



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

Modelado y análisis del dispositivo HTPsim30 mediante dinámica de fluidos computacional

Autor:

Gordo Martín, Luis Miguel

Tutor:

**Méndez Bueno, César
Departamento de ingeniería
energética y fluidomecánica**

Valladolid, 06/07/2020

RESUMEN

Los ensayos de motor son un aspecto clave de los motores de combustión interna alternativos, ya que conducen a un mejor entendimiento de su funcionamiento, por ello son una parte importante de su investigación, desarrollo y homologación. Estos ensayos están generalizados y su uso es más que habitual entre los fabricantes de motores. Un aspecto importante a tener en cuenta en estos ensayos es el control del aire que entra al motor.

AVL dispone de un dispositivo para regular la temperatura, la humedad y la presión del aire que entra al motor en estos ensayos, el dispositivo HTPsim30. El objetivo del presente trabajo es realizar una simulación de este dispositivo, para analizar el comportamiento del aire a través del mismo, y así obtener un mayor conocimiento del HTPsim30, con la intención de mejorar los ensayos realizados con este dispositivo.

Palabras clave: HTPsim30, CFD, simulación, motor, aire, temperatura, presión.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| Capítulo 1 - Introducción..... | 11 |
| 1.1 Contexto..... | 11 |
| 1.2 Antecedentes y motivación..... | 11 |
| 1.3 Objetivos..... | 12 |
| 1.4 Estructura de la memoria..... | 12 |
| Capítulo 2 - Fundamentos teóricos..... | 15 |
| 2.1 Introducción..... | 15 |
| 2.2 Psicometría..... | 15 |
| 2.2.1 Aire húmedo y sus propiedades..... | 15 |
| 2.2.2 Diagrama psicrométrico..... | 16 |
| 2.3 Dinámica de fluidos computacional..... | 17 |
| 2.3.1 Introducción..... | 17 |
| 2.3.2 Estrategia general de la dinámica de fluidos computacional..... | 18 |
| 2.3.3 Ecuaciones de conservación para el flujo..... | 18 |
| 2.3.4 Método de los volúmenes finitos..... | 20 |
| 2.3.5 Características y tipos de mallado..... | 20 |
| 2.3.6 Método de los volúmenes finitos en problemas difusivos y convectivos..... | 22 |
| 2.3.7 Algoritmo de resolución..... | 26 |
| 2.3.8 Precisión, consistencia, estabilidad y convergencia..... | 27 |
| 2.3.9 Turbulencia..... | 28 |
| 2.3.10 Capa límite en CFD..... | 31 |
| Capítulo 3 - Descripción del problema y resolución..... | 35 |
| 3.1 Descripción de la instalación y problema..... | 35 |
| 3.1.1 HTsim30..... | 35 |
| 3.1.2 Psim30..... | 38 |
| 3.1.3 Descripción del problema..... | 40 |
| 3.2 Modelado de la geometría..... | 43 |
| 3.2.1 Programa..... | 43 |
| 3.2.2 Modelo físico..... | 44 |
| 3.2.3 Mallado y estrategia..... | 45 |
| 3.3 Modelado numérico..... | 46 |
| 3.3.1 Programa..... | 46 |
| 3.3.2 Condiciones de contorno..... | 46 |
| 3.3.3 Selección del modelo de turbulencia..... | 47 |

| | |
|--|----|
| 3.3.4 Controles de solución..... | 48 |
| 3.3.5 Estudio de independencia de malla..... | 48 |
| Capítulo 4 - Análisis de resultados..... | 50 |
| 4.1.1 Flujo en HTsim30 | 50 |
| 4.1.2 Flujo en Psim30..... | 52 |
| 4.1.3 Perfiles y distribuciones de temperatura. | 53 |
| Capítulo 5 - Presupuesto | 69 |
| Capítulo 6 - Conclusiones..... | 71 |
| Capítulo 7 - Referencias | 73 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 - Terminología empleada en el MVF..... | 21 |
| Figura 2.2 - Ejemplo de mallado 2D, estructurado, no ortogonal..... | 21 |
| Figura 2.3 - Esquema de problema unidimensional con flujo en el sentido x | 23 |
| Figura 2.4 - Esquema de discretización Upwind..... | 25 |
| Figura 2.5 - Requisitos de la resolución numérica. | 28 |
| Figura 2.6 - Experimento de Reynols..... | 29 |
| Figura 2.7 - Coexistencia de diferentes regímenes de un flujo. | 30 |
| Figura 2.8 - Esquema de zonas de flujo susceptibles de ser afectadas por las paredes..... | 31 |
| Figura 2.9 - Regiones de la capa límite. | 32 |
| Figura 2.10 - Comparativa entre función de pared y tratamiento mejorado de pared..... | 33 |
| Figura 3.1 - Esquema HTsim30 | 35 |
| Figura 3.2 - Rango de funcionamiento standard..... | 37 |
| Figura 3.3 - Rango de funcionamiento extendido | 38 |
| Figura 3.4 – Psim30. Módulo de aire fresco. | 40 |
| Figura 3.5 - Resumen mediciones | 42 |
| Figura 3.6 - Perfil de velocidad y temperatura simulación 1 | 43 |
| Figura 3.7 - Perfil de velocidad y temperatura simulación 2 | 43 |
| Figura 3.8 - Modelo 3D del dispositivo HTPsim30 simplificado | 44 |
| Figura 3.9 - Topología de bloques | 45 |
| Figura 3.10 - Mallado geometría..... | 46 |
| Figura 4.1 - Secciones de estudio..... | 50 |
| Figura 4.2 - Líneas de corriente de velocidad (izquierda) y de temperatura (derecha) simulación 1..... | 51 |
| Figura 4.3 – Líneas de corriente de velocidad (izquierda) y de temperatura (derecha) simulación 2..... | 51 |
| Figura 4.4 - Líneas de corriente velocidad (izquierda) y de temperatura (derecha) Psim30, simulación 1..... | 52 |
| Figura 4.5 - Contornos de presión simulación 1..... | 52 |
| Figura 4.6 - Líneas de corriente velocidad (izquierda) y de temperatura (derecha) Psim, simulación 2..... | 53 |
| Figura 4.7 - Contornos de presión simulación 2..... | 53 |
| Figura 4.8 - Simulación 1 - sección 1. A 100mm de la salida..... | 54 |
| Figura 4.9 - Simulación 2 - sección 1. A 100mm de la salida..... | 54 |
| Figura 4.10 - Distribución de valores de temperatura en la sección 1 | 55 |
| Figura 4.11 - Simulación 1 - sección 2. A 200mm de la salida..... | 55 |
| Figura 4.12 - Simulación 2 - sección 2. A 200mm de la salida..... | 56 |
| Figura 4.13 - Distribución de valores de temperatura en la sección 2 | 56 |
| Figura 4.14 - Simulación 1 - sección 3. A 300mm de la salida..... | 57 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.15 - Simulación 2 - sección 3. A 300mm de la salida..... | 57 |
| Figura 4.16 - Distribución de valores de temperatura en la sección 3 | 58 |
| Figura 4.17 - Simulación 1 - sección 4. A 300mm de la salida..... | 58 |
| Figura 4.18 - Simulación 2 - sección 4. A 300mm de la salida..... | 59 |
| Figura 4.19 - Distribución de valores de temperatura en la sección 4 | 59 |
| Figura 4.20 - Simulación 1 - sección 5. A 200mm de la salida..... | 60 |
| Figura 4.21 - Simulación 2 - sección 5. A 200mm de la salida..... | 60 |
| Figura 4.22 - Distribución de valores de temperatura en la sección 5 | 61 |
| Figura 4.23 - Simulación 1 - sección 6. A 100mm de la salida..... | 61 |
| Figura 4.24 - Simulación 2 - sección 6. A 100mm de la salida..... | 62 |
| Figura 4.25 - Distribución de valores de temperatura en la sección 6 | 62 |
| Figura 4.26 - Simulación 1 - sección 7. A 225mm del eje de la horizontal de la tubería de salida. | 63 |
| Figura 4.27 - Simulación 2 - sección 7. A 225mm del eje horizontal de la tubería de salida. | 63 |
| Figura 4.28 - Distribución de valores de temperatura en la sección 7 | 64 |
| Figura 4.29 - Simulación 1 - sección 8. A 325 del eje horizontal de la tubería de salida. | 64 |
| Figura 4.30 - Simulación 2 - sección 8. A 325 del eje horizontal de la tubería de salida. | 65 |
| Figura 4.31 - Distribución de valores de temperatura en la sección 8 | 65 |
| Figura 4.32- Simulación 1 - Contornos de temperatura en la sección intermedia..... | 66 |
| Figura 4.33 - Simulación 2 – Contorno de temperatura en la sección intermedia..... | 67 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 3.1 - Medida TT2 con válvula de sala abierto y válvula de depresión abierto | 41 |
| Tabla 3.2 - Medida TT1 con válvula de sala abierto y válvula de depresión abierto | 41 |
| Tabla 3.3 - Medida TT2 con válvula de sala cerrado y válvula de depresión abierto..... | 41 |
| Tabla 3.4 - Medida TT2 con válvula de sala cerrado y válvula de depresión al 50%..... | 42 |
| Tabla 4.1 - Resumen valores característicos simulación 1. | 66 |
| Tabla 4.2 - Resumen valores característicos simulación 2. | 66 |
| Tabla 5.1 - Presupuesto..... | 69 |

Capítulo 1 - Introducción

1.1 Contexto

Los ensayos de motor son un aspecto clave de los motores de combustión interna alternativos (M.C.I.A.) ya que conducen a un mejor entendimiento de su funcionamiento, por ello son una parte importante de su investigación, desarrollo y homologación. Estos ensayos están generalizados y su uso es más que habitual entre los fabricantes de motores [1].

Existen varios tipos de ensayos según su finalidad. Por ejemplo, para medir las emisiones existen varios tipos: *Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure* (WLTP) para Europa; y el *US06 Supplemental Federal Test Procedure* (SFTP-US06) en Estados Unidos. También existen diversos ensayos para: medir la potencia y el par del motor; así como para comprobar sus prestaciones, como el arranque en frío o el funcionamiento del motor a diferentes cotas.

La configuración de éstos últimos generalmente depende de cada fabricante, ya que son ellos los que diseñan el tipo de ensayo, en función de qué propiedad quieran analizar. Por otro lado, los ensayos de emisiones son ensayos de homologación y por tanto deben ser siempre iguales, es decir, están totalmente detallados.

Los diferentes ensayos de motor que se pueden realizar requieren de un control exhaustivo de las condiciones, tanto del combustible como del comburente que entran al motor, pues cualquier cambio en las condiciones de estos cambiaría significativamente el proceso de combustión y por tanto truncaría los datos obtenidos en los ensayos. En consecuencia, en estos ensayos, como en cualquier experimento, es fundamental considerar la precisión de las entradas y salidas del sistema [2].

La precisión en la medida del consumo de aire en los M.C.I.A. es un asunto de cierta dificultad, pero de gran importancia, puesto que un M.C.I.A. es esencialmente un 'motor de aire' en el que el aire es el fluido de trabajo; la función del combustible es suministrar calor. Por lo tanto, una medida de las condiciones del aire errada puede llevar al falseamiento de los ensayos. Por este motivo es de vital importancia conocer el estado de las propiedades del aire de entrada al motor.

1.2 Antecedentes y motivación

Como se ha comentado, los ensayos de motor requieren un control exhaustivo de las condiciones del aire de entrada al motor. Con este fin se creó el dispositivo HTPsim30. El dispositivo HTPsim30 ha sido diseñado para regular las condiciones del aire que entra al motor.

Este dispositivo se divide en dos: por un lado, se tiene el dispositivo HTsim30, encargado de regular la temperatura y la humedad del aire; y por otro lado se tiene el Psim30, encargado de regular la presión. Estos dispositivos disponen de unos reguladores PID (proporcional, integral y derivativo) para realizar el control de las condiciones del aire respecto a unos valores de consigna.

El dispositivo HTsim30 es el primero en entrar en contacto con el aire, regula su temperatura y su humedad, y pasa el aire hacia el dispositivo Psim30, donde se regula la presión de éste y se suministra al motor. Más adelante, en el capítulo 3, se describirán estos dispositivos detalladamente.

Desde su creación, sendos dispositivos han sufrido varias modificaciones, en su mayoría por exigencias de la distribución de la sala de ensayos, aunque otras con la intención de mejorar las características de los dispositivos.

A la hora de tomar medidas de las propiedades del aire a la salida del HTPsim30, se observó que las propiedades del aire no eran uniformes en la sección elegida para la medida, sino que había cierta estratificación de las propiedades. Este hecho impedía la regulación mediante PID de las condiciones de funcionamiento del HTPsim30, provocando por tanto un mal funcionamiento de este y un falseamiento de los resultados obtenidos en los ensayos de motor.

A la vista de estos resultados, se hace necesario realizar una simulación del comportamiento del aire a su paso por el dispositivo HTPsim30, para localizar una sección de medida válida para el control del dispositivo.

1.3 Objetivos

El objetivo de este documento es analizar el comportamiento del aire dentro del dispositivo HTPsim30, utilizado en ensayos de motor para acondicionar la temperatura, la presión y la humedad del aire de entrada al motor. Con el fin de obtener un conocimiento más amplio acerca del dispositivo.

Para ello, se han marcado una serie de objetivos parciales:

- Validar el mallado de los dispositivos HTsim30 y Psim30.
- Simular dos casos con distintos perfiles de velocidad y temperatura a la entrada del dispositivo simulado.
- Comprobar si existe cierta independencia entre los perfiles de velocidad y temperatura de entrada en el HTPsim30, y el comportamiento del aire dentro del dispositivo Psim30.
- Localizar cuál sería, de existir, un buen punto para realizar la medida de control dentro del Psim30 de la temperatura y la presión del aire.

1.4 Estructura de la memoria

La presente memoria que describe el Trabajo Fin de Grado está conformada por 7 capítulos:

- Capítulo 1: Introducción

Contexto, antecedentes, motivación y objetivos del proyecto.

- Capítulo 2: Teoría base

En este capítulo se desarrollan una serie de fundamentos teóricos. Principalmente sobre psicrometría y dinámica de fluidos computacional, con la intención de facilitar, por un lado, el entendimiento del dispositivo objeto del estudio, y por otro las herramientas usadas para su análisis.

- Capítulo 3: Descripción del problema y resolución

En este capítulo se presentan el dispositivo que se estudia en este trabajo, y sus modelos físico y numérico.

- Capítulo 4: Análisis de resultados

En este capítulo se analizan los resultados numéricos obtenidos para determinar la independencia entre los perfiles de velocidad y temperatura a la entrada del dispositivo HTsim30 y el comportamiento del aire dentro del dispositivo Psim30.

- Capítulo 5: Presupuesto

Se detalla una aproximación del coste del estudio realizado.

- Capítulo 6: Conclusiones

Se expondrán las conclusiones obtenidas en el presente trabajo de fin de grado.

- Capítulo 7: Referencias

Capítulo 2 - Fundamentos teóricos

2.1 Introducción

En este capítulo se desarrollan una serie de conceptos teóricos con la intención de facilitar, por un lado, el entendimiento del dispositivo objeto del estudio, y por otro las herramientas usadas para su análisis.

2.2 Psicrometría

2.2.1 Aire húmedo y sus propiedades

La psicrometría es la rama de la ciencia que estudia las propiedades termodinámicas del aire húmedo, compuesto por la mezcla de aire seco y vapor de agua. El aire húmedo puede considerarse como una mezcla de dos componentes: aire seco y vapor de agua.

El aire seco es, en la práctica, de composición constante y habitualmente se utiliza la composición dada, en volumen, por la *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers (ASHRAE)*:

| | |
|--------------------|--------|
| Nitrógeno | 78,09% |
| Oxígeno | 20,95% |
| Argón | 0,93% |
| Dióxido de carbono | 0,03% |

La temperatura crítica es la temperatura límite por encima de la cual un gas miscible no puede ser licuado por compresión. Por encima de esta temperatura no es posible condensar el gas aumentando la presión.

La presión y temperatura a la que se encuentra el aire seco en la atmósfera hacen que se pueda considerar el comportamiento de éste como el de un gas perfecto, de hecho, el intervalo de temperaturas utilizado en los ensayos de motor está muy por encima de la temperatura crítica del aire, que es de -141 °C .

El vapor de agua es el otro elemento que forma parte del aire húmedo y cuya cantidad varía en la mezcla. Por ejemplo, con la estación del año, la climatología de la zona, por presencia de focos que emiten vapor, o por la presencia de zonas con una temperatura suficientemente pequeña como para que se produzca la condensación de éste.

El vapor de agua se encuentra en el aire a presiones muy bajas, su presión parcial es del orden de la décima parte de la presión atmosférica o incluso menor, por lo que, al igual que ocurría con la mezcla de gases que forman el aire seco, se comporta prácticamente como un gas ideal.

Para definir termodinámicamente el estado de la mezcla, es necesario ver cuál es el número de variables termodinámicas (o grados de libertad) independientes necesarias. En termodinámica, la regla de las fases de Gibbs establece el número de

grados de libertad (L) que es necesario para caracterizar un sistema en equilibrio en función del número de fases (F) y del número de componentes (C) del sistema. Esta regla establece para el caso del aire húmedo, con una fase (gaseosa) y dos componentes (aire seco y vapor de agua) que:

$$L = C - F + 2 \qquad \text{Ecuación 2.1}$$

Por lo tanto, para caracterizar el aire húmedo, el número de variables termodinámicas independientes necesarias serán $2-1+2 = 3$. De las tres variables necesarias, la primera que se fija es la presión total de la mezcla, que será la presión atmosférica, que depende sobre todo de la altura sobre el nivel del mar. Una vez establecida la presión atmosférica, con cualesquiera otras dos variables, por ejemplo, la temperatura seca del aire y su humedad relativa quedará caracterizado el aire húmedo.

2.2.2 Diagrama psicrométrico.

Los diagramas psicrométricos permiten la representación de las propiedades del aire húmedo en diferentes condiciones y fases del agua en su mezcla con el aire seco, por lo que son herramientas de gran utilidad para la comprensión de procesos entre distintos estados psicrométricos. Las distintas magnitudes que se han de representar en un diagrama son las siguientes:

- La humedad específica.
- La temperatura húmeda.
- La entalpía.
- La humedad relativa.
- La temperatura seca.
- El volumen específico.

Para determinar las condiciones del aire húmedo se deben conocer tres variables independientes, según establece la ley de Gibbs. Este hecho hace difícil su representación en un plano, pero se solventa construyendo los diagramas del aire húmedo particularizados para diferentes presiones totales de la mezcla aire húmedo.

Por otro lado, es posible trabajar con los diagramas sin considerar la cantidad de aire húmedo en estudio, ya que las magnitudes representadas son todas específicas.

Uno de los diagramas psicrométricos es el de Mollier, en este diagrama es factible representar todos los estados de la mezcla agua-aire seco, por eso se considera el diagrama más termodinámico de todos, aunque sólo se desarrolla la mezcla en estado vapor por ser la única que interesa en el estudio del aire húmedo.

2.3 Dinámica de fluidos computacional

2.3.1 Introducción

Las ecuaciones que describen el movimiento de los fluidos son las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones solo se pueden resolver de manera analítica para un número limitado de casos, debido fundamentalmente a la presencia de viscosidad en el fluido y a las geometrías complejas. Las soluciones conocidas son extremadamente útiles a la hora de entender los fluidos, pero raramente son directamente aplicables a problemas reales de ingeniería. Los ingenieros se han visto tradicionalmente forzados a utilizar otro tipo de aproximaciones.

En la mayoría de estas aproximaciones se hace uso de la simplificación de las ecuaciones. Normalmente son una combinación de aproximación y análisis dimensional. Por ejemplo, el análisis dimensional muestra que la fuerza de arrastre de un objeto puede ser representada por:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D S \rho v^2 \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde S es el área del cuerpo enfrentada al flujo, v es la velocidad del flujo y ρ es la densidad del fluido; el parámetro C_D se llama coeficiente de arrastre. Es función de otro parámetro no dimensional del problema y casi siempre se obtiene correlacionando datos experimentales. Esta aplicación es muy útil cuando el sistema se puede describir con uno o dos parámetros, por lo que quedan fuera del alcance aplicaciones con geometrías complejas.

Para muchos flujos la adimensionalización de las ecuaciones de Navier-Stokes dejan como único parámetro adimensional el número de Reynolds. Si la geometría del cuerpo está totalmente definida, se puede obtener el resultado deseado mediante la realización de un experimento con un modelo a escala con la misma geometría. El Reynolds deseado se puede conseguir mediante la elección del fluido y de los parámetros del flujo. Estas aproximaciones son muy fiables y la primera elección incluso hoy en día.

El problema es que muchos flujos requieren varios parámetros adimensionales para su definición y sería muy complicado (y en algunas ocasiones imposible) realizar un experimento que escale correctamente el flujo de estudio. Un ejemplo de esto último es el flujo alrededor de un avión. Para conseguir el mismo número de Reynolds con un modelo más pequeño, la velocidad del fluido debe aumentar. Si se usa el mismo fluido (aire), daría como resultado un número muy alto de Mach, que haría que el fluido se comprimiera variando su comportamiento y, por tanto, las ecuaciones a aplicar; habría que usar otro fluido.

En otros casos, la experimentación es muy complicada, si no imposible. Por ejemplo, el equipo de medida podría distorsionar el flujo o el flujo puede ser inaccesible. Algunas cantidades simplemente no se pueden medir con la tecnología actual, o se pueden medir solo con una precisión insuficiente.

Una alternativa a estos problemas, o al menos un método complementario, llegó con el nacimiento de los ordenadores. Aunque la mayoría de las ideas claves de los métodos de resolución numérica para ecuaciones en diferencias parciales ya se conocían hace más de un siglo, eran de poca utilidad antes de la aparición de los ordenadores. Con la aparición de estos, el estudio de los fluidos se hizo mucho más sencillo y efectivo. La solución computacional de las ecuaciones de Navier-Stokes ha adquirido tanta importancia, que ahora mismo ocupa un tercio de las investigaciones en dicho campo [7].

2.3.2 Estrategia general de la dinámica de fluidos computacional

La estrategia seguida en la dinámica de fluidos computacional (conocida como CFD por sus siglas en inglés, Computational Fluid Dynamics) es la de reemplazar un problema de mecánica de fluidos definido sobre un dominio continuo (hipótesis del continuo de la mecánica de fluidos clásica) por uno en dominio discreto definido a partir de una malla. En el dominio continuo, cada variable del flujo (presión, velocidad, temperatura) está definida en todos los puntos del espacio. Sin embargo, en el dominio discreto, cada variable del flujo está definida únicamente en los puntos (nodos) que configuran la malla. A este proceso se le denomina discretización espacial, porque el espacio se 'discretiza' en un número finito de puntos. Lógicamente, también será necesario realizar una discretización temporal en caso de que las ecuaciones de gobierno muestren un comportamiento dependiente del tiempo [6].

Las ecuaciones de gobierno en derivadas parciales, así como las condiciones de contorno, están definidas matemáticamente mediante variables continuas, ϕ . Es posible aproximar estas complejas ecuaciones no lineales en derivadas parciales por una serie de ecuaciones algebraicas que relacionan las variables discretizadas ϕ_i . El sistema de ecuaciones resultante es un gran conjunto de ecuaciones algebraicas acopladas en variables discretas. Manipular este sistema y resolverlo requiere un número muy grande de cálculos iterativos, que deberán ser realizados por ordenador.

