SIMULACIÓN POR CFD DE LA FLUIDINÁMICA DE UN PLATO PERFORADO DE DESTILACIÓN PARA EL SISTEMA AIRE-AGUA

OMAR STEVEN PÁRRAGA CHICA

Proyecto integral de grado para optar al título de

INGENIERO QUÍMICO

Director
JAVIER ALEXANDER MANCERA APOLINAR
Phd: Ingeniería Química

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ, D.C.
2025

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del director

_____

Firma del docente jurado

_____

Firma del docente jurado

Bogotá D.C., febrero de 2025

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica

Dra. María Fernanda Vega de Mendoza

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ramiro Augusto Forero Corzo

Vicerrectora de Investigaciones y Extensión

Dra. Susan Margarita Benavides Trujillo

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano Facultad de Ingenierías

Dra. Carlos Mauricio Veloza Villamil

Directora Departamento de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica, en Energías, Química y Ambiental

Dra. María Angelica Acosta Pérez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado, primeramente, a mi abuelita **María del Carmen Sosa Cadena**, por ser la persona que me ha apoyado desde niño, la que me inculcó los valores de ser persona, la que me brindó su amor incondicionalmente durante su vida, y que ahora, desde el cielo, continúa guiando mis pasos.

También quiero dedicarles este proyecto a mis padres, **Piedad Chica Sosa**, **Omar Alberto Párraga Sarmiento** y a toda la familia, por brindarme siempre un amor reconfortante, el gran apoyo a lo largo de todos mis estudios, por siempre estar ahí para mí, y ser mi motor de vida.

Finalmente, también quiero dedicarle este proyecto a **Paula Andrea Castillo Gándara**, por ser una persona especial y muy significativa en mi vida, brindándome su apoyo, su gran compañía, y la felicidad que genera al estar presente siempre conmigo. Muchas gracias a todos por su apoyo durante mi vida; este proyecto también es un logro compartido con todos ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento, en primer lugar, a mi orientador y profesor **Javier Alexander Mancera Apolinar**, por brindarme su apoyo, conocimientos y por sus valiosas asesorías a lo largo del desarrollo de este proyecto. Agradezco también a la **Universidad de Améric**a por permitirme ser parte de su comunidad educativa y por contribuir a mi formación académica.

Asimismo, quiero agradecer a mis compañeros **Nicolás García**, **Heidy García**, **Tania Lesmes** y **Santiago Lozano**, quienes han sido parte fundamental de mi vida estudiantil. Gracias por su motivación, su alegría y por todo el apoyo que me han brindado durante este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

	pág
RESUMEN	**13**
INTRODUCCIÓN	**14**
1. ANTECEDENTES	**16**
2. JUSTIFICACIÓN	**19**
3. OBJETIVOS	**23**
3.1 Objetivo General	**23**
3.2 Objetivos Específicos	**23**
4. MARCO REFERENCIAL	**24**
4.1 Marco teórico	**24**
4.1.1 ***Dinámica de fluidos Computacional (CFD)***	**24**
4.1.2 ***Hidrodinámica***	**30**
4.1.3 ***Plato perforado***	**31**
4.1.4 ***Destilación***	**32**
4.1.5 ***Conservación de masa***	**33**
4.1.6 ***Conservación de momento***	**34**
4.1.7 ***Conservación de energía***	**34**
4.1.8 ***Modelo Euler-Euler***	**36**
4.1.9 ***Coeficiente de intercambio fluido-fluido***	**36**
5. DISEÑO METODOLÓGICO	**40**
5.1 Cálculos de parámetros del plato perforado	**41**
5.1.1 ***Área total del plato***	**41**
5.1.2 Distancia entre el centro y la zona del vertedero o la parte receptora	**42**
5.1.3 Área del segmento	**44**

5.1.4 Área de burbujeo **44**

5.1.5 Área de los huecos **44**

5.1.6 Cálculo de las velocidades de entrada de los fluidos **45**

5.1.7 Cálculo de la altura teórica del líquido claro **46**

5.1.8 Cálculo de la altura de la simulación del líquido claro **47**

5.2 Creación de geometría **48**

5.3 Generación del mallado (mesh) **59**

5.4 Configuración del Setup **62**

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS **67**

6.1 Generación de geometría (esquema detallado) **67**

6.1.1 Construcción del mallado **70**

6.1.2 Selección de zonas de entrada y salida de los fluidos **73**

6.1.3 Configuración del setup **74**

6.2 Solución e hidrodinámica de la simulación **76**

6.2.1 Primera simulación **76**

6.2.2 Segunda simulación **79**

6.2.3 Tercera simulación **81**

6.3 Comparación de la altura del líquido claro **83**

6.3.1 Comparación de dato experimental y teórico de la altura del líquido claro **83**

6.3.2 Comparación de los datos experimentales de investigaciones de la altura del líquido claro **84**

7. CONCLUSIONES **87**

REFERENCIAS **88**

LISTA DE FIGURAS

	pág
Figura 1. Simulaciones CFD con los datos experimentales de Solari y Bell	**155**
Figura 2. Objetivos de Desarrollo Sostenible de la investigación	**20**
Figura 3. Análisis de coocurrencia entre palabras clave	**21**
Figura 4. Análisis de concurrencia entre palabras clave visualizado por densidad	**22**
Figura 5. Vectores de velocidad de fase líquida y mapa de calor Krishna	**322**
Figura 6. Diagrama de flujo del diseño metodológico.	**400**
Figura 7. Dibujo de un triángulo isósceles en el plato	**42**
Figura 8. Altura desde el centro hasta el segmento en el plato.	**43**
Figura 9. Interfaz de DesignModeler en el plano ZX	**48**
Figura 10. Extrude del círculo con el diámetro establecido	**49**
Figura 11. Vista de corte de la línea	**49**
Figura 12. Construcción del vertedero y zona receptora	**50**
Figura 13. Creación y configuración del sketch para un hueco	**51**
Figura 14. Generación del extrude en el hueco	**51**
Figura 15. Primera función de patrón	**52**
Figura 16. Segunda función de patrón	**53**
Figura 17. Elementos de patrón en el plato perforado	**54**
Figura 18. Perforación del plato	**54**
Figura 19. Generación de la función Move	**55**
Figura 20. Generación del Extrude de los dos círculos	**56**
Figura 21. Vista de la función Surfaces From Sketches	**57**
Figura 22. Vista de los platos sin la carcasa	**57**
Figura 23. Selección de zonas con la función Fill	**58**
Figura 24. Generación limpia del dominio	**59**
Figura 25. Generación de mesh	**60**
Figura 26. Selección de las entradas y salidas de los fluidos	**611**
Figura 27. Interfaz del Workbench para actualizar mesh	**61**
Figura 28. Interfaz de inicio del Setup	**62**
Figura 29. Configuración en multifase	**63**

Figura 30. Configuración de métodos de solución **64**
Figura 31. Vista de Surface report definition **655**
Figura 32. Vista de simulación de cálculos **66**
Figura 33. Geometría completa de dos platos perforados **68**
Figura 34. Vista de la simetría en el dominio y geometría **68**
Figura 35. Intersecciones provenientes en el dominio **700**
Figura 36. Simetría en el proceso de mallado **71**
Figura 37. Mallado en los huecos u orificios **72**
Figura 38. Zonas seleccionadas entrada y salida de fluidos **74**
Figura 39. Gráfica de residuales a 0,03 s **76**
Figura 40. Gráfica de contorno (0,03 s) de fracción de volumen en la fase 1 **77**
Figura 41. Gráfica residual a 0,02 s **79**
Figura 42. Gráfica de residuales a 0,001 s **80**
Figura 43. Gráfica de contorno (0,001 s) de fracción de volumen **81**
Figura 44. Gráfica de contorno (0,005 s) de fracción de volumen **82**
Figura 45. Gráfica altura del líquido claro en función del caudal volumétrico **85**

LISTA DE TABLAS

	pág
Tabla 1. Especificaciones de los detalles del plato perforado	**42**
Tabla 2. Comparación de los detalles del plano con el artículo base	**456**
Tabla 3. Configuración de las simulaciones realizadas por CFD	**76**
Tabla 4. Resultados teóricos y experimentales de la altura del líquido claro	**84**

NOMENCLATURA

$\vec{v}_q$ - Velocidad de la fase q.

$\dot{m}_{pq}$ – Tasa de transferencia de masa de la fase pth a la qth.

$\dot{m}_{qp}$ – Tasa de transferencia de masa de la fase q a la p.

S_q – Término fuente de masa constante o definida para la fase q.

∇ - Gradiente.

ρ – Densidad de la sustancia.

α_q – Fracción de volumen de la fase q.

ρ - Presión estática.

$\bar{\bar{\tau}}$ - Tensor de tensión-deformación, $\bar{\bar{\tau}}_q$ - Tensor tensión-deformación de la fase qth.

$\rho\vec{g}$ – Fuerza gravitacional del cuerpo.

$\vec{F}$ - Fuerzas externas del cuerpo respectivamente.

μ - Viscosidad molecular.

I - Tensor unitario.

μ_q - Viscosidad de corte, λ_q - Viscosidad de corte y de volumen de la fase q.

$\vec{F}_q$ - Fuerza externa del cuerpo.

$\vec{F}_{lift,q}$ - Fuerza de elevación.

$\vec{F}_{wl,q}$ - Fuerza de lubricación en la pared.

$\vec{F}_{vm,q}$ - Fuerza de masa virtual.

$\vec{F}_{td,q}$ - Fuerza de dispersión turbulenta.

$\vec{R}_{pq}$ - Fuerza de interacción entre fases y ρ es la presión compartida por las fases.

A_i - Área interfacial

f - Función de arrastre

τ_ρ - Tiempo de relajación de partículas

d_p - Diámetro de burbujas o gotas de la fase p.

