

# Trabajo Fin de Grado

## Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales



El proyecto SOLMIDEFF está financiado por el Plan Estatal Retos de Investigación del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (RTI2018-102196-B-I00)



### Estudio preliminar de un sistema de tratamiento de salmuera para vertido líquido cero (Zero Liquid Discharge) alimentado por gases de escape de micro turbina de gas

Autor: Francisco Béjar Hernández  
Tutores: David Tomás Sánchez Martínez  
Lourdes García Rodríguez

Departamento de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2020





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de tecnologías industriales

# **Estudio preliminar de un sistema de tratamiento de salmuera para vertido líquido cero (Zero Liquid Discharge) alimentado por gases de escape de micro turbina de gas**

Autor:

Francisco Béjar Hernández

Tutores:

David Tomás Sánchez Martínez

Lourdes García Rodríguez

Profesores titulares

Dpto. de Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2020



Trabajo de Fin de Grado: Estudio preliminar de un sistema de tratamiento de salmuera para vertido líquido cero (Zero Liquid Discharge) alimentado por gases de escape de micro turbina de gas

Autor: Francisco Béjar Hernández

Tutores: David Tomás Sánchez Martínez,  
Lourdes García Rodríguez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

*A mis maestros*

*A mi familia que siempre estuvo  
ahí*

*A mi novia que me apoyó en los  
peores momentos*



# Resumen

---

El proyecto SOLMIDEFF (*Solar micro gas turbine-driven desalination for environmental off-grid applications*), financiado por el plan Nacional de Investigación del Gobierno de España tiene como objetivo el desarrollo de un sistema combinado de desalación de agua alimentado por energía solar, apto para instalaciones en lugares aislados de la red eléctrica. En este trabajo se realiza un estudio teórico preliminar de un sistema de vertido cero o ZLD (*Zero Liquid Discharge*), instalado aguas debajo del escape de una microturbina de gas solar, el cual consiste en un proceso térmico para recuperar agua de la corriente de salmuera que, de otro modo, sería vertida al ambiente. Esta característica de SOLMIDEFF incorpora ventajas muy importantes respecto de los sistemas convencionales basados en tecnología fotovoltaica. El sistema ZLD consiste en un regenerador al cual entra un gas caliente en flujo horizontal y, tras pasar por un codo, asciende y se encuentra con la salmuera procedente del proceso de ósmosis, la cual se inyecta a contracorriente y por gravedad a cierta altura dentro del canal, evaporando el agua de la salmuera para separarla de la sal.

En este estudio se incluye el análisis de la geometría del regenerador, el mallado empleado y unas condiciones de contorno suficientes para que el sistema alcance el objetivo de evaporar el agua de la salmuera introducida (caso base). Tras un estudio completo sobre el efecto de cada variable en el sistema se demuestra que el tamaño de las gotas introducidas y su caudal toman un papel fundamental en la evaporación de las gotas. Finalmente, empleando la información recabada a lo largo del trabajo, se desarrollan mejoras para el caso base, consiguiendo duplicar la cantidad de salmuera evaporada en relación a un cierto caudal de gases de escape de la microturbina de gas.



# Abstract

---

The SOLMIDEFF (*Solar micro gas turbine-driven desalination for environmental off-grid applications*) project, which is financed by the National plan of Investigation of the Government of Spain, pursues the development of combined system that removes salt from seawater powered by solar energy, what makes it suitable to off-grid applications. This project consists on a preliminar theoretical study of the initial design of a ZLD (*Zero Liquid Discharge*) system, a thermal process in which water is recovered from brine, since it could not be recovered otherwise. Besides, this characteristic of SOLMIDEFF involves deep innovations regarding the conventional systems based on photovoltaic energy. The ZLD system consists on a regenerator where a hot gas enters horizontally and, after passing through an elbow, ascends and meets an introduced brine current coming from a previous osmosis process, which is counter current injected and falls by gravity at a certain height into the canal, evaporating the water within the brine in order to separate it from the salt.

This project involves the regenerator geometry, its mesh and preliminary boundary conditions that fulfil the goal of evaporating the water within the brine (reference frame). After a complete research about the effect that every variable has on the system, it is proved that brine's drops size and flow rate are decisive aspects that determine the success of the process. Finally, the information gathered through the completion of this project is utilized to improve the reference frame, doubling the evaporated brine in relation with certain gas flow from the microgas turbine



# Índice

---

<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvi</b>
<b>Notación</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Motivación del proyecto</i>	1
1.2. <i>Organización del proyecto</i>	2
<b>2 Proyecto SOLMIDIFF</b>	<b>3</b>
2.1. <i>Sistema Zero Liquid Discharge (ZLD)</i>	3
2.1.1. <i>Objetivos, aplicaciones y funcionamiento</i>	3
2.1.2. <i>Tratamientos de membrana</i>	4
2.1.3. <i>Ósmosis inversa</i>	5
2.1.4. <i>Tratamientos térmicos convencionales</i>	7
<b>3 Modelo de cálculo</b>	<b>9</b>
3.1. <i>Fundamento físico</i>	9

3.1.1	Suposiciones y criterios respecto a regímenes bifásicos	9
3.2.	<i>Métodos de resolución en CFD de flujos turbulentos conductores de partículas</i>	12
3.3.	<i>Propiedades termodinámicas y estimaciones preliminares</i>	12
<b>4</b>	<b>Simulación con CFD</b>	<b>16</b>
4.1.	<i>Geometría</i>	16
4.2.	<i>Mallado</i>	18
4.3.	<i>Condiciones de contorno en ANSYS fluent</i>	25
4.3.1.	Método de cálculo	25
4.3.2.	Fase discreta	25
4.3.3.	Fase continua	26
4.4.	<i>Resultados y discusión</i>	27
4.4.1.	Caso base	27
4.3.1	Variaciones de los parámetros de la fase discreta	41
4.3.2	Variaciones de los parámetros de la fase continua	49
4.5.	<i>Otras configuraciones</i>	53
<b>5</b>	<b>Análisis de sensibilidad</b>	<b>61</b>
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>66</b>
	<b>Referencias</b>	<b>67</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Entalpía de cambio de fase de disoluciones de sales marinas, en kJ/kg	13
Tabla 2. Elevación del punto de ebullición de disoluciones de sales marinas, en K	14
Tabla 3. Parámetros significativos en el canal vertical.	37
Tabla 4. Desviación típica de parámetros significativos en el canal vertical	37
Tabla 5. Evaporación de las partículas aumentando el caudal de salmuera por inyector	42
Tabla 6. Evaporación de las partículas aumentando el diámetro de las gotas introducidas	44
Tabla 7. Características del flujo inyectado según la concentración de sales	47
Tabla 8. Parámetros en el outlet según la concentración de sales	48
Tabla 9. Variaciones de la temperatura y la humedad relativa medias en el outlet relativas al caso base si se modifican la velocidad o la temperatura de entrada de la fase discreta.	48
Tabla 10. Parámetros en el outlet según la humedad relativa en el inlet	52
Tabla 11. Parámetros de otras configuraciones	54
Tabla 12. Parámetros en el outlet según el caso estudiado	60
Tabla 13. Casos de afino del mallado	62
Tabla 14. Tabla de variación de parámetros índice según el caso	63
Tabla 15. Tabla de variaciones relativas al caso inicial de parámetros índice en cada caso expresados en %	63
Tabla 16. Tabla de variaciones relativas al caso anterior de parámetros índice en cada caso	64

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Objetivos principales de SOLMIDIFF [2]	1
Figura 2. Sistema de disco solar de OMSoP [4]	3
Figura 3. Diagrama de un proceso ZLD [6]	4
Figura 4. Diagrama de flujo de un proceso ZLD con sistemas de membrana y de tratamiento térmico [7]	5
Figura 5. Tecnologías de pre-tratamiento de salmuera: (a) electrodiálisis, (b) osmosis inversa, (c) destilación de membrana [5]	5
Figura 6. Flujo a través de un módulo de membrana [13] (citado en [11, p.5])	6
Figura 7. Vasija a presión [16] (citado en [11, p.5])	6
Figura 8. Fase de evaporación/cristalización en un dispositivo convencional [5]	8
Figura 9. Mapa de los regímenes de interacción entre partículas y turbulencia [20]	11
Figura 10. Entalpía de cambio de fase de disoluciones de sales marinas, en kJ/kg	14
Figura 11. Elevación del punto de ebullición de disoluciones de sales marinas, en K	14
Figura 12. Geometría del caso base	17
Figura 13. Dimensiones de la geometría del caso base	17
Figura 14. Geometría alternativa con más anchura en el canal vertical	18
Figura 15. Geometría alternativa con entrada brusca en la zona de intercambio	18
Figura 16. Función $y +$ [37]	20
Figura 17: Valor de $y +$ a lo largo de las paredes del dominio	20
Figura 18. Mallado completo del sistema	22
Figura 19. Malla aumentada	22
Figura 20. Codo aumentado con la función Inflation cerca de la pared	23
Figura 21. Conexión del codo con el canal vertical	23
Figura 22. Canal horizontal	24
Figura 23. Canal vertical	24
Figura 24. Inyecciones de salmuera en la fase continua.	26
Figura 25. Contorno de la velocidad a lo largo del dominio	27
Figura 26. Diámetro de las partículas	28
Figura 27. Humedad relativa	29
Figura 28. Temperatura	29
Figura 29. Gráfica de energía cinética turbulenta	30
Figura 30. Fracción másica de H <sub>2</sub> O	30
Figura 31. Presión	31
Figura 32. Evaporación de DPM	31

Figura 33. Gráfica de concentración de DPM	32
Figura 34. Gráfica de evaporación de DPM	32
Figura 35. Gráfica de fracción másica de O <sub>2</sub>	33
Figura 36. Gráfica de fracción másica de H <sub>2</sub> O	33
Figura 37. Gráfica de temperatura	34
Figura 38. Gráfica de velocidad	34
Figura 39. Gráfica de velocidad radial	35
Figura 40. Gráfica de velocidad tangencial	35
Figura 41. Concentración de DPM a distintas alturas del eje y.	38
Figura 42. Energía cinética turbulenta a distintas alturas del eje y	38
Figura 43. Fracción másica de H <sub>2</sub> O a distintas alturas del eje y	39
Figura 44. Humedad relativa a distintas alturas del eje y	39
Figura 45. Temperatura del flujo a distintas alturas del eje y	40
Figura 46. Evaporación de DPM a distintas alturas del eje y	40
Figura 47. Velocidad a distintas alturas del eje y	41
Figura 48. Representación de la temperatura y la humedad relativa para varios caudales de salmuera. Las barras muestran el parámetro en cuestión (izquierda) y la línea el CV (derecha)	43
Figura 49. Diámetro de las partículas para distintos caudales de salmuera	44
Figura 50. Diámetro de las partículas para distintos tamaños de partícula	46
Figura 51. Representación de la temperatura y la humedad relativa para varios tamaños de partícula. Las barras muestran el parámetro en cuestión (izquierda) y la línea el CV (derecha)	46
Figura 52. Representación de la temperatura y la humedad relativa para varias temperaturas de entrada de salmuera. Las barras muestran el parámetro en cuestión (izquierda) y la línea el CV (derecha)	49
Figura 53. Representación de la temperatura y la humedad relativa para varias velocidades del aire a la entrada. Las barras muestran el parámetro en cuestión (izquierda) y la línea el CV (derecha)	50
Figura 54. Gráfica de perfiles de la fracción másica de H <sub>2</sub> O para v=7 m/s a distintas alturas dentro del canal vertical	50
Figura 55. Representación de la temperatura y la humedad relativa para varias temperaturas del aire a la entrada. Las barras muestran el parámetro en cuestión (izquierda) y la línea el CV (derecha)	51
Figura 56. Diámetro de partículas en el caso 1	55
Figura 57. Gráfica de la fracción másica de H <sub>2</sub> O a distintas alturas del eje de ordenadas para el caso 1	55
Figura 58. Gráfica de la temperatura a distintas alturas del eje de ordenadas para el caso 1	56
Figura 59. Posición de las líneas de inyección de salmuera en el caso 2. El valor de las cotas se encuentra en la Figura 13	57
Figura 60. Gráfica de la fracción másica de H <sub>2</sub> O a distintas alturas del eje de ordenadas para el caso 2	57
Figura 61. Diámetro de partículas en el caso 2	58
Figura 62. Temperatura en el caso 2	58
Figura 63. Diámetro de partículas en el caso 3	59
Figura 64. Gráfica del número de elementos de la malla en los distintos casos	62
Figura 65. Gráficas de variación de parámetros índice según el caso	64
Figura 66. Gráficas de variación relativa al caso anterior de los parámetros índice según el caso	65



# Notación

---

ZLD	Zero Liquid Discharge
SOLMIDEFF	Solar Micro gas turbine-driven Desalination for Environmental Off-grid applications
SMGT	Solar Micro Gas Turbine
OMSoP	Optimised Microturbine Solar Power system
FO	Ósmosis convencional
RO	Ósmosis inversa
ED	Electrodialisis
EDR	Electrodialisis reversible
MD	Destilación de membrana
PV	Tubo a presión
CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Simulaciones numéricas directas
CV	Coefficiente de variación
DPM	Lagrangian discrete phase model
EES	Engineering Equation Solver
MIT	Instituto tecnológico de Massachusetts
HR	Humedad relativa
UDF	Función definida por el usuario



# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1. Motivación del proyecto

El objetivo de este trabajo es el diseño, modelado y análisis de un sistema ZLD (Zero Liquid Discharge), uno de los procesos que forman parte de SOLMIDEFF (Solar Micro gas turbine-driven Desalination for Environmental Off-grid applications), un proyecto multidisciplinar cuyo objetivo principal es desarrollar y demostrar una tecnología innovadora, a pequeña escala que posibilite la producción de agua en ubicaciones remotas y sin acceso a electricidad [1]. En este punto se hace una introducción a dicho proyecto, de qué partes se compone, qué áreas de la ingeniería implica y qué aportación ofrece este trabajo.

SOLMIDEFF es un proyecto financiado por el Ministerio de ciencia e innovación y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional que consiste, esencialmente, en el desarrollo conceptual de un sistema de producción de energía eléctrica y agua potable a partir de energía solar, empleando para ello una microturbina de gas solar (SMGT). Este motor, con un diseño optimizado, produce energía eléctrica y térmica que es empleada por una unidad de ósmosis inversa en combinación con un sistema de vertido líquido nulo para producir agua potable con un impacto ambiental prácticamente nulo [2]. La integración de estos sistemas puede verse en la Figura 1 de manera conceptual.

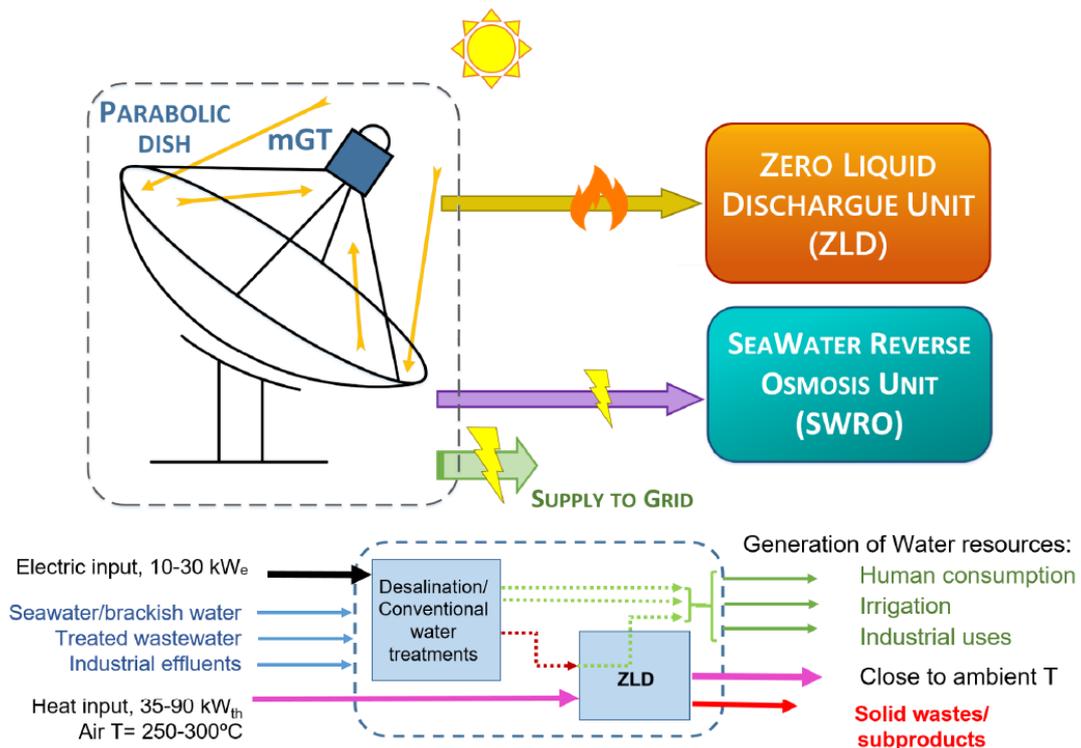


Figura 1. Objetivos principales de SOLMIDEFF [2]

Como se detalla en la propia página web de SOLMIDEFF [1], estos sistemas podrían constituir una solución ideal y rentable para el suministro eléctrico en comunidades aisladas, ya que permite un único sistema generador de energía con mucho menos mantenimiento y costes de operación que otras tecnologías combinadas como fotovoltaica + baterías o fotovoltaica + diésel. Las microturbinas solares en el rango de 5 a 30 kW<sub>e</sub> han sido probadas recientemente en Europa en proyectos como OMSoP [3], demostrando el potencial de producir electricidad (con un coste de 10-15 c€/kWh) y energía térmica a alta temperatura a 250 °C a partir de la energía solar, y permitiendo una fácil hibridación con combustible líquido o gas para regímenes de operación prolongados (o incluso continuos).

El proyecto SOLMIDIFF se compone de actividades teóricas y experimentales, y este trabajo pretende contribuir a este desarrollo mediante la simulación y diseño del proceso óptimo de desalación del sistema ZLD que encaje con las condiciones y características que requiere el proyecto. La motivación principal de desarrollar un proceso de desalación óptimo y a pequeña escala es contribuir al progreso de comunidades en ubicaciones remotas produciendo agua que pueda servir tanto para el consumo humano como para servicios agrícolas. Ya existen tecnologías disponibles para solventar este problema, pero o requieren una potencia eléctrica no disponible (ósmosis inversa dependiente de la energía) o se apoyan en sistemas que no permiten una producción continua de electricidad. Además, el coste de esta tecnología podría ser inadmisiblemente en ciertas ubicaciones [1].

## 1.2. Organización del proyecto

Este trabajo comienza con una descripción del proyecto SOLMIDIFF en el capítulo 2, incluyendo de qué partes se compone y cuál es su fin último, haciendo especial hincapié en el sistema ZLD, marco en el que se desarrolla este trabajo. A lo largo de la subsección 2.1 se desarrolla cómo funciona este dispositivo y los usos que se le puede dar en distintas industrias. El capítulo 3 trata los modelos numéricos empleados según la literatura para proyectos de la misma tipología, describiendo los fenómenos físicos que ocurren en sistemas similares en la subsección 3.1. En las subsecciones 3.2 y 3.3 se centra la atención en la simulación en CFD mediante ANSYS Fluent, detallando cómo se aplican los modelos teóricos a las simulaciones. El capítulo 4 constituye el eje central del proyecto, tratando el caso base propuesto, así como analizando variaciones del mismo. En primer lugar se hace una descripción del sistema y sus características, comentándose las características de la geometría en la subsección 4.1, de la malla diseñada para la simulación en la subsección 4.2 y de las condiciones fluidodinámicas de contorno en ella subsección 4.3. Tras esto, se exponen los resultados obtenidos y se comenta su sentido y fiabilidad en la subsección 4.4. En este último se analizan varios aspectos de los resultados obtenidos: se discute sobre el caso base (término que se empleará a lo largo de este trabajo) en la subsección 4.4.1; y se analiza la influencia que cada una de las variables de contorno tiene sobre el sistema, dejando en evidencia los parámetros que mejor definen los fenómenos que se observan (subsecciones 4.3.1 y 4.3.2). Una vez conocidos todos estos datos, se proponen nuevas condiciones de contorno con el objetivo de mejorar la actuación del caso base en la subsección 4.5. En el capítulo 5 se ejecuta un análisis de sensibilidad de la malla empleada en el caso base, validándola y analizando la influencia que una mayor o menor bondad del mallado puede tener sobre el sistema. El proyecto finaliza con un apartado de conclusiones en el que se hace un resumen de todas las lecciones aprendidas durante la realización del mismo.

## 2 PROYECTO SOLMIDEFF

El funcionamiento del sistema, según la propia documentación de SOLMIDEFF [2] es el siguiente. Un disco parabólico recoge y concentra la energía solar en un plano focal donde se instala la unidad de conversión de potencia (Power Conversion Unit o PCU), la cual se compone de un receptor solar y una microturbina de gas. El compresor de la microturbina aspira aire atmosférico, el cual se comprime y, tras su calentamiento en el intercambiador regenerativo, se introduce en el receptor solar. El receptor también es un intercambiador de calor que transfiere la energía solar concentrada recibida del colector a la corriente entrante de gas presurizado, devolviéndola a alta temperatura y presión. Este aire, típicamente alrededor de los 800°C es expandido en la turbina, donde se produce la potencia para accionar tanto el compresor como el generador eléctrico. Finalmente, antes de ser descargados a la atmósfera, los gases de salida de la turbina son conducidos a través del regenerador para precalentar el aire de entrada en el compresor. Dentro del regenerador, las corrientes fría y caliente suelen disponerse a contracorriente, disposición empleada también en el proyecto OMSoP [3].

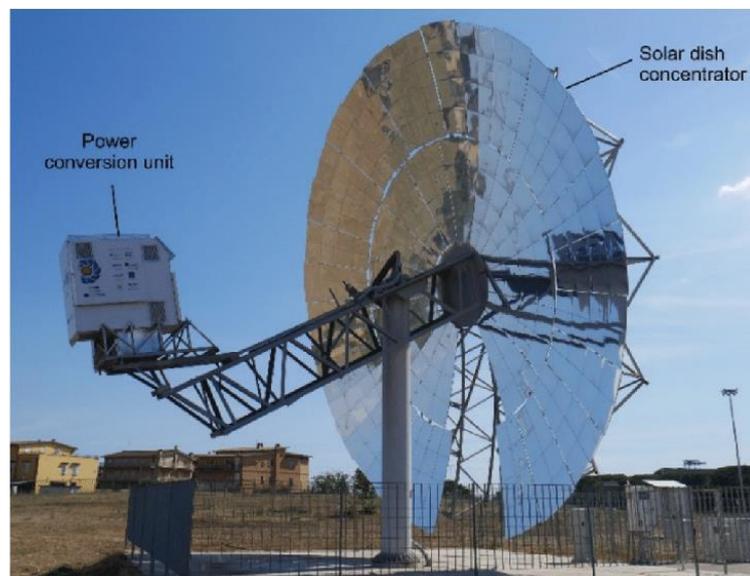


Figura 2. Sistema de disco solar de OMSoP [4]

El segundo subsistema del concepto SOLMIDEFF se compone de dos elementos [2]: un sistema avanzado de desalación basado en tecnología de osmosis inversa y una unidad de ZLD (Zero Liquid Discharge). El sistema de osmosis inversa produce agua dulce y salmuera con una alta concentración de sales, la cual es tratada en un dispositivo de recuperación de agua de la corriente de salmuera por medios térmicos. Este sistema, conocido generalmente como Zero Liquid Discharge (ZLD), es el objeto de este trabajo.

El ZLD es el elemento en el que se centra este trabajo y su funcionamiento, prestaciones y características serán descritas a lo largo del mismo. Ambos sistemas que componen el sistema inferior incorporan profundas innovaciones con respecto a la tecnología actual.

### 2.1. Sistema Zero Liquid Discharge (ZLD)

#### 2.1.1 Objetivos, aplicaciones y funcionamiento

En este subapartado se explica brevemente en qué procesos consiste y de qué partes se compone el sistema ZLD convencional, dejando de lado consideraciones económicas. Como ya se adelantó anteriormente, el Zero Liquid Discharge (ZLD) es realmente proceso de tratamiento de efluentes que se puede emplear en una gran variedad de industrias y cuyo objetivo es eliminar, en la medida de lo posible, el residuo líquido de un vertido. Estos sistemas se pueden emplear para [5]:

- Reducir el gasto de agua residual de una industria, disminuyendo los gastos de gestión de la misma.
- Reciclar agua y, por tanto, disminuir la cantidad de agua demandada por una industria
- Disminuir la cantidad de residuos que vierte al ambiente
- Producir agua limpia apta para su reutilización.

Estos sistemas se emplean en una gran cantidad de campos: industrias químicas, textiles, alimentarias, en plantas de potencia, para potabilización de aguas municipales, reutilización de agua para usos agrícolas, etc. Además, más allá de los beneficios que ofrece, el incremento de las regulaciones medioambientales por parte de los gobiernos alrededor del mundo hace necesaria la implantación de ZLD en un futuro cercano. En la Figura 3 se representa un diagrama que destaca el lugar que generalmente ocupa un ZLD en un proceso industrial:

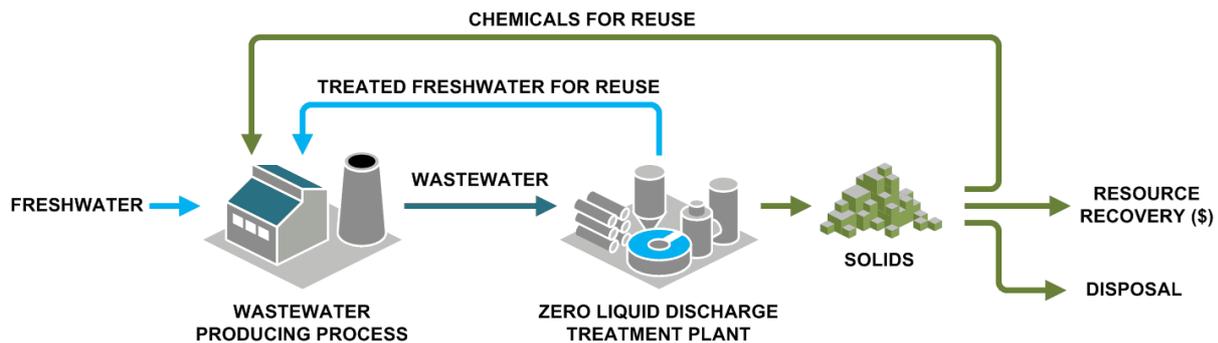


Figura 3. Diagrama de un proceso ZLD [6]

En el caso que nos ocupa, el motivo principal del empleo de un ZLD, como ya se adelantó previamente, es emplear la energía del gas residual procedente de la microturbina de gas para aumentar la salinidad de una salmuera, extrayendo de ella agua que se pueda emplear en otros procesos. Esto tiene el beneficio múltiple de reducir el impacto ambiental, mejorar la manejabilidad del residuo y aumentar el aprovechamiento energético de la energía solar capturada.

El diseño de un ZLD depende de tres factores principalmente: los contaminantes específicos que se puedan encontrar en el flujo que se vaya a tratar, la cantidad de flujo y el volumen del material disuelto. En sistemas convencionales se suelen considerar dos etapas [5]: una primera etapa de pre-concentración, la cual se consigue generalmente con concentradores de salmuera de membrana o electrodiálisis con el objetivo de incrementar la salinidad y recuperar hasta el 60-80% del agua; y una segunda etapa de evaporación/cristalización, la cual se lleva a cabo mediante procesos térmicos, evaporando el agua y recogiénola para su reutilización, además de cristalizando las impurezas para poder tratarlas como sólidos.

### 2.1.2 Tratamientos de membrana

En realidad, un ZLD puede ser diseñado únicamente mediante procesos térmicos con concentradores y cristalizadores, tecnologías ampliamente desarrolladas en grandes industrias tras años de desarrollo tecnológico. Sin embargo, los procesos térmicos requieren una gran inversión de capital y consumen enormes cantidades de energía. Por tanto, el coste de los ZLD puede ser reducido significativamente empleando membranas previamente al tratamiento térmico, como se puede apreciar en la Figura 4.

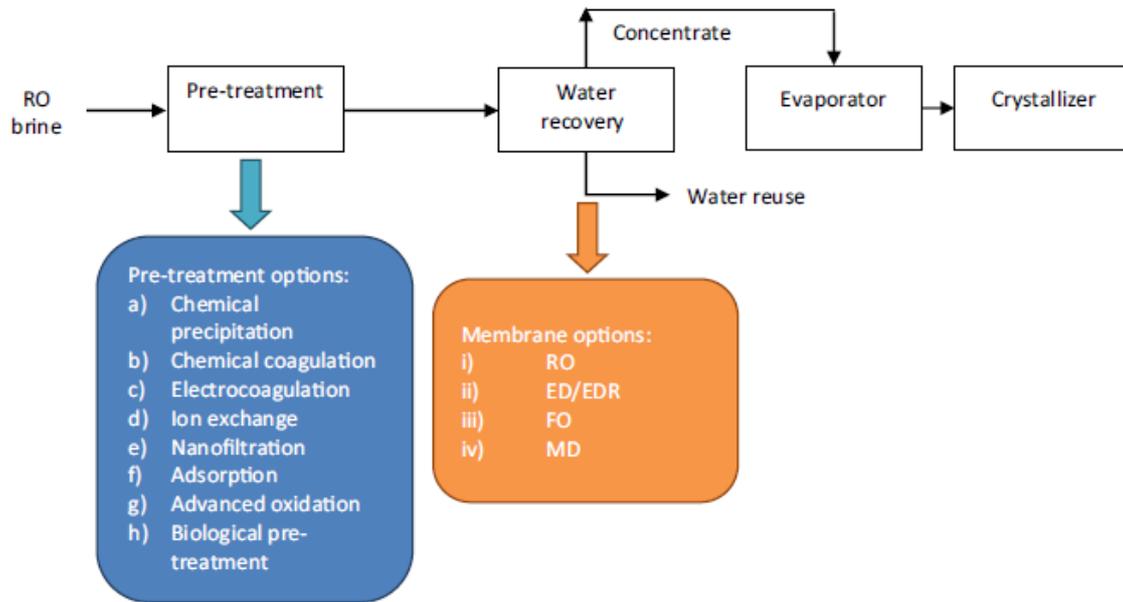


Figura 4. Diagrama de flujo de un proceso ZLD con sistemas de membrana y de tratamiento térmico [7]

En la literatura se han ido proponiendo distintas tecnologías de membrana [7] como la osmosis convencional (FO), la osmosis inversa (RO), la electrodiálisis (ED), la electrodiálisis reversible (EDR) y la destilación de membrana (MD). En la Figura 5 se presenta un esquema del funcionamiento de estas tecnologías.

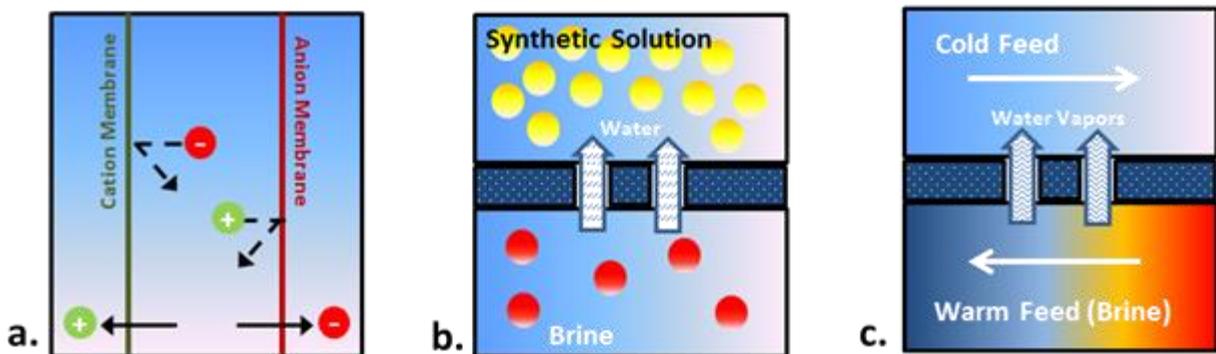


Figura 5. Tecnologías de pre-tratamiento de salmuera: (a) electrodiálisis, (b) osmosis inversa, (c) destilación de membrana [5]

- La ED es un proceso de membrana que emplea electrodos para crear un campo eléctrico que empuja los iones positivos y negativos a través de membranas semipermeables que atrapan los iones positivos y negativos respectivamente
- La RO consiste en una membrana osmótica semipermeable a través de la cual fluye el agua cuando es sometida a una presión superior a la presión osmótica de la disolución en sentido contrario al flujo natural de agua desde la disolución de menor concentración a la más concentrada. De esta forma, se logra separar la sustancia concentrada de la permeada, esta última baja en contenidos disueltos [8]. Ya que este es el sistema empleado en SOLMIDIFF, se profundiza en el funcionamiento de la osmosis inversa en el siguiente subapartado.
- La MD es un proceso de transporte accionado térmicamente en el que la diferencia de presión de vapor entre los dos lados de la membrana hidrófoba permite un intercambio de calor y masa a través de la misma.

### 2.1.3 Ósmosis inversa

En el proyecto SOLMIDIFF el proceso empleado es el de ósmosis inversa (RO), el cual está bien establecido

en la industria y permite recuperar una gran cantidad de agua, por lo que se trata dicho sistema en este subapartado de manera más detallada. Como se comenta en [9], el proceso RO es relativamente nuevo en comparación a otras tecnologías y fue introducido como una tecnología competente en la desalación de agua a principios de los años 70 del siglo XX. Recientemente se han construido grandes plantas de RO en Oriente Medio, particularmente en Arabia Saudí, pues los avances tecnológicos a lo largo de los años han permitido una bajada de precio promedio de la desalación por volumen de agua. En los años 90, el precio estaba sobre 1,5 \$/m<sup>3</sup>, mientras que actualmente ciertas plantas son capaces de producir agua a alrededor de 0,5 \$/m<sup>3</sup> [10].

Siguiendo a [11], la única configuración de las membranas en plantas de desalación son las membranas de poliamida enrolladas en espiral [12] (citado en [11, p.5]). Su configuración se muestra en la Figura 6. Consiste en varias láminas de membrana unidas entre sí por tres lados, quedando el cuarto unido al conducto central. Entre ambas láminas de membranas selladas se introduce un espaciador que generará el hueco por donde circulará el permeado (agua dulce que atraviesa la membrana) en sentido perpendicular al lado abierto. Entre dos pares de membranas selladas se coloca un espaciador de alimentación. En estos espacios circulará la alimentación, que se irá concentrando progresivamente. El conjunto de pares de membranas y espaciadores se enrolla alrededor de un conducto cilíndrico perforado que recogerá en su interior el permeado. Los elementos de membrana se conectan en serie y se instalan dentro de un tubo a presión (PV), cilindros capaces de soportar grandes presiones. El agua a tratar se introduce en el sistema aplicando trabajo, fluye a través de un camino en espiral y se recoge en el colector central. El resto del flujo de alimentación fluye de forma paralela al colector, por donde sale la sal retenida por el lado opuesto de la PV. [13]–[15] (citados en [11, p.5])

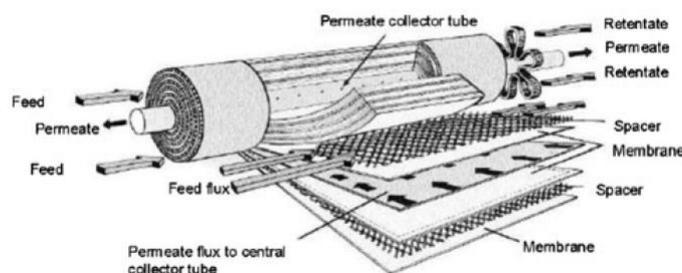


Figura 6. Flujo a través de un módulo de membrana [13] (citado en [11, p.5])

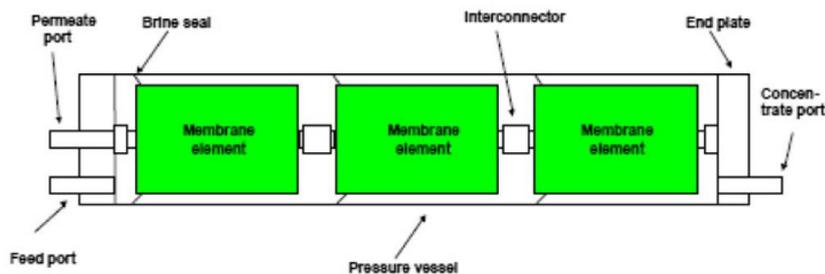


Figura 7. Vasija a presión [16] (citado en [11, p.5])

Las membranas no retienen el 100% de las sales. La capacidad de estas para filtrar depende de la concentración y temperatura del flujo de entrada, la concentración de sales en el flujo de salida, del tipo de membrana empleada y de la configuración de la planta o sistema [15] (citado en [11, p.5]). Aunque el índice de recuperación depende principalmente de la presión osmótica, también depende directamente del tamaño de los elementos de membrana, pues estos tienen una longitud determinada (normalmente 1 m). Para conseguir un porcentaje de extracción de permeado aceptable (para agua de mar se considera aceptable un 45%), es necesaria la instalación de 7 u 8 elementos en serie por cada PV [15]–[17] (citados en [11, p.5]).