2.3.3 Ecuaciones de conservación para el flujo

Ecuación de conservación de masa:

La ecuación de conservación de masa (ecuación de continuidad) establece de forma general que la variación temporal de masa en el interior de un volumen de control, V_c , es consecuencia del flujo neto de masa a través de las paredes de dicho V_c . La expresión no estacionaria de la ecuación de conservación de masa en forma diferencial es la siguiente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \bar{v}) = 0 \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde ρ es la densidad y \bar{v} la velocidad. En el caso particular del flujo incompresible la densidad del fluido no varía temporal ni espacialmente en el dominio, por lo que la ecuación se reduce a que la divergencia de la velocidad debe ser nula:

$$\text{div}(\bar{v}) = 0 \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento:

La segunda ley de Newton afirma que la variación en la unidad de tiempo, t , de la cantidad de movimiento, $\rho\bar{v}$, de una masa fluida es igual a la resultante de las fuerzas que actúan sobre esa masa fluida. La expresión general de la ecuación de conservación de cantidad de movimiento para un fluido newtoniano (que presenta una relación lineal entre las tensiones cortantes y las velocidades de deformación resultantes según $\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$, donde μ es el coeficiente de viscosidad) e incompresible es:

$$\frac{\partial(\rho\bar{v})}{\partial t} + \nabla(\rho\bar{v}\bar{v}) = -\nabla p + \rho \bar{f}_m + \mu\Delta\bar{v} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Ecuación de conservación de la energía:

La ecuación de conservación de la energía tiene la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) \right] + \text{div} \left[\rho \left(h + \frac{1}{2} v^2 \right) \bar{v} \right] = \\ = \rho \bar{f}_m \bar{v} + \text{div}(\bar{\tau}'\bar{v}) - \text{div} \bar{q} + Q_r + Q_q \end{aligned} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Siendo e la energía interna del fluido, h la entalpía, $h = e + \frac{p}{\rho}$, $\text{div} \bar{q}$ el calor que se comunica al sistema por conducción térmica, Q_r el calor recibido por radiación, y Q_q el calor que aparece en el interior del fluido debido a la transformación química.

Ecuación general de conservación:

Las 3 ecuaciones anteriores se pueden escribir de una forma generalizada. En alguno de los apartados posteriores será necesario utilizar estas ecuaciones para desarrollar ciertos aspectos. Con el objetivo de realizar esto con la mayor universalidad posible en cuanto al tipo de ecuación, nos valdremos de una ecuación general de conservación:

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} + \nabla(\rho\bar{v}\phi) = \nabla(\Gamma\nabla\phi) + S_\phi \quad \text{Ecuación 2.7}$$

- El primer término a la izquierda de la Ecuación 2.7 es un término temporal que representa la variación local con el tiempo de la propiedad genérica ϕ ; es decir, la acumulación o disminución de ϕ .
- El segundo es un término convectivo, que representa el transporte de la propiedad, ϕ , de un punto a otro del dominio por medio de la velocidad del flujo.

- El primer término a la derecha de la ecuación es el término difusivo. Corresponde con alguno de los fenómenos de transporte molecular de la propiedad, ϕ , como la ley de Fourier para el transporte de calor o la ley de Fick para la difusión de la masa.
- Por último, el cuarto término es un término fuente, para tener en cuenta la generación o destrucción de la propiedad transportada. Por ejemplo, el aporte de calor desde el exterior del fluido.

Nótese que, particularizando en cada caso la propiedad ϕ de la Ecuación 2.7, se puede recuperar cada una de las ecuaciones anteriores.

2.3.4 Método de los volúmenes finitos.

La idea de partida fundamental es el concepto de suplir una solución analítica de unas ecuaciones en derivadas parciales (que proporcionan el valor de unas variables de forma continua en todos los puntos del espacio) con una solución numérica aproximada de unas ecuaciones algebraicas (que proporcionan el valor de las variables únicamente en una serie de puntos discretos, nodos, definidos por la malla del dominio). Más adelante se muestra la transformación de las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas.

En particular, se establece que los valores discretos de la variable ϕ quedarán descritos por un conjunto de ecuaciones algebraicas que relacionan el valor de la variable en un nodo con el valor de los nodos vecinos. La forma en que se transmite la información entre esos nodos requiere de algún tipo de aproximación, que en el caso del método de los volúmenes finitos (MVF) es mediante esquemas conservativos que evalúan los flujos a través de las superficies de unos volúmenes de control (celdas).

El método de volúmenes finitos asocia un volumen finito local a diversos puntos en el dominio, y a continuación aplica las leyes integrales de conservación a cada volumen local.

Por tanto, el método se basa en valores discretos que están promediados en la celda. Esto distingue claramente al método de volúmenes finitos de otros métodos como el de diferencias finitas o elementos finitos, en los que la variable numérica fundamental es el valor local de la función en los nodos de la malla.

2.3.5 Características y tipos de mallado.

La generación de la malla es una de las partes más importantes de la preparación de un modelo para la simulación CFD. Ninguna simulación puede realizarse sin haber previamente definido una malla con una distribución de celdas apropiada.

Los puntos discretos dónde se calculará la variable del problema se definen en el mallado, que es esencialmente una representación discreta del dominio geométrico donde se resolverá el problema. Como se puede observar en la Figura 2.1, el mallado divide el espacio en un número finito de subdominios (celdas). Cada celda está asociada a un centroide, y también está limitada por un número de superficies o caras, que a su vez están ancladas a una serie de nodos (vértices). El tipo de conectividad existente entre las diferentes celdas de la malla permite clasificar los mallados en dos categorías básicas: mallas estructuradas y mallas no estructuradas.

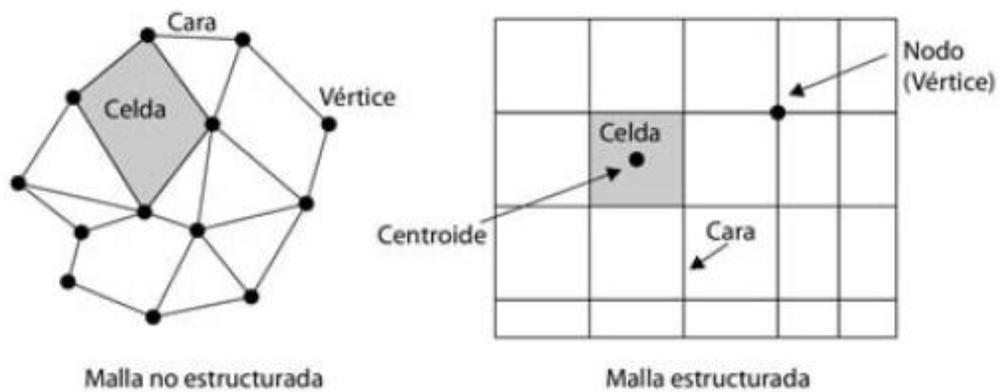


Figura 2.1 - Terminología empleada en el MVF

Los mallados estructurados consisten en familias de líneas de malla con la propiedad de que los miembros de una misma familia no se cruzan entre ellos y cruzan una sola vez a los miembros de otra familia. Esto permite la numeración consecutiva de estas líneas. La posición de cualquier nodo de la malla estará unívocamente identificada por un conjunto de dos (en el caso de mallas 2D) o 3 (en el caso de mallas 3D) índices, ejemplo: i, j, k .

Este tipo de mallado es el más simple, ya que es equivalente a una malla cartesiana. Cada nodo tiene 4 nodos colindantes, en el caso de mallas 2D, o 6 en el caso de mallados 3D, se puede observar un ejemplo de este tipo de mallados en la Figura 2.2. Esta conexión entre celdas vecinas facilita la programación y los sistemas matriciales de las ecuaciones algebraicas

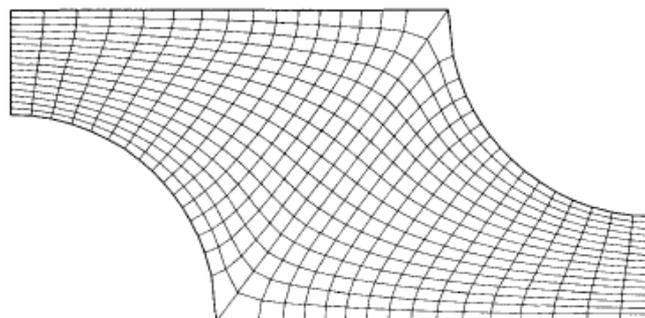


Figura 2.2 - Ejemplo de mallado 2D, estructurado, no ortogonal.

Los mallados estructurados son, de algún modo, la elección más natural para resolver un flujo determinado, pues éste estará generalmente alineado con las direcciones principales de la malla y tendrá una composición regular. En cierto sentido, las líneas de malla siguen a las líneas de corriente, las cuales se alinean con los contornos sólidos del dominio.

Es importante destacar que las mallas estructuradas tienen, en comparación con las no estructuradas mejores prestaciones desde el punto de vista del CFD en términos de precisión, tiempo de cálculo y consumo de memoria computacional, aunque siempre que la geometría sea sencilla. Por tanto, el empleo de mallas no estructuradas está únicamente ligado a la necesidad industrial de generar geometrías en reducidos intervalos de tiempo y al uso de herramientas automáticas de generación de mallas.

Por otro lado, uno de los principales inconvenientes de las mallas estructuradas es que presentan cierta rigidez. Así, por ejemplo, si se quiere introducir localmente un nuevo punto en la malla, es imprescindible hacer pasar nuevas líneas ortogonales por el punto, que, por extensión, afectará al resto de los puntos del dominio, obligando a regenerar toda la familia de curvas ya existentes y aumentando innecesariamente la resolución del mallado en otras zonas.

De forma general, los mallados estructurados pueden clasificarse de la siguiente forma:

- Mallas cartesianas uniformes: sólo aplicables para geometrías regulares extremadamente sencillas.
- Mallas cartesianas no uniformes: la malla sigue siendo ortogonal, pero ya no es regular en todas las direcciones. Esta es la mejor opción si se desea una malla cartesiana cuya resolución aumente en alguna zona.
- Mallas *body-fitted* estructuradas: la malla se hace curvilínea para adaptarla lo más posible a la forma geométrica del dominio a modelar. Normalmente emplea métodos sofisticados para mantener condiciones de continuidad y suavidad en el tamaño de las celdas.
- Mallas multibloque: consisten en una combinación de mallas estructuradas, que aplican diversas topologías en diferentes zonas del dominio.

2.3.6 Método de los volúmenes finitos en problemas difusivos y convectivos.

En este apartado se muestra con un ejemplo el método de los volúmenes finitos en problemas difusivos y convectivos. Considérese un dominio unidimensional dividido en celdas en el que se experimenta el transporte de un escalar ϕ por un flujo conocido (Figura 2.3).

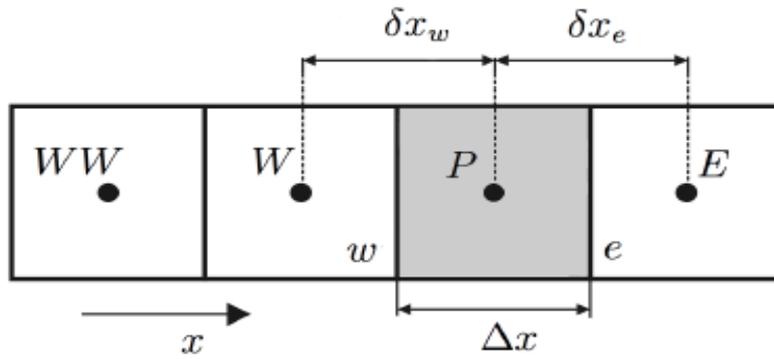


Figura 2.3 - Esquema de problema unidimensional con flujo en el sentido x

Si tomamos como partida la ecuación general de conservación (Ecuación 2.7) que se obtuvo en el apartado anterior, considerando por simplicidad flujo estacionario obtenemos la siguiente ecuación:

$$\nabla \bar{u} \rho \phi - \nabla(\Gamma \nabla \phi) = S_\phi \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Integrando la ecuación anterior en la celda P se obtiene:

$$\int_V (\nabla(\Gamma \nabla \phi) - \nabla(\rho \bar{u} \phi)) dV + \int_{v_p} S_\phi dV = 0 \quad \text{Ecuación 2.9}$$

Aplicando el teorema de Gauss de la divergencia se llega a:

$$\int_A (\Gamma \nabla \phi - \rho \bar{u} \phi) d\bar{A} + \int_{v_p} S_\phi dV = 0 \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Asumiendo un flujo unidimensional en la dirección x el gradiente queda definido como $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \bar{i}$ y el vector velocidad como $\bar{u} = u \bar{i}$. Además, según se observa en el volumen de control unidimensional de la Figura 2.3, los diferenciales de área serán $d\bar{A} = dA \bar{i}$, siendo dA positivo o negativo según el sentido del vector normal saliente del volumen de control coincida o no con el sentido del vector unitario. Por lo tanto:

$$\int_A \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} - \rho \bar{u} \phi \right) dA + \int_{v_p} S_\phi dV = 0 \quad \text{Ecuación 2.11}$$

La Ecuación 2.11 se discretiza suponiendo que el vector del flujo difusivo varía linealmente entre los valores de los centros de la celda que comparten la cara analizada. Para el flujo convectivo es necesario conocer además el valor de la variable en las caras, por lo que habrá que introducir en ellas un esquema de discretización adicional. Además, aceptando que el valor medio del término fuente

en el interior de la celda es S_\emptyset , para el volumen finito asociado al punto P de la Ecuación 2.11 se tiene:

$$\left(\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} - \rho u \phi \right) \bar{i} \bar{A} \right)_e + \left(\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} - \rho u \phi \right) \bar{i} \bar{A} \right)_w + S_\emptyset \Delta V_p = 0 \quad \text{Ecuación 2.12}$$

Puesto que las caras este (east, e) y oeste (west, w) son unitarias (flujo unidimensional), se tiene que $\bar{A}_e = \bar{i}$, $\bar{A}_w = -\bar{i}$. El volumen de la celda se toma como Δx , ya que $\Delta y \sim 1$. Consecuentemente:

$$\Gamma_e \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \rho_e u_e \phi_e - \Gamma_w \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w + \rho_w u_w \phi_w + S_\emptyset \Delta x = 0 \quad \text{Ecuación 2.13}$$

Aproximando el valor de la derivada en las caras por diferencias finitas entre centros de celdas contiguas, se tiene que:

$$\Gamma_e \left(\frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_e} \right) - \rho_e u_e \phi_e - \Gamma_w \left(\frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_w} \right) + \rho_w u_w \phi_w + S_\emptyset \Delta x = 0 \quad \text{Ecuación 2.14}$$

La variable ϕ está definida en los nodos de las celdas y no en las caras y es preciso definir su valor en las caras (ϕ_e , ϕ_w) en función de su valor en los nodos adyacentes. Hay diversas maneras de establecer esta relación, pero aquí se realizará la más elemental, que es aplicar una variación lineal de la variable ϕ entre nodos (diferencias centradas), que en caso de una malla equiespaciada establece que:

$$\phi_e = \frac{\phi_E + \phi_P}{2}, \quad \phi_w = \frac{\phi_W + \phi_P}{2} \quad \text{Ecuación 2.15}$$

Introduciendo esta definición en la Ecuación 2.14:

$$\Gamma_e \left(\frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_e} \right) - \rho_e u_e \frac{\phi_E + \phi_P}{2} - \Gamma_w \left(\frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_w} \right) + \rho_w u_w \frac{\phi_W + \phi_P}{2} + S_\emptyset \Delta x = 0 \quad \text{Ecuación 2.16}$$

Por último, reagrupando términos en función de las incógnitas y suponiendo que el termino fuente presenta una variación lineal $S_\emptyset = S_C + S_p \phi_p$. Con el objetivo de compactar la

$$\left(\frac{\rho_w u_w - \rho_e u_e}{2} + \frac{\Gamma_e}{\delta x_e} - \frac{\Gamma_w}{\delta x_w} + S_p \right) \phi_P - \left(\frac{\rho_e u_e}{2} - \frac{\Gamma_e}{\delta x_e} \right) \phi_E + \left(\frac{\rho_w u_w}{2} - \frac{\Gamma_w}{\delta x_w} \right) \phi_W + S_C \Delta x = 0 \quad \text{Ecuación 2.17}$$

En definitiva, tenemos que en la ecuación de conservación en la celda P aparece la incógnita ϕ en la propia celda (ϕ_P) multiplicada por un coeficiente que dependerá de las discretizaciones usadas y de las características concretas del problema, las incógnitas de las celdas vecinas (c.v.) multiplicadas también por coeficientes y un término independiente.

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + b \quad \text{Ecuación 2.18}$$

$$a_P \phi_P = \sum_{c.v.} a_{c.v.} \phi_{c.v.} + b \quad \text{Ecuación 2.19}$$

En los casos en dos y tres dimensiones se tendrán ecuaciones similares, pero con un mayor número de términos implicados.

El esquema de diferencias centradas, a pesar de ser de segundo orden, presenta el grave inconveniente de que es susceptible de presentar problemas de convergencia.

El problema del esquema de diferencias centradas proviene de la media aritmética entre valores de nodos adyacentes para interpolar al valor de la variable en la cara. Una forma ingeniosa de resolver el problema es utilizar un esquema de diferenciación aguas arriba (upwind) en el que el valor en la cara se sustituye directamente por el valor en el centroide más cercano aguas arriba:

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_P & \text{si } u_e \geq 0 \\ \phi_E & \text{si } u_e < 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 2.20}$$

En el esquema de discretización aguas arriba de primer orden (first-order upwind) el valor de la cara se sustituye directamente por el valor en el centroide más cercano (Figura 2.4). Cuando se requiere una precisión de primer orden, los valores en las caras de las celdas se determinan asumiendo que el valor en el centro de la celda representa un valor medio de la celda y se mantiene a través de toda la celda.

A pesar de que este esquema garantiza soluciones realistas, su precisión es únicamente de primer orden y se puede ver comprometida en determinados casos.

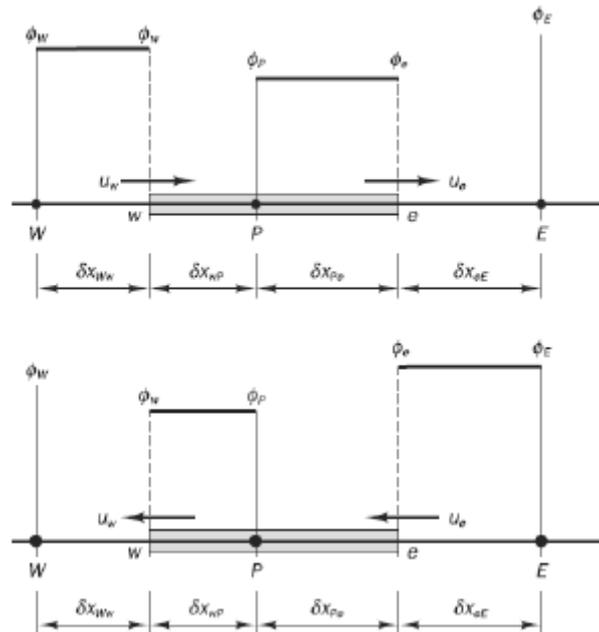


Figura 2.4 - Esquema de discretización Upwind

Para aumentar la precisión se puede utilizar un esquema aguas arriba de segundo orden (second-order upwind), en el que se extrapola el valor de la variable en la cara de la celda utilizando los valores de dos celdas aguas arriba.

Cuando se selecciona el esquema second order upwind, el valor en la cara ϕ_f se obtiene usando la siguiente expresión:

$$\phi_{f,SOU} = \phi + \nabla\phi \cdot \vec{r} \quad \text{Ecuación 2.21}$$

Donde ϕ y $\nabla\phi$ son los valores en el centro de la celda, y su gradiente aguas arriba de la celda, y \vec{r} es el desplazamiento del vector desde el centroide de la celda aguas arriba hasta la cara del centroide. Esta formulación requiere la determinación del gradiente $\nabla\phi$ en cada celda.

2.3.7 Algoritmo de resolución.

El objetivo de este apartado es presentar la estrategia que el software CFD utilizará para resolver los casos de estudio y obtener los campos de variables del flujo (presiones, velocidades, temperatura, etc.), dando lugar a distintos tipos de algoritmos de resolución (solver).

Como primera clasificación, un solver se puede clasificar según su enfoque (approach). El enfoque basado en presión (pressure-based approach) fue desarrollado para flujos a no muy alta velocidad incompresibles, mientras que el basado en densidad (density-based approach) es principalmente utilizado para flujos a alta velocidad compresibles.

En el método density-based la ecuación de continuidad es empleada para obtener el campo de densidades mientras que el campo de presiones es determinado con una ecuación de estado. Por otro lado, en el método pressure-based, el campo de presiones se extrae de resolver una ecuación de presión obtenida de manipular las ecuaciones de continuidad y momento de manera que el campo de velocidades, corregido por la presión, satisfaga la continuidad. En lo siguiente, se pondrá el foco sobre los métodos pressure-based, ya que el solver utilizado en las simulaciones pertenece a esta familia.

La presión aparece en las tres ecuaciones de momento. El campo de velocidades ha de satisfacer la ecuación de continuidad; luego, aunque no hay ecuación explícita para la presión se tienen cuatro ecuaciones para cuatro incógnitas.

El algoritmo de resolución más extendido y utilizado es el algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations). En él se utiliza una ecuación de corrección de la presión y en cada iteración el campo de presiones se actualiza aplicando la corrección obtenida para cada celda.

La idea fundamental es definir una ecuación discretizada para la presión a partir de la ecuación de continuidad discreta. Puesto que la ecuación de continuidad contiene valores de velocidad en las caras, se necesita alguna forma de relacionar estas velocidades con los valores de presión en los centroides de las celdas. El algoritmo SIMPLE utiliza las ecuaciones de momento discretas para hacer esa relación.

El principio detrás del algoritmo SIMPLE es sencillo. Se basa en la premisa de que el flujo fluye desde regiones con alta presión a regiones de baja presión. Se comienza con un campo de presiones supuesto y se comprueba cada celda. Si la continuidad no se satisface porque hay más flujo másico entrando a la celda que saliendo, es que la presión en esa celda comparada con las vecinas es demasiado baja. Por lo tanto, la presión en esa celda deba ser corregida al alza. Si, por el contrario, hay más flujo másico saliendo que entrando, la presión se corregirá a la baja.

Nótese que en el algoritmo SIMPLE se resuelven primero las ecuaciones de momento y luego la de corrección de la presión. En función de si se resuelven a la vez o no estas ecuaciones podemos tener algoritmos segregados o acoplados.

Un algoritmo segregado o desacoplado, como el SIMPLE, resuelve las ecuaciones de gobierno secuencialmente por separado, de ahí el nombre. Es un algoritmo eficiente en cuanto a memoria ya que no es necesario almacenar las ecuaciones linealizadas al mismo tiempo. Sin embargo, la convergencia requiere mayor número de iteraciones.

2.3.8 Precisión, consistencia, estabilidad y convergencia.

En este apartado se definen importantes conceptos relacionados con las simulaciones numéricas cuyo significado es necesario conocer para dar validez a una solución numérica.

El primer concepto que se introduce es la precisión, que es el acuerdo de la solución numérica con respecto a la solución exacta o real. Desgraciadamente, en la mayoría de las ocasiones no se conoce la solución exacta, por eso precisamente se recurre a técnicas numéricas.