Re – Número de Reynolds

C_{ex_ρ} - Exponente de corrección de la fracción de volumen.

RESUMEN

En este trabajo se desarrolló un modelo tridimensional de dinámica de fluidos computacional (CFD) en Ansys Fluent para simular la hidrodinámica de un plato perforado en una columna de destilación, empleando el enfoque Euleriano. Se generó la geometría del plato, el mallado y se configuraron las condiciones iniciales y de frontera para analizar fenómenos como la interacción multifásica y la altura del líquido claro, calculada en h=0,0404 m, dentro de un rango experimental.

Las simulaciones enfrentaron limitaciones por inestabilidad numérica, debidas al mallado grueso (9 mm) y a esquemas de primer orden, afectando la precisión en áreas como los orificios del plato y el rebosadero. No obstante, el modelo logró capturar el comportamiento general del sistema, destacando la necesidad de usar mallados más finos (6 mm), esquemas de segundo orden o más avanzados para mejorar la estabilidad y precisión. Este trabajo resalta la utilidad del CFD en la optimización de procesos industriales como la transferencia de masa y calor en columnas de destilación, reduciendo costos experimentales y tiempos de diseño. Además, se identificaron conceptos clave en la literatura mediante cienciometría, como hidrodinámica y la transferencia de masa, y se validaron los resultados con datos experimentales de Solari y Bell de 1986. Las simulaciones establecen una base para futuras investigaciones en el diseño eficiente y sostenible de columnas de destilación.

Palabras clave: Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), Plato perforado, Columna de destilación, Interacción multifásica, Altura del líquido claro, Optimización de procesos industriales

INTRODUCCIÓN

Las columnas de destilación con platos perforados se utilizan común y ampliamente en el ámbito de la práctica industrial, siendo la descripción de la hidrodinámica de los platos de gran relevancia e importancia. Es necesaria una predicción adecuada o precisa de la hidráulica para predecir su eficiencia de separación y el rendimiento general. Para un conjunto dado de condiciones operativas (como las cargas de gas y líquido), geometría del plato (diámetro de la columna, altura del vertedero, longitud del vertedero, diámetro de los orificios, etc.) y propiedades del sistema, es necesario predecir el régimen de flujo que prevalece en el plato, la retención de líquido, la altura del líquido claro, la densidad de la espuma, el área interfacial, la caída de presión, el arrastre de líquido, las distribuciones del tiempo de residencia de las fases gaseosa y líquida y los coeficientes de transferencia de masa o ecuaciones de transporte en cualquiera de las fases del fluido. [1]

Aunque la investigación experimental de columnas de platos perforados proporciona información relevante, las técnicas de simulación por computadora se utilizan como herramientas útiles para obtener información detallada sobre el comportamiento del flujo en dichos sistemas. La dinámica de fluidos computacional (CFD) ha surgido recientemente como una herramienta eficaz para la investigación de los parámetros hidráulicos de las torres de platos, determinando la predicción de su eficiencia. En los últimos años, la herramienta de CFD se ha utilizado para modelar flujos multifásicos para reducir el tiempo y el costo de diseño. [2]

A pesar de que el CFD se ha convertido en una potencial herramienta de investigación y diseño en ingeniería química, existe una limitada fuente de información acerca de la simulación del líquido que fluye en los platos perforados. La mayoría de los trabajos por CFD en literatura, se han realizado en velocidades limitadas de líquido y vapor en la ventana de operación normal del plato [2]. Los platos perforados se utilizan comúnmente en las torres de destilación y absorción, siendo la predicción de la eficiencia un papel determinante en la reducción del número de etapas de transferencia de masa y los requisitos de energía. [3]

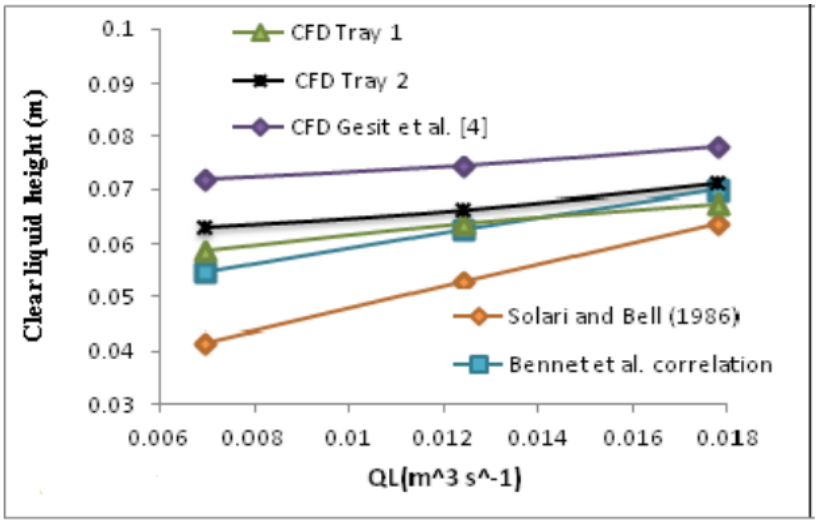
En el presente trabajo, se desarrolla un modelo CFD tridimensional, basado en el marco Euleriano, para describir la hidrodinámica de un plato perforado en un sistema aire-agua en la

aplicación de Ansys Fluent siguiendo una metodología para la creación de la geometría, mallado, definición de variables, modelos y limites, asimismo, que se realizan simulaciones transitorias por medio de los datos experimentales de Solari y Bell de 1986 como es la velocidad superficial de los fluidos. En las cuales, se limita al sistema bifásico aire-agua, considerando las investigaciones previas y las simulaciones realizadas específicamente para esta torre de destilación.

En este estudio, se busca realizar una comparación detallada de los resultados obtenidos con los datos experimentales reportados por Solari y Bell. Siendo así que, el enfoque de la simulación se centra exclusivamente en reproducir parámetros hidrodinámicos, como la altura del líquido claro, que sean muy similares a los obtenidos en el artículo experimental, validando así el potencial predictivo del modelo construido a partir de CFD teniendo en cuenta los datos registrados de simulaciones en la figura 1:

Figura 1.

Simulaciones CFD con los datos experimentales de Solari y Bell.



Nota. La figura muestra una comparación de diversos trabajos por CFD y los datos experimentales del artículo base de la altura del líquido claro en función del caudal volumétrico. Tomado de: R. B. Solari y R. L. Bell, «Fluid flow patterns and velocity distribution on commercial-scale sieve trays», AIChE J., vol. 32, n.o 4, pp. 640-649, 1986.

1. ANTECEDENTES

Los autores Parizi y Rahimi, expresan un modelo CFD 3D de dos fases basándose en el modelo de Euler-Euler para simular la hidrodinámica del sistema aire-agua en diferentes velocidades en la fase gaseosa (0,464, 0,801, 1,015, 1,464 m/s $(kg/m^3)^{1/2}$), determinando por medio de los datos experimentales de Solari y Bell: la distribución de velocidad, la altura del líquido y la altura de la espuma en dos platos perforados. Con respecto a los resultados de la simulación, se compararon con los valores de Solari y Bell, la correlación de Bennet y el modelo de simulación en CFD de Gesit, se evidencia una mejor aproximación de los datos experimentales de Solari y Bell y la correlación de Bennett que en la simulación demostrada por Gesit donde se adaptó un modelo de simetría, afirmando los autores Parizi y Rahimi que el flujo realmente no muestra este comportamiento, además, recomiendan utilizar una geometría real del equipo para posteriores modelados. [4]

Por otro lado, el autor Mancera et al. postula un sistema aire-agua al igual que Parizi y Rahimi en 2015, modificando el modelo de Grace Drag (GDM) por medio de datos experimentales correspondientes a la altura del líquido con respecto a diversas velocidades de gas superficial (Vs), asimismo, el autor Mancera y coautores establecieron los efectos sobre la altura del líquido de la variación del tipo de geometría, la altura del vertedero, la carga del líquido por longitud del vertedero y la velocidad superficial del gas. Para su obtención de resultados, acoplaron un diseño de turbulencia de dos ecuaciones relacionado con las ecuaciones Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) para la fase líquida; ecuaciones de momento enfatizadas al coeficiente de arrastre y su respectiva corrección para modelar diversos tamaños de burbuja. [5]

Los autores efectúan una comparativa entre los resultados obtenidos por los autores con respecto a los datos experimentales de Krishna en 1999, la simulación CFD de Krishna y la correlación de Bennet, en donde, los autores denotaron la precisión del modelado propuesto con el coeficiente de arrastre modificado con un porcentaje de error de 3,42 % en la simulación CFD, disminuyendo considerablemente el margen de error en comparación con el promedio de 40 % reportado en modelados y estudios. Además, el autor Mancera y coautores afirman que la correlación de Bennet

no es necesaria para estimar la retención de gas, el cual se utiliza mayoritariamente en las simulaciones de platos perforados. [5]

Con respecto a los datos experimentales de Solari y Bell, los autores analizan la distribución del tiempo de residencia y la distribución de velocidades en platos perforados comerciales utilizando un simulador de aire/agua a escala comercial, donde emplean una técnica fluorimétrica con inyección de tinte fluorescente para obtener datos experimentales y evaluar los parámetros ajustables del modelo de flujo retrógrado, igualmente comparan las predicciones de eficiencia de platos con servicios industriales reportados en la literatura. [6]

Los resultados experimentales de los autores Solari y Bell, muestran una distribución de residencia temporal afectada por la tasa de gas, con tiempos extendidos cerca de la pared y más cortos cerca del centro. Además, se evidencia que las velocidades a bajos factores de F mostraron no uniformidades severas con alta velocidad en el centro y zonas estancadas cerca de la pared, la varianza en esta región fue significativamente mayor que en la región de flujo directo, es decir que, a altas tasas de gas, las no uniformidades se reducen con curvas de distribución de velocidad más planas y eliminación casi completa de la tendencia de acumulación. [6]