Como cualquier otra tecnología, el proceso de osmosis inversa tiene ventajas y desventajas [9]:

- (i) Los problemas de corrosión de los materiales son significativamente menores comparados con los procesos térmicos debido a la operación de temperatura ambiente.
- (ii) Dos avances en particular de esta tecnología la han hecho alcanzar un dominio absoluto de la industria de la desalación.

- a. El desarrollo de membranas con gran durabilidad y precios bajos.
  - b. El uso de dispositivos de alta eficiencia para la recuperación de energía de la salmuera.
- (iii) La precipitación de sales resultando incrustaciones sobre las superficies es un problema común en los procesos de RO, pero con menos afectación que en la destilación flash multietapa.
- (iv) Las membranas en operación sufren ensuciamiento por materia orgánica e inorgánica depositada en la superficie de la membrana. El ensuciamiento también ocurre sobre las superficies de intercambio de los sistemas térmicos. El pretratamiento del agua salada de alimentación, así como limpiezas periódicas de las membranas minimizan el efecto del ensuciamiento.

#### **2.1.4 Tratamientos térmicos convencionales**

Tras la pre-concentración de los residuos, y la producción de una parte del agua producto, se produce la evaporación de la mayoría del líquido presente en la salmuera. Para ello se recurre a uno o varios evaporadores, con el objetivo de concentrar sólidos no volátiles de un solvente. Los evaporadores, generalmente, incluyen un intercambiador de calor cuya misión es evaporar la solución y además suelen tener un sistema para separar el vapor de la solución en ebullición. Los tipos de evaporadores pueden clasificarse según su tamaño y posición (horizontal o vertical) de los tubos por los que fluye el vapor. A fin de reducir la temperatura de operación de los evaporadores, ya sea por falta de una fuente de energía térmica a elevada temperatura o para reducir el coste de los materiales, estos evaporadores suelen operar a presiones reducidas para reducir el punto de ebullición, lo que requiere una bomba de vacío en el último efecto del evaporador [18]. El evaporador es elegido en base a varios factores como el caudal a tratar, la viscosidad de la solución, la naturaleza del fluido, etc. El proceso de evaporación suele detenerse justo antes de que el soluto empieza a precipitar, pues de otra forma sería considerado cristalización.

El presente trabajo irá enfocado en gran parte al proceso de evaporación, pues este se basa en el fenómeno de enfriamiento evaporativo. Un sistema de introducción de gotas pondrá la salmuera en contacto con los gases calientes que salen del motor, absorbiendo el calor sensible para evaporar el agua de la salmuera que pasa de esta manera a saturar (o casi) dicha corriente de gases. Este fenómeno se ve influenciado por variables físicas como la velocidad de los fluidos que intervienen, la distribución del tamaño de las gotas o las interacciones entre gotas y entre las fases continua y discreta; y también por variables psicrométricas como la humedad relativa del aire o la temperatura. Cabe destacar que la salinidad del agua influirá de manera determinante en la temperatura de ebullición de las gotas, pues a mayor salinidad se necesitará más calor latente para tratar dicho caudal, como se detalla en apartados posteriores.

La salmuera que sale del evaporador en un sistema convencional suele enviarse a un cristizador de circulación forzada, donde se concentra el agua más allá de la solubilidad del fluido, formándose cristales. El agua condensada resultante de estos tres pasos es devuelta al proceso. Finalmente, el residuo sólido es destinado a su reutilización o a un vertedero.

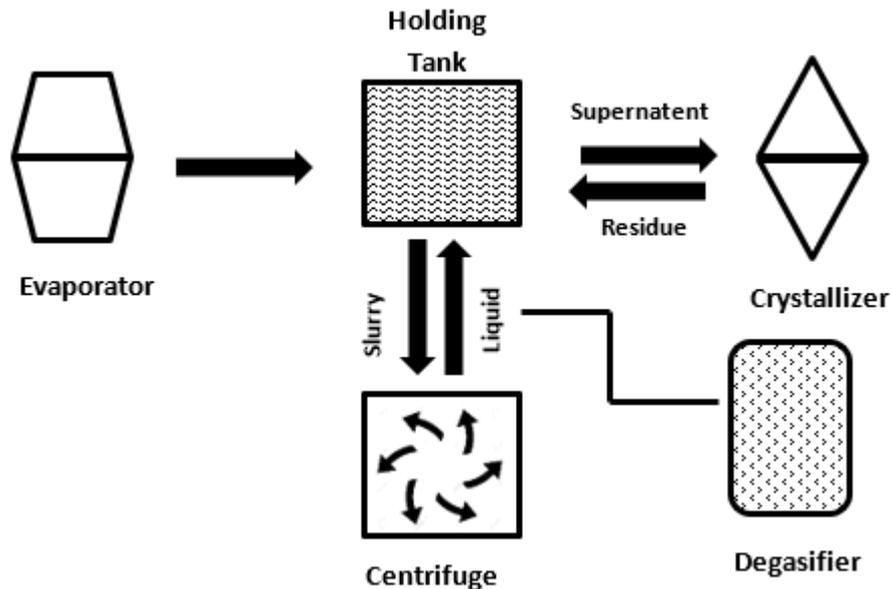


Figura 8. Fase de evaporación/cristalización en un dispositivo convencional [5]

Típicamente, el tratamiento del concentrado mediante un sistema ZLD convencional tiene la desventaja de ser un proceso técnicamente complejo, muy caro y no necesariamente respetuoso con el medio ambiente debido a la cantidad de material y energía que requiere. Esto motiva la innovación en el ZLD que se plantea como uno de los objetivos del proyecto SOLMIDEFF. En este escenario, también cabe mencionar la existencia de otro sistema de tratamiento de agua: el Minimal Liquid Discharge (MLD). Consiste en abordar tratamientos de aguas residuales mediante tecnologías basadas en la filtración, consiguiendo una alta fracción de agua recuperada por un precio mucho menor. Ahora bien, el ZLD desarrollado en SOLMIDEFF no presenta estos inconvenientes, ya que funciona a partir de energía térmica residual, disponible en la instalación de producción de potencia pero no empleada para la producción de energía eléctrica. Además, el diseño adoptado es tal que el coste es muy reducido, tanto por la temperatura de operación ( $<200^{\circ}\text{C}$ ) como por la simplicidad del diseño. En el capítulo 4 se hará un análisis más detallado del proyecto concreto que nos ocupa.

# 3 MODELO DE CÁLCULO

Como se ha comentado previamente, el presente proyecto de diseño y análisis de un sistema ZLD es una innovación respecto del sistema de ZLD convencional, un dispositivo que empleando técnicas fluidodinámicas conocidas anteriormente ofrece un servicio no accesible con anterioridad. Sin embargo, es un sistema cuyos procesos fluidodinámicos tienen características en común con muchos otros sistemas en la industria: fenómenos de dispersión, enfriamiento evaporativo, entre otros. Como indicaba Loth en su artículo sobre los enfoques numéricos de los sistemas consistentes en el movimiento de partículas dispersas [19], se pueden encontrar flujos bifásicos de esta índole en muchos sistemas ingenieriles, incluyendo aplicaciones aeroespaciales, biológicas, químicas, civiles, mecánicas y nucleares. Un mejor entendimiento de las interacciones entre las dos fases puede llevar a incrementos de rendimiento, reducciones de coste y mejoras en la seguridad de estos sistemas. Para abordar estas cuestiones, las técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional, o *Computational Fluid Dynamics* (CFD), se han convertido en una herramienta indispensable. Así pues, en los sucesivos subapartados se presentarán las ecuaciones que gobiernan el sistema ZLD, aunque también se prestará atención a su resolución numérica. Se hará especial énfasis en el proceso de enfriamiento evaporativo.

## 3.1. Fundamento físico

Para describir los regímenes del fluido que estamos considerando, se requieren algunas definiciones esenciales. Siguiendo a Loth [19], una “partícula” será definida en este trabajo como un cuerpo independiente en un fluido cuyo movimiento está controlado principalmente por fuerzas convectivas y/o de gravedad. Aunque esta definición sea válida para referenciar tanto partículas sólidas (por ejemplo, polvo u hollín) como fluidas (por ejemplo, una gota o una burbuja), en este trabajo solo se nombrará como partícula a las gotas de agua. El conjunto de estas partículas también recibirá el nombre de “fase discreta” (más adelante se explica el motivo de esta denominación) a lo largo de este trabajo, así como “fase particulada”, “fase transportada” o “fase dispersa”. El fluido que rodea a la partícula (por ejemplo, gas o líquido) será referido como el “fluido continuo”, “fase continua”, “fase transportadora” o “flujo transportador” (pues define la trayectoria de la fase discreta). El fluido que constituye la fase transportadora se considera continuo con respecto a la fase transportada y el tamaño de la partícula se asumirá pequeño en comparación al sistema en el que se encuentra.

### 3.1.1 Suposiciones y criterios respecto a regímenes bifásicos

Antes de imponer unas condiciones al CFD para analizar su respuesta y diseñar el sistema es menester describir brevemente qué técnicas se han estado empleado en ingeniería según la literatura para predecir el comportamiento de las partículas conducidas por un flujo continuo. A continuación se expresan, siguiendo a Elghobashi [20], los retos y progresos asociados con la tarea de predecir numéricamente el comportamiento de los flujos turbulentos conductores de partículas. Este apartado recoge métodos matemáticos basados en modelos de turbulencias, así como simulaciones numéricas directas (DNS). Quizá sea útil mencionar los desafíos que conlleva intentar predecir este tipo de flujos:

- (i) Una característica significativa de estos flujos es el amplio espectro de longitudes y tiempos característicos (*time and length-scales*) que se deben manejar habitualmente. Estas escalas están relacionadas con la física microscópica de la fase dispersa, por un lado, y las grandes estructuras turbulentas que están presentes en el flujo principal. La complejidad que puede conllevar la gestión de todos estos datos puede ser un problema de cara a la computación de las ecuaciones intervinientes.
- (ii) A pesar de los numerosos esfuerzos dedicados al estudio de los fenómenos turbulentos en flujos libres de partículas durante las últimas décadas, la comprensión de dichos fenómenos sigue siendo incompleta debido a la falta de universalidad en su caracterización matemática. Este hecho constituye un límite al entendimiento actual de flujos turbulentos conductores de partículas más complejos.

Estos dos desafíos resultaron en el desarrollo de tratamientos matemáticos con distintos niveles de sofisticación

para predecir estos flujos. A continuación, se revisan brevemente estos métodos. Cabe destacar que la validación última de cualquiera de estos métodos para asegurar una calidad aceptable de los mismos queda determinada por la comparación de estas predicciones con experimentos bien definidos.

Como explica Sorato [21] en su tesis “*Methodology to analyse three dimensional droplet dispersion applicable to Icing Wind Tunnels*” (caso similar al que nos ocupa), la interacción entre partículas y fase gaseosa, que controla el proceso de dispersión, depende de las propiedades locales del flujo y de las propiedades de la mezcla, caracterizadas por el material o fluido de la fase discreta (densidad), sus propiedades geométricas (tamaño y forma de la gota/partícula) y su fracción volumétrica. Dependiendo de la cantidad de agua que se encuentre en el gas y la distribución del tamaño de gotas pueden existir diferentes interacciones recíprocas entre ambos fluidos. La cantidad de agua que se encuentre en el gas, identificado en términos de carga, da una clasificación primaria de las características de la mezcla.

La condición diluida, descrita como una baja concentración de la fase dispersa, es considerada según Loth [19] cuando los efectos de la interacción partícula-partícula se consideran despreciables. Más adelante, en el apartado relativo al CFD, se concreta esta distinción y se comenta qué implicaciones tiene en la resolución numérica por parte del CFD. Las interacciones entre partículas pueden dar lugar a dos escenarios distintos: colisión directa partícula-partícula (donde las partículas pueden fusionarse o colisionar entre ellas) o interacción dinámica de fluidos partícula-partícula (donde la proximidad de las partículas y su efecto estela afecten a sus fuerzas aerodinámicas).

Dependiendo de qué interacciones se produzcan entre la fase continua y la fase discreta, los sistemas de flujo turbulento con fase dispersa se recogen habitualmente en la literatura siguiendo una clasificación que permita tener una primera aproximación sobre el comportamiento del flujo bifásico. Esta primera clasificación es la siguiente [20]:

- *One-way coupling*: este régimen particular considera despreciable el efecto de la partícula sobre la fase transportadora y sólo se considera la acción de la fase transportadora sobre la partícula. El campo fluido de la corriente de gas se considera independiente de la presencia de partículas (gotas) y los cálculos para su movimiento pueden hacerse “a priori” resolviendo sus propias ecuaciones. Según datos encontrados en la literatura, este régimen puede encontrarse para cargas volumétricas ( $\varphi_p$ , parámetro definido en la página siguiente) de partículas inferiores a  $\sim 10^{-6}$ .
- *Two-way coupling*: en flujos de dos fases generalmente se denota una importante transferencia de masa, cantidad de movimiento y/o energía a través de la interfase, lo cual es importante para la descripción dinámica de los fluidos en ambas fases. Con una mayor carga de partículas, la fase particulada comienza a influir sobre el movimiento de la fase transportadora, existiendo una transferencia de cantidad de movimiento por parte de las partículas lo suficientemente grande como para alterar la estructura de los fenómenos turbulentos. Bajo estas circunstancias, el nivel de turbulencia puede ser atenuado o incrementado, dependiendo de las características de la partícula y de las velocidades relativas: dada una fracción volumétrica y bajando el tiempo de respuesta de la partícula (por ejemplo, bajando el diámetro de las partículas para el mismo material de partícula y viscosidad del fluido) aumenta el área de superficie de la fase discreta, contribuyendo a la disipación de energía de los fenómenos turbulentos. Esto se puede observar con facilidad en la Figura 9. Por otro lado, aumentar el tiempo de respuesta de la partícula para una fracción volumétrica constante daría como resultado un aumento del número de Reynolds, incrementando la energía de los fenómenos turbulentos. Como se menciona en [21], las ecuaciones de la fase fluida y de la fase discreta deben de ser resueltas simultáneamente. Las condiciones de contorno para el *two-way coupling* suelen establecerse para cargas volumétricas de entre  $10^{-5}$  y  $10^{-2}$ .
- *Four-way coupling*: si la carga de partículas se incrementa aún más, las interacciones partícula-partícula deben ser tenidas en cuenta (colisiones, interacciones hidrodinámicas). En este régimen, la distribución de partículas puede volverse significativamente no aleatoria, con grandes regiones sin presencia de partículas. Debido a la gran carga de partículas, en este régimen decimos que existen suspensiones densas. No se hará un mayor análisis de este régimen pues tiene una mayor complejidad que los anteriores y, además, en este trabajo se discutirá si nos encontramos en *one-way coupling* o *two-way coupling*, pero en ningún caso en *four-way coupling*; pues la concentración y tamaño de partícula tiene

que ser lo suficientemente pequeña en consonancia con el resto de variables que intervienen como para que el agua se evapore.

En el mapa clasificatorio de la Figura 9 se puede observar qué interacciones se producen entre partículas y fluido teniendo en cuenta diversos factores. Las coordenadas adimensionales que aparecen en la figura están definidas a continuación.

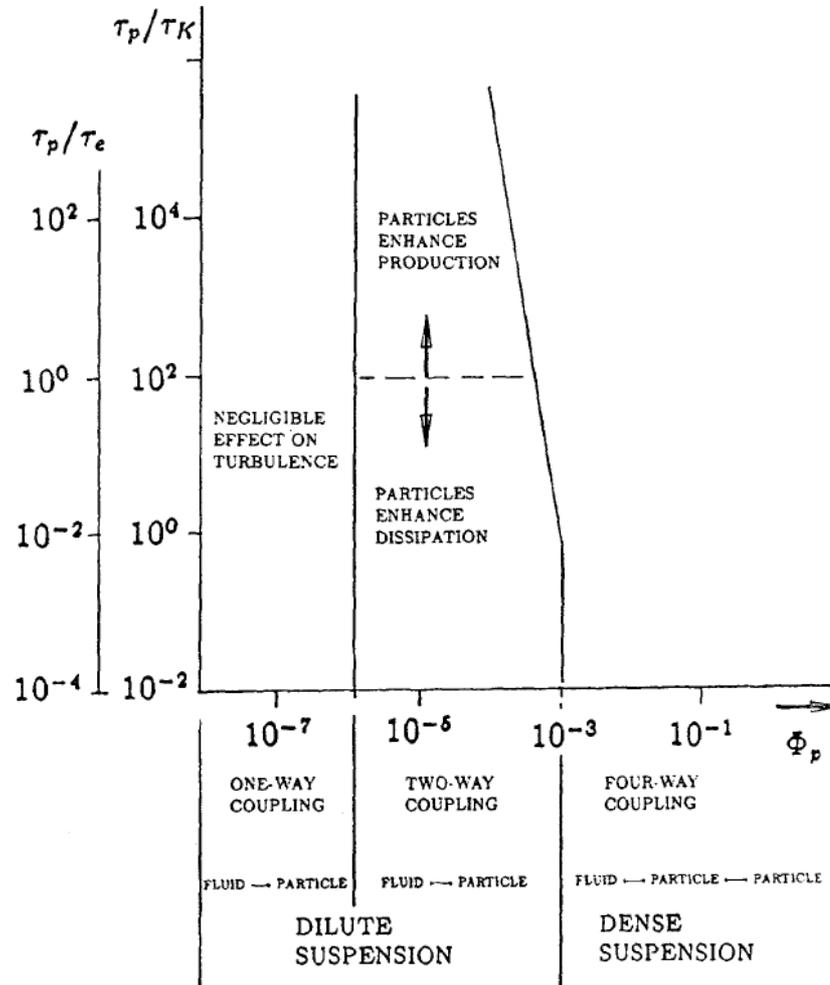


Figura 9. Mapa de los regímenes de interacción entre partículas y turbulencia [20]

Siendo:

- $\varphi_p$ : Fracción volumétrica de las partículas,  $\varphi_p = MV_p/V$
- $M$ : Número de partículas
- $V_p$ : Volumen de una única partícula
- $V$ : Volumen ocupado por partículas y fluido
- $d$ : Diámetro de la partícula
- $\tau_p$ : Tiempo de respuesta de la partícula  $= \rho_p d^2 / (18\rho_f \nu)$
- $\tau_K$ : Escala de tiempo de Kolmogorov  $= (\nu/\varepsilon)^{1/2}$
- $\tau_e$ : Tiempo de rotación de un vórtice de gran tamaño  $= l/u$

En estas definiciones,  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido,  $l$  es la longitud característica de la energía contenida en los torbellinos,  $u$  es la velocidad del fluido y  $\varepsilon$  es la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta.

Para tener una idea superficial sobre el comportamiento del sistema, se observará en qué categoría de las tres descritas se podría clasificar a nuestro sistema y se mencionará junto con los resultados en el subapartado correspondiente

### 3.2. Métodos de resolución en CFD de flujos turbulentos conductores de partículas

Una forma completa de determinar el comportamiento de un fluido turbulento es el método de simulación numérica directa (DNS). Este consiste en la resolución completa de las ecuaciones de Navier-Stokes para obtener el campo de velocidades completo del flujo turbulento en todas las escalas (sin emplear modelos de aproximación para las escalas de menor longitud características). Aunque este podría ser el medio más deseable para tener la mayor precisión del comportamiento de los fluidos, en la práctica no es posible su aplicación debido a la gran complejidad y coste computacional que supondría, pues este método conlleva la resolución exacta de las ecuaciones de Navier-Stokes de cada partícula del fluido, computando todas las escalas de torbellinos que puedan existir en el problema. Este método, debido a las limitaciones anteriormente descritas, está restringido a dominios pequeños.

Otra opción mucho menos compleja que la anterior es emplear aproximaciones adecuadas de las ecuaciones de Navier-Stokes incorporando modelos de turbulencia para caracterizar el comportamiento de los fenómenos turbulentos de menor longitud característica. Esta técnica de simulación se conoce como ‘Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) Equations’ y, aunque no proporciona la solución exacta del dominio fluido, sí permite abordar problemas complejos y de gran carga computacional. Existen diversas clases de modelos de turbulencias para la simulaciones mediante RANS [30]:

- (i) *Zero-equation models*. En esta categoría solo se resuelve un sistema diferencial de ecuaciones parciales (PDEs) para el flujo principal.
- (ii) *One-equation models*. Con respecto al (i), esta categoría implica una ecuación de transporte adicional para el cálculo de la velocidad en la escala turbulenta, normalmente expresada en términos de la energía cinética turbulenta media ( $k$ ).
- (iii) *Two-equation models*. Con respecto al (ii), esta categoría implica una ecuación de transporte adicional para el cálculo de la longitud característica de la escala turbulenta, normalmente en términos de la disipación de energía cinética turbulenta ( $\varepsilon$ ).
- (iv) *Stress-equation models*. Con respecto a (i), esta categoría implica un número de ecuaciones adicionales de transporte para los componentes del tensor de tensiones de Reynolds ( $\tau_{ij}$ ) y uno por el índice escalar de la disipación de energía cinética turbulenta ( $\varepsilon$ ). Por este motivo, los modelos de la categoría (iv) son también llamados los modelos ( $\tau_{ij} - \varepsilon$ )

Un método intermedio entre los anteriores es el conocido como *Large Eddy Simulations* (LES) o simulación de grandes vórtices [20] en el cual se resuelven las ecuaciones del flujo para los fenómenos turbulentos de mayor longitud características mientras los de menor escala son resueltos mediante modelos simplificados. Esta solución constituye un punto intermedio de complejidad entre la resolución completa de las ecuaciones de Navier-Stokes (DNS) y la simplificación que implica emplear modelos para conocer el comportamiento de los fluidos (RANS).

En el apartado 164 se especifica qué método se emplea en este problema y por qué motivos.

### 3.3. Propiedades termodinámicas y estimaciones preliminares

Una estimación de la cantidad de agua que puede evaporar una cierta cantidad de gas caliente (proveniente en la aplicación real del escape de una turbina de gas) podría ser realmente útil para afrontar la simulación del sistema ZLD mediante CFD, teniendo unas nociones básicas de cómo se comporta el sistema. En primer lugar, se presenta un cálculo aproximado de la relación de masas entre fases, de manera simplificada, suponiendo una entalpía de cambio de fase del agua salada y una temperatura de vaporización que no se ven afectados por la salinidad de la misma.

A fin de realizar este cálculo, se considera el sistema ZLD como si fuera un intercambiador de calor en el cual se aplica el principio de conservación de energía. Para ello se considera igualmente que el intercambio de calor entre fases (fluidos) sólo se produce en el proceso de evaporación y que la diferencia mínima de temperaturas entre fluidos es nula ( $\delta T = 0$ ):

$$m_g \cdot C_{pg} \cdot (T_E - T_{sat}) \approx m_s \cdot (\Delta h_{vap}) \quad (1)$$

$$\frac{m_s}{m_g} = 0,1969 \approx 0,2 \quad (2)$$

Siendo:

- $C_{pg} = 1,05 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  la capacidad térmica isobárica másica del gas
- $\Delta h_{vap} = 2257 \text{ kJ/kg}$  la entalpía de cambio de fase del agua
- $T_E = 250 \text{ }^\circ\text{C}$  la temperatura de entrada del gas
- $T_{sat}=100 \text{ }^\circ\text{C}$  la temperatura de saturación del agua
- $m_g$  el caudal de gas
- $m_s$  el caudal de salmuera

No obstante lo anterior, la existencia de salmuera (en lugar de agua dulce) podría cambiar estos resultados, pues la temperatura de vaporización y la entalpía de cambio de fase cambiarían con la concentración de la misma. Estas variaciones se pueden observar en las figuras Figura 10. y Figura 11. y en las tablas Tabla 1 y Tabla 2, documentación procedente de la librería de propiedades termofísicas del agua salada del Instituto Tecnológico de Massachusetts MIT [31] referidas a disoluciones de sales marinas. Estos datos están recogidos a una presión de 1 atm para temperaturas menores de  $100^\circ\text{C}$  y a la temperatura de la presión de vapor de agua de mar para temperaturas mayores de  $100^\circ\text{C}$ .

Temp. °C	Salinity, g/kg												
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
0	2500.9	2475.9	2450.9	2425.9	2400.9	2375.9	2350.8	2325.8	2300.8	2275.8	2250.8	2225.8	2200.8
10	2477.2	2452.5	2427.7	2402.9	2378.1	2353.4	2328.6	2303.8	2279.0	2254.3	2229.5	2204.7	2180.0
20	2453.6	2429.0	2404.5	2379.9	2355.4	2330.9	2306.3	2281.8	2257.3	2232.7	2208.2	2183.7	2159.1
30	2429.8	2405.5	2381.2	2356.9	2332.6	2308.3	2284.0	2259.7	2235.4	2211.1	2186.8	2162.5	2138.2
40	2406.0	2381.9	2357.9	2333.8	2309.7	2285.7	2261.6	2237.6	2213.5	2189.4	2165.4	2141.3	2117.3
50	2382.0	2358.1	2334.3	2310.5	2286.7	2262.9	2239.0	2215.2	2191.4	2167.6	2143.8	2120.0	2096.1
60	2357.7	2334.1	2310.5	2287.0	2263.4	2239.8	2216.2	2192.7	2169.1	2145.5	2121.9	2098.3	2074.8
70	2333.1	2309.8	2286.4	2263.1	2239.8	2216.4	2193.1	2169.8	2146.4	2123.1	2099.8	2076.5	2053.1
80	2308.1	2285.0	2261.9	2238.8	2215.8	2192.7	2169.6	2146.5	2123.4	2100.4	2077.3	2054.2	2031.1
90	2282.6	2259.7	2236.9	2214.1	2191.3	2168.4	2145.6	2122.8	2100.0	2077.1	2054.3	2031.5	2008.7
100	2256.5	2233.9	2211.3	2188.8	2166.2	2143.7	2121.1	2098.5	2076.0	2053.4	2030.8	2008.3	1985.7
110	2229.7	2207.4	2185.1	2162.8	2140.5	2118.2	2095.9	2073.6	2051.3	2029.0	2006.7	1984.4	1962.1
120	2202.1	2180.1	2158.1	2136.1	2114.1	2092.0	2070.0	2048.0	2026.0	2003.9	1981.9	1959.9	1937.9

Tabla 1. Entalpía de cambio de fase de disoluciones de sales marinas, en kJ/kg

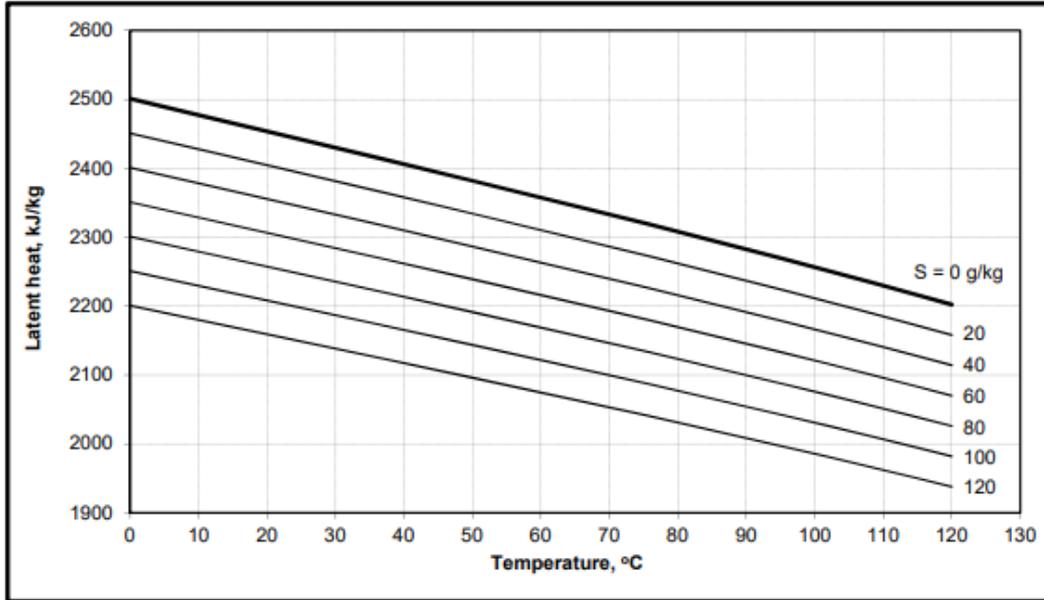


Figura 10. Entalpía de cambio de fase de disoluciones de sales marinas, en kJ/kg

Temp., °C	Salinity, g/kg											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
0	0.067	0.138	0.213	0.291	0.373	0.458	0.547	0.640	0.736	0.836	0.939	1.046
10	0.073	0.150	0.232	0.317	0.407	0.501	0.599	0.701	0.807	0.917	1.032	1.151
20	0.079	0.163	0.251	0.344	0.442	0.545	0.652	0.764	0.880	1.002	1.128	1.258
30	0.085	0.176	0.272	0.373	0.479	0.590	0.707	0.829	0.956	1.088	1.225	1.368
40	0.092	0.190	0.293	0.402	0.517	0.637	0.764	0.895	1.033	1.176	1.325	1.480
50	0.099	0.204	0.315	0.433	0.556	0.686	0.822	0.964	1.112	1.267	1.428	1.595
60	0.106	0.219	0.338	0.464	0.597	0.736	0.882	1.035	1.194	1.360	1.532	1.711
70	0.114	0.234	0.362	0.497	0.639	0.788	0.944	1.107	1.277	1.455	1.639	1.831
80	0.121	0.250	0.387	0.530	0.682	0.841	1.007	1.181	1.363	1.552	1.748	1.952
90	0.129	0.267	0.412	0.565	0.726	0.895	1.072	1.257	1.450	1.651	1.860	2.076
100	0.138	0.284	0.438	0.601	0.772	0.952	1.139	1.335	1.540	1.752	1.973	2.203
110	0.146	0.302	0.465	0.638	0.819	1.009	1.208	1.415	1.631	1.856	2.089	2.331
120	0.155	0.320	0.493	0.676	0.868	1.068	1.278	1.497	1.725	1.962	2.207	2.462

Tabla 2. Elevación del punto de ebullición de disoluciones de sales marinas, en K

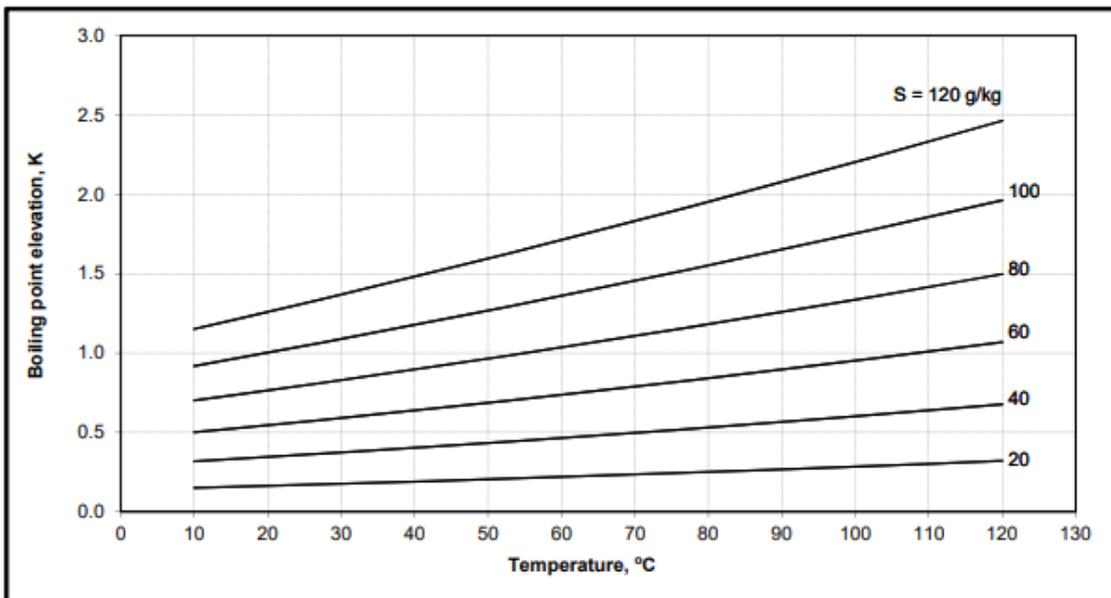


Figura 11. Elevación del punto de ebullición de disoluciones de sales marinas, en K

Este efecto se estudiará en la siguiente sección, sabiendo que el orden de magnitud de la salinidad de la corriente de salmuera que sale del proceso de osmosis inversa se estudiará en el rango entre 40000 y 50000 ppm que, en mg/kg, implica un rango entre 40 y 50 mg/kg. Aunque no se ha tratado aún la temperatura de la salmuera entrante

en el caso que nos ocupa, en estos datos aportados vemos una elevación máxima de la temperatura de saturación que ronda el 2% y una disminución máxima del calor latente que ronda el 12%. Estos datos se deben tener en cuenta en las simulaciones en CFD pues los cambios en estos parámetros y su influencia sobre el sistema pueden llegar a ser muy significativos según la concentración y temperatura de la corriente de salmuera entrante.

## 4 SIMULACIÓN CON CFD

El flujo bifásico en sistemas de enfriamiento evaporativo, como el existente en nuestro sistema, se ve influenciado por gran cantidad de parámetros: velocidad, temperatura y humedad relativa de la fase continua; distribución de tamaños de gota, velocidad y temperatura de las gotas; y las interacciones que puedan existir entre gotas o entre gotas y fase continua. Para conocer el funcionamiento de nuestro sistema de manera fiable y lo suficientemente precisa, es importante saber el impacto de cada parámetro. Los programas CFD (*Computational Fluid Dynamics*) son herramientas valiosas para analizar las variaciones y comportamiento de estos parámetros.

Como se menciona en [32], existen tres métodos principales para evaluar la actuación del enfriamiento evaporativo: medidas a gran escala, medidas en túnel de viento y simulaciones numéricas con CFD. Las medidas a gran escala ofrecen la ventaja de que se estudia la situación real, teniendo en cuenta toda la complejidad del problema. Sin embargo, no se puede tener control total sobre las condiciones de contorno por lo que la experimentación queda limitada. Las medidas a pequeña escala en túnel de viento permiten un gran control sobre las condiciones de contorno, aunque se requiere garantizar un buen número de condiciones de semejanza entre el experimento y el sistema real, algo que frecuentemente no es posible. Además, las medidas en el túnel de viento son habitualmente tomadas en un número limitado de puntos en el espacio de estudio (sección de ensayo) mientras que el CFD nos ofrece datos de los parámetros relevantes sobre el dominio completo.