Respecto a la consistencia, se dice que un método numérico es consistente si el error de truncamiento tiende a cero cuando la discretización se hace cada vez más y más fina, teniendo de nuevo al continuo. El sistema de ecuaciones algebraico generado por la discretización es consistente si dicho sistema es equivalente al sistema original en derivadas parciales en cada punto cuando el espaciado del mallado tiende a cero.

Por otro lado, la estabilidad es la propiedad que controla el proceso hacia la solución. El conjunto de ecuaciones es estable si los valores de las variables implicadas tienden hacia una solución correcta sin que los errores de cálculo en la solución

discreta deformen y distorsionen los resultados mientras se realiza el proceso numérico.

Por último, el concepto de convergencia es aquel que determina si los valores de las variables en los puntos del dominio tienden hacia unos valores fijos mientras la solución progresa.

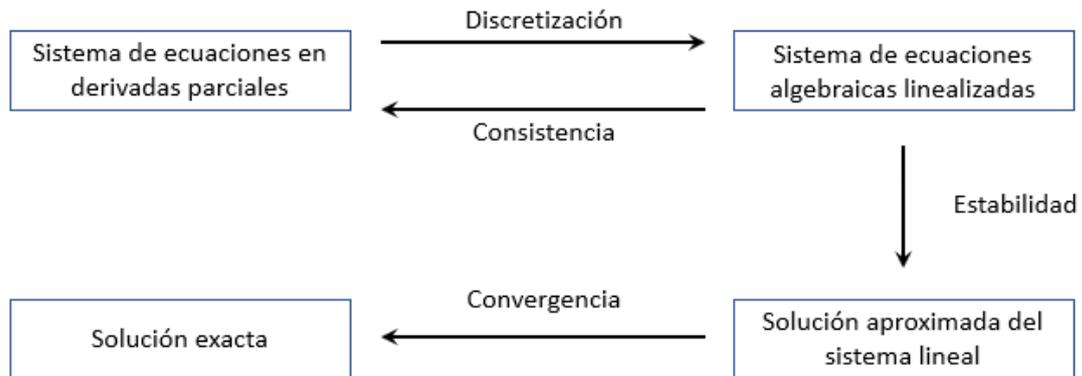


Figura 2.5 - Requisitos de la resolución numérica.

2.3.9 Turbulencia

El tratamiento de la turbulencia es un problema complejo al que se han dedicado innumerables investigaciones. Las primeras investigaciones fundamentales sobre el tema fueron desarrolladas por Kolmogorov.

La turbulencia puede ser caracterizada como el movimiento caótico del fluido. Un movimiento turbulento del fluido tiene lugar con la presencia de remolinos, mientras que cuando estos están ausentes el movimiento del fluido es laminar.

El surgimiento de la turbulencia está relacionado con la relación entre las fuerzas de inercia y las viscosas en el fluido. Cuando las fuerzas viscosas son pequeñas con relación a las inerciales, éstas no son capaces de amortiguar a las inerciales dando lugar a remolinos de gran y pequeña escala.

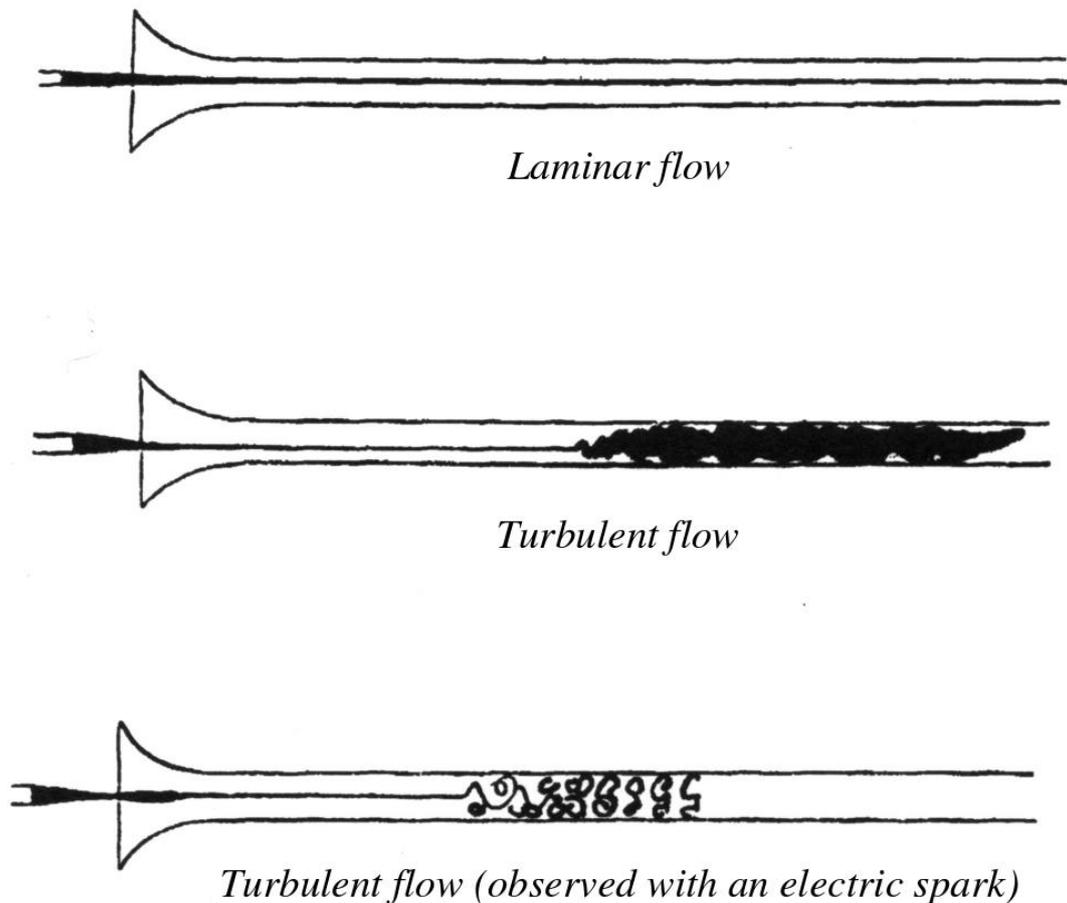


Figura 2.6 - Experimento de Reynolds

Esta característica del movimiento de los fluidos (laminares o turbulentos) fueron analizadas por Reynolds en su aplicación al movimiento de líquidos por tuberías [9]. De hecho, el número adimensional que lleva su nombre es un índice de la turbulencia del fluido y se obtiene como la relación entre las fuerzas inerciales y las viscosas:

$$Re \equiv \frac{F_{inerciales}}{F_{viscosas}} = \frac{|\rho \bar{u} \nabla \bar{u}|}{|\mu \nabla^2 \bar{u}|} = \frac{\rho u L}{\mu} \quad \text{Ecuación 2.22}$$

El número de Reynolds también puede interpretarse como la relación entre las máximas y las mínimas escalas longitudinales o tamaños de los remolinos, desde los más grandes a los más pequeño (Figura 2.7).

Las escalas de remolinos pueden variar desde las más grandes, en cuyo caso las ecuaciones de movimiento deben ser integradas en esa escala para capturar el comportamiento de los grandes remolinos, hasta la más pequeña, denominada escala de Kolmogorov [10].

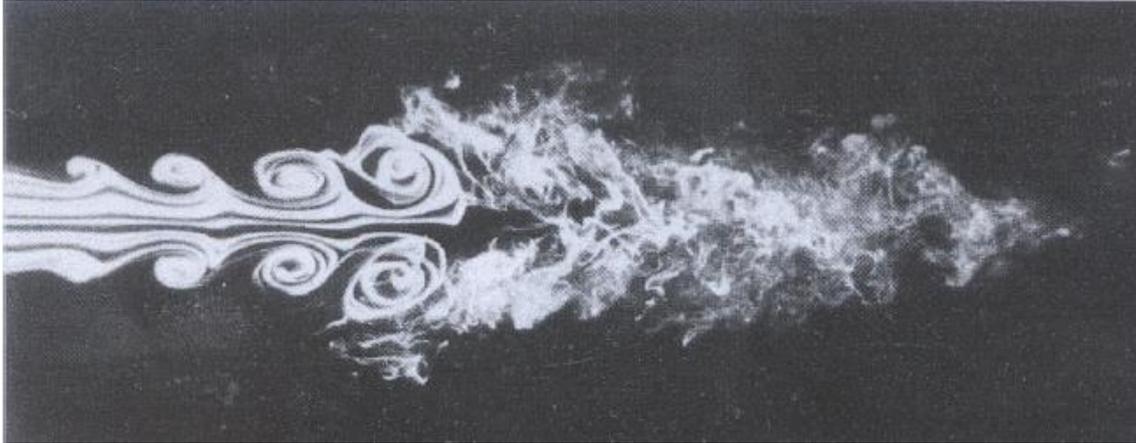


Figura 2.7 - Coexistencia de diferentes regímenes de un flujo.

El desarrollo del CFD trajo aparejada la necesidad de la representación computacional del proceso de la turbulencia y esto dio lugar a varios modelos computacionales de turbulencia, que se pueden agrupar en:

- Modelos promediados de Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS).
- Modelos de simulación de grandes remolinos (LES).
- Modelos de simulación numérica directa (DNS).

Los modelos RANS se basan en la promediación de las ecuaciones del flujo, para lo cual todas las magnitudes se sustituyen por la suma de su valor medio y una componente fluctuacional. Después de promediarlas se obtienen términos adicionales que requieren la adición de otras ecuaciones para cerrar el sistema.

El modelo LES se basa en un filtrado espacial de las ecuaciones de gobierno del fluido de tal manera que se resuelven computándose las grandes escalas, mientras que para escalas más pequeñas se asume un modelo que permite considerar de forma aproximada su influencia en la variación general de los parámetros del flujo.

El modelo DNS trata de resolver las ecuaciones de Navier-Stokes de una forma directa, sin emplear más valores promedios o aproximaciones que las discretizaciones numéricas. Por lo tanto, es el más completo en cuanto a exactitud de los resultados que ofrece. Sin embargo, es difícil de llevar a la práctica debido a su alto coste computacional.

Es un hecho que no todos los modelos de turbulencia son aplicables a todos los problemas. La elección del modelo de turbulencia dependerá de ciertas circunstancias, como el nivel de precisión buscado en la simulación, la capacidad computacional disponible, o la cantidad de tiempo disponible para la simulación, entre otras.

2.3.10 Capa límite en CFD

Los flujos turbulentos son afectados significativamente por la presencia de paredes. En el flujo cercano a una pared, los efectos de la viscosidad tienen gran influencia en una pequeña zona, muy próxima al contorno, denominada capa límite. A medida que nos aproximamos a la región más exterior de la zona de influencia de la pared, la turbulencia aumenta rápidamente debido a los grandes gradientes de velocidad que se producen.

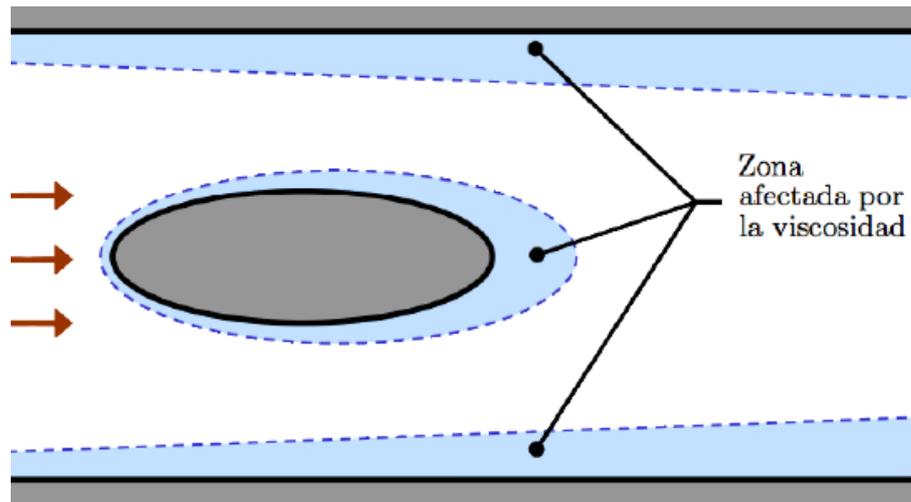


Figura 2.8 - Esquema de zonas de flujo susceptibles de ser afectadas por las paredes.

En las condiciones de flujo turbulento completamente desarrollado, esta capa límite se divide a su vez en cuatro regiones diferenciadas: la subcapa viscosa (viscous sublayer); la subcapa buffer; la subcapa logarítmica (log-law región); la región exterior (outer layer). Las tres primeras constituyen la región interior (inner layer) de la capa límite.

La capa más cercana a la pared es llamada subcapa viscosa, donde los efectos viscosos predominan sobre los inerciales, por lo que en ella subyace un comportamiento laminar. Se establece que la subcapa viscosa está delimitada por la condición $y^+ < 5$ y en ella se cumple la siguiente relación:

$$u^+ = y^+ \quad \text{Ecuación 2.23}$$

Donde y^+ es la distancia adimensional a la pared y viene dada por:

$$y^+ = \frac{\rho y u_\tau}{\mu} \quad \text{Ecuación 2.24}$$

Y u^+ es la velocidad adimensional, dada por:

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad \text{Ecuación 2.25}$$

En condiciones de flujo laminar no se produce transición a la turbulencia, por lo que únicamente se contempla esta capa.

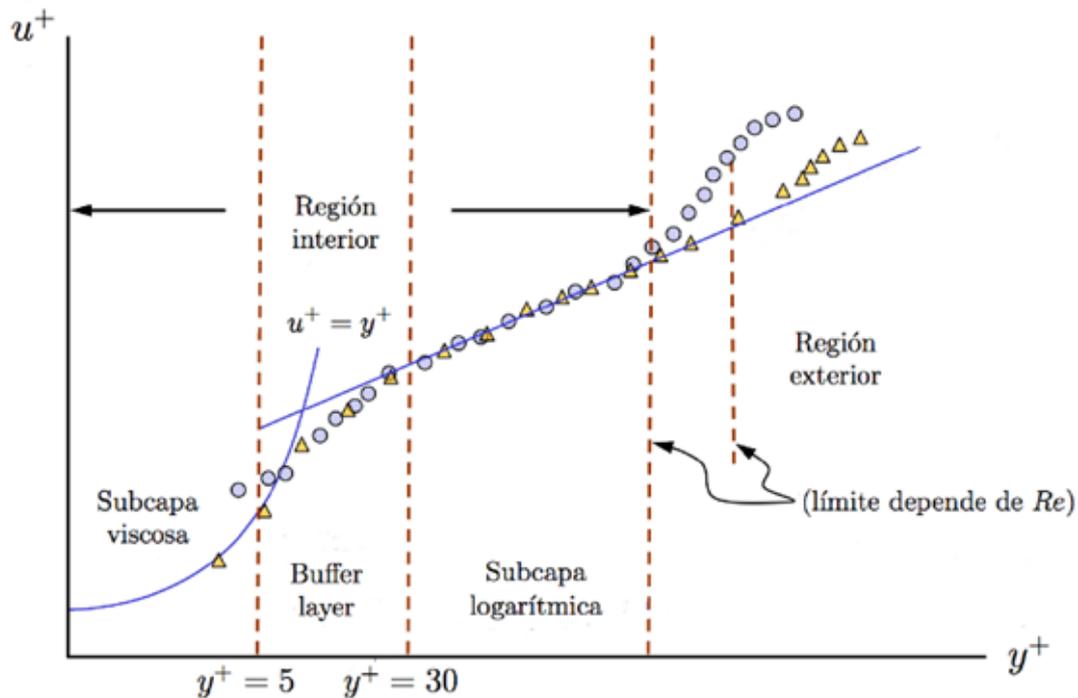


Figura 2.9 - Regiones de la capa límite.

Después existe una zona donde se produce una transición difusa de flujo laminar a turbulento, denominada buffer layer, comprendida en $5 < y^+ < 30$.

La siguiente zona es la subcapa logarítmica que se desarrolla de $30 < y^+ < 300$ (aunque este límite depende del número de Reynolds). Esta región es totalmente turbulenta, y en ella se cumple la ley que relaciona la velocidad media del flujo turbulento con el logaritmo de la distancia a la pared. En la siguiente ecuación, B es un factor que adquiere valores comprendidos entre 5,5 y 8,5.

$$u^+ = 2.5 \ln(y^+) + B \quad \text{Ecuación 2.26}$$

La capa externa comienza al final de la región logarítmica, que normalmente se corresponde con la zona comprendida entre el 20% y el final de la capa límite. Se dice que la capa límite termina cuando el valor de la velocidad alcanza el 99% del valor en la zona no viscosa. En esta región exterior dominan los efectos de inercia del flujo, quedando libre de los efectos viscosos de la pared.

En un flujo turbulento típico, si llamamos a la distancia desde la pared hasta el final de la subcapa de transición δ , entonces la distancia desde la pared al final de la región logarítmica sería del orden de 100δ . Es posible utilizar modelos de turbulencia para calcular el flujo en todas estas regiones, pero dado que las dos

primeras capas (viscosa y de transición) son muy finas, resultaría ventajoso utilizar una aproximación en esta región.

Se han desarrollado diversos modelos matemáticos para proporcionar condiciones de contorno para las celdas en las paredes de flujos turbulentos. De esta forma, se introducen condiciones para todas las ecuaciones de transporte a resolver.

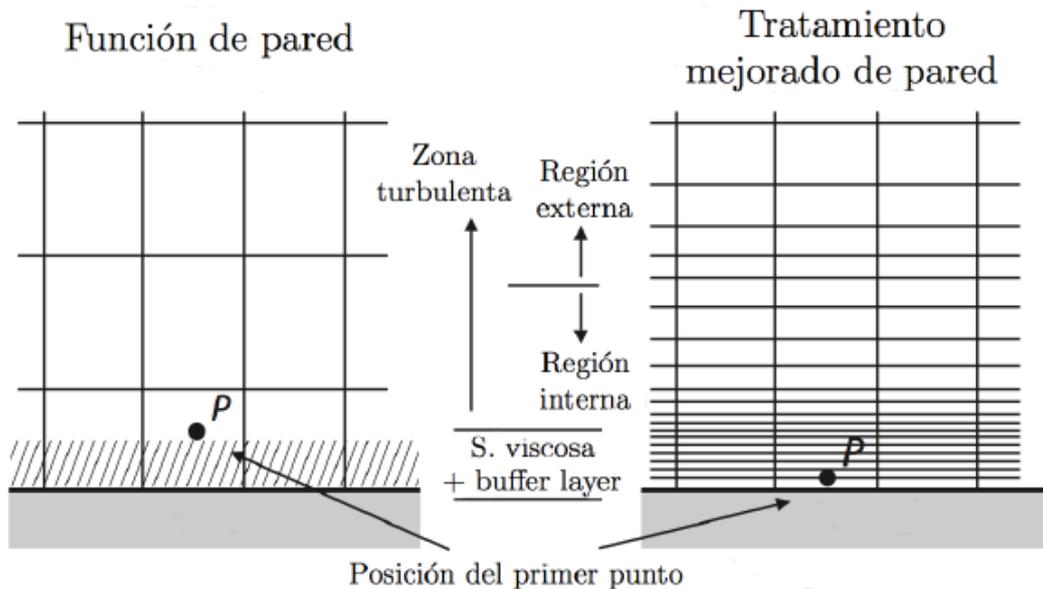


Figura 2.10 - Comparativa entre función de pared y tratamiento mejorado de pared

Genéricamente, se distinguen dos tipos de aproximación:

- Funciones de pared (Wall Functions, WF). Se basan en la ley logarítmica que se produce en la zona turbulenta de la región interna en la capa límite y que tiene validez en el rango $30 < y^+ < 300$. En este caso el mallado a emplear no es excesivamente exigente. Las funciones de pared ignoran las dos primeras regiones y utilizan una fórmula analítica para darle una velocidad distinta de cero al punto más próximo a la pared.
- Tratamiento mejorado de pared (Enhanced Wall Treatment, EWT). Resuelve la distribución de la velocidad en toda la capa interna. Para aplicar esta opción es imprescindible tener un mallado muy fino, del orden de $y^+ = 1$, lo cual exige al menos entre 10 o 15 celdas en la subcapa viscosa.

Capítulo 3 - Descripción del problema y resolución

En el presente capítulo se da una descripción detallada del dispositivo HTPsim30, y se presenta el problema objeto del estudio. En la segunda parte del capítulo se define el modelo geométrico y el modelado numérico empleados para el análisis del problema.

3.1 Descripción de la instalación y problema

Como se comentó en el capítulo 1, el dispositivo HTPsim30 se compone de dos dispositivos: por un lado, el HTsim30, encargado de la regulación de la temperatura y la humedad del aire; y el dispositivo Psim30, encargado de regular la presión del aire. A continuación, se detallan sendos dispositivos.

3.1.1 HTsim30

Este equipo es capaz de regular la humedad y la temperatura del aire de entrada al motor. Para ello dispone de los siguientes elementos principales (Figura 3.1):

- Aletas de entrada (1).
- Filtro G4 (2).
- Soplante: Mueve hasta 3000 m³/h (3).
- Batería de frío (4).
- Batería de calor (5).
- Humidificador (6).

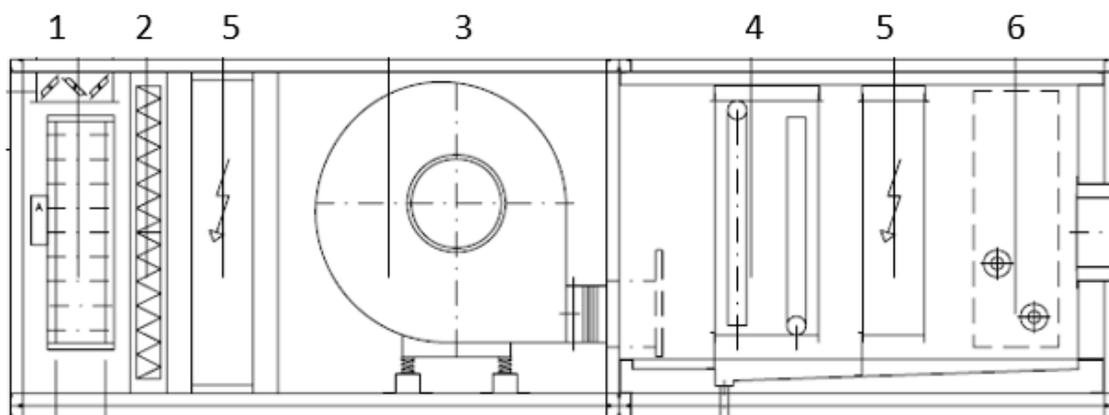


Figura 3.1 - Esquema HTsim30

Además, dispone de un circuito de agua de chiller capaz de conectarse a dos entradas diferentes de agua de chiller, con diferentes temperaturas, para regular la temperatura de la batería de frío.

Para el control del agua de chiller, el circuito dispone de dos válvulas neumáticas para elegir entre las dos líneas de agua de chiller. Este circuito se compone de una

servoválvula, una bomba y un transmisor de temperatura. La servoválvula regula la cantidad de agua de chiller que la bomba pone en circulación. De este modo controla la temperatura del aire que circula a través de la batería de frío.

El HTsim30 puede abastecerse con aire seco proveniente de un secador externo al HTsim30 o con aire proveniente del piso técnico. La selección del aire de entrada se efectúa mediante el accionamiento de las aletas de entrada. Dependiendo del modo de operación seleccionado por el operario, se elegirá aire del secador o del piso técnico.