Finalmente, los autores demostraron que los perfiles de tiempo de residencia y varianza muestran zonas de tiempo extendido y variación cerca de la pared, indicando condiciones de acumulación de líquido, donde a medida que aumentan las tasas de gas y líquido, las no uniformidades se reducen, pero no se eliminan por completo; y el aumento de la tasa de gas desplaza parte del flujo hacia la pared, mejorando la distribución del flujo en el plato. [6]

Lavasani et al. en 2018, identifican que la caída de presión en el plato perforado es una variable clave e importante que afecta la distribución del gas, especialmente a bajas presiones, también afirman que la mala distribución del gas en el plato provoca una pérdida de eficiencia de transferencia de masa gas-líquido en cada condición de operación. Los autores denominan que la caída de presión de vapor a través del orificio de un plato en ausencia de flujo de líquido se denomina caída de presión seca, que es una porción notable de la caída de presión total. Por último, los autores recalcan que la caída de presión en seco refleja el rendimiento del plato y puede usarse

para el estudio de parámetros hidráulicos. Teniendo como resultados finales que un aumento en la velocidad del gas aumenta la caída de presión seca. [7]

R. Krishna et al. realizaron estudios de simulación CFD en 2D y 3D para investigar el comportamiento de los platos perforados, determinando que el uso de técnicas CFD es una herramienta eficaz de prueba y diseño de platos, que puede describir cambios hidrodinámicos y, asimismo, han demostrado que los platos de gran diámetro tienen un carácter de flujo pistón de fluido. [8]

Por otra parte, los autores Rahimi et al. en el año 2011, desarrollaron un modelo CFD de dos fases en un marco Euleriano-Euleriano para estudiar la eficiencia, la hidráulica y la transferencia de masa de las platos perforados, observaron los efectos de los diámetros de los agujeros y burbujas en la eficiencia de las platos, encontrando que el patrón de flujo de líquido en la plato con un diámetro de agujero más pequeño se asemeja al flujo tapón y tiende a tener una tasa de transferencia de masa más alta. Asimismo, llegaron a la conclusión de que el plato con diámetros de orificios más pequeños daría una mezcla de fase líquida más uniforme, menor retromezcla y mayor eficiencia. Los autores compararon las eficiencias de punto de dos geometrías, mostrando que la eficiencia de punto para la Geometría 2 es mayor que la de la Geometría 1, donde el aumento de la eficiencia de punto en la Geometría 1 es mayor que en la Geometría 2 a medida que x/L tiende hacia 1. [3]

Los autores Noriler, Barros, Maciel y Meier por el año 2010, evidencian que las temperaturas de los resultados varían a lo largo del plato perforado, mostrando que los gradientes de temperatura dependen de la posición, principalmente en la dirección del flujo de líquido, con temperaturas más bajas en la entrada del líquido y aumentos rápidos cerca de la entrada del líquido. [9]

2. JUSTIFICACIÓN

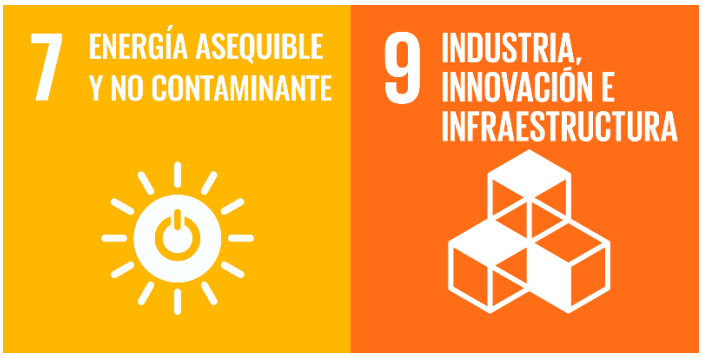
En los últimos años ha crecido considerablemente un interés académico e industrial en la utilización de la dinámica de fluidos computacional (CFD) para modelar flujos de dos fases en equipos de proceso, siendo una de las características del modelado, la descripción de las columnas de burbujas de gas-líquido, en donde se han empleado los marcos de Euler-Euler y Euler-Lagrange para la descripción de las fases gaseosa y líquida [1]. Con la mejora continua de la turbulencia, el flujo multifásico y otros conceptos hidrodinámicos, así como el avance de los algoritmos numéricos, la tecnología CFD se ha impulsado, desarrollado y potenciado rápidamente; en la actualidad, el cálculo mediante CFD es más preciso, es decir, que el error es menor y la tecnología CFD se ha convertido en un método viable para estudiar la distribución del campo de flujo de los componentes internos [10].

Donde, la predicción de fluidos con CFD es significativo para entender el comportamiento real de los fluidos en sistemas industriales como en equipos de columnas de destilación o absorción, permitiendo optimizar la eficiencia de los procesos, como la transferencia de masa y calor, lo que lleva a un diseño más eficiente de platos de destilación. Por otro lado, la optimización de los recursos de simulación CFD por parte de datos experimentales se puede implementar a diversos procesos en la industria y del campo de la ingeniería química, utilizando la simulación CFD para predecir y diseñar fluidos, evitando recursos o costosos de experimentación física y minimizando el tiempo empleado en el desarrollo de procesos industriales. [11]

A través de la mejora del diseño del plato perforado y la comprensión de la hidrodinámica, se puede observar con precisión sus efectos sobre la eficiencia del plato y cumplir por medio de la eficiencia en investigaciones posteriores la reducción de energía del proceso [12], evitando las perdidas por equipos, adaptándose a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como se muestra en la figura 2:

Figura 2.

Objetivos de Desarrollo Sostenible de la investigación.

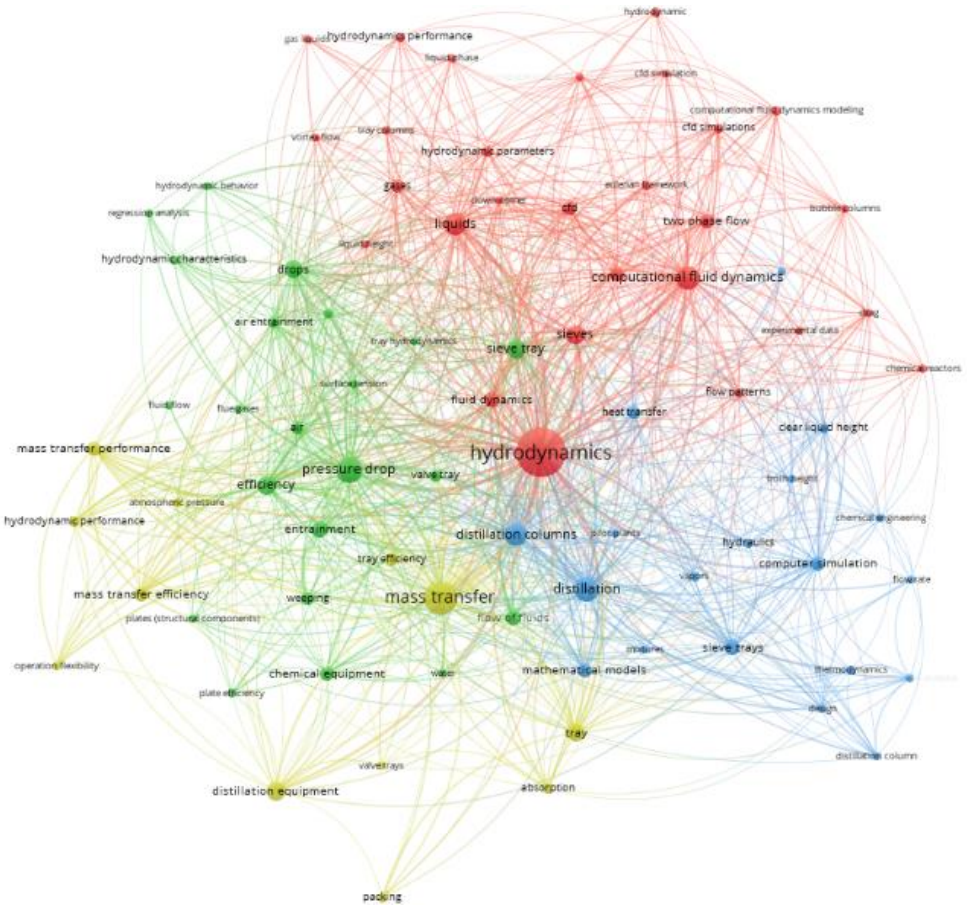


Nota. La figura representa los Objetivos de Desarrollo Sostenible que representa el trabajo. Tomado de: M. J. Gamez y M. C. G. Legaz, «Portada», *Desarrollo Sostenible*. Disponible en: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/.

Por otra parte, para incluir fuentes de información y búsquedas de información viables, se efectúa una cienciometría enfatizada en las conexiones de los términos o conceptos que involucran la hidrodinámica con respeto a su utilización en platos de destilación como se puede observar en la figura 3 y, asimismo, una densidad de los conceptos de mayor relevancia expresada en la figura 4:

Figura 3.

Análisis de coocurrencia entre palabras clave.