A diferencia del test en el túnel de viento, las herramientas CFD permiten recrear con exactitud todos los detalles y parámetros del sistema que queremos medir. Las simulaciones en CFD permiten evaluar distintas configuraciones de diseño, especialmente cuando las distintas configuraciones son, a priori, en base al mismo dominio computacional y mallado. Sin embargo, es necesario asegurar la precisión y fiabilidad del CFD por lo que es imperativa la verificación y validación de los estudios realizados. Con estas consideraciones, el uso del CFD se está incrementando en el estudio de un enorme rango de procesos atmosféricos y medioambientales como, por ejemplo, la dispersión de la contaminación en el aire, el efecto del viento sobre la lluvia o la transferencia de calor convectiva. Dadas las ventajas que esta herramienta proporciona, podría proporcionar una aproximación muy buena al funcionamiento fluidodinámico del ZLD.

El software empleado en este trabajo ha sido ANSYS Fluent. Según la propia documentación de ANSYS [33], este programa es capaz de analizar los siguientes datos del modelo: cálculo de la trayectoria de la fase discreta usando formulación que incluya la inercia de la misma, arrastre hidrodinámico y fuerza de la gravedad; predicción de los efectos de la turbulencia en la dispersión de las partículas debido a torbellinos turbulentos presentes en la fase continua; calentamiento o enfriamiento de la fase discreta; vaporización y ebullición de gotas líquidas; combustión de partículas; y ruptura y coalescencia de gotas. Todas estas opciones de modelado de las que dispone el programa permiten hacer una simulación precisa, fiel y completa del proceso de introducción de las gotas y evaporación en la zona de intercambio, incluyendo todos los aspectos físicos y fluidodinámicos presentes en el problema.

Los apartados sucesivos se centran en el sistema que nos ocupa, haciendo un análisis profundo de las peculiaridades del sistema, los valores de los parámetros que lo definen y de los resultados obtenidos. En primer lugar se describe el caso base para, en el apartado de resultados, tratar casos modificados con el objetivo de compararlos.

### 4.1. Geometría

La geometría del sistema será bidimensional, lo cual representa suficientemente el problema para poder ser estudiado con fiabilidad. La geometría del evaporador consiste en un canal vertical que se conecta mediante un codo con una entrada horizontal en el que el intercambio de energía se produce a contracorriente: el gas caliente

entra horizontalmente y, tras pasar por un codo, asciende y se encuentra con la salmuera, la cual se inyecta a contracorriente y por gravedad a cierta altura dentro del canal. Al final del canal, en la parte superior, se encuentra la salida (outlet) por donde sale el gas humedecido por el agua de la salmuera que se ha evaporado. El resto de superficies de la geometría son paredes adiabáticas (las propiedades de las paredes se comentarán más adelante). Se ha adoptado un modelo bidimensional con la función *Design Modeler* dentro de ANSYS, una herramienta lo suficientemente versátil como para obtener una geometría sencilla como es el caso que nos ocupa. Concretamente, la geometría base a partir de la cual se ha simulado el problema queda representada en la Figura 12, con sus dimensiones dadas en la Figura 13. El canal tiene una anchura de 1 metro en toda su longitud y está dividido en tres partes para afinar el posterior mallado: canal horizontal, codo y canal vertical. Esta división se puede ver en la figura con las tres partes divididas por líneas azules. La geometría tiene una longitud suficiente como para garantizar la no influencia de las condiciones de contorno. Además, como se verá en siguientes apartados, con esta geometría se satisfacen los objetivos que se persiguen en este proyecto.

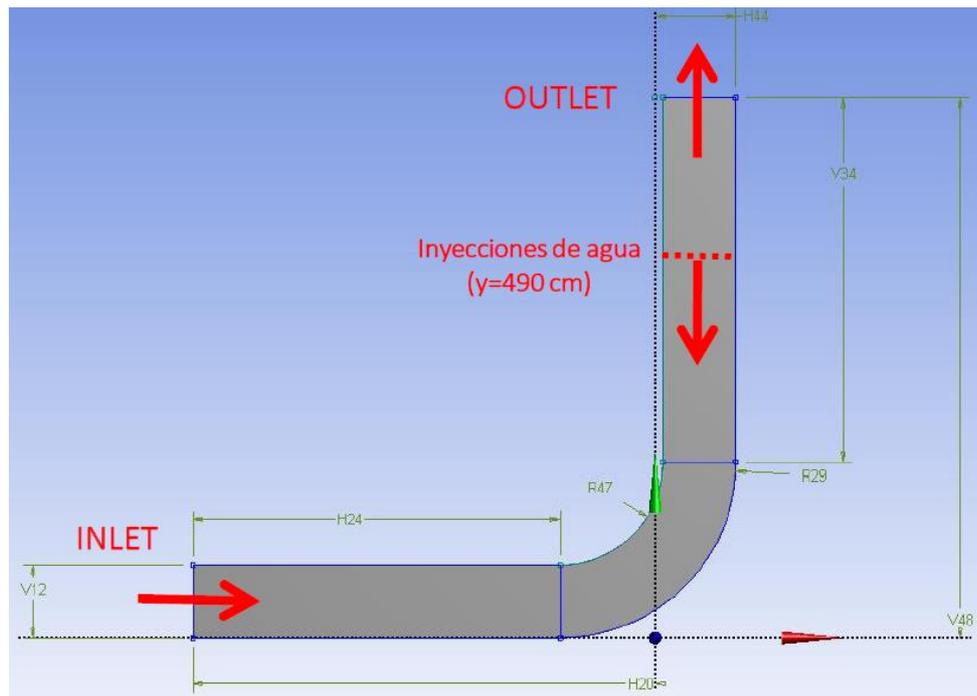


Figura 12. Geometría del caso base

H20	630 cm
H24	500 cm
H44	110 cm
R29	240 cm
R47	140 cm
V12	100 cm
V34	500 cm
V48	740 cm

Figura 13. Dimensiones de la geometría del caso base

Además de esta geometría, que resultará ser definitiva, también se ha evaluado el comportamiento del sistema con otras geometrías. Las dos más significativas han sido la geometría de la Figura 14. Geometría alternativa con más anchura en el canal vertical, con un canal con el doble de anchura en la zona vertical; y la geometría de la Figura 15. Geometría alternativa con , con una conexión brusca entre la entrada horizontal y el canal vertical. Estas geometrías se descartaron durante el estudio debido a su peor comportamiento.

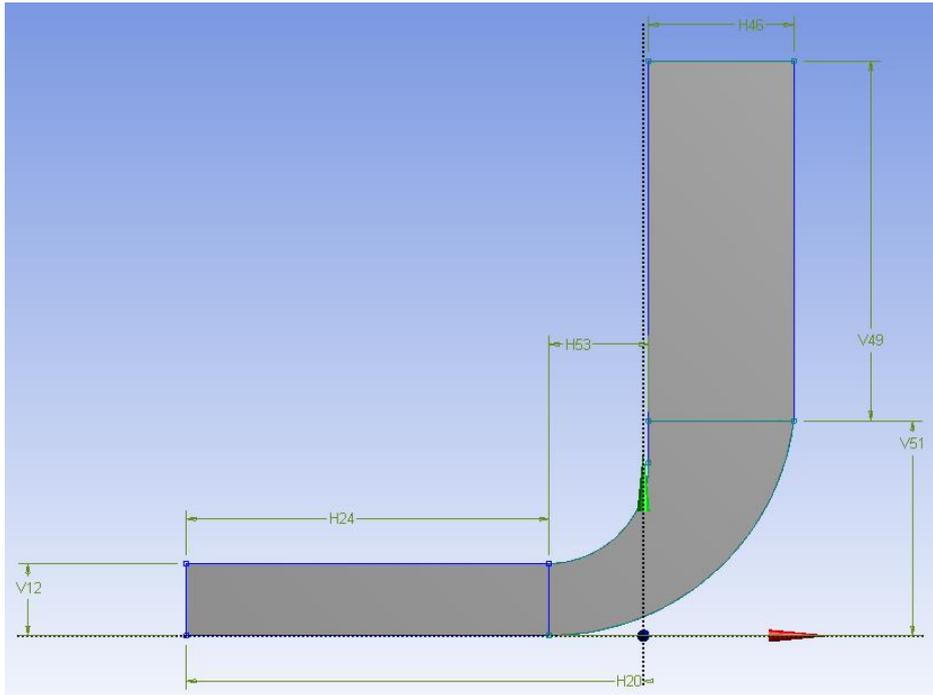


Figura 14. Geometría alternativa con más anchura en el canal vertical

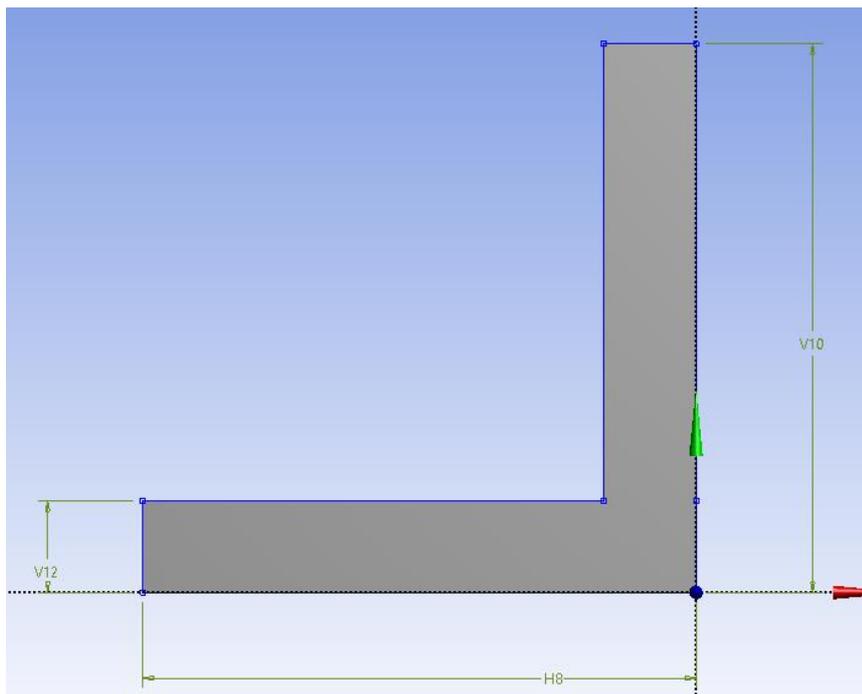


Figura 15. Geometría alternativa con entrada brusca en la zona de intercambio

## 4.2. Mallado

Como se comenta en [34], generar el mallado óptimo en el dominio consume un tiempo importante. Esto hace que haya que establecer un equilibrio entre la precisión buscada y el coste computacional (aspectos más profundamente detallados en el apartado 5). En este trabajo, la bondad del refinamiento de la malla se valora de dos maneras: mediante un análisis de sensibilidad, el cual se lleva a cabo detenidamente en el apartado 5 y mediante el parámetro  $y^+$ , descrito a continuación.

Para ilustrar y comentar la importancia del parámetro  $y^+$  nos apoyaremos en la Figura 16, en la que se presenta

la velocidad tangencial adimensional del flujo  $U^+$  frente a la distancia normal a la pared  $y^+$ , ambos parámetros definidos en las ecuaciones (3) y (4), siendo  $y$  la distancia medida desde la pared,  $U$  la velocidad del flujo en función de dicha distancia y  $u_\tau$  una velocidad de referencia basada en el esfuerzo cortante en zona próxima a la pared.  $u_\tau$  queda definido en la ecuación (5), donde  $\tau_\omega$  es dicho esfuerzo y  $\rho$  la densidad del flujo. Tal y como se comenta en [35], numerosos experimentos han demostrado que la forma de la función resultante corresponde a la línea roja. La región cercana a la pared puede ser dividida, por sus diferentes características en tres capas. En la capa más cercana a la pared, llamada subcapa viscosa (*viscous sublayer*), el flujo es casi laminar, y la viscosidad toma un papel fundamental en la cantidad de movimiento y la transferencia de masa o calor. En la capa más alejada de la pared, llamada capa completamente turbulenta (*fully-turbulent layer*), la energía turbulenta es el parámetro que predomina. Finalmente, entre ambas capas existe la capa amortiguada (*buffer layer*), donde los efectos de la viscosidad y la energía turbulenta son igualmente importantes. Estas tres zonas se muestran también en la Figura 16.

$$y^+ = \frac{yu_\tau}{\nu} \quad (3)$$

$$U^+ = \frac{U}{u_\tau} \quad (4)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_\omega}{\rho}} \quad (5)$$

Para entender el interés de conocer el valor de  $y^+$  y su importancia, es necesario conocer cómo modela ANSYS Fluent el comportamiento del flujo cerca de la pared. ANSYS es capaz de predecir el comportamiento del flujo aproximando la curva roja de dos formas: haciendo un ajuste lineal si  $y^+$  es menor o igual a 11,067 o un ajuste logarítmico si  $y^+$  es mayor que 11,067. Cabe aclarar que el ajuste lineal aparece representado con una línea curva y viceversa porque la escala del eje horizontal es logarítmica, característica que puede llevar a confusión. Si el centroide de la celda adyacente a la pared tiene un  $y^+ < 10$ , ANSYS resolverá el flujo de manera precisa en la subcapa viscosa mediante el ajuste lineal mencionado. Por otro lado, si el centroide de la celda adyacente a la pared se encuentra en el intervalo  $30 < y^+ < 200$ , ANSYS también podría predecir el comportamiento del flujo con cierta precisión empleando funciones de pared. Así pues, es recomendable evitar que el  $y^+$  sea menor que 10 o menor que 30, zona en la que los resultados serían calculados con menos precisión, ya que ANSYS no puede ajustar correctamente ninguno de los dos modelos [36]. En la Figura 16 puede comprobarse cómo la capa amortiguada es donde los ajustes propuestos por ANSYS (líneas azules) están más lejos del comportamiento real del sistema (línea roja). La mayor precisión, como se comenta en la literatura, se consigue para bajos  $y^+$ , e idealmente se busca que  $y^+ < 1$ , un valor que asegura la precisión total del modelo. Las regiones cercanas a la pared tienen mayores gradientes de los parámetros característicos del flujo y para ello se requiere medir con precisión estos bruscos cambios cercanos a la pared, para así poder obtener un resultado fiable en estas zonas más comprometidas. Por último, cabe destacar que este parámetro viene afectado por el refinamiento de la malla en las zonas a la pared y el número de Reynolds en dichas zonas, por lo que conseguir un  $y^+$  aceptable también viene determinado por las condiciones del fluido y no únicamente por las características del mallado.

Sin embargo, dadas las condiciones del problema y la bondad de la malla creada, limitada por el poder de computación disponible durante la realización de este proyecto, no ha sido posible alcanzar el objetivo de  $y^+ < 1$ . En la Figura 17 se representa el valor de  $y^+$  obtenido en el caso base a lo largo del dominio en función de la posición en el eje x. En dicha figura no se quiere hacer hincapié en la forma de la función representada, sino más bien en el rango de valores en el que se encuentra y la precisión de la malla en distintos puntos de esta.

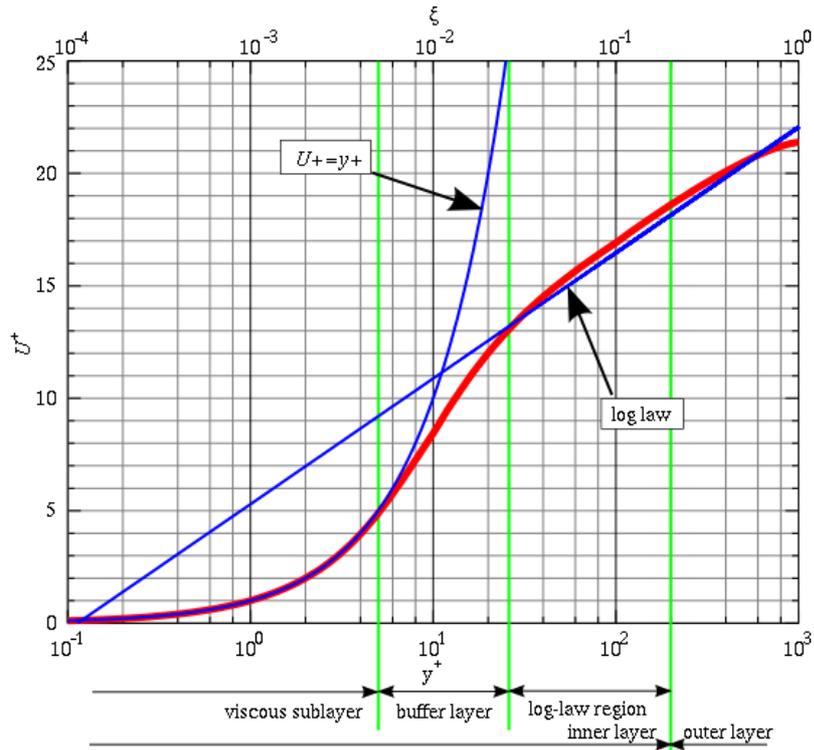


Figura 16. Función  $y^+$  [37]

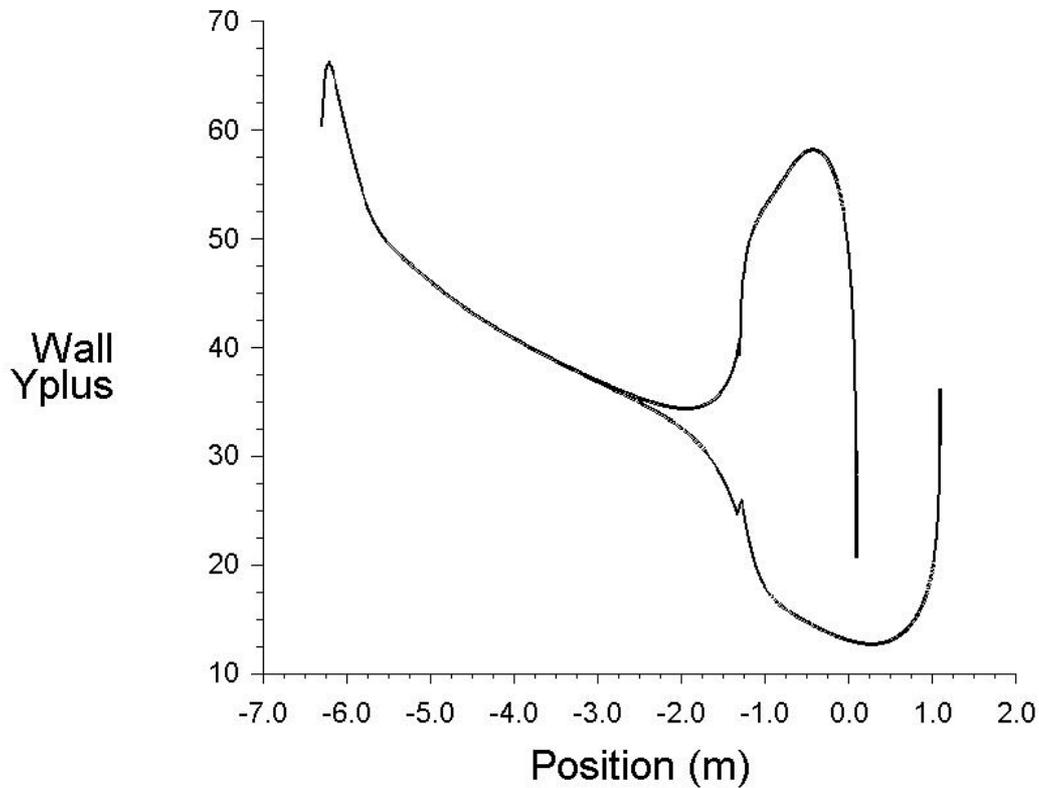


Figura 17: Valor de  $y^+$  a lo largo de las paredes del dominio

En cuanto al tipo de malla empleada en el sistema, esta puede ser estructurada o no estructurada. La empleada en este sistema es una malla estructurada que, como se explica en [38], se caracteriza por tener los vértices interiores topológicamente similares, pues forman una red de cuadriláteros (en nuestro caso bidimensional; en

el caso tridimensional formarían hexaedros) a lo largo del dominio. En general, a diferencia de las mallas no estructuradas, las mallas estructuradas ofrecen una mayor simplicidad y mejor convergencia. Una malla no estructurada se adaptaría mejor a un dominio de geometría compleja por lo que no es necesaria en nuestro caso, donde la geometría se podría dividir únicamente se compone de dos rectángulos y un codo, formas sencillas de mallar con cierto grado de precisión. Una opción más precisa es hacer un mallado híbrido, un enfoque que disfruta de las ventajas de ambos métodos.

El mallado se ha hecho a partir de algunas funciones sencillas:

- (i) *Face Meshing*. Con esta función, ANSYS hace un mapeado del dominio y crea una malla estructurada con cuadriláteros. Es útil en dominios rectangulares o aproximadamente rectangulares, por lo que es especialmente útil en los canales vertical y horizontal, aunque también es capaz de crear una malla ordenada y fiable en el codo.
- (ii) *MultiZoneQuad/Tri Method*. El objetivo principal del uso de esta función es poder emplear la función *Inflation*, además de descomponer el mallado en las tres partes mencionadas anteriormente
- (iii) *Inflation*. Esta función permite hacer un mallado en el que las celdas van disminuyendo de tamaño conforme nos acercamos a la pared. De esta forma, podemos conseguir una mayor precisión en estas zonas conflictivas. Se emplea una función *inflation* en cada una de las tres partes del dominio: En el codo el número de capas es 40 (se requiere una gran precisión en esta zona, donde el fluido cambia de dirección y hay una fuerte influencia de la pared); en el canal horizontal el número de capas es 6; y en el canal vertical el número de capas es 25. En las tres zonas el índice de crecimiento entre capa y capa es de 1,2.

Configurado para tener un tamaño de elemento máximo de 0,008 metros, ejecutar el mallado con todas las restricciones impuestas da como resultado una malla formada por 355760 elementos y 357900 nodos. A continuación se presentan algunas imágenes de la malla resultante. La Figura 18 es el mallado completo del sistema, pero debido a la densidad de la malla no se puede apreciar cómo es esta en detalle, por lo que se representan las siguientes imágenes enfocando únicamente a partes concretas de la misma. Cabe destacar un par de peculiaridades:

- Se puede observar en la Figura 19 una mayor densidad del mallado entre el codo y los canales horizontal y vertical. Para aplicar el *Face Meshing* en el dominio (y que, por tanto, la malla sea estructurada) ANSYS debe detectar que la cara donde se aplica dicha función es un cuadrilátero, o aproximadamente un cuadrilátero. De esta forma, para conseguir la malla estructurada fue necesario dividir el dominio en tres partes, canal vertical, horizontal y codo. Además, luego se aplicó la función *Inflation*, la cual necesita ser aplicada, al menos, en tres bordes de cada cuadrilátero. Todo esto da como resultado que cada una de las tres partes tenga un mallado más fino en, al menos, tres de sus bordes, apareciendo esa mayor densidad en zonas donde no hay pared.
- En la Figura 23 hay una mayor densidad de malla a la salida para obtener un resultado más fiable en esa zona, pues es de gran interés tener una buena precisión sobre las condiciones de temperatura y saturación del gas a la salida.

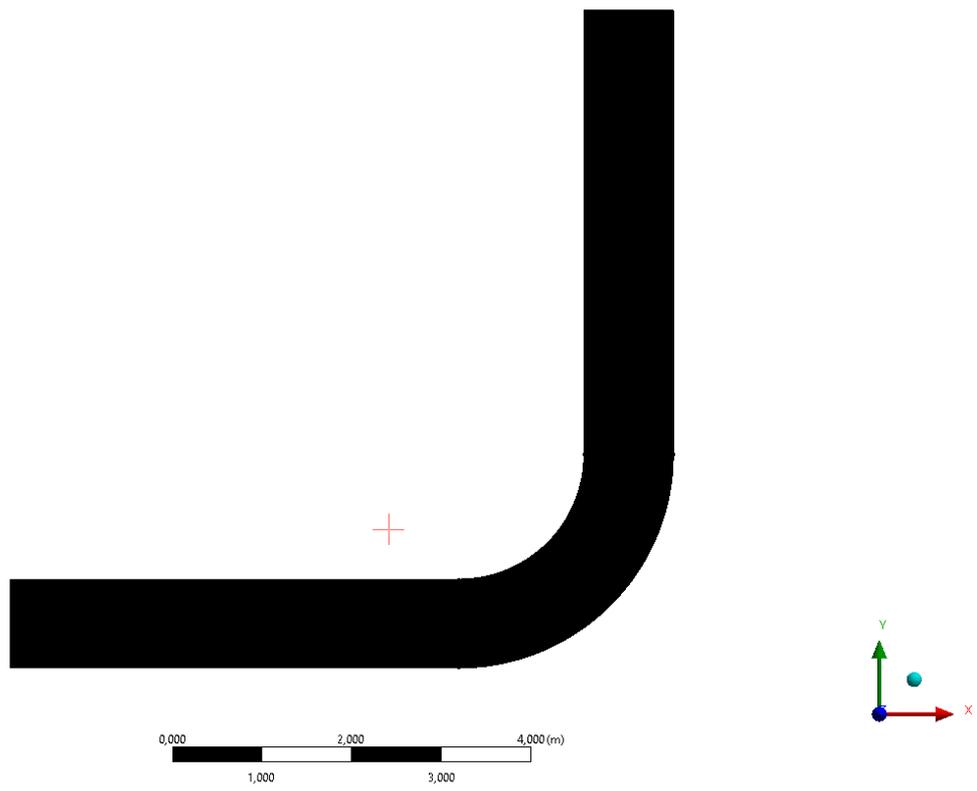


Figura 18. Mallado completo del sistema



Figura 19. Malla aumentada

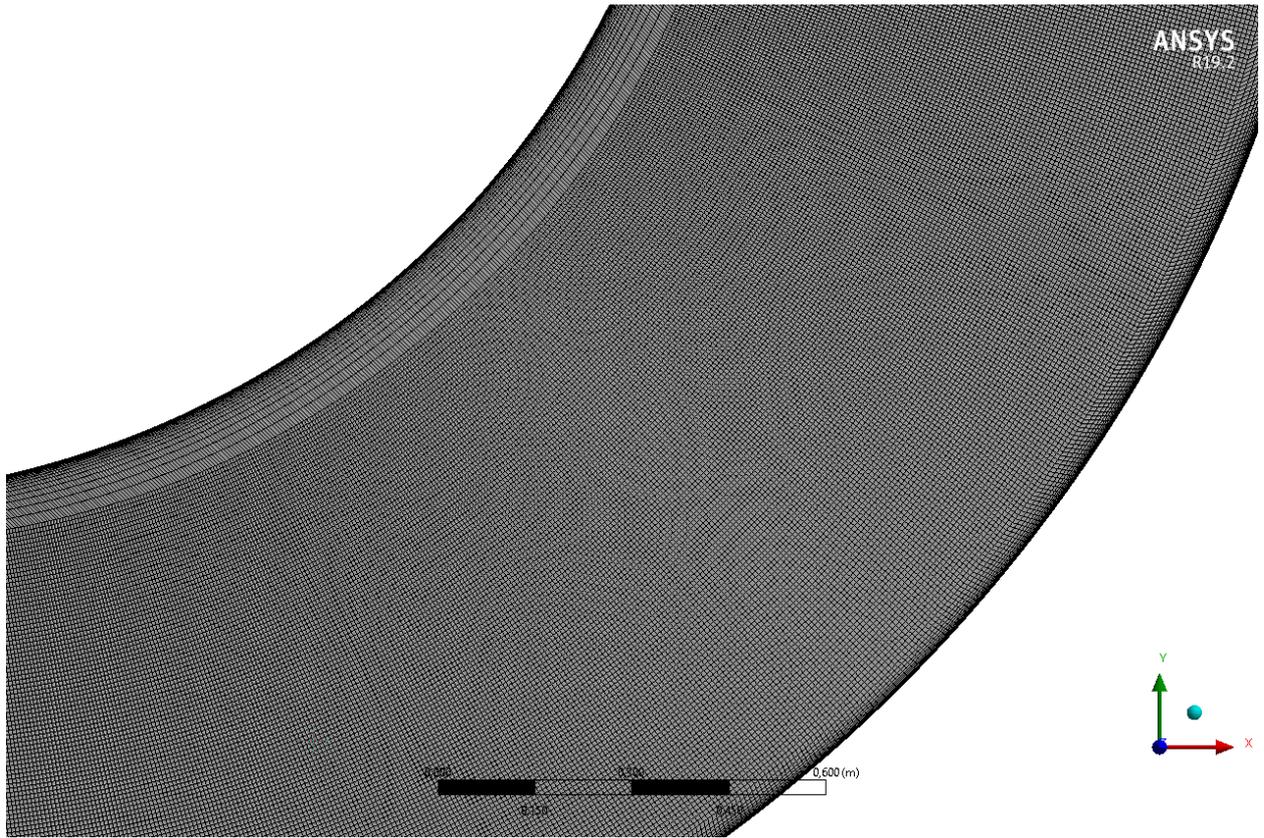


Figura 20. Codo aumentado con la función Inflation cerca de la pared

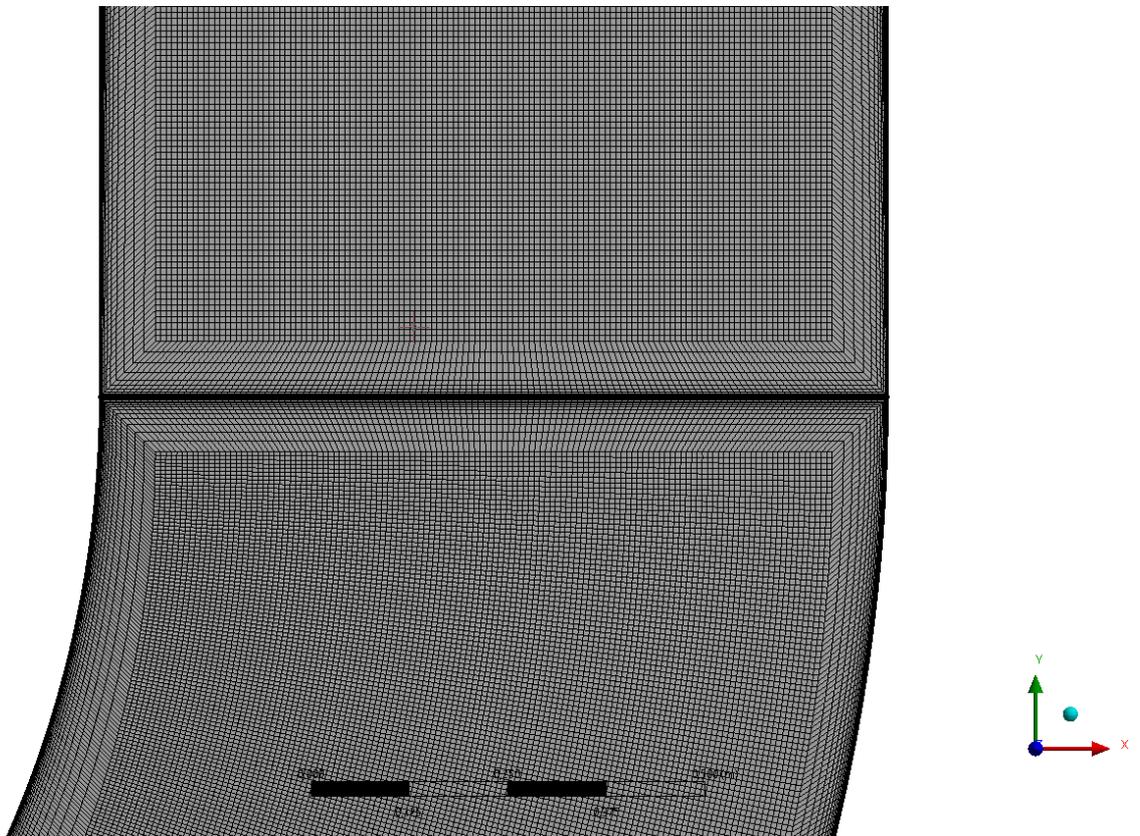


Figura 21. Conexión del codo con el canal vertical

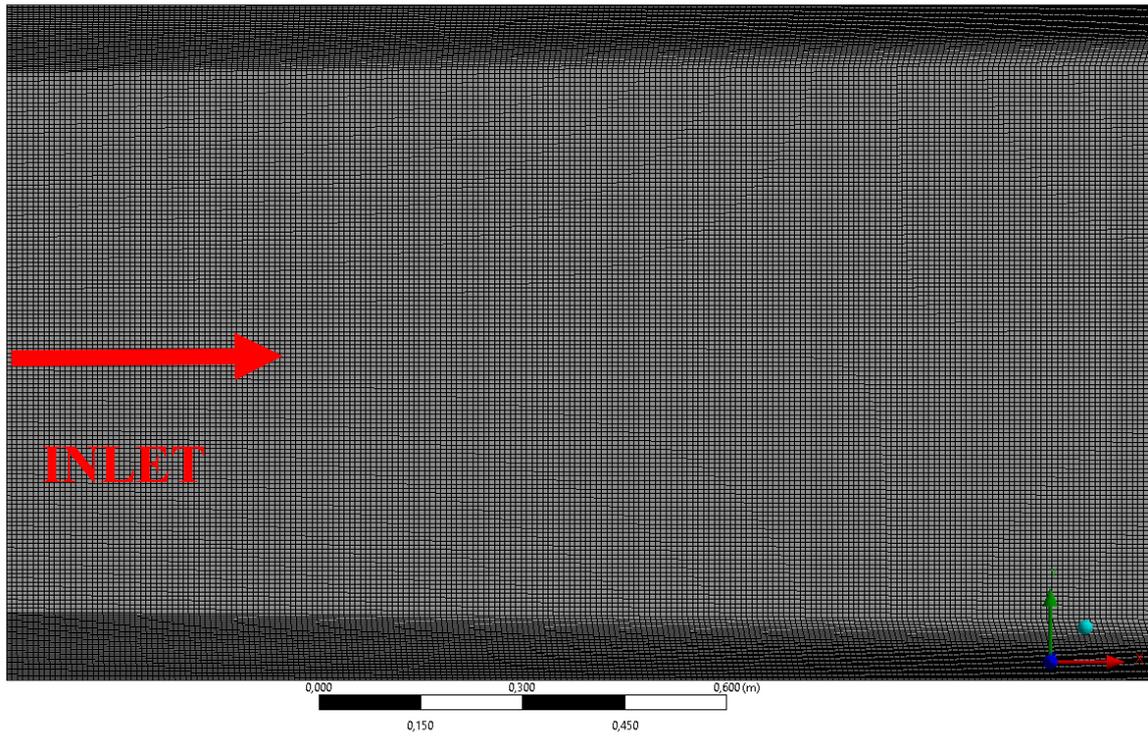


Figura 22. Canal horizontal

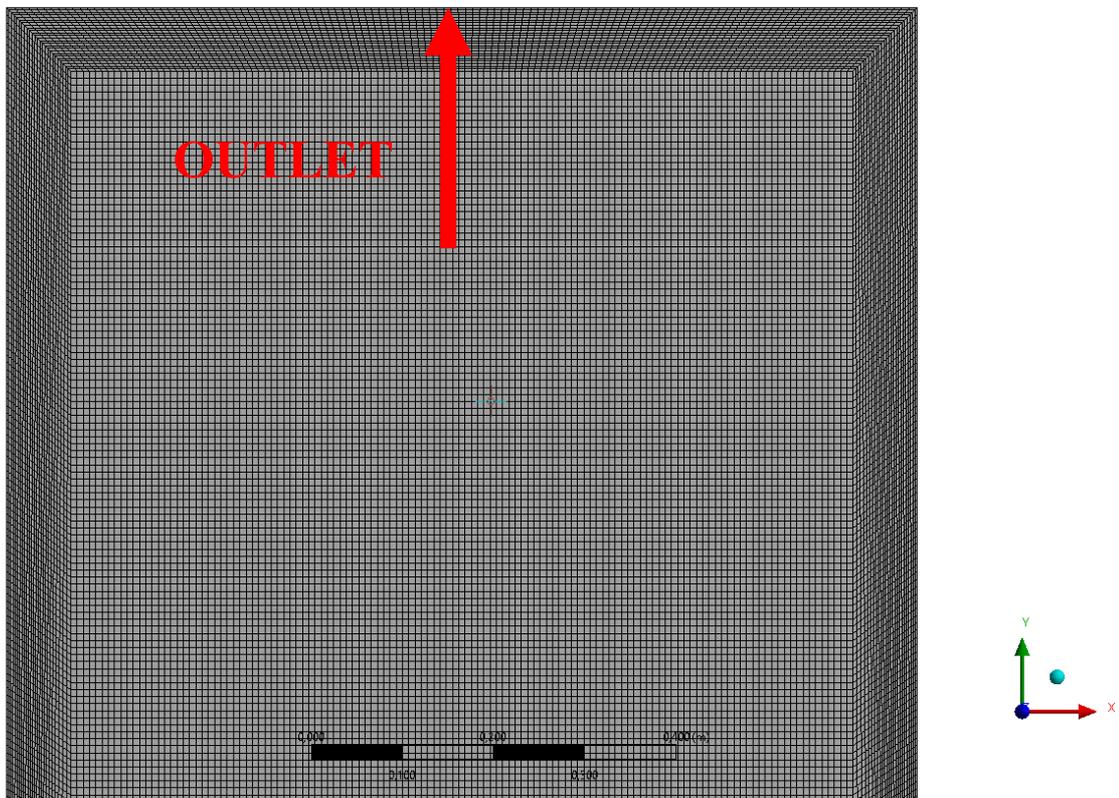


Figura 23. Canal vertical

### 4.3. Condiciones de contorno en ANSYS fluent

En apartados anteriores se han tratado los métodos numéricos que se suelen emplear para predecir el comportamiento de flujos turbulentos. Con todo ello en mente, hay dos formas diferentes en las que flujos bifásicos en spray (condición similar a la que nos ocupa) son comúnmente representados mediante CFD [39]. Estos dos enfoques son el método “Euleriano”, donde el spray es considerado una fase continua por todo el dominio del flujo, y el método “Lagrangiano”, donde las trayectorias seguidas por las gotas o grupo de gotas son rastreadas a su paso por el dominio. En el enfoque Lagrangiano la fase gaseosa se representa usando el enfoque Euleriano mientras que las gotas líquidas son representadas por un número de “partículas” discretas. Estas partículas individuales son rastreadas a través del flujo del dominio desde su punto de inyección hasta que escapan del dominio o hasta encontrar algún criterio de límite de integración. Cada partícula del fluido representa típicamente un gran número de gotas con unas propiedades y distribución de tamaño determinadas, siendo un mayor número de partículas o trayectorias una representación mejor del comportamiento del líquido. Una de las ventajas del enfoque Lagrangiano es que una representación precisa de la distribución de las gotas se puede obtener a un menor coste computacional que empleando el enfoque Euleriano en la fase líquida, donde el rastreo de la interfase entre todas las gotas y la fase gaseosa puede ser un factor limitante en términos de coste computacional. En consecuencia, el método Lagrangiano para la fase líquida ha sido el más usado en RANS. En definitiva, el método Euleriano será la mejor opción para la fase continua y el Lagrangiano para la fase discreta.