- Rango de operación extendido -10 °C: Aire proveniente del secador.
- Rango de operación standard: Aire proveniente del piso técnico.

Para regular el flujo de aire se regula el punto de funcionamiento de la soplante mediante un controlador de frecuencia. Un transmisor de presión diferencial monitoriza la dP de la soplante, esto permite controlar el flujo de aire. El control se basará en mantener el flujo constante: 3000 m³/h para el rango de operación standard y 1000 m³/h para el rango de operación extendido.

La regulación de la temperatura se lleva a cabo por medio de un control en cascada. Se introduce un punto de funcionamiento en el HTsim30. El PID principal compara el punto fijado con el valor del sensor de temperatura colocado a la salida del HTsim30 y minimiza el error con las siguientes acciones:

- Si hay que aumentar la temperatura, se actúa sobre el PID secundario correspondiente a la batería de calor. Éste controla la temperatura de la batería de calor recibiendo el valor del sensor instalado sobre la superficie de la batería.
- Si, por el contrario, hay que disminuir la temperatura, se actúa sobre el PID secundario correspondiente a la batería de frío. Éste regula la temperatura del agua de chiller actuando sobre la servo-válvula y recibiendo el valor del transmisor de temperatura instalado en el circuito de agua de chiller.

La regulación de la humedad se lleva a cabo por medio de un control en cascada. Se introduce un punto de funcionamiento en el HTsim30. El PID principal compara el punto fijado con el valor del sensor de humedad colocado a la salida del HTsim30 y minimiza el error con las siguientes acciones:

- Si hay que aumentar la humedad, se actúa sobre el humidificador.
- Si, por el contrario, hay que reducir la humedad, el PID secundario controla la temperatura del agua de chiller actuando sobre la servo-válvula y recibiendo el valor del transmisor de temperatura instalado en el circuito.

Rango de funcionamiento standard:

Los límites azules de la Figura 3.2 indican los límites críticos para el dimensionado de elementos. No se trabaja en estos rangos ya que fuerzan la capacidad máxima de

la máquina y pueden presentar fluctuaciones en el control dependiendo de las condiciones del entorno, la temperatura del agua de chiller y otros factores. Los límites naranjas indican los límites recomendados de regulación. Este área debe ser considerada como el rango nominal de regulación bajo las siguientes condiciones exteriores:

- Invierno: 5 °C 60% HR
- Verano: 27 °C 70% HR

Agua de chiller suministrada a 2 °C máx.

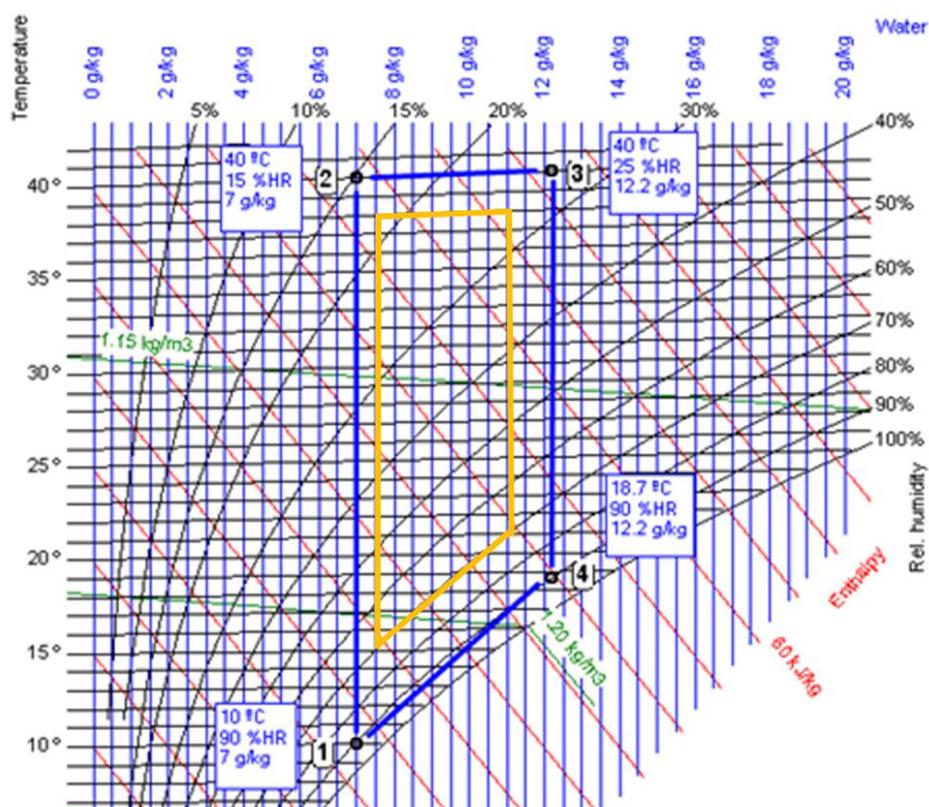


Figura 3.2 - Rango de funcionamiento standard

Rango de funcionamiento extendido:

Los límites rojos de la Figura 3.3 indican los límites críticos para el dimensionado de elementos. El rango de funcionamiento extendido no se ha diseñado para regular en este área, sino para llegar a un punto de regulación de -10 °C. Fuera del rango de operación standard, se conecta el secador de aire y suministra aire seco a la entrada del HTsim30 sin regulación de humedad.

El punto verde indica el punto de regulación extendida bajo las siguientes condiciones: -10 °C, aire seco, sin regulación de humedad, con unas condiciones en

el exterior de 5 °C, 60% HR en invierno y 27 °C, 70% HR en verano. Y agua de chiller suministrada a -20 °C.

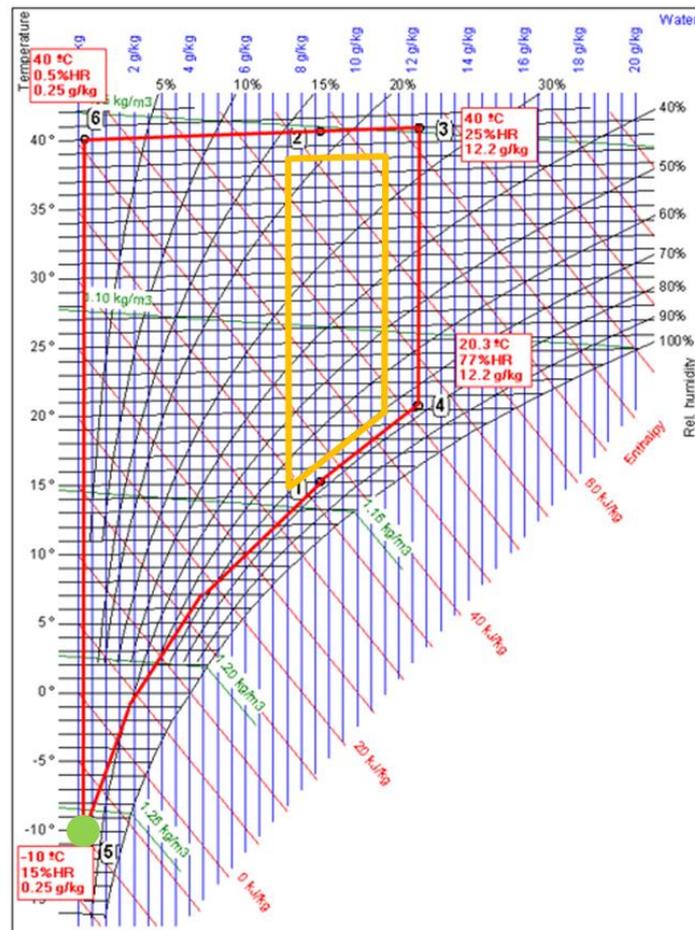


Figura 3.3 - Rango de funcionamiento extendido

3.1.2 Psim30

Este equipo es el encargado de regular la presión de entrada al motor, está conectado a la unidad HTsim30, la cual suministra aire presurizado a este equipo, y se compone de dos módulos: módulo de aire fresco y módulo de escape.

El módulo de aire fresco dispone de sensores de control de temperatura y humedad (señales que se mandan al HTsim30) y sensores de presión para la regulación de ésta. Este módulo también está equipado con un sensor de temperatura para controlar la recirculación del escape. Además, dispone de una válvula para la regulación de la depresión, así como una válvula reguladora de vacío.

El módulo de escape dispone de sensores para el control de la temperatura del escape y está equipado con una válvula de regulación de sobrepresión y válvulas de selección de modo.

El sistema usa 2 soplantes para regular la presión: la soplante de sobrepresión se encuentra en el HTsim30, mientras que la de depresión está en el módulo de escape del Psim30.

El equipo se sirve de dos válvulas para controlar la presión, una válvula de sobrepresión en el módulo de aire fresco y otra de depresión en el módulo de escape.

Igualmente, el modo de escape se selecciona mediante dos válvulas. Sendas válvulas están instaladas en el módulo de escape del Psim30.

- La válvula de selección de depresión: conecta el sistema a la soplante de depresión.
- La válvula de selección del sistema de escape principal: conecta el sistema al sistema de extracción de la celda de ensayo.

Esta unidad dispone de 4 modos de operación

- Marcha en vacío
- Estacionario
- Dinámico
- Atmosférico

Modo de marcha en vacío +/-P

En este modo, el sistema Psim30 puede regularse para alcanzar presiones manométricas negativas y positivas en la admisión y en la extracción, pero solo cuando el motor está en marcha en vacío. Esto se debe a que la soplante de extracción está conectada a la extracción del motor y las altas temperaturas podrían ser peligrosas para su integridad. Este modo se podría usar en pruebas de arranque.

Modo de operación estacionario +/- P

En este modo de operación el Psim30 puede regular presiones manométricas positivas y negativas en la admisión. En este modo el motor puede estar a diferentes cargas y rpm. La regulación no está garantizada durante el transitorio del motor, pero sí después de un tiempo de estabilización.

Modo de operación dinámico +P

En este modo el sistema Psim30 puede regular una sobrepresión en la admisión y el escape con la ventaja de ser un modo altamente dinámico. Puede ajustar la presión durante el transitorio entre fases del motor antes de que se estabilice.

Como el escape del motor está directamente conectado al sistema mientras el motor está funcionando, se pueden aplicar limitaciones de potencia para evitar altas temperaturas en el sistema.

Modo atmosférico

Cuando no se necesita regular la presión, es posible desconectar el motor del sistema Psim30 y simplemente dirigir el aire hacia el motor regulando la temperatura y la humedad de este, pero sin una conexión hermética.

3.1.3 Descripción del problema

Desde su creación, sendos dispositivos han sufrido varias modificaciones, en su mayoría por exigencias del piso técnico, aunque otras con la intención de mejorar las características técnicas del dispositivo. Por ejemplo, en la segunda versión se modificó la disposición de la soplante, quedando como se muestra en la Figura 3.1, ya que antes el aire se inyectaba por la zona superior. Este cambio en la disposición de la soplante permitió bajar el centro de gravedad de la soplante, reduciendo considerablemente las vibraciones generadas por ésta.

En la segunda versión del dispositivo HTPsim30, como ya se anticipó en el primer capítulo de esta memoria, se realizaron una serie de medidas para conocer las condiciones del aire en el dispositivo Psim30. Se seleccionaron 2 puntos para realizar estas medidas, TT1 y TT2 (Figura 3.4).

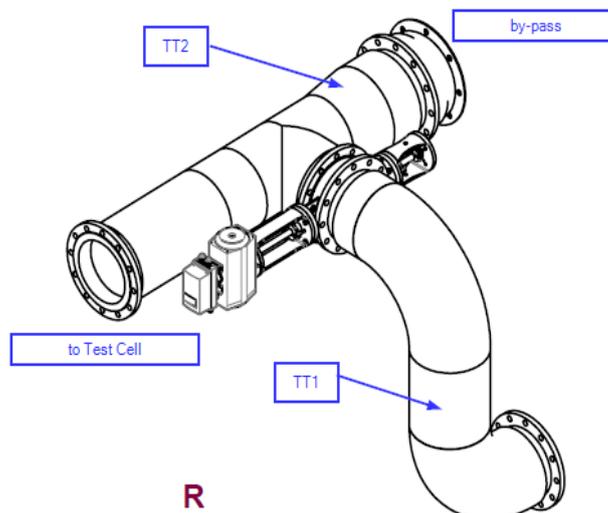


Figura 3.4 - Psim30. Módulo de aire fresco.

Los resultados de estas medidas se pueden ver en las siguientes tablas:

| Válvula de sala abierta | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Válvula de depresión abierta | | | | | | | | | | | |
| Medida de temperatura en el by-pass - TT2 | | | | | | | | | | | |
| punto medida | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| profundidad (cm) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 |
| T (°C) | 23,2 | 23,1 | 23,1 | 23,1 | 23,0 | 23,0 | 23,0 | 23,0 | 23,0 | 23,0 | 22,9 |
| H (%HR) | 23,9 | 23,7 | 23,9 | 23,9 | 24,0 | 23,9 | 24,0 | 23,9 | 24,0 | 24,0 | 24,0 |

Tabla 3.1 - Medida TT2 con válvula de sala abierto y válvula de depresión abierto

| Válvula de sala abierta | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Válvula de depresión abierta | | | | | | | | | | | |
| Medida temperatura impulsión - TT1 | | | | | | | | | | | |
| punto medida | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| profundidad (cm) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 |
| T (°C) | 18,2 | 18,2 | 18,2 | 18,8 | 19,2 | 20,0 | 21,5 | 22,7 | 23,4 | 24,5 | 25,3 |
| H (%HR) | 33,0 | 33,0 | 33,0 | 31,0 | 29,6 | 28,0 | 25,2 | 23,5 | 22,5 | 21,2 | 20,1 |

Tabla 3.2 - Medida TT1 con válvula de sala abierto y válvula de depresión abierto

| Válvula de sala cerrada | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Válvula de depresión abierta | | | | | | | | | | | |
| Medida de temperatura en el by-pass - TT2 | | | | | | | | | | | |
| punto medida | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| profundidad (cm) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 |
| T (°C) | 25,4 | 25,5 | 25,4 | 25,3 | 25,4 | 25,5 | 25,7 | 25,6 | 25,5 | 25,4 | 25,2 |
| H (%HR) | 20,9 | 20,7 | 20,7 | 20,8 | 20,8 | 20,7 | 20,4 | 20,4 | 20,5 | 20,7 | 20,9 |

Tabla 3.3 - Medida TT2 con válvula de sala cerrado y válvula de depresión abierto

| Válvula de sala cerrada | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Válvula de depresión 50% | | | | | | | | | | | |
| Medida de temperatura en el by-pass - TT2 | | | | | | | | | | | |
| punto medida | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| profundidad (cm) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 |
| T (°C) | 27,7 | 27,9 | 28,1 | 28,3 | 28,4 | 28,4 | 28,5 | 28,5 | 28,6 | 28,6 | 28,6 |
| H (%HR) | 18,4 | 18,2 | 18 | 17,8 | 17,7 | 17,7 | 17,6 | 17,6 | 17,6 | 17,6 | 17,6 |

Tabla 3.4 - Medida TT2 con válvula de sala cerrado y válvula de depresión al 50%

En la Figura 3.5 se puede ver como las mediciones tomadas en TT2 son bastante uniformes (en las 3 disposiciones diferentes que se midieron), mientras que las mediciones tomadas en TT1 muestran una clara estratificación a lo largo de la sección, de en torno a 7 grados de diferencia entre los distintos puntos de la sección. Tras estas mediciones, el punto TT2 se confirmó como un punto de medida válido para el proceso, mientras que el TT1 no se podía usar como punto de medida.

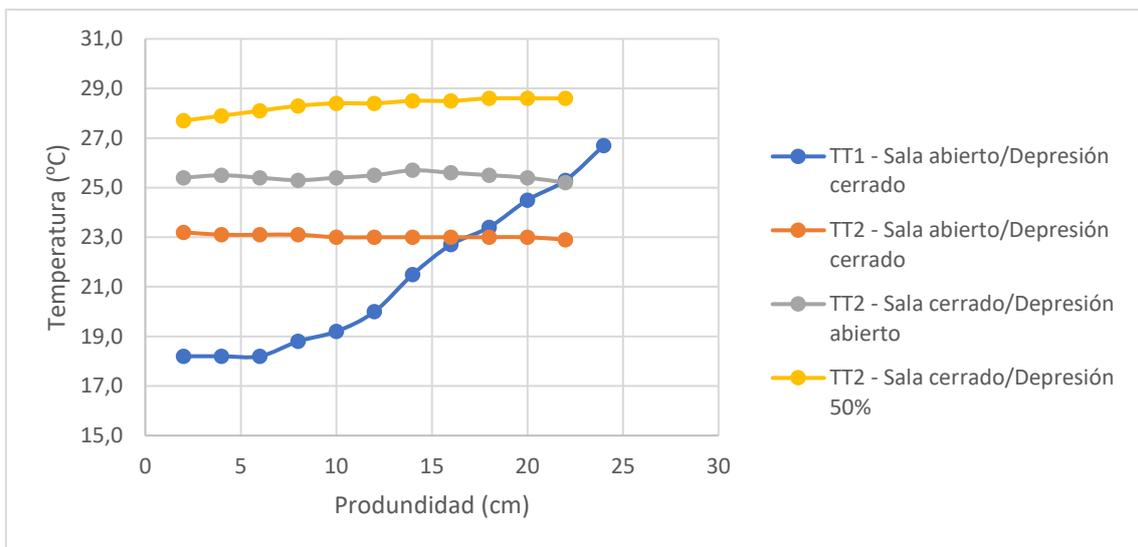


Figura 3.5 - Resumen mediciones

En el presente trabajo se quiere comprobar si existe cierta independencia entre los perfiles de velocidad y temperatura de entrada al dispositivo HTsim30, y el comportamiento del aire dentro del dispositivo Psim30, de modo que se puedan seleccionar unos puntos de medida que no se vean afectados por las condiciones de entrada del HTPsim30. Para ello se van a estudiar dos casos, ambos con perfiles triangulares de velocidad y temperatura, simulando las dos disposiciones de la soplante que se han configurado en las versiones anteriores.

- Para la primera simulación, los perfiles de velocidad y temperatura serán como se muestra en la Figura 3.6. El perfil de velocidades simula la disposición actual de la soplante, mientras que el de temperaturas es una consecuencia del de velocidades, ya que al tener la parte superior del flujo

menos velocidad su tiempo de residencia a través de la batería de calor es mayor, de la misma forma, la parte inferior del flujo, al tener mayor velocidad tiene un menor tiempo de residencia a través de la batería de calor.

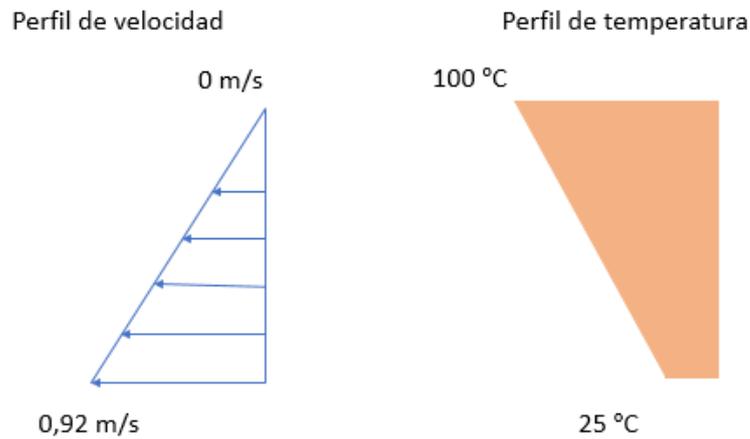


Figura 3.6 - Perfil de velocidad y temperatura simulación 1

- Para la segunda simulación, los perfiles de velocidad y temperatura serán como se muestra en la Figura 3.7. Este caso es el contrario a la primera simulación, el perfil de velocidad simula la disposición inicial de la soplante, y el de temperaturas es consecuencia de éste.

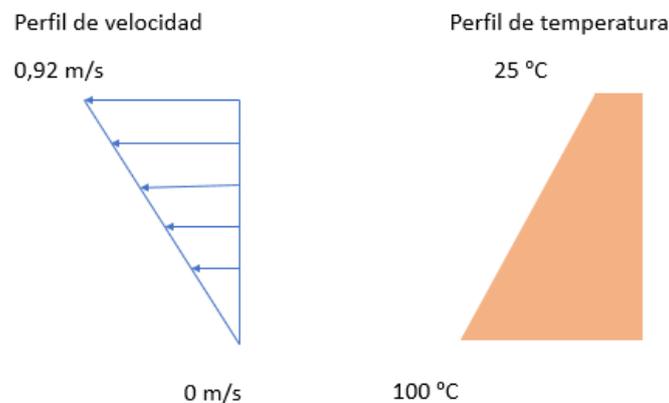


Figura 3.7 - Perfil de velocidad y temperatura simulación 2

3.2 Modelado de la geometría

3.2.1 Programa

Para la creación del modelo se han usado dos softwares: CATIA V5 y ICEM CFD. CATIA es un programa informático de diseño, fabricación e ingeniería asistida por ordenador (CAD), se ha usado este programa para el modelado de la geometría. Mientras que ICEM CFD es un programa creado para servir como enlace entre la

geometría del modelo y el análisis de éste, es por tanto un programa diseñado para generar el mallado de la geometría a partir del modelo geométrico ya creado con CATIA V5.

3.2.2 Modelo físico

Debido al alto coste computacional que supondría la simulación de un modelo geométrico que representase la geometría interna exacta del HTPsim30, se ha optado por realizar una simplificación de ésta (Figura 3.8).

Las simplificaciones introducidas consisten, por una parte, en el HTsim30, del que se han omitido las baterías de frío y calor, así como el humidificador, quedando únicamente la parte final del dispositivo. Se ha decidido realizar esta simplificación debido a que el objetivo del presente trabajo es analizar la independencia de las condiciones de entrada al dispositivo, por este motivo analizar cómo afectan estos elementos al flujo de aire carecería de sentido, además de suponer un altísimo coste computacional.

Por otro lado, el dispositivo Psim30 se ha simplificado eliminando la válvula de control existente en el conducto principal. Puesto que se va a estudiar únicamente el caso de que esté totalmente abierta.

Debido a estas simplificaciones sabemos que los resultados no serán exactos, aunque sí serán una buena aproximación cualitativa. Este hecho no riñe con los objetivos del trabajo, puesto que lo que se busca en este estudio es un análisis cualitativo, más que cuantitativo.

