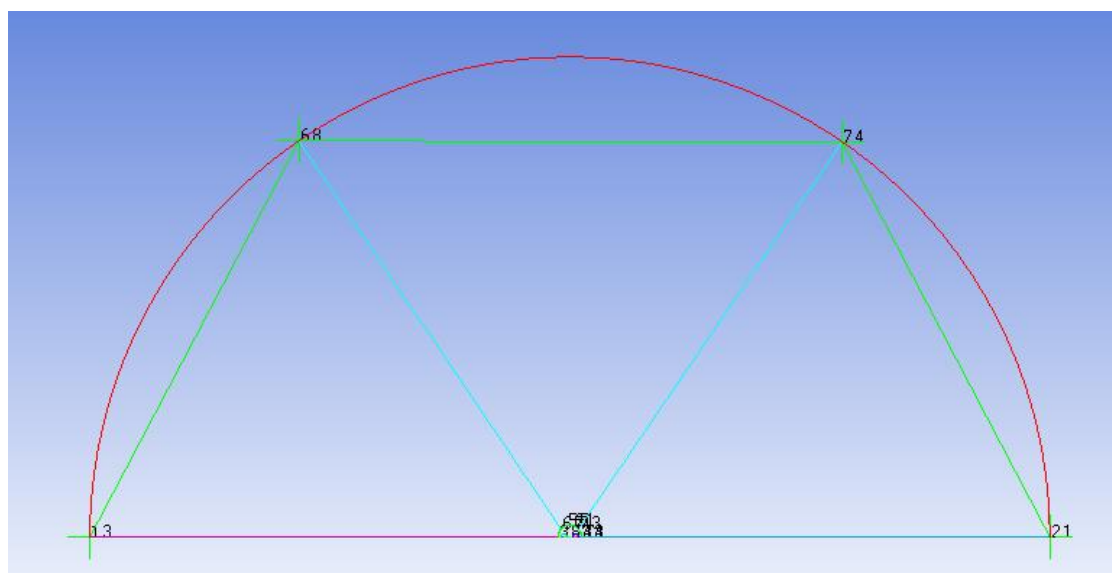


Figura 3.5: Bloques asociados y dispuestos sobre la geometría.

Estableciendo el número de nodos y la distribución de éstos en los segmentos de los bloques se obtiene la malla deseada (Figura 3.6 y 3.7). Es imprescindible diferenciar cada bloque antes de exportar la malla ya que puede originar problemas al cargarlo en FLUENT (*Parts* → botón derecho → *Create Part* → *Blocking Material*, *Create Part* → seleccionar y nombrar bloque).

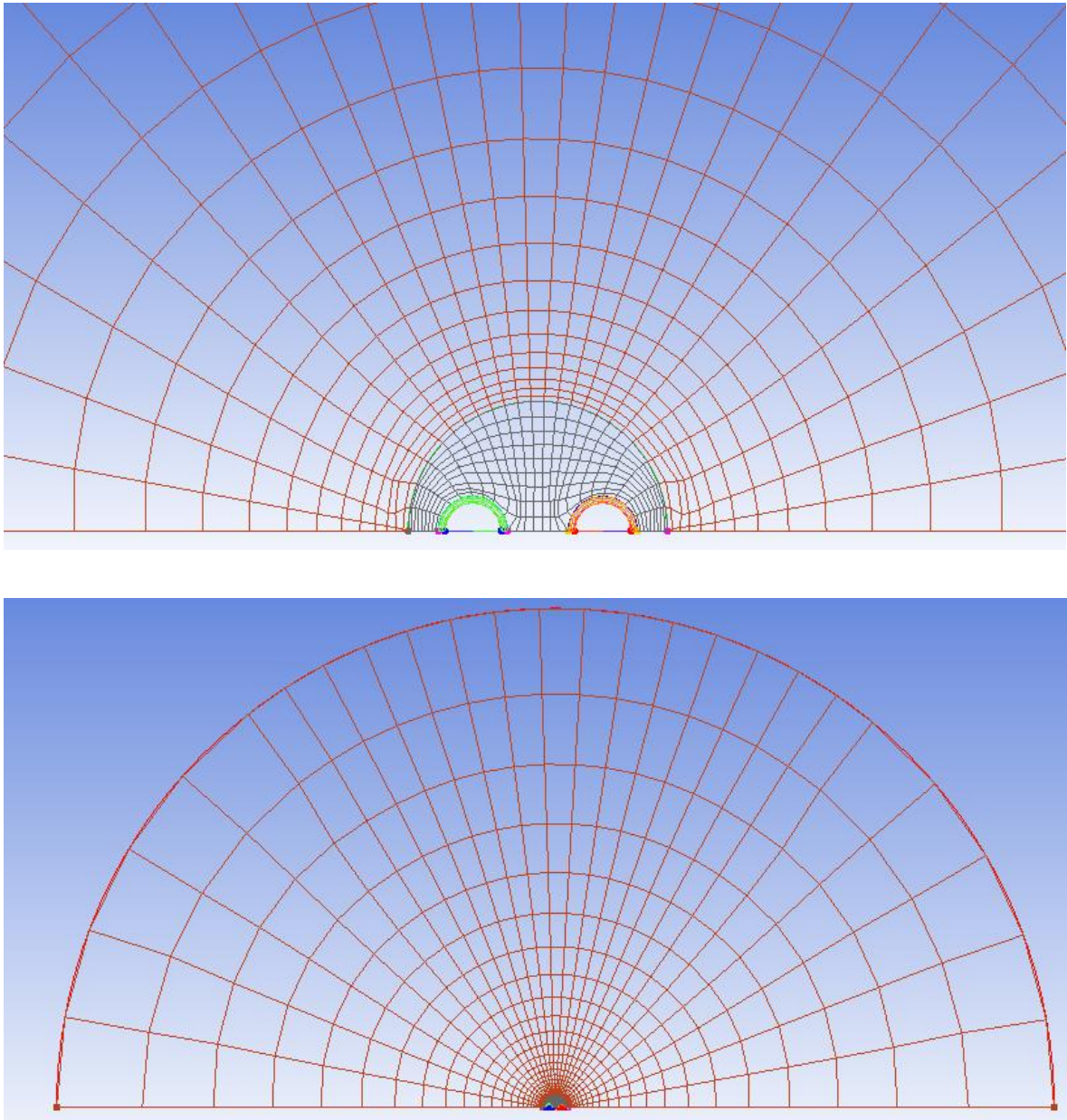


Figura 3.6: Malla estructurada de 1000 nodos.

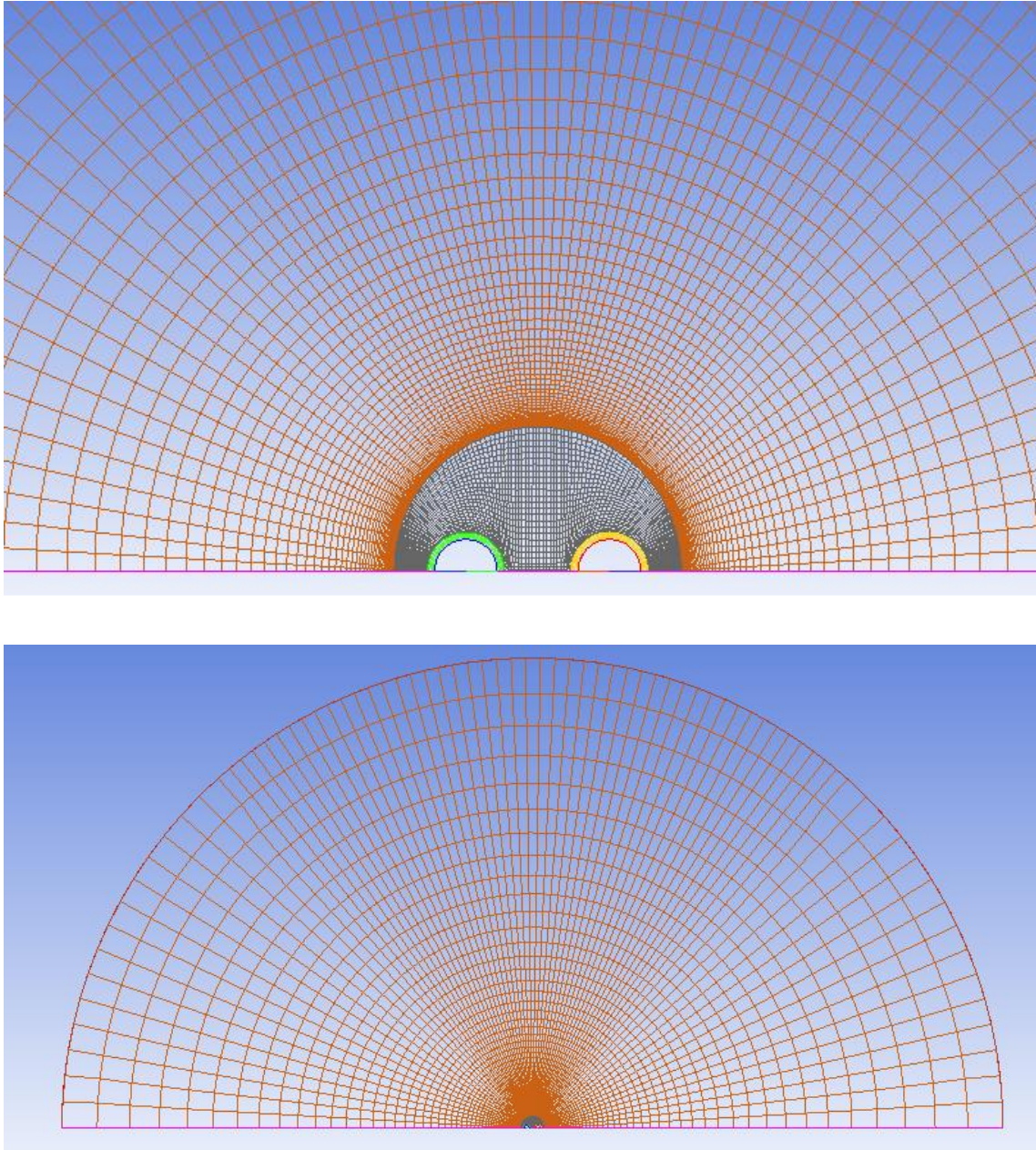


Figura 3.7: Malla estructurada de 8500 nodos.

En la malla no estructurada sólo es necesario establecer el número de nodos de los segmentos de la geometría y elegir el tipo de celdilla. A ésta malla se le hizo posteriormente una modificación que fue cambiar la densidad de nodos en los tubos, teniendo así un número de nodos similar a las mallas estructuradas respectivamente (Figuras 3.8 y 3.9).

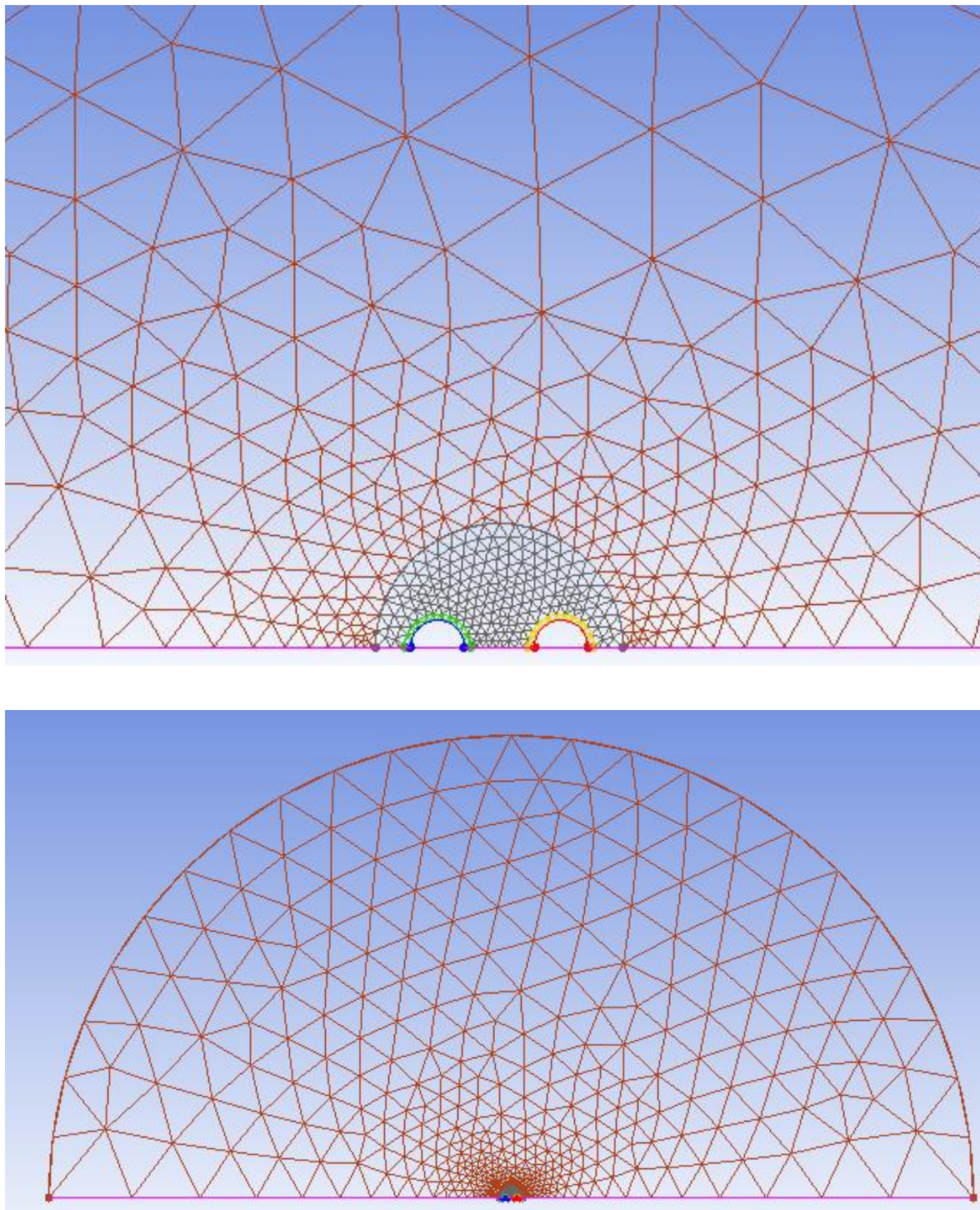


Figura 3.8: Malla triangular de 1000 nodos.

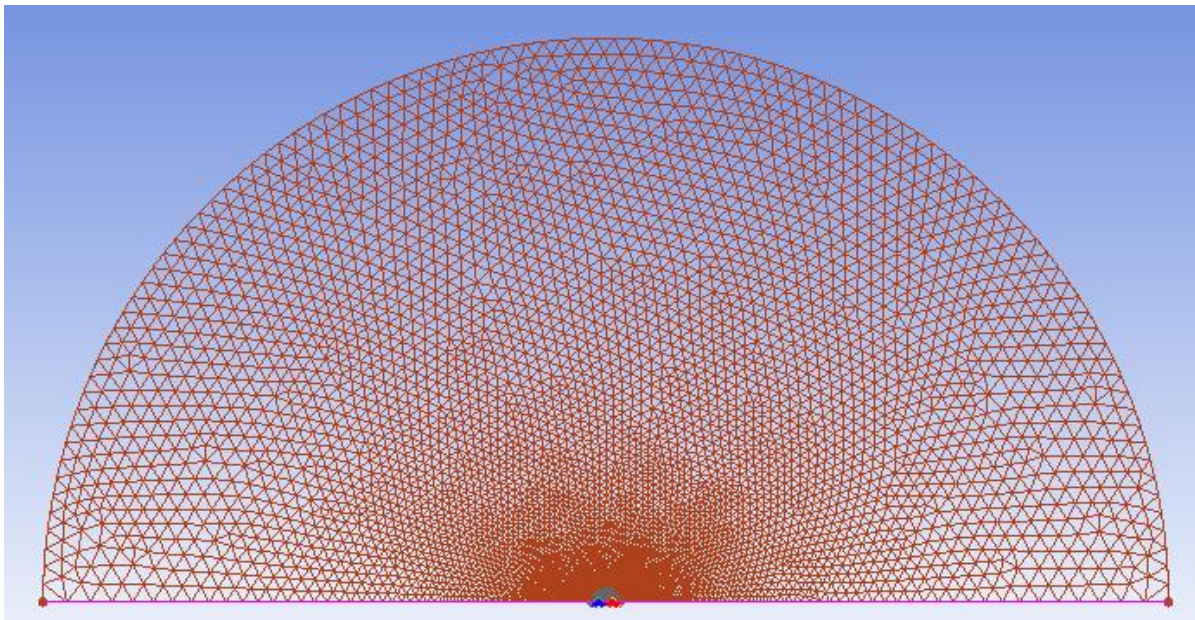
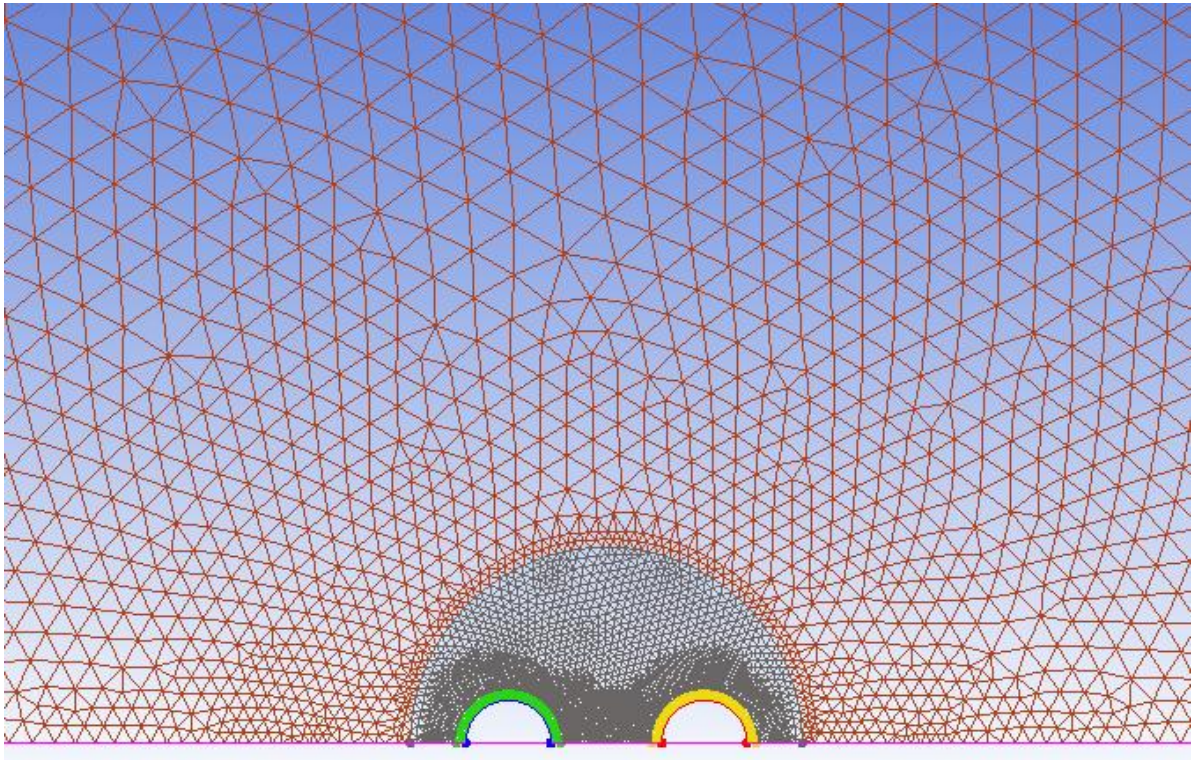


Figura 3.9: Malla triangular de 8500 nodos.

3.1.2.2 Generación de la malla en 3D

Antes de realizar este apartado es necesario haber comparado y analizado resultados de las diferentes mallas en dos dimensiones, tal y como se ha descrito en el apartado 3.2 Resultados de los modelos 2D. Se concluye que la mejor opción es la malla estructurada de mil nodos (en el plano a profundidad cero).

La malla se genera extruyendo los bloques de la superficie a profundidad cero hasta 129,9 m de distancia según la Figura 3.10. El siguiente paso es unir los dos bloques de agua y tubo que se encuentran separados, para lo que se realiza una extrusión a lo largo de la U y se unen los vértices mediante el comando *Merge Vertices*.

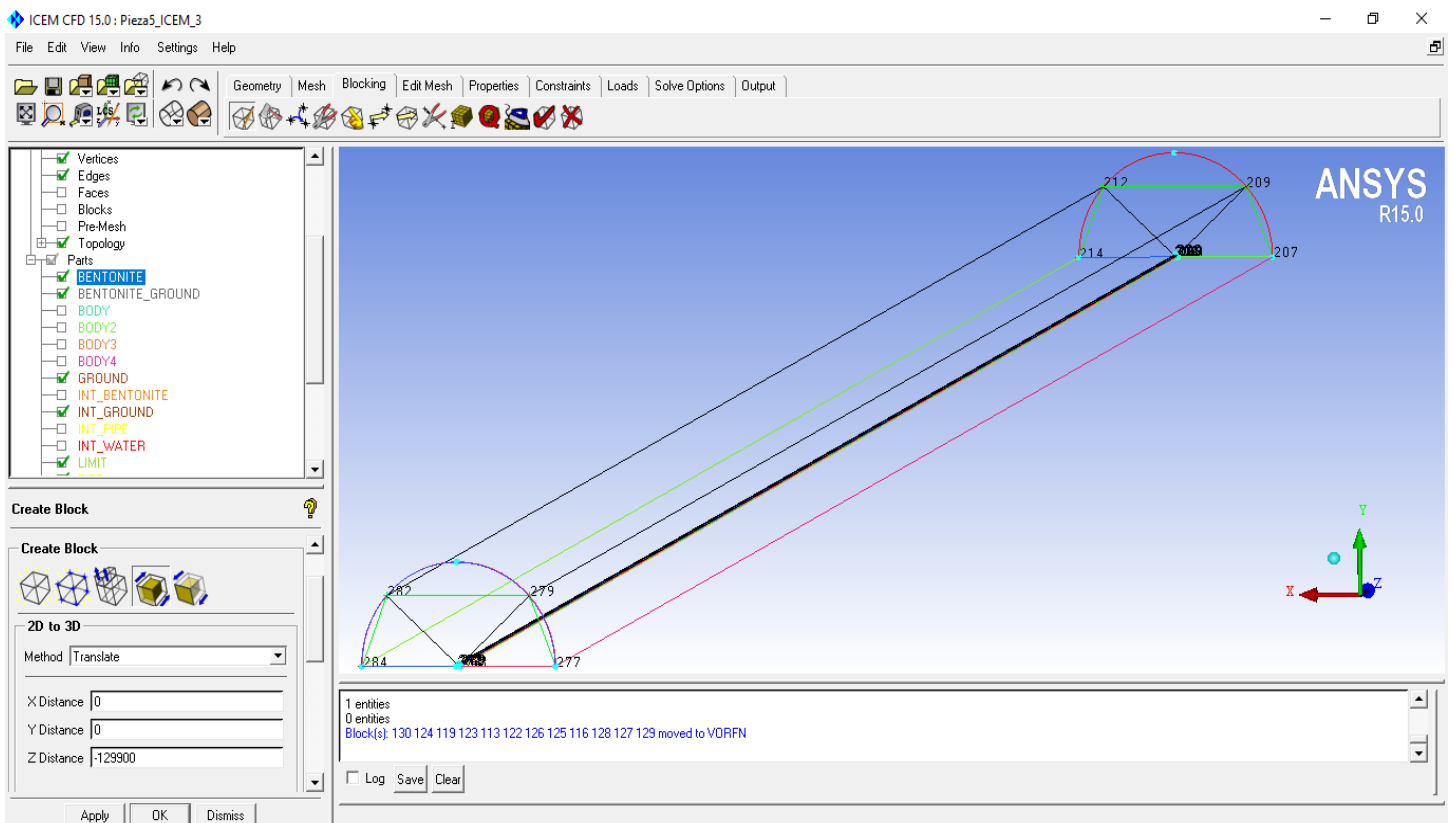


Figura 3.10: Conversión de bloques de 2D a 3D a lo largo del eje z.

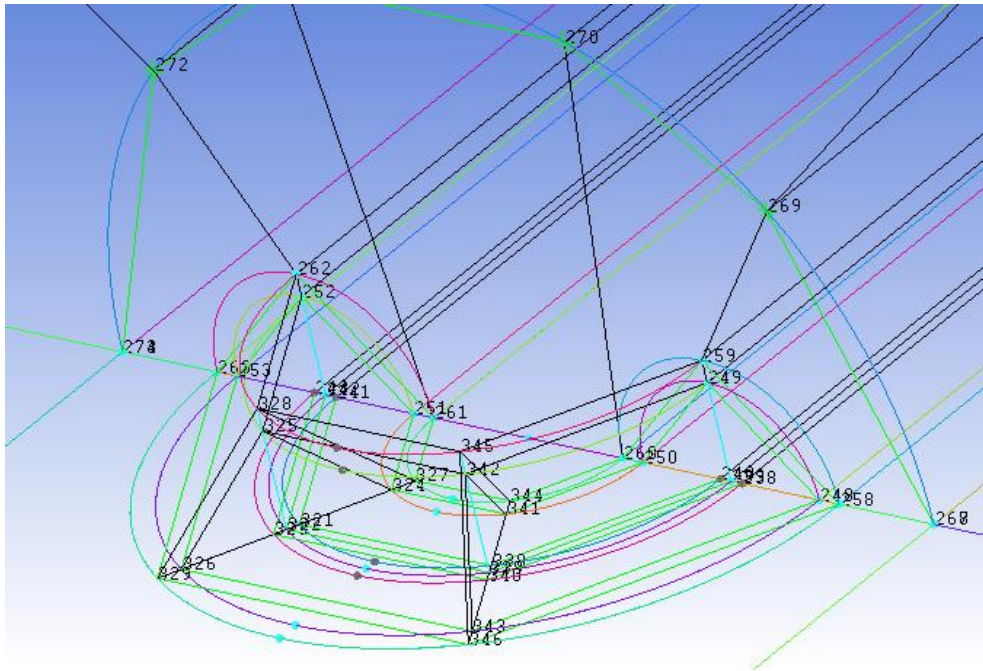


Figura 3.11: Bloques del tubo en U.