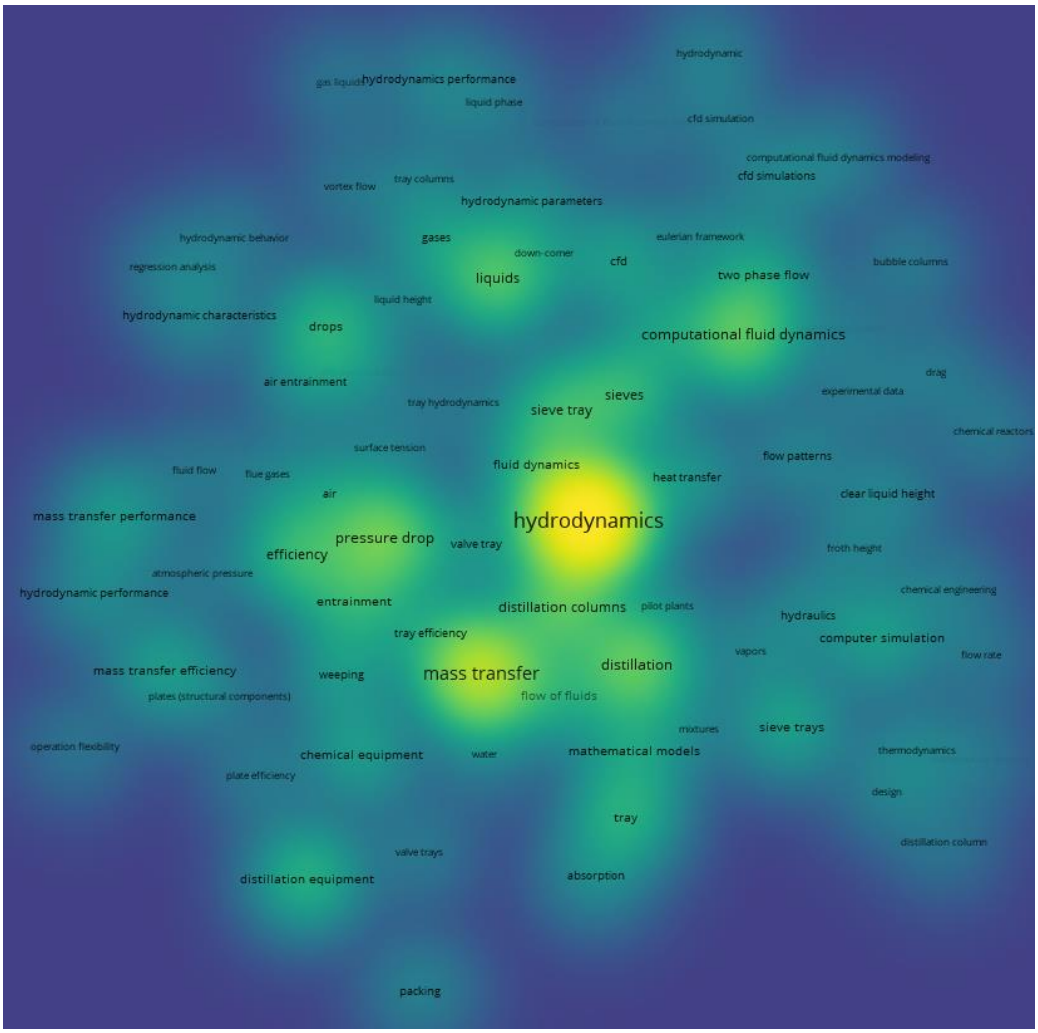


Nota. La figura muestra la cienciometría realizada a través de la conexión de los términos claves del proyecto de simulación.

La figura 3, muestra un análisis de red en el que los conceptos relacionados con la hidrodinámica están conectados a términos relevantes dentro del ámbito de las columnas de destilación. Los nodos y líneas representan la frecuencia y relación entre términos como *tray efficiency*, *mass transfer*, *computational fluid dynamics* y *pressure drop*, donde, la estructura de la red destaca la centralidad del término *hydrodynamics* como eje principal de las conexiones conceptuales, evidenciando su relevancia en los estudios de dinámica de fluidos en columnas de separación y simulaciones computacionales.

Figura 4.

Análisis de concurrencia entre palabras clave visualizado por densidad.



Nota. La figura evidencia la densidad o la relevancia entre los términos conectados, evaluando su impacto en la búsqueda y recopilación de datos con respecto a la simulación.

Por otra parte, la figura 4 representa un mapa de densidad en el que los conceptos más importantes en la literatura aparecen como puntos con alta concentración (color amarillo intenso). Los términos clave, como hydrodynamics, mass transfer, distillation columns y sieve trays, se identifican como áreas de alta relevancia en la investigación, demostrando la concordancia jerárquica e intensidad de su uso en el campo.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Implementar un modelo de CFD para simular la hidrodinámica de un plato perforado de una columna de destilación.

3.2 Objetivos Específicos

- Elaborar un esquema detallado de un plato perforado de una columna de destilación mediante herramientas CAD para uso en CFD.

- Analizar el comportamiento fluidodinámico del plato perforado mediante la determinación de la altura del líquido claro con CFD.

- Validar el modelo de CFD con datos experimentales para la descripción de la hidrodinámica del plato de destilación.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 Marco teórico

4.1.1 *Dinámica de fluidos Computacional (CFD)*

La herramienta de CFD es abarcada y radicada para resolver problemas que involucran fenómenos acoplados como el flujo de fluidos, reacciones químicas y transferencia de calor, masa y momento. Comprendiendo la necesidad de comprender, describir y mejorar los diseños de los procesos, conjunto con el momento de aumento exponencial con respecto a las capacidades computacionales, permitió aumentar masivamente el potencial de CFD para buscar soluciones en procedimientos que requerían un trabajo experimental costoso y de gran consumo temporal, influyendo un aumento de interés por parte de la industria y la demanda de soluciones de diversos campos. [13]

OpenFOAM es probablemente el software CFD de código abierto más famoso, el cual fue lanzado el año 2004. El uso de este software se puede aplicar a una amplia gama de problemas que involucran flujos de fluidos complejos, reacciones químicas, turbulencias, transferencia de calor y en distintos campos como la acústica o la electromagnética. OpenFOAM es una relevante opción para resolver problemas que incluyen el análisis térmico, características hidrodinámicas de los vehículos, aerodinámica, problemas de combustión y multifásicos estándar e incluso en interacciones fluido-estructura. [13]

Sin embargo, ANSYS Fluent es actualmente la herramienta CFD más potente disponible en el mercado, en el cual Fluent proporciona un amplio conjunto de modelos validados, que proporcionan resultados precisos en un corto periodo de tiempo a una diversidad de problemas de CFD, electrónica, análisis estructural y multifísica. [13]

Los programas o software se radican en un conjunto de tareas que comienza con la identificación del problema y continúa con los pasos de geometría, mallado, configuración de la solución y posprocesamiento. Las diferencias relevantes provienen principalmente del método numérico utilizado para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes: volumen finito, elemento finito, híbrido o ambos, pero, diferentes empresas implementan el enfoque Lattice Boltzmann. [13]

La dinámica de fluidos computacional (CFD) se ocupa de la solución numérica de ecuaciones diferenciales que componen el flujo de un determinado fluido, la transferencia de calor y los fenómenos asociados, como las reacciones químicas, mediante simulación por computadora. La actividad CFD se originó y se potencio debido a la disponibilidad de computadoras a principios de los años 1960. Desde principios de la década de 1970, los paquetes de software comerciales disponibles hicieron del CFD una poderosa técnica dominante que abarca un extenso campo de áreas de aplicación industriales y no industriales. [14]

CFD tiene varias ventajas únicas sobre los experimentos para diseñar sistemas de fluidos [14]:

- Reduce sustancialmente los tiempos de entrega y los costos de nuevos diseños.

- Es capaz de estudiar los sistemas donde los experimentos controlados son difíciles o imposibles de realizar.

- Es capaz de estudiar sistemas en condiciones peligrosas en sus límites de rendimiento normales y más allá.

- Da resultados con un nivel de detalle ilimitado.

Por tanto, todos los códigos contienen tres elementos principales: (1) preprocesador, (2) solucionador y (3) posprocesador. En CFD, las ecuaciones gobernantes se discretizan en pintas de cuadrícula (usando el método de diferencias finitas, el método de volúmenes finitos, el método de elementos finitos, etc.) y se transforman en un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales, que se resuelven para dar los resultados. [14]

Donde, un proceso CFD se puede dividir en cuatro fases: la construcción de la geometría (modelo CAD), la síntesis del dominio computacional, la ejecución real de la simulación y el análisis de los resultados después del posprocesamiento [5]. Como el cálculo de CFD requiere mucho esfuerzo, todo el proceso puede llevar horas o días. Por lo tanto, la mayoría de las veces el uso de simulaciones CFD se limita a casos especiales como la dinámica automotriz o aeroespacial. [15]

4.1.1.a Modelado geométrico. La resolución de un problema de CFD comienza con la creación de un modelo geométrico del sistema, que puede ser en 2D o 3D. Aunque los programas comerciales de CFD incluyen herramientas CAD, la geometría puede ser diseñada en cualquier software CAD y luego importada al programa de generación de cuadricula o mallas. Sin embargo, muchos programas CAD no diseñados específicamente para CFD incluyen detalles innecesarios, como tuercas y tornillos, que no son relevantes para las simulaciones de CFD, por lo tanto, es necesario modificar estos modelos antes de utilizarlos en el proceso de mallado. [16]

Ansys ofrece la herramienta Ansys DesignModeler, que permite editar y preparar geometrías de modelos CAD existentes. Este modelador paramétrico, basado en características, facilita la creación de bocetos en 2D, el diseño de piezas en 3D y la importación de modelos CAD 3D, a través de dos modos básicos de funcionamiento: DesignModeler 2D Sketching y DesignModeler 3D Modeling. Asimismo, es relevante para el preprocesamiento en análisis de ingeniería, incluyendo simulaciones de CFD, optimizando así el proceso de preparación de la geometría para su análisis. [16]

4.1.1.b Generación de cuadrícula (mallado). Las ecuaciones de transporte de momento, debido a su naturaleza intrínsecamente no lineal, requieren una adecuada discretización del dominio computacional para lograr soluciones numéricas precisas. [16]