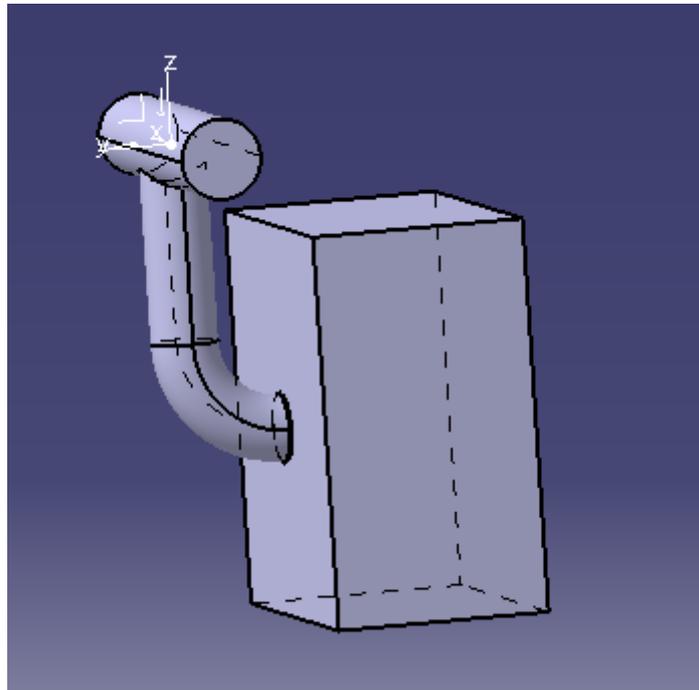


Figura 3.8 - Modelo 3D del dispositivo HTPsim30 simplificado

3.2.3 Mallado y estrategia

Para este modelo se ha utilizado una estrategia de mallado multibloque, la cual genera una malla hexaédrica pura. Se ha elegido este tipo de mallado debido a que, según se detalla en el capítulo 2, proporciona mejores prestaciones en términos de precisión, tiempo de cálculo y consumo de memoria computacional. Además, con esta estrategia se tiene un mayor control del modelado de la capa límite.

Por otro lado, esta estrategia también aporta ciertos inconvenientes:

- El procedimiento de creación de la malla es totalmente manual.
- Imposibilidad de refinar la malla localmente (malla hexaédrica pura sin nodos colgantes)

No obstante, estos inconvenientes se ven compensados debido a que la mayor facilidad de convergencia de este tipo de mallado unido al menor número de celdas necesarias hacen que se ahorre en tiempo de simulación.

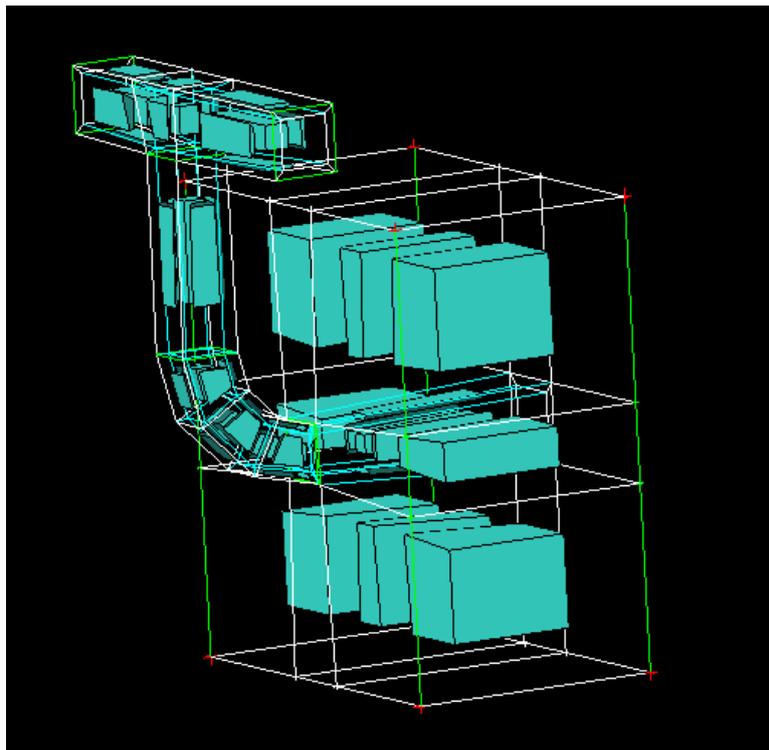


Figura 3.9 - Topología de bloques

Una vez definida la topología, se ajustan los parámetros de cada bloque hasta conseguir la malla deseada.

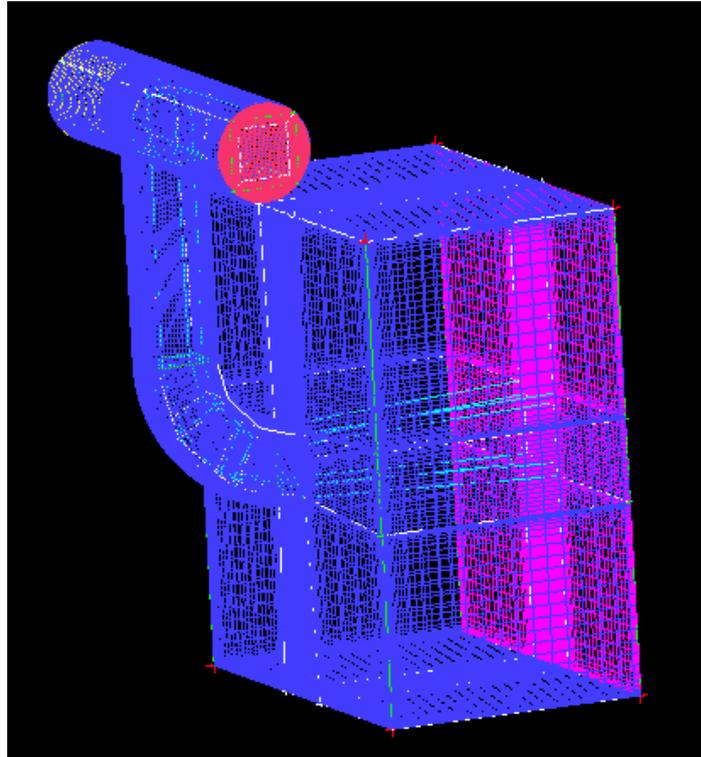


Figura 3.10 - Mallado geometría

La capa límite se ha modelado con un ratio de crecimiento de 1,2 y una altura de la primera celda de 2 mm. De esta manera se evitan y^+ mayores a 200 en la superficie del dispositivo Psim30. Y nos aseguramos de que estamos en el rango de trabajo del modelo de turbulencia.

En cuanto al número de celdas, se han utilizado aproximadamente 7×10^5 celdas en la simulación.

3.3 Modelado numérico

3.3.1 Programa

Para el estudio del modelo físico se ha utilizado el software ANSYS Fluent. ANSYS Fluent es un software de CFD usado para modelar flujos, turbulencias, transmisiones de calor...

3.3.2 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno que se han impuesto han sido las siguientes:

Entrada de aire al dominio: Se ha seleccionado la opción Velocity inlet, con el perfil de velocidades y de temperaturas que corresponda a cada simulación. Además, como Ansys no permite configurar directamente un perfil triangular de velocidades,

ni de temperaturas, se ha desarrollado unos UDFs (User Define Function) para configurar estos perfiles.

A continuación, se expone, a modo de ejemplo, el UDF para la velocidad para la primera simulación:

```
#include "udf.h"
DEFINE_PROFILE(inlet_y_velocity, thread, position)
/* Definición constantes de la ecuación que define nuestra superficie */
#define H 1.42 /*Altura de la superficie*/
#define V 0.46209 /*Velocidad media*/
{
    real x[ND_ND];
    face_t f;
    begin_f_loop(f,thread)
    {
        F_CENTROID(x, f, thread);
        F_PROFILE(f, thread, position) = 2 * V * (H-x[2])/H;
    }
    end_f_loop(f, thread)
}
```

Salida de aire del dominio: Para ambas salidas se ha utilizado la opción pressure-outlet con una presión manométrica de 0 Pa. Simulando el modo atmosférico del dispositivo Psim30.

3.3.3 Selección del modelo de turbulencia

Como ya se comentó en el capítulo de teoría, existen dos modos de estudiar la capa límite en CFD, mediante funciones de pared y mediante el tratamiento mejorado de pared. Este último exige tener $y^+ \approx 1$, tal sería el caso del modelo de turbulencia RANS $k-\omega$, lo cual supondría un mallado muy exigente.

A diferencia del modelo de turbulencia $K-\omega$, el $K-\epsilon$ resuelve la capa límite mediante funciones de pared, y por lo tanto no necesita un mallado tan exigente.

El modelo de turbulencia elegido para las simulaciones será $K-\epsilon$ Realizable, por tener mejor definición de chorros circulares, así como mejor predicción de zonas de desprendimiento y recirculación que el modelo standard $K-\epsilon$.

3.3.4 Controles de solución

Al estar trabajando con números de Mach menores a 0,3 se puede asumir que el flujo se comporta como incompresible, por tanto, se puede utilizar una aproximación pressure-based para resolver las ecuaciones de flujo.

Hay dos tipos de algoritmos pressure-based disponibles en ANSYS FLUENT, uno segregado y otro acoplado.

El segregado, o desacoplado, resuelve las ecuaciones de gobierno secuencialmente por separado, de ahí el nombre. Es un algoritmo eficiente en cuanto a memoria ya que no es necesario almacenar todas las ecuaciones al mismo tiempo. Sin embargo, la convergencia requiere mayor número de iteraciones.

En contraste con el segregado, el algoritmo acoplado resuelve el sistema acoplado de ecuaciones que comprende las ecuaciones de momento y la de presión. Las demás ecuaciones (energía, turbulencia...) se resuelven de manera desacoplada. Ya que las ecuaciones de momento y presión se resuelven de manera conjunta, la convergencia mejora significativamente comparado con el segregado, aunque los requerimientos de memoria se incrementan de 1,5 a 2 veces, ya que todo el sistema de ecuaciones discretas ha de ser almacenado en la resolución de los campos de velocidad y presión.

Se ha utilizado el algoritmo de resolución SIMPLE (pressure-based segregado). Este algoritmo ha sido muy utilizado en la literatura, y sigue siendo hoy día una de las elecciones más habituales en la resolución de simulaciones de carácter industrial.

En cuanto al esquema de discretización empleado, se ha utilizado el Second Order Upwind. Aunque al principio las simulaciones han sido realizadas con un esquema upwind de primer orden, para evitar la divergencia, y una vez estabilizada la solución se ha introducido el esquema Second Order Upwind. Con la misma intención el factor de subrelajación de la ecuación del momento ha sido reducido al principio, y a medida que las soluciones se estabilizaban se ha aumentado al valor por defecto. Se ha operado del mismo modo con la ecuación de la energía, que no se ha introducido hasta tener una solución estable de las ecuaciones de momento y presión.

3.3.5 Estudio de independencia de malla

El objetivo de esta etapa es asegurarse de que los resultados obtenidos son independientes de la resolución del mallado. Muy pocas celdas pueden llevar a una solución errónea, mientras que demasiadas pueden suponer el gasto innecesario de recursos.

El primer paso es decidir un primer número de celdas a utilizar. El orden de magnitud para alcanzar la independencia de los resultados con la malla es:

- 10^4 elementos para problemas relativamente pequeños, como flujos en el interior de equipos o en conductos de no gran tamaño.

- 10^5 para casos de tamaño intermedio como cámaras o habitaciones pequeñas.
- 10^6 para problemas con espacios de tamaño grande o con objetivos que requieren elevado detalle.
- 10^7 elementos para análisis aplicados a la automoción, aeroespaciales y estudios típicos de departamentos de defensa.

El mallado del dispositivo HTPsim30 deberá estar entre 10^4 y 10^5 elementos. La primera simulación se ha realizado con un mallado de 4×10^5 elementos. Una vez realizada la simulación y alcanzada la convergencia, se ha refinado la malla, aumentando la precisión del dispositivo Psim30.

La nueva malla tiene 7×10^5 elementos. Aunque sí ha habido una variación en los resultados entre la nueva malla y la malla original, se ha decidido no aumentar más el número de elementos debido a la potencia de cálculo que ofrece la máquina utilizada. Por lo que se tomarán los resultados obtenidos con la malla de 7×10^5 elementos.

Capítulo 4 - Análisis de resultados

En este capítulo se van a analizar los resultados numéricos obtenidos para determinar la independencia entre los perfiles de velocidad y temperatura a la entrada del dispositivo HTsim30 y el comportamiento del aire dentro del dispositivo Psim30.

Para ello se han tomado 8 secciones de referencia dentro del dispositivo Psim30. Tres en cada salida del dispositivo Psim30 y 2 en el conducto central, como se puede observar en la Figura 4.1. Posteriormente se analizan los resultados obtenidos.

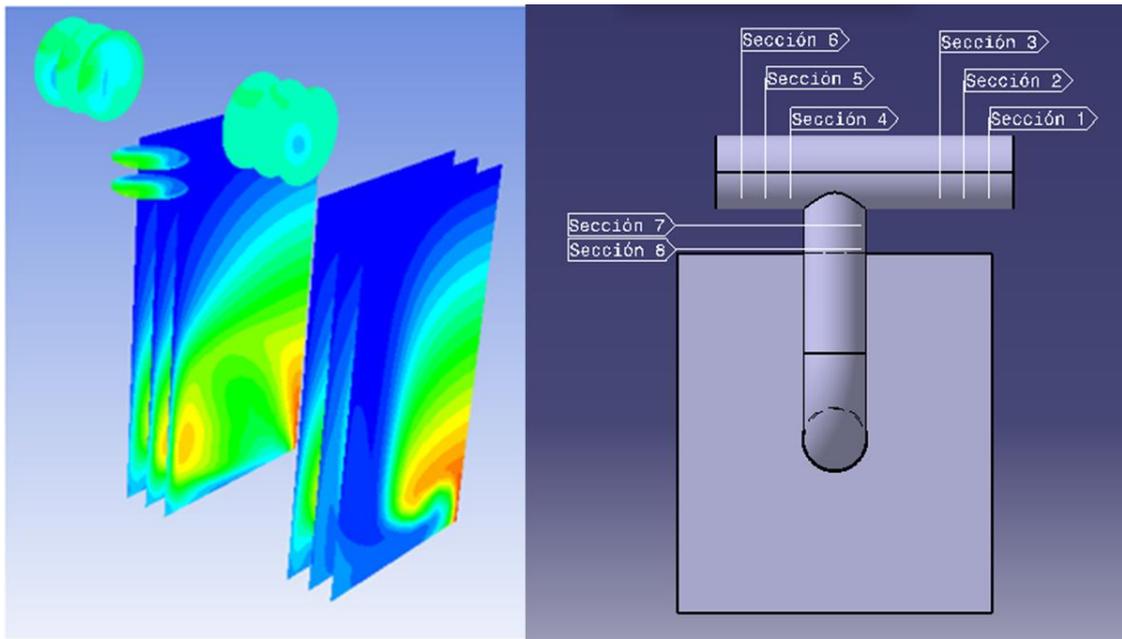


Figura 4.1 - Secciones de estudio

Se presentarán los resultados de la siguiente forma:

1. Flujo a través del dispositivo HTSim30.
2. Flujo a través del dispositivo PSim30.
3. Perfiles y distribución de T^a .

4.1.1 Flujo en HTsim30

En este apartado se muestra el valor de las propiedades del aire (velocidad y temperatura) mediante el color que adquieren las líneas de corriente, como se puede ver en la Figura 4.2.

Se puede observar como en la simulación 1 (Figura 4.2), con unos perfiles de velocidad y temperatura en la entrada del dispositivo HTsim30 acorde a la Figura 3.6, el flujo se desarrolla de tal forma que las líneas de corriente inferiores describen una trayectoria más directa hacia el dispositivo Psim30. Este hecho provoca que el

aire de la parte inferior, con menor temperatura que el resto, no se mezcle apenas antes de llegar al dispositivo Psim30. Por otro lado, el aire de la parte superior sí que se mezcla con el aire de la porción intermedia de modo que se equilibran las temperaturas de estas dos zonas.

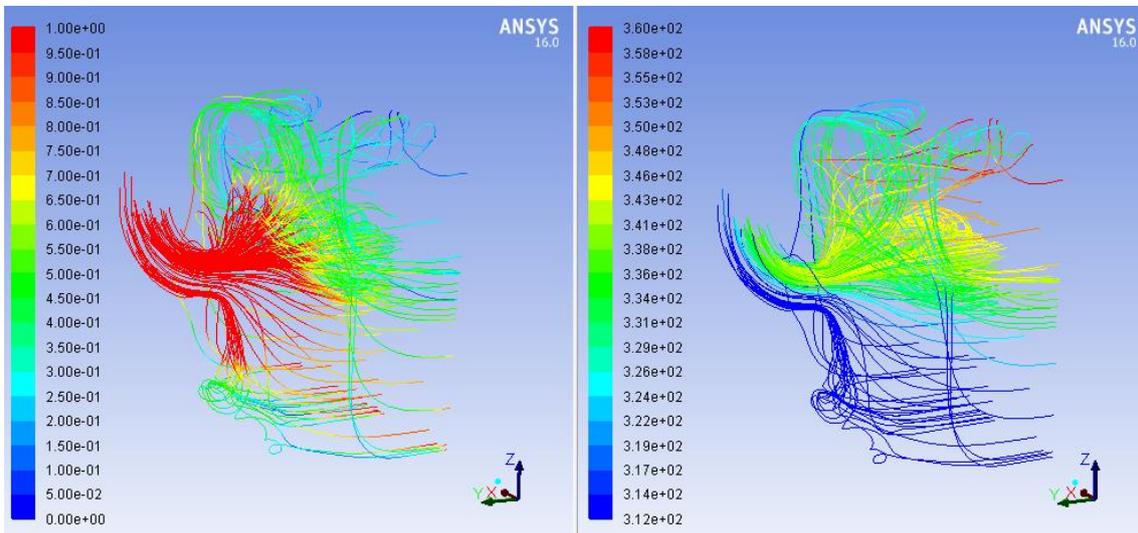


Figura 4.2 - Líneas de corriente de velocidad (izquierda) y de temperatura (derecha) simulación 1.

Por su parte, en la simulación 2, con un perfil de velocidades y temperatura acorde a la Figura 3.7, tenemos el caso opuesto, se puede observar como las líneas de corriente superiores van directamente hacia el dispositivo Psim30, sin apenas mezclarse con el resto, y, por tanto, manteniendo su temperatura inicial. Mientras que, en la zona inferior, debido a la trayectoria que describen las líneas de corriente, sí que se realiza esta mezcla de temperaturas (Figura 4.3).

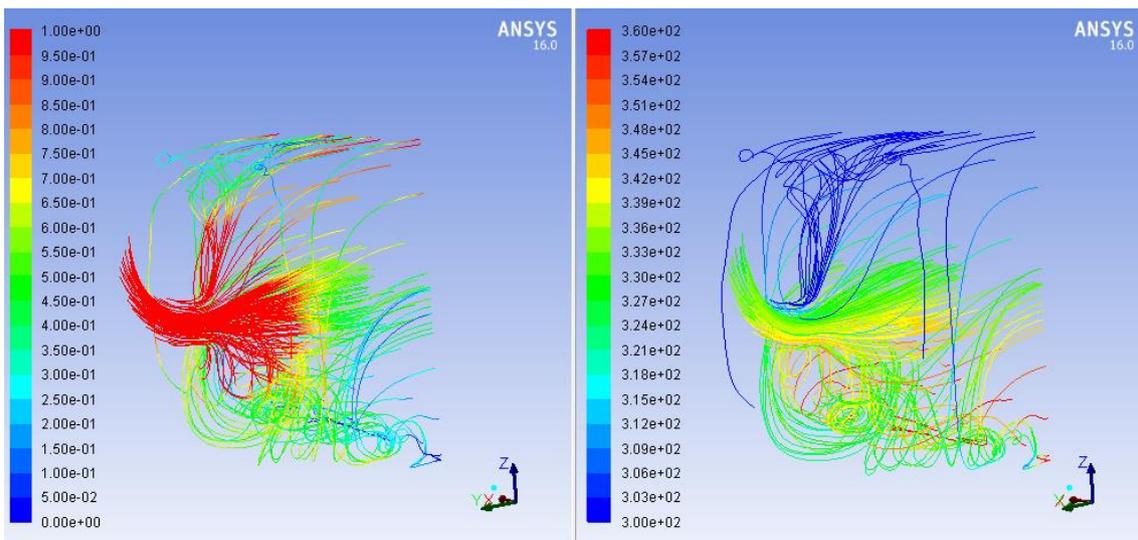


Figura 4.3 - Líneas de corriente de velocidad (izquierda) y de temperatura (derecha) simulación 2.

4.1.2 Flujo en Psim30

Si comparamos la Figura 4.4 y Figura 4.5 con la Figura 4.6 y Figura 4.7 podemos ver como en ambos casos se generan perfiles similares de velocidad y presión en el dispositivo Psim30. No obstante, debido a que los perfiles de temperatura eran opuestos, obtenemos unos resultados diferentes. Podemos ver como en la simulación 1 la temperatura se empieza a equilibrar antes de llegar a la T , mientras que en la simulación 2, esto no ocurre hasta que el flujo atraviesa la T .

Este hecho hace que se creen perfiles de temperatura diferentes en cada caso, como se puede comprobar en el apartado Perfiles y distribuciones de temperatura.4.1.3

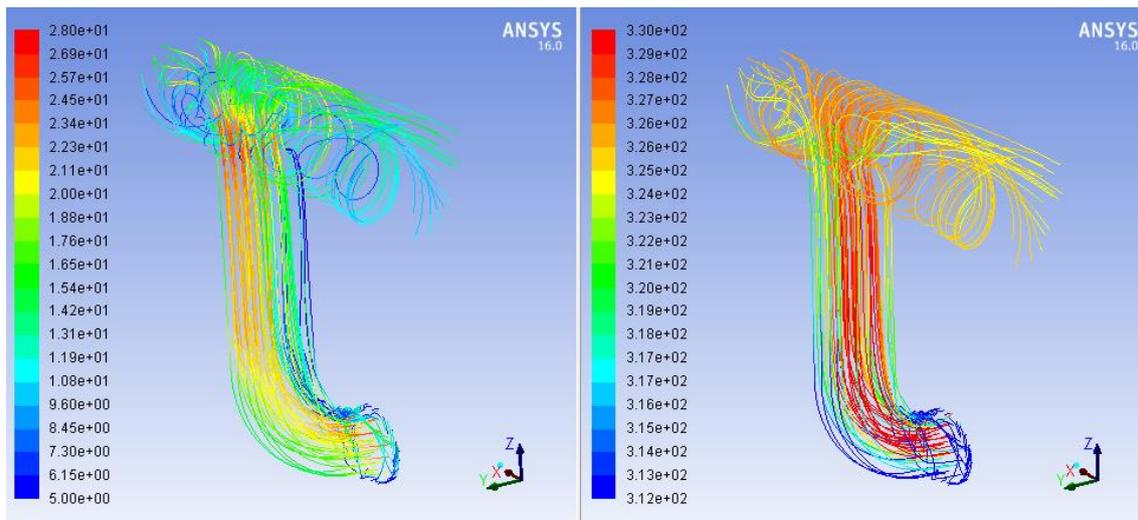


Figura 4.4 - Líneas de corriente de velocidad (izquierda) y de temperatura (derecha), simulación 1.