La parte adicional de la geometría (Figura 3.3) es añadida creando otro bloque, se divide dicho bloque y se asocian los segmentos y vértices en esa zona. Luego, se tiene que extruir hasta la superficie a 129,9 m de profundidad y unir algunos bloques de la parte adicional para tener una sola pieza. Los nuevos bloques unidos a los anteriores quedan de la siguiente forma:

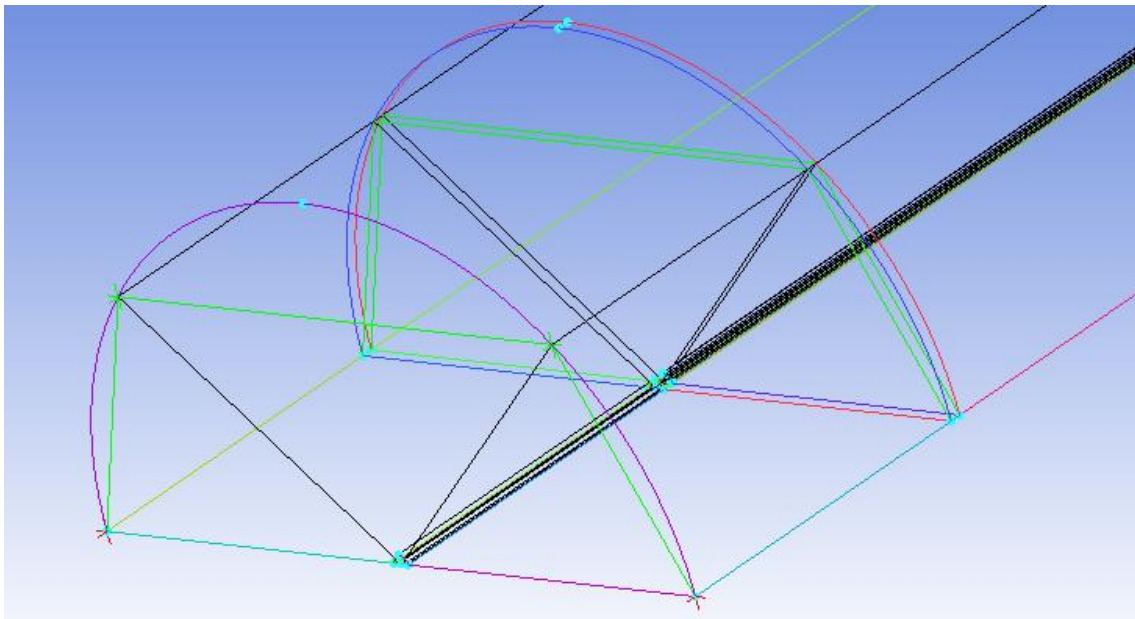


Figura 3.12: Bloques dispuestos y asociados a la geometría adicional.

A los bloques establecidos se les tiene que introducir el número de nodos y la distancia entre ellos en los segmentos que no existían en el modelo 2D. Esto corresponde a los segmentos en el eje Z, el tubo con forma de U y el volumen de tierra añadido como se detalla en la Tabla 3.1.

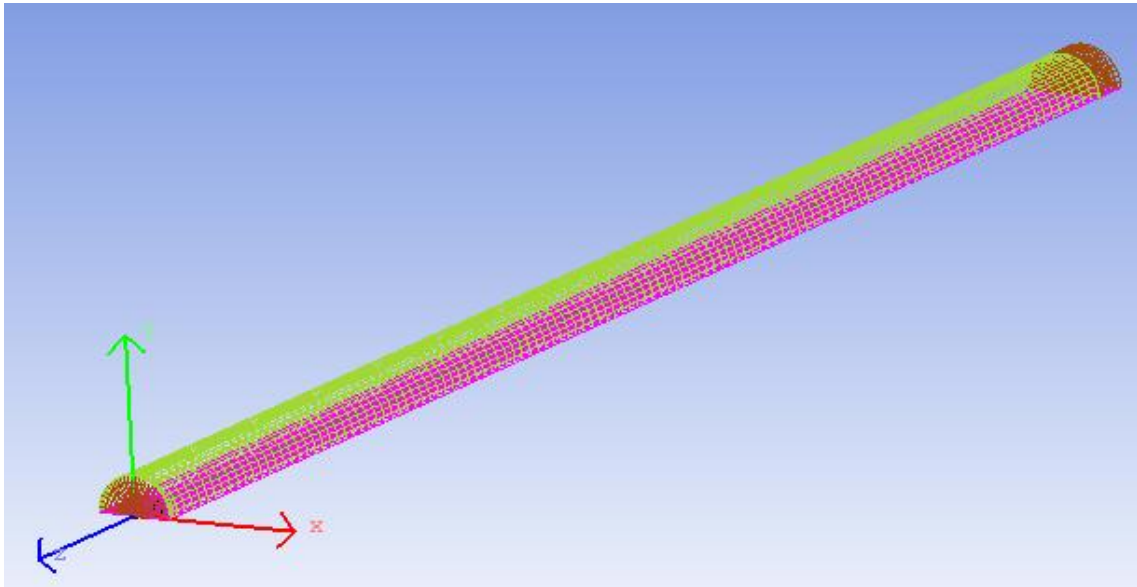


Figura 3.13: Malla completa en tres dimensiones.

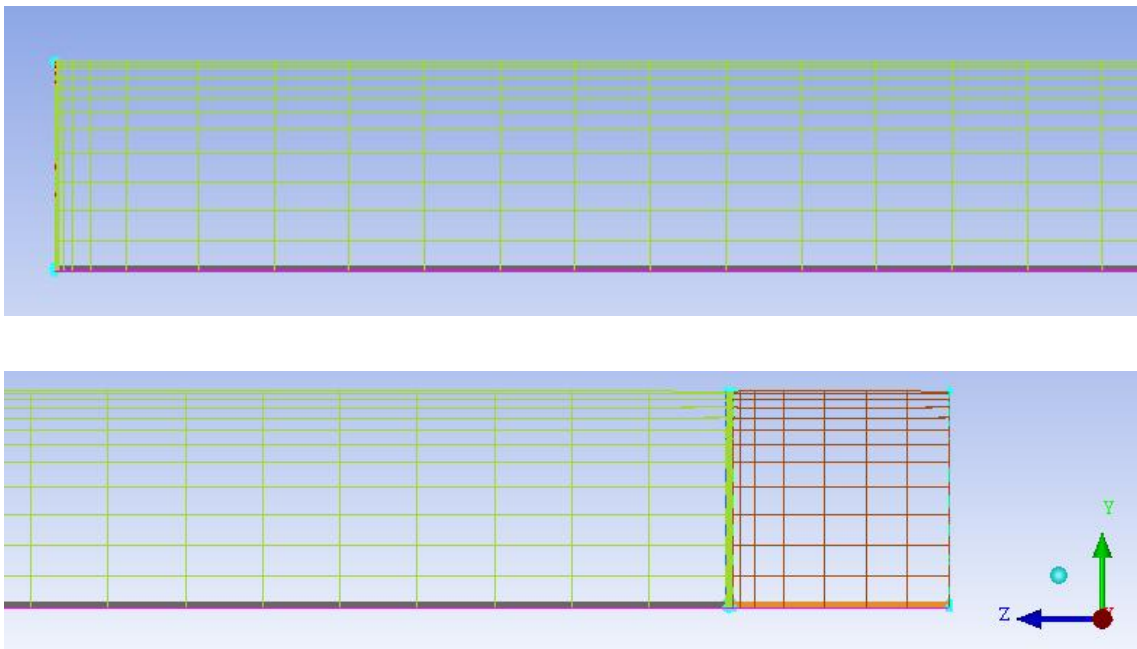


Figura 3.14: Extremos de la malla en el plano YZ.

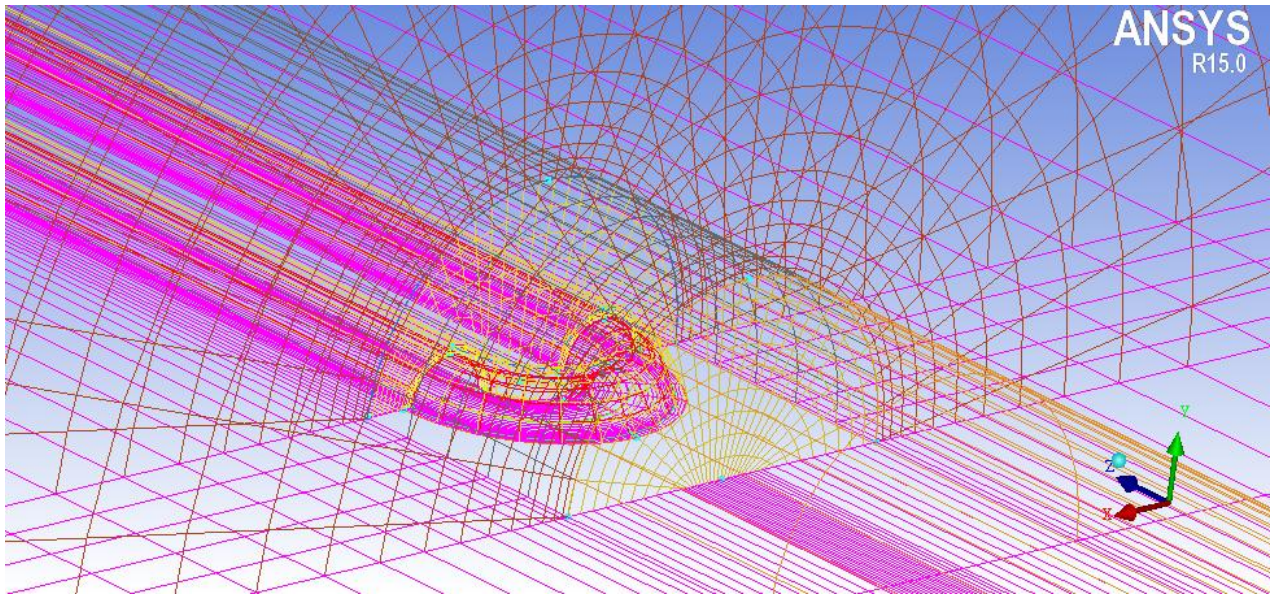


Figura 3.15: Detalle de la malla a 130 m de profundidad aproximadamente.

Nótese en la Figura 3.15 que la bentonita existente entre el terreno y el tubo con forma de U no ha sido mallada. Esto se debe a que resulta muy complejo dibujar los bloques en ICEM. Otra opción podría ser crear una malla desestructurada en esa zona y unirla al resto empleando *Edit Mesh* → *Merge Nodes* → *Merge Meshes* pero, por motivos aún por descubrir, aparecían errores en ANSYS Fluent al cargar la malla.

Para introducir la región no mallada se podría cambiar la malla a una tipo desestructurada pero, como se va a ver en los resultados de los modelos en dos dimensiones, el error que se introduce sería mucho mayor que obviando esta región (Figuras 3.20 y 3.21).

Finalmente, se ha despreciado la transmisión de calor en la zona del tubo en U ya que su efecto supondrá un error mínimo en los resultados finales (Véase en el Anexo C).

Tipo de segmento	Región	Nº de nodos	Tipo de separación	Distancia entre nodos (mm)
Radiales (plano XY, Z=0)	WATER	14	Exponential2	Spacing 2 = 0,4
	PIPE	4	BiGeometric	—
	BENTONITE	9	BiGeometric	Spacing 1 = 1,0
	GROUND	26	Exponential1	Spacing 1 = 3,0
Semicirculares (plano XY, Z=0)	WATER	5	BiGeometric	—
Eje Z	0 – 129,9 m (Todos)	131	BiGeometric	Spacing 2 = 1,0
	129,9 – 130 m (Todos)	6	BiGeometric	—
	130 – 133 m (Todos)	8	BiGeometric	Spacing 1 = 100,0
Transversal al tubo	U	5	BiGeometric	—
Semicirculares (plano XY, Z=133m)	GROUND-GROUND	46 (en total)	BiGeometric	—

Tabla 3.1: Características de los segmentos de los bloques copiando éstas a todos los paralelos.

3.2 Resultados de los modelos 2D

Como ya se ha dicho anteriormente, el objetivo de realizar diversas mallas en 2D no es más que hacer una comparación entre ellas para ver cuál se adapta mejor al modelo que se quiere simular. Dicha comparación se realizará de manera cualitativa, mediante un video de las cuatro simulaciones con la distribución descrita en la Figura 3.16, y cuantitativa, situando una cantidad de puntos en zonas clave de la geometría (Figura 3.19) y obteniendo a partir de éstos el error medio y el error cuadrático medio. Ambos errores se calculan como la suma del error de todos los puntos entre el número de puntos en cada instante de tiempo y tomando como referencia la malla estructurada de 8500 nodos.

$$e_{\text{medio}}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i^{8500 \text{ est}} - T_i^{\text{caso}}) \quad (3-1)$$

$$e_{\text{cuadrático medio}}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i^{8500 \text{ est}} - T_i^{\text{caso}})^2 \quad (3-2)$$

Siendo N el número de puntos representados sobre la geometría y T_i la temperatura de un punto determinado.

Malla Estructurada 1000 nodos	Malla Triangular 1000 nodos
Malla Estructurada 8500 nodos	Malla Triangular 8500 nodos

Figura 3.16: Distribución de los casos simulados en el vídeo

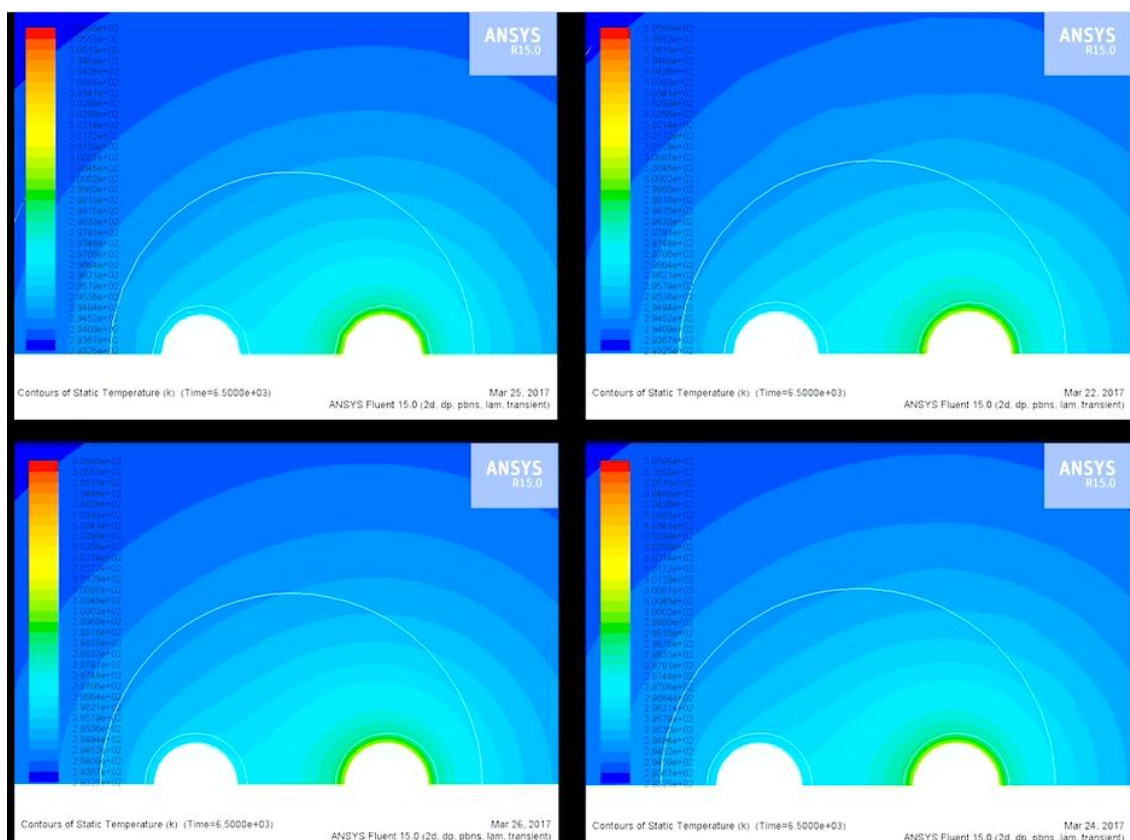


Figura 3.17: Captura de vídeo comparativo de los diferentes modelos 2D transcurridos 6500s.

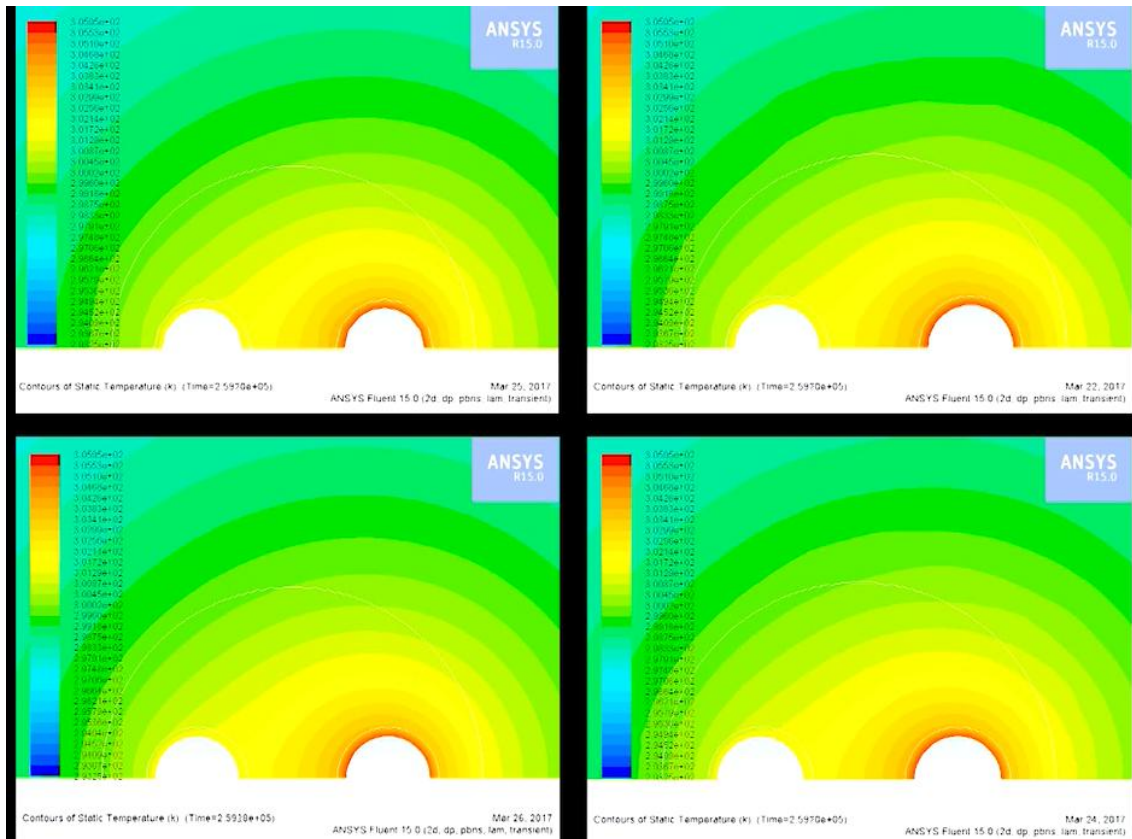


Figura 3.18: Captura de vídeo comparativo de los diferentes modelos 2D transcurridos 259200s.

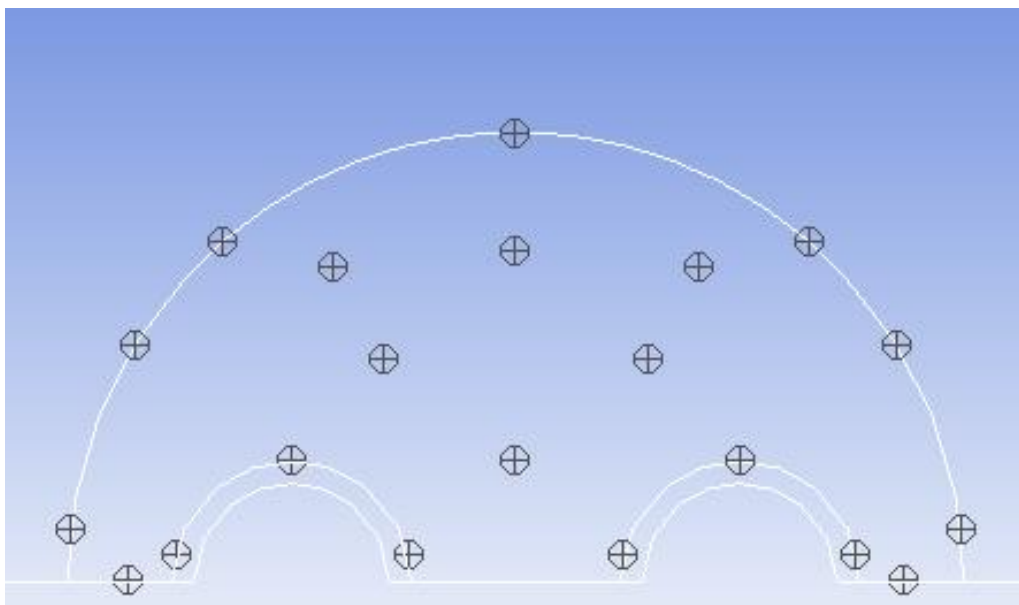


Figura 3.19: Puntos situados en zonas clave de la geometría.

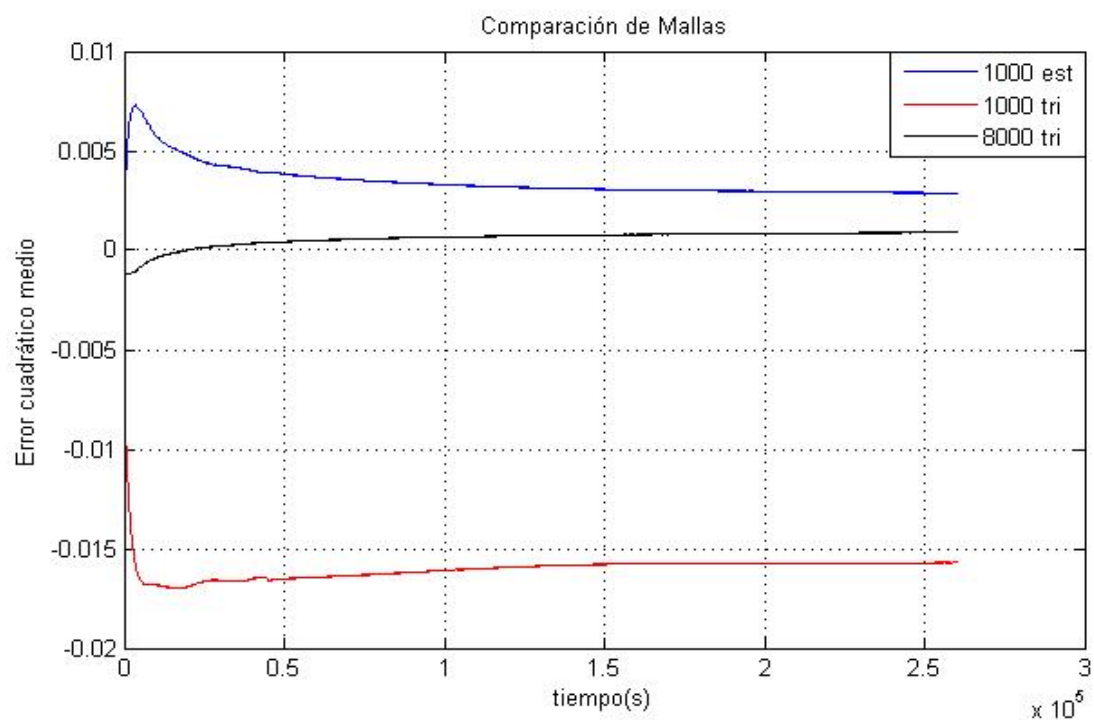


Figura 3.20: Error medio calculado a partir de 21 puntos en cada instante de tiempo.

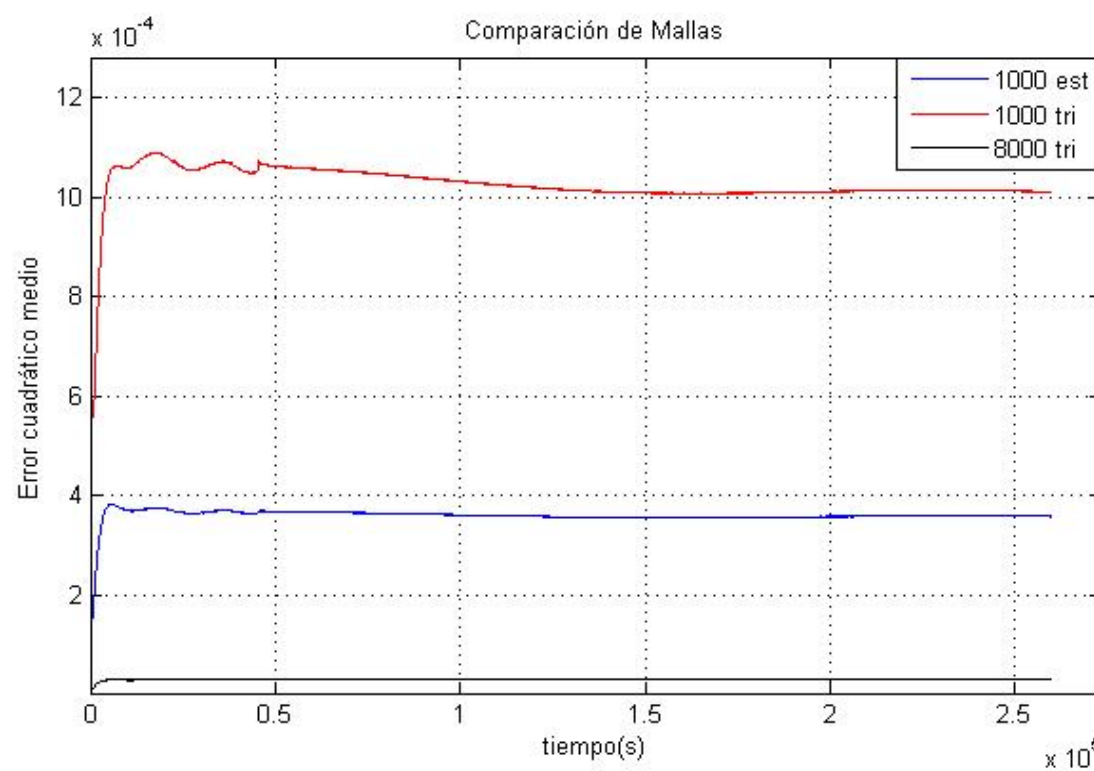


Figura 3.21: Error cuadrático medio calculado a partir de 21 puntos en cada instante de tiempo.

En las Figuras 3.17 y 3.18 la distribución de temperaturas es similar en los diferentes casos por lo que no existen diferencias apreciables visualmente; el rango de temperaturas de la mayoría de las celdas, correspondiente a la barra de color establecida, coincide en las simulaciones. Aún así, será necesario analizar de forma más precisa las diferencias entre ellas.

Observando las Figuras 3.20 y 3.21 se aprecia claramente que se obtienen resultados muy parecidos en la malla triangular de 8500 nodos respecto a la de referencia, ya que el error medio está muy próximo a cero y el error cuadrático es bastante inferior a los otros. Además, la malla estructurada de 1000 nodos resulta interesante por tener un error medio pequeño a pesar de no ser una malla tan refinada.

Finalmente, la malla que se ha utilizado es la estructurada de 1000 nodos porque posee menos elementos lo que se traduce en un ahorro computacional muy elevado (las iteraciones necesarias para converger son menores).

3.3 Resultados del modelo 3D

La simulación del modelo en tres dimensiones es la parte más importante de este trabajo y en la que se valora tanto la adecuación de la malla al problema como los coeficientes térmicos del terreno y la bentonita.

A la hora de realizar dicha simulación, es imprescindible realizar una simulación previa en estado estacionario con el fluido en reposo de modo que todos los elementos que participan en la simulación adquieran la temperatura del terreno inalterado (Figura 3.22). Esto se realizó en el experimento llevado a cabo por los profesores dejando el agua en reposo durante una semana tal y como se explica en [1].