La calidad del mallado es un aspecto fundamental, tan relevante como la definición de los modelos físicos, ya que un mallado deficiente puede ocasionar resultados imprecisos. Por esta razón, es crucial evaluar factores como la relación de aspecto y el sesgo antes de llevar a cabo simulaciones. Por tanto, diversos programas de dinámica de fluidos computacional (CFD) ofrecen opciones de adaptación que permiten refinar localmente la malla tras obtener resultados preliminares. [16]

El proceso de mallado se efectúa posteriormente a la definición de la geometría, que puede realizarse en el propio programa de mallado o importarse desde software CAD. La geometría se crea combinando puntos, líneas y formas 2D o 3D (como rectángulos, círculos, cajas o cilindros), donde estas formas pueden unirse, restarse o intersectarse para generar estructuras complejas. En las superficies, el mallado debe diseñarse cuidadosamente para mantener un ángulo cercano a 90°

entre las celdas y las paredes, comenzando preferentemente con una malla regular. Cuando es necesaria una resolución fina en los límites, se puede generar una malla que incremente el tamaño de las celdas con la distancia desde la pared. [16]

El proceso de mallado se realiza una vez definida la geometría, la cual puede elaborarse directamente en el programa de mallado o importarse desde un software CAD. Esta geometría se construye mediante la combinación de puntos, líneas y formas 2D o 3D (como rectángulos, círculos, cajas o cilindros), permitiendo que dichas formas se unan, resten o intersecten para crear estructuras más complejas. En las superficies, el diseño del mallado debe ejecutarse con cuidado para mantener un ángulo cercano a 90° entre las celdas y las paredes, lo cual es preferible lograrse iniciando con una malla regular. Si se requiere una resolución más fina en los límites, es posible generar una malla donde el tamaño de las celdas aumente progresivamente con la distancia respecto a la pared. [16]

Para garantizar la precisión en las simulaciones, el diseño de la malla debe cumplir con dos condiciones que aseguren su calidad [16]:

- Es importante mantener la homogeneidad en el tamaño de las celdas, evitando grandes diferencias entre las celdas adyacentes para minimizar los errores numéricos.

- La geometría de la malla debe ser simétrica, con ángulos cercanos a 90° en mallas cuadriláteras, a 60° en las triangulares y dentro del rango de 40° a 140° en las tetraédricas. Además, la relación de aspecto puede incrementarse para favorecer la convergencia, siempre que no supere un valor de 5.

El mallado constituye un aspecto importante en el trabajo del ingeniero en CFD, ya que un diseño deficiente puede ocasionar problemas numéricos y resultados poco fiables. En este ámbito, las mallas se clasifican en dos categorías principales: estructuradas y no estructuradas. [16]

Las mallas estructuradas se construyen utilizando cuadriláteros en 2D o hexaedros en 3D y se caracterizan por facilitar la indexación y la búsqueda de celdas vecinas, lo que las hace más rápidas

y con menor requerimiento de memoria. No obstante, su aplicación presenta limitaciones en geometrías complejas, donde su implementación puede volverse menos eficiente. [16]

Por otra parte, las mallas no estructuradas se componen de una variedad de elementos como triángulos, tetraedros, pirámides, prismas y hexaedros, lo que permite una mayor flexibilidad para abordar geometrías complejas, aunque requiere un costo mayor en consumo de memoria y tiempo de cálculo. En la actualidad, la mayoría de los solucionadores modernos de CFD tienen la capacidad de manejar ambos tipos de mallas, lo que permite su uso combinado para adaptarse a las necesidades específicas de cada modelo mientras se optimiza el equilibrio entre flexibilidad y eficiencia computacional. [16]

4.1.1.c Definición de modelos. En el flujo laminar monofásico, las ecuaciones de Navier-Stokes pueden resolverse directamente, mientras que en flujos turbulentos y multifásicos es necesario seleccionar el modelo más adecuado. Aunque existen pocos modelos ampliamente aceptados para turbulencia y flujo multifásico, hay numerosas opciones disponibles, cada una con parámetros que deben configurarse, donde generalmente los valores predeterminados son la mejor elección, pero pueden ajustarse según el caso. [16]

La mayoría de los programas comerciales de CFD permiten a los usuarios definir sus propios modelos mediante subrutinas o funciones personalizadas en lenguajes como Fortran o C. En los flujos multifásicos, muchas propiedades no se resuelven directamente en el programa y requieren la definición de modelos semiempíricos para describir la transferencia de momento, calor y masa entre fases dispersas y continuas. [16]

Ansys Fluent ofrece un amplio campo de herramientas para modelar y analizar el comportamiento de fluidos en una variedad de condiciones. Conserva una capacidad para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes que, junto con modelos de turbulencia avanzados, permite simular flujos desde regímenes laminares hasta turbulentos complejos. Además, puede manejar tanto fluidos newtonianos como no newtonianos, y considerar efectos de compresibilidad, lo que lo hace adecuado para una amplia gama de aplicaciones en ingeniería. [16]

Una de las principales ventajas de Ansys Fluent es su capacidad para modelar fenómenos de transporte acoplados, como la transferencia de calor, masa y momento. Esto permite simular procesos industriales complejos que involucran interacciones fluido-estructura, reacciones químicas y combustión. Asimismo, existe una amplia gama de modelos de turbulencia, lo que permite seleccionar el modelo más adecuado para cada aplicación, desde los modelos de bajo orden numérico hasta los modelos de gran escala. [16]

4.1.1.d Establecer propiedades, límites y condiciones iniciales. En un análisis CFD, es esencial definir todas las propiedades físicas de los fluidos existentes en un sistema, como la viscosidad y la densidad teniendo en cuenta su dependencia de la temperatura, la composición, la presión, la velocidad, etc. Muchas de estas propiedades están integradas en el software (también ofrecen polinomios ajustables) o disponibles en bases de datos específicas, además, es posible programar funciones definidas por el usuario conocidas como UDS o UDF, que permiten calcular estas propiedades de forma personalizada según las necesidades del modelo. [16]

Es igualmente importante establecer con precisión las condiciones de entrada, salida y los límites del dominio, incluyendo paredes, rotaciones y simetrías, u otras características relevantes como las condiciones de contorno periódicas especialmente útiles en equipos donde solo se modela una sección específica. Por otra parte, en simulaciones transitorias, deben definirse condiciones iniciales claras, mientras que en simulaciones de estado estable se requiere una estimación inicial que facilite las iteraciones y acelere la convergencia del modelo. [16]

4.1.1.e Solucionador. Para configurar el solucionador, primero se debe seleccionar el tipo de método, ya sea segregado o acoplado, según el problema y su dependencia de la presión y el orden. Para problemas no estacionarios, es necesario elegir entre métodos de pasos de tiempo implícitos o explícitos. Posteriormente, se deben definir los esquemas numéricos para mejorar la convergencia, como los esquemas multimalla, contra el viento o con factores de relajación y, además, se debe establecer la calidad de la solución aceptable definiendo criterios claros de convergencia. [16]

Es relevante que, antes de iniciar el cálculo, se realice una inicialización, ya sea híbrida o estándar, para garantizar condiciones iniciales adecuadas y una mayor estabilidad numérica. Adicionalmente, se pueden configurar reportes para monitorear valores clave, como presión, velocidad, fracción de volumen, temperatura o cualquier otra variable necesaria, permitiendo evaluar el progreso de la simulación y detectar posibles inconsistencias, también, es posible aplicar técnicas avanzadas, como el refinamiento adaptativo de mallas, la selección de tiempos de simulación óptimos o estrategias de desacoplamiento físico para simplificar iteraciones complejas. [16]

4.1.2 *Hidrodinámica*

El estudio de la hidrodinámica implica la aplicación de los principios fundamentales de la mecánica y la termodinámica para comprender la dinámica del movimiento del flujo de fluidos. La dinámica de fluidos y la hidrodinámica desempeñan un papel vital en la vida cotidiana, como ejemplos prácticos se incluyen el movimiento del flujo en el fregadero de la cocina, el extractor de aire encima de la estufa y el sistema de aire acondicionado de nuestra casa. Las aplicaciones de ingeniería abarcan el transporte de fluidos en tuberías y canales, la generación de energía, los procesos ambientales y el transporte (automóviles, barcos, aviones), otras aplicaciones incluyen estructuras costeras, flujo de viento alrededor de edificios, circulaciones de fluidos en lagos, océanos y atmósfera e incluso movimiento de fluidos en el cuerpo humano. [12]

La hidrodinámica en el contexto de la destilación se refiere e incorpora a la retención de líquido o gas, la caída de presión, la altura del líquido claro, la altura de la espuma, el arrastre de líquido, la distribución del tiempo de residencia y llanto (RTD), etc. [17]. Las mediciones más triviales son las de caída de presión y altura del líquido claro (a través de un manómetro de tubo en U), altura visual de la espuma y recolección de líquido arrastrado y lloroso. Por otro lado, las distribuciones de la altura efectiva de la espuma, la retención del líquido y el tiempo de residencia sobre el área de burbujeo del plato son difíciles de obtener, debido a la naturaleza caótica y tridimensional (3D) del flujo cruzado de dos fases. [12]

4.1.3 *Plato perforado*

Los platos perforados son dispositivos de contacto populares para operaciones de separación y operaciones de reacción debido a su simplicidad y bajo costo. Los platos tienen un diseño clásico y un diseño mejorado, como platos perforados guiados por flujo, platos perforados de malla, platos perforados cónicas, platos perforados con bajante múltiple y platos de espuma. Han sido bien desarrollados y ampliamente utilizados en procesos de contacto gas-líquido y presentaron buena hidrodinámica en procesos de separación y en reactores de burbujas. [18]