#### 4.3.1. Método de cálculo

El sistema está en régimen estacionario e influido por la acción de la gravedad y la resolución mediante RANS se adapta a las características del problema, ofreciendo resultados fiables en un tiempo razonable para el poder de computación del que se dispone. Se aplica el modelo de turbulencias  $k - \epsilon$  *realizable*, variante del modelo  $k - \epsilon$  ampliamente validada en un gran rango de aplicaciones que abarcan flujos rotativos, chorros, flujos cercanos a paredes y contornos, dispersión y flujos separados. En todos estos casos se ha probado que esta variante es más fiel a la realidad que el modelo  $k - \epsilon$  estándar [40]. La intensidad de la turbulencia se fija en el 10%.

El algoritmo SIMPLE es el empleado en el acoplamiento presión-velocidad. Los términos de presión, cantidad de movimiento,  $H_2O$  y energía son de segundo orden mientras que los términos de disipación de energía turbulenta y energía cinética turbulenta son de primer orden.

#### 4.3.2. Fase discreta

Las gotas se computan en el programa como fase discreta, lo cual tiene ciertas implicaciones. Según la propia guía de usuario de ANSYS [41], la simulación de una fase discreta en FLUENT implica asumir que la fase discreta está lo suficientemente diluida como para que la interacción partícula-partícula y los efectos de la fracción volumétrica de las partículas en la fase gaseosa sean despreciables. En la práctica, esto implica que la fase discreta debe estar presente en una fracción volumétrica lo suficientemente pequeña, menos del 10-12%. De esta forma, la carga másica de la fase discreta puede exceder un 10-12%. Esto hace que el modelo de fase discreta o DPM (*Lagrangian discrete phase model*) sea el apropiado para simulaciones de secadores en spray, combustión de carbón o combustibles líquidos y flujos continuos cargados de partículas. Nuestro caso es similar a algunos de los ejemplos anteriores, además de que la fracción volumétrica es lo suficientemente pequeña (más detalles en el capítulo de resultados), lo que hace que este modelo sea el ideal para nuestra simulación.

También cabe destacar que en las simulaciones hechas en este trabajo no se computa la sal dentro del agua para formar la salmuera, sino únicamente el agua. Para simular distintas concentraciones se varían las condiciones del agua, aunque en principio se simula un caso base únicamente con los parámetros por defecto del agua líquida.

Las gotas se introducen a lo largo de la anchura del canal en el canal vertical y a contracorriente con la corriente gaseosa (velocidad negativa en el eje y). La posición y sentido de la inyección de las gotas se puede apreciar con claridad en la Figura 24. Existen numerosos parámetros que influyen en el comportamiento del sistema y sobre todo en lo que estamos buscando, la evaporación del agua. Cada uno de ellos afecta al sistema de forma diferente y con más o menos intensidad. La forma que tiene cada parámetro de afectar al sistema se analiza con detenimiento en el apartado 4.4. Los parámetros del caso base que definen la inyección de gotas son los

siguientes:

- Número de puntos de inyección: 30
- Posición (altura) de los puntos de inyección:  $y = 4,9 \text{ m}$
- Velocidad de inyección:  $v = -3 \text{ m/s}$
- Diámetro del chorro inyectado:  $D = 4 \cdot 10^{-5} \text{ m}$  (se suponen todas las gotas del mismo tamaño)
- Temperatura del agua:  $T = 293 \text{ K}$
- Caudal de salmuera introducida en cada inyección:  $\dot{m} = 0,006 \text{ m/s}$

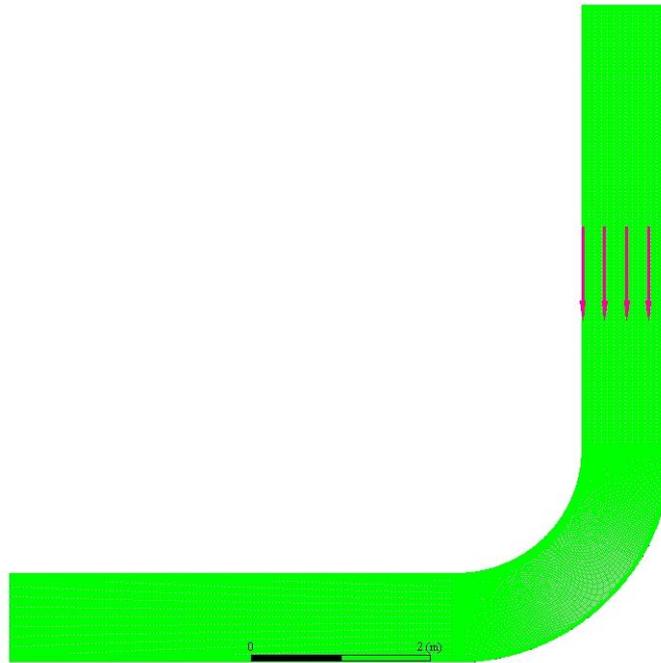


Figura 24. Inyecciones de salmuera en la fase continua.

#### 4.3.3. Fase continua

El fluido introducido por la entrada del dominio es aire a alta temperatura. Para este caso base, las propiedades que lo definen (viscosidad, calor específico, densidad, etc.) se consideran constantes con la temperatura por simplicidad. El fluido transportador continúa con dichos parámetros hasta que se encuentra con la inyección de salmuera. Para esta mezcla el calor específico sí cambia con la temperatura, empleándose una interpolación polinómica para contemplar este efecto. El calor latente de esta mezcla no cambia con la temperatura (lo cual sería lo ideal), por simplicidad, pues añadir esta característica en las simulaciones requeriría el empleo de funciones y un conocimiento más profundo del software, lo cual añadiría demasiada complejidad a este TFG.

Los parámetros del caso base que definen la entrada de aire por el conducto horizontal son los siguientes:

- Velocidad del aire de entrada:  $v = 16 \text{ m/s}$
- Intensidad de la turbulencia:  $I = 5\%$
- Diámetro hidráulico:  $0,28 \text{ m}$
- Temperatura de entrada:  $T = 573 \text{ K}$

Por último, cabe mencionar que las paredes son adiabáticas y lisas.

## 4.4. Resultados y discusión

El objetivo de este trabajo es conseguir la evaporación del agua de la salmuera y analizar qué parámetros y condiciones de contorno la hacen posible. Con esto en mente hay numerosos parámetros que se pueden medir, analizar y comparar para evaluar si se consigue el objetivo propuesto y en qué condiciones se obtiene el fluido a la salida del evaporador. Para todo ello se han hecho distintas mediciones de los parámetros que afectan al sistema que incluyen tanto análisis cualitativos con el uso de mapas de contorno como cuantitativos con distintos tipos de gráficos.

En primer lugar, se exponen los resultados del caso base, cuyos parámetros han sido comentados en el subapartado anterior, y en segundo lugar se analiza la influencia que tiene la variación de estos parámetros sobre el sistema. En este apartado se incluyen las representaciones y los datos más significativos que describen el sistema y explican su funcionamiento.

### 4.4.1. Caso base

Antes de discutir sobre los parámetros, cabe destacar la gran influencia que la geometría tiene sobre el campo de velocidades y presiones en el interior del dominio, como era de esperar. Independientemente de las condiciones en las que se encuentre el flujo de entrada, se intuye que la presencia de un codo que cambie la dirección de la corriente produce una variación importante de la distribución de velocidad: aumento de la velocidad en la cara interna del codo y disminución en la cara externa. Este efecto se verá atenuado casi con toda seguridad con cambios como un mayor radio de curvatura, una mayor anchura del canal o una mayor longitud del mismo hasta conseguir condiciones uniformes en todo el perfil de los parámetros fluidodinámicos intervinientes. Todo esto se puede observar de forma cualitativa en el contorno de velocidad del fluido en la Figura 25 donde se pone de manifiesto el acierto que supone afinar la malla cerca de las paredes, especialmente en el codo del canal.

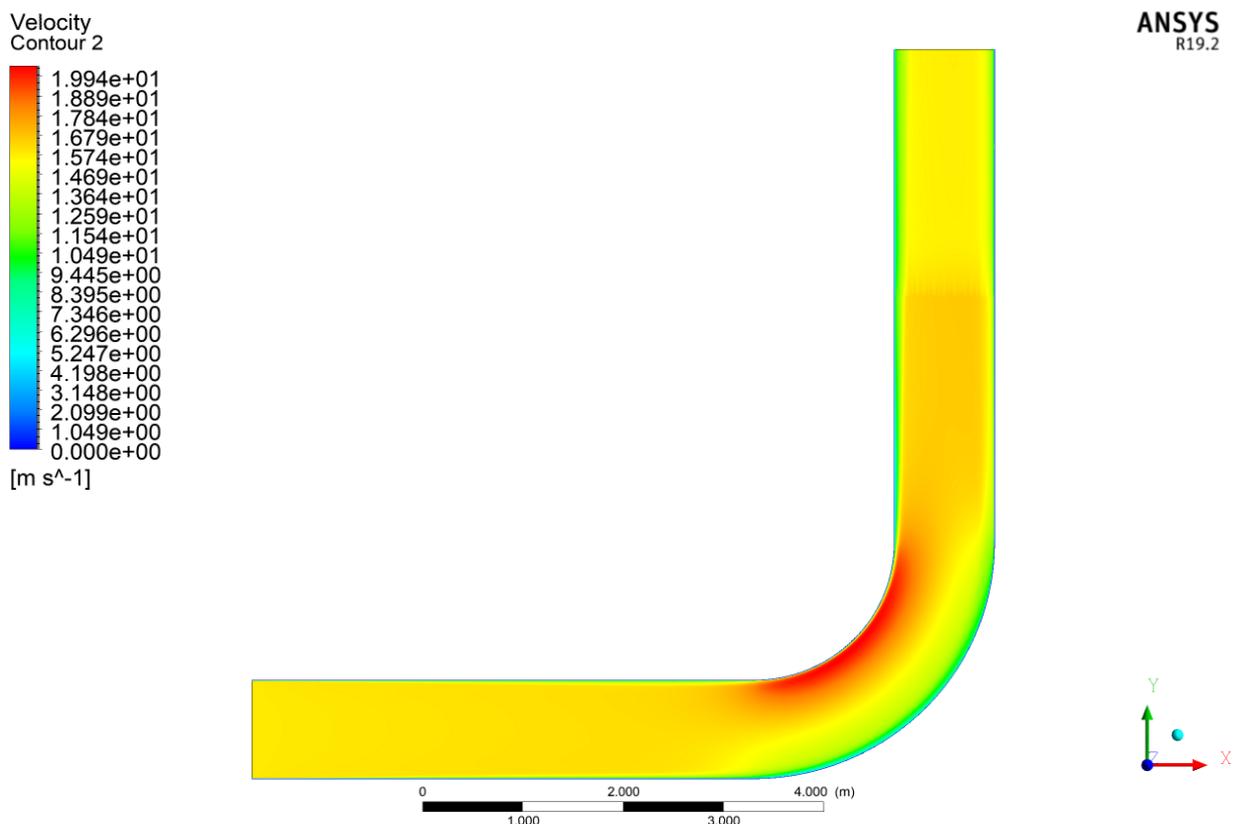


Figura 25. Contorno de la velocidad a lo largo del dominio

Para las condiciones del caso base se puede comprobar que se produce la evaporación completa de la fase discreta. Esto es fácilmente visible en la Figura 26 donde se muestra que el diámetro de las partículas de la fase

concreta (la salmuera) se reduce a cero a partir de cierto punto, por lo que podemos confirmar que se evapora completamente. De hecho, se puede afirmar que la evaporación se produce de forma bastante eficaz, pues ocurre en apenas los primeros centímetros del canal tras el punto de inyección. Nuevamente está presente el efecto de la pared en el tiempo de residencia de las partículas, pues las partículas más cercanas a esta son transportadas por el fluido a menor velocidad.

Como ya se adelantaba en apartados anteriores, se produce el enfriamiento evaporativo de la fase continua. Esto se pone de manifiesto en el aumento de la humedad relativa en la corriente y el descenso de la temperatura. Estos aspectos se pueden observar, cualitativamente, en las figuras Figura 27 y Figura 28. También se puede observar el efecto del codo en las turbulencias producidas a lo largo de todo el canal vertical. Esto se puede ver gráficamente y de manera cuantitativa en la Figura 29. Esta figura muestra varias líneas que representan la variación de energía turbulenta a lo largo del eje horizontal a varias alturas del eje vertical, incluyendo la salida. La mayor perturbación del flujo se produce en la cara interna del canal y esta va disminuyendo a medida que aumenta la distancia desde el codo.

Para tener un conocimiento completo y preciso sobre el comportamiento del sistema es necesario el análisis de los datos desde varios puntos de vista. Las figuras Figura 30, Figura 31 y Figura 32 se presentan algunos diagramas de contorno adicionales a los ya expuestos. Por otro lado, las figuras comprendidas entre la Figura 33 y la Figura 40 representan algunos gráficos que muestran información adicional sobre la variación de algunos de los parámetros característicos que definen el sistema a lo largo del eje horizontal para varias alturas del eje vertical.

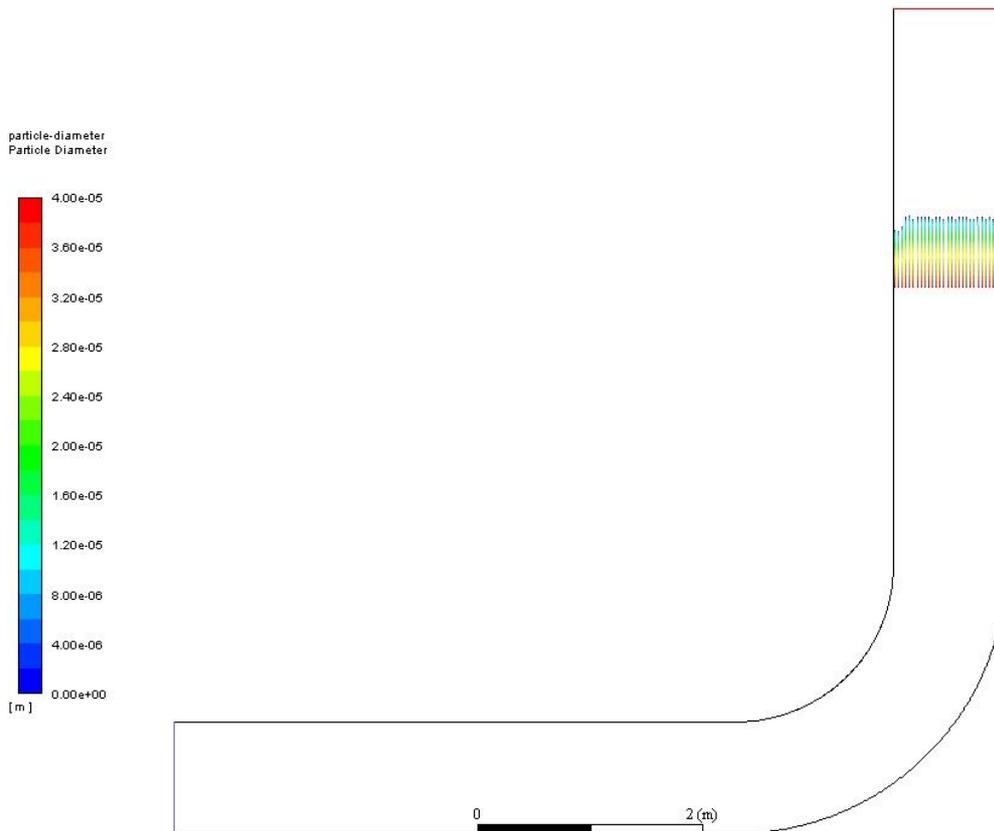


Figura 26. Diámetro de las partículas

relative-humidity-contour  
Relative Humidity

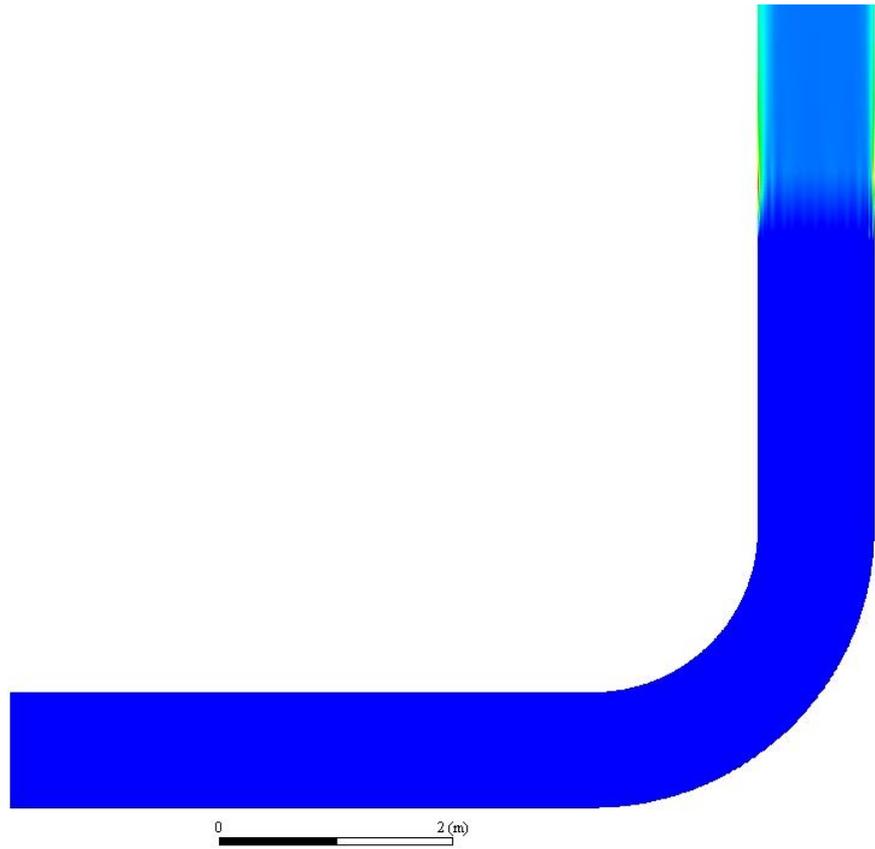
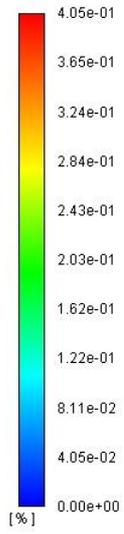


Figura 27. Humedad relativa

temperature-contour  
Static Temperature

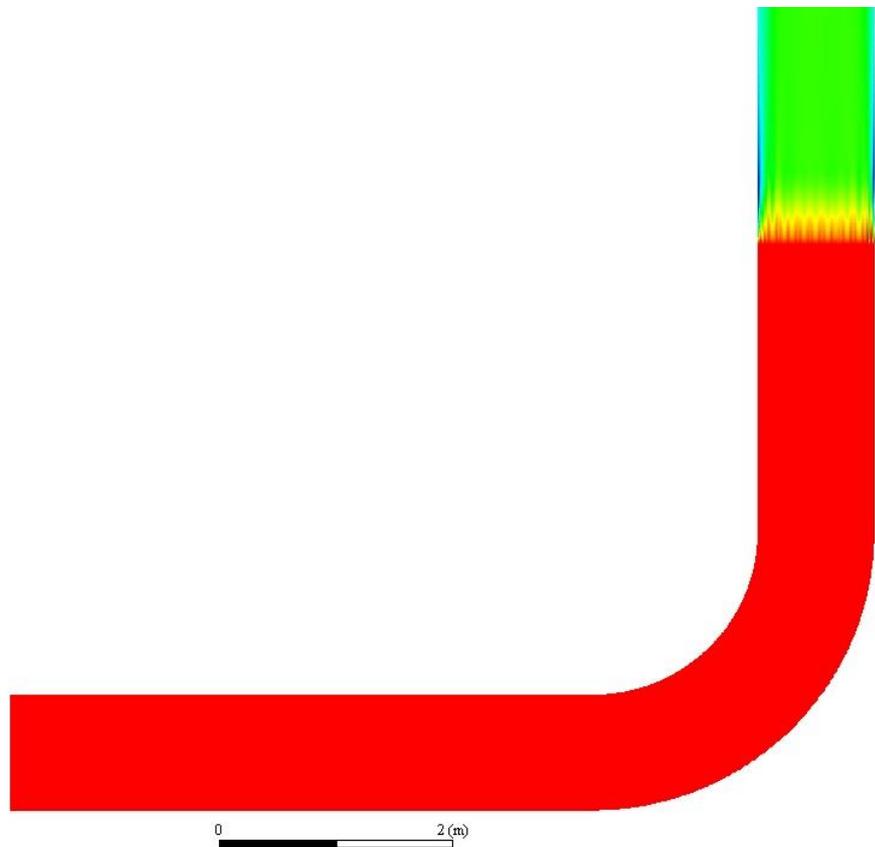
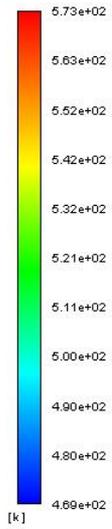