El siguiente paso consiste en configurar el caso en transitorio y comenzar el cálculo. Los intervalos de tiempo no pueden ser muy altos especialmente al principio, por tanto, se han empleado intervalos de cinco segundos en los

primeros veinte minutos (1300s concretamente) y más adelante intervalos de veinticinco segundos.

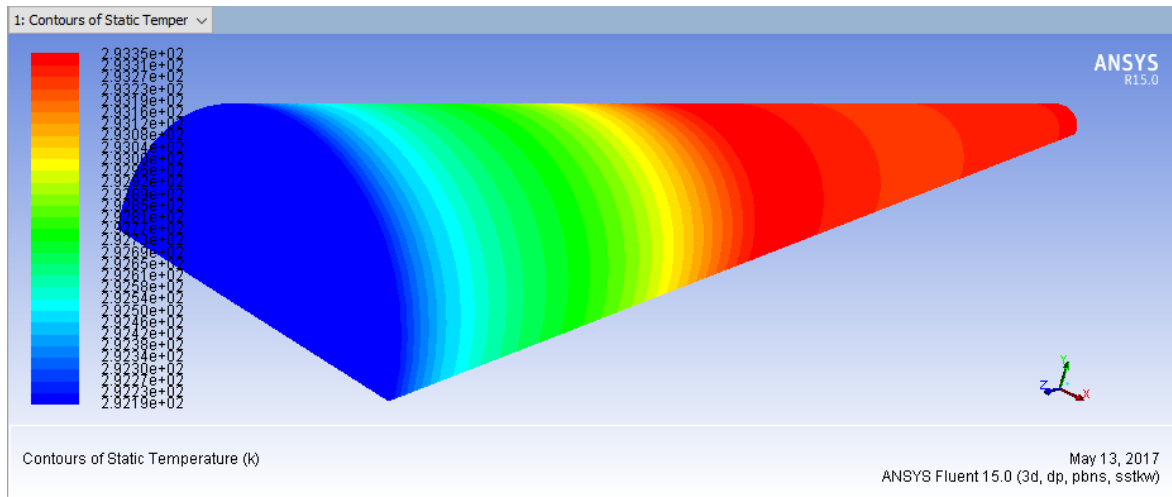


Figura 3.22: Contornos de temperatura de todos los elementos inicialmente.

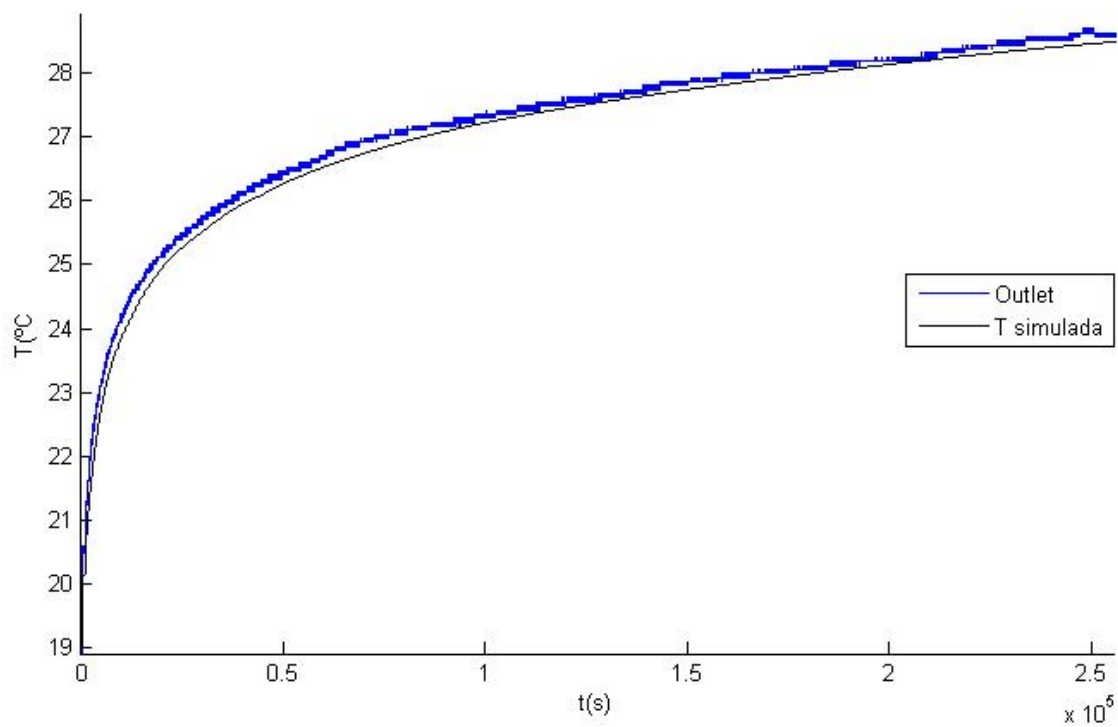


Figura 3.23: Gráfica con datos experimentales y simulados de la temperatura de salida del agua

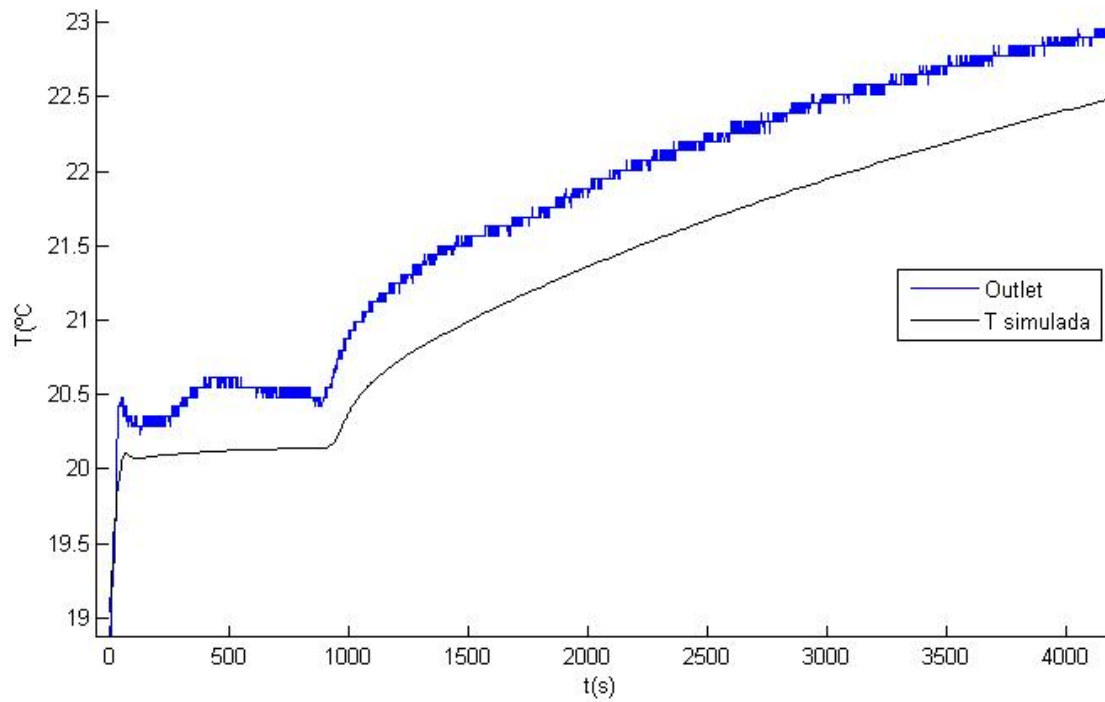


Figura 3.24: Gráfica con datos experimentales y simulados de la temperatura de salida del agua entre 0 y 4000s.

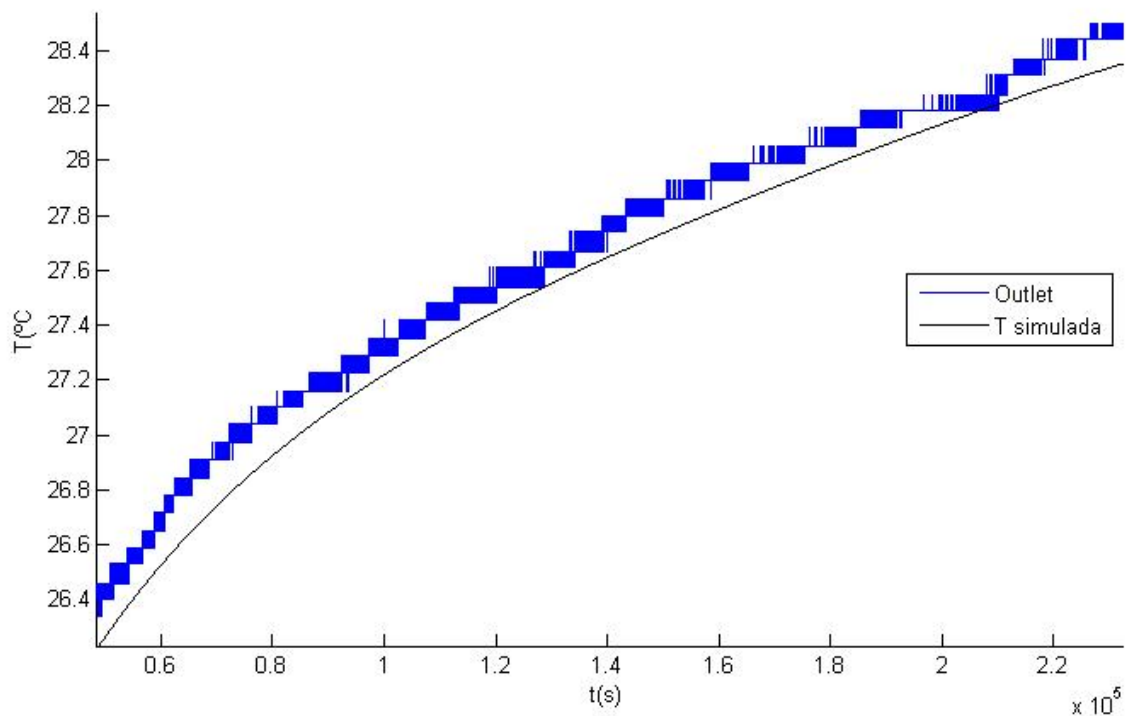


Figura 3.25: Gráfica con datos experimentales y simulados de la temperatura de salida del agua entre 50000 y 230000s.

La curva de la temperatura de salida que se ha extraído de la simulación posee la misma forma que la curva experimental y valores considerablemente parecidos (Figuras 3.23, 3.24 y 3.25). Al inicio las temperaturas divergen afectando esa diferencia a la temperatura posterior del fluido. Si la curva simulada es desplazada verticalmente ambas curvas se superponen.

Además de obtener la temperatura de salida, resulta interesante ver la distribución de temperaturas en diferentes secciones y la temperatura del fluido a lo largo del tubo en cualquier instante de tiempo. Se representan como ejemplo las siguientes gráficas y contornos transcurridos en el tiempo indicado (más instantes de tiempo en Anexo D).

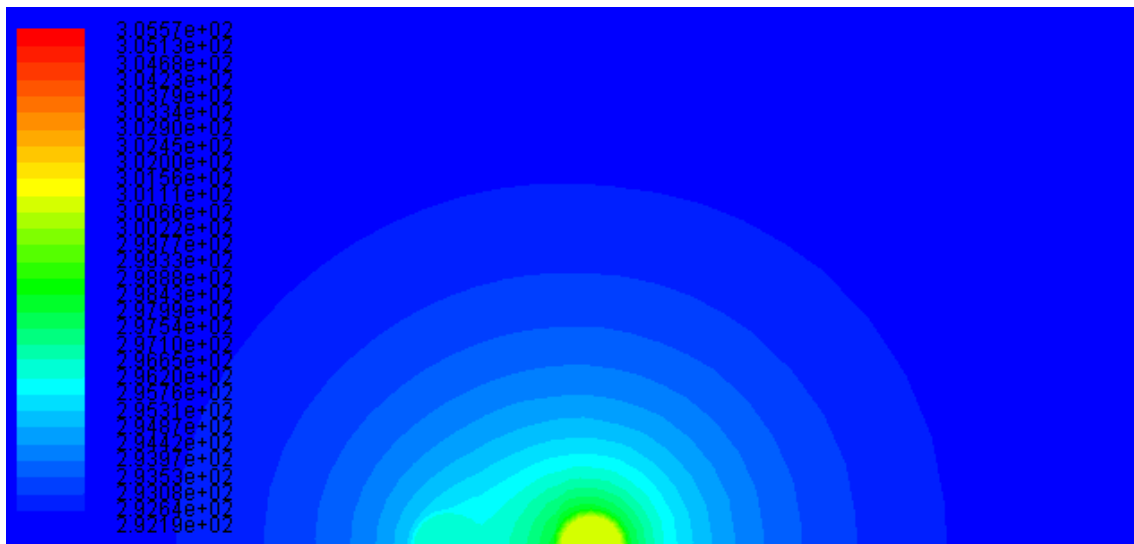


Figura 3.26: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, Z=0m), t = 7175s.

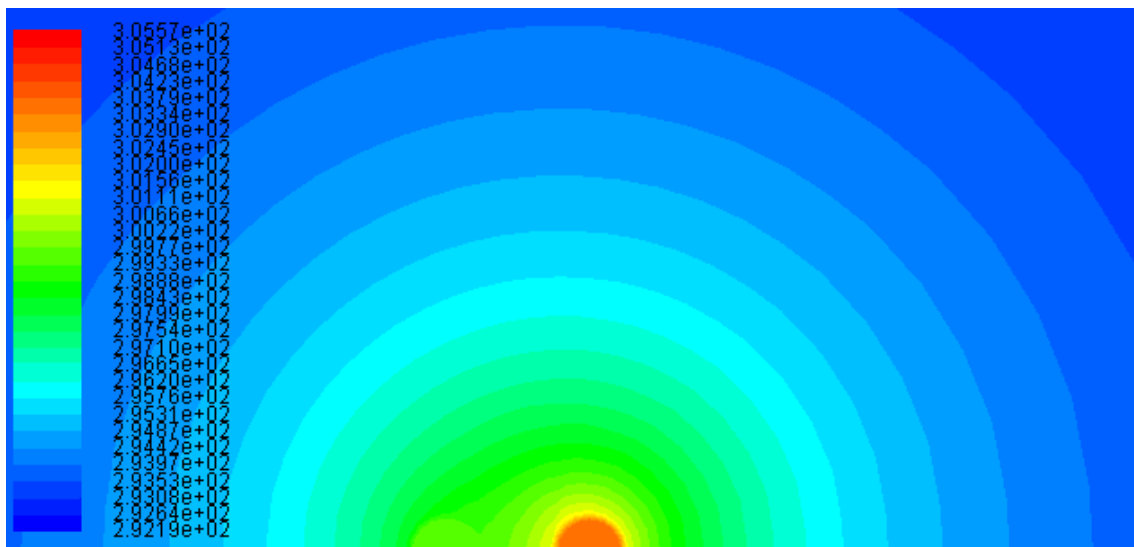


Figura 3.27: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, Z=0m), t = 53200s.

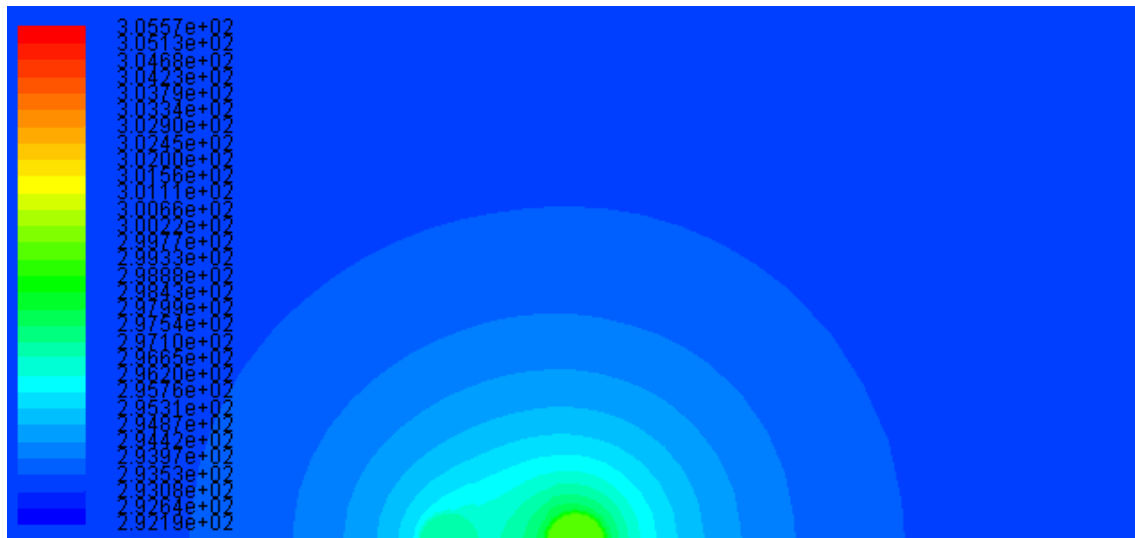


Figura 3.28: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -40\text{m}$, $t = 7175\text{s}$.

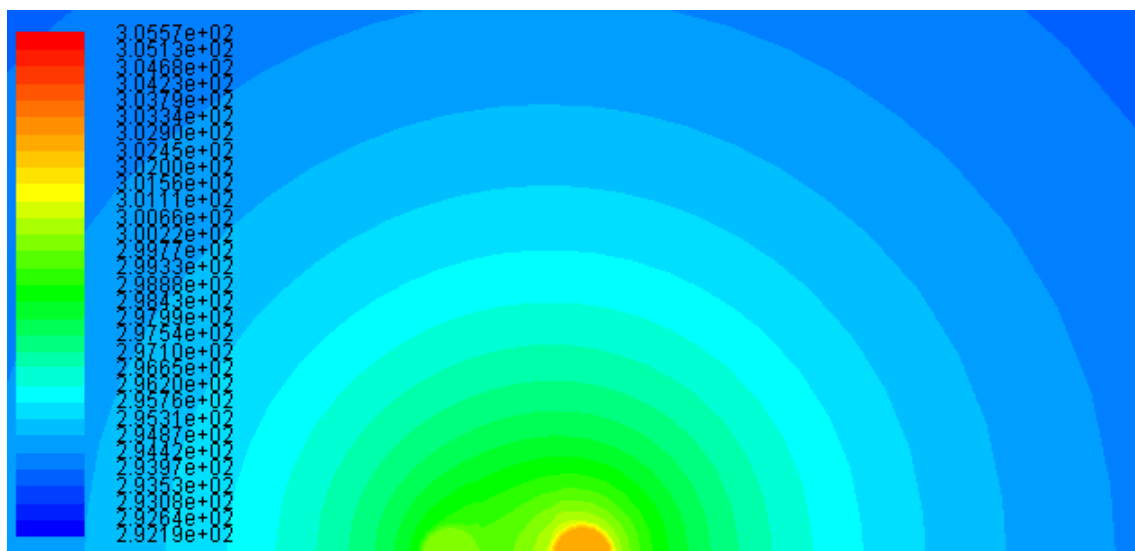


Figura 3.29: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -40\text{m}$, $t = 53200\text{s}$.

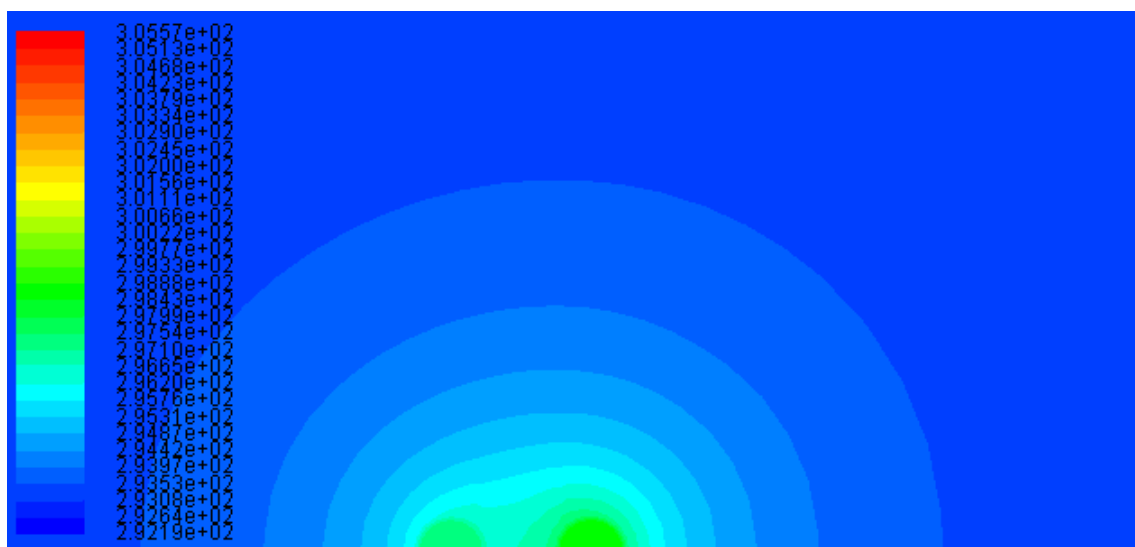


Figura 3.30: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -80\text{m}$, $t = 7175\text{s}$.

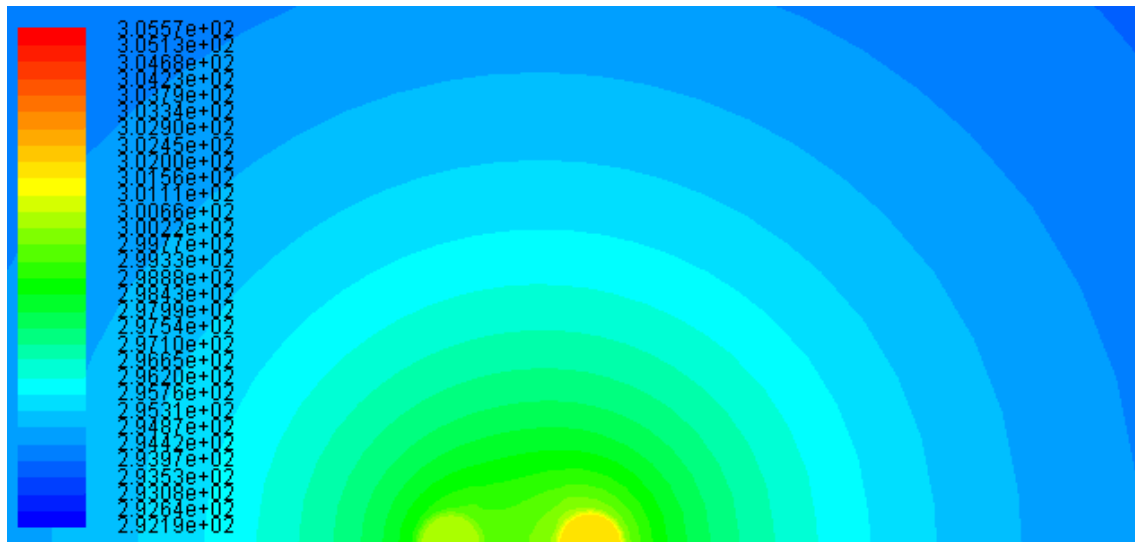


Figura 3.31: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -80\text{m}$, $t = 53200\text{s}$.

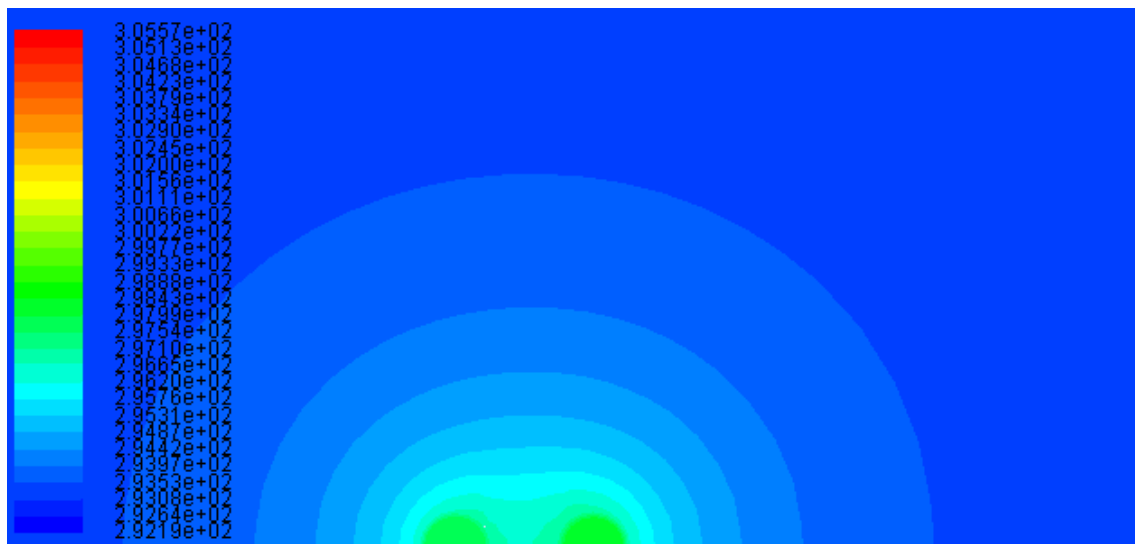


Figura 3.32: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -120\text{m}$, $t = 7175\text{s}$.

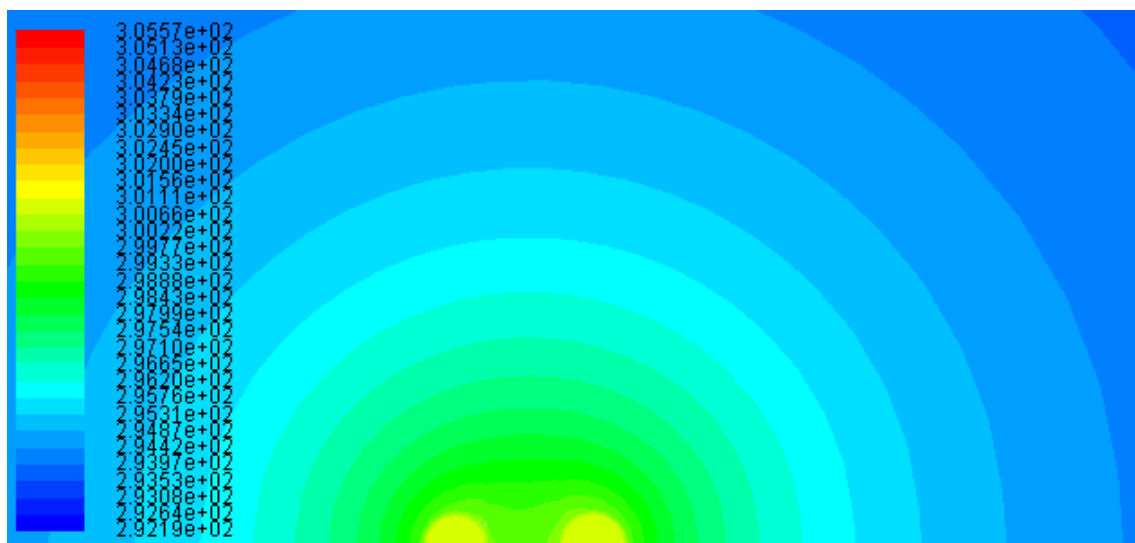


Figura 3.33: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -120\text{m}$, $t = 53200\text{s}$.