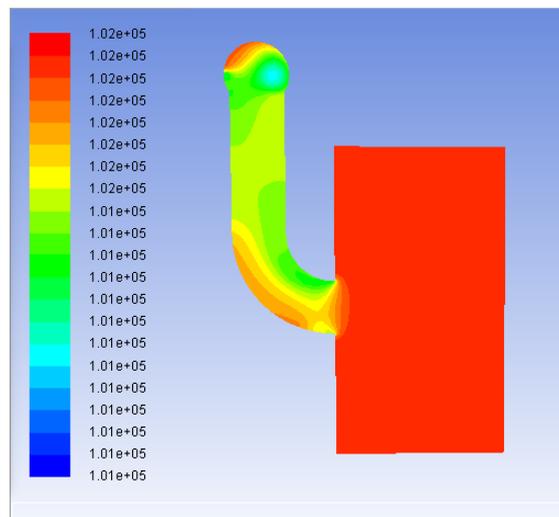


Figura 4.5 - Contornos de presión simulación 1

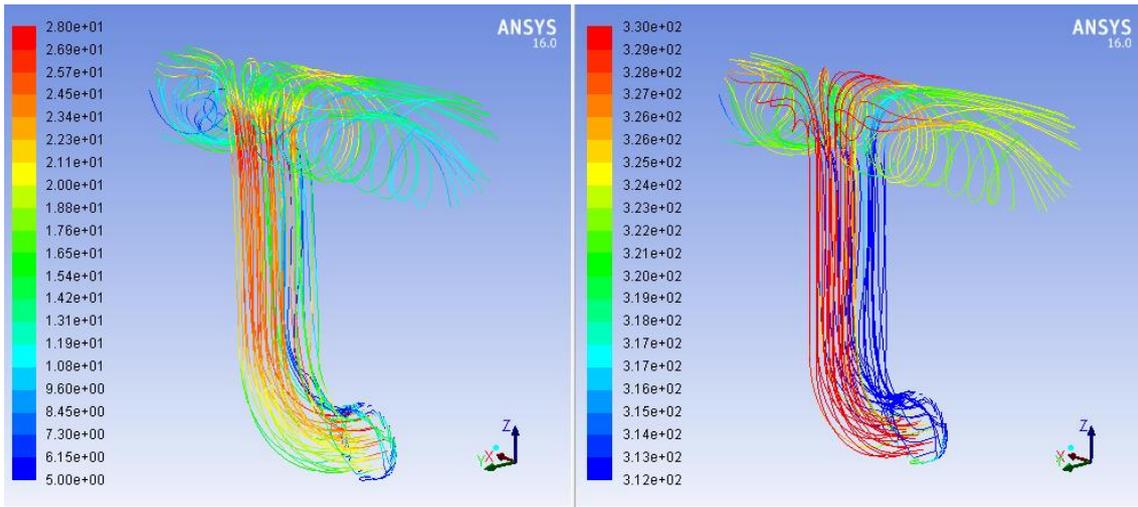


Figura 4.6 - Líneas de corriente de velocidad (izquierda) y de temperatura (derecha), simulación 2.

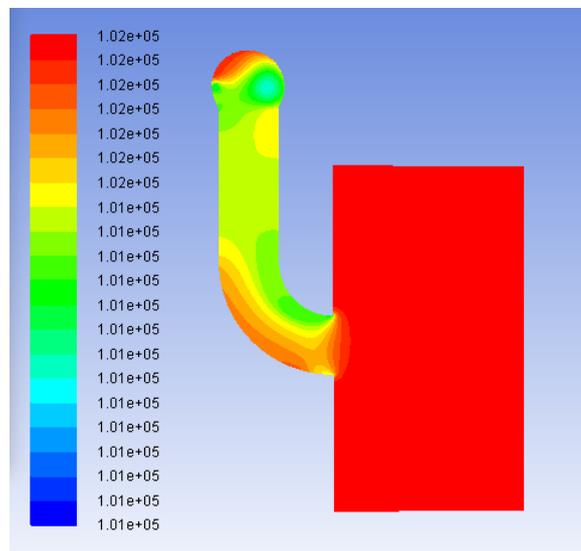


Figura 4.7 - Contornos de presión simulación 2

4.1.3 Perfiles y distribuciones de temperatura.

A continuación, se presentan los diferentes perfiles de temperatura, así como sus respectivas distribuciones para cada sección. Al final de este apartado se encuentran las Tabla 4.1 y Tabla 4.2, con un resumen de los resultados obtenidos en cada sección.

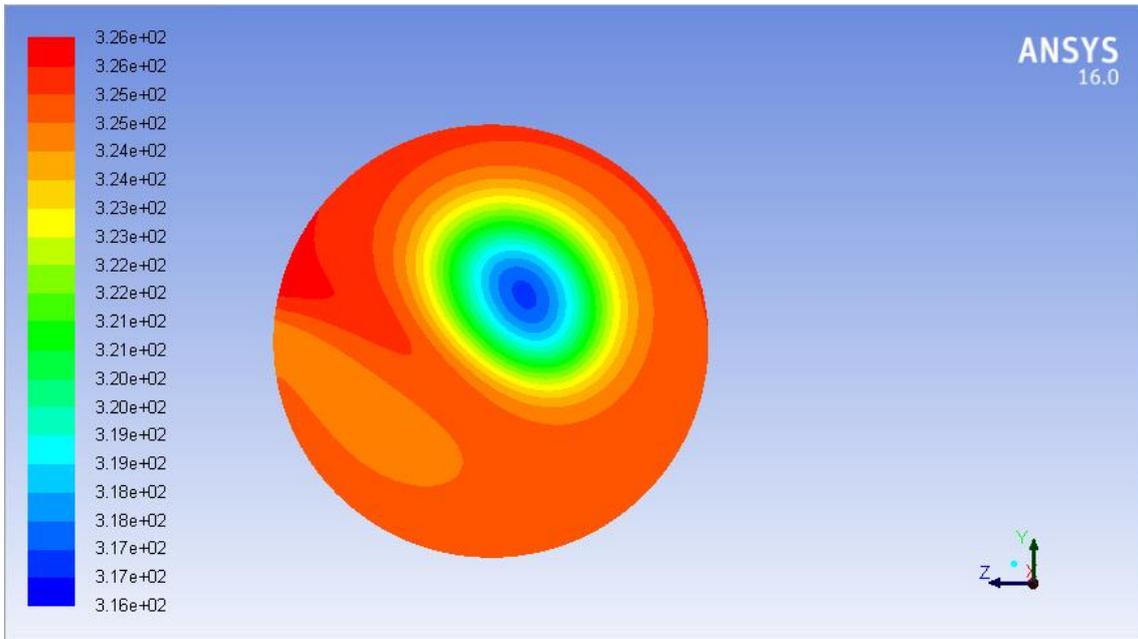


Figura 4.8 - Simulación 1 - sección 1. A 100mm de la salida.

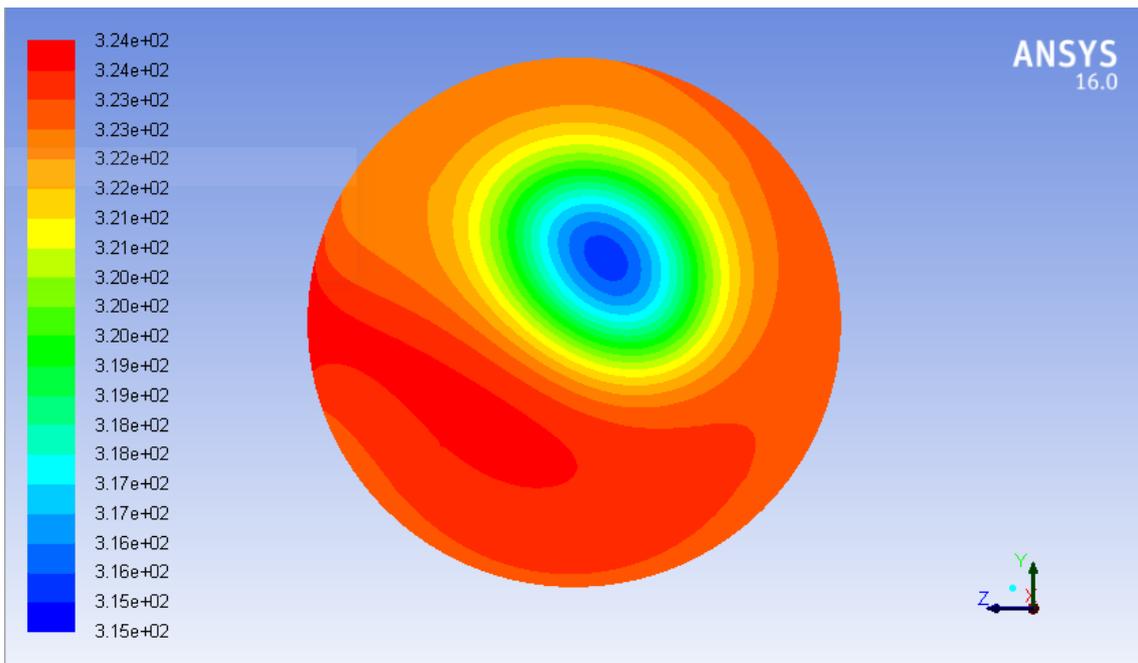


Figura 4.9 - Simulación 2 - sección 1. A 100mm de la salida.

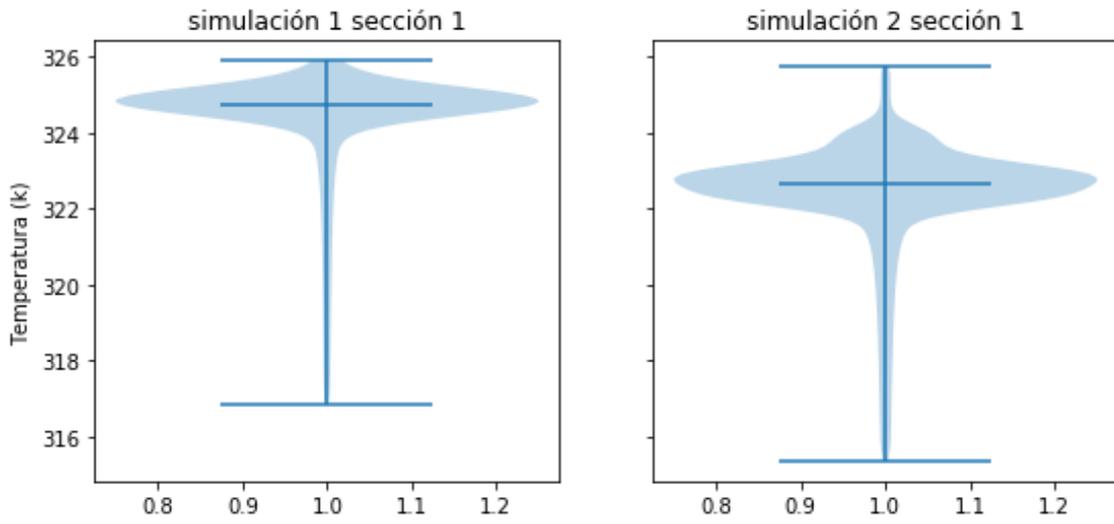


Figura 4.10 - Distribución de valores de temperatura en la sección 1

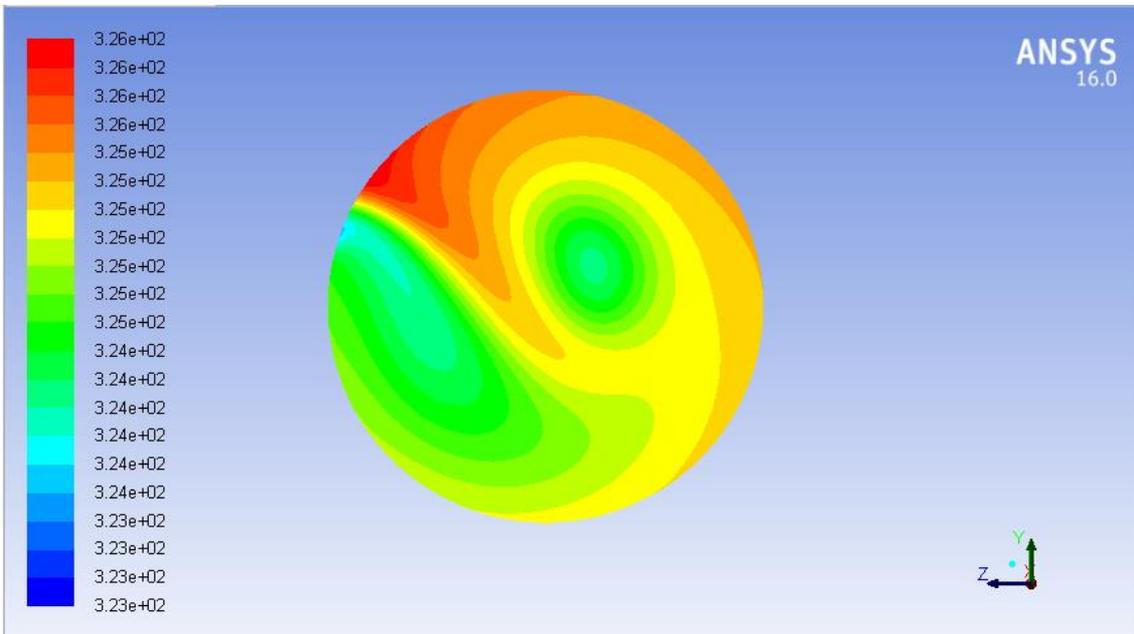


Figura 4.11 - Simulación 1 - sección 2. A 200mm de la salida.

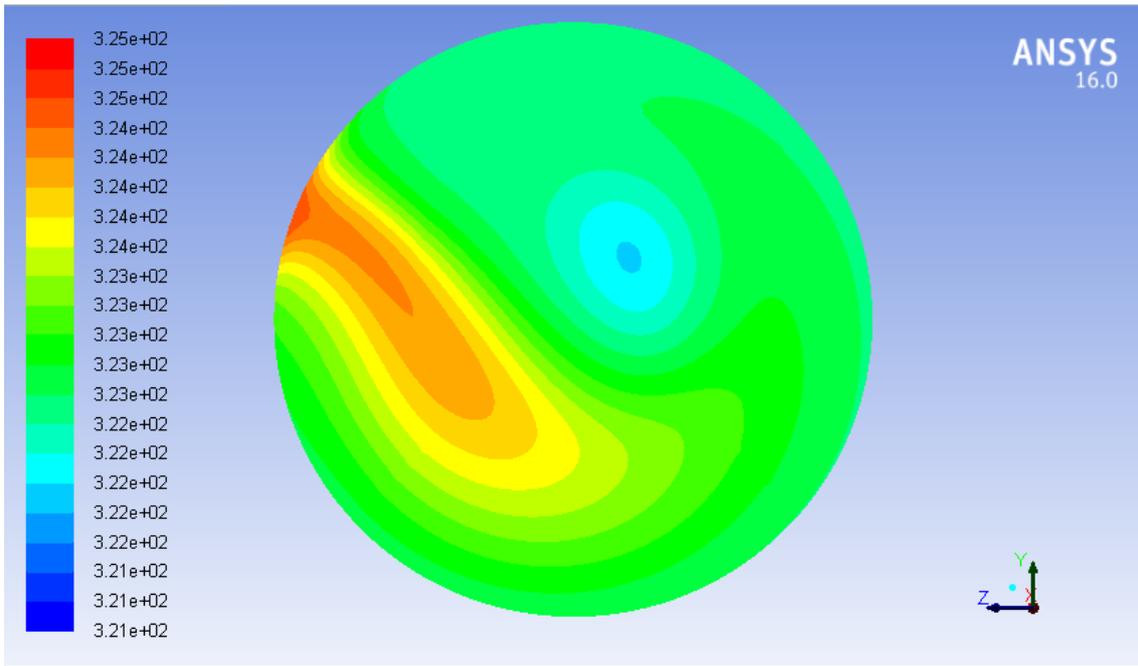


Figura 4.12 - Simulación 2 - sección 2. A 200mm de la salida.

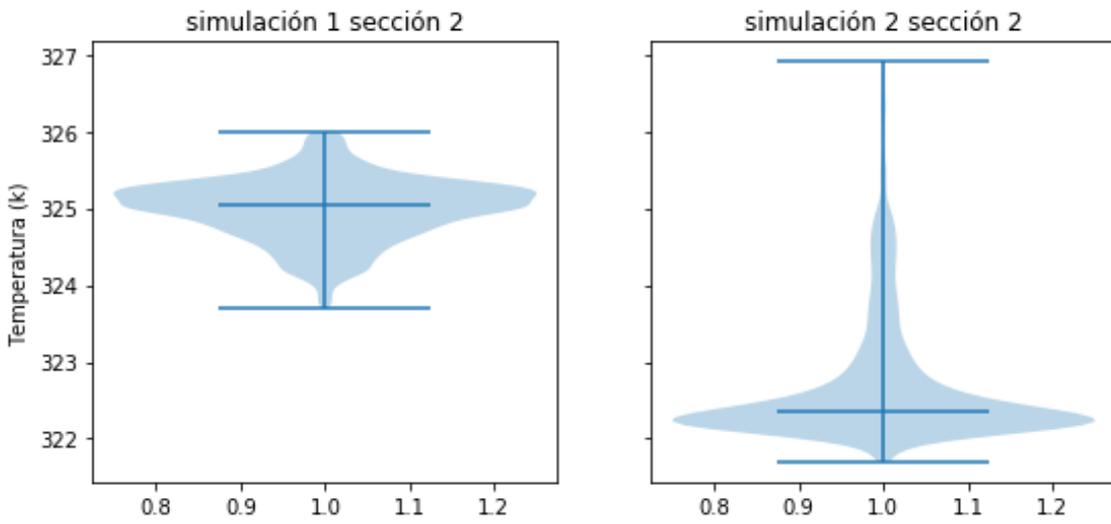


Figura 4.13 - Distribución de valores de temperatura en la sección 2

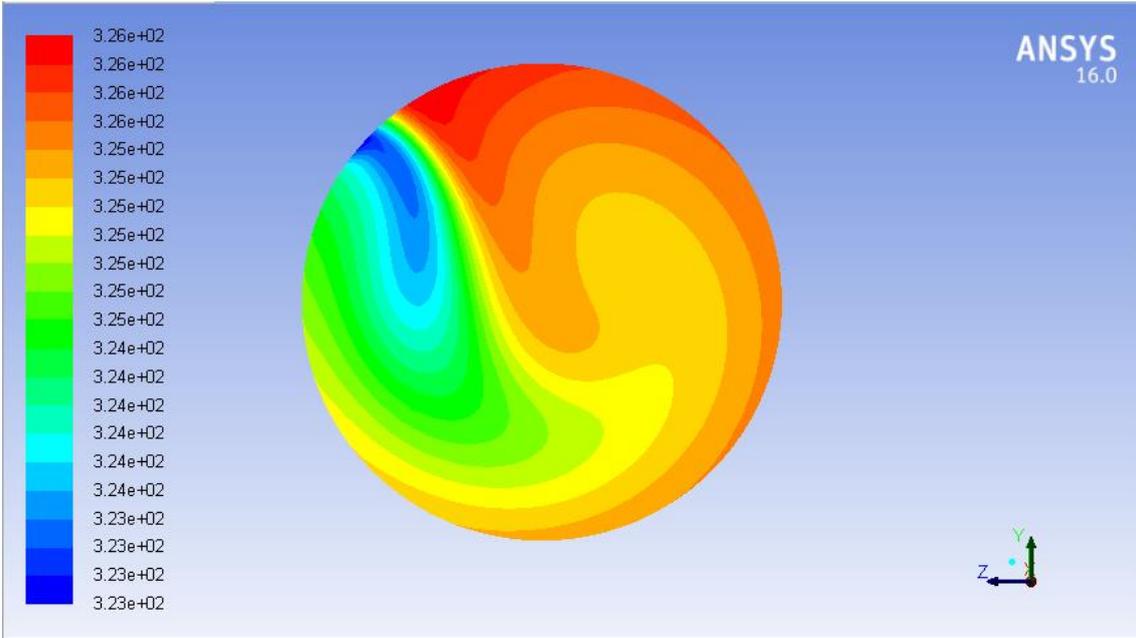


Figura 4.14 - Simulación 1 - sección 3. A 300mm de la salida.

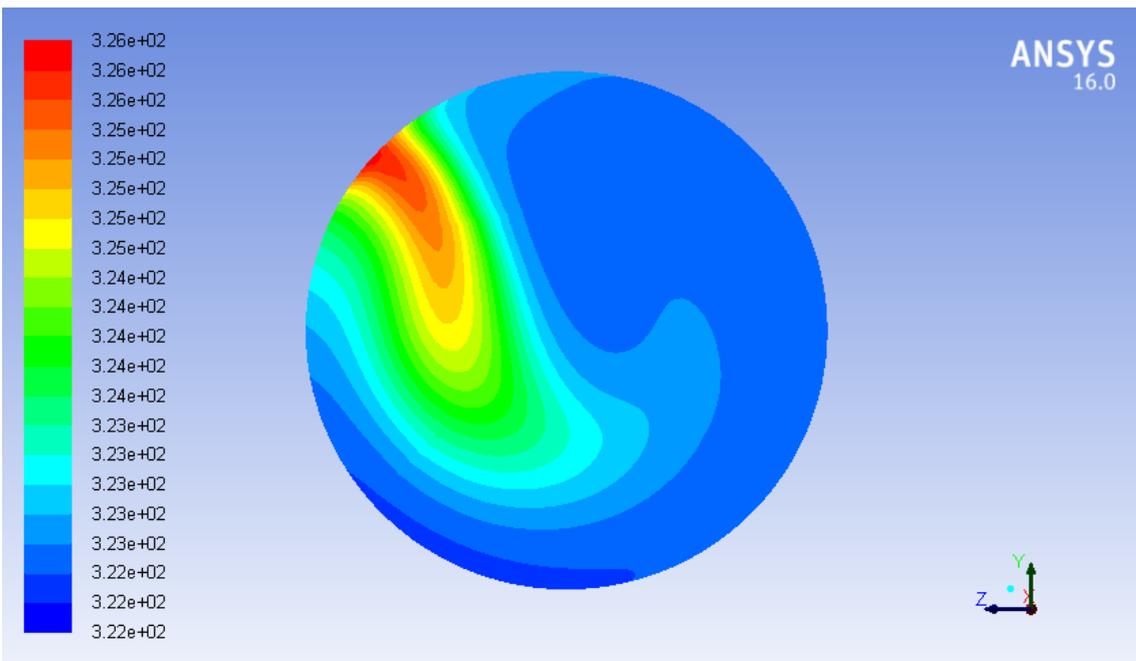


Figura 4.15 - Simulación 2 - sección 3. A 300mm de la salida.