Figura 28. Temperatura

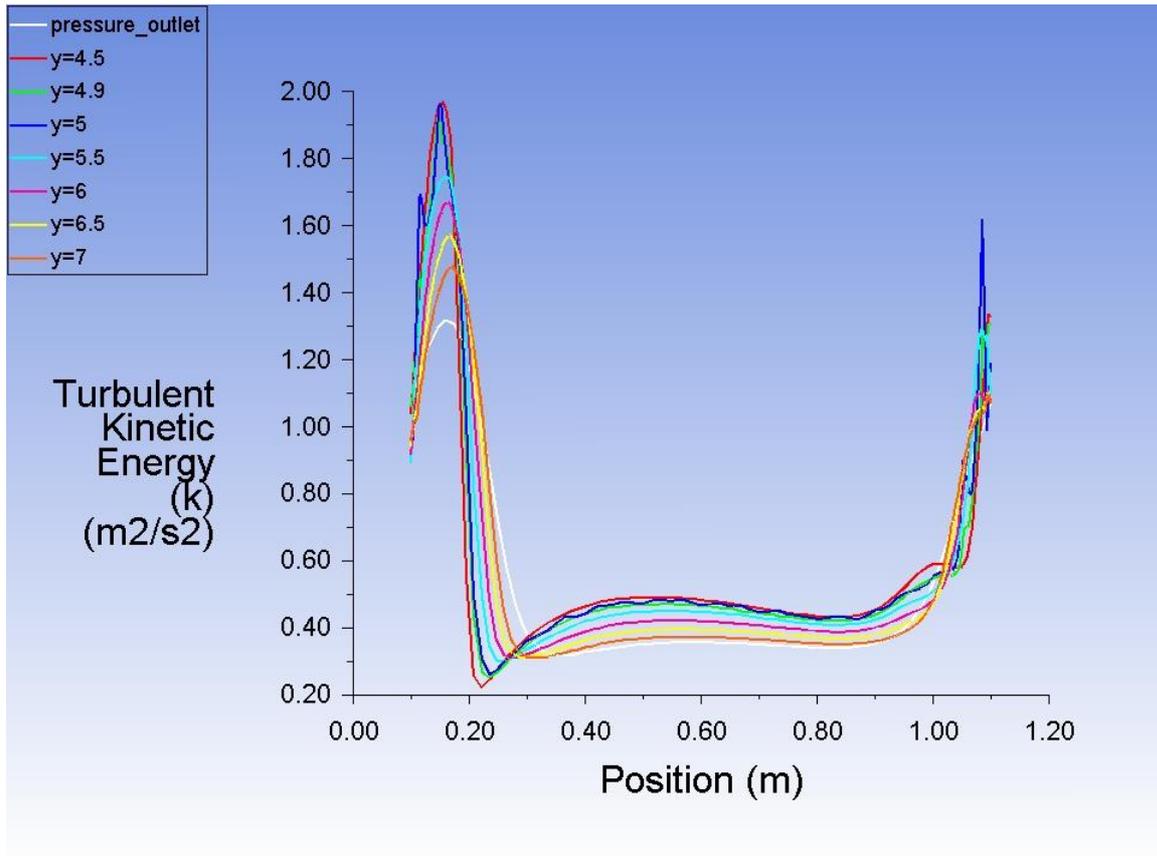


Figura 29. Gráfica de energía cinética turbulenta

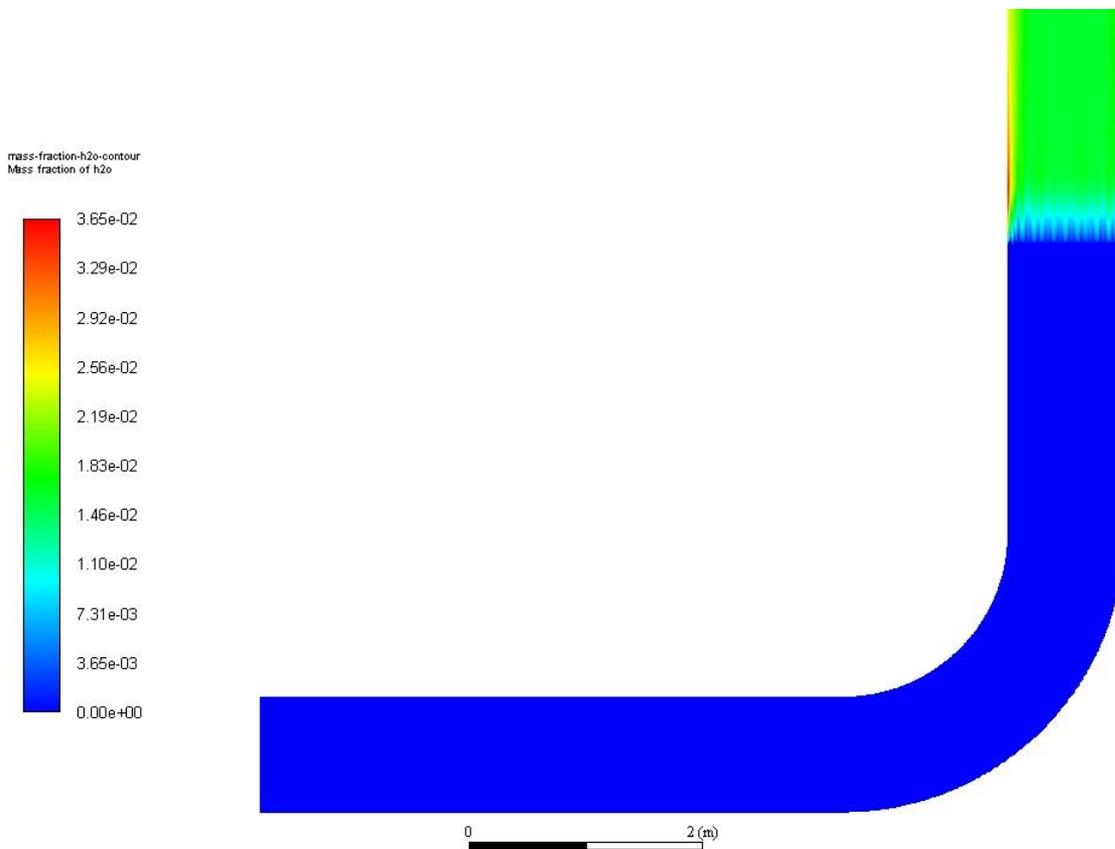


Figura 30. Fracción másica de H<sub>2</sub>O

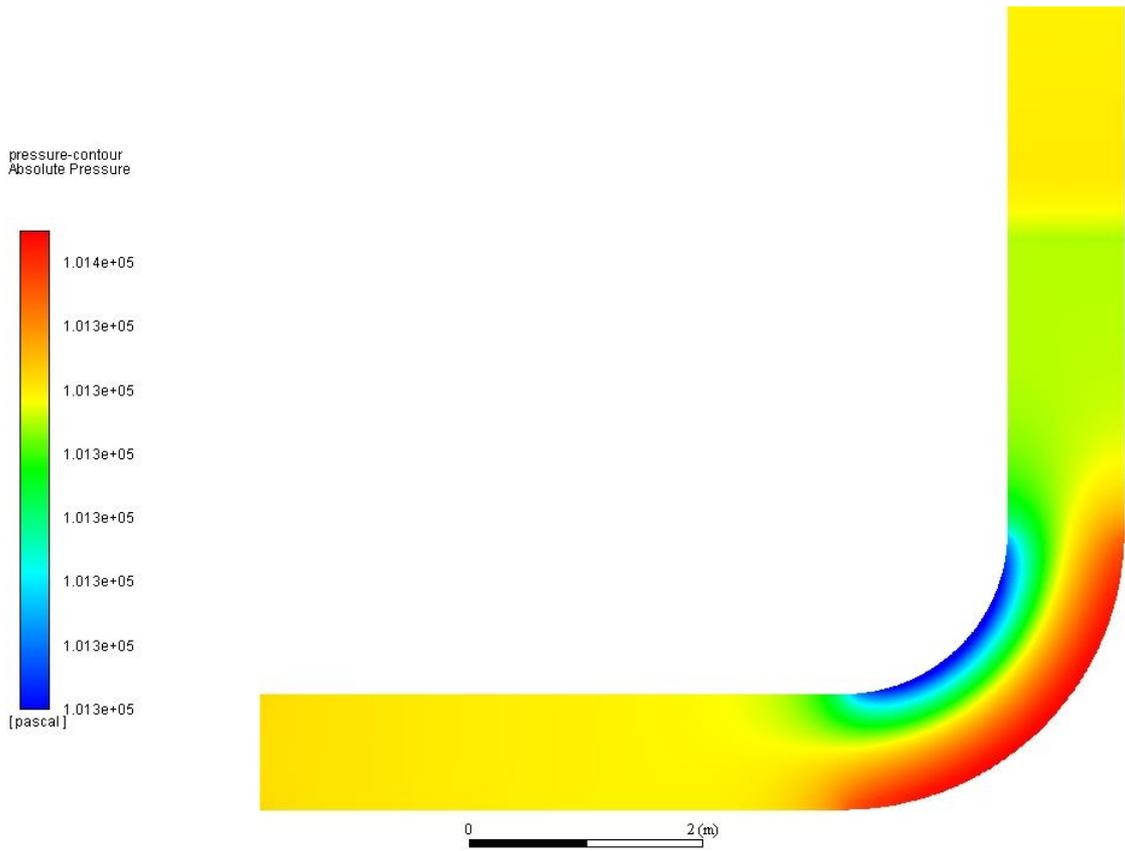


Figura 31. Presión

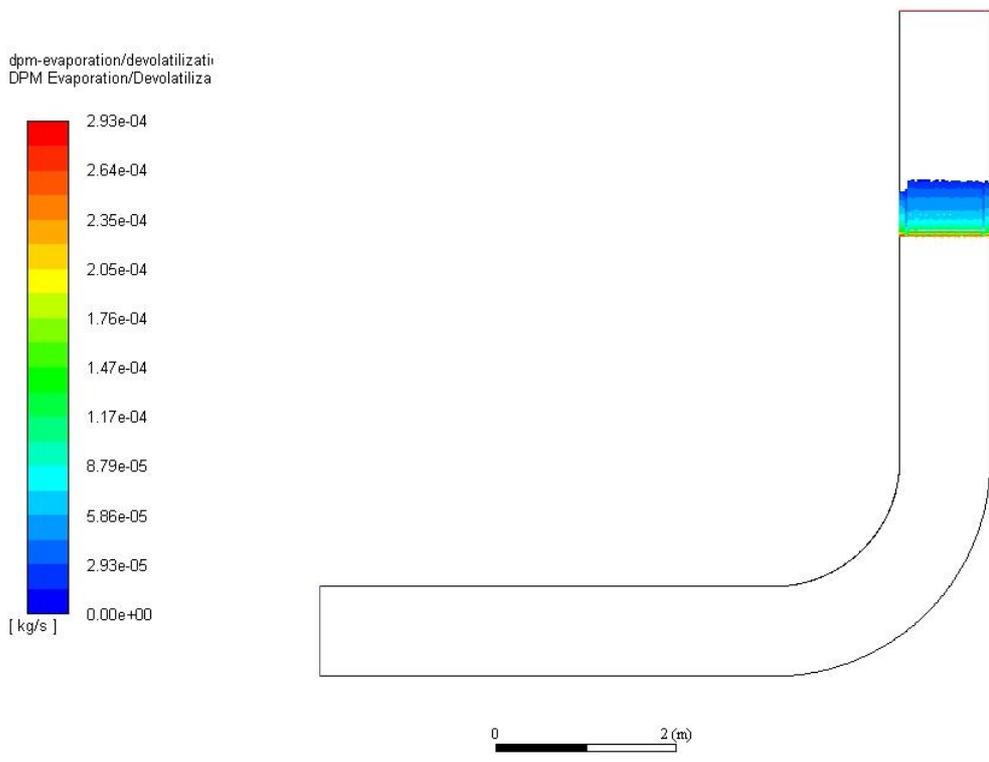


Figura 32. Evaporación de DPM

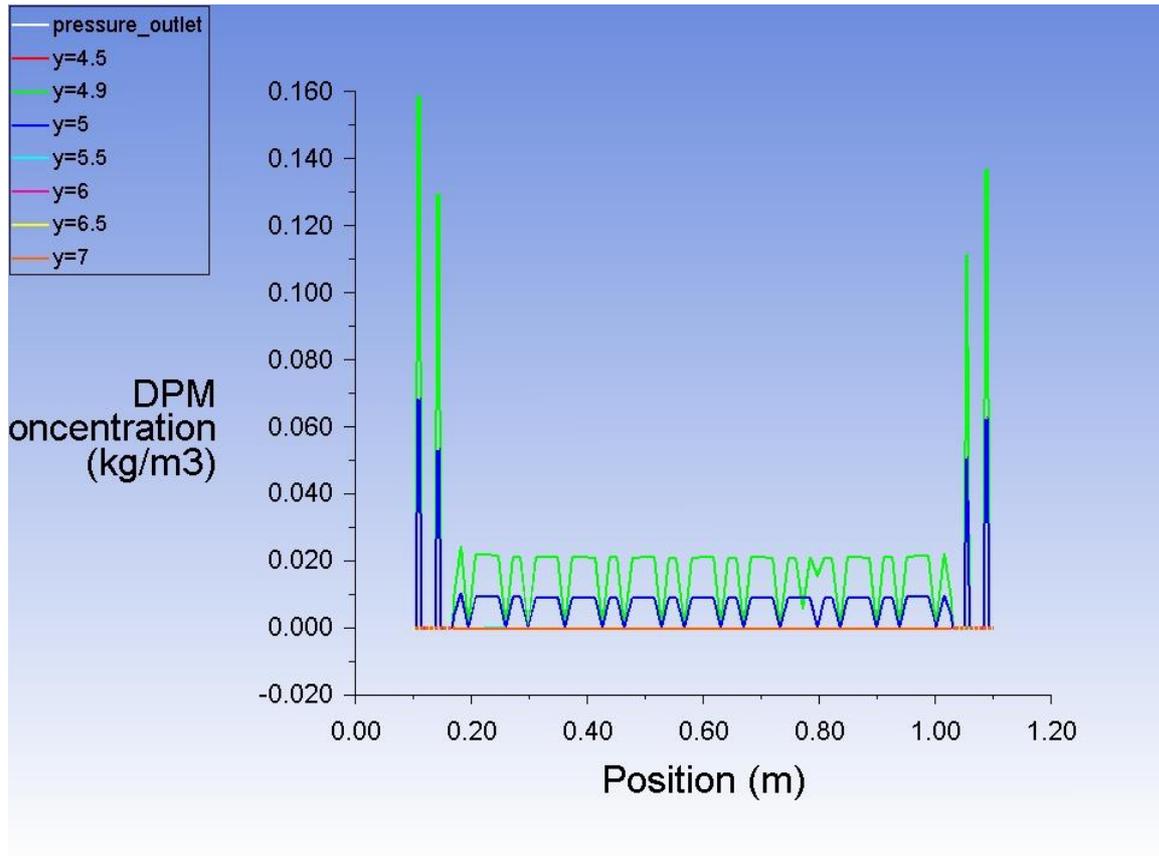


Figura 33. Gráfica de concentración de DPM

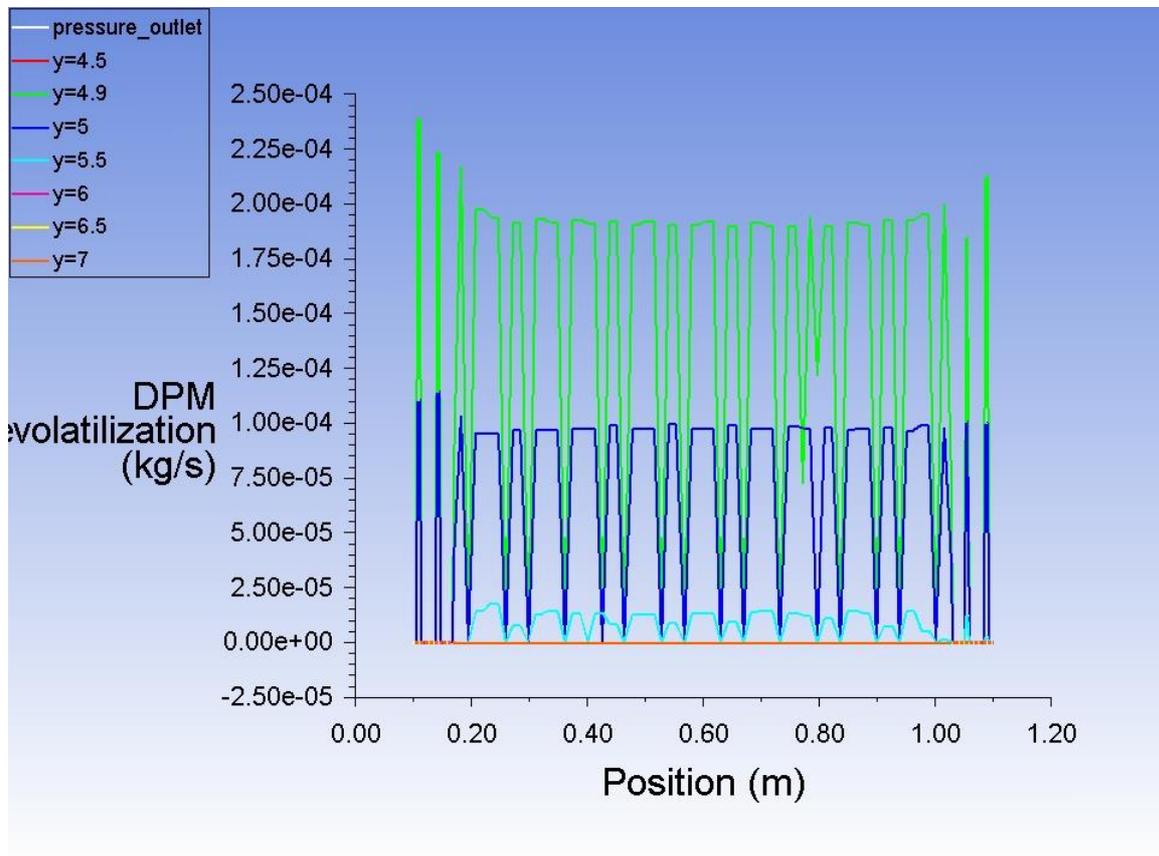


Figura 34. Gráfica de evaporación de DPM

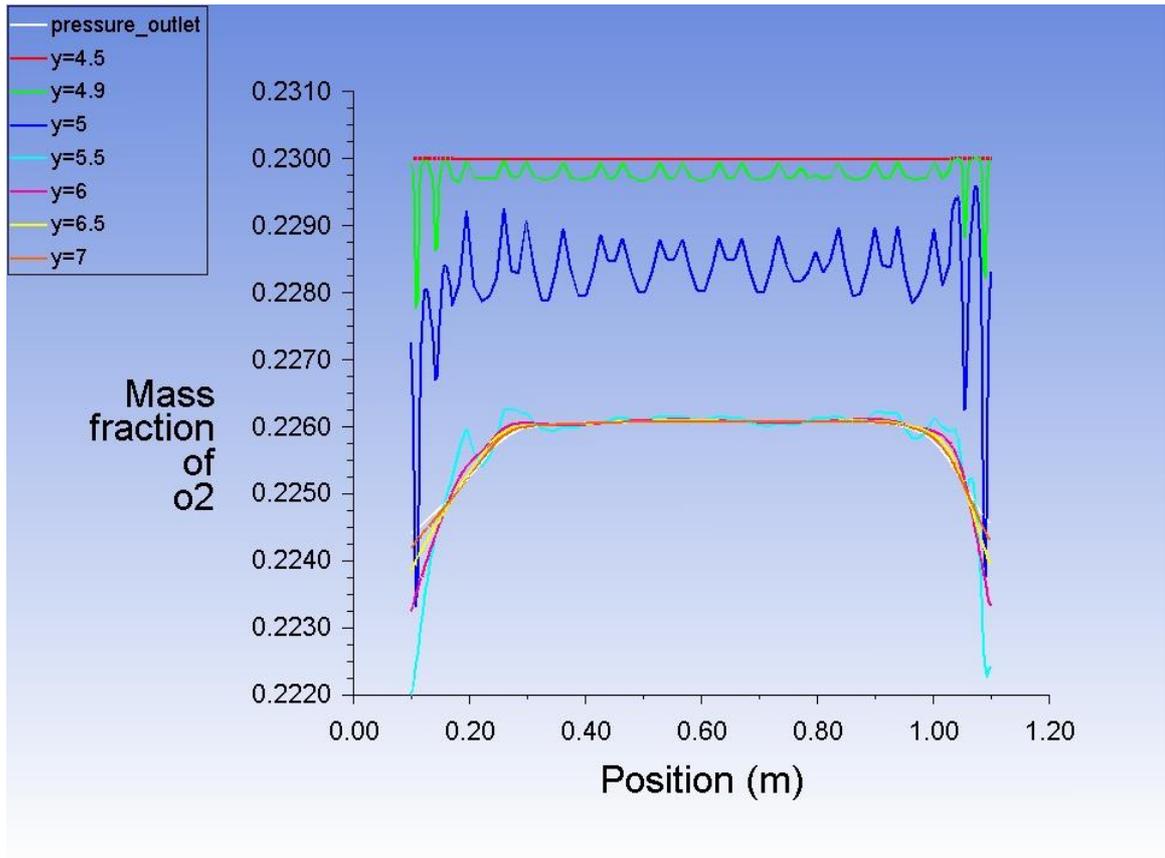


Figura 35. Gráfica de fracción másica de O<sub>2</sub>

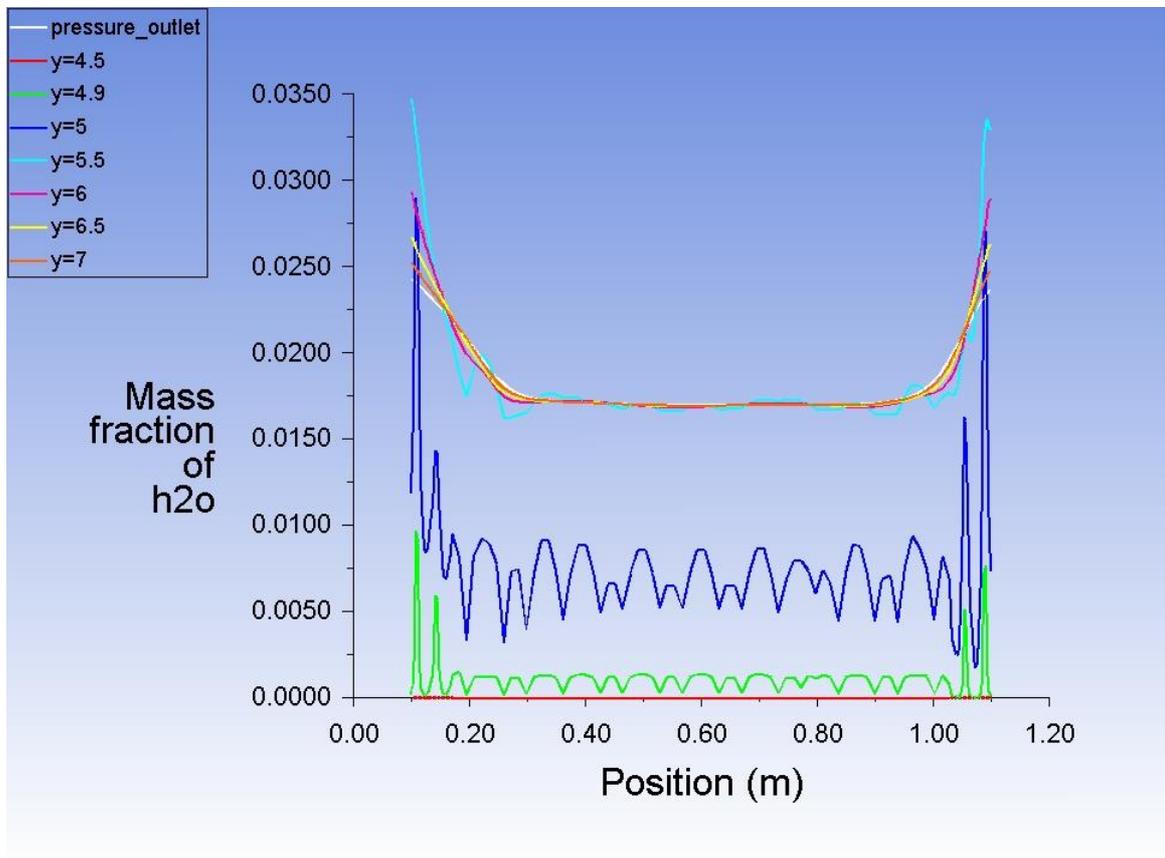


Figura 36. Gráfica de fracción másica de H<sub>2</sub>O

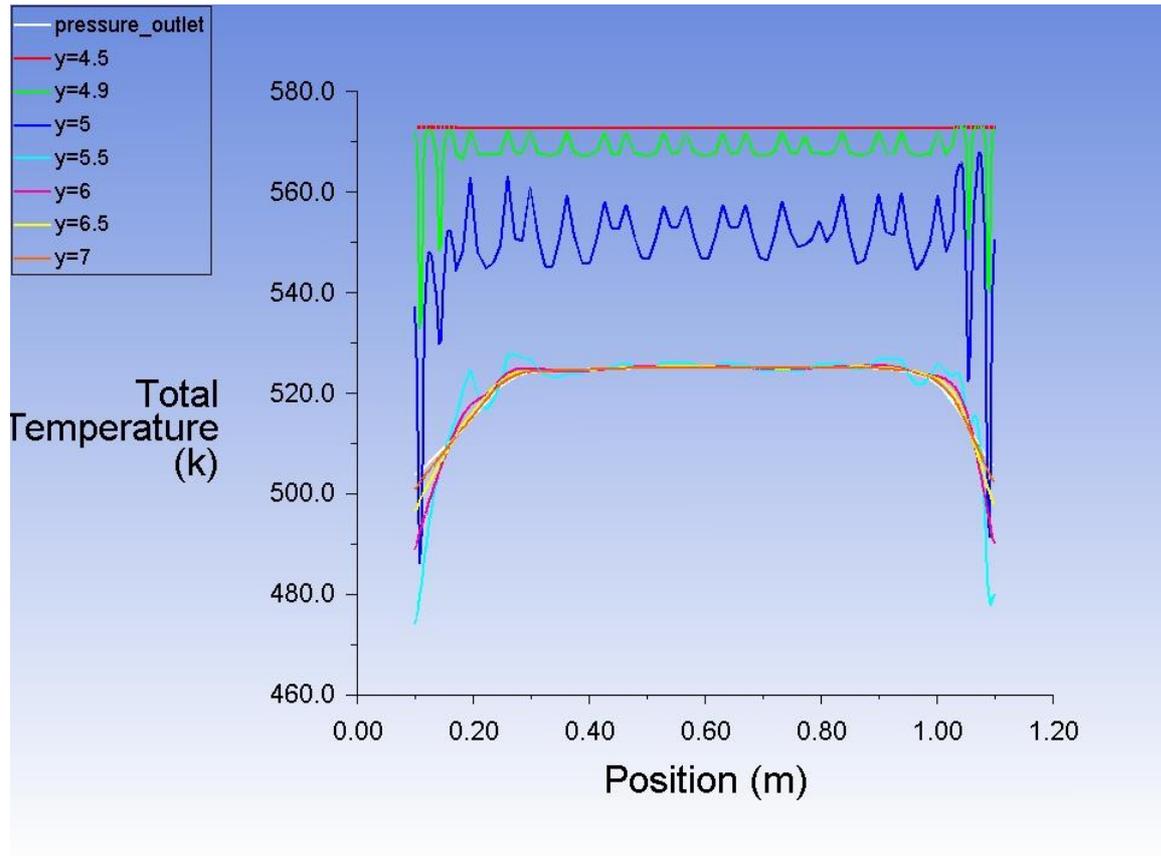


Figura 37. Gráfica de temperatura

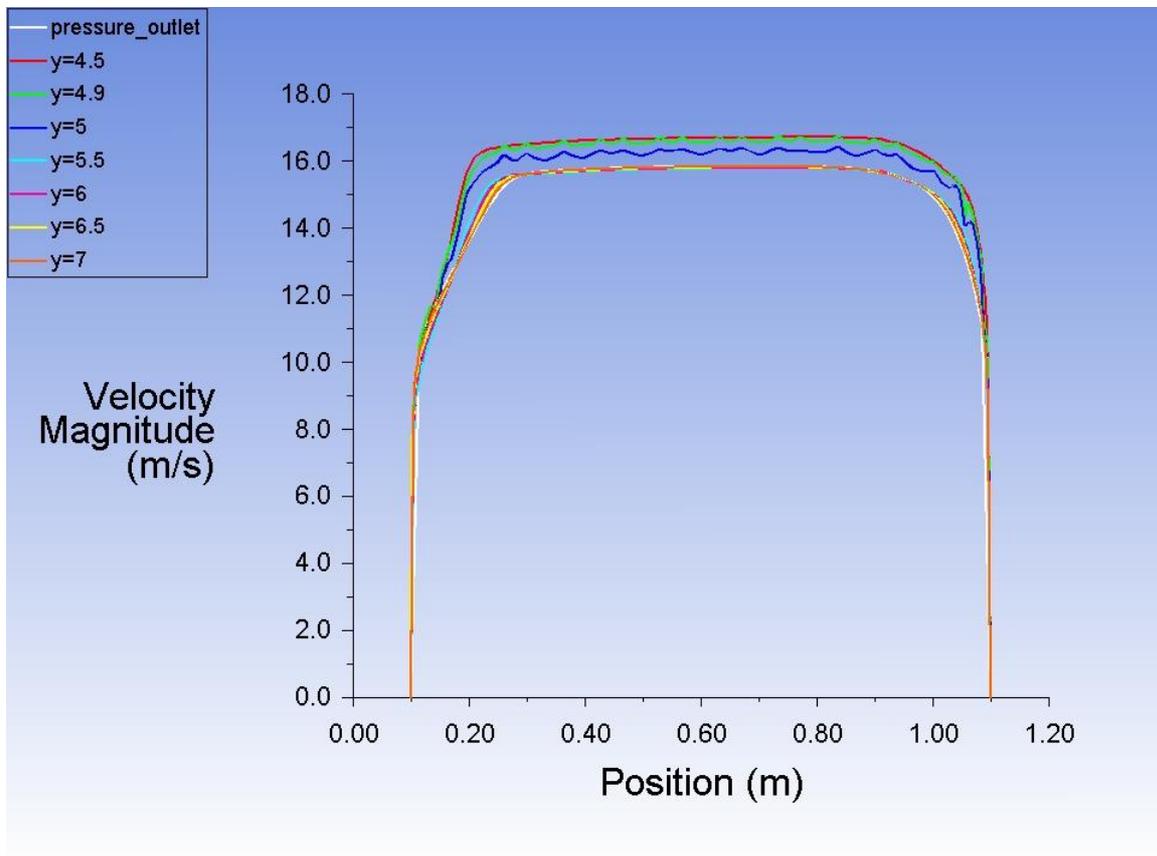


Figura 38. Gráfica de velocidad

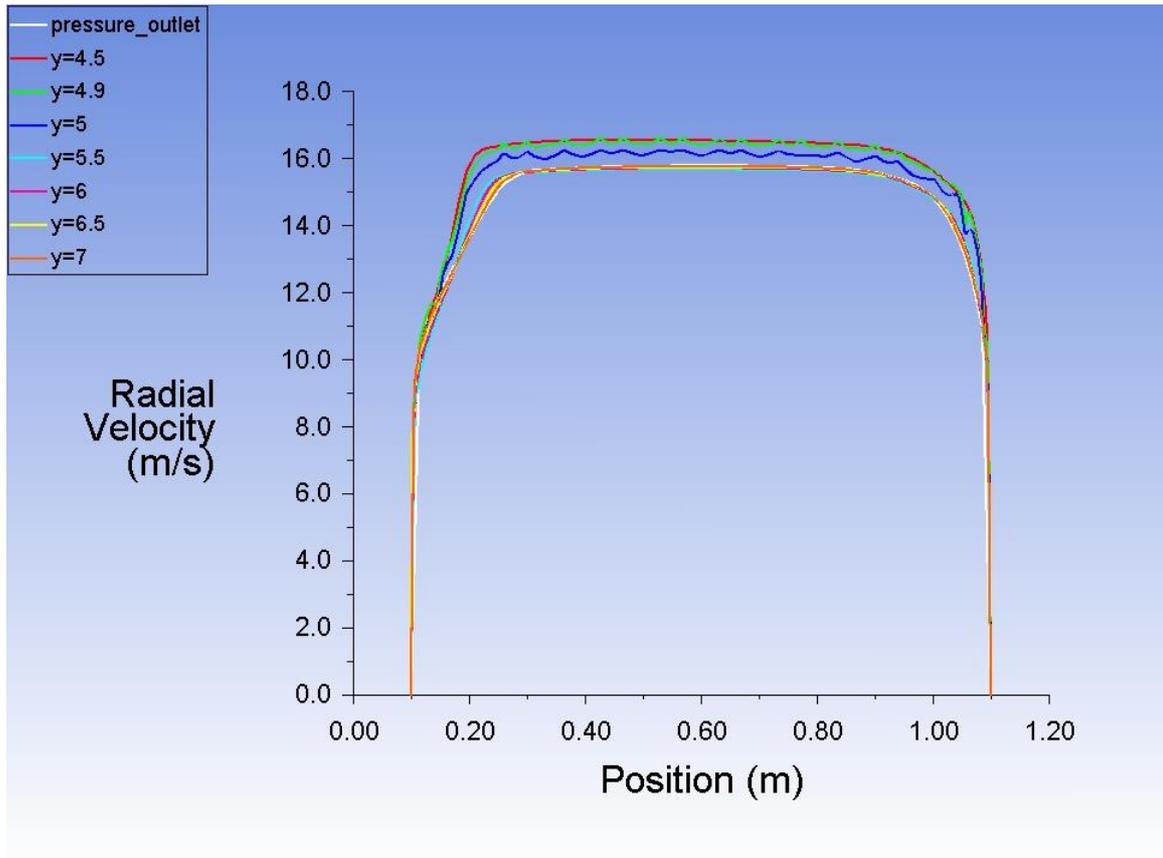


Figura 39. Gráfica de velocidad radial

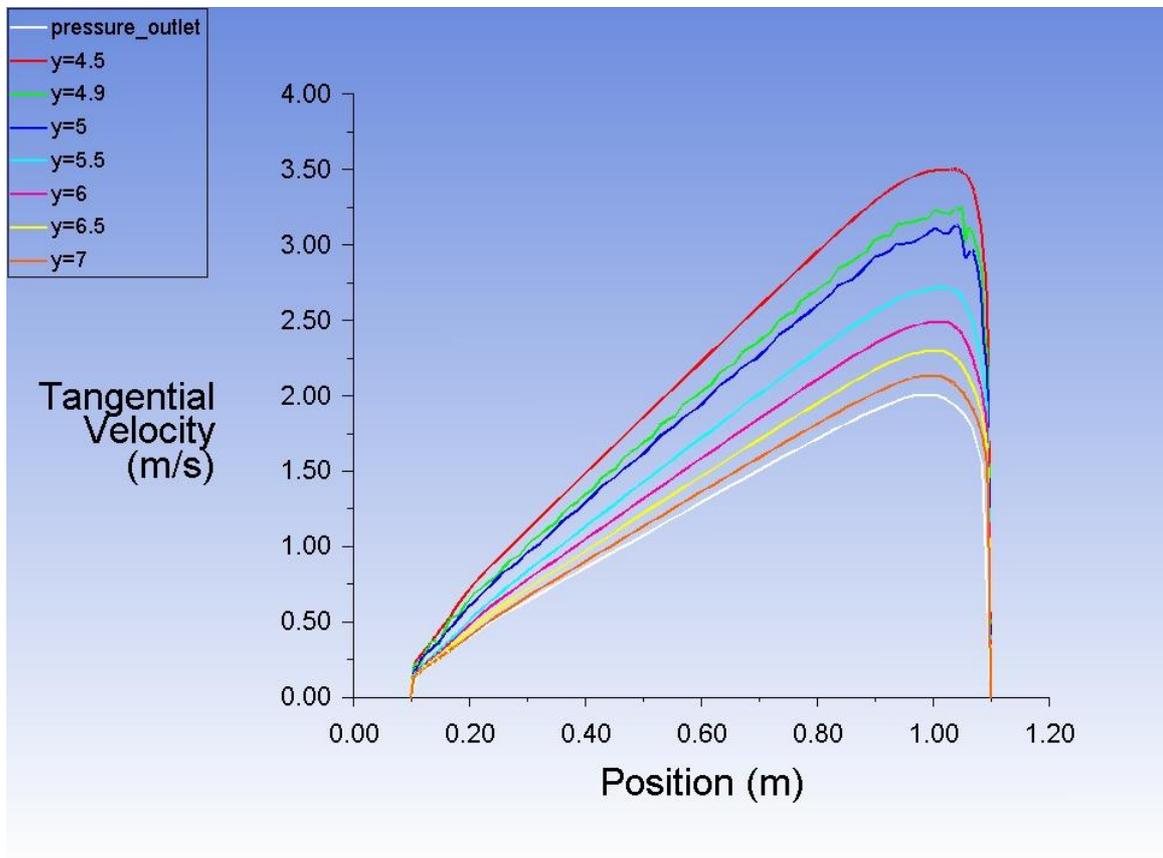


Figura 40. Gráfica de velocidad tangencial

Siguiendo el mismo criterio de medición que con la energía turbulenta se pueden obtener los resultados de varios

parámetros significativos que definen la variación de las condiciones del flujo a lo largo del canal vertical. Estos resultados se pueden observar de forma numérica en la Tabla 3. Parámetros significativos en el canal vertical, donde se presenta los valores medios de ciertos parámetros para varios valores del eje y en el canal vertical. Algunos de los parámetros presentan variaciones apreciables en un corte transversal al eje del conducto vertical por lo que el valor medio puede no representar adecuadamente los valores máximo y mínimo del parámetro en cuestión en la localización correspondiente, pero la tabla es una aproximación que puede ser intuitiva en la mayoría de casos. Adicionalmente, para poner de manifiesto esta variabilidad, estos valores vienen representados junto a su coeficiente de variación (CV), el cual representa el porcentaje de dispersión de los datos medios presentados. Los datos con un CV menor del 25% pueden considerarse homogéneos, por lo que la magnitud media representada tiene cierto grado de fiabilidad; mientras que si el CV es mayor que 25% los datos comienzan a ser más heterogéneos y estos datos medios van perdiendo fiabilidad conforme se acercan a 100%. Los datos de la Tabla 3 vienen representados gráficamente en las figuras comprendidas entre la Figura 41 y la Figura 47, en las que se representa en azul el parámetro en cuestión (izquierda) y en rojo el CV (derecha). Existen datos medios cuyo CV superan el 100%, lo cual significa que el dato no es fiable. Todas estas medidas han sido tomadas en ANSYS fluent, al igual que las anteriores. Las desviaciones típicas empleadas para el cálculo del CV se pueden consultar en la Tabla 5.

Tabla 3. Parámetros significativos en el canal vertical.

Parámetros	Posición							
	y=4,5m	y=4,9m	y=5m	y=5,5m	y=6m	y=6,5m	y=7m	Outlet
Concentración DPM (kg/m <sup>3</sup> )	0	0,0115	0,0077	0	0	0	0	0
Energía cinética de las turbulencias (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	0,5815	0,5762	0,5913	0,5774	0,5595	0,5467	0,5356	0,5264
Fracción másica de H <sub>2</sub> O	0	0,00056	0,00736	0,01829	0,18270	0,01823	0,01821	0,01819
Humedad relativa (%)	0	0,00206	0,02231	0,08069	0,07837	0,07737	0,07680	0,07642
Temperatura (K)	573	570,2	550,7	521,7	521,7	521,8	521,9	521,9
Velocidad (m/s)	16	15,93	15,57	15,02	15,02	15,02	15,02	15,02
Evaporación de DPM (kg/s)	0	3,6·10 <sup>-5</sup>	6,9·10 <sup>-5</sup>	7,1·10 <sup>-6</sup>	0	0	0	0

Tabla 4. Desviación típica de parámetros significativos en el canal vertical

Parámetros	Posición							
	y=4,5m	y=4,9m	y=5m	y=5,5m	y=6m	y=6,5m	y=7m	Outlet
Concentración DPM (kg/m <sup>3</sup> )	0	0,0658	0,0225	0	0	0	0	0
Energía cinética de las turbulencias (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	0,5318	0,5124	0,5194	0,4884	0,4530	0,4253	0,4067	0,3081
Fracción másica de H <sub>2</sub> O	0	0,00361	0,00544	0,00508	0,00395	0,00340	0,00300	0,00201
Humedad relativa (%)	0	0,02240	0,04123	0,06846	0,04300	0,03415	0,02805	0,01807
Temperatura (K)	0	13,32	16,44	14,42	11,35	9,84	8,56	5,77
Velocidad (m/s)	2,36	2,39	2,36	2,32	2,28	2,35	2,19	1,49
Evaporación de DPM (kg/s)	0	1,2·10 <sup>-4</sup>	8,9·10 <sup>-5</sup>	1,0·10 <sup>-5</sup>	0	0	0	0

A continuación, las representaciones gráficas junto con algunas observaciones y conclusiones que se pueden extraer de la evolución de los distintos parámetros.

- Concentración de DPM: Solo está presente en las zonas cercanas a las inyecciones, pues el agua se evapora mayoritariamente entre las cotas y=4,9m e y=5,5m. Además, existe un gran efecto de pared que hace que la concentración sea mucho mayor en las paredes, haciendo que el CV se dispare, como

se ha podido comprobar en representaciones anteriores, especialmente en la Figura 33.

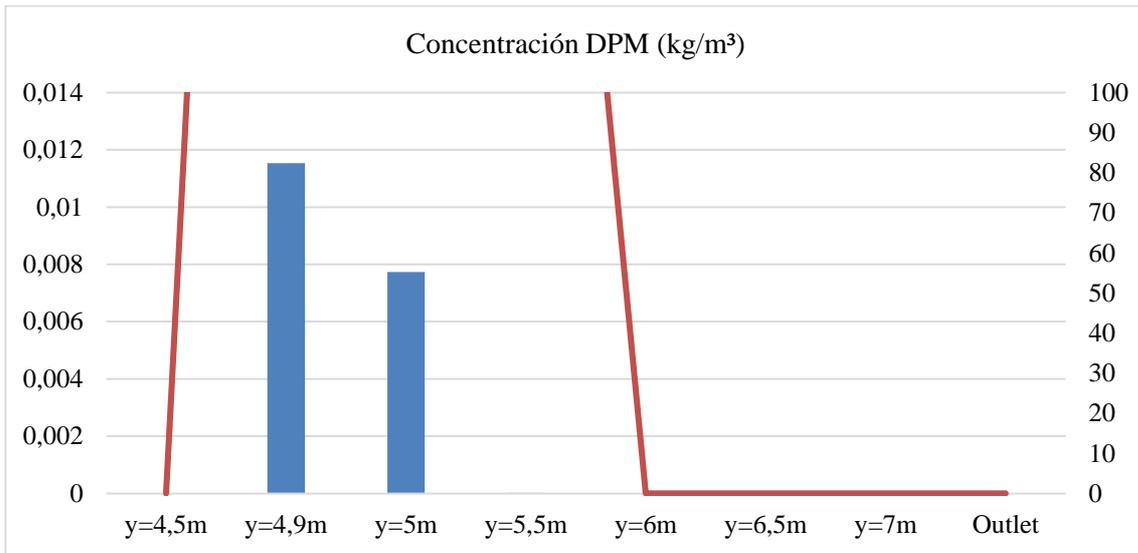


Figura 41. Concentración de DPM a distintas alturas del eje y.

- Energía cinética turbulenta: va disminuyendo conforme nos acercamos al outlet, pues el efecto que produce el codo sobre el flujo se va atenuando conforme este avanza por el canal vertical. Además, la energía cinética turbulenta está mucho más presente en las zonas cercanas a las paredes del canal vertical, como se puede comprobar en la Figura 29, lo que hace que el CV sea alto.

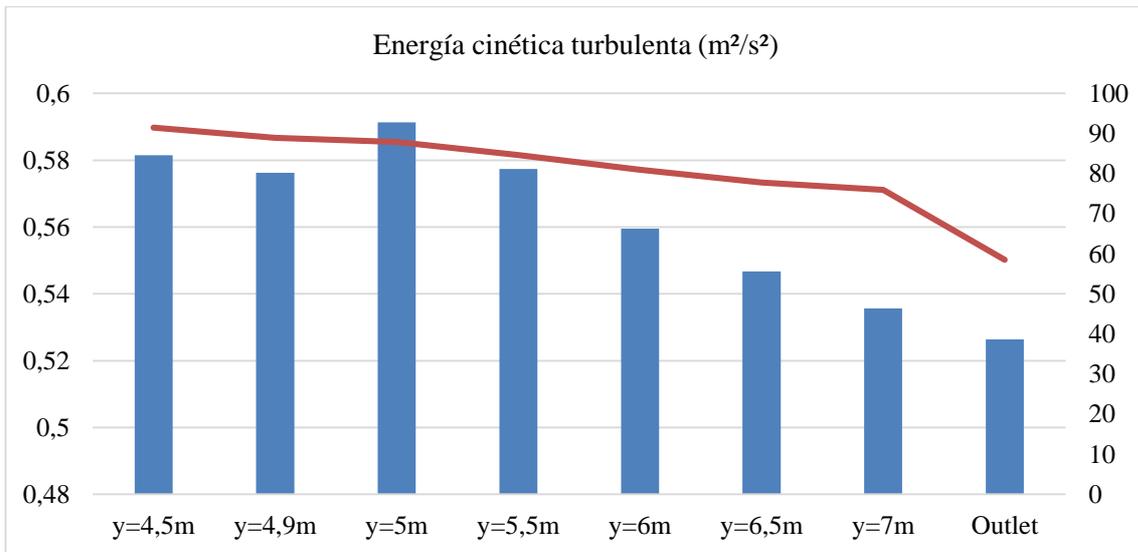


Figura 42. Energía cinética turbulenta a distintas alturas del eje y

- Fracción másica de H<sub>2</sub>O: En las cotas cercanas a las inyecciones el agua sigue siendo líquida. A partir de la cota y=5,5m la cantidad de agua en el aire es la máxima posible en estas condiciones, 0,018 a cualquier cota hasta el outlet.

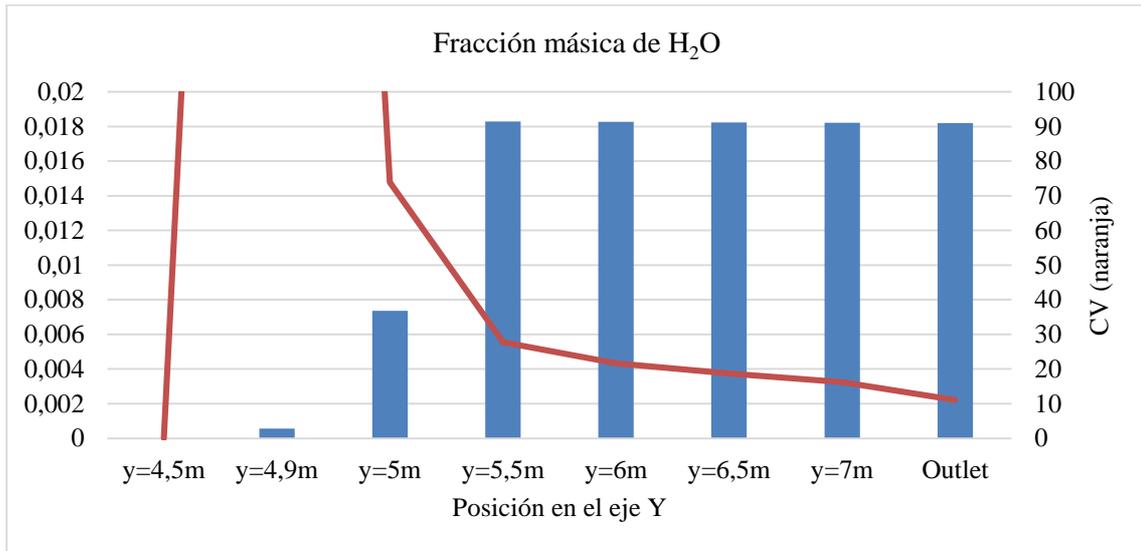


Figura 43. Fracción másica de H<sub>2</sub>O a distintas alturas del eje y

- Humedad relativa: El comportamiento es análogo al de la fracción másica de H<sub>2</sub>O.