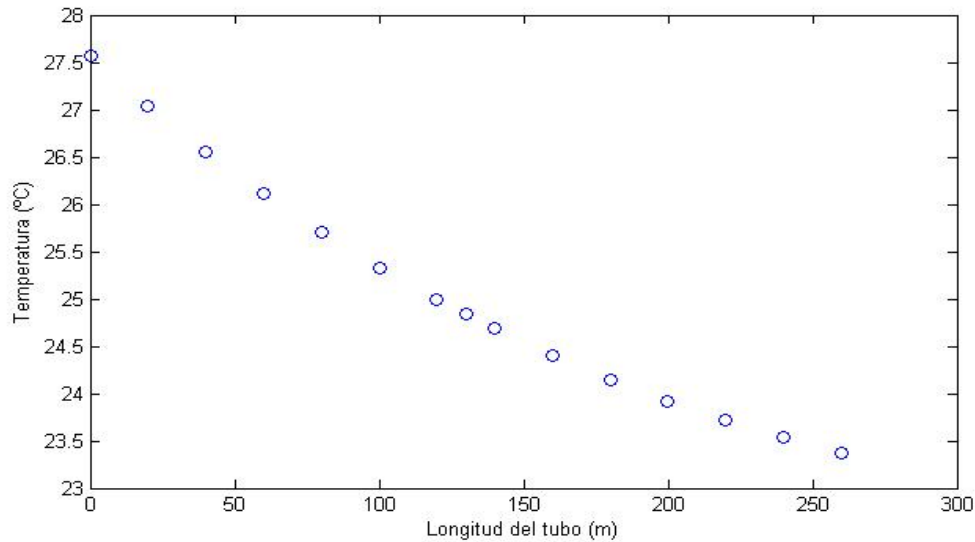


Figura 3.34: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, $t = 7175s$.

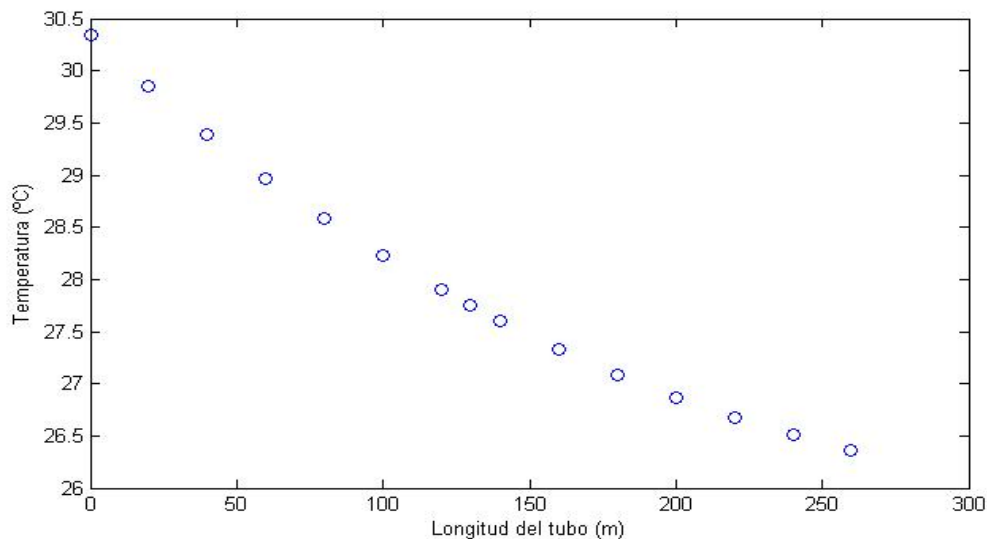


Figura 3.35: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, $t = 53200s$.

Las diferentes secciones paralelas al suelo permiten visualizar cómo la temperatura del fluido disminuye a lo largo del tubo y la temperatura de los cuerpos colindantes. De la misma manera, se observa como la temperatura del fluido varía con mayor intensidad en el principio del tubo para después ir decreciendo la pendiente lentamente a lo largo del tubo en las Figuras 3.34 y 3.35. Esto se debe a que la transmisión de calor es mayor al principio ya que la diferencia de temperaturas entre el fluido y la pared del tubo es mayor que en tramos posteriores.

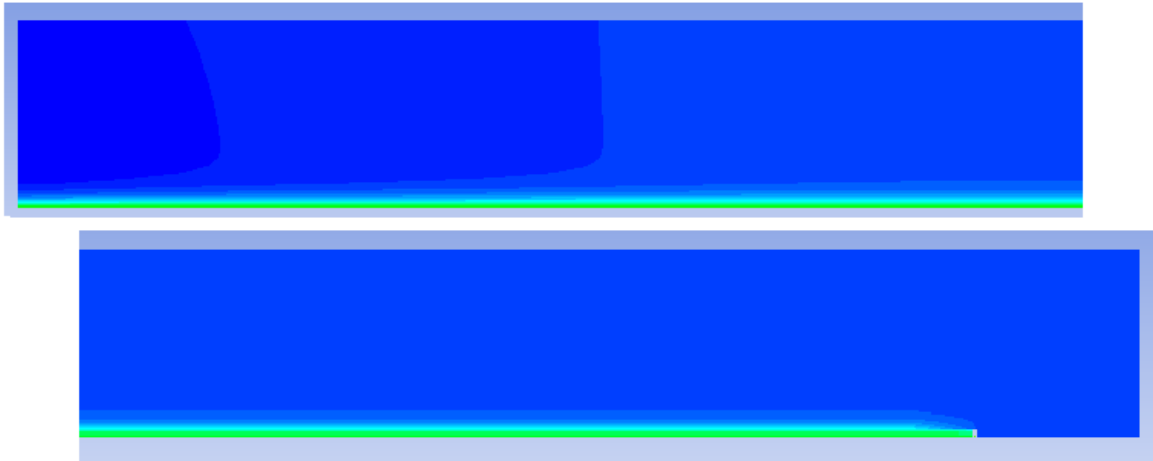


Figura 3.36: Distribución de temperaturas en la mitad de la pieza (Plano YZ, $X=0$), $t=24000s$.

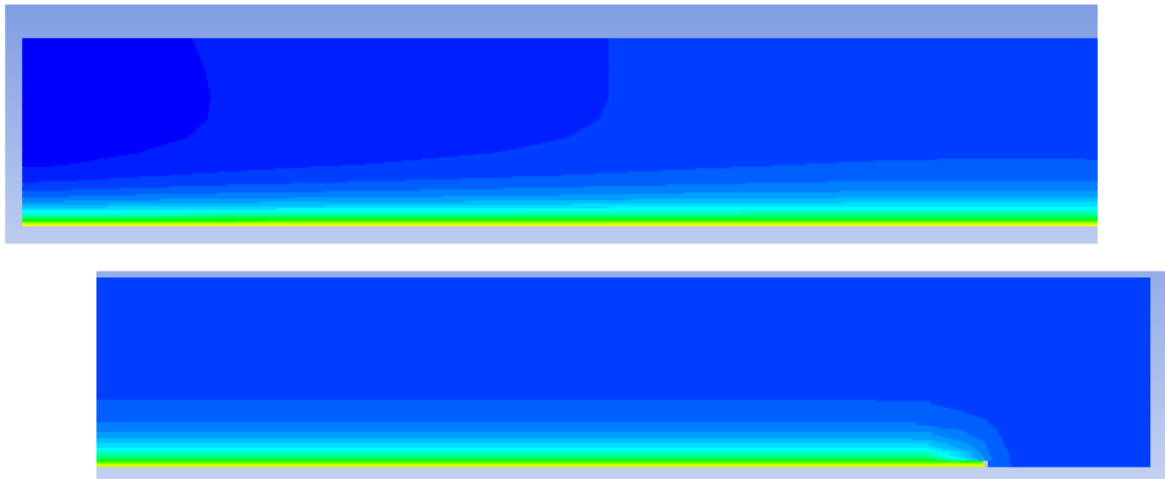


Figura 3.37: Distribución de temperaturas en la mitad de la pieza (Plano YZ, $X=0$), $t=259200s$.

La temperatura del terreno en el límite establecido debe permanecer constante en todo momento como se demuestra en las Figuras 3.36 y 3.37. Si la temperatura no se mantuviese fija no se estaría empleando la del terreno inalterado, por tanto, afectaría de forma considerable a la distribución de temperaturas y, consecuentemente, a la temperatura del fluido. Cabe recordar que la temperatura del límite cambia con la profundidad pero se mantiene fija en el tiempo, por ello, se aprecian diferentes colores a baja profundidad.

3.4 Fiabilidad de los resultados

El tamaño de las celdas y el intervalo de tiempo tomado pueden suponer una variación significativa de los resultados. Estos dos factores están englobados en el número de Courant, CFL, que es el cociente entre el intervalo de tiempo y el tiempo de residencia en un volumen finito.

$$CFL = \frac{\Delta t}{\Delta x / c} = \frac{c \Delta t}{\Delta x} \quad (3-3)$$

En donde:

Δt es el intervalo de tiempo establecido.

Δx es el intervalo de espacio recorrido por el fluido.

c es la velocidad del fluido.

Variar el número de Courant es una manera de visualizar las diferencias de resultados en las simulaciones, que se podría hacer variando la separación entre los nodos o cambiando el intervalo de tiempo.

En este caso, se ha realizado otra simulación empleando un intervalo de tiempo inferior, de un segundo, con lo que se espera unos resultados más fiables.

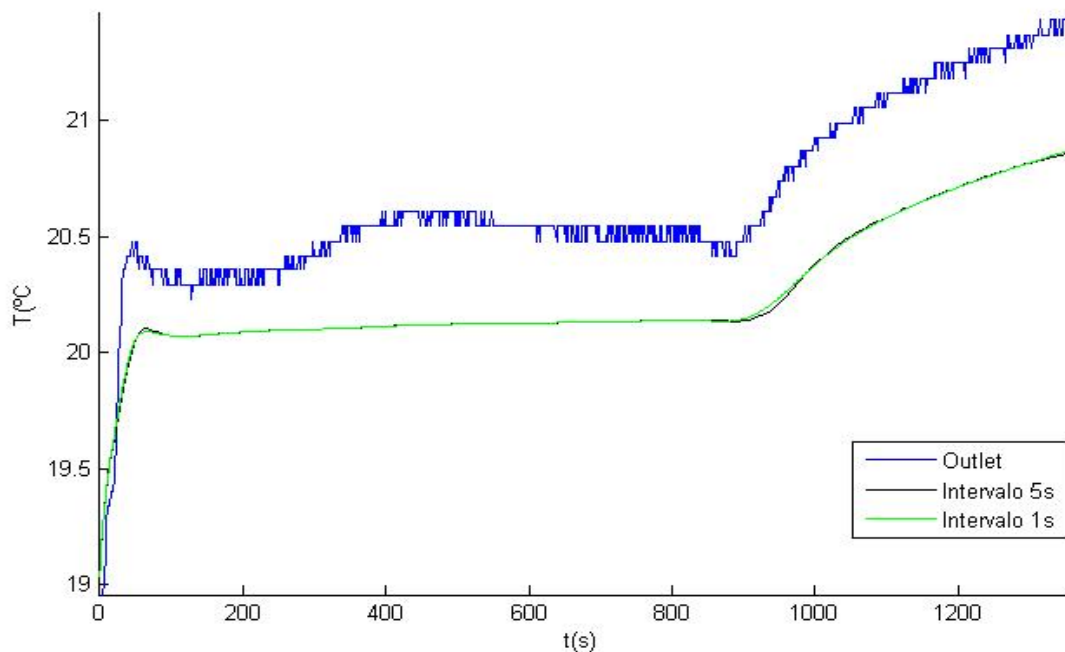


Figura 3.38: Gráfica con datos experimentales y simulados empleando $\Delta t=1\text{s}$, 5s entre 0 y 1300s.

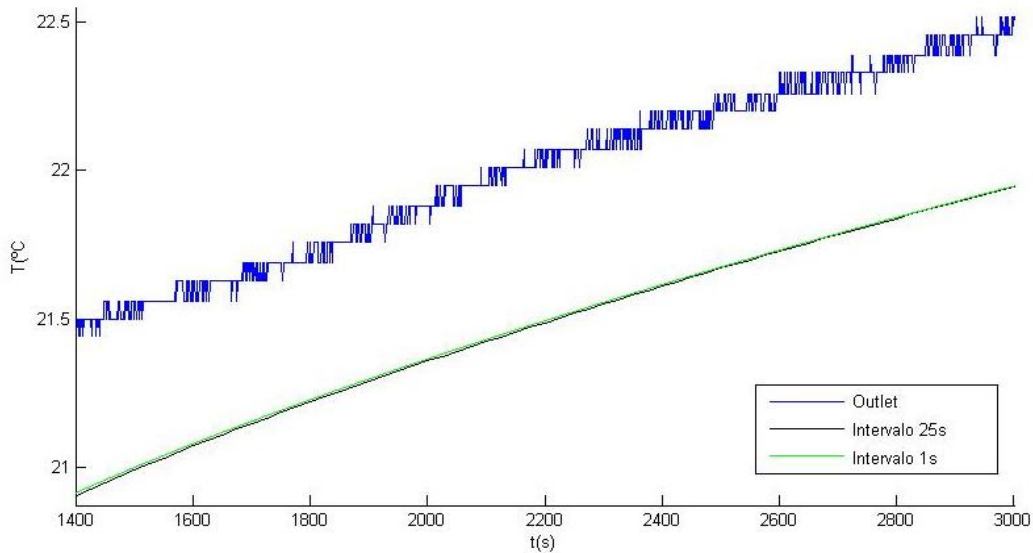


Figura 3.39: Gráfica con datos experimentales y simulados empleando $\Delta t=1s$, 25s entre 1400 y 3000s.

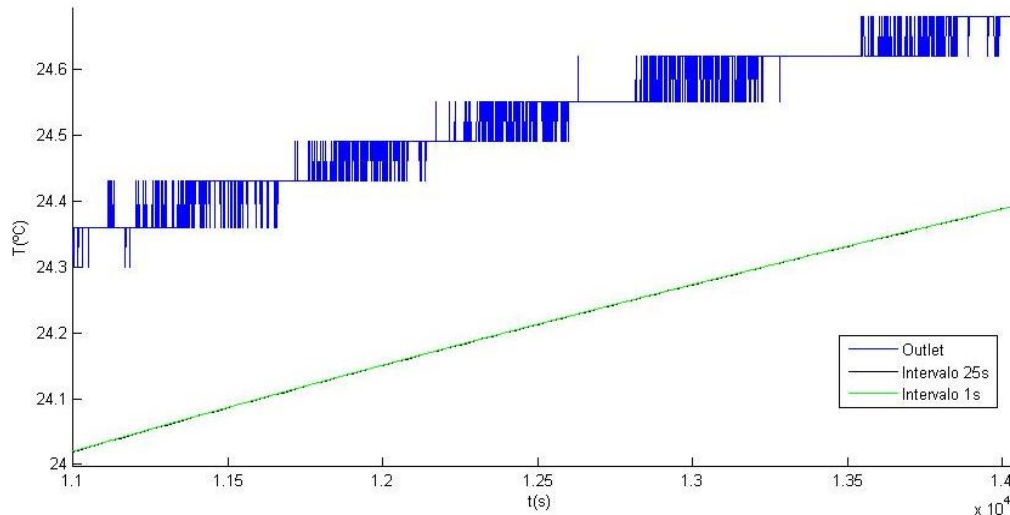


Figura 3.40: Gráfica con datos experimentales y simulados empleando $\Delta t=1s$, 25s entre 11000 y 14000s.

Las simulaciones en dos dimensiones han permitido establecer que características de la malla eran más útiles obteniendo resultados similares, pero a la hora de diseñar el modelo en tres dimensiones aparecen nuevos parámetros (profundidad, parte en U, zona adicional) que pueden hacer variar el resultado considerablemente si no son establecidos correctamente. Las Figuras 3.38, 3.39 y 3.40 muestran como variando el número de Courant los resultados apenas se ven afectados con lo que está asegurado que el intervalo de tiempo y la distancia entre los nodos de las nuevas superficies son adecuados.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se ha estudiado el intercambio de calor de un tubo de agua caliente con el terreno durante tres días en régimen transitorio, el cual formaba parte de una instalación con máquina de absorción para climatizar una habitación. El conducto sustituye al aerorefrigerador disminuyendo la potencia del equipo y su estudio es fundamental para conocer la disponibilidad de intercambio con el entorno [5]. Este estudio ha sido llevado a cabo mediante herramientas informáticas cuyo funcionamiento y manejo eran un objetivo en segundo plano a conseguir en este trabajo ya que, a través del mismo, se ha podido entender el potencial que tiene el campo de las simulaciones de medios continuos y, en particular, del CFD para resolver problemas muy complejos o para implementar modelos matemáticos que sirvan de aproximaciones a soluciones analíticas que todavía no se han podido resolver.

De la elaboración de este trabajo, se han podido obtener las siguientes conclusiones:

- a) Es imprescindible que la temperatura del terreno permanezca inalterada en el límite tal y como se ha establecido para que los resultados sean coherentes.
- b) Es necesario e imprescindible adquirir un buen manejo de herramientas de mallado (ICEM) y de cálculo numérico (ANSYS Fluent) y poder así observar la ventaja de trabajar con estas herramientas.
- c) La creación de archivos definidos por el usuario (UDF) mediante lenguaje de compilación C permite una mayor flexibilidad de ANSYS Fluent ya que con ellos han sido establecidas condiciones de contorno que dependen de otra variable.
- d) La malla que mejor se adapta al problema es de tipo estructurada de aproximadamente mil nodos en el plano horizontal mediante la comparación visual de las simulaciones y cuantitativa de los errores respecto a una malla de referencia.

- e) Para establecer las condiciones iniciales hay que realizar una simulación del fluido en reposo con la que todos los elementos adquieren la temperatura del terreno inalterado, provocando que la temperatura sea igual en cada plano horizontal.
- f) Se puede decir que el ajuste entre las curvas de la temperatura de salida simulada y la experimental a lo largo del tiempo es bastante bueno aunque se requiere más precisión en los resultados.
- g) Los intervalos de tiempo empleados en la simulación son adecuados y no influyen en los resultados.

Por último, a partir de los resultados del modelo en tres dimensiones, concluimos que el modelo diseñado es perfectamente válido para trabajar con él y se espera que sea de gran utilidad para caracterizar el terreno de manera precisa en un trabajo futuro (no es objeto de este trabajo obtener las propiedades exactas del terreno).

4.1 Desarrollos futuros

En un futuro trabajo se evaluará hacia qué valores óptimos tienden los coeficientes característicos del terreno y del relleno poniendo en marcha la simulación con diferentes valores, dentro de un DOE, valorándose el grado de ajuste con los resultados experimentales. Una etapa de optimización posterior permitirá validar correctamente el modelo. Además, se realizarán numerosos análisis de sensibilidad e identificación de parámetros para validar el modelo.

REFERENCIAS

- [1] P.J. Casanova-Peláez, J.M. Palomar-Carnicero, R. López-García, F. Cruz-Peragón, Desarrollo de equipo para la realización de test de respuesta térmica del terreno (TRT) en instalaciones geotérmicas, *Dyna* (Bilbao), Vol. 89 (3), (2014), p. 316-324
- [2] F. Cruz-Peragón, P.J. Casanova-Peláez, R. López-García, J.M. Palomar-Carnicero (2016), *Improvements of 2D Numerical Model for Vertical Ground Heat Exchangers*, *International Conference on Innovative Technologies*, IN-TECH 2016, Prague
- [3] G. Llopis-Trillo, V. Rodrigo-Ángulo, Guía de la Energía Geotérmica, Universidad Politécnica de Madrid (UPM)
- [4] Anónimo (2010), Guía práctica de la energía: consumo eficiente y responsable (3ª ed.). IDAE, Madrid.
- [5] F. Cruz-Peragón, P.J. Casanova-Peláez, R. López-García, J.M. Palomar-Carnicero (2012/13), Climatización de Viviendas con Fuentes Renovables, Contrato de Servicios de Proyectos I+D+i relativos al ámbito competencial de la Consejería de Fomento y Vivienda para los años 2012 y 2013.
- [6] ANSYS Inc. (2013), *ANSYS Fluent Tutorial Guide 15.0*, ANSYS Fluent
- [7] ANSYS Inc. (2013), *ANSYS Fluent UDF Manual*, ANSYS Fluent
- [8] ANSYS Inc. (2012), *Lecture 7: Turbulence, Introduction to ANSYS Fluent 14.5*. ANSYS Fluent
- [9] Yunus A. Çengel, Michael A. Boles (2009), *Termodinámica*, 6ª Edición, Editorial McGraw Hill
- [10] R. Fernández-Feria, J. Ortega-Casanova (2016), *Mecánica de Fluidos*, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Málaga, Editorial Universidad de Málaga
- [11] Incropera & Dewitt (1996): *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley. New York, USA.
- [12] Piechowski, M., (1999), *Heat and mass transfer model of a ground heat exchanger*: Theoretical development, *Int. J. Energy Res.*, 23, 571-588
- [13] Antonio Crespo M. (2006), *Mecánica de Fluidos*, Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Editorial Paraninfo.
- [14] M. J. Moran, H. N. Shapiro (2004), *Fundamentos de Termodinámica Técnica*, 2ª Edición, Editorial Reverté
- [15] ANSYS Inc. (2013), *ANSYS ICEM CFD 15.0 Tutorial Manual*, ANSYS ICEM
- [16] *SST K-Omega Turbulence Models*, Learning Guide, AutoDesk CFD. Recuperado de <https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/>

cloudhelp/2016/ENU/SimCFD-Learning/files/GUID-0F5C4828-9F91-46B6-A16A-2578D72DCFCC-htm.html

[17] M. Zamora-Pina (2016), Simulación numérica de la inyección de gas en columnas de flujo oscilatorio (Trabajo Fin de Grado), Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT)

[18] ANSYS Inc. (2006), 25.3.3 *Evaluation of Gradients and Derivatives*. ANSYS Fluent Inc. Recuperado de <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node994.htm>

[19] ANSYS Inc. (2012), *Lecture 5: Solver Settings, Introduction to ANSYS Fluent 14.5*, ANSYS Fluent

[20] E. Mands, B. Sanner, Energía geotérmica a poca profundidad, Alemania, Editorial UbeG

[21] D. Crevillén-García (2012), Simulación numérica del flujo a través del tubo difusor de una turbina de reacción. Factores de mejora de su eficiencia, Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT)

[22] D. Martínez-López (2007), Simulación de una turbina radial mediante CFD FLUENT: caso de una turbina Rushton (Trabajo Fin de Máster), Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)

ANEXO A

MÉTODOS DE ACOPLAMIENTO EN ANSYS FLUENT (*SOLVER*)

Tradicionalmente, el método *Pressure-Based* fue desarrollado para baja velocidad en flujos incompresibles, mientras que *Density-Based* lo fue principalmente para alta velocidad en flujos compresibles. Actualmente, son aplicables a un amplio rango de flujos y a menudo pueden utilizarse en otro tipo de flujos.

En *Density-Based*, la densidad se obtiene a partir de la ecuación de continuidad mientras que la presión se obtiene de la ecuación de estado.

En *Pressure-Based*, la presión se extrae de una ecuación de corrección de presión que se obtiene de manipular las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento.

A continuación se distinguen los métodos para calcular la solución de una simulación:

- a) *Pressure-Based* segregado, aplicable a un amplio rango de regímenes de flujos desde incompresible a baja velocidad hasta compresible a alta velocidad.
- b) *Pressure-Based* acoplado, aplicable a flujos de mayor fase única y campos de actuación superior para el segregado.
- c) *Density-Based* acoplado, se aplica cuando hay una fuerte interdependencia entre densidad, energía, cantidad de movimiento y otras especies. Puede ser explícito o implícito.

Dentro del acoplamiento *Pressure-Based* se encuentran los algoritmos SIMPLE, SIMPLEC, PISO y *coupled* (acoplado) en FLUENT.

1. SIMPLE: emplea una relación entre la velocidad y la correlación de la presión para hacer que se cumpla la conservación de la masa y obtener el

- campo de presiones. Se utiliza normalmente excepto para casos especiales.
2. SIMPLEC: es muy parecido al algoritmo SIMPLE, solo se diferencia en la forma de expresión empleada para el flujo corregido. Permite una convergencia más rápida para problemas simples aunque en algunos problemas incrementar el valor del factor de subrelajación puede generar inestabilidades.
 3. PISO: está basado en una aproximación de alta precisión de la relación entre las correcciones de presión y velocidad. Es muy recomendable para todo tipo de flujos no estacionarios y se pueden usar altos intervalos de tiempo. Recomendable para mallas muy distorsionadas.
 4. Coupled: resuelve las ecuaciones de gobierno de forma simultánea.

Cuando se realice la simulación es recomendable seguir el siguiente procedimiento:

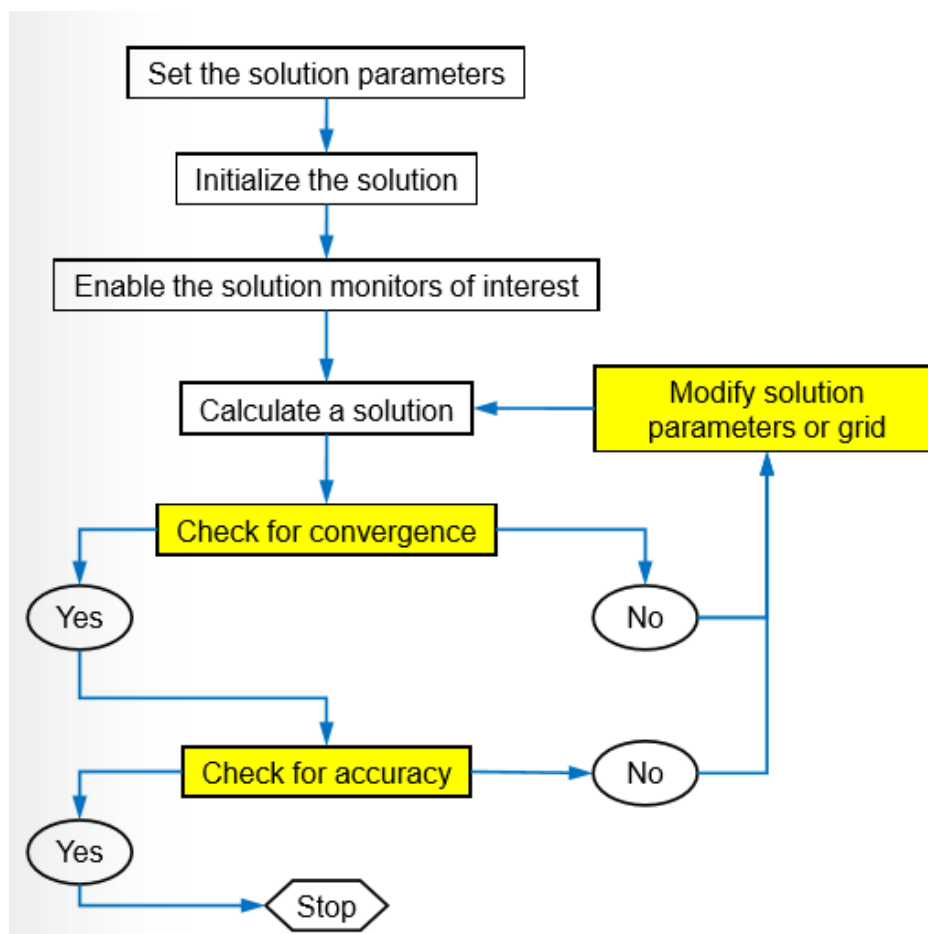


Figura A.1: Esquema del procedimiento a seguir para la elección de un *solver* [19].