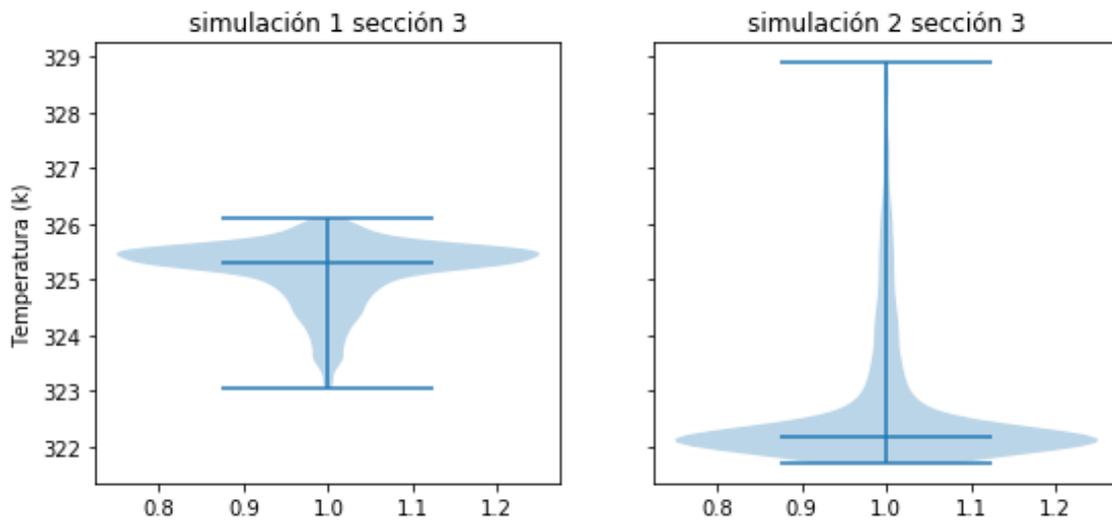


Figura 4.16 - Distribución de valores de temperatura en la sección 3

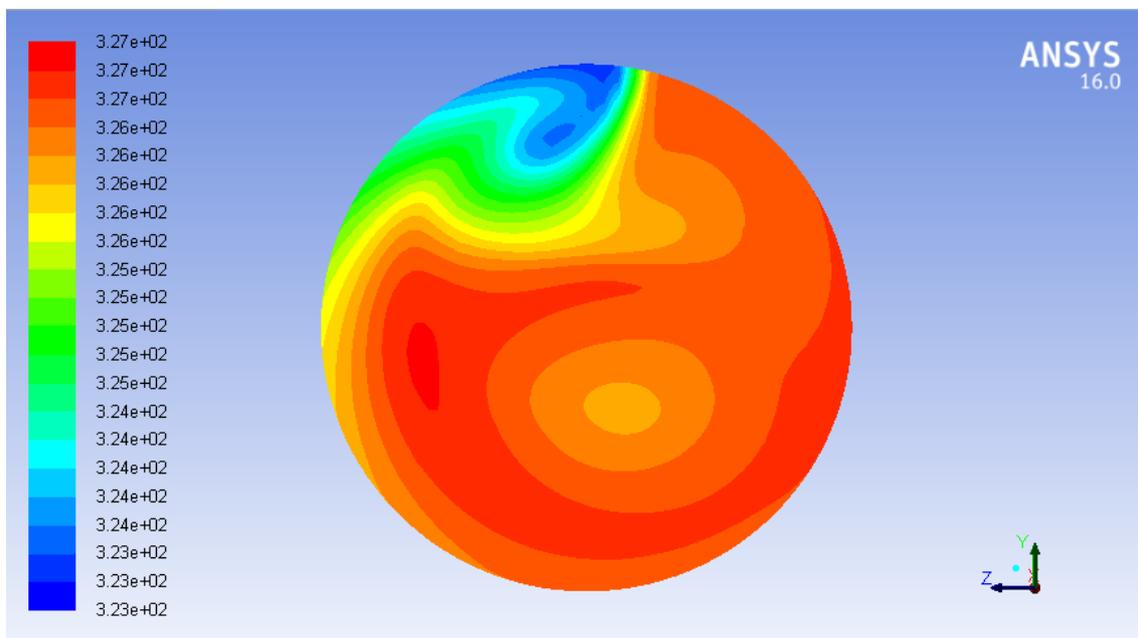


Figura 4.17 - Simulación 1 - sección 4. A 300mm de la salida.

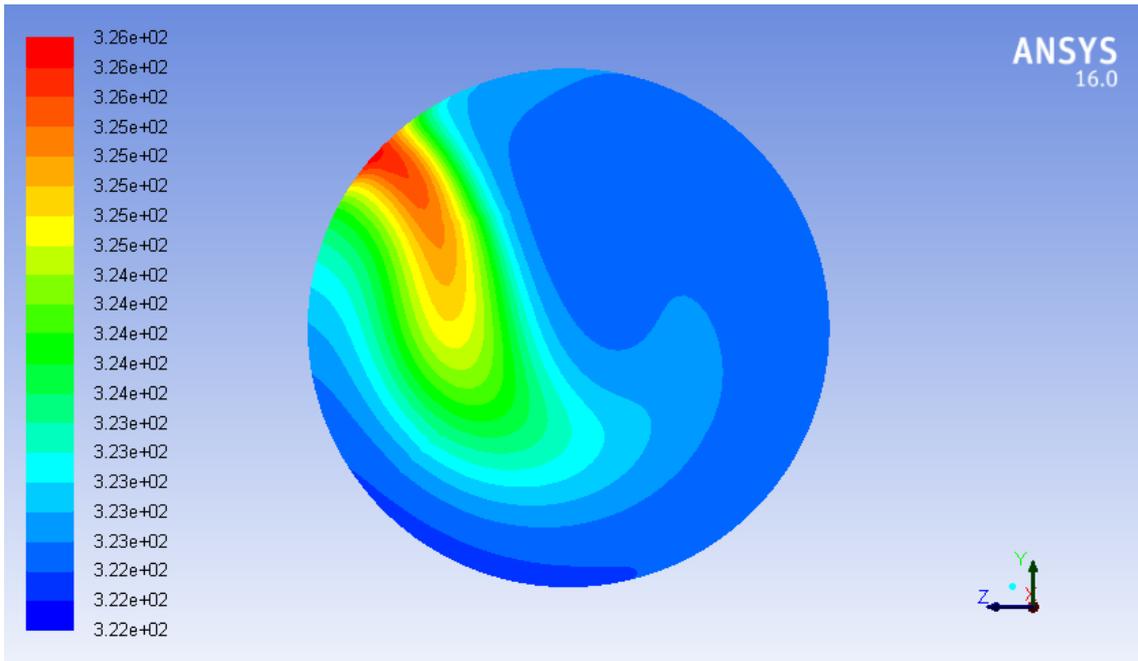


Figura 4.18 - Simulación 2 - sección 4. A 300mm de la salida.

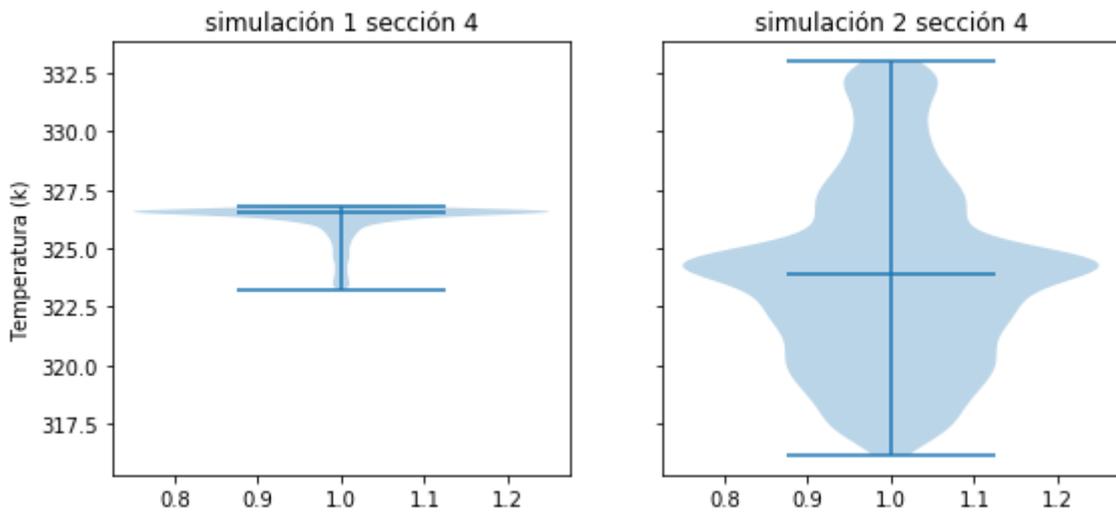


Figura 4.19 - Distribución de valores de temperatura en la sección 4

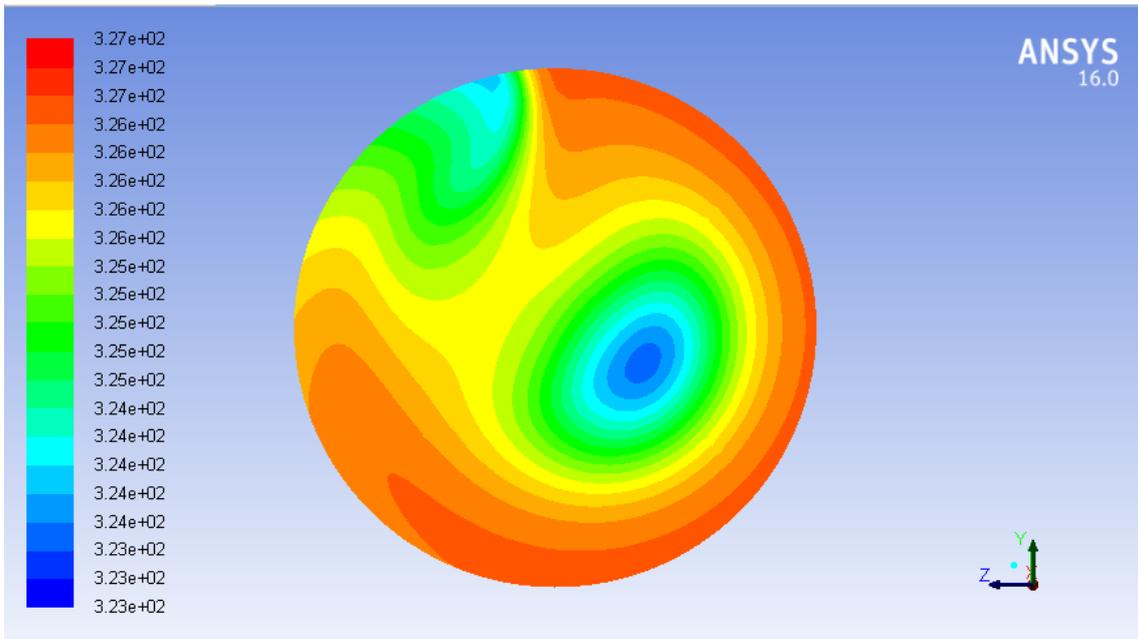


Figura 4.20 - Simulación 1 - sección 5. A 200mm de la salida.

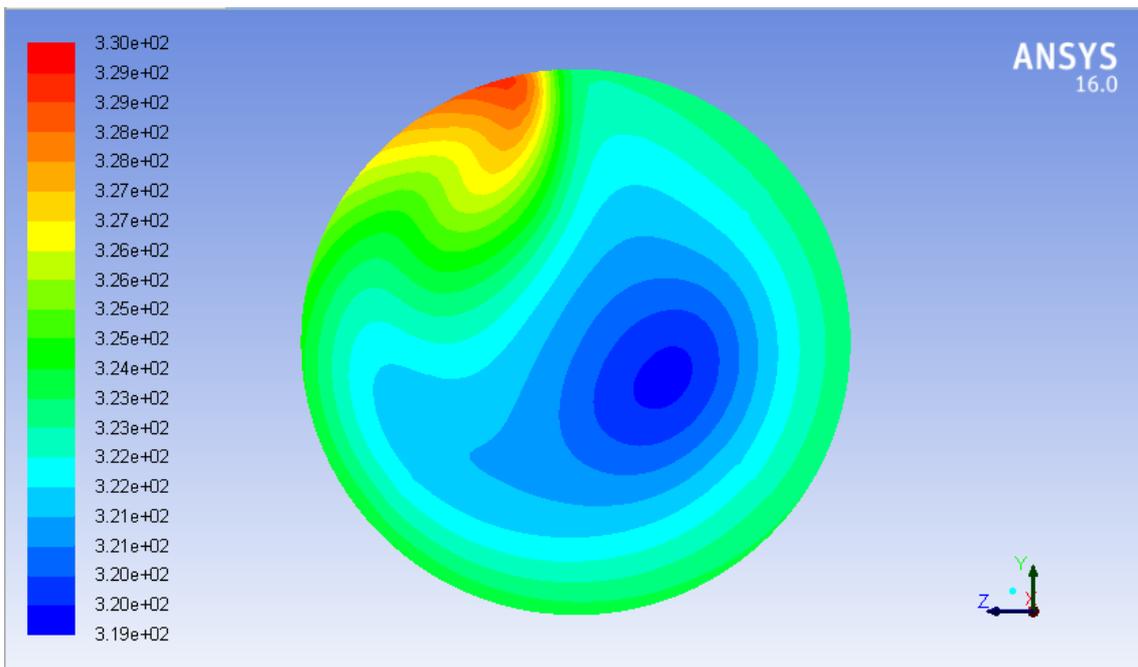


Figura 4.21 - Simulación 2 - sección 5. A 200mm de la salida.

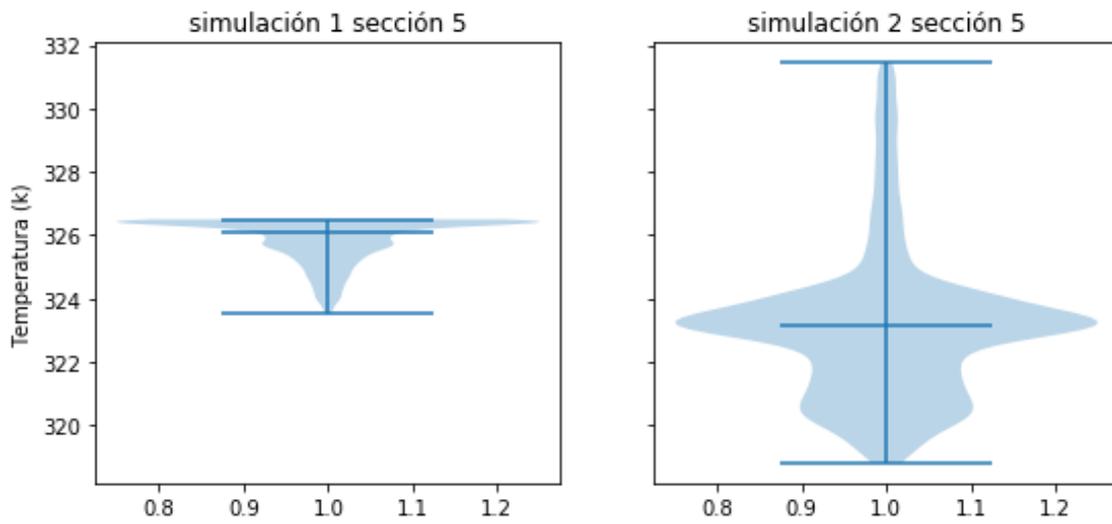


Figura 4.22 - Distribución de valores de temperatura en la sección 5

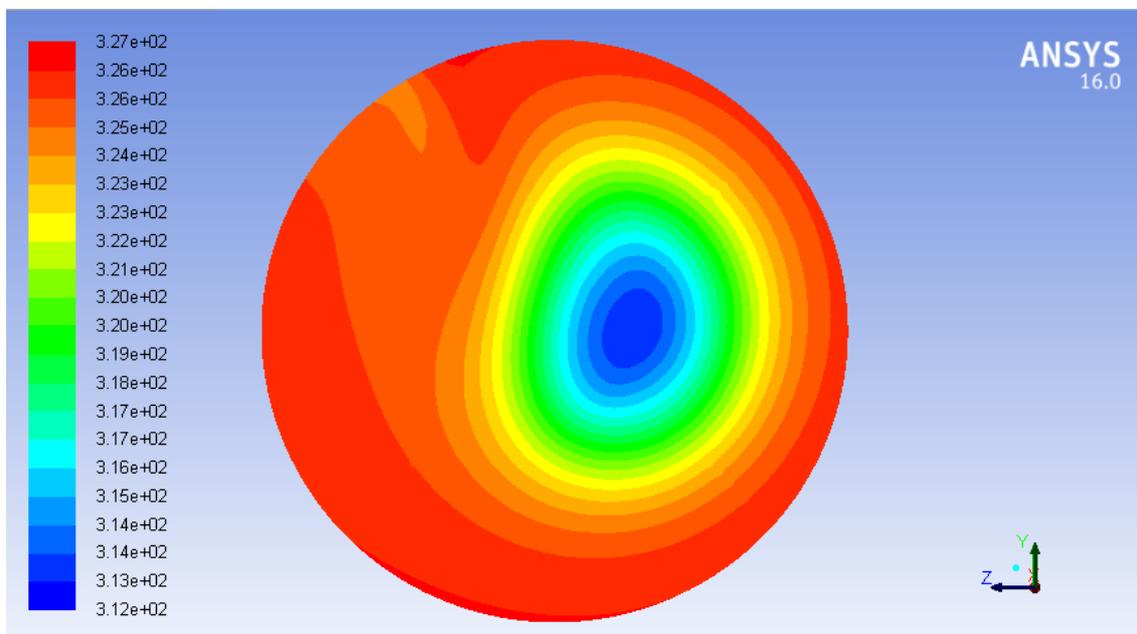


Figura 4.23 - Simulación 1 - sección 6. A 100mm de la salida.

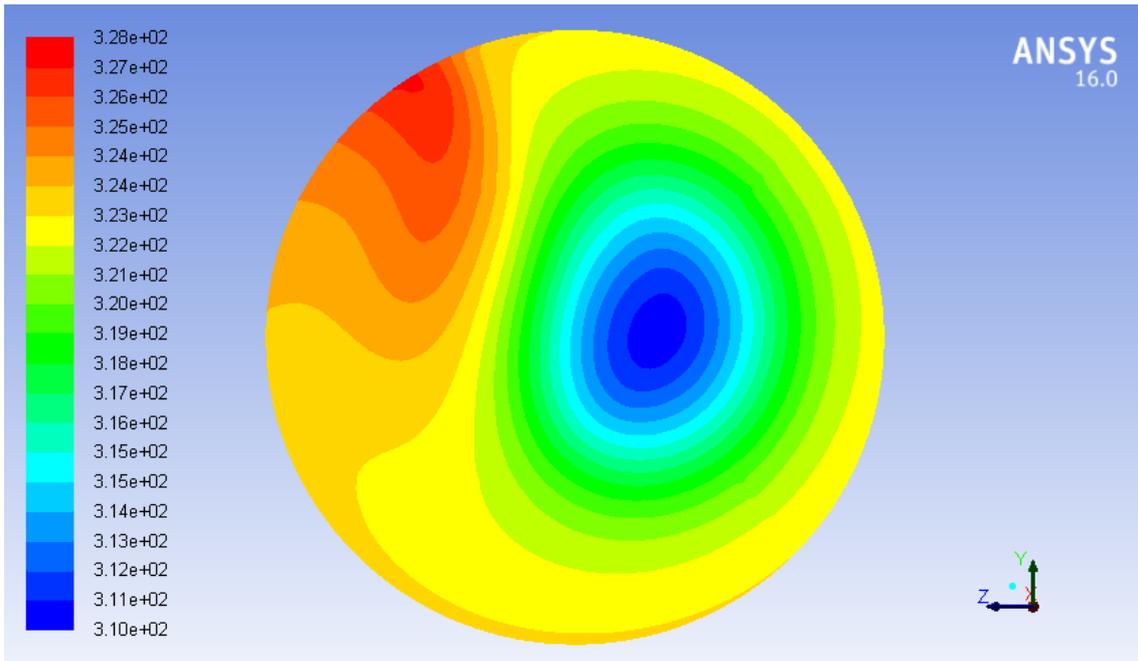


Figura 4.24 - Simulación 2 - sección 6. A 100mm de la salida.

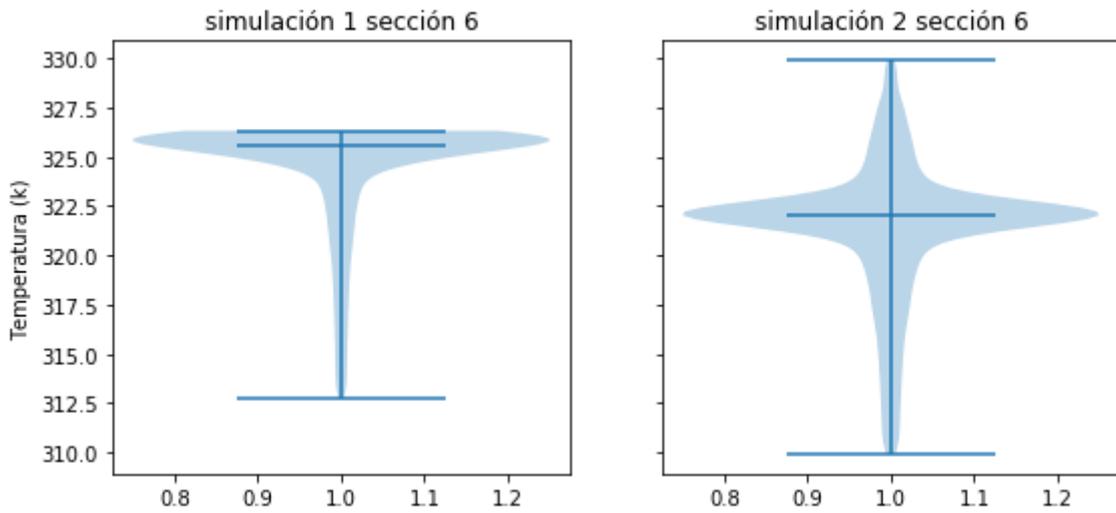


Figura 4.25 - Distribución de valores de temperatura en la sección 6

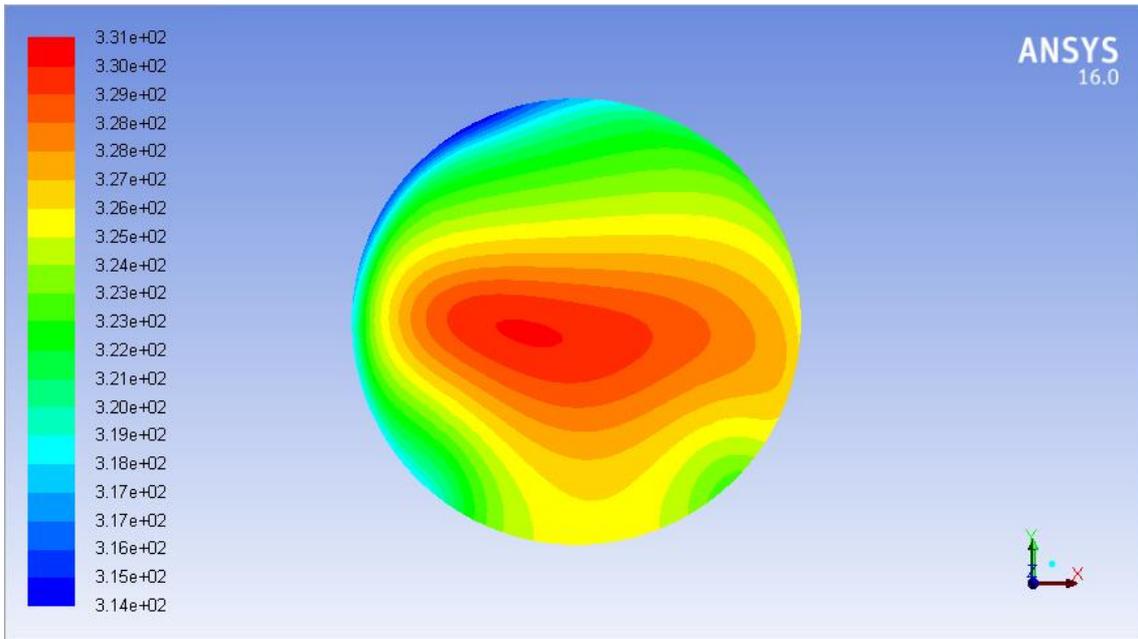


Figura 4.26 - Simulación 1 - sección 7. A 225mm del eje de la horizontal de la tubería de salida.