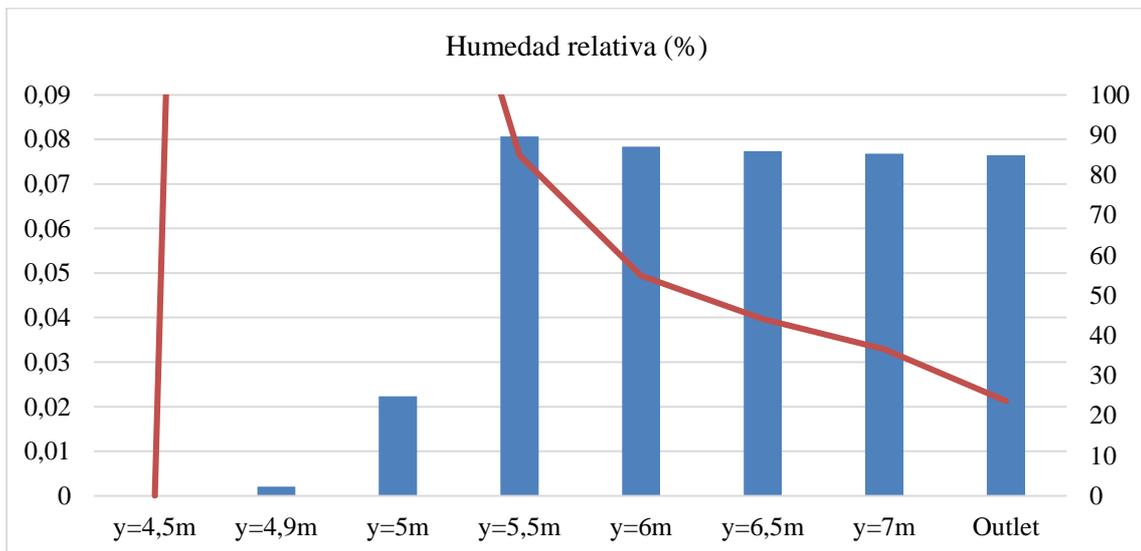


Figura 44. Humedad relativa a distintas alturas del eje y

- Temperatura: al producirse el enfriamiento evaporativo del aire de entrada, el aumento de humedad relativa conlleva una disminución de la temperatura, la cual se hace presente desde que las gotas se evaporan hasta el outlet. La temperatura se mantiene prácticamente uniforme en todo el ancho del canal a cualquier cota, siendo el CV menor del 10%.

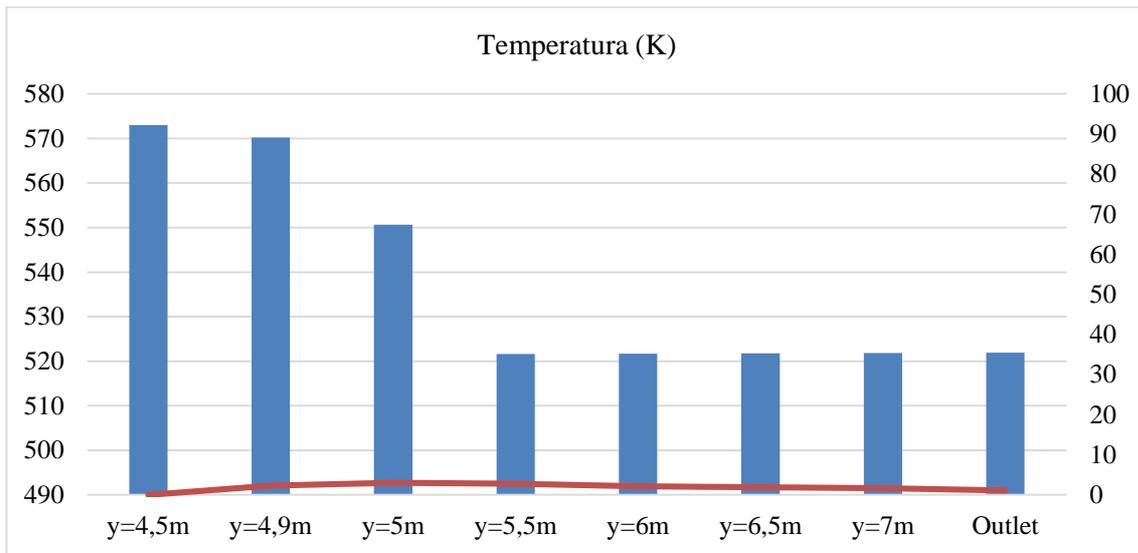


Figura 45. Temperatura del flujo a distintas alturas del eje y

- Evaporación de DPM: como ya se ha dejado entrever en el análisis de los parámetros anteriores, la evaporación se produce mayoritariamente en las zonas cercanas a la inyección hasta la cota de aproximadamente  $y=5,5\text{m}$ . La mayor parte del caudal de agua se evapora en los 10 primeros centímetros de longitud en el canal vertical desde que éste es inyectado. De ello se puede concluir que la la energía térmica (calor sensible) en la corriente de aire es más que suficiente como para evaporar el caudal de agua entrante, y podría existir margen como para evaporar una cantidad mayor de agua.

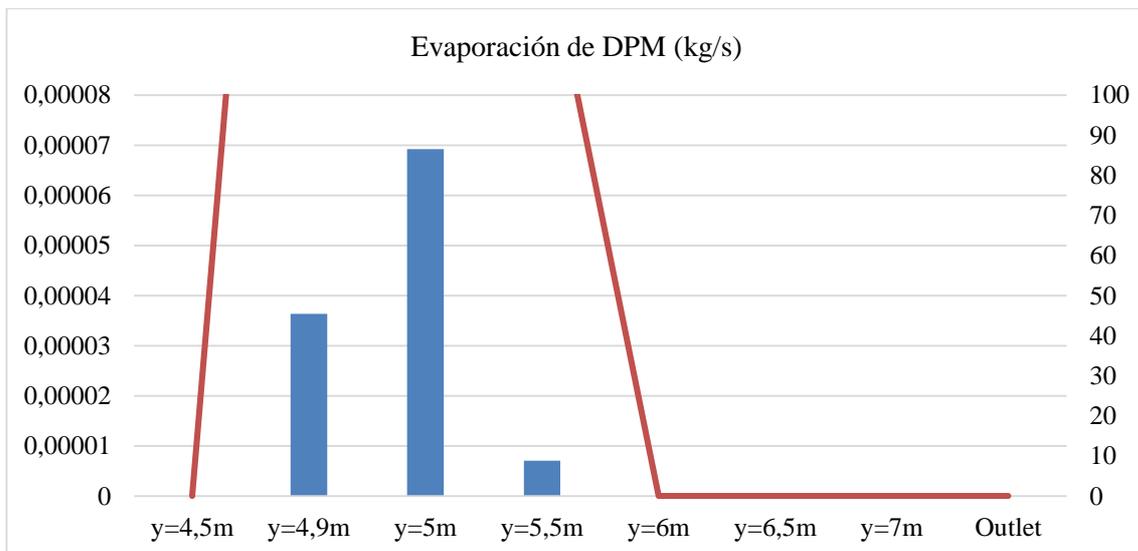


Figura 46. Evaporación de DPM a distintas alturas del eje y

- Velocidad del aire: se ve ligeramente disminuida a partir de la inyección de agua a  $-3\text{ m/s}$ , pero no ocurren cambios significativos que afecten al flujo ni al fin último del sistema.

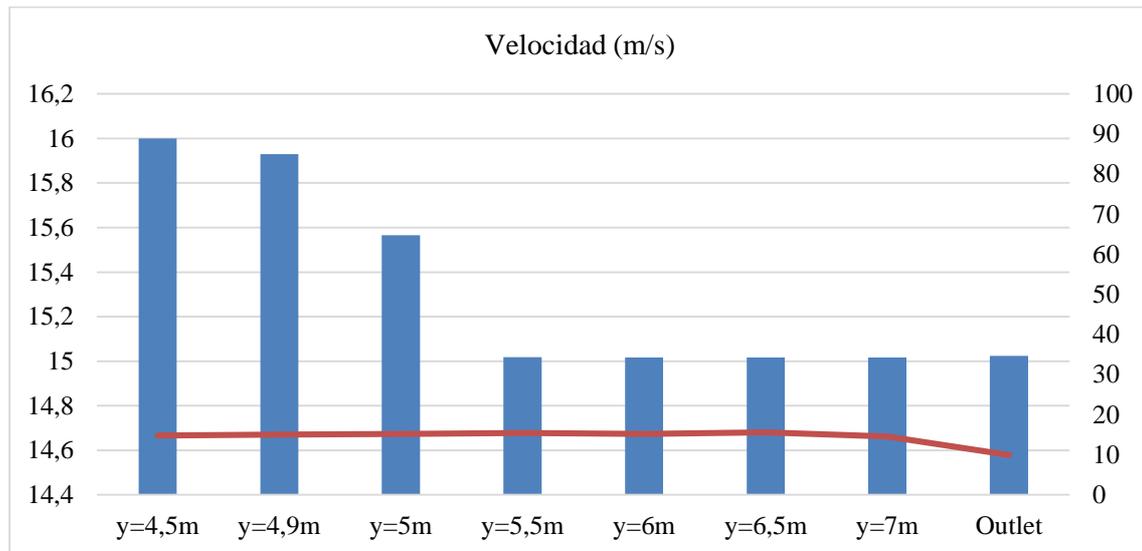


Figura 47. Velocidad a distintas alturas del eje y

Observando estos datos se pueden sacar las siguientes conclusiones:

1. Las variables relacionadas exclusivamente con la fase discreta (concentración de DPM, humedad relativa, fracción másica de H<sub>2</sub>O y evaporación de DPM) tienen una enorme dispersión de los datos, sobre todo en alturas cercanas a la inyección de las gotas. Esto es por la gran influencia de las paredes, que hace que las gotas, aún en estado líquido, se acumulen en la pared. Conforme las gotas comienzan a cambiar su estado a gaseoso los datos comienzan a ser menos dispersos a alturas mayores en el eje vertical.
2. Aunque la evaporación total se produzca a lo largo de una distancia aproximada de 60 cm (entre y=4,9m e y=5,5 aproximadamente), la mayor parte de la evaporación se produce en los primeros 10 cm, entre y=4,9m e y=5m.
3. El efecto de la inyección a contracorriente disminuye la velocidad del flujo
4. Los perfiles más homogéneos a cualquier altura son los de velocidad y temperatura.
5. Se producen los efectos esperados del fenómeno del enfriamiento evaporativo: incremento de humedad y disminución de la temperatura.
6. Existe una disminución progresiva de la energía cinética turbulenta. El flujo se va uniformizando conforme avanza por el canal vertical hasta, eventualmente, alcanzar un perfil uniforme en toda la anchura del canal si la longitud del mismo fuera mayor.

Así pues, podemos concluir que el caso base implica unos valores asumibles y suficientes para cumplir el objetivo de evaporar el agua de la salmuera.

Con estos datos del caso base, y volviendo a la clasificación de flujo presentada en el apartado 3.1.1, se puede determinar de manera aproximada si el flujo se encuentra en régimen *one-way coupling* o *two-way coupling*. Para ello se calcula la fracción volumétrica de las partículas como se presenta bajo la Figura 9 ( $\phi_p$ ) empleando áreas en lugar de volúmenes (pues este proyecto se ciñe únicamente a un estudio bidimensional), por lo que se toma el área de un círculo con el mismo diámetro que las partículas en lugar del volumen de una única partícula ( $V_p$ ) y se toma el área comprendida entre la introducción de gotas y la salida del canal en lugar del volumen ocupado por partículas y fluido ( $V$ ). Sabiendo que el número de partículas es 30, el área de una partícula es de  $5,03 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$  y el área ocupada por partículas y fluido es  $12,25 \text{ m}^2$ , la fracción volumétrica es de  $12,31 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ . De esta forma, se podría considerar que este sistema se encuentra en el régimen *one-way coupling*.

#### 4.3.1 Variaciones de los parámetros de la fase discreta

Un estudio completo no puede limitarse a analizar únicamente un caso que funcione pues es necesario explorar otras posibilidades para compararlas entre ellas. Sólo así, teniendo una perspectiva lo suficientemente amplia de

cómo podría diseñarse el sistema, se puede llegar a la solución más válida o incluso a una solución óptima (la cuál no es el objetivo que se persigue en este trabajo, pero sí una solución con un grado de validez suficiente). De esta forma, este subapartado y el siguiente muestran los cambios y comportamientos del sistema ante variaciones en los valores de los parámetros ya establecidos (los del caso base, para el cual ya se cumplen los objetivos como se ha demostrado anteriormente).

Las condiciones de contorno del problema se irán variando una a una mientras se mantiene constante el resto de parámetros, para así poder analizar la influencia que tendría cambiar cada una de ellas en el sistema completo. Para contabilizar el impacto de cambiar cada condición de contorno sobre el sistema se medirán dos parámetros principalmente: la temperatura media y la humedad relativa a la salida del canal vertical. Además, si procede, se incluirán gráficos o figuras que ilustren estos cambios, si son representativos o añaden información relevante que permita analizar los resultados desde otros puntos de vista. Los parámetros de la fase discreta cuya influencia se va a analizar son los siguientes:

- Caudal de fluido inyectado
- Diámetro de las gotas introducidas
- Velocidad del fluido inyectado
- Temperatura del fluido inyectado
- Fluido inyectado: agua pura o salmuera

La primera variable a analizar es el caudal de salmuera introducida. Ya que el objetivo de este dispositivo es el tratamiento de agua, es razonable pensar que nuestro objetivo sea tratar la mayor cantidad de agua dentro de unas condiciones razonables para la aplicación real que se le quiere dar. Manteniendo el resto de valores constantes, se han hecho tres simulaciones como se indica en la Tabla 5, donde se recoge si se produce evaporación o no de las partículas junto con la temperatura y la humedad medias a la salida del regenerador; valores de salida del proceso de enfriamiento evaporativo que es interesante conocer. Al igual que en el caso base, lo que llamamos salmuera en este subapartado es, a efectos prácticos, agua, por simplicidad.

Tabla 5. Evaporación de las partículas aumentando el caudal de salmuera por inyector

Caudal de salmuera por inyector (kg/s)	Temperatura media de salida (K)	Humedad relativa media de salida (%)	Evaporación de las partículas
0,006 (base)	521,9	0,08	30/30
0,012	473,7	0,39	30/30
0,018	428,2	1,89	30/30
0,025	386,9	9,67	28/30

A partir de estos datos se obtienen los datos gráficos recogidos en la Figura 48. En ellos, al igual que anteriormente, se representa también el coeficiente de variación, el cuál determina la dispersión de estos datos y cuán fiables son estos datos medios. Además, para una mejor comprensión de la evaporación de la salmuera se puede consultar la Figura 49, que presenta los diagramas de contorno de la disminución del diámetro en los cuatro casos. En dicha figura se pretende representar únicamente de forma cualitativa el recorrido de las partículas hasta que son evaporadas (excepto en el caso de 0,025 kg/s). Se pueden obtener varias conclusiones:

- (i) El enfriamiento evaporativo, como cabe esperar, se hace más notorio con un mayor flujo de salmuera, aumentando la humedad relativa y disminuyendo la temperatura
- (ii) Conforme aumenta el caudal de salmuera se hace más notorio el efecto de pared. En el caso de 0,024

kg/s el efecto es tal que la acumulación de humedad en dicha zona no permite la evaporación completa de la partícula más próxima a cada pared, por lo que en ese caso no se cumpliría el objetivo principal.

(iii) Considerando constantes el resto de parámetros es posible mejorar el caso base, pues el sistema permite evaporar 2,5 veces el caudal de agua empleado inicialmente.

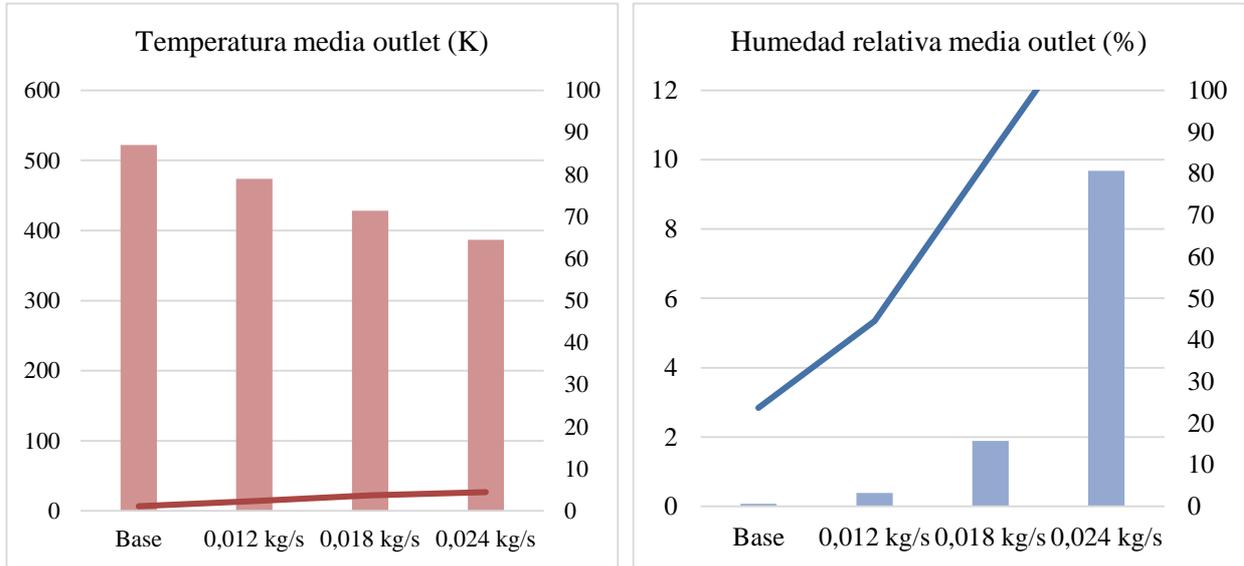
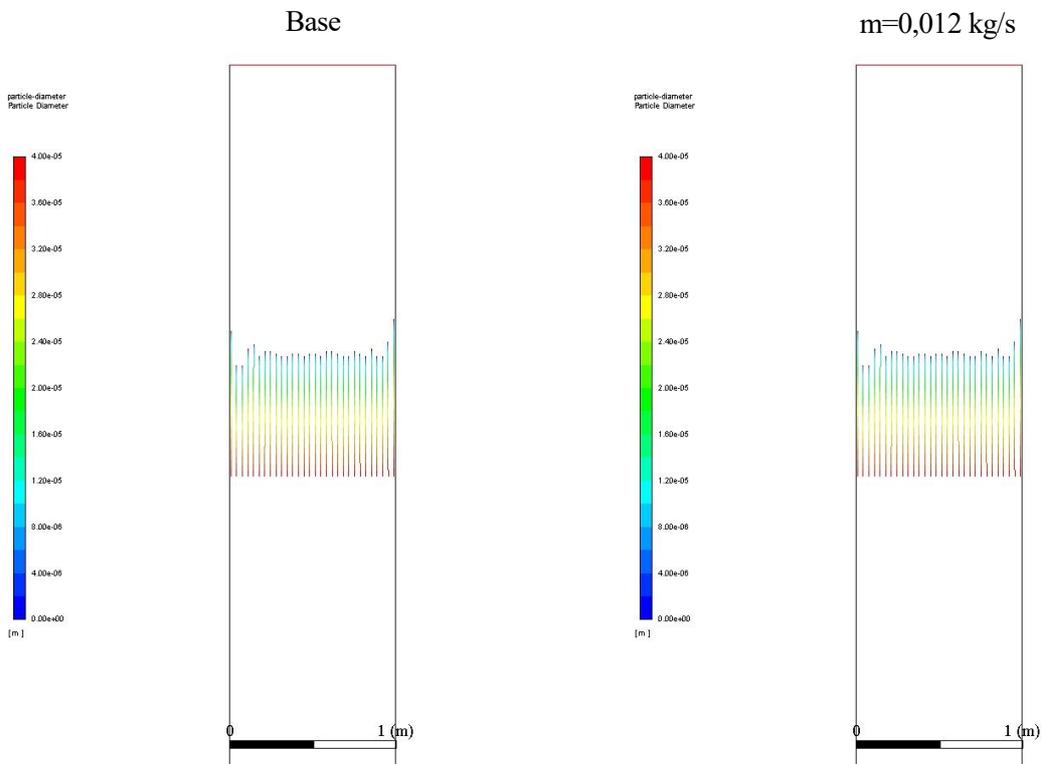


Figura 48. Representación de la temperatura y la humedad relativa para varios caudales de salmuera. Las barras muestran el parámetro en cuestión (izquierda) y la línea el CV (derecha)



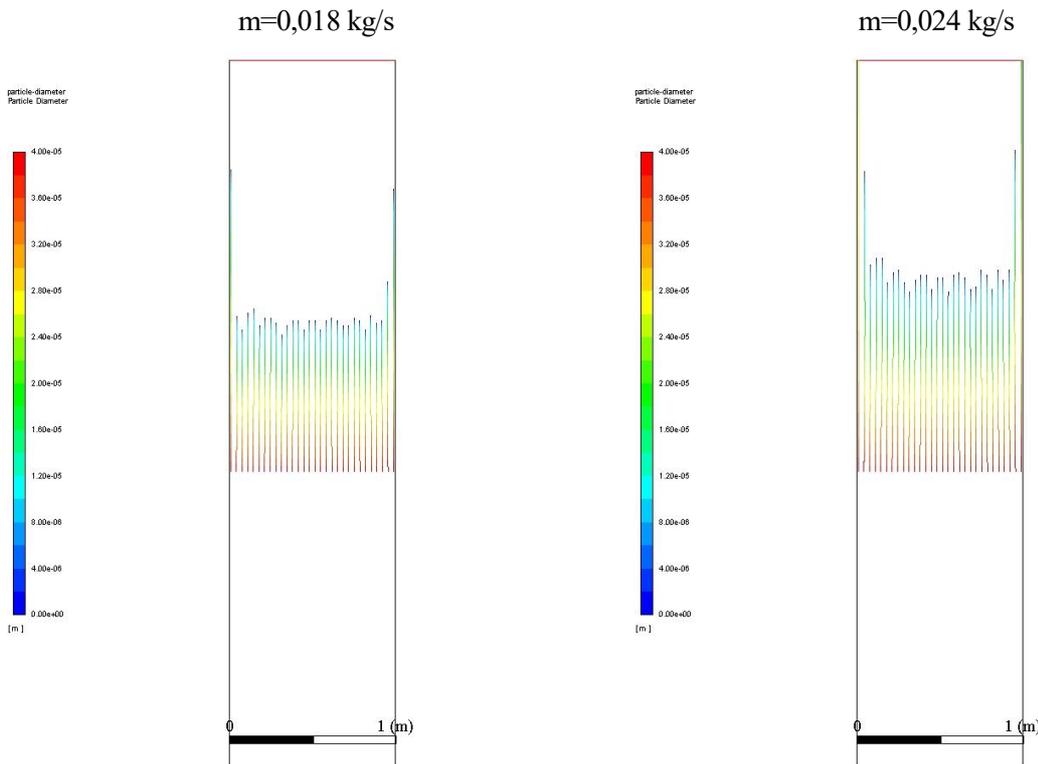


Figura 49. Diámetro de las partículas para distintos caudales de salmuera

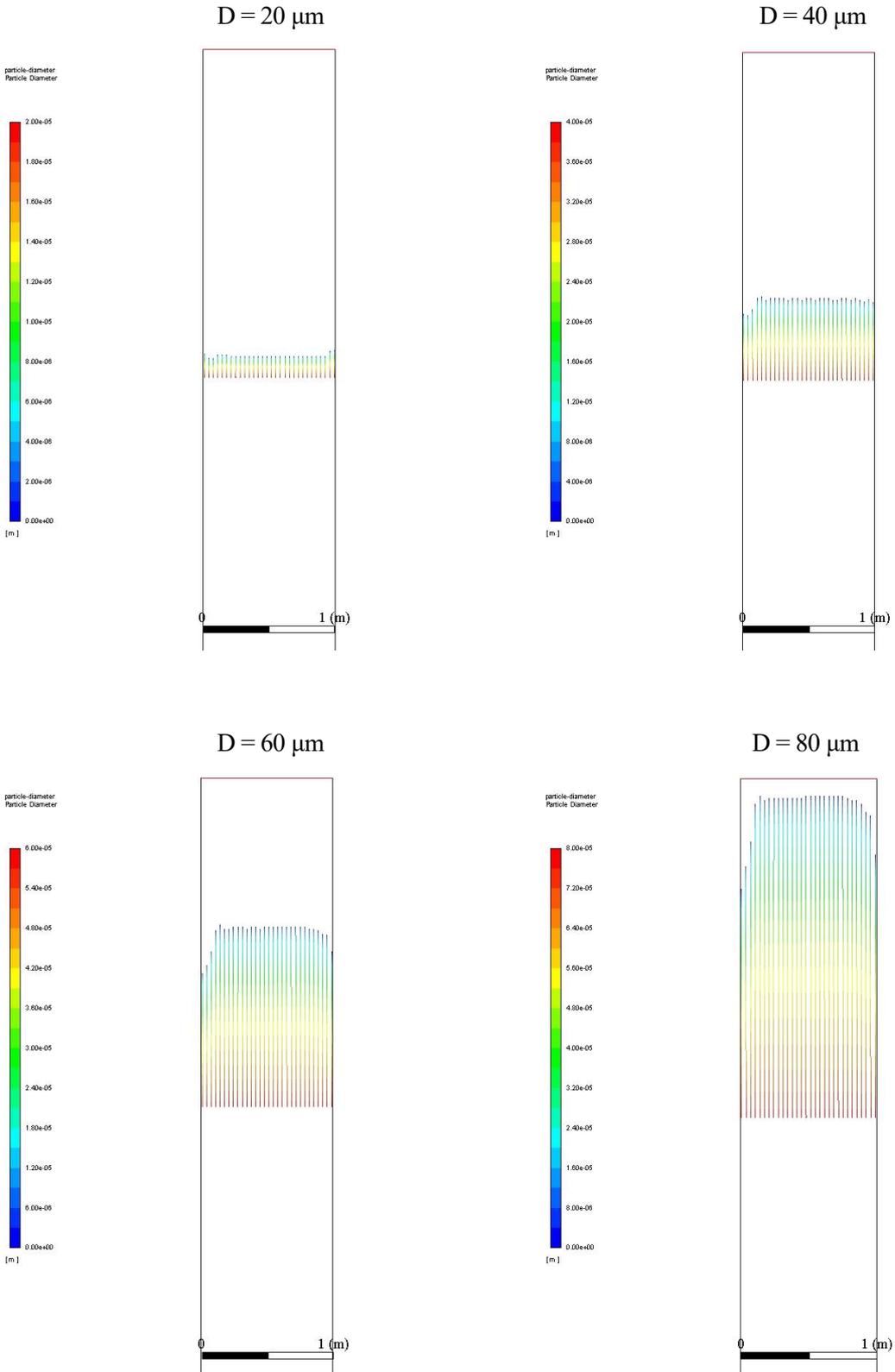
En segundo lugar, se evalúa el impacto de variar el tamaño de las gotas. Como ya se ha comentado en apartados anteriores, aunque en la mayoría de sistemas de inyección se obtiene un cierto rango de gotas de distinto tamaño, en este subapartado también se suponen todas las gotas del mismo tamaño. Estas comparaciones se abordan de la misma forma que la comparación anterior de caudales de entrada de la fase discreta, y se pueden consultar en la Tabla 6 y la Figura 51. Nuevamente esta comparación se presenta de forma gráfica sobre diagramas de contorno del diámetro de las partículas, pues nos da una visión muy intuitiva de lo que le ocurre a las partículas.

Tabla 6. Evaporación de las partículas aumentando el diámetro de las gotas introducidas

Diámetro de las gotas introducidas (µm)	Temperatura media de salida (K)	Humedad relativa media de salida (%)	Evaporación de las partículas
20	521,89	0,07646	30/30
40 (base)	521,89	0,07643	30/30
60	521,90	0,07643	30/30
80	521,88	0,07650	30/30
100	526,45	0,06484	29/30

El único cambio observado está en el caso de 100 µm, escenario en el cuál no se evaporan todas las partículas introducidas, por lo que deja de ser interesante seguir aumentando el tamaño de las mismas. En este caso, debido a que el enfriamiento evaporativo es menor, la temperatura de salida media es mayor y la humedad relativa

media es menor. Como se puede observar, el sistema es bastante sensible a ligeros cambios del tamaño de las gotas para la configuración planteada en el caso base, por lo que convendría tener un gran control sobre esta variable. Nuevamente, gracias a este estudio se puede comprobar que el sistema admite variaciones y mejoras, pues es posible introducir en el sistema un tamaño mayor de partículas, que siempre es la posibilidad más barata y sencilla de llevar a cabo en la mayoría de procesos de creación de gotas.



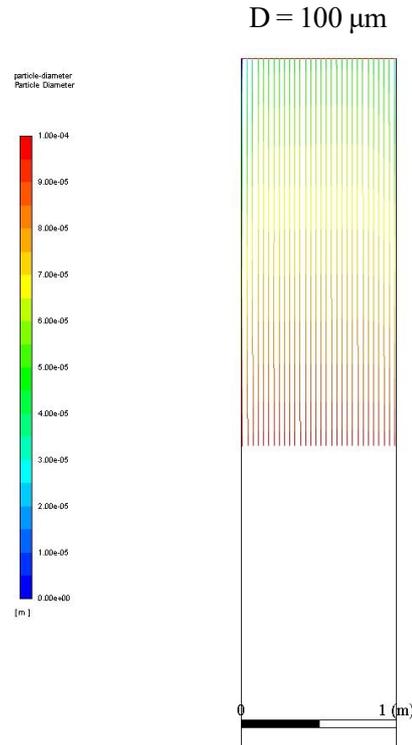


Figura 50. Diámetro de las partículas para distintos tamaños de partícula

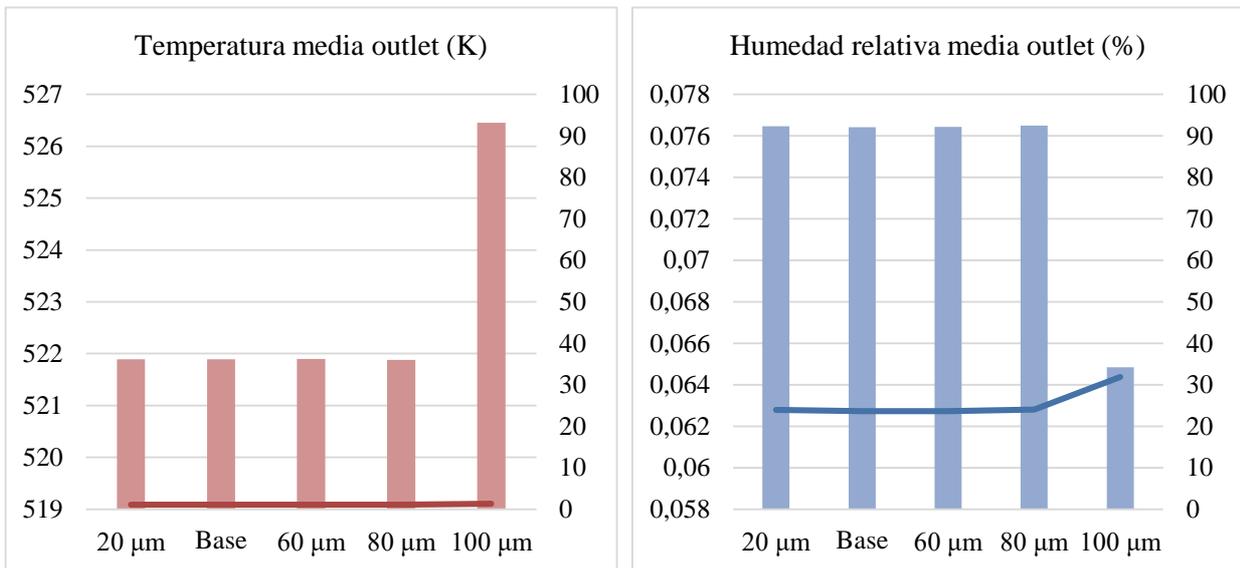


Figura 51. Representación de la temperatura y la humedad relativa para varios tamaños de partícula. Las barras muestran el parámetro en cuestión (izquierda) y la línea el CV (derecha)

Como ya se ha comentado, en la práctica, se ha empleado agua en lugar de salmuera en el caso base por simplicidad. Cabe esperar que, si las propiedades del fluido inyectado cambian, también lo haga el comportamiento del sistema y, por tanto, las características del flujo de salida. Para el cálculo de las nuevas características de la fase discreta, considerando la salmuera, se ha empleado EES (*Engineering Equation Solver*). En dicho software se ha empleado una librería de funciones desarrollada por MIT [42] que permite calcular distintas propiedades del agua marina en función de la temperatura, la presión y la salinidad. De esta forma, a

continuación, se observa el impacto de cambiar los parámetros que definen el agua por los que definen la salmuera, cambiando su densidad, su calor específico y su capacidad calorífica para hacer que el fluido inyectado se parezca a agua salada lo máximo posible

La salinidad de la corriente de salmuera que entra en el ZLD es, concretamente, de 46183 ppm, por lo que es razonable un estudio del efecto de la salinidad en un rango lo suficientemente amplio como para poder apreciar el efecto de la salinidad (entre 40000 ppm y 80000 ppm). En la Tabla 7 se observan las características del flujo inyectado según el grado de salinidad; parámetros calculados a partir de la función de EES mencionada. Tomando el calor latente constante con la temperatura, como se ha venido haciendo hasta ahora en todo este proyecto, el cambio de comportamiento del flujo a lo largo del canal y los cambios los parámetros del flujo a la salida del mismo apenas son apreciables. Esto se puede comprobar en la

Tabla 8. En ambas tablas se incluye una fila en referencia al caso base (salinidad 0) para facilitar la comparación.

Tabla 7. Características del flujo inyectado según la concentración de sales

Salinidad (g/kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Capacidad térmica isobárica (J/(kg·K))	Entalpía de cambio de fase (kJ/kg)	Punto de ebullición (K)
0	998,2	4182	2263	373
40	1029	3973	2335	373,3
46,18	1034	3942	2340	373,4
50	1036	3924	2331	373,4
60	1044	3875	2306	373,5
70	1052	3829	2282	373,7
80	1060	3784	2257	373,8

Tabla 8. Parámetros en el outlet según la concentración de sales

Salinidad (g/kg)	Temperatura media a la salida (K)	Humedad relativa a la salida (%)	CV temperatura media a la salida (%)	CV humedad relativa a la salida (%)
0	521,9	0,07642	1,106	23,65
40	520,6	0,07819	1,136	24,031
46,18	520,9	0,07779	1,129	23,94
50	521,1	0,07754	1,113	23,98
60	521,6	0,07687	1,131	23,60
70	522,0	0,07624	1,102	24,51
80	522,5	0,07559	1,091	23,44

Simular un fluido inyectado con estas características conlleva una mayor aproximación a la realidad que la inyección de una fase discreta compuesta únicamente por agua pura. Como se ha comprobado, esta nueva aproximación no supone grandes cambios en el comportamiento del sistema con respecto del caso base por lo que se podría tomar el fluido de salinidad 40,18 g/kg como referencia de cara a futuros trabajos que desarrollen este proyecto.

Finalmente, cabe mencionar que el cambio de velocidad o temperatura en la corriente inyectada no introduce apenas cambios significativos en el comportamiento del sistema (al menos dentro de un margen lógico y aceptable para la aplicación que se le quiere dar al recuperador). No obstante, se expone en la Tabla 9 el efecto que estas variables producen en la temperatura y la humedad relativa medias en el outlet, sin entrar en más detalle.

Tabla 9. Variaciones de la temperatura y la humedad relativa medias en el outlet relativas al caso base si se modifican la velocidad o la temperatura de entrada de la fase discreta.