ANEXO B

FUNCIONES DEFINIDAS POR EL USUARIO (UDF)

B.1 Definición y estructura

Una Función Definida por el Usuario (*User-Defined Function*), o UDF, es una función construida mediante programación C que puede ser empleada por ANSYS Fluent para aumentar la flexibilidad del programa. Los usos más comunes de las UDFs son los siguientes:

- Personalizar condiciones de contorno, propiedades de los materiales, tasas de reacción en superficies y volúmenes, términos en las ecuaciones de transporte de ANSYS Fluent, términos en las ecuaciones de transporte de *User-Defined Scalar* (UDS), funciones de difusividad, etc.
- Ajustar valores calculados en cada iteración.
- Establecer los valores iniciales.
- Mejorar el post-procesado.
- Mejorar los modelos existentes en ANSYS Fluent (por ejemplo, modelado de fase discreta, modelado de mezcla multifásica).

Las UDFs se identifican con la extensión .c (por ejemplo, *Temperatures completely defined.c*). Un archivo puede contener una UDF o varias. También, es posible emplear varios archivos en un mismo caso.

Todas las UDFs son definidas empleando *DEFINE macros* proporcionados por ANSYS Fluent, los cuales son codificados usando *macros* y funciones adicionales (también proporcionados por ANSYS Fluent) que acceden al solucionador de datos ANSYS Fluent y actúa en otras tareas. Poseen el siguiente formato general:

```
DEFINE_MACRONAME(udf_name, passed-in variables)
```

El primer término dentro del paréntesis es el nombre de la UDF y el segundo corresponde a las variables que forman parte de la función definida desde el solucionador de ANSYS Fluent.

Todas las funciones definidas contienen `#include "udf.h"` al comienzo del código, lo que le permite identificar la UDF a ANSYS Fluent así como emplear *DEFINE macros* y otras funciones.

Los archivos que contienen UDFs pueden ser interpretados o compilados en ANSYS Fluent.

- Para UDFs interpretadas, los archivos son cargados directamente en un proceso de un solo paso.
- Para UDFs compiladas, el proceso involucra dos pasos separados. Una librería de código se construye primero, y después es cargada en ANSYS Fluent.

Después de ser interpretadas o compiladas, las UDFs serán visibles en los cuadros de diálogo y aparecerá el nombre que hayamos seleccionado en nuestro *DEFINE macro* [7].

B.2 Limitaciones

Las UDFs tienen las siguientes limitaciones:

1. Aunque se pueden emplear para un gran número de aplicaciones, no se pueden usar para aplicaciones excesivamente complejas o incluso no obtener la precisión que se espera. No todas las variables se pueden definir mediante UDFs.
2. Las UDFs usan y devuelven valores especificados en el SI.
3. Puede ser necesario actualizar la UDF cuando se utiliza otra versión de ANSYS Fluent.

B.3 Código de UDFs empleadas

Dentro de los usos que se le puede dar a las funciones definidas por el usuario, en este trabajo se han empleado para establecer aquellas condiciones de contorno que dependen de otra variable. De esta forma, la condición de contorno es calculada a partir de una función a trozos obtenida mediante la interpolación de los datos experimentales existentes.

- a) Temperaturas del agua a la entrada y salida del tubo que dependen del tiempo.

```
#include "udf.h"
```

```
DEFINE_PROFILE(inlet_def, thread, position)
```

```
{
    face_t f;
    real t = CURRENT_TIME;
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        if (t<=67.)
            F_PROFILE(f, thread, position) = (23.4715-19.039)/67*t + 19.039+273.15;
        else if (t<45000.)
            F_PROFILE(f, thread, position) = - 5.358119758803521e-035*t*t*t*t*t*t*t +
1.173446279951434e-029*t*t*t*t*t*t*t - 1.068979420423248e-024*t*t*t*t*t*t +
5.249828108592179e-020*t*t*t*t*t - 1.507920555395901e-015*t*t*t*t +
2.580108777568737e-011*t*t*t - 2.596101623240043e-007*t*t + 0.001555958647475*t +
23.368484178062047+273.15;
        else
            F_PROFILE(f, thread, position) = 7.635617343544632e-27*t*t*t*t*t-
8.013289934981613e-21*t*t*t*t+3.221446080994479e-15*t*t*t-6.351993022331468e-
10*t*t+7.048813833061054e-5*t+27.964825512470309+273.15;
    }
    end_f_loop(f, thread)
}
```

```
DEFINE_PROFILE(outlet_def, thread, position)
```

```
{
    face_t f;
    real t = CURRENT_TIME;
    begin_f_loop(f, thread)
    {
        if (t<100.)
            F_PROFILE(f, thread, position) =293.2477;
    }
}
```

```

else if (45000.<=t && t<=350000.)
    F_PROFILE(f, thread, position) = 7.579812903317942e-27*t*t*t*t*t -
7.954569441920481e-21*t*t*t*t+3.198181209819711e-15*t*t*t - 6.309624726384781e-
10*t*t+7.014711274005066e-5*t+24.158104669256058+273.15;

else if (t<45000.)
    F_PROFILE(f, thread, position) = - 2.587904240155960e-035*t*t*t*t*t*t*t +
5.805056762383269e-030*t*t*t*t*t*t*t - 5.448725992140823e-025*t*t*t*t*t*t +
2.780341155093312e-020*t*t*t*t*t - 8.402767222505397e-016*t*t*t*t +
1.543409239376635e-011*t*t*t - 1.723953375747157e-007*t*t + 0.001213123629210*t +
19.982518550715021+273.15;

}
end_f_loop(f, thread)
}

```

- b) Temperatura de la tierra en función de la profundidad a una distancia en la que no se ve afectada con la temperatura del tubo.

```
#include "udf.h"
```

```

DEFINE_PROFILE(depth, thread, position)
{
    face_t f;
    real y[ND_ND];
    real z;
    begin_f_loop(f, thread)
    {

        F_CENTROID(y,f,thread);
        z=y[2];

        if (z <-15.)
            F_PROFILE(f, thread, position) = 8.878013769861082e-013*z*z*z*z*z*
+6.779719682474673e-010*z*z*z*z*z +1.804537555648564e-007*z*z*z*z*
+2.265785515724088e-005*z*z*z+0.001439984960712*z*z +0.043437505933972*z
+20.603172998564297+273.15;

        else
            F_PROFILE(f, thread, position) = -5.057314988777136e-007*z*z*z*z*z* -
3.548139905756319e-005*z*z*z*z*z -9.777575921005636e-004*z*z*z*z* -
0.013053272049240*z*z*z -0.086010296130208*z*z -0.319281087850537*z
+19.039051309081071+273.15;

    }
    end_f_loop(f, thread)
}

```

ANEXO C

COMPARACIÓN DE LA TRANSMISIÓN DE CALOR DE LA ZONA EN U RESPECTO A LA LONGITUD TOTAL

En este anexo se pretende calcular la cantidad de calor transferido en un instante determinado entre el fluido y la pared exterior del tubo de polietileno. Para ello, se emplea el coeficiente de conducción del tubo y de película del agua, este último calculado mediante correlaciones empíricas.

Una vez conocidos dichos coeficientes y las temperaturas en el agua y pared exterior, es calculada la resistencia térmica en coordenadas cilíndricas y, posteriormente, se calcula el calor transferido en el tramo con forma de U, empleando la temperatura en esa zona, y el calor transferido medio a lo largo del tubo completo.

C.1 Correlaciones empíricas en convección

El coeficiente de película del agua se obtiene empleando correlaciones empíricas y lo calculamos teniendo en cuenta que se trata de flujo interno, convección forzada y sin cambio de fase:

1º Caracterizamos el flujo:

$$Re_D = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (C-1)$$

$$Re_D = \frac{1000 \cdot 0,3 \cdot 32,6 \cdot 10^{-3}}{860 \cdot 10^{-6}} = 11372 > 2300 \quad \text{Regimen turbulento}$$

2º Número de Nusselt:

$$\overline{Nu}_D = \frac{\overline{h_w} D}{k_w} \quad (C-2)$$

3º En tubos lisos se emplea la ecuación de Dittus-Boelter:

$$\overline{Nu_D} = 0,023(Re_D)^{4/5}(Pr)^n \quad \text{Si} \quad \left\{ \begin{array}{l} Re_D > 10^4 \\ 0,7 \leq Pr \leq 160 \\ L/D \geq 10 \end{array} \right\} \quad (C-3)$$

Donde $n = 0,3$ en enfriamiento y el Prandtl, Pr , es evaluado en la temperatura del fluido.

En el tiempo $t = 7185 \text{ s}$ se obtiene:

$$T_w^U = 297,9845 \text{ K}; \quad T_{p,ext}^U = 296,7514 \text{ K}$$

$$T_w^m = 298,2145 \text{ K}; \quad T_{p,ext}^m = 296,9709 \text{ K}$$

$T_w^U \equiv$ Temperatura del agua en el tubo en U

$T_{p,ext}^m \equiv$ Temperatura media de la pared en todo el tubo

En las tablas de la referencia [9] se obtienen las propiedades termodinámicas del agua. Dichas propiedades son muy parecidas a las empleadas en la simulación siendo:

$$\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; \quad \mu = 860 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{m s}}; \quad k_w = 0,61 \frac{\text{W}}{\text{m K}}; \quad Pr_w = 6,112$$

Volvemos a la ecuación de Dittus-Boelter (C-3):

$$\overline{Nu_D} = 0,023 \cdot (11372)^{4/5} \cdot (6,112)^{0,3} = 69,543$$

De la ecuación (C-2):

$$\overline{h_w} = \frac{\overline{Nu_D} \cdot k_w}{D} = \frac{69,543 \cdot 0,61}{32,6 \cdot 10^{-3}} = 1301,26 \text{ W/m}^2\text{K}$$

C.2 Calor transmitido entre agua y pared exterior del tubo

Partiendo de la ecuación de calor en coordenadas cilíndricas sin generación de energía en el conducto y suponiendo que la transmisión, en el instante dado, se hace de forma radial $q_r \gg q_\theta, q_z$, la expresión de la transferencia de calor queda, sabiendo que se produce convección entre el agua y la pared interior del tubo y conducción en el tubo, de la siguiente manera:

$$q_r = \frac{T_w - T_{p.ext}}{\frac{1}{2\pi r_i L h_w} + \frac{\ln(r_e/r_i)}{2\pi k_p L}} = \frac{T_w - T_{p.ext}}{R_{t\acute{e}rmica}} = \frac{T_w - T_{p.ext}}{R_{convecci\acute{o}n}^{agua-tubo} + R_{conducci\acute{o}n}^{tubo}} \quad (C-4)$$

Siendo $r_i = 16,3 \text{ mm}$; $r_e = 20 \text{ mm}$; $k_p = 0,42 \text{ W/m K}$; $R \equiv \text{Resistencia}$

✓ Tramo en U:

$$L_U = \pi \cdot 37,5 \cdot 10^{-3} = 0,1178 \text{ m}$$

$$q_r^U = \frac{297,9845 - 296,7514}{\frac{1}{2\pi \cdot 16,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1178 \cdot 1301,26} + \frac{\ln(20/16,3)}{2\pi \cdot 0,42 \cdot 0,1178}} = 1,7085 \text{ W}$$

✓ Tubo completo:

$$L_m = 129,9 \cdot 2 + \pi \cdot 37,5 \cdot 10^{-3} = 259,92 \text{ m}$$

$$q_r^m = \frac{298,2145 - 296,9709}{\frac{1}{2\pi \cdot 16,3 \cdot 10^{-3} \cdot 259,92 \cdot 1301,26} + \frac{\ln(20/16,3)}{2\pi \cdot 0,42 \cdot 259,92}} = 3801,78 \text{ W}$$

Se comparan ambos resultados y se deduce claramente que se puede despreciar el tramo del tubo con forma de U en el cálculo:

$$q_r^U/q_r^m = 4,4939 \cdot 10^{-4} \approx 0$$

ANEXO D

RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

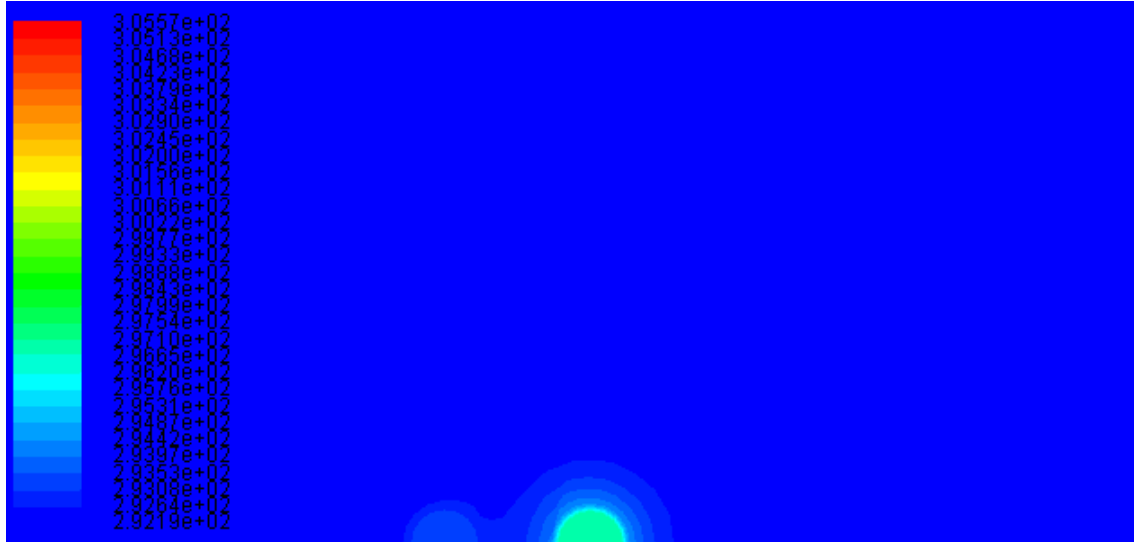


Figura D.1: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, Z=0m), t=360s.

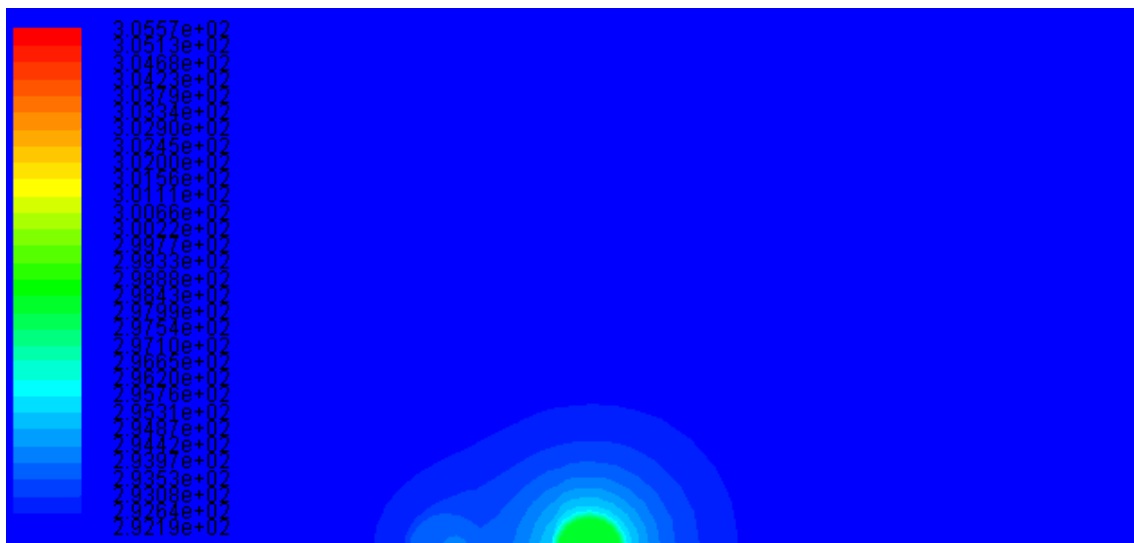


Figura D.2: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, Z=0m), t=1300s.

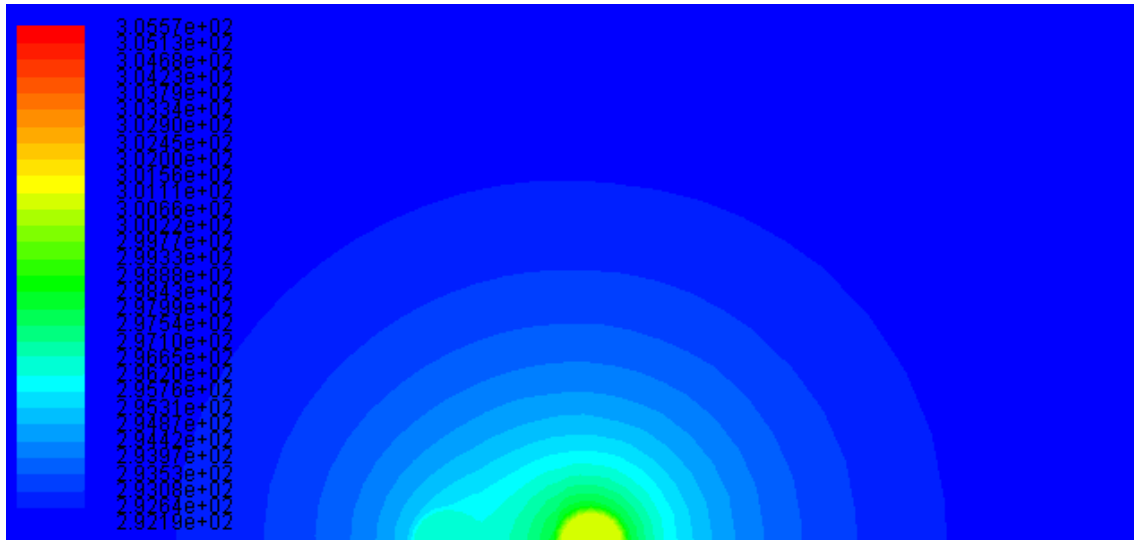


Figura D.3: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, Z=0m), $t = 7175s$.

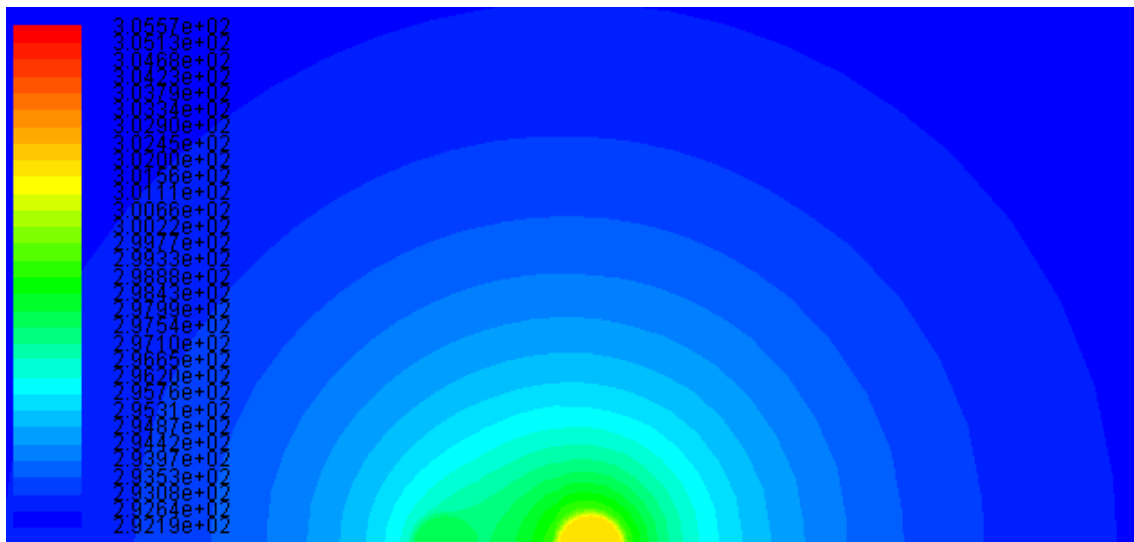


Figura D.4: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, Z=0m), $t = 15000s$.

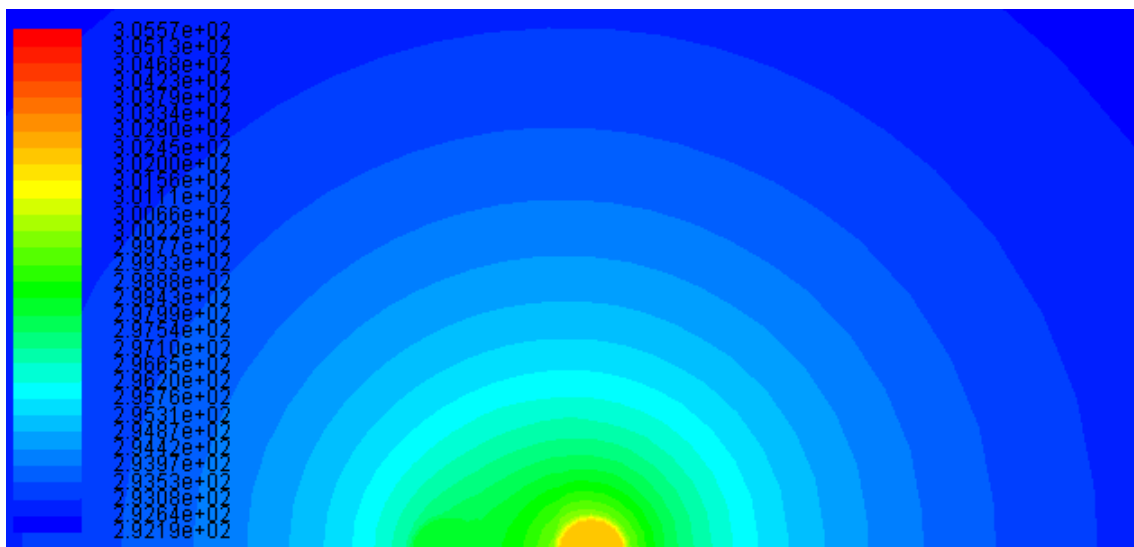


Figura D.5: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, Z=0m), $t = 24000s$.

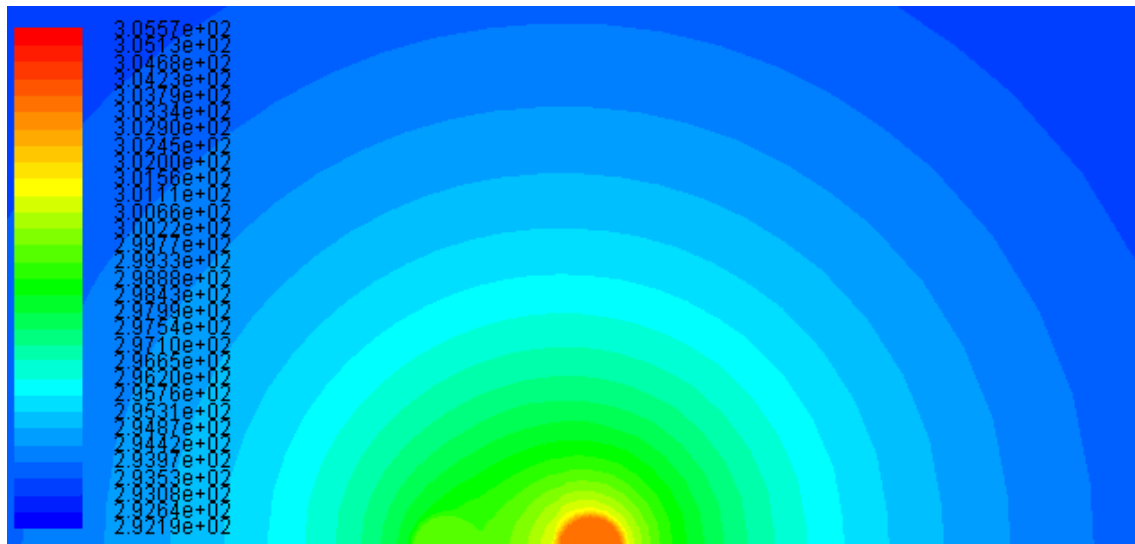


Figura D.6: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, Z=0m), t=53200s.

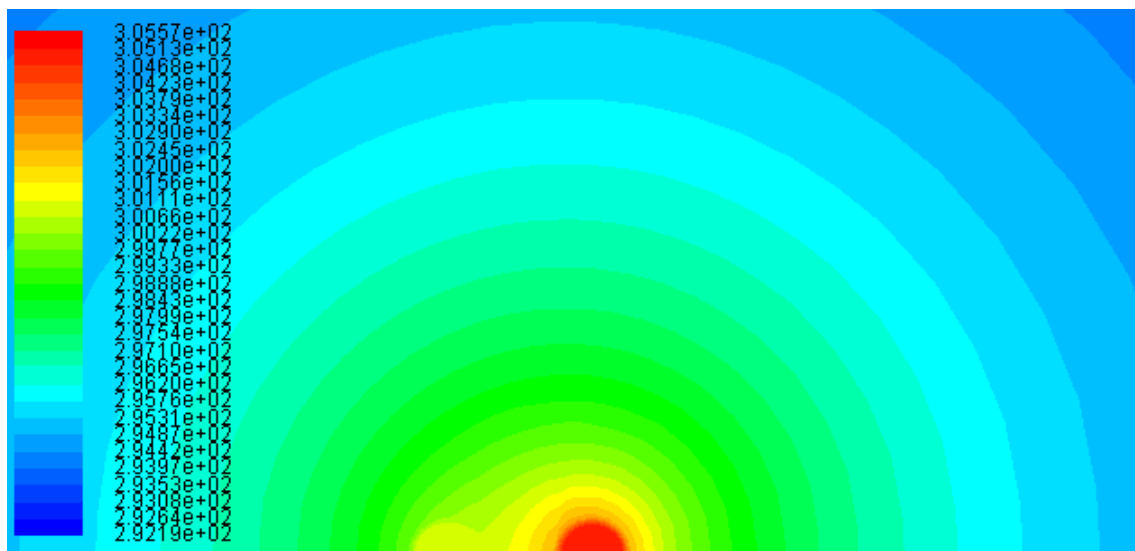


Figura D.7: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, Z=0m), t=146500s.