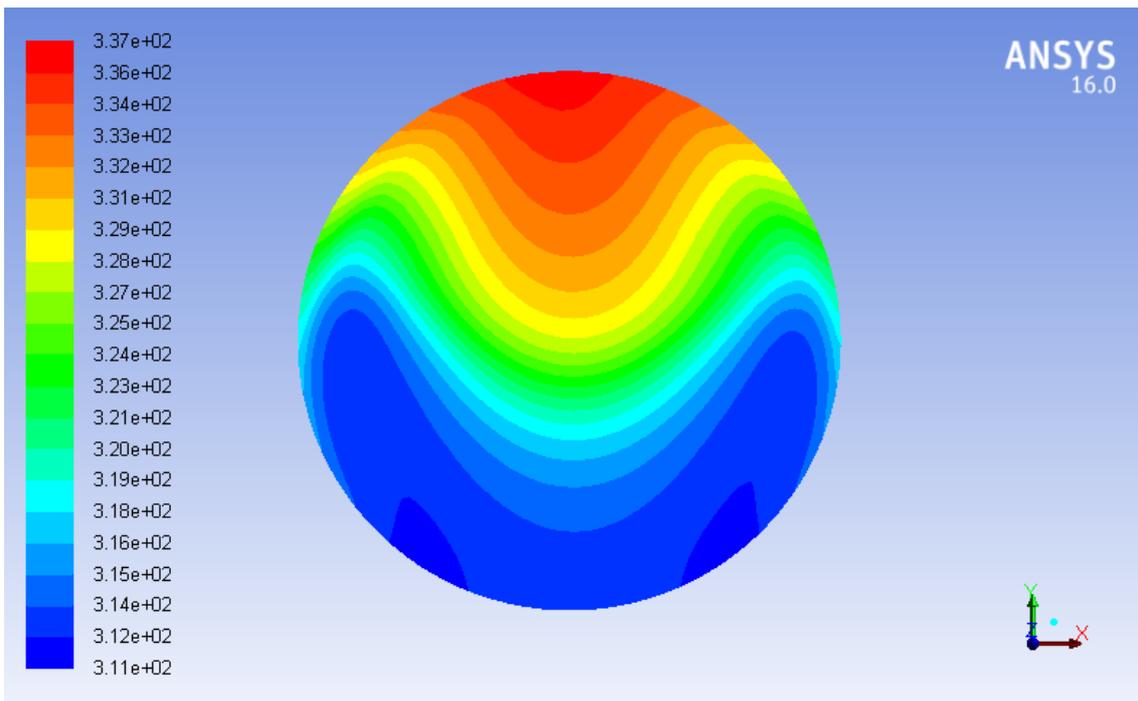


Figura 4.27 - Simulación 2 - sección 7. A 225mm del eje horizontal de la tubería de salida.

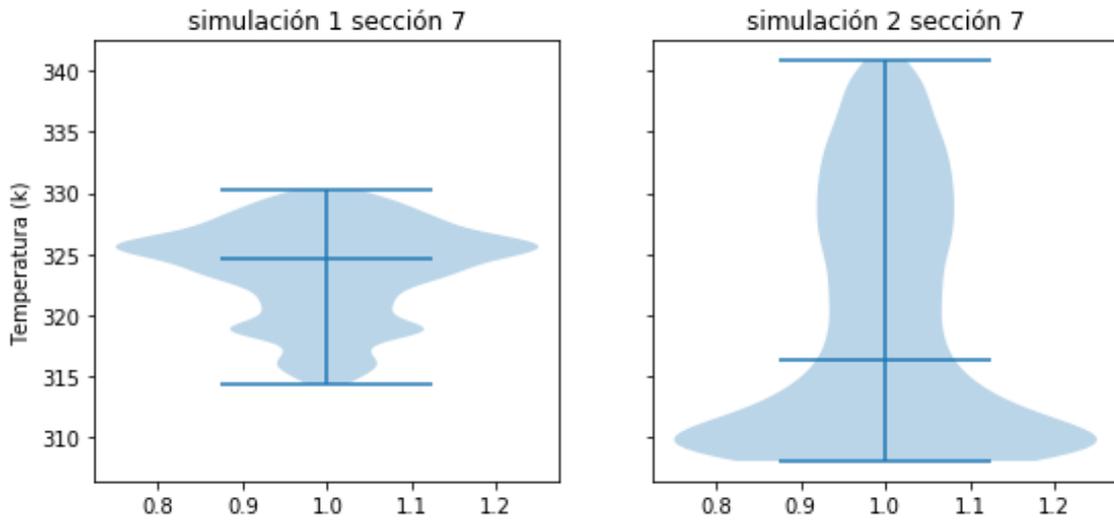


Figura 4.28 - Distribución de valores de temperatura en la sección 7

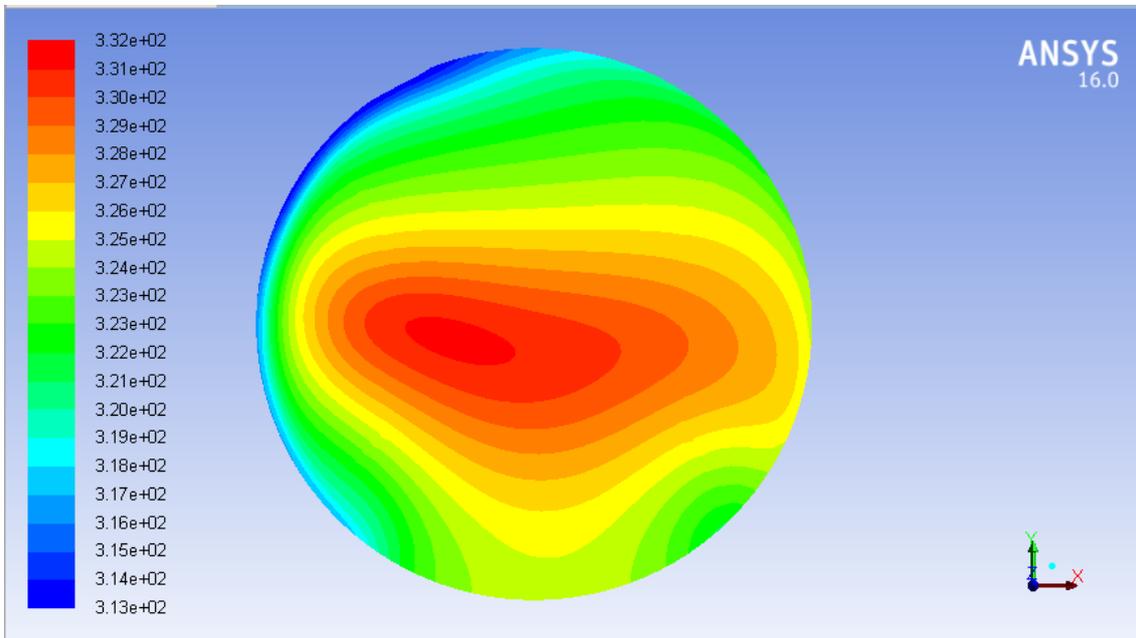


Figura 4.29 - Simulación 1 - sección 8. A 325 del eje horizontal de la tubería de salida.

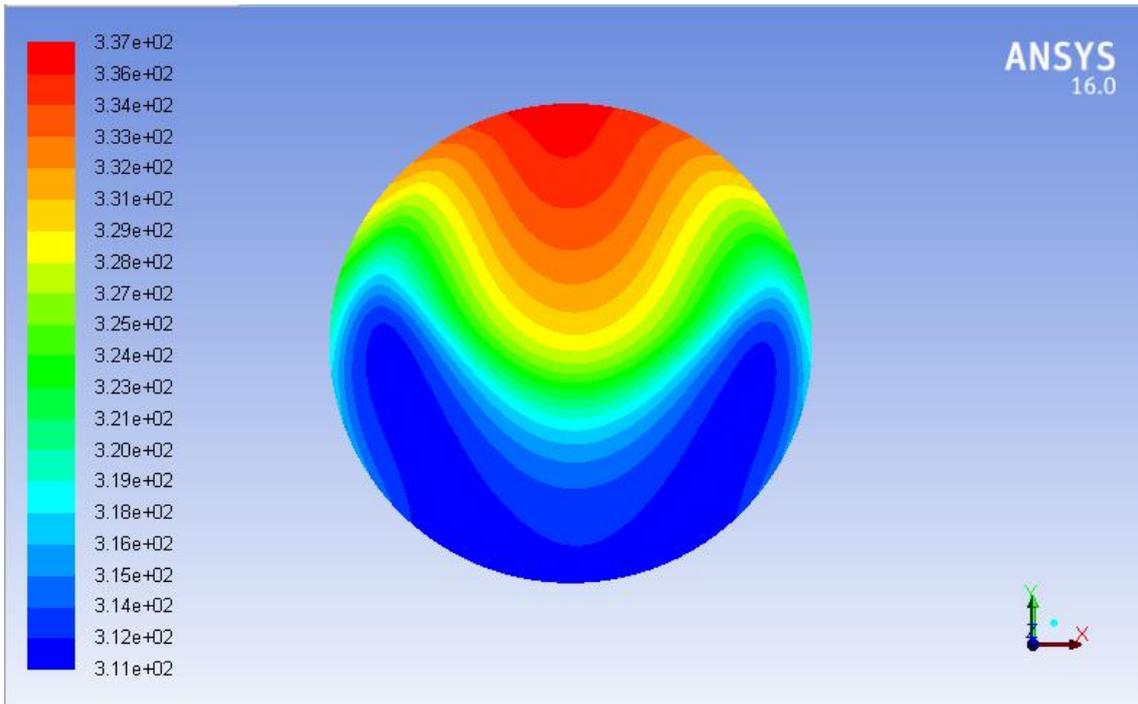


Figura 4.30 - Simulación 2 - sección 8. A 325 del eje horizontal de la tubería de salida.

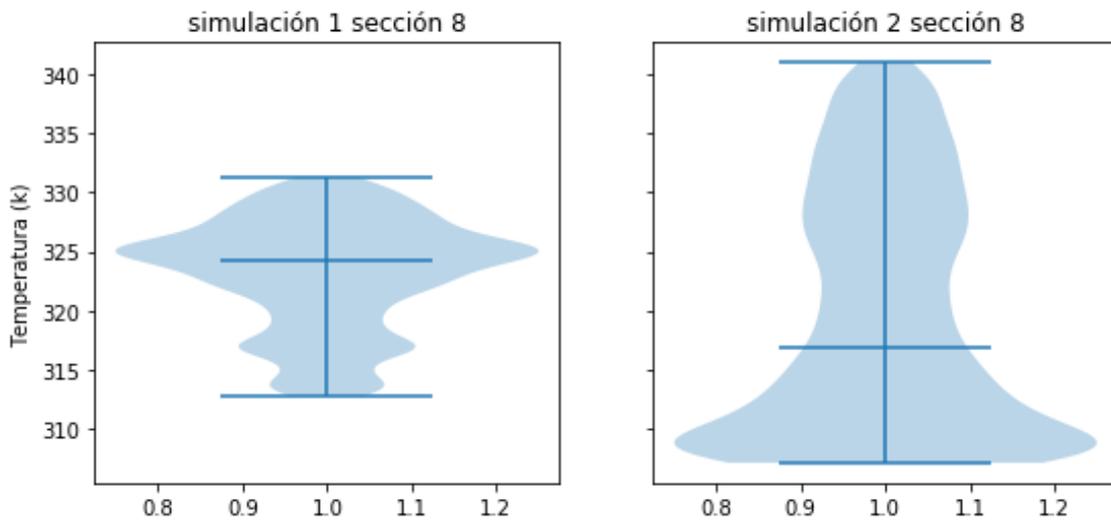


Figura 4.31 - Distribución de valores de temperatura en la sección 8

| Simulación 1 | | | | |
|--------------|----------|----------|----------|---------------|
| | min (°C) | max (°C) | med (°C) | σ (°C) |
| sección 1 | 43,83 | 52,89 | 51,75 | 1,56 |
| sección 2 | 50,69 | 52,99 | 52,04 | 0,41 |
| sección 3 | 50,06 | 53,10 | 52,32 | 0,57 |
| sección 4 | 50,23 | 53,83 | 53,50 | 0,79 |
| sección 5 | 50,51 | 53,50 | 53,12 | 0,70 |
| sección 6 | 39,78 | 53,33 | 52,60 | 2,97 |
| sección 7 | 41,33 | 57,25 | 51,57 | 3,89 |
| sección 8 | 39,75 | 58,31 | 51,21 | 4,67 |

Tabla 4.1 - Resumen valores característicos simulación 1.

| Simulación 2 | | | | |
|--------------|----------|----------|----------|---------------|
| | min (°C) | max (°C) | med (°C) | σ (°C) |
| sección 1 | 42,35 | 52,74 | 49,66 | 1,59 |
| sección 2 | 48,70 | 53,91 | 49,36 | 0,85 |
| sección 3 | 48,71 | 55,89 | 49,18 | 1,24 |
| sección 4 | 43,15 | 60,00 | 50,86 | 3,95 |
| sección 5 | 45,81 | 58,45 | 50,13 | 2,37 |
| sección 6 | 36,92 | 56,90 | 49,03 | 3,49 |
| sección 7 | 35,02 | 67,85 | 43,39 | 9,96 |
| sección 8 | 34,10 | 68,02 | 43,86 | 10,33 |

Tabla 4.2 - Resumen valores característicos simulación 2.

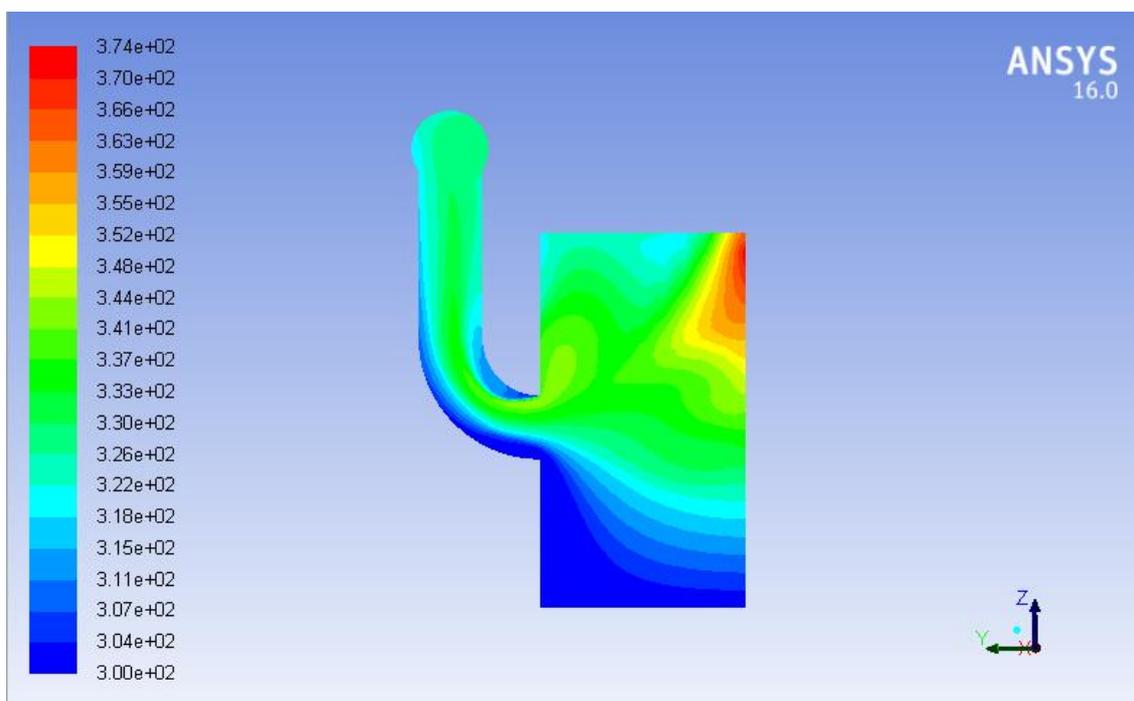


Figura 4.32- Simulación 1 - Contornos de temperatura en la sección intermedia.

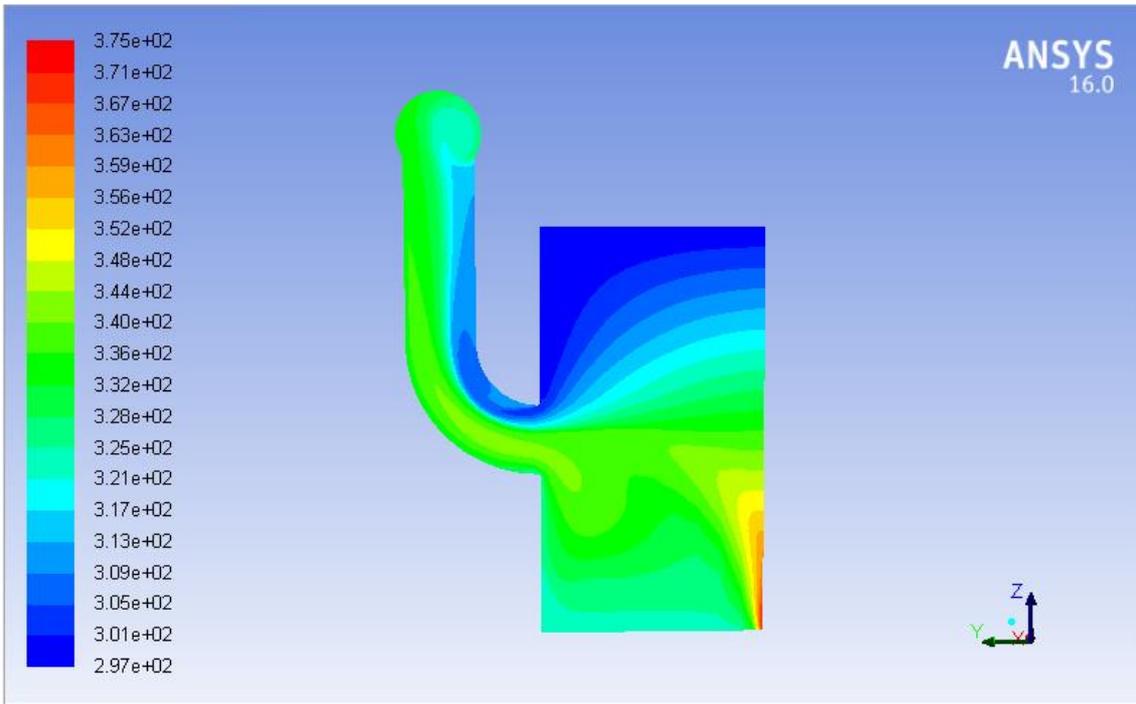


Figura 4.33 - Simulación 2 – Contorno de temperatura en la sección intermedia.

Capítulo 5 - Presupuesto

En el presente capítulo se detalla un presupuesto del proyecto realizado. Con la intención de aportar una idea aproximada del coste que supondría para una ingeniería el estudio realizado. Para realizar este análisis se han tenido en cuenta los costes de tres partes diferentes: recursos humanos, software y ordenador.

La parte de recursos humanos engloba los costes relacionados con el personal que interviene en el proyecto, o, dicho de otro modo, las horas dedicadas por el ingeniero al proyecto. Estos costes han sido calculados siguiendo el convenio colectivo de Industria siderometalúrgica de Valladolid 2017-2019.

En cuanto al software, hay que considerar las licencias de los programas utilizados. La amortización de las licencias se ha calculado según la tabla de coeficientes de amortización lineal de la Agencia Tributaria, que para este caso es un 33%. Además se ha estimado un uso diario de 5 horas para estimar un coste por hora de dichas licencias.

El coste asociado al ordenador se ha calculado estimando una vida útil de 5 años según la siguiente fórmula:

$$Amortización = \frac{(Valor\ inicial - Valor\ residual)}{Vida\ útil} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Siendo el valor inicial del ordenador utilizado 500 € y estimando un valor residual al final de su vida útil de 50 €, obtenemos una amortización anual de 90 €.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los costes, así como el coste total del trabajo:

| Recursos humanos | Coste (€/horas) | Tiempo invertido (horas) | Total (€) |
|-------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
| Recogida de información | 16,24 | 16 | 259,84 |
| Preproceso | 16,24 | 85 | 1.380,40 |
| Simulación | 16,24 | 64 | 1.039,36 |
| Postproceso | 16,24 | 50 | 812,00 |
| Total | | | 3.491,60 |
| | | | |
| Software | Coste (€/año) | Utilización (horas) | |
| CATIA | 10,00 | 15 | 150,00 |
| ICEM CFD | 4,00 | 60 | 240,00 |
| ANSYS Fluent | 8,00 | 84 | 672,00 |
| | | | 1.062,00 |
| Ordenador | Coste (€/año) | Utilización (años) | |
| Ordenador portátil | 90,00 | 1 | 90,00 |
| | | | |
| Total | | | 4.643,60 |

Tabla 5.1 - Presupuesto

Capítulo 6 - Conclusiones

En este Trabajo de Fin de Grado se ha analizado el comportamiento del aire dentro del dispositivo HTPsim30 mediante el estudio de dos situaciones diferentes. Para ello se ha construido un modelo computacional con el que se han realizado las simulaciones.

En una primera parte del trabajo, se han introducido una serie de simplificaciones al dispositivo HTPsim30 para reducir el tamaño y la complejidad del modelo geométrico y por tanto el coste computacional del estudio. Estas simplificaciones se han podido llevar a cabo debido a que no suponían una alteración de los resultados obtenidos, ya que este trabajo busca una solución cualitativa.

Tras la validación del mallado, se han realizado dos simulaciones, con diferentes perfiles de velocidad y temperatura a la entrada del HTPsim30. Una vez realizada estas simulaciones se ha trabajado con los datos para comparar los resultados de sendas simulaciones.

Al comparar los datos obtenidos de ambas simulaciones se ha observado una variación notable entre ambas simulaciones, es decir, los perfiles de velocidad, temperatura y presión a lo largo del dispositivo HTPsim30 varía entre las dos simulaciones. Dentro del Psim30, la propiedad que más varía entre ambas simulaciones es la temperatura, mientras que los campos de velocidad y presión, si bien no son iguales, muestran cierta similitud.

Este hecho nos lleva a la conclusión de que sí existe una dependencia entre las condiciones de entrada del aire al HTsim30 y el comportamiento de éste a través del dispositivo Psim30. A la vista de este hecho no podremos asegurar un buen punto de medida sin conocer previamente las condiciones de entrada. No obstante, para ambas simulaciones en la sección 2 se han obtenido los valores más constantes, coincidiendo con los resultados de los análisis en campo. Ya que estas secciones serían análogas al punto TT2 usado para medir en el dispositivo real.

Capítulo 7 - Referencias

- [1] **Michael Plint y Anthony Martyr.** Engine Testing: Theory and Practice. Society of Automotive Engineers, 1998
- [2] **Richard Stone.** Introduction to internal combustion engines. Red Globe Press, 2012.
- [3] **Colin Ferguson y Allen Kirkpatrick.** Internal combustion engines. John Wiley & Sons Inc, 2015.
- [4] **Ángel Luis Miranda Barreras.** La psicrometría. Ediciones Ceac, 1996.
- [5] **Jose María Desantes Fernández y Francisco Payri González.** Motores de Combustión Interna Alternativos. Editorial Reverte, 2011
- [6] **Jesús Manuel Fernández Oro.** Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos. Editorial Reverte, 2011
- [7] **John Wendt.** Computational Fluid Dynamics. Springer, 1995
- [8] **Antonio Crespo.** Mecánica de fluidos. Ediciones paraninfo, 2006
- [9] **Osborne Reynolds.** An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels. 1883
- [10] **Andrei Nikolaevich Kolmogorov.** Dissipation of energy in isotropic turbulence. 1941