Modificación	Variación de la temperatura media de salida	Variación de la humedad relativa media de salida
Aumento de la velocidad de entrada de las gotas a 13 m/s a contracorriente	+ 0,0019 %	+ 0,2 %
Aumento de la temperatura de entrada de las gotas a 353 K	+ 0,8 %	- 7,2 %

Las variaciones de la temperatura y la humedad cuando varía la velocidad de entrada de la salmuera son apenas apreciables, pudiendo ser causadas por la variación introducida en las variaciones del propio software. Sí se aprecia cierto cambio cuando se aumenta la temperatura de entrada de las gotas, produciéndose un aumento de la temperatura y una disminución de la humedad relativa. También se puede comparar dicho efecto en la Figura 52. Al subir la temperatura de la salmuera se consume menor calor sensible del gas y por lo tanto este se enfría

menos, dando como resultado un flujo más caliente a la salida. El aire húmedo, para la misma humedad absoluta y mayor temperatura, presenta una humedad relativa inferior. Además, la energía térmica disponible del gas de entrada independientemente de la temperatura de la salmuera, escenario que podría no darse si la energía térmica disponible del gas fuera menor.

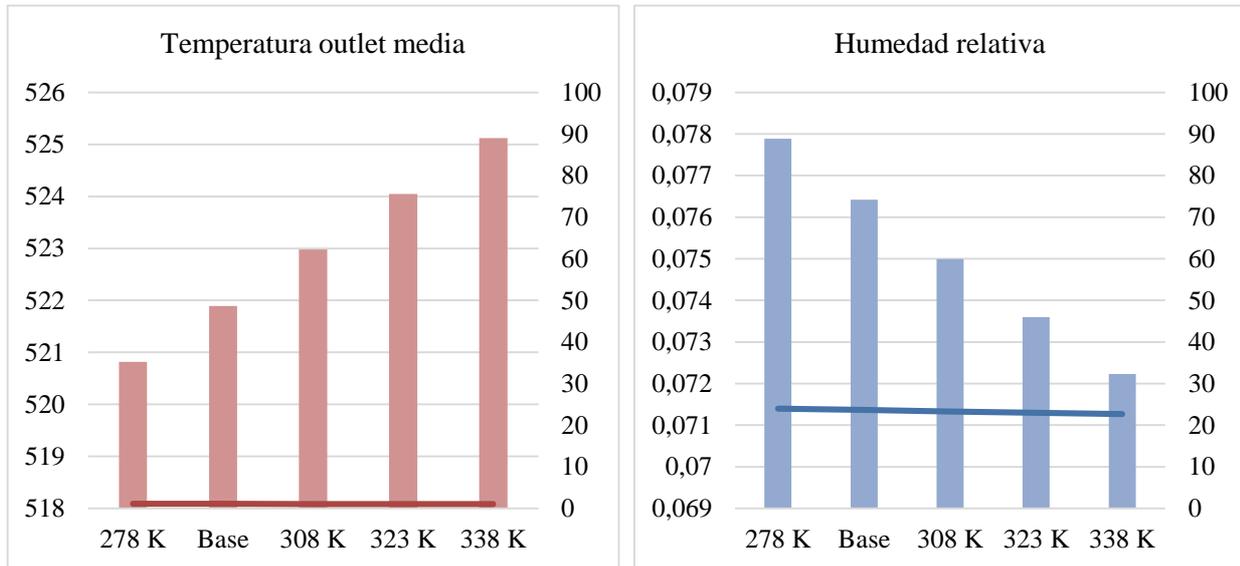


Figura 52. Representación de la temperatura y la humedad relativa para varias temperaturas de entrada de salmuera. Las barras muestran el parámetro en cuestión (izquierda) y la línea el CV (derecha)

#### 4.3.2 Variaciones de los parámetros de la fase continua

El análisis del sistema no solo se limita a observar el comportamiento del mismo ante cambios en la fase discreta. También son necesarias experimentaciones y mediciones con respecto a variaciones de los parámetros de la fase continua. Los parámetros de la fase continua cuya influencia se va a analizar son los siguientes:

- Velocidad del aire a la entrada
- Temperatura del aire a la entrada
- Humedad del aire a la entrada

El primer parámetro a analizar de la fase continua es la velocidad del aire a la entrada. Esta velocidad debe ser lo suficientemente elevada como para evitar que la fase discreta se deposite en la base del canal por acción de la gravedad, pero tampoco demasiado alta para que arrastre las gotas sin que estas se evaporen. En un escenario ideal, las gotas se quedarían en suspensión con tiempos de residencia altos hasta que se evaporaran.

Se estudian los cambios producidos en el sistema para casos en los que la velocidad disminuye, que es el terreno donde se pueden observar mejoras, pues empleando más velocidad que en el caso base (16 m/s) solo se consigue el arrastre de las gotas hacia el exterior, consiguiendo un enfriamiento evaporativo menos eficiente. En los casos aquí estudiados se reduce la velocidad del aire a 10 m/s y posteriormente a 7 m/s. La variación de la temperatura media y la humedad relativa media en el outlet se representa en la Figura 53, nuevamente representando también el coeficiente de variación para denotar la fiabilidad de estos datos medios. Como se puede observar en estas representaciones, el fenómeno del enfriamiento evaporativo es mucho más notorio conforme menor es la velocidad, haciendo que el sistema sea más eficiente. Esto conlleva, puede intuirse, un aumento en el tiempo de residencia: el tiempo de residencia máximo en el caso base es de  $6,03e-02$  segundos, mientras que en el caso en el que  $v=7$  m/s, el tiempo de residencia máximo es  $2,52e-01$  segundos; más de un orden de magnitud mayor. También se puede comprobar el aumento del enfriamiento evaporativo con la disminución de la velocidad en la Figura 54 que, si se compara con la Figura 36, se puede observar que los valores de fracción másica de  $H_2O$  en la corriente resultante son mayores para cualquier valor del eje vertical.

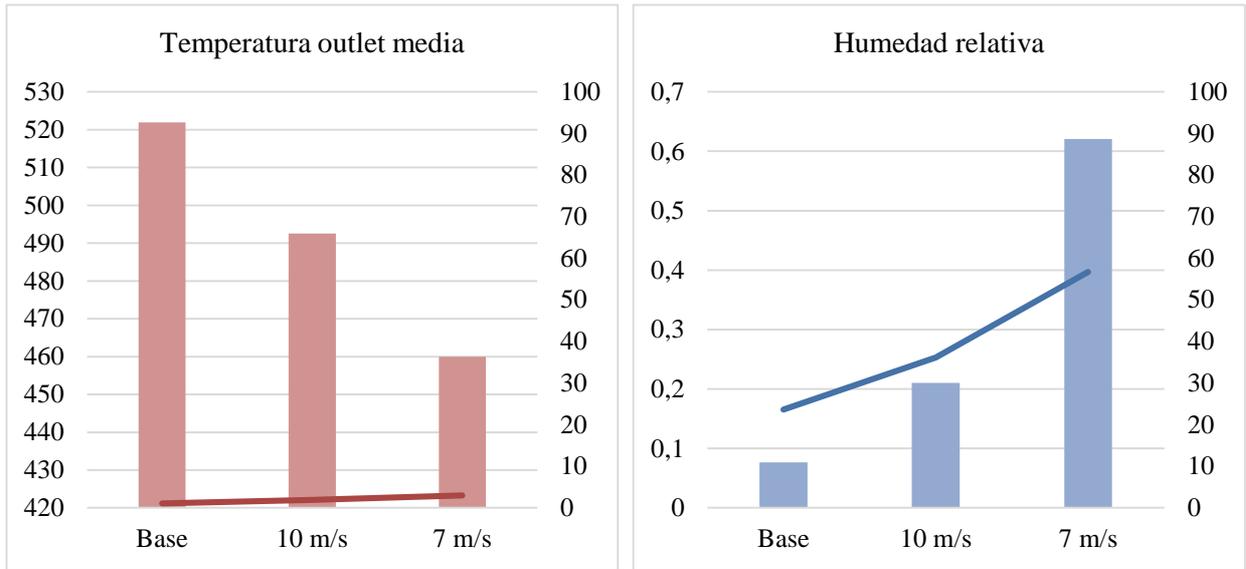


Figura 53. Representación de la temperatura y la humedad relativa para varias velocidades del aire a la entrada. Las barras muestran el parámetro en cuestión (izquierda) y la línea el CV (derecha)

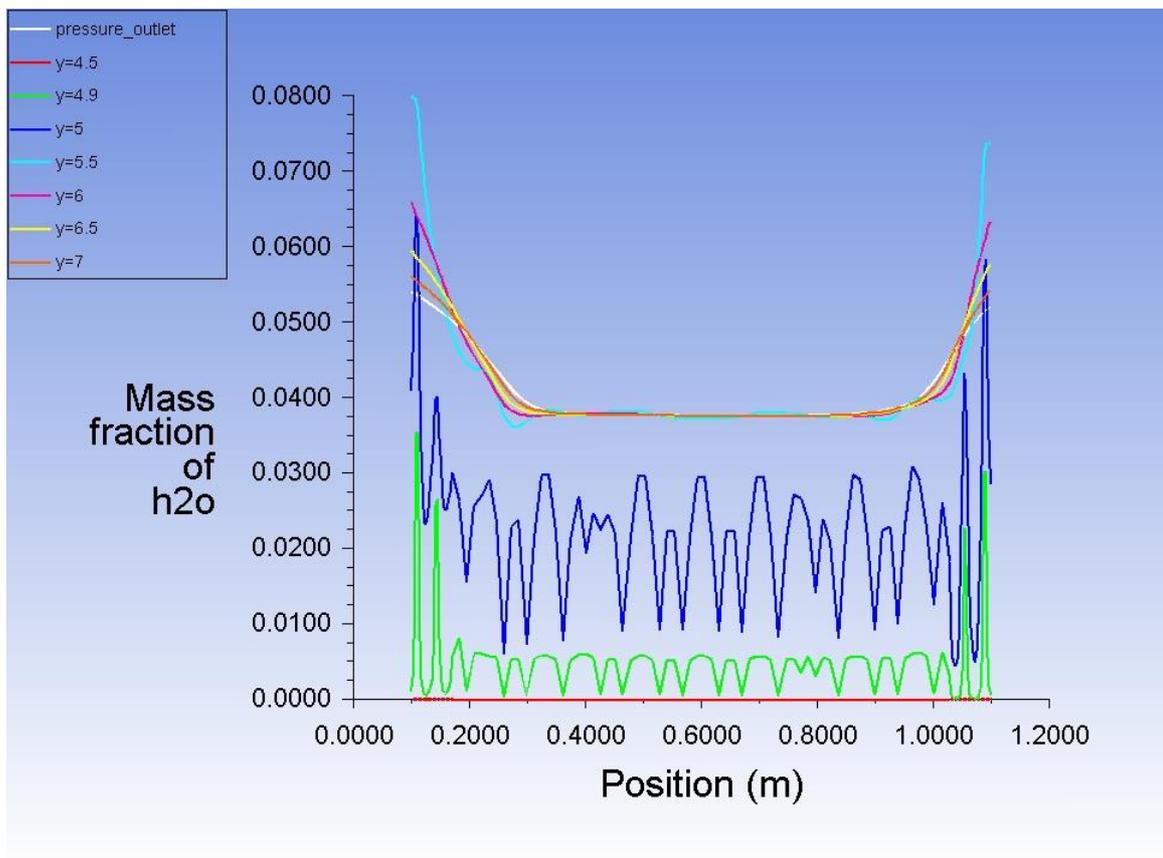


Figura 54. Gráfica de perfiles de la fracción másica de H<sub>2</sub>O para v=7 m/s a distintas alturas dentro del canal vertical

Pese a que hubiera sido interesante continuar bajando la velocidad para determinar el comportamiento del sistema hasta llegar al límite en el que las gotas caen por la fuerza de la gravedad, la simulación se vuelve inestable y los resultados obtenidos no son fiables. Por ello la mínima velocidad estudiada en este proyecto es 7 m/s. Por lo tanto, este trabajo puede ser mejorado y ampliado en el futuro con un estudio más exhaustivo y abarcando un mayor rango de velocidades.

Otro parámetro clave en este estudio es la temperatura del aire a la entrada del canal. Si se observa con

detenimiento el caso base se puede observar que la cantidad de energía aportada a través de la fase continua es capaz de evaporar rápidamente las gotas, pues estas pasan a vapor en centésimas de segundo y recorriendo apenas unos centímetros. A causa de los procesos previos al ZLD, es razonable estimar que la corriente de aire estará a una temperatura perteneciente al intervalo 250-300 °C. Este es el rango que se tiene en cuenta en este estudio. Disminuyendo la temperatura de la corriente de entrada, la Figura 55 muestra las variaciones de la corriente de salida si esta entra a 473 K ó a 574 K. Como se puede observar, conforme se disminuye la temperatura de entrada del flujo, mayor es el efecto del enfriamiento evaporativo. Considerando estos datos y los obtenidos en el análisis de la velocidad de entrada del flujo, se puede concluir que el flujo que entra en el canal en el caso base se caracteriza por tener demasiada temperatura y velocidad, por lo que para conseguir un enfriamiento evaporativo más eficaz sería más eficiente bajar estos valores disminuyendo el valor de ambos parámetros antes de entrar en el ZLD.

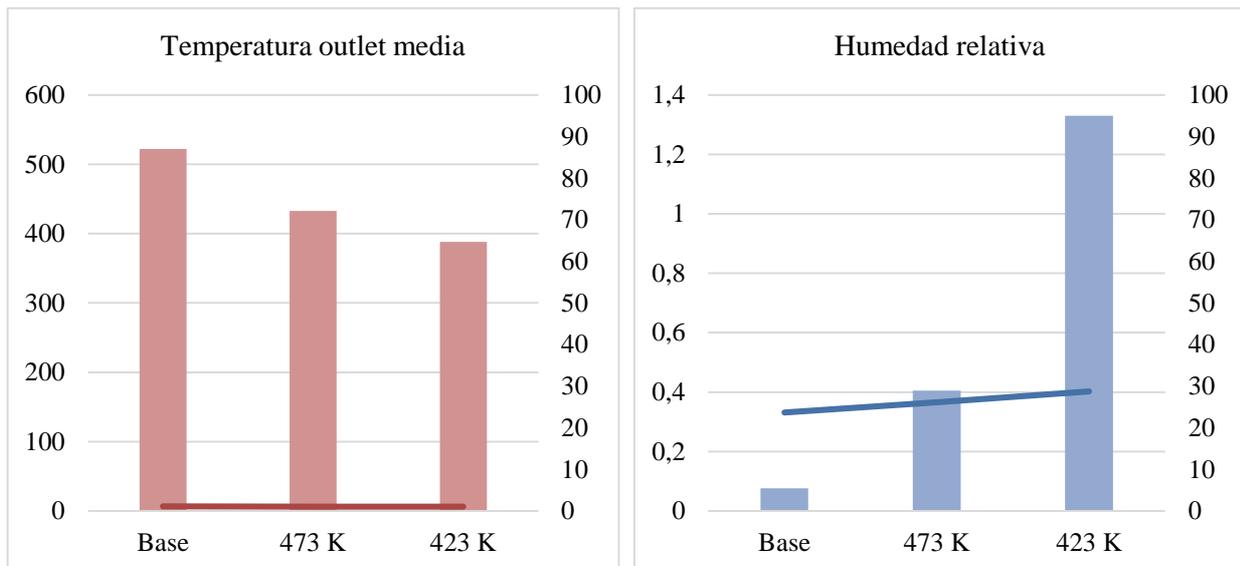


Figura 55. Representación de la temperatura y la humedad relativa para varias temperaturas del aire a la entrada. Las barras muestran el parámetro en cuestión (izquierda) y la línea el CV (derecha)

En el caso base se tomó la humedad del aire de entrada como nula, cuando dicho fluido no tiene por qué ser seco. De hecho, el aire empleado tendrá cierta humedad casi con toda seguridad. Como valores índice para evaluar el comportamiento del sistema ante distintos grados de humedad, se toman valores que se pueden encontrar en Sevilla, por ejemplo, a lo largo del año. Para ello, los datos empleados de la humedad relativa de la zona a lo largo del año se han tomado de [43]. En ANSYS la humedad del aire se introduce en términos de fracción másica, y para calcular este término se emplea una calculadora psicrométrica [44] en la que se introducen dos valores extremos de la humedad relativa en esta región, calculando ambas situaciones a 25°C para estar del lado de la seguridad. De esta forma, las fracciones másicas empleadas en ambos casos son los siguientes:

- HR = 25% → Fracción másica H<sub>2</sub>O: 0,0049
- HR = 75% → Fracción másica H<sub>2</sub>O: 0,015

Como se puede intuir, para valores de humedad relativa mayores, mayor es la humedad relativa del flujo a su paso por el ZLD. De hecho, el aumento de este parámetro apenas afecta a otras variables del sistema, por lo que la aproximación del caso base (HR=0%) es suficiente como para obtener unos resultados fiables. Los cambios introducidos por la variación de este parámetro se recogen en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros en el outlet según la humedad relativa en el inlet

Humedad relativa (%)	Temperatura media outlet (K)	Humedad relativa outlet (%)	CV temperatura media outlet (%)	CV humedad relativa outlet (%)
0	521,9	0,08	1,106	23,65
25	522,0	0,10	1,105	20,91
75	522,1	0,14	1,103	17,81

## 4.5. Otras configuraciones

Observando los resultados de los análisis realizados en los anteriores subapartados, es evidente que el caso base está sujeto a modificaciones para mejorar el proceso de enfriamiento evaporativo que se produce en el regenerador pues, con ciertas modificaciones en los parámetros intervinientes, podría ser posible evaporar un mayor caudal de agua y de manera más eficiente. Este subapartado persigue aportar nuevas ideas basadas en las conclusiones obtenidas a partir de los resultados obtenidos en apartados anteriores, y así sugerir nuevas líneas de desarrollo de este sistema en trabajos futuros para conseguir una mayor aproximación al caso óptimo. Para ello toma algunas de las variaciones de los parámetros que se han hecho anteriormente, combinándolas para obtener mejores resultados. En este apartado se exponen variaciones del caso base constituyendo varios casos diferenciados en los que se consigue la evaporación completa. Se expondrán tres casos distintos, todos ellos siguiendo los siguientes principios:

- Conservan la misma geometría y la misma malla que en el caso base.
- Al igual que en el caso base, se sigue considerando constante la entalpía de vaporización del agua (pues, en caso contrario, se requeriría el uso de UDFs, *User-Defined Functions*).
- Estos casos tienen un grado de simplificación menor en las condiciones de contorno, acercando más los resultados a los que se obtendrían en la práctica.
- Las líneas de inyección de fase discreta no superarán 30 puntos de inyección pues un número mayor podría no ser realizable en la práctica por limitaciones tecnológicas y de espacio.
- En los tres casos se busca el tratamiento de un mayor caudal de agua y de una forma más eficiente

Cada uno de los 3 casos aborda el enfriamiento evaporativo desde un enfoque distinto. En la Tabla 11 se encuentran los parámetros que definen a los distintos casos y posteriormente se comentan detalles sobre cada uno de ellos. A diferencia del caso base, la fase discreta posee las características de la salmuera en todos los casos, además de incluir un 3% de humedad en la corriente de aire de entrada, acercando el problema más a las condiciones reales en las que el sistema pueda trabajar en la práctica. Las características que definen el fluido de la fase discreta según su concentración de sal se pueden consultar nuevamente en el apartado 4.3.2.

Tabla 11. Parámetros de otras configuraciones

Fase	Caso			
	Parámetro	1	2	3
Continua	Temperatura aire (K)	573	573	573
	Humedad relativa aire (%)	3	3	3
	Velocidad aire (m/s)	10	7	7
Discreta	Salinidad (g/kg)	46,18	46,18	46,18
	Temperatura salmuera (K)	293	293	293
	Velocidad salmuera (m/s)	-3	-3	-3
	Diámetro de inyección (μm)	80	80	40
	Caudal de salmuera por inyección (kg/s)	0,008	0,006	0,006
	Número de inyecciones	30	50 (20+30)	60 (30+30)
	Caudal de salmuera total evaporado (kg/s)	0,24	0,3	0,36

- El caso 1 es el más parecido al caso base, con una única línea de inyección y en la misma posición que en el caso base. En este intento de mejora del caso base se ha priorizado conseguir los objetivos propuestos con un tamaño mayor de gotas, concretamente doblando el diámetro de las mismas (80 micras). Además, para esta configuración del sistema es posible tratar un 33% más de caudal. El proceso de enfriamiento evaporativo ocurre más lentamente que en el caso base, consiguiendo la evaporación completa de la salmuera a apenas unos centímetros de la salida (Figura 56), por lo que se dan menores gradientes de temperatura y fracción másica de agua. Esto se puede comprobar comparando las figuras Figura 57 y Figura 58 con las figuras Figura 36 y Figura 37, ambas correspondientes al caso base.

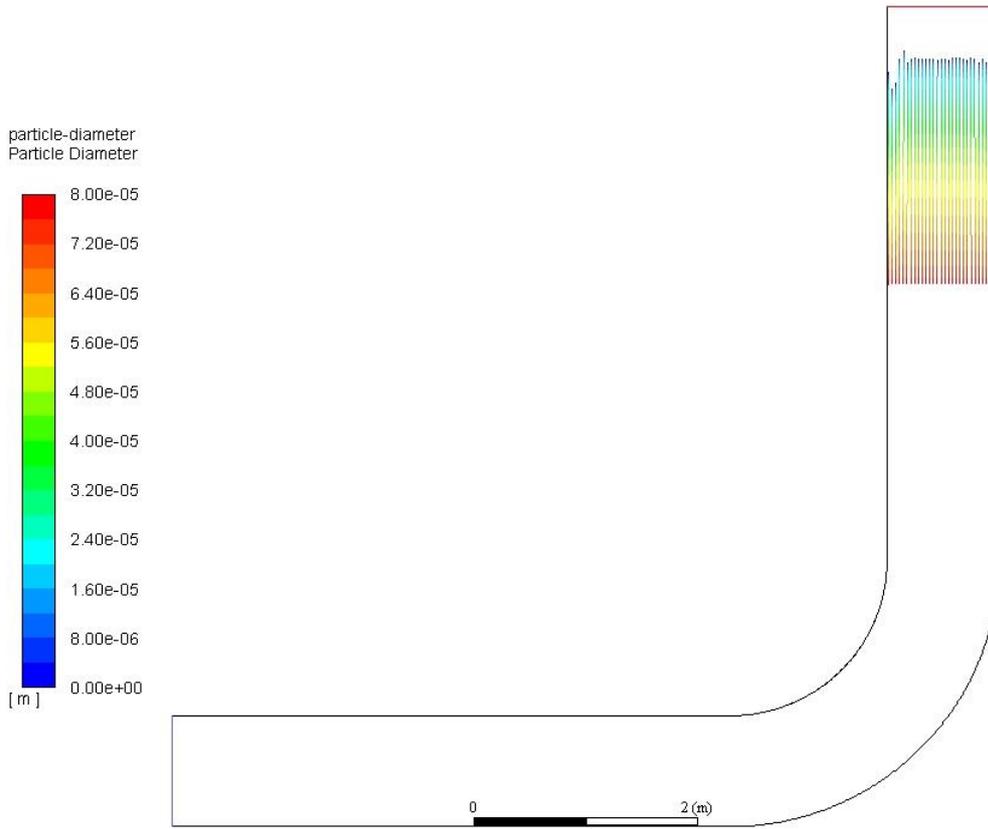


Figura 56. Diámetro de partículas en el caso 1

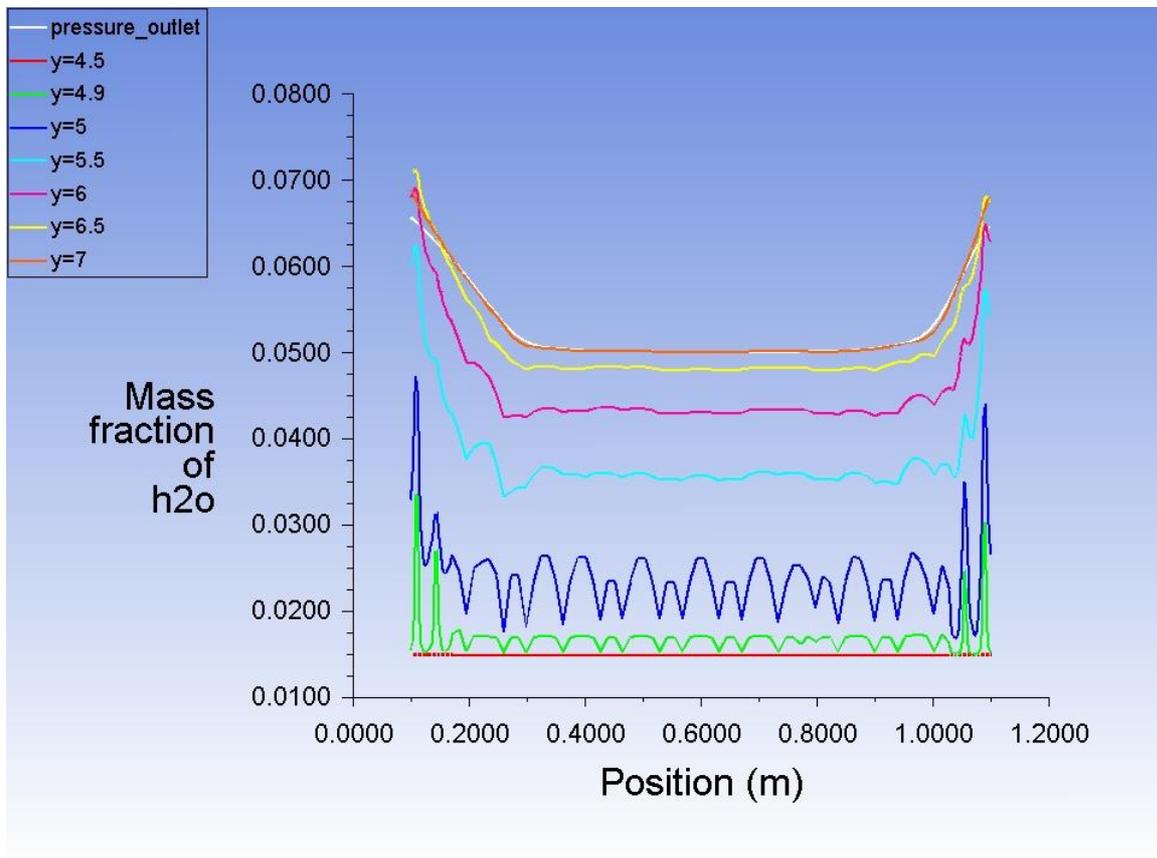


Figura 57. Gráfica de la fracción másica de H<sub>2</sub>O a distintas alturas del eje de ordenadas para el caso 1

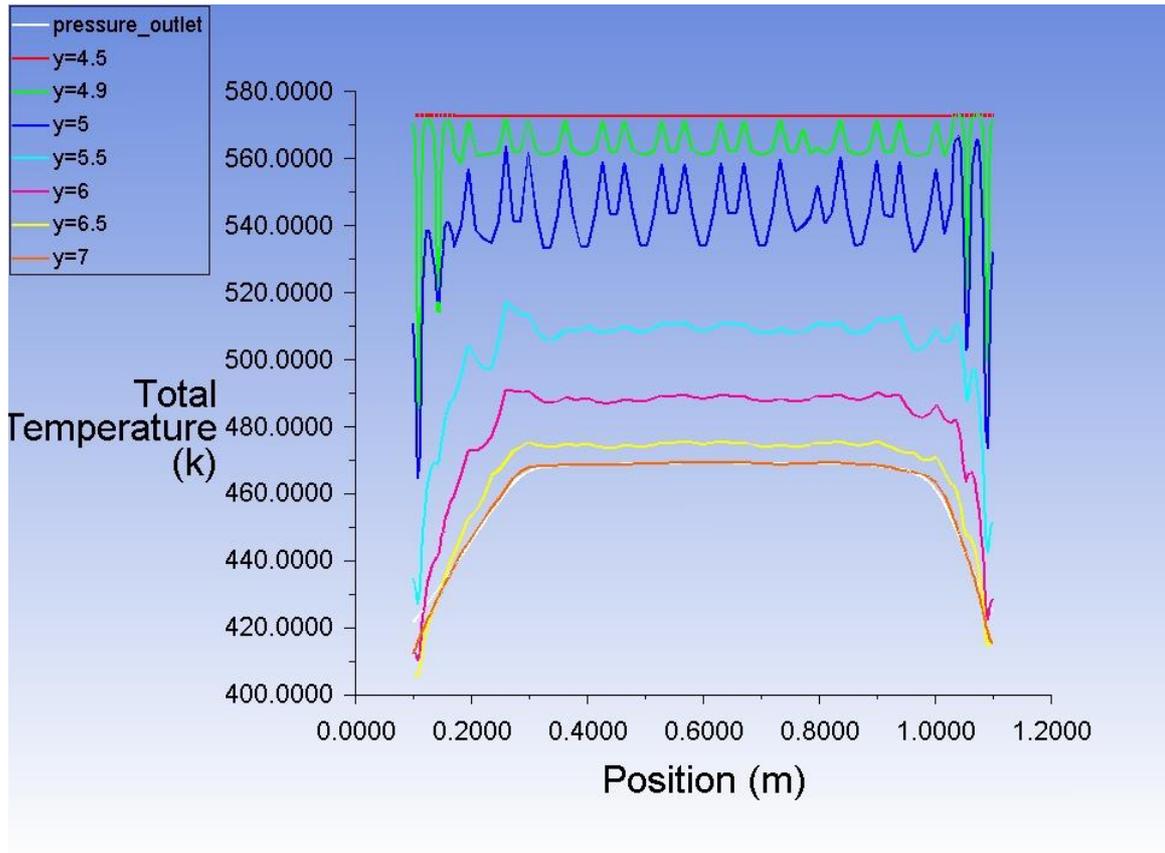


Figura 58. Gráfica de la temperatura a distintas alturas del eje de ordenadas para el caso 1

- En el caso 2 se ha incrementado la complejidad del sistema, añadiendo una segunda línea de inyección al sistema para conseguir tratar un mayor caudal de salmuera y, además, al igual que en el caso 1, se ha priorizado en la introducción de gran tamaño de gotas (80 micras). Para ello se ha bajado la posición de la línea de inyección de salmuera del caso 1 a la posición  $y=2,5\text{m}$ , y se ha introducido una segunda línea de inyección en la posición  $y=3,75\text{m}$  (Figura 59). Esta segunda línea de inyección, a diferencia de la primera, introduce las gotas desde una posición más centrada con respecto al eje vertical del canal, ocupando el canal vertical desde  $x=0,18$  hasta  $x=1,02$  (dejando un margen de 7 cm con cada pared del canal). Esta nueva posición tiene como objetivo eliminar el efecto que la pared pueda tener sobre la corriente y que todo el flujo de esta se evapore correctamente. La línea de inyección en  $y=2,5$ , al igual que en los casos anteriormente tratados en este proyecto, dispone de 30 entradas de gotas que emiten un caudal de  $0,006\text{ kg/s}$  de salmuera cada una; mientras que la línea de inyección en  $y=3,75\text{m}$  dispone únicamente de 20. Se puede observar el comportamiento del sistema en el siguiente material gráfico: la Figura 60, donde aparecen los valores de la fracción másica de  $\text{H}_2\text{O}$  a lo largo del canal vertical; la Figura 61, donde se puede observar la evolución de las gotas en el sistema; y la Figura 62, que muestra los gradientes de temperaturas producidos en el regenerador.