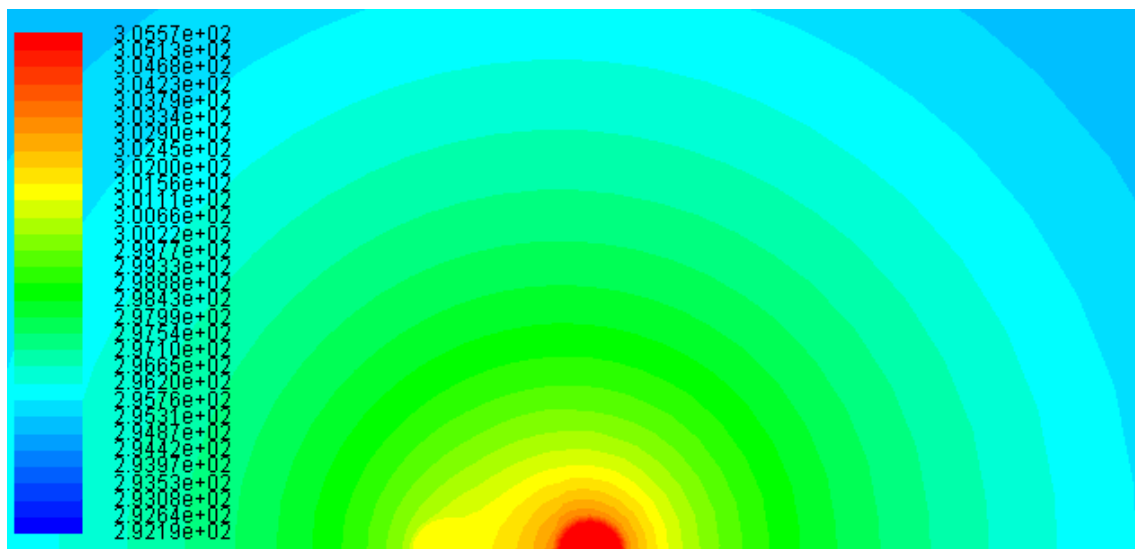


Figura D. 8: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, Z=0m), t=237000s.

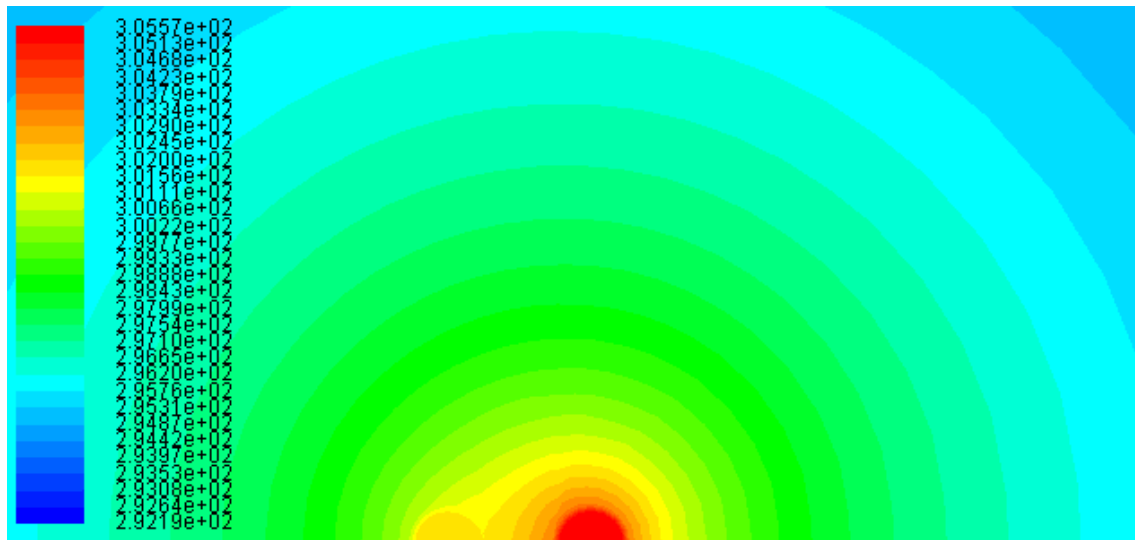


Figura D.9: Contornos de temperatura. Superficie del modelo 3D (Plano XY, $Z=0\text{m}$), $t=259200\text{s}$.

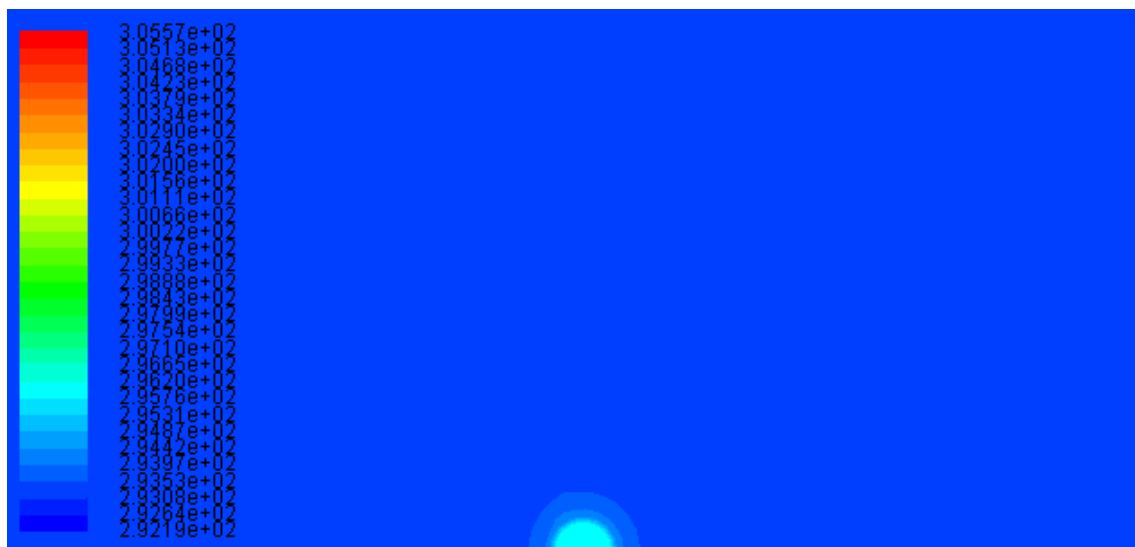


Figura D.10: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z=-40\text{m}$, $t=360\text{s}$.

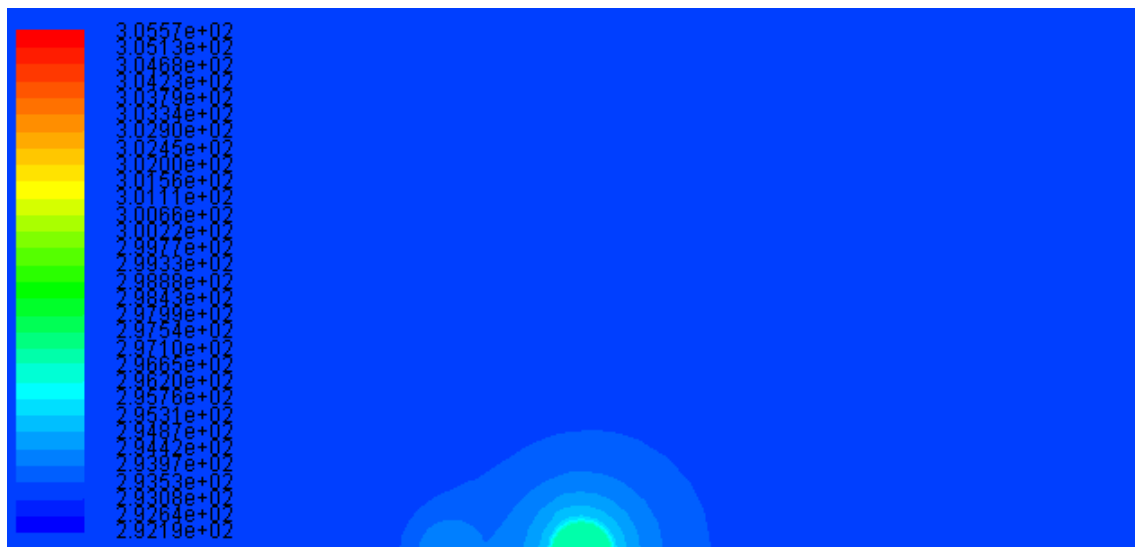


Figura D.11: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z=-40\text{m}$, $t=1300\text{s}$.

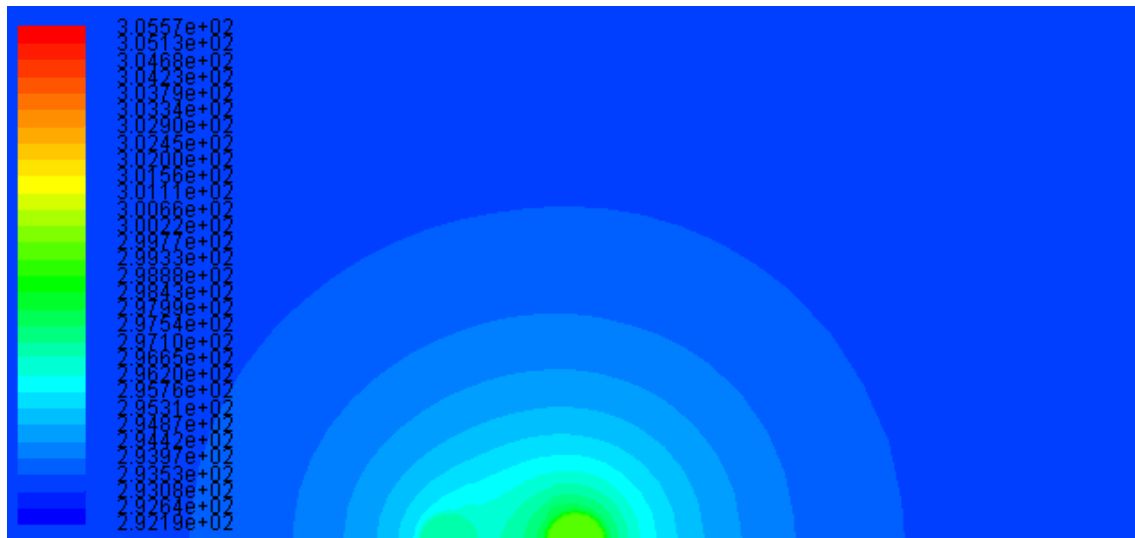


Figura D.12: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -40\text{m}$, $t = 7175\text{s}$.

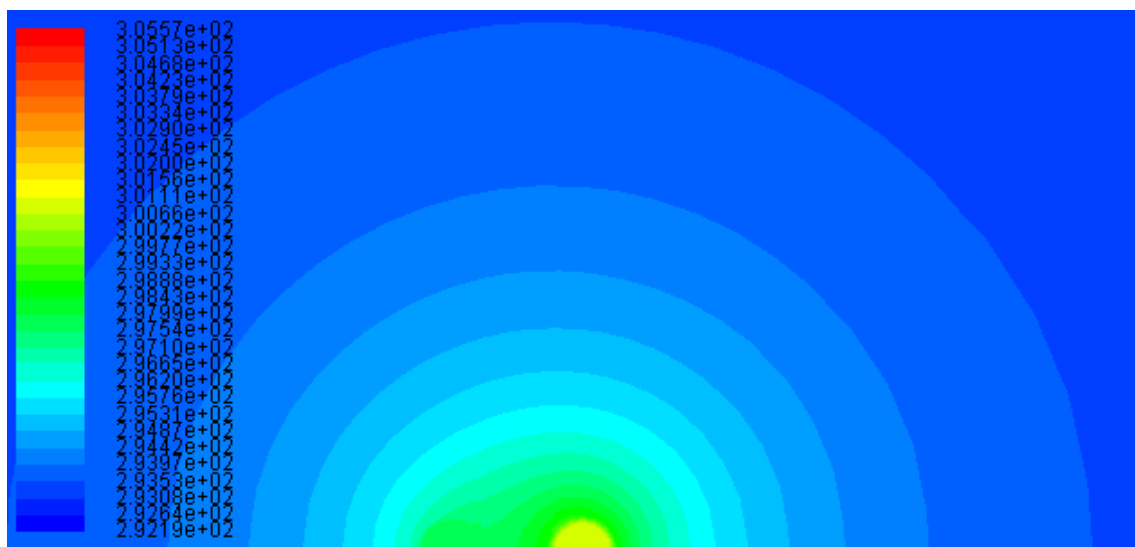


Figura D.13: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -40\text{m}$, $t = 15000\text{s}$.

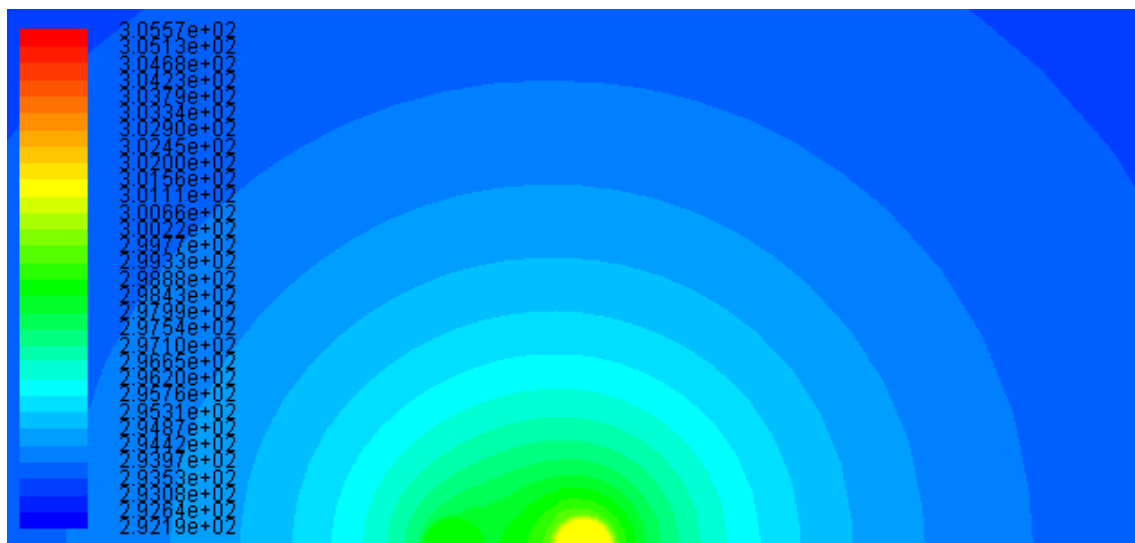


Figura D.14: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -40\text{m}$, $t = 24000\text{s}$.

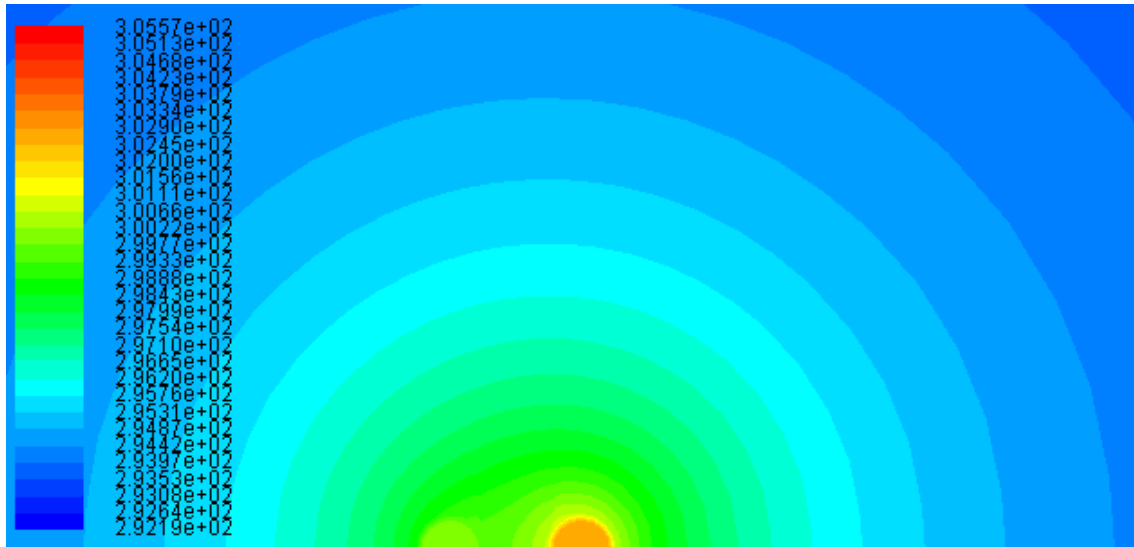


Figura D.15: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -40\text{m}$, $t = 53200\text{s}$.

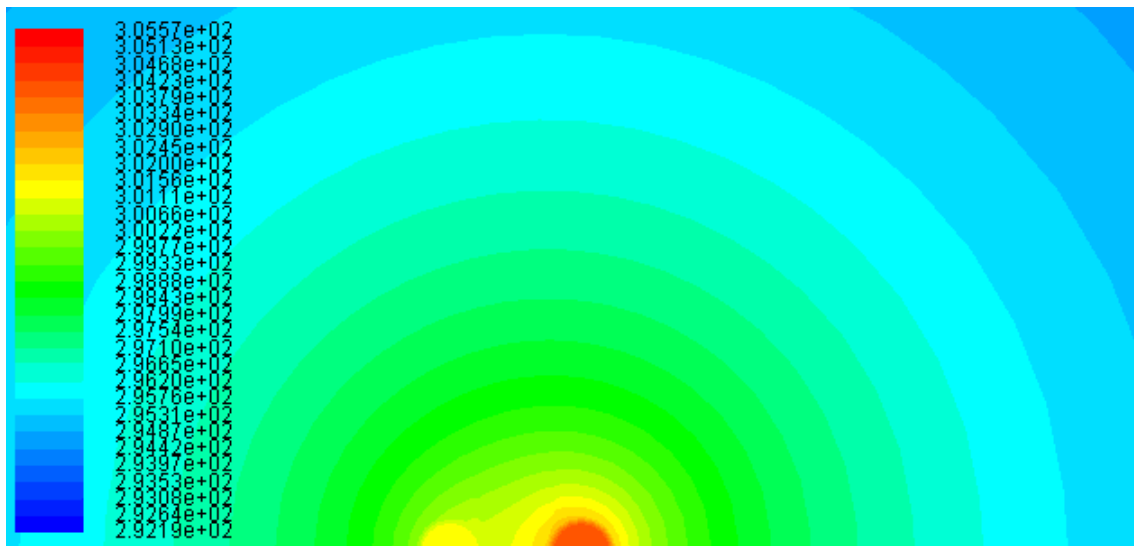


Figura D.16: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -40\text{m}$, $t = 146500\text{s}$.

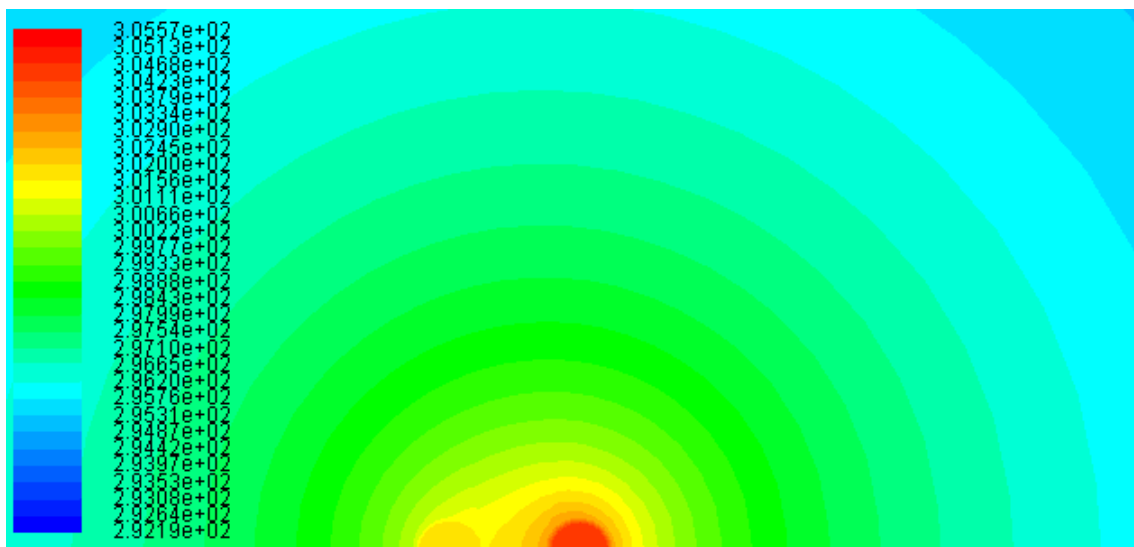


Figura D.17: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -40\text{m}$, $t = 237000\text{s}$.

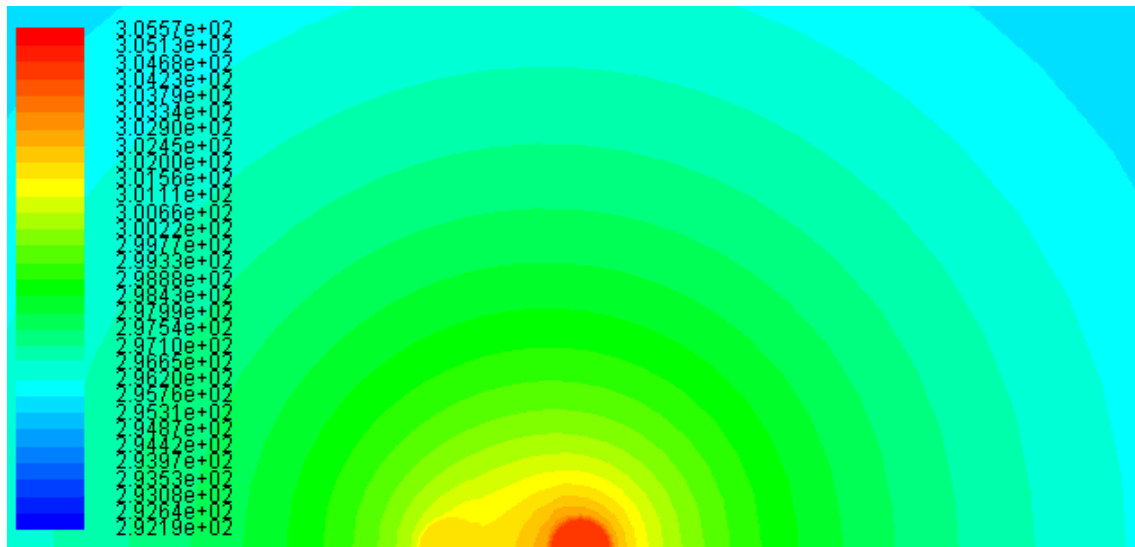


Figura D.18: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -40\text{m}$, $t = 259200\text{s}$.

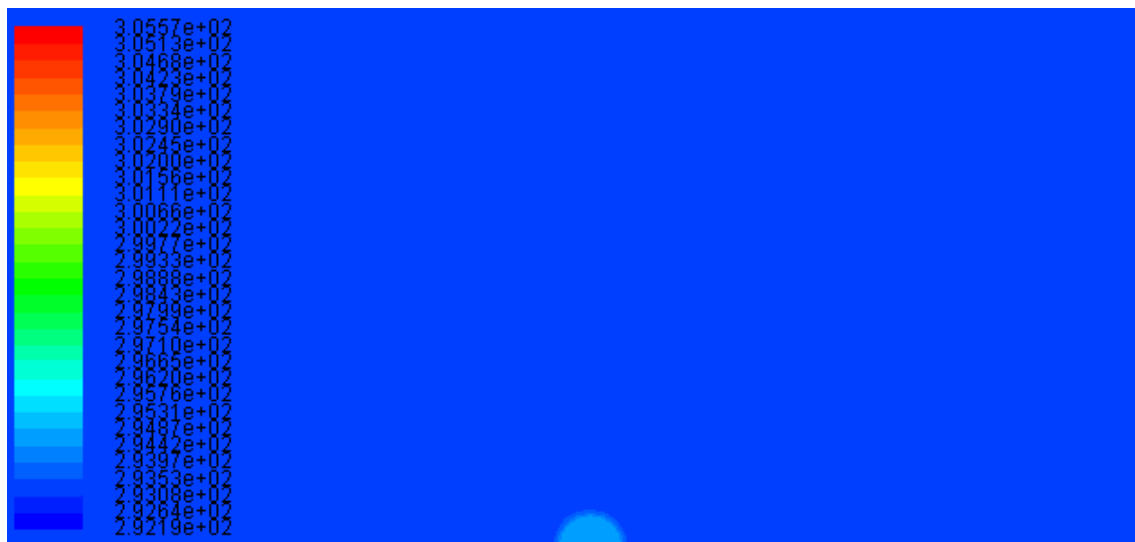


Figura D.19: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -80\text{m}$, $t = 360\text{s}$.

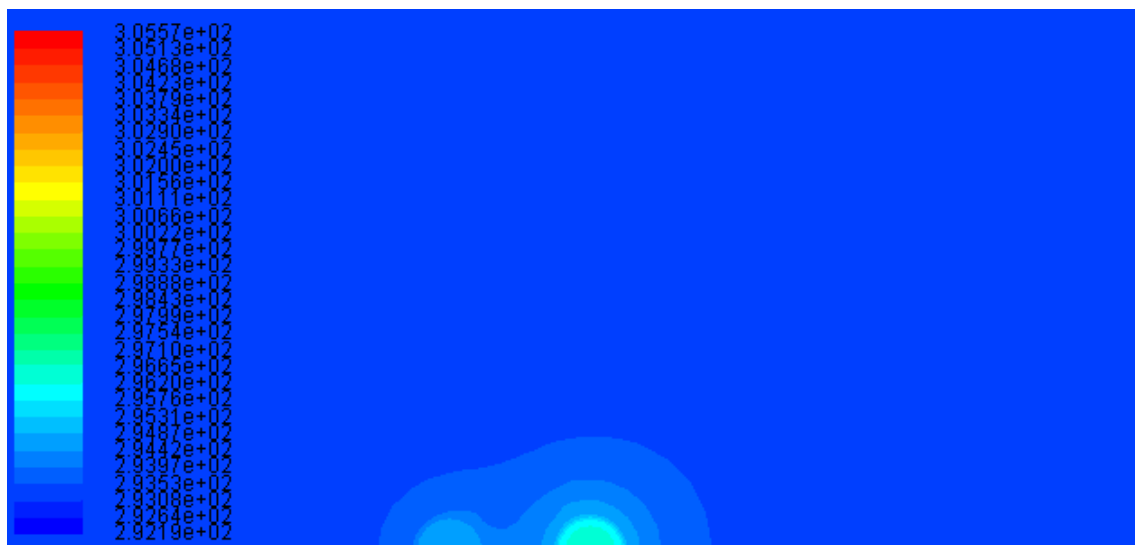


Figura D.20: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -80\text{m}$, $t = 1300\text{s}$.