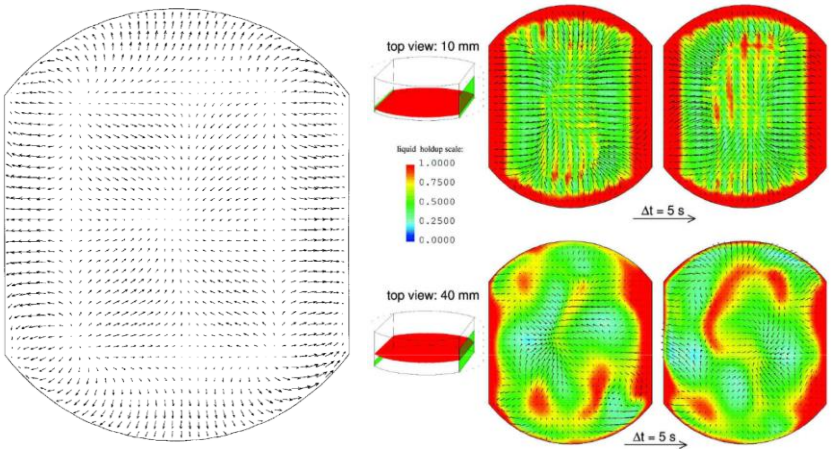
El modelo de plato considera la interacción hidráulica de una fase líquida de agua pura y una fase gaseosa que es aire dentro de un plato perforado a presión atmosférica. En la simulación de la hidrodinámica de este flujo bifásico turbulento, intrínsecamente inestable, no se contemplan transferencias de calor ni de masa [19]. Las columnas de platos se utilizan ampliamente en las industrias química y de refinación de petróleo, donde existen tres tipos predominantes de columnas de platos; plato de tapa de burbuja, plato perforado y plato de válvula. El costo, el rango operativo, la caída de presión y el mantenimiento son los principales factores para comparar el rendimiento de los platos. Las tapas de burbujas son considerablemente más caras que los platos perforados o de válvula, y el costo relativo dependerá del material de construcción utilizado. Debido a su diseño sencillo, los platos suelen ser las más baratas. [7]

Los platos con tapa de burbuja tienen un sello líquido positivo y, por lo tanto, pueden funcionar de manera eficiente con tasas de vapor muy bajas. Los platos perforados dependen del flujo de vapores a través de los orificios para retener el líquido en el plato, por lo que no pueden funcionar con tasas de vapor muy bajas. Los platos de válvulas están destinadas a brindar mayor flexibilidad que los platos perforados a un costo menor que las tapas de burbujas. Por lo tanto, los platos de casquete de burbujas tienen el rango de operación más amplio, seguidas por los platos de válvulas y los platos perforados. La caída de presión del plato dependerá del diseño detallado, pero en general, los platos dan la caída de presión más baja. Para servicios sucios, los platos perforados son las más fáciles de limpiar. En conclusión, los platos perforados son los más baratos y satisfactorios para servicios sucios, los platos perforados son las más fáciles de limpiar [7].

Un diseño apropiado del plato conduce a una buena transferencia de masa y a una mejora en la eficiencia del plato, por lo que el plato debe operar en una región satisfactoria de condiciones operativas. Dicha región, que se denomina "ventana operativa" o "gráfico de capacidad", depende de la geometría del plato, las propiedades físicas del gas/líquido y las cargas de vapor y líquido. Al mantener constante el caudal de líquido a baja velocidad del gas, los platos llorarán y a alta velocidad del gas comenzará el arrastre. Ambos fenómenos conducen a una disminución en la eficiencia de transferencia de masa de un plato, siendo los límites operativos superior e inferior de los platos determinados por estos dos fenómenos. Por otro lado, la caída de presión del plato es un parámetro hidráulico vital, que determina el límite operativo inferior de un plato [7]. Como un ejemplo de plato perforado, se tiene en cuenta al realizado por Krishna en 2003 en la figura 5:

Figura 5.

Vectores de velocidad de fase líquida y mapa de calor Krishna.



Nota. La figura representa un modelo de un plato perforado donde se evidencia los vectores de velocidad y mapa de calor teniendo en cuenta un tiempo de residencia. Tomado de: B. A. R. A. L. H. M. M. R. S. B. van Wachem, Computational Fluid Dynamics for Engineers. 2012.

4.1.4 *Destilación*

La destilación es uno de los principales procesos de separación en las industrias química y petroquímica, que utilizan aproximadamente el 3% de la energía total del mundo. En el último

siglo, se ha utilizado la intensificación de procesos en el proceso de destilación para reducir los requisitos energéticos de estas industrias. Hoy en día, la tecnología de intensificación de procesos representa una tendencia dominante en el desarrollo de la industria química debido principalmente a los problemas medioambientales y a la crisis energética. [7]

La destilación es la técnica de separación más utilizada y suele ser la primera opción para separar mezclas. Sólo cuando la destilación falla se buscan otras alternativas de separación. Uno de los principales factores que favorece la destilación es el hecho de que se pueden diseñar y construir columnas de gran diámetro con confianza. Las columnas de destilación con platos perforados se utilizan ampliamente en la práctica industrial y la descripción de la hidrodinámica de los platos es de gran importancia para predecir la eficiencia de separación y el rendimiento general del plato. [7]

4.1.5 *Conservación de masa*

La ecuación de continuidad describe que, si se transporta masa al sistema a través de sus límites, la densidad del sistema debe aumentar para almacenar esta masa. Por otro lado, si la masa se transporta fuera del sistema a través de sus límites, la densidad del sistema debe disminuir. Si el líquido es incompresible, la densidad del sistema no puede cambiar. Por lo tanto, si el líquido fluye hacia el sistema a través de un lado del límite, la misma cantidad de masa debe fluir fuera del sistema a través de un lado diferente del límite. Si la superficie límite total del sistema es constante. [20]

La fórmula general de la ecuación de conservación de masa y, la cual se puede usar tanto para flujos incompresibles como compresibles es la siguiente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \qquad (1)$$

Considerando la ecuación de continuidad para la fase q, obtenemos que [21]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_1) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{\rho=1}^{n} (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q \qquad (2)$$

En donde:

- $\vec{v}_q$, es la velocidad de la fase q.
- $\dot{m}_{pq}$, caracteriza la transferencia de masa de la fase pth a la qth.
- $\dot{m}_{qp}$, caracteriza la transferencia de masa de la fase q a la p.
- Donde S_q es cero, pero puede especificar una fuente de masa constante o definida para cada fase.

4.1.6 *Conservación de momento*

La ecuación del momento expresa la ley de conservación del momento para un fluido en movimiento. La tasa de cambio del impulso total de cualquier microunidad en el campo de flujo es igual a la fuerza resultante de todas las fuerzas externas que actúan sobre la microunidad. La expresión de la ecuación del momento del fluido es la siguiente [22]. La conservación de momento en un sistema referencial de inercia, es decir, sin aceleración se estipula como [21]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v}) + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) = -\nabla\rho + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho\vec{g} + \vec{F} \tag{3}$$

En donde [21]:

- ρ es la presión estática.
- $\bar{\bar{\tau}}$ es el tensor de tensión.
- $\rho\vec{g}$ y $\vec{F}$ se refieren a la fuerza gravitacional del cuerpo y las fuerzas externas del cuerpo respectivamente.

Asimismo, la ecuación depende de otros términos y conceptos que dependen del modelo, como pueden ser los medios porosos y las fuentes definidas por el usuario. [21]

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu\left[(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T) - \frac{2}{3}\nabla \cdot \vec{v}I\right] \tag{4}$$

En donde [21]:

- μ es la viscosidad molecular.
- I es el tensor unitario.

Considerando la ecuación de momento para la fase q, obtenemos que [21]:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q\right) + \nabla \cdot \left(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q\right) = -\alpha_q \nabla_\rho + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{\rho=1}^{n}\left(\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq}\vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp}\vec{v}_{qp}\right)$$

$$+\left(\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{wl,q} + \vec{F}_{vm,q} + \vec{F}_{td,q}\right) \quad (5)$$

Donde $\bar{\bar{\tau}}_q$ es el tensor tensión-deformación de la fase qth:

$$\bar{\bar{\tau}}_q = \alpha_q \mu_q \left(\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q{}^T\right) + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3}\mu_q\right) \nabla \cdot \vec{v}_q \bar{\bar{I}} \quad (6)$$

En donde [21]:

- μ_q y λ_q es la viscosidad de corte y de volumen de la fase q.
- $\vec{F}_q$ es una fuerza externa del cuerpo.
- $\vec{F}_{lift,q}$ es una fuerza de elevación, $\vec{F}_{wl,q}$ una fuerza de lubricación en la pared, $\vec{F}_{vm,q}$ una fuerza de masa virtual y $\vec{F}_{td,q}$ una fuerza de dispersión turbulenta.
- $\vec{R}_{pq}$ es una fuerza de interacción entre fases y ρ es la presión compartida por las fases.

4.1.7 *Conservación de la energía*

La ecuación de conservación de masa es la misma que para un flujo laminar, pero las ecuaciones de conservación de momento y energía se reducen debido a la ausencia de difusión molecular, describiéndose por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(pE) + \nabla \cdot \left(\vec{v}(pE + p)\right) = -\nabla \cdot \left(\sum_j h_j J_j\right) + S_h \quad (7)$$

4.1.8 *Modelo Euler-Euler*

El modelo Euleriano resuelve un conjunto de ecuaciones de impulso y continuidad para cada fase. El acoplamiento se logra mediante los coeficientes de presión y de intercambio de interfase, siendo la manera en que se maneja este acoplamiento depende del tipo de fases involucradas. Los flujos granulares (fluido-sólido) se manejan de manera diferente que los flujos no granulares (fluido-fluido). Para flujos granulares, las propiedades se obtienen mediante la aplicación de la teoría cinética. [21]

Las aplicaciones del modelo multifásico de Euler incluyen columnas de burbujas, elevadores, suspensión de partículas y lechos fluidizados. [21]

4.1.9 *Coeficiente de intercambio fluido-fluido*

Correspondiente a los flujos fluido-fluido, se supone que cada fase secundaria forma gotas o burbujas y con esto, un impacto en la manera de cómo se consigne cada uno de los fluidos a una fase particular. Con respecto a lo anterior, si en un sistema existe unas cantidades distintas de dos fluidos, el fluido predominante o que se encuentra en mayor medida se debe modelar como el fluido primario debido a que tiene mayor tendencia a formar gotas o burbujas por su dispersión. Para esto, el coeficiente de intercambio para este tipo de mezclas burbujeantes (ya sea liquido-liquido o gas-liquido) se puede expresar de la siguiente forma:

$$K_{pq} = \frac{\rho_p f}{6\tau_\rho} d_\rho A_i \tag{8}$$

En donde [21]:

- A_i es el área interfacial y f es la función de arrastre, la cual se define de acuerdo con los modelos establecidos en literatura.
- τ_ρ es el tiempo de relajación de partículas.

$$\tau_\rho = \frac{\rho_p d_\rho^2}{18\mu_q} \tag{9}$$

En donde [21]:

- d_p es el diámetro de burbujas o gotas de la fase p.
- La mayoría de las definiciones de f incluyen un coeficiente de arrastre (C_D), relacionando el numero de Reynolds (Re).