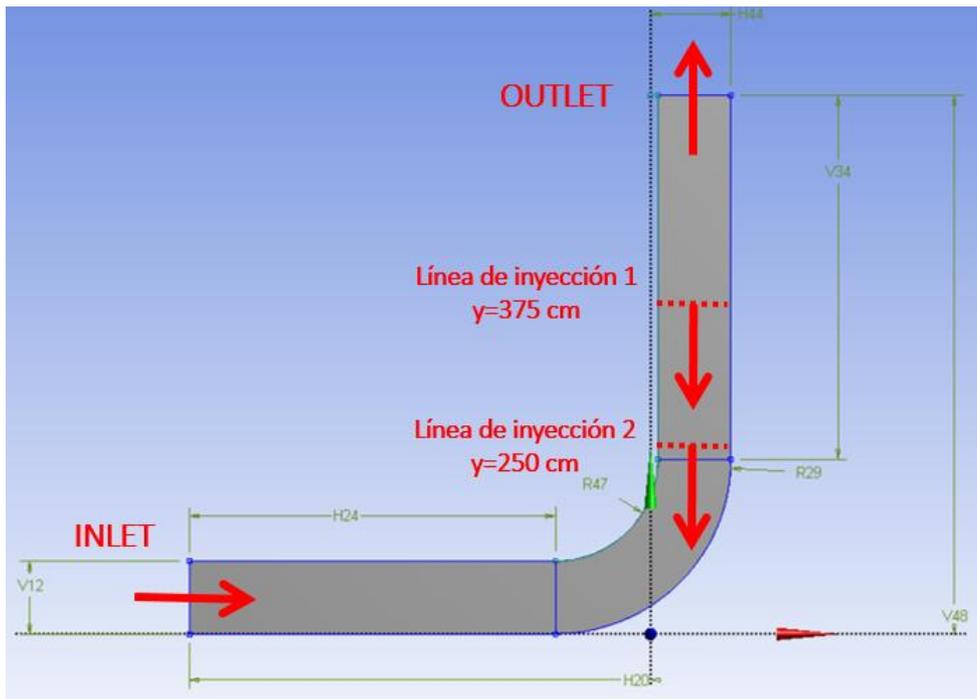


Figura 59. Posición de las líneas de inyección de salmuera en el caso 2. El valor de las cotas se encuentra en la Figura 13

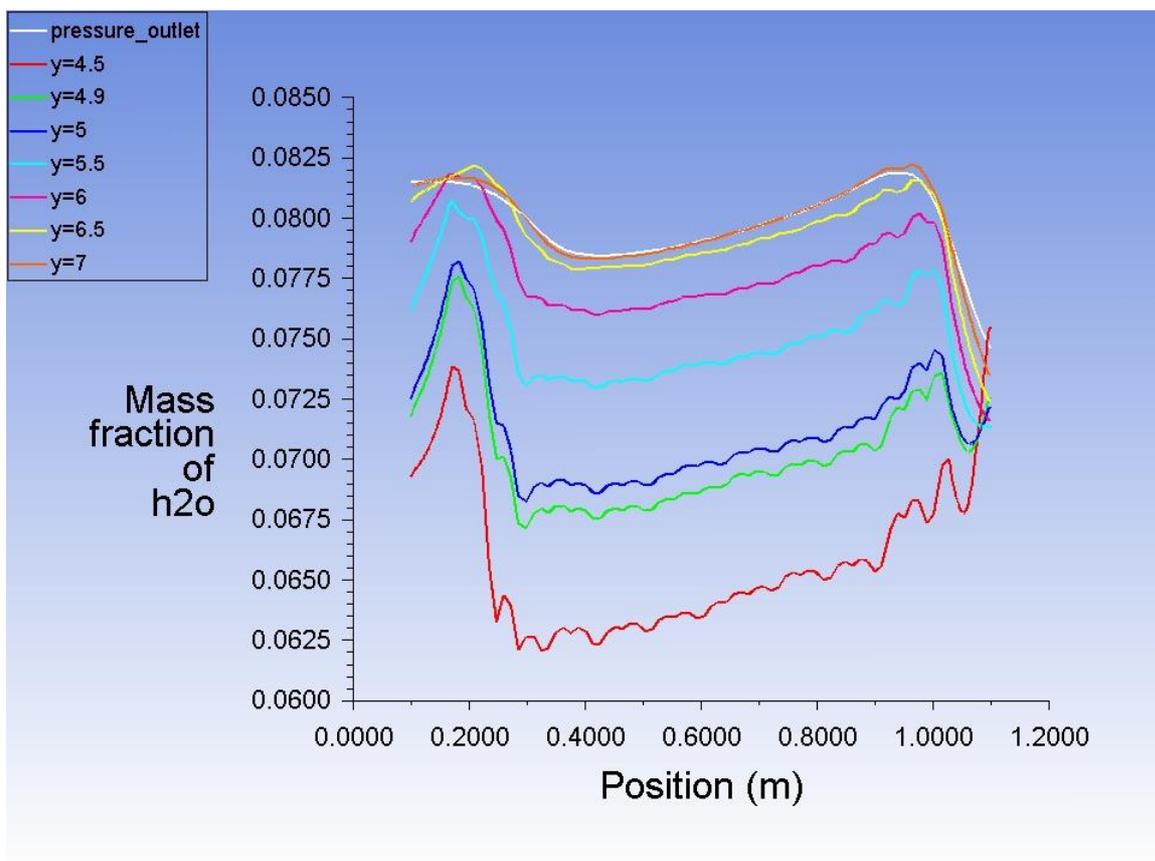


Figura 60. Gráfica de la fracción másica de  $H_2O$  a distintas alturas del eje de ordenadas para el caso 2

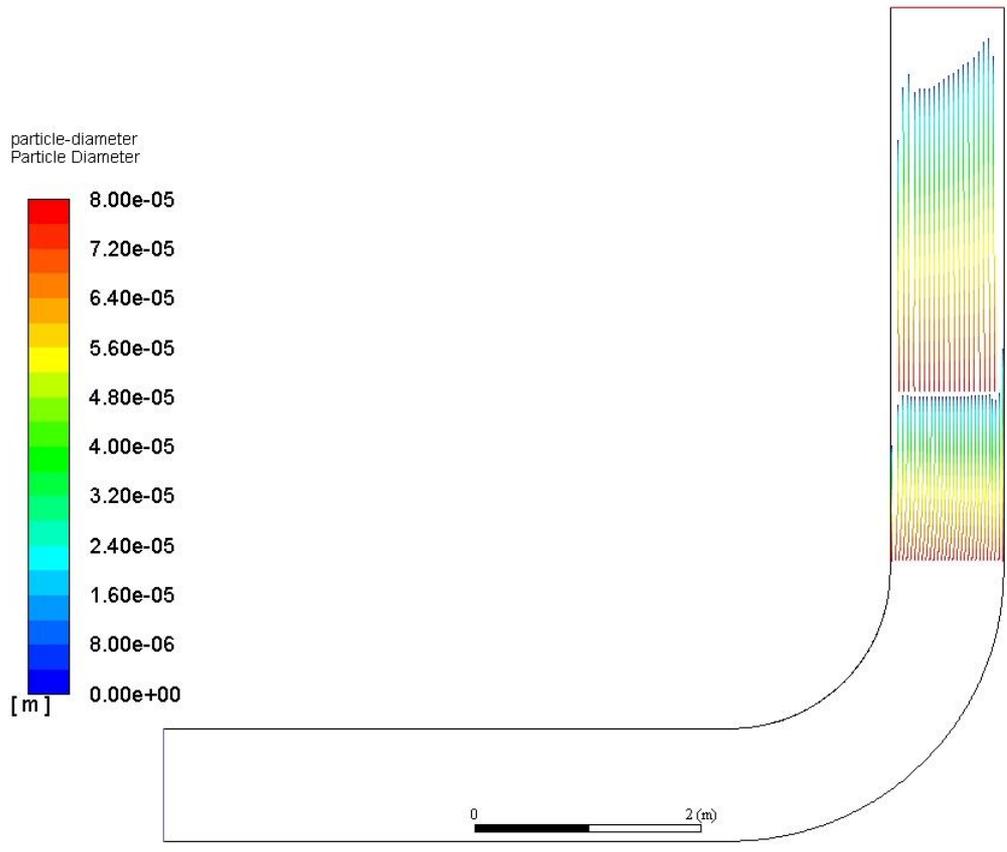


Figura 61. Diámetro de partículas en el caso 2

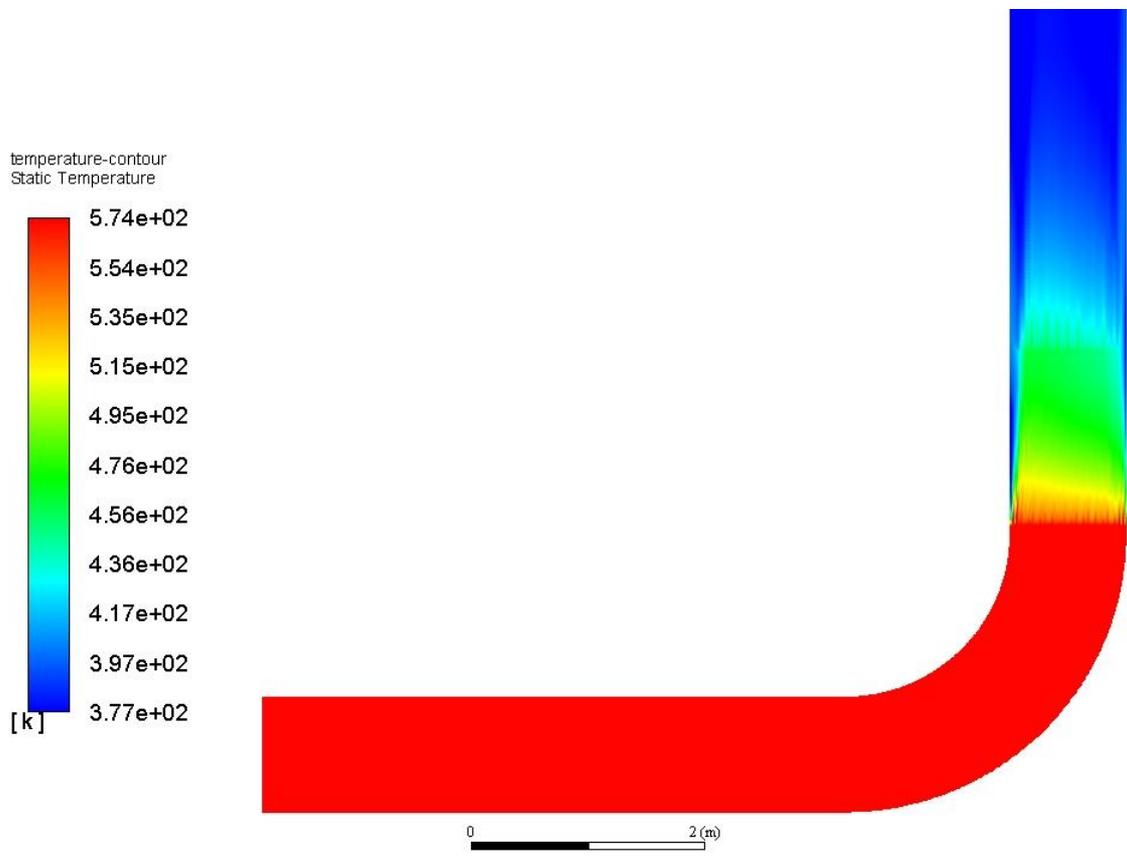


Figura 62. Temperatura en el caso 2

- El caso 3, aunque similar al caso 2, se ha enfocado desde otro punto de vista. Para esta simulación se ha

priorizado el tratamiento de un mayor caudal de agua, manteniendo el mismo tamaño de gota que en el caso base ( $4 \cdot 10^{-5}$  m)

Se han introducido dos líneas de inyección con 30 entradas de gotas cada una, una inyección en  $y=2,5$  m y otra en  $y=3,15$  m, dejando una distancia prudente desde las inyecciones hasta la salida para aumentar el tiempo de residencia y que se produzca una evaporación eficaz del agua. Las distribuciones de temperatura y otros parámetros son similares al caso 2. En la Figura 63 se puede visualizar el comportamiento de la salmuera en este caso. Este caso constituye, para un diámetro de partículas de 40 micras, la variación más eficaz del caso base en este proyecto, consiguiendo saturar la corriente de agua hasta casi un 39% en la sección de salida (en el caso base la humedad relativa en el outlet era del 0,076%) y tratando un 50% más de salmuera, todo ello estableciendo un set-up menos simple, teniendo en cuenta unas condiciones de entrada de la salmuera y del aire de entrada más cercanas a las que podrían darse en la aplicación práctica final de este sistema.

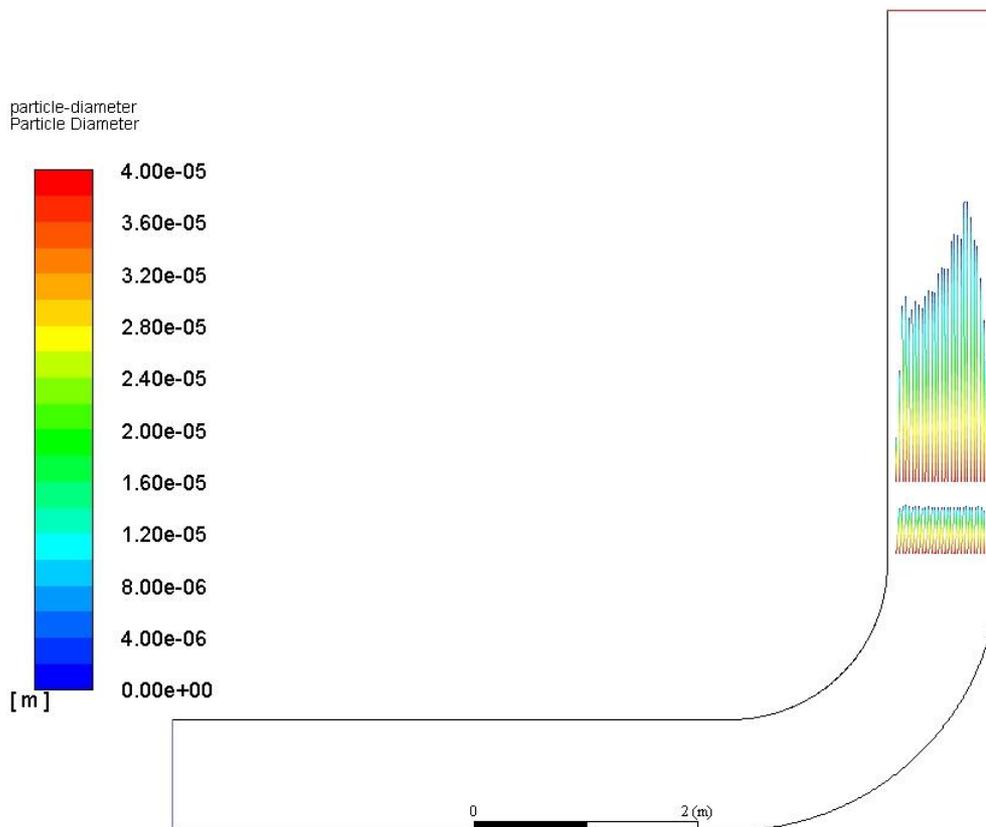


Figura 63. Diámetro de partículas en el caso 3

Finalmente, la Tabla 12 muestra de manera resumida las condiciones de salida en el outlet del flujo en cada uno de los casos, mostrando nuevamente la temperatura media y la humedad relativa media en esa zona, con sus respectivos coeficientes de variación.

Tabla 12. Parámetros en el outlet según el caso estudiado

Caso	Temperatura media outlet (K)	Humedad relativa outlet (%)	CV temperatura media outlet (%)	CV humedad relativa outlet (%)
1	461,6	0,75	2,831	51,49
2	385,3	8,16	1,140	15,54
3	353,6	38,85	5,860	49,63

## 5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Una malla eficaz es vital para cualquier simulación en CFD. Ya que ningún software permite, a día de hoy, un mallado completamente automático, el desarrollo de una malla óptima suele considerarse el cuello de botella de cualquier proyecto, pues si esta no es capaz de recoger todas las características y singularidades del comportamiento de un sistema, la simulación se aleja de la realidad y el propio uso del CFD pierde el sentido.

Aunque en el caso base o de referencia se ha propuesto una malla lo suficientemente eficaz como para que cumpla el propósito impuesto, una forma de evaluar la veracidad de los resultados y la fiabilidad de la solución es haciendo un análisis de sensibilidad sobre la malla. Aunque existen métodos para generar una malla correctamente e índices que nos proporcionan indicaciones sobre la fiabilidad de la misma, en este proyecto se hace un análisis de sensibilidad. Este consiste en simular el caso base sobre varias mallas de distinta complejidad, analizando algunos de los parámetros que se obtienen como resultado (a los cuales denominaremos parámetros índice) y observando si cambian de una malla a otra. Lo que se persigue es diseñar una malla lo suficientemente precisa como para que los resultados de la simulación no varíen si se aumenta la densidad de esta, lo que significaría que se habría conseguido la densidad mínima de celdas como para obtener unos resultados fiables. Los parámetros índice sobre los que se evalúa la eficacia de la malla son los siguientes:

- Temperatura media a la salida del canal vertical
- Humedad relativa media a la salida del canal vertical
- Energía cinética turbulenta en  $y=5m$

Para afinar la malla no se han hecho grandes cambios con respecto a la estructura del mallado ni a los valores de los parámetros establecidos en el subapartado 4.2, sino únicamente ligeras variaciones de las mismas técnicas empleadas en el caso base, dando lugar a celdas más pequeñas y un mallado más fino para conseguir mayor precisión en las medidas. Los cambios efectuados para ello han sido: disminución del tamaño de los elementos para aumentar el número de celdas en todo el dominio; y mayor densidad en las zonas cercanas a la pared con la función *Inflation*, pues estas zonas son las que incluyen grandes gradientes en los distintos parámetros intervinientes y las que exigen una mayor precisión. En este proyecto el análisis se centra en cuatro casos numerados, correspondiendo el caso 1 al caso base y aumentando la densidad de la malla hasta el caso 4. Cabe destacar que se ha elegido como caso más complejo (caso 4) aquel que se encuentra en el límite del poder computacional del que se dispone en la realización de este proyecto para un tiempo de cálculo asumible, por lo que este apartado es susceptible de ser ampliado y mejorado con nuevos casos de mayor complejidad en trabajos posteriores.

Los datos de los distintos casos se muestran en la Tabla 13, a partir de la cual se presenta una gráfica del número de elementos de los distintos casos para mostrar de forma más visual la diferencia entre ellos (Figura 64). Por otro lado, en la

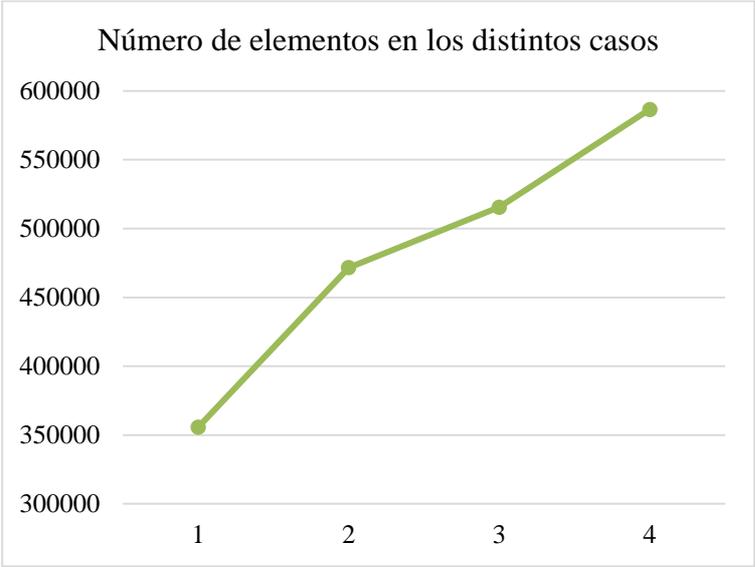


Figura 64. Gráfica del número de elementos de la malla en los distintos casos

Tabla 14 se presentan los resultados de los parámetros índice anteriormente mencionados tras los cálculos en los diferentes casos. Aunque ésta refleja de manera precisa los cambios que se han producido en los parámetros, ya que la finalidad de este apartado es comparar la diferencia de los distintos casos con el de referencia, quizá sea más interesante aún conocer la diferencia relativa de estos resultados con respecto al caso base, lo cual puede comprobarse en la

Tabla 15, donde se refleja la variación relativa de estos nuevos resultados en relación al caso base, con su posterior representación gráfica en la Figura 65. Además, para apreciar estas variaciones desde otro punto de vista, la Tabla 16Figura 66 expresa la variación relativa al caso anterior de los parámetros índice, mostrando cuánto cambian estos parámetros de un caso a otro, también con su posterior representación gráfica en la Figura 66.

Tabla 13. Casos de afino del mallado

Caso	Opciones <i>inflation</i> codo	Opciones <i>inflation</i> canal vertical	Tamaño de elementos (m)	Número de elementos
1	Number of layers: 40 Growth Rate: 1,2 Maximum Thickness: 0,007m	Number of layers: 25 Growth Rate: 1 Maximum Thickness: 0,1m	0,08	355760
2	Number of layers: 50 Growth Rate: 1,05 Maximum Thickness: 0,1m	Number of layers: 25 Growth Rate: 1 Maximum Thickness: 0,1m	0,007	471603
3	Number of layers: 65 Growth Rate: 1,04 Maximum Thickness: 0,1m	Number of layers: 25 Growth Rate: 1 Maximum Thickness: 0,1m	0,007	515658
4	Number of layers: 65 Growth Rate: 1,04 Maximum Thickness: 0,1m	Number of layers: 55 Growth Rate: 1,04 Maximum Thickness: 0,1m	0,065	586528
5	Number o layers: 65 Growth Rate: 1,04 Maximum Thickness: 0,1m	Number of layers: 55 Growth Rate: 1,04 Maximum Thickness: 0,1m	0,005	950220

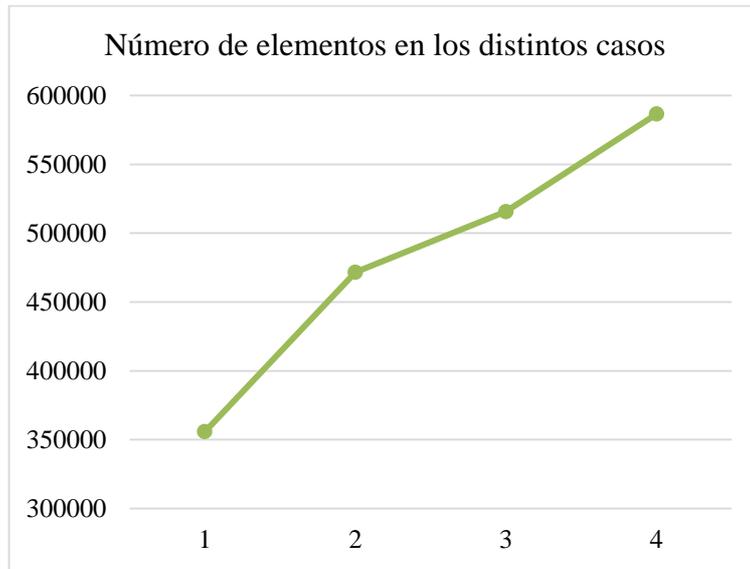


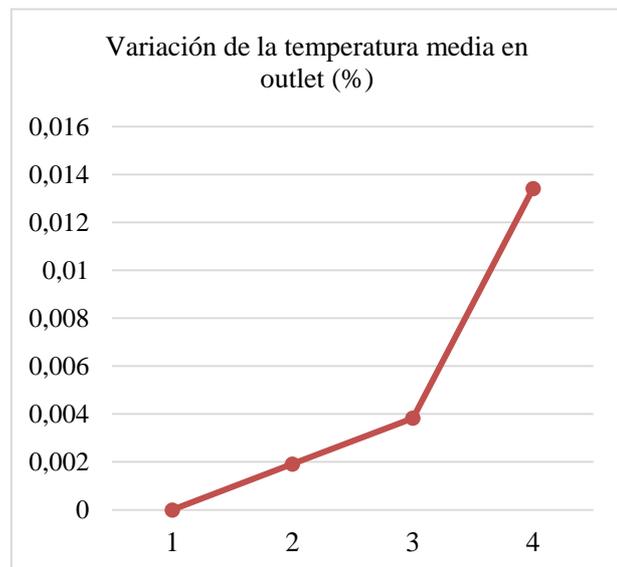
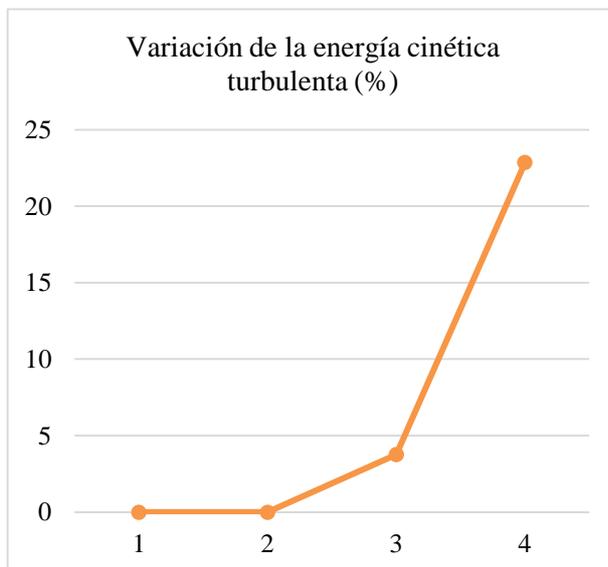
Figura 64. Gráfica del número de elementos de la malla en los distintos casos

Tabla 14. Tabla de variación de parámetros índice según el caso

Caso	Energía cinética turbulenta ( $m^2/s^2$ )	Temperatura media de salida (K)	Humedad relativa media de salida (%)	Rango de $y^+$
1	0,6066	521,9	0,08	12-68
2	0,6066	521,9	0,08	2,5-37
3	0,6303	521,9	0,08	2-37
4	0,7507	521,8	0,08	2-37

Tabla 15. Tabla de variaciones relativas al caso inicial de parámetros índice en cada caso expresados en %

Caso	Energía cinética turbulenta	Temperatura media de salida	Humedad relativa media de salida
1	0	0	0
2	0	0,001916	0,0001308
3	3,76	0,003832	0,0007847
4	22,86	0,01341	0,003008



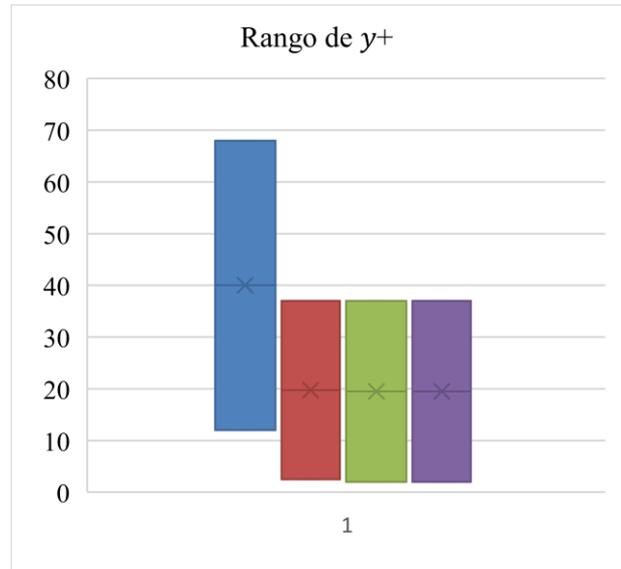
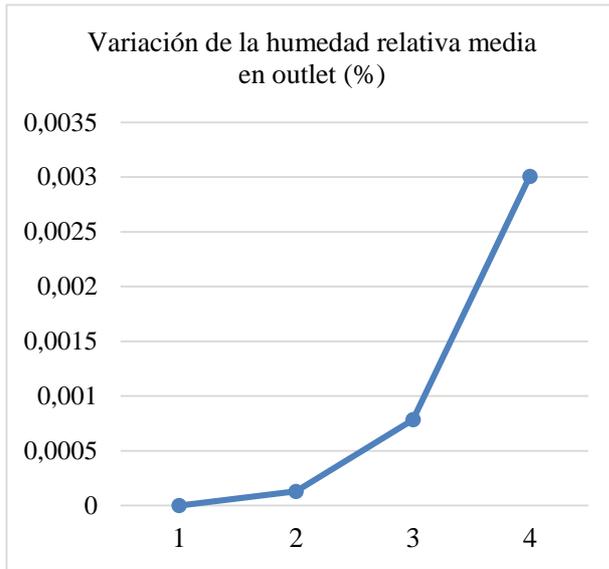
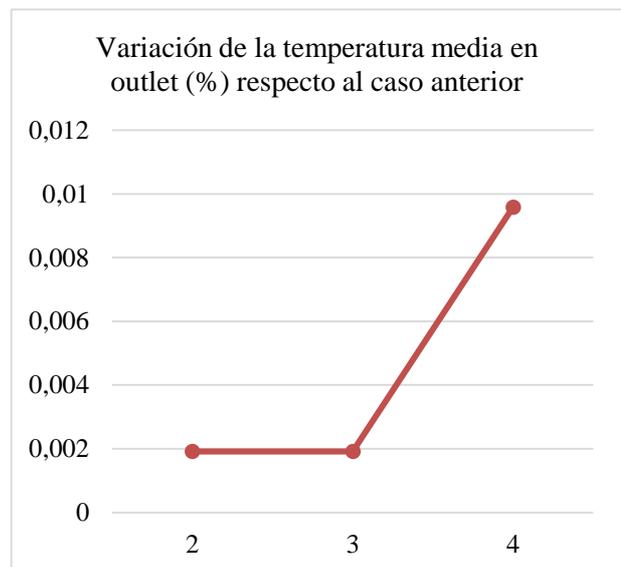
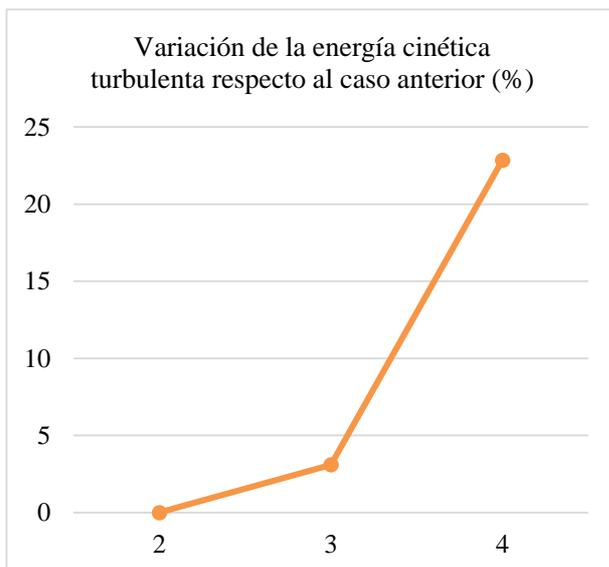


Figura 65. Gráficas de variación de parámetros índice según el caso

Tabla 16. Tabla de variaciones relativas al caso anterior de parámetros índice en cada caso

Caso	Energía cinética turbulenta	Temperatura media de salida	Humedad relativa media de salida
1	0	0	0
2	0	0,001916	0,01308
3	3,097	0,001916	0,06539
4	22,86	0,009581	0,2222



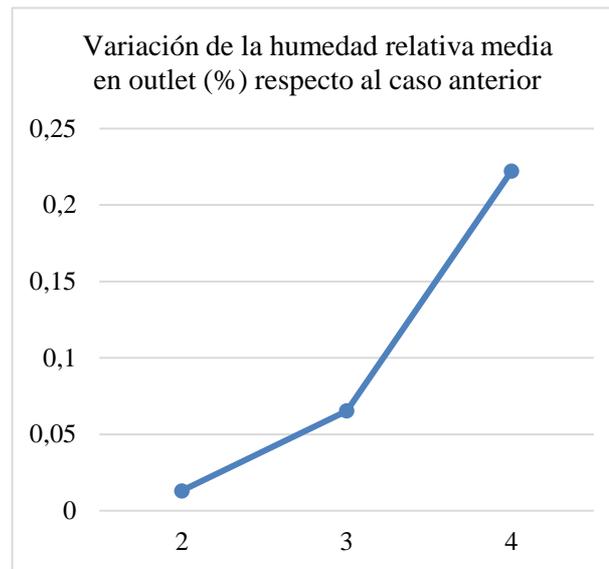


Figura 66. Gráficas de variación relativa al caso anterior de los parámetros índice según el caso

Observando todos estos datos podemos obtener varias conclusiones:

- (i) La malla inicial es susceptible de mejora, aunque se puede considerar de una calidad aceptable, pues las variaciones relativas de los distintos parámetros no son desorbitados, siendo  $<0,2\%$  en el caso de la temperatura y la humedad
- (ii) Pese a que el aumento en el número de elementos se aumenta de forma casi lineal a lo largo de los casos (Figura 64), las pendientes de las variaciones de los distintos parámetros cada vez es mayor, por lo que los aumentos en la complejidad de la malla implican un aumento de la precisión cada vez mayor
- (iii) El rango del parámetro  $y^+$  disminuye con respecto al caso base y se acerca más al rango de valores óptimo (más detalles sobre el parámetro  $y^+$  la subsección 4.2), por lo que los resultados cercanos a las paredes son más precisos, justo lo que se perseguía con la función *Inflation*.

Como ya se ha mencionado anteriormente, este es el mayor nivel de precisión que se puede alcanzar con los medios disponibles para este proyecto, y durante la realización de este proyecto no se ha alcanzado el caso ideal que se buscaba, pues los resultados de las simulaciones sucesivas continúan alejándose de los resultados del caso base. Sin embargo, este trabajo (y más concretamente este subapartado) puede ser de gran importancia de cara a una ampliación de las ideas aquí expuestas y la continuación de su desarrollo.

## 6 CONCLUSIONES

---

Se ha realizado un estudio teórico preliminar sobre un sistema que logra la nula descarga líquida (ZLD) para el tratamiento de concentrados de procesos de ósmosis inversa. Este estudio es un primer paso de las investigaciones teóricas y experimentales del proyecto SOLMIDEF en lo que respecta al desarrollo de este tipo de sistemas.

Con este trabajo se ha establecido una metodología válida para el diseño preliminar de los sistemas ZLD, que podrá aplicarse a diversas configuraciones y geometrías, así como a nuevos parámetros de diseño y operación con la finalidad de adaptarlo a la aplicación concreta con microturbinas de gas solares. Las principales aplicaciones contempladas en el proyecto SOLMIDEF son la desalación de agua de mar o salobre y el tratamiento de aguas industriales.

Se ha demostrado que las variables que más influyen sobre el comportamiento del sistema son el tamaño de las gotas y el caudal de salmuera introducido, variables que se deben tener especialmente en cuenta en futuros desarrollos de este proyecto. En esta primera aproximación se ha conseguido evaporar un máximo de 0,36 kg/s de agua (lo que corresponde a 0,053 kg de salmuer por kg de aire) de una salmuera de concentración de 46183 ppm (condiciones detalladas en el apartado 4.5), lo que demuestra la validez de esta tecnología innovadora de ZLD, la cual es susceptible de ser mejorada.

Existe un amplio abanico de mejoras aplicables a este proyecto. Los nuevos estudios que se realicen sobre esta tecnología podrían enfocarse en la introducción de gotas desde distintos puntos, empleando distintas geometrías del regenerador o introduciendo álabes en el codo que favorezcan el cambio de dirección que sufre el gas al pasar a través de él. Estos cambios de configuración podrían permitir el tratamiento de un mayor caudal de salmuera o la introducción de gotas con un mayor tamaño, permitiendo hacer estudios en los que se concrete y desarrolle la tecnología empleada en la introducción de la fase discreta. En cualquier caso, este estudio contribuye al desarrollo del proyecto SOLMIDEFF empleando una tecnología prometedora.



- [20] S. Elghobashi, "On predicting particle-laden turbulent flows," *Appl. Sci. Res.*, vol. 52, no. 4, pp. 309–329, 1994, doi: 10.1007/BF00936835.
- [21] S. Sorato, "Methodology to analyse three dimensional droplet dispersion applicable to Icing Wind Tunnels," Cranfield University, 2019.
- [22] M. A. Rizk and S. E. Elghobashi, "A two-equation turbulence model for dispersed dilute confined two-phase flows," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 15, no. 1, pp. 119–133, 1989, doi: 10.1016/0301-9322(89)90089-X.
- [23] M. W. Reeks, "On a kinetic equation for the transport of particles in turbulent flows," *Phys. Fluids A3*, pp. 446–456, 1991.
- [24] S. Yuu, N. Yasukouchi, Y. Hirose, and T. Jotaki, "Particle turbulent diffusion in a dust-laden round jet," *J. AIChE*, vol. 24, pp. 509–519, 1978.
- [25] A. D. Gosman and E. Ioanides, "Aspects of computer simulation of liquid-fuelled combustors.," *AIAA 19th Aerospace Sciences Meeting, St Louis*. 1981.
- [26] M. R. Maxey and J. J. Riley, "Aerosol particle deposition in numerically simulated channel flow.," *Phys. Fluids A1*, pp. 883–889, 1989.
- [27] P. G. Saffman, "The lift on a small sphere in a slow shear flow," *J. Fluid Mech.*, vol. 22, pp. 385–400, 1965.
- [28] P. G. Saffman, "The lift on a small sphere in a slow shear flow - corrigendum," *J. Fluid Mech.*, vol. 31, p. 624, 1968.
- [29] M. R. Maxey, "The equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform or unsteady flow," *ASME-Fluids Eng. Div.*, vol. 166, pp. 57–62, 1993.
- [30] G. Alfonsi, "Reynolds-averaged Navier-Stokes equations for turbulence modeling," *Appl. Mech. Rev.*, vol. 62, no. 4, pp. 1–20, 2009, doi: 10.1115/1.3124648.
- [31] K. G. Nayar, M. H. Sharqawy, L. D. Banchik, and J. H. Lienhard, "Thermophysical properties of seawater: A review and new correlations that include pressure dependence," *Desalination*, vol. 390, pp. 1–24, 2016, doi: 10.1016/j.desal.2016.02.024.
- [32] H. Montazeri, B. Blocken, and J. L. M. Hensen, "Evaporative cooling by water spray systems: CFD simulation, experimental validation and sensitivity analysis," *Build. Environ.*, vol. 83, pp. 129–141, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.03.022.
- [33] ANSYS, "Chapter 19. Discrete phase models," 2001. [Online]. Available: <https://www.afs.enea.it/fluent/Public/Fluent-Doc/PDF/chp19.pdf>. [Accessed: 15-Sep-2020].
- [34] S. M. Salim and S. C. Cheah, "Wall  $y^+$  Strategy for Dealing with Wall-bounded Turbulent Flows," *Int. MultiConference Eng. Comput. Sci.*, vol. II, no. January 2009, pp. 1–6, 2009, doi: 10.1.1.149.722.
- [35] J. Murad, "What is  $y^+$  (yplus)?," *SimWiki*, 2018. [Online]. Available: <https://www.simscale.com/forum/t/what-is-y-plus/82394>.
- [36] M. Bern and P. Plassmann, *Mesh Generation*. Woodhead Publishing Limited, 2000.
- [37] X. Jiang, G. A. Siamas, K. Jagus, and T. G. Karayiannis, "Physical modelling and advanced simulations of gas-liquid two-phase jet flows in atomization and sprays," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 36, no. 2, pp. 131–167, 2010, doi: 10.1016/j.pecs.2009.09.002.
- [38] ANSYS, "4.4.3 Realizable k-epsilon Model," *ANSYS FLUENT 12.0/12.1 Documentation*. [Online]. Available: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node60.htm>.
- [39] ANSYS, "23.1.2. Limitations," *Fluent User's Guide*. [Online]. Available: [https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v192/fluent/ug/ug\\_sec\\_disp\\_oview\\_limits.html](https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v192/fluent/ug/ug_sec_disp_oview_limits.html). [Accessed: 15-Sep-2020].
- [40] MIT, "Thermophysical properties of seawater," 2017. [Online]. Available: <http://web.mit.edu/seawater/>. [Accessed: 12-Oct-2020].

- 
- [41] “El clima promedio en Sevilla.” [Online]. Available: <https://es.weatherspark.com/y/34152/Clima-promedio-en-Sevilla-España-durante-todo-el-año>. [Accessed: 12-Oct-2020].
- [42] “PsyCalc.” [Online]. Available: <http://linricsoftw.web701.discountasp.net/webpsycalc.aspx>. [Accessed: 12-Oct-2020].