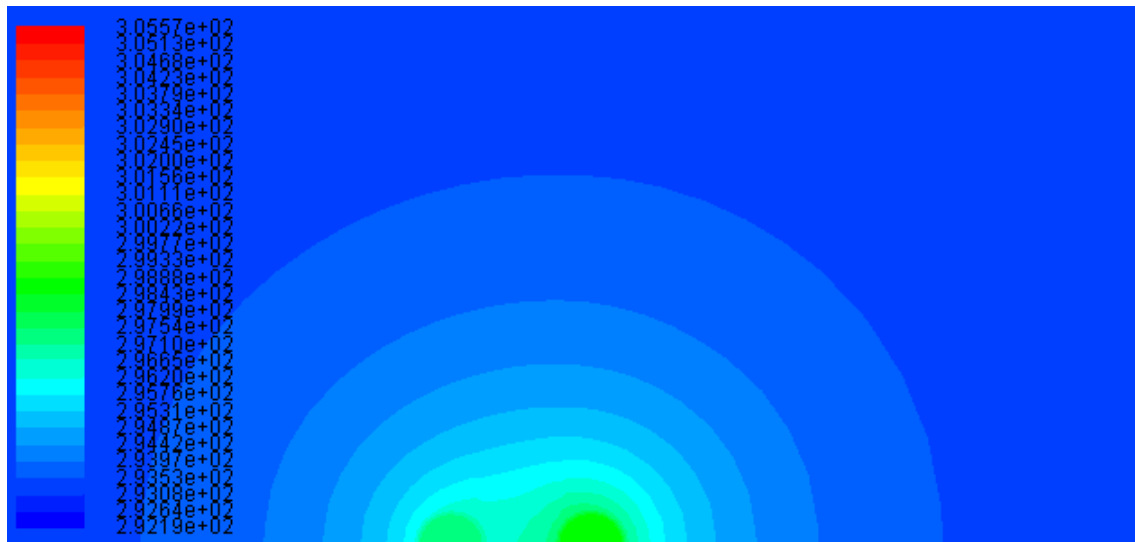


Figura D.21: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -80\text{m}$, $t = 7175\text{s}$.

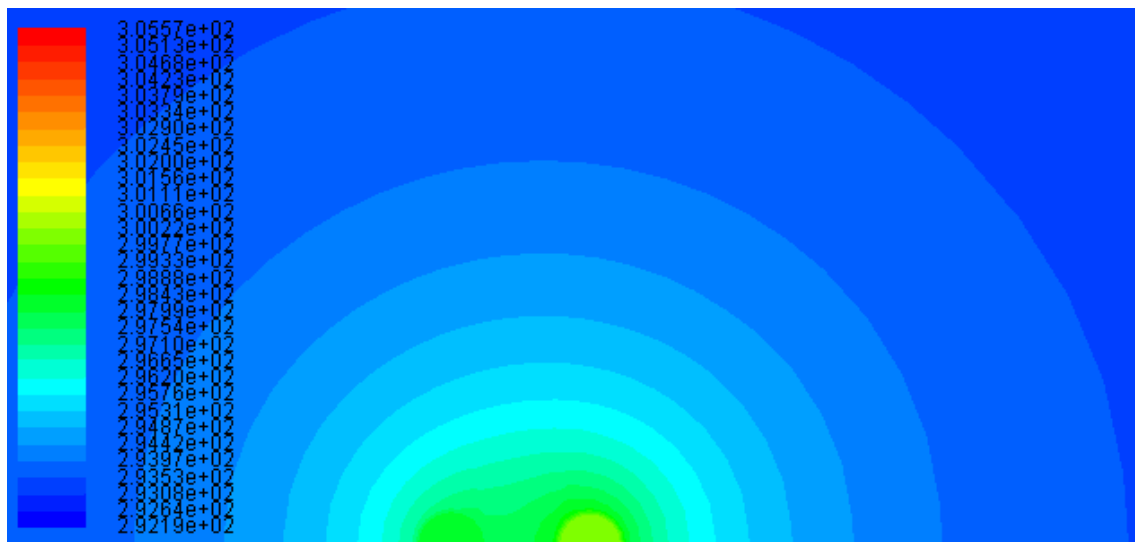


Figura D.22: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -80\text{m}$, $t = 15000\text{s}$.

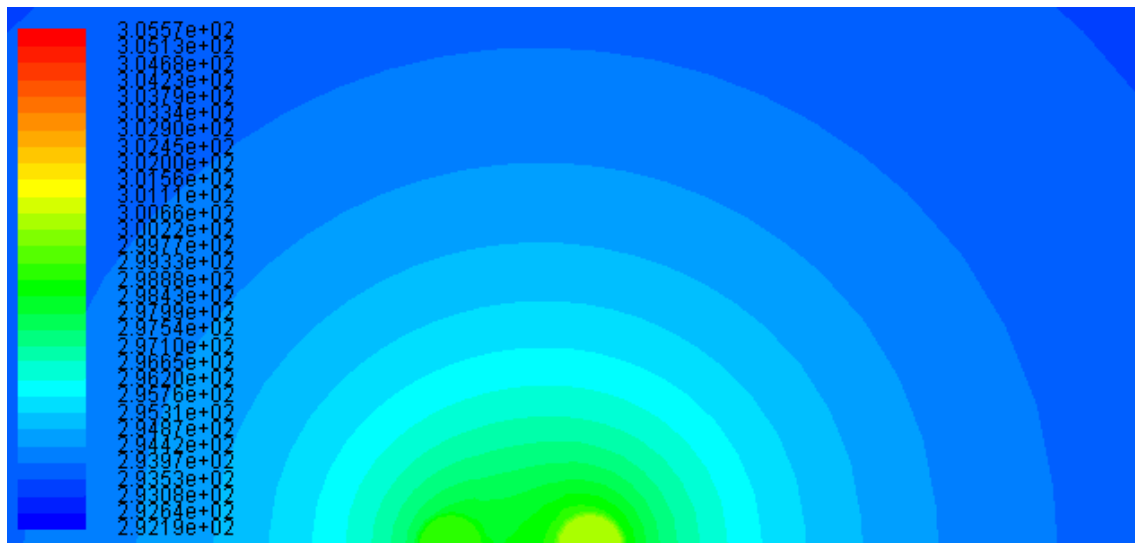


Figura D.23: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -80\text{m}$, $t = 24000\text{s}$.

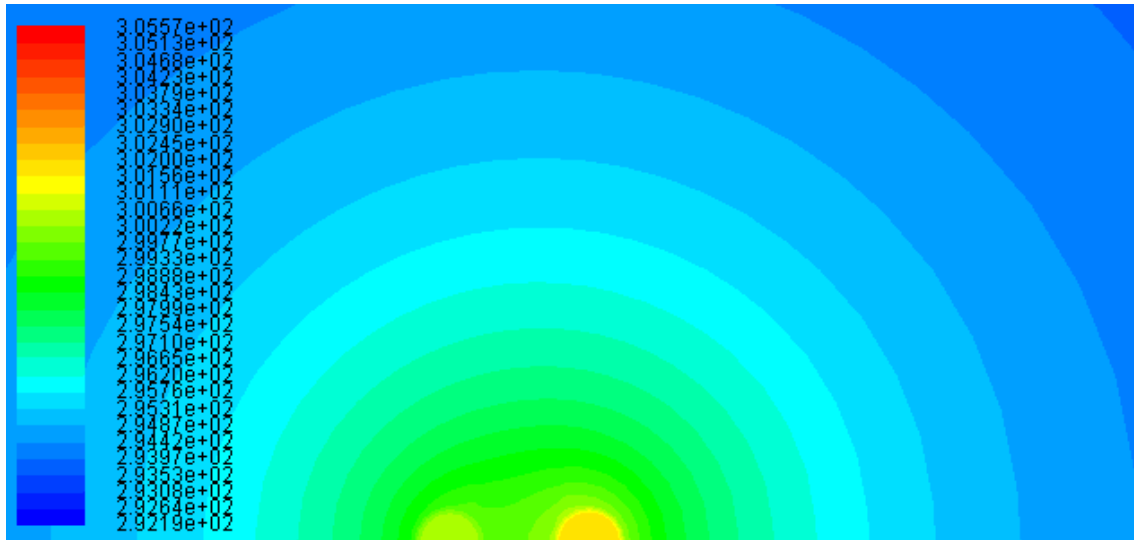


Figura D.24: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -80\text{m}$, $t = 53200\text{s}$.

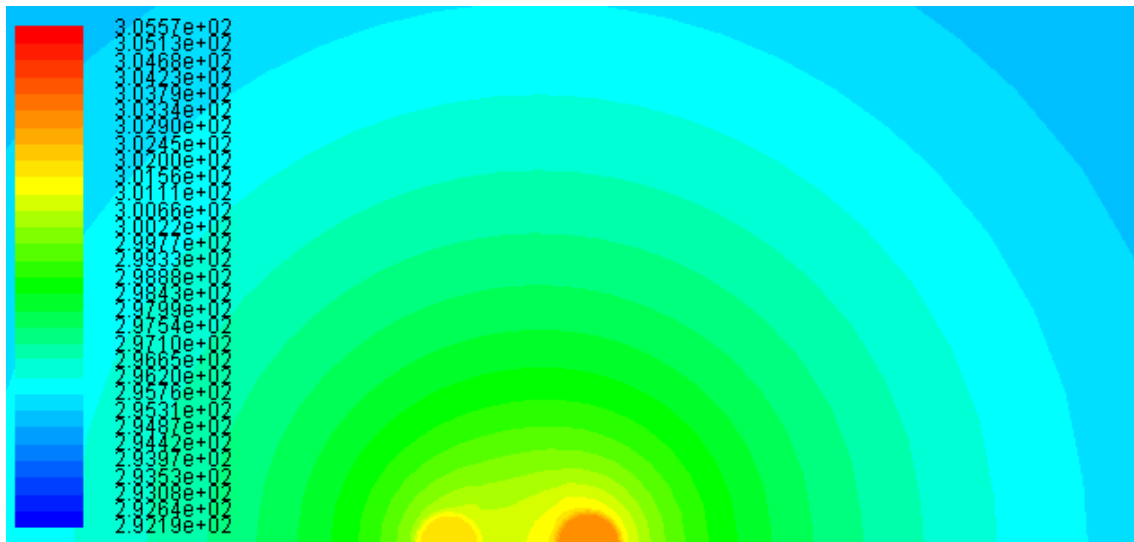


Figura D.25: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -80\text{m}$, $t = 146500\text{s}$.

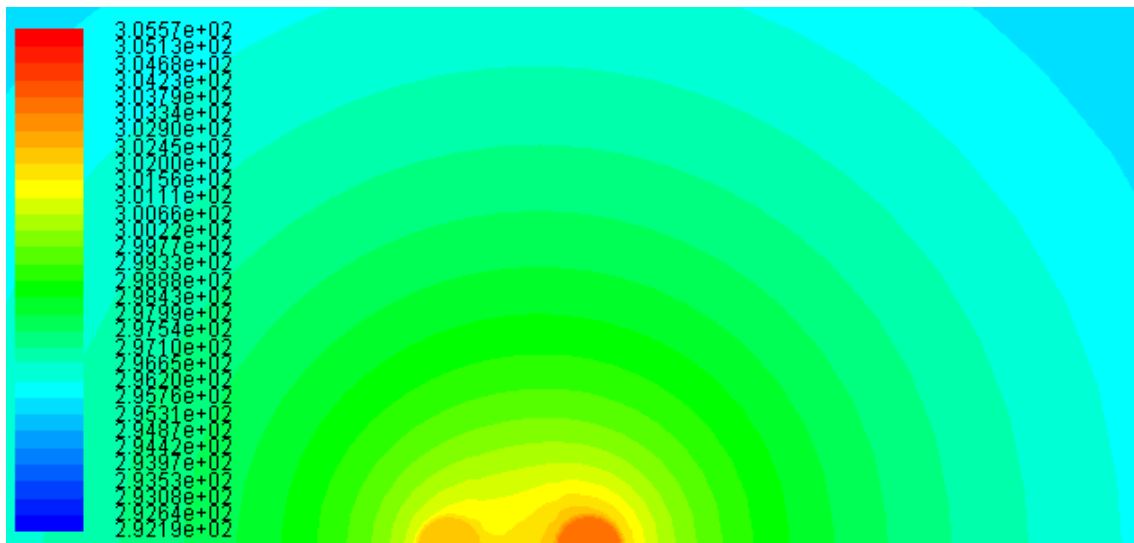


Figura D.26: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -80\text{m}$, $t = 237000\text{s}$.

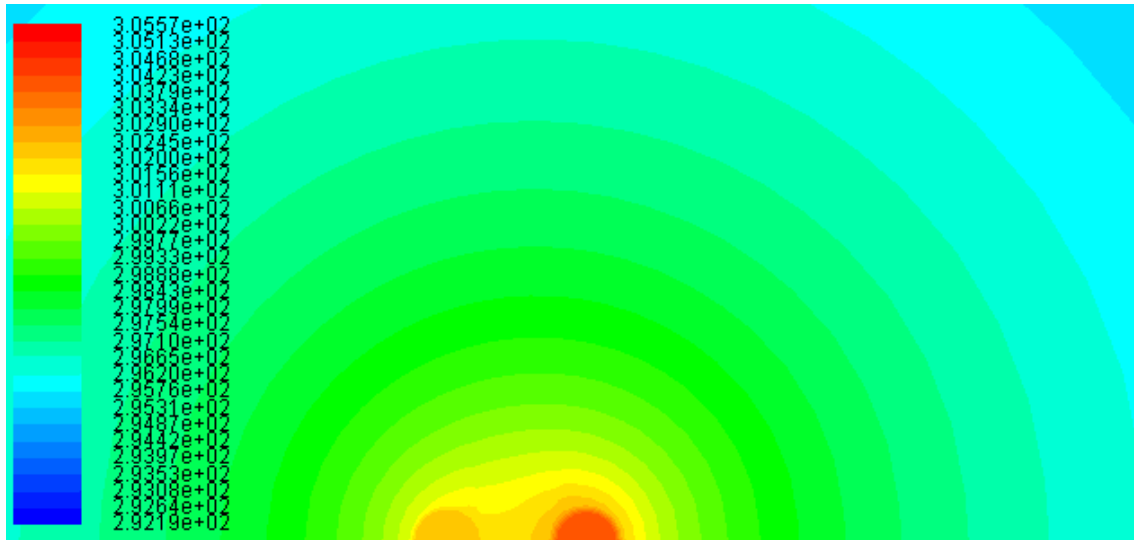


Figura D.27: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -80\text{m}$, $t = 259200\text{s}$.



Figura D.28: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -120\text{m}$, $t = 360\text{s}$.

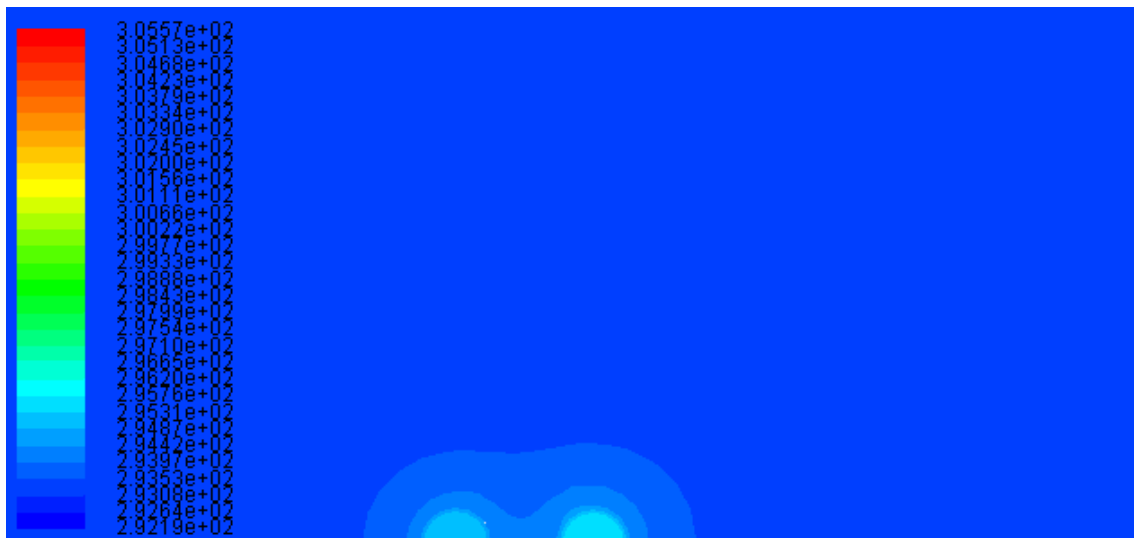


Figura D.29: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -120\text{m}$, $t = 1300\text{s}$.

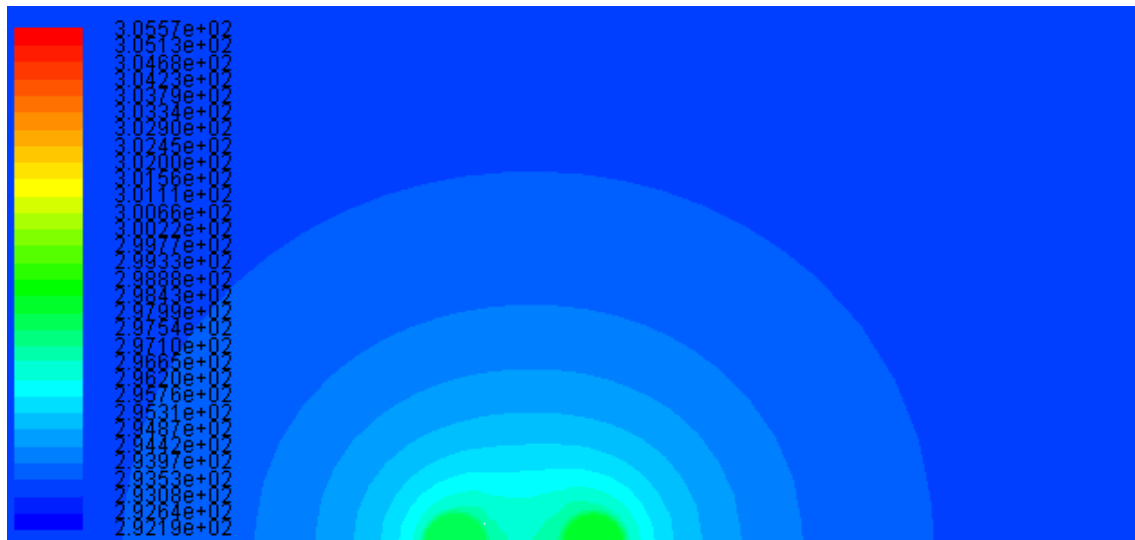


Figura D.30: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -120\text{m}$, $t = 7175\text{s}$.

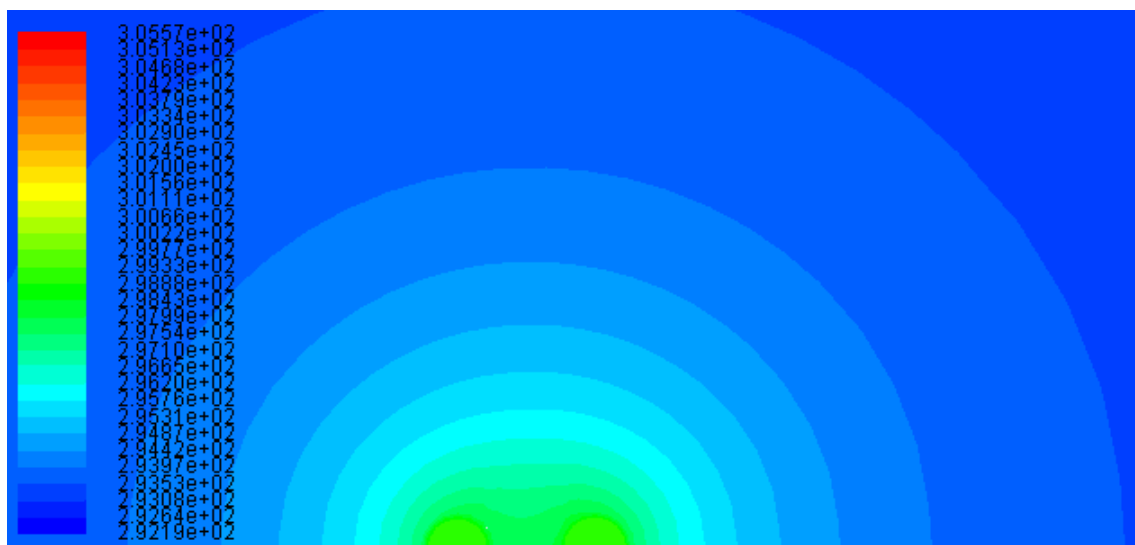


Figura D.31: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -120\text{m}$, $t = 15000\text{s}$.

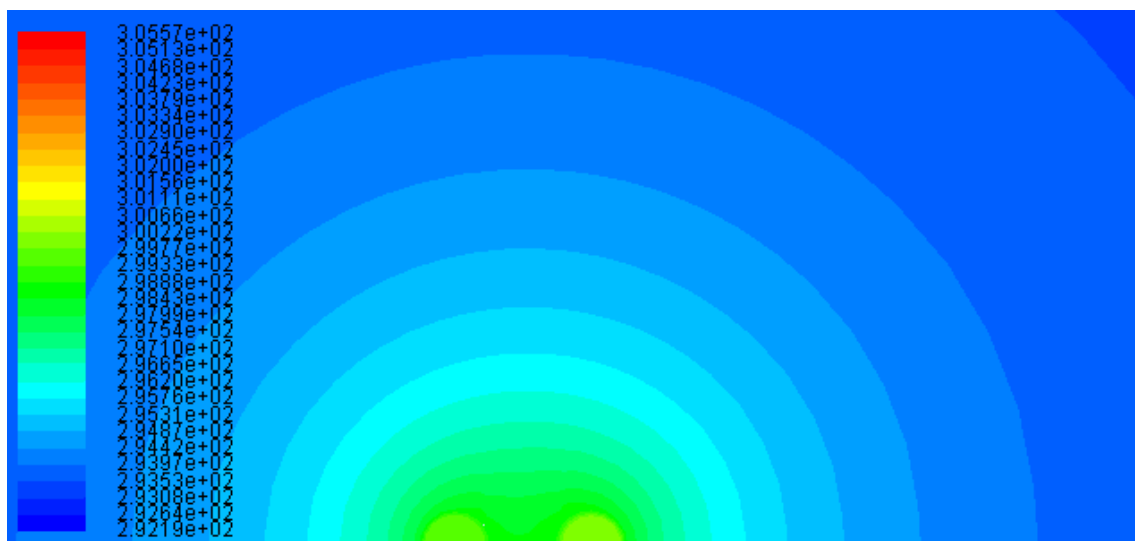


Figura D.32: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -120\text{m}$, $t = 24000\text{s}$.

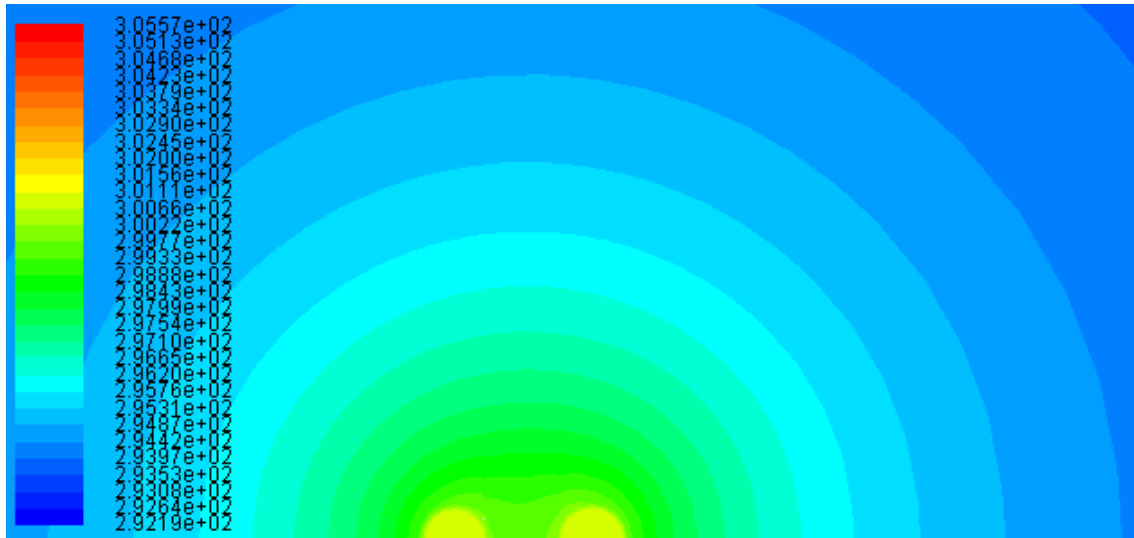


Figura D.33: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -120\text{m}$, $t = 53200\text{s}$.

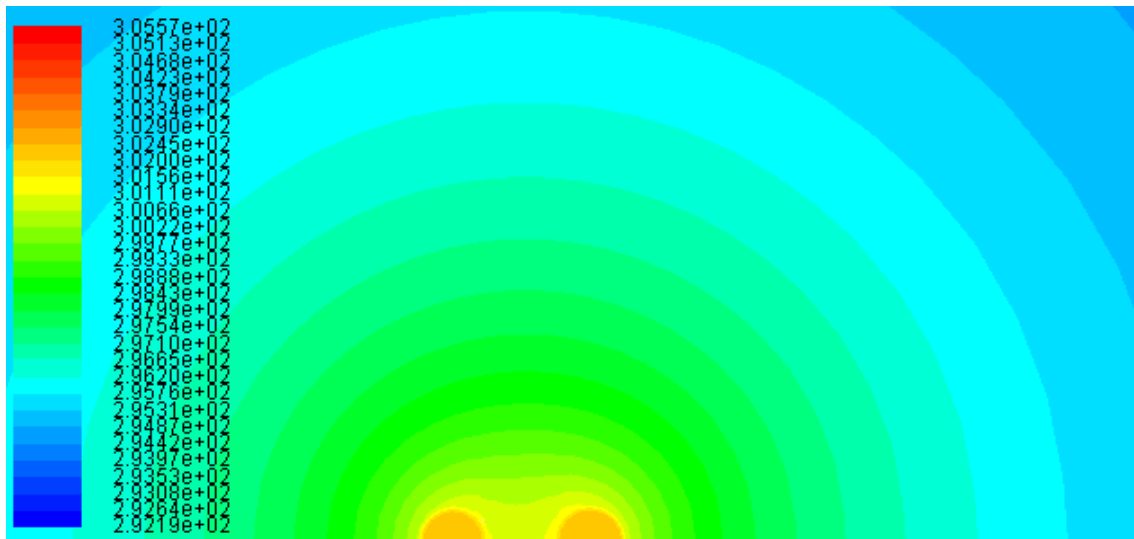


Figura D.34: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -120\text{m}$, $t = 146500\text{s}$.

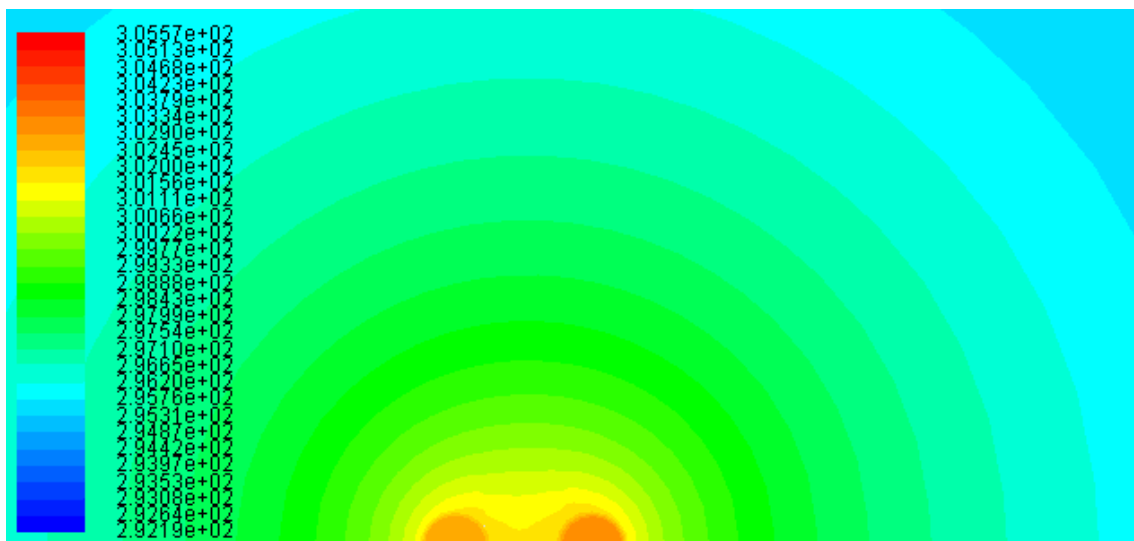


Figura D.35: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -120\text{m}$, $t = 237000\text{s}$.