Sin embargo, si el coeficiente de intercambio es igual a cero, los campos de flujo se calcularán de forma independiente, correspondiendo a su única interacción a sus fracciones de volumen complementarias dentro de cada celda computacional [21]. A continuación, se presentan diversos modelos de arrastre que pueden ser ejecutados en Ansys Fluent [21]:

4.1.9.a Modelo de Schiller y Naumann. Este modelo es el método predeterminado y aceptado para uso general en todos los pares de fases fluido-fluido, el cual utiliza las siguientes consideraciones y ecuaciones [21]:

$$f = \frac{C_D R_e}{24} \tag{10}$$

$$C_D \begin{cases} 24(1 + 0{,}15Re^{0.687})/Re & Re \leq 1000 \\ 0{,}44 & Re > 1000 \end{cases}$$

4.1.9.b Modelo de Morsi y Alexander. Este modelo es el más completo y ajusta la definición de f con frecuencia en un amplio rango de números de Reynolds, pero, los cálculos de acuerdo con este modelo pueden ser menos estables con respecto a los demás [21]:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \tag{11}$$

$$a_1, a_2, a_3 = \begin{cases} 0{,}24{,}0 & 0 < Re < 0.1 \\ 3{,}690, 22{,}73, 0{,}0903 & 0.1 < Re < 1 \\ 1{,}222, 29{,}1667, -3{,}8889 & 1 < Re < 10 \\ 0{,}6167, 46{,}50, -116{,}67 & 10 < Re < 100 \\ 0{,}3644, 98{,}33, -2778 & 100 < Re < 1000 \\ 0{,}357, 148{,}62, -47500 & 1000 < Re < 5000 \\ 0{,}46, -490{,}546, 578700 & 5000 < Re < 10000 \\ 0{,}5191, -1662{,}5, 5416700 & Re \geq 10000 \end{cases}$$

4.1.9.c Modelo simétrico. Este tipo de modelo se recomienda para flujos en los que la fase secundaria o dispersa en una parte o región del dominio del sistema se convierte en la fase primaria o continua en otra región. Asimismo, este modelo se puede utilizar para las fases secundarias. [21]

4.1.9.d Modelo de Grace et al. Este modelo se adapta de manera adecuada a los flujos de gas-liquido, en los que las burbujas pueden tener una variedad de formas [21]:

$$Re = \frac{\rho_p \left|\vec{v}_p - \vec{v}_q\right| d_p}{\mu_q} \tag{12}$$

$$C_D = \alpha_q^{C_{ex_\rho}} \cdot \max\left(min\left(C_{D_{ellipse}}, C_{D_{cap}}\right), C_{D_{spehere}}\right) \tag{13}$$

En donde [21]:

- α_q es la fracción de volumen de la fase continua.
- C_{ex_ρ} es el exponente de corrección de la fracción de volumen.

Considerando a los demás términos, se expresan de la siguiente forma [21]:

$$C_{D_{spehere}} = \begin{cases} 24/Re & Re < 0{,}01 \\ 24(1 + 0{,}15Re^{0{,}687})/Re & Re \geq 0{,}01 \end{cases}$$

$$C_{D_{cap}} = \frac{8}{3} \tag{14}$$

$$C_{D_{ellipse}} = \frac{4}{3}\frac{g d_p}{U_t^2}\frac{\left(\rho_q - \rho_p\right)}{\rho_q} \tag{15}$$

Asimismo, donde:

$$U_t = \frac{\mu_q}{\rho_q d_p} Mo^{-0{,}149}(J - 0{,}857) \tag{16}$$

Definiendo el número de Morton Mo y J como:

$$Mo = \frac{\mu_q^4 g\left(\rho_q - \rho_p\right)}{\rho_q^2 \sigma^3} \tag{17}$$

$$J = \begin{cases} 0{,}94\, H^{0{,}757} & 2 < H \leq 59{,}3 \\ 3{,}42 H^{0{,}441} & H > 59{,}3 \end{cases}$$

$$H = \frac{4}{3} EoMo^{-0{,}149} \left(\frac{\mu_q}{\mu_{ref}}\right)^{-0{,}14} ; \mu_{ref} = 0{,}0009\ kg/(m.s) \tag{18}$$

Siendo el número de Eötvös igual a:

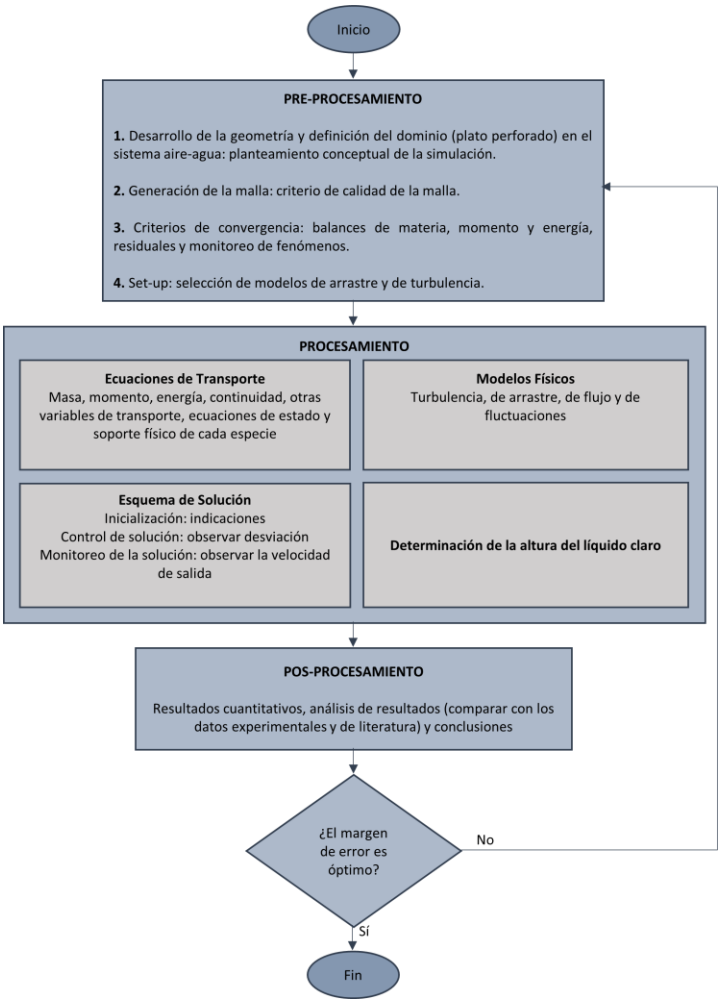
$$Eo = \frac{g(\rho_q - \rho_p) d_p^2}{\sigma} \tag{19}$$

5. DISEÑO METODOLÓGICO

Para la investigación y desarrollo del modelo de CFD, se efectuó una simulación de un plato perforado del sistema bifásico aire-agua basado en los datos experimentales del trabajo de Solari y Bell [6], en donde, la determinación de parámetros y ecuaciones se estipularon mediante la selección de modelos fiscos y matemáticos. Para la implementación de la simulación se consideró el flujo de gas y líquido como un continuo interpenetrante, con ecuaciones de transporte para cada fase y omitiendo transferencias de masa y energía, por tanto, se denota la figura 6:

Figura 6.

Diagrama de flujo del diseño metodológico.



Nota. En el diagrama se refleja un resumen de los pasos necesarios para la realización de la simulación.

5.1 Cálculos de parámetros del plato perforado

Antes de iniciar el procedimiento correspondiente al programa de Ansys Fluent, fue necesario realizar una serie de cálculos preliminares con el objetivo de garantizar que el diseño del plato cumpliera con las características específicas y el nivel de detalle requerido. Este enfoque se basó en las recomendaciones de Solari y Bell [6], tal como se detalla en las características de la Tabla 1. Para ello, se llevaron a cabo cálculos numéricos básicos y sencillos, orientados a determinar las áreas necesarias para la comparación de resultados y a establecer parámetros fundamentales, como el número de huecos necesarios para el plato.

Tabla 1.

Especificaciones de los detalles del plato perforado.

Detalles del plato	
Diámetro de la bandeja (m)	1,213
Espaciado entre bandejas (m)	0,61
Longitud del vertedero (m)	0,925
Altura del vertedero de salida (m)	0,10
Longitud del bajante (m)	0,572
Diámetro y espaciamiento de los orificios (m)	0,0127 x 0,05

Nota. La tabla muestra las especificaciones de diseño del plato perforado que se utilizo en los datos experimentales de Solari y Bell.

5.1.1 *Área total del plato*

Primeramente, para calcular el área total del plato, se aplicó la fórmula con el dato de diámetro en el artículo base de Solari y Bell [6], lo que nos da un valor de:

$$A_{total} = \pi \cdot (r)^2 \tag{20}$$

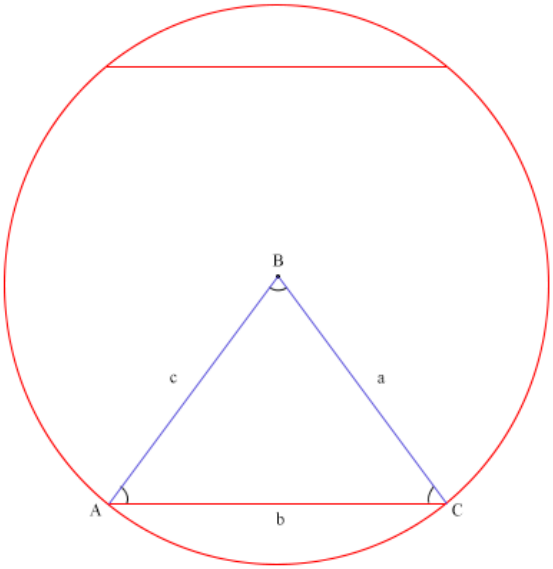
$$A_{total} = \pi \cdot (0{,}6065)^2 = 1{,}1556\ m^2$$

5.1.2 Distancia entre el centro y la zona del vertedero o la parte receptora

Ahora, se traza un triángulo isósceles para determinar la distancia desde el centro hasta la zona del vertedero y la parte receptora. Para calcular los ángulos, se aplica la ley del coseno, lo que permite obtener los valores requeridos con los datos experimentales (el radio y la longitud del vertedero) de Solari y Bell [6].

Figura 7.

Dibujo de un triángulo isósceles en el plato.



Nota. A través de la figura se denota la figura geométrica que relaciona el centro del circulo y la longitud del vertedero.

Donde se utiliza la fórmula:

$$Cos\ B\ = \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2(a)(c)} \tag{21}$$

$$Cos\ B\ = \frac{0{,}6065^2 + 0{,}6065^2 - 0{,}925^2}{2(0{,}6065)(0{,}6065)} = -0{,}1630325228$$

Obteniendo como resultado un ángulo para el apartado B de 99,38°:

$$B = cos^{-1}(-0{,}163032522) = 99{,}38°$$

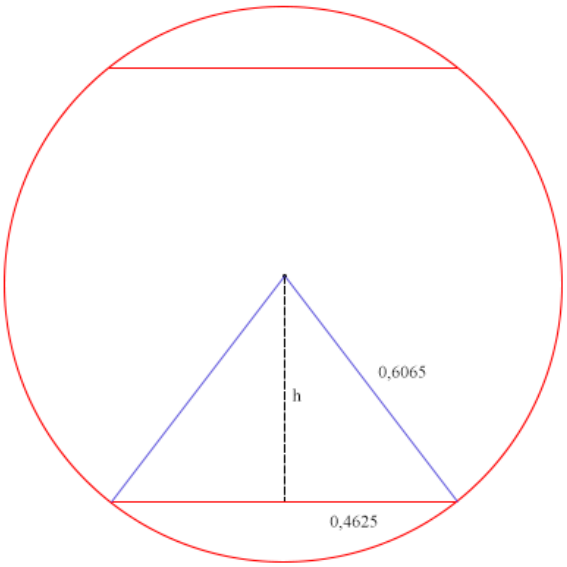
Por consiguiente, se determina el ángulo para el apartado A y C:

$$180 - 99{,}38 = 80{,}62/2 = 40{,}31\,°\, para\ A\ Y\ C$$

Para determinar la distancia del triángulo, se aplica el teorema de Pitágoras como se muestra a continuación:

Figura 8.

Altura desde el centro hasta el segmento en el plato.



Nota. Por medio de la figura podemos observar diversas dimensiones del radio y altura del vertedero para encontrar la distancia hacia el centro.

$$c^2 = a^2 + h^2 \tag{22}$$

Reemplazando los valores se determina la altura:

$$0{,}6065^2 = 0{,}4625^2 + h^2$$

$$h = \sqrt{0{,}6065^2 - 0{,}4625^2}$$

$$h = 0{,}392346\ m$$

5.1.3 Área del segmento

Para hallar el área del segmento del vertedero y la zona receptora se utilizó la fórmula:

$$A_{segmento} = A_{sec.circular} - A_{triangulo}$$

$$A_{segmento} = \frac{\pi r^2 \theta}{360°} - \frac{bh}{2} \tag{23}$$

Obteniendo que:

$$A_{segmento} = \frac{\pi \cdot (0{,}6065)^2 \cdot 99{,}38°}{360°} - \frac{0{,}925 \cdot 0{,}392346}{2} = 0{,}1375\ m^2$$

Esto es equivalente al 11,90% del total. Al multiplicar por dos, debido a que existe la zona del vertedero y la parte receptora, se obtiene un valor de 0,27510 m^2, lo que corresponde al 23,81% del total.

5.1.4 Área de burbujeo

Al restar el área de los segmentos con el área total del plato, da como resultado el área de burbujeo:

$$A_{total} - A_{segmentos} = A_{burbujeo} \tag{24}$$

$$A_{burbujeo} = 1{,}1556\ m^2 - 0{,}27510\ \mathrm{m}^2 = 0{,}8805\ m^2$$

El área de burbujeo es equivalente al 76,19 % del área total del plato perforado.

5.1.5 Área de los huecos

Correspondiente al artículo base, se considera que el 5 % sobre el área de burbujeo es el área de los agujeros o de los huecos, el cual tendrá un valor de:

(25)

$$A_{huecos} = 0{,}05\left(A_{burbujeo}\right)$$
$$A_{huecos} = 0{,}05(0{,}8805\ m^2) = 0{,}0440\ m^2$$

Teniendo en cuenta que el diámetro es de 0,0127 m, el área de un solo hueco se determina de la siguiente manera:

$$A_{1hueco} = \pi \cdot (r)^2 \tag{26}$$

$$A_{1hueco} = \pi \cdot (0{,}00635)^2 = 0{,}00012668\ m^2$$

Haciendo una división entre el área de los huecos y el área de un solo hueco, determinamos los huecos necesarios para completar ese 5 % del área de burbujeo:

$$\frac{A_{burbujeo}}{A_{1hueco}} = \frac{0{,}0440\ m^2}{0{,}00012668\ m^2} \approx 348\ huecos$$

Por medio de la tabla 2, se comprueba la concordancia todos los valores obtenidos con los detalles del plato según el artículo de Solari y Bell:

Tabla 2.

Comparación de los detalles del plano con el artículo base.

Porcentaje del área (sobre el área total)	Detalles del plato	
	Solari y Bell	Presente trabajo
Área de burbujeo	76	76,19
Área de los huecos	5	5,007
Área del segmento	12,5	11,90

Nota. La tabla evidencia la comparación de los detalles del plato por medio de diversas ecuaciones matemáticas.

5.1.6 Cálculo de las velocidades de entrada de los fluidos

Para determinar las velocidades de entrada de los fluidos, se seleccionaron dos parámetros del artículo base, derivados de las diversas comparaciones realizadas que realizan los autores para obtener una buena distribución de los fluidos: la carga de velocidad de vapor, con un valor

adimensional de 0,655, y un caudal volumétrico del líquido de 17,7x10^{-3} m^3/s. A partir de estos valores, y utilizando las ecuaciones correspondientes, se calcularon las velocidades superficiales necesarias. Dichas velocidades se emplearon como condiciones de entrada en el software para la simulación.

$$u_L = \frac{Q_L}{A} \tag{27}$$

$$u_G = \frac{F_s}{\sqrt{\rho_G}} \tag{28}$$

En el cual:

F_s, es la carga de velocidad de vapor $\left[\frac{m}{s}\left(\frac{kg}{m^3}\right)^{\frac{1}{2}}\right]$

Q_L, es el caudal volumétrico $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

A través de las ecuaciones 27 y 28, se obtuvieron los siguientes resultados con respecto a las velocidades superficiales:

$$u_L = \frac{0{,}0177\ \frac{m^3}{s}}{0{,}13221\ m^2} = 0{,}1339\ \frac{m}{s}$$

$$u_G = \frac{0{,}655\ \frac{m}{s}\left(\frac{kg}{m^3}\right)^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{1{,}225\ \frac{kg}{m^3}}} = 0{,}5918\ \frac{m}{s}$$

5.1.7 Cálculo de la altura teórica del líquido claro

Consecuentemente, para determinar la altura del líquido claro, se utilizó la correlación de Bennet et al. [23], la cual permite estimar este parámetro de manera precisa. Esta correlación ayuda a complementar los cálculos de simulación, proporcionando un valor inicial de referencia que facilita la comparación de resultados entre las simulaciones y los datos experimentales.

$$h_{c_t} = (1-\phi)\left[h_w + 15{,}33 C_B \left(\frac{q_L}{(1-\phi)}\right)^{\frac{2}{3}}\right] \tag{29}$$

$$C_B = 0{,}0327 + 0{,}0286 e^{(-137{,}7 h_w)} \tag{30}$$

$$\phi = e^{-12{,}55 F_c^{0{,}91}} \tag{31}$$

$$F_c = u_A \sqrt{\frac{\rho_G}{(\rho_L - \rho_G)}} \tag{32}$$

En el cual:

h_{c_t} , corresponde a la altura teórica del líquido claro [m]

h_w , es altura del vertedero de salida [m]

ϕ, corresponde a un parámetro escalar de fracción de volumen

F_c, es el factor de carga de gas basado en área activa $\left[\frac{m}{s}\right]$

u_A, es la velocidad del gas basado en área activa $\left[\frac{m}{s}\right]$

q_L, es la velocidad del gas basado en área activa $\left[\frac{m^3}{s \cdot m}\right]$

5.1.8 Cálculo