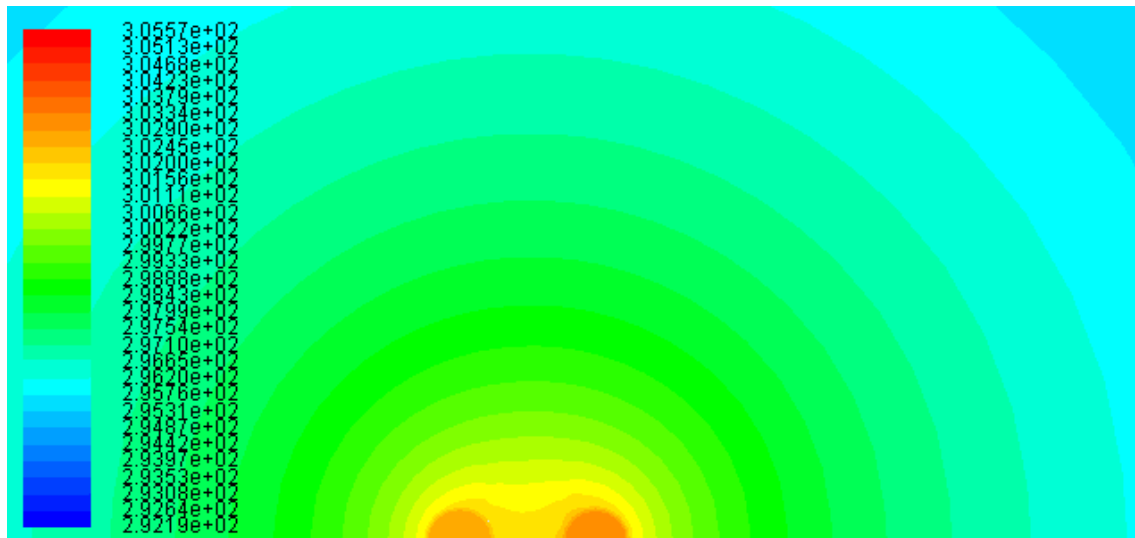


Figura D.36: Contornos de temperatura. Modelo 3D, Plano XY, $Z = -120\text{m}$, $t = 259200\text{s}$.

En las siguientes figuras se representan las temperaturas en los extremos de la pieza y se emplea la misma barra de temperaturas que en las anteriores:

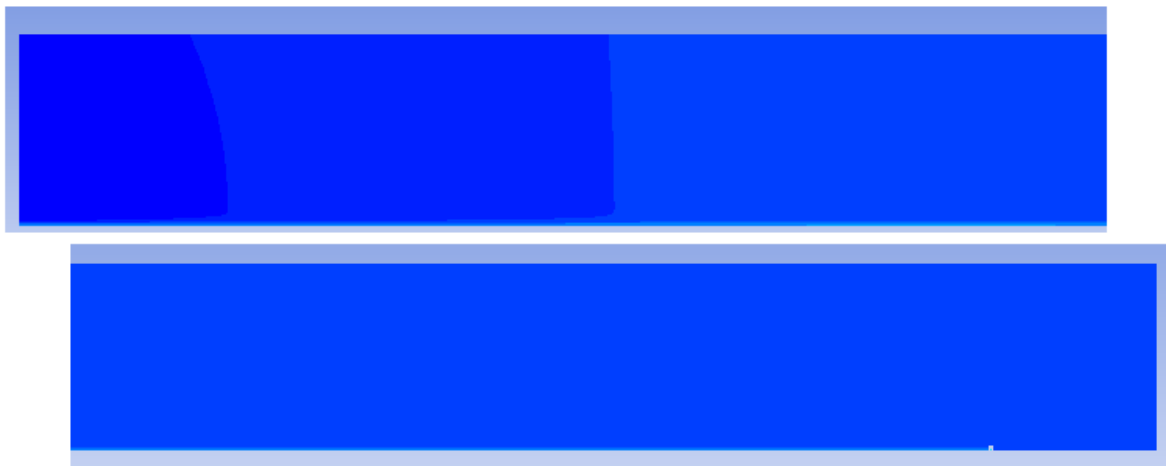


Figura D.37: Distribución de temperaturas en la mitad de la pieza (Plano YZ, $X=0$), $t = 360\text{s}$.

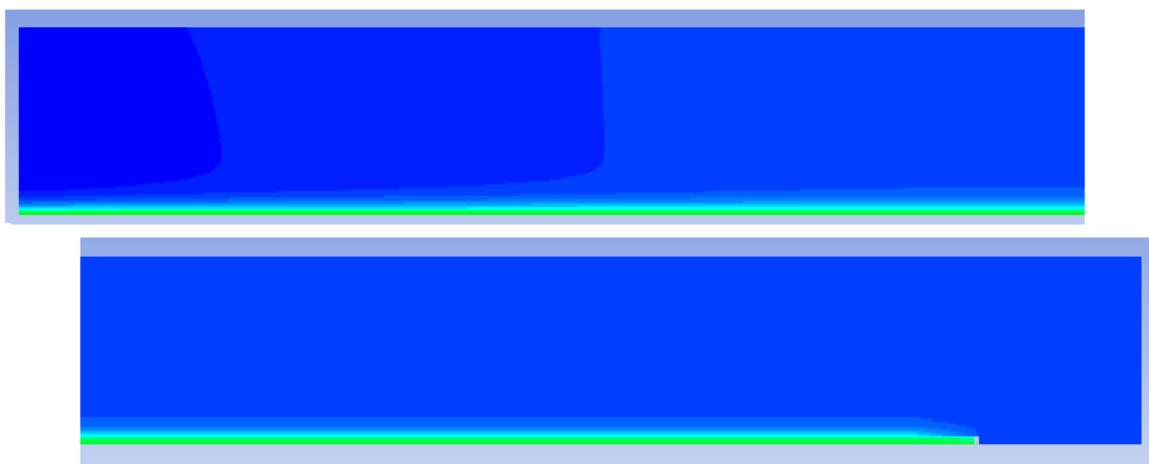


Figura D.38: Distribución de temperaturas en la mitad de la pieza (Plano YZ, $X=0$), $t = 24000\text{s}$.

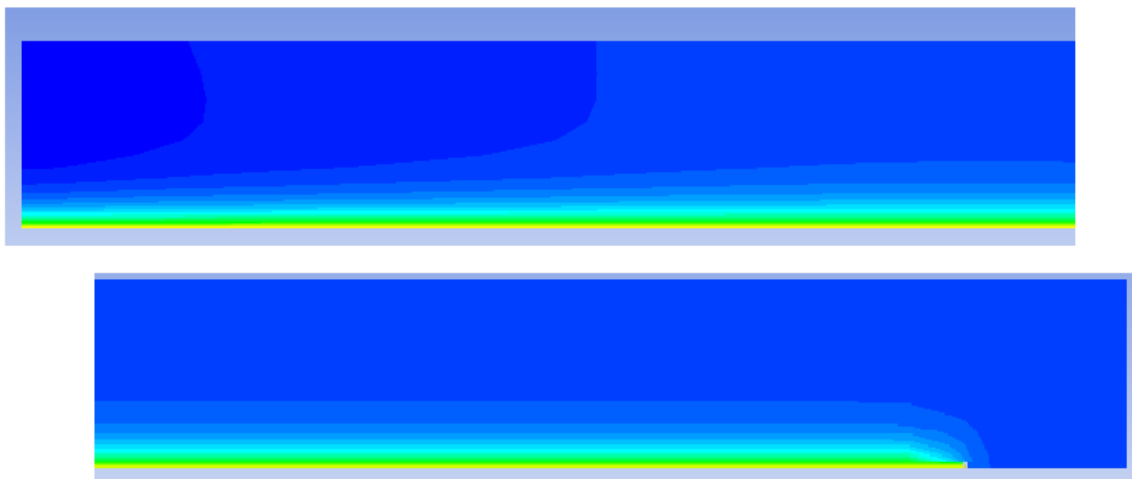


Figura D.39: Distribución de temperaturas en la mitad de la pieza (Plano YZ, $X=0$), $t=146500s$.

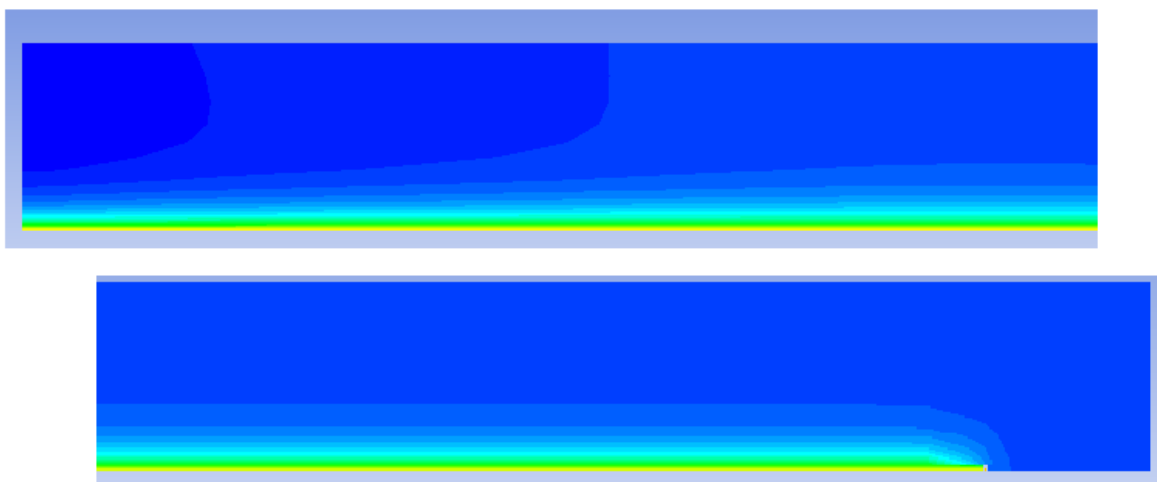


Figura D.40: Distribución de temperaturas en la mitad de la pieza (Plano YZ, $X=0$), $t=259200s$.

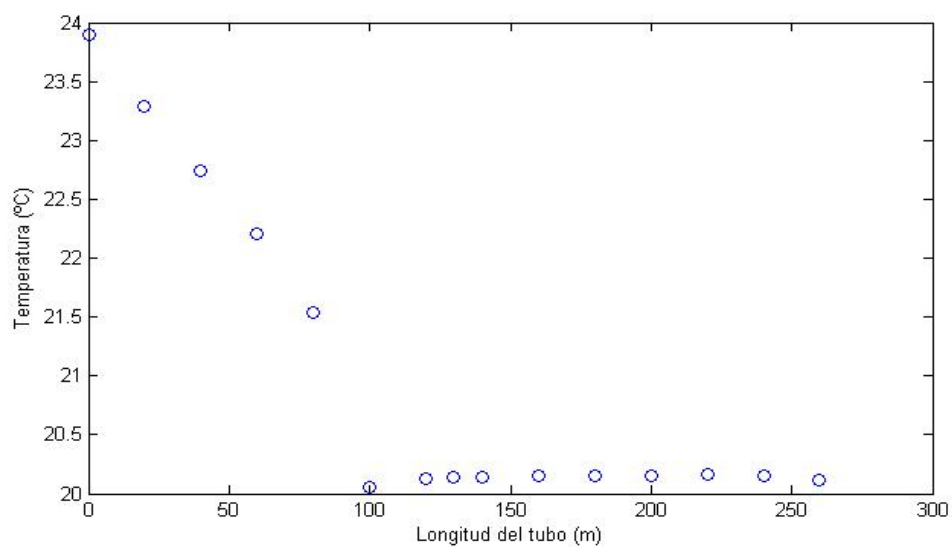


Figura D.41: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, $t=360s$.

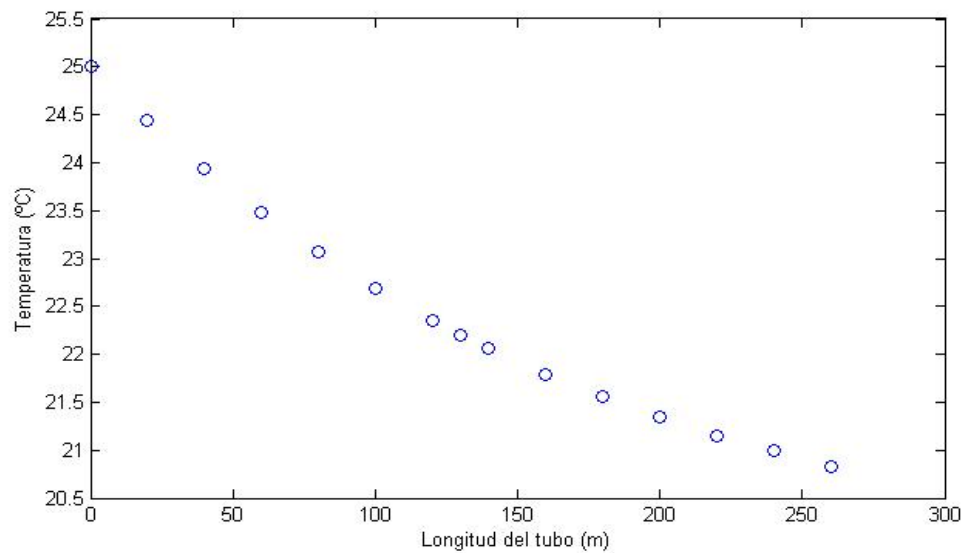


Figura D.42: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, $t = 1300s$.

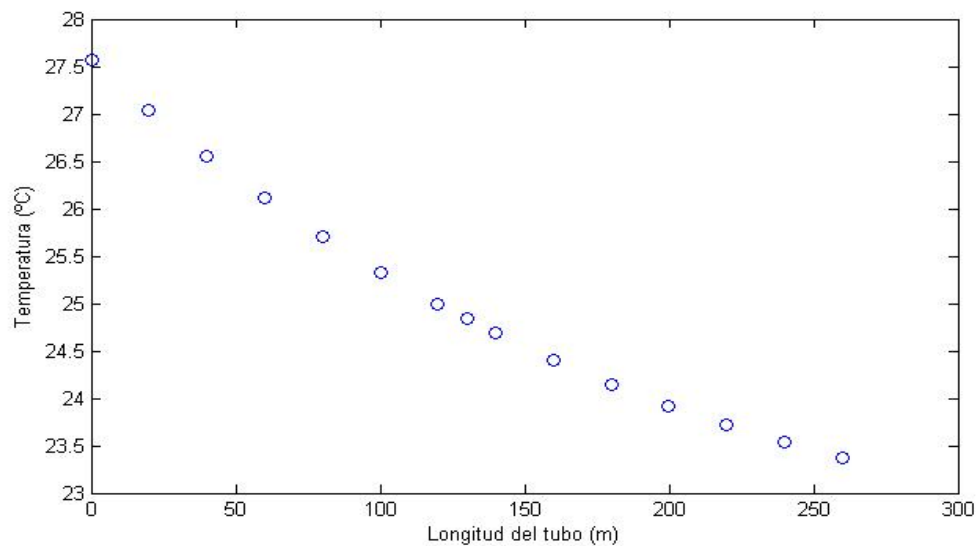


Figura D.43: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, $t = 7175s$.

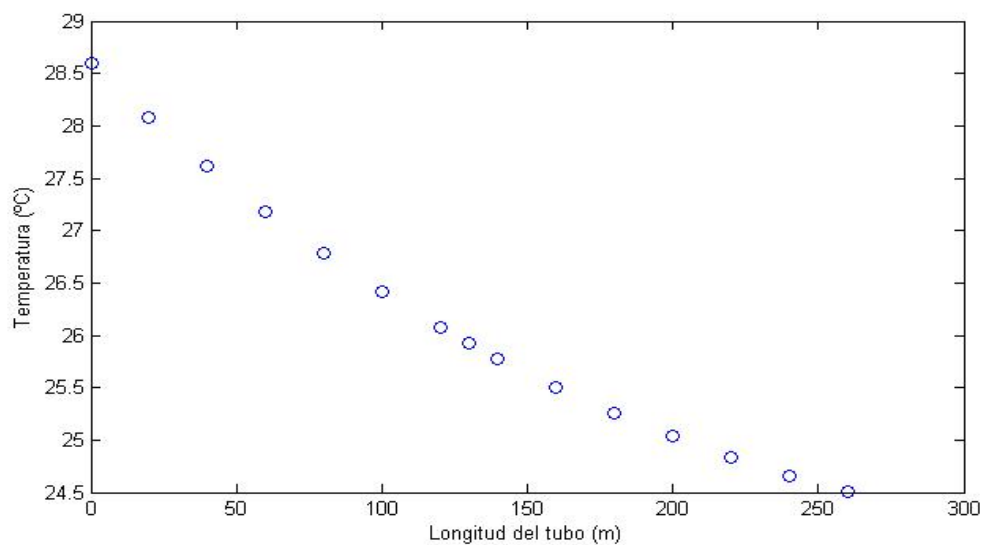


Figura D.44: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, $t = 15000s$.

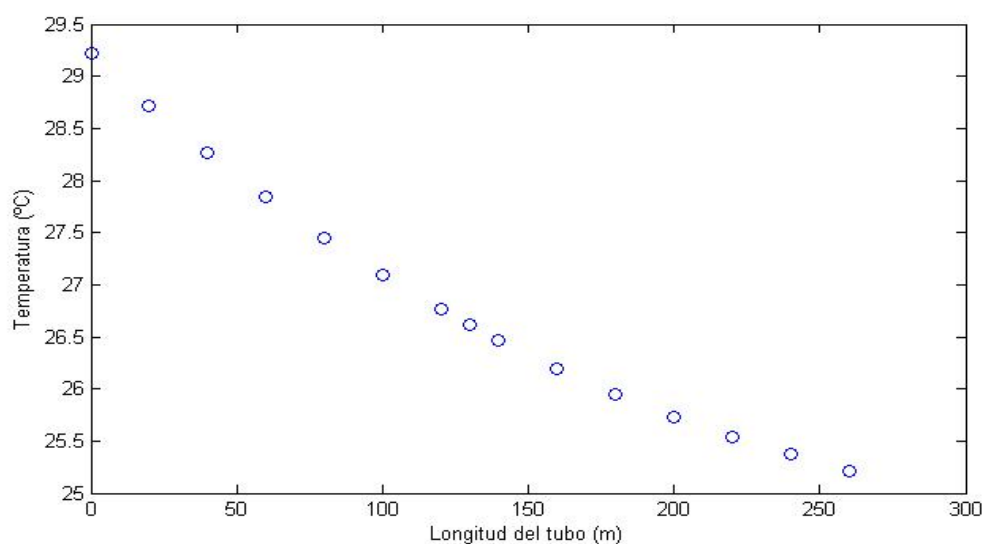


Figura D.45: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, $t = 24000s$.

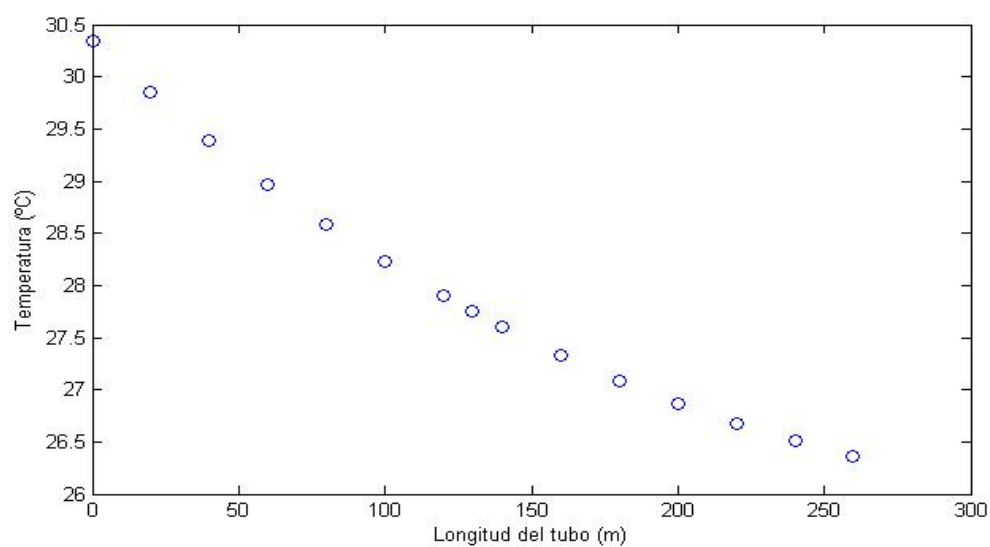


Figura D.46: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, $t = 53200s$.

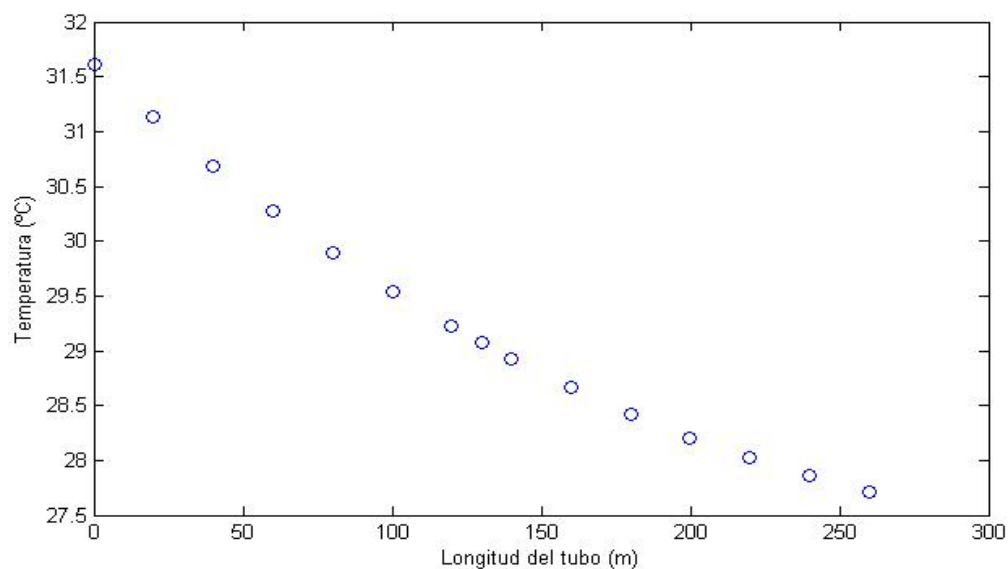


Figura D.47: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, $t = 146500s$.

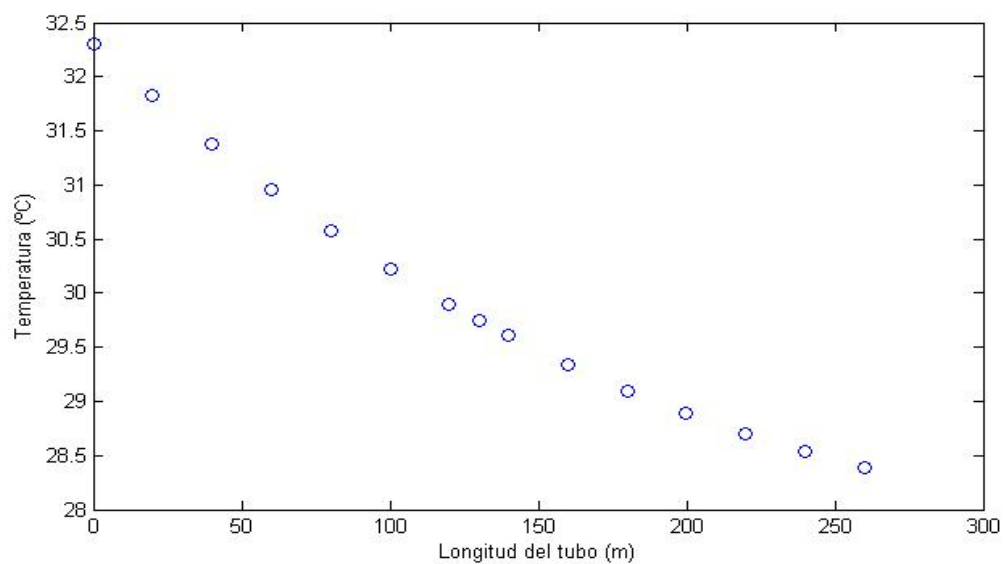


Figura D.48: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, $t = 237000s$.

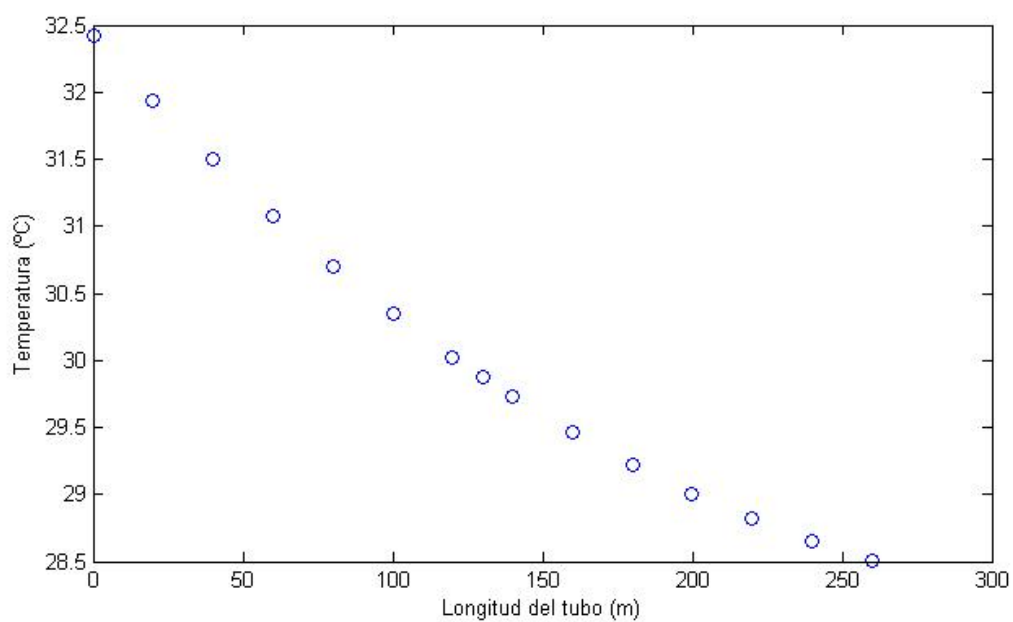


Figura D.49: Gráfica de temperatura del agua a lo largo del tubo, $t = 259200s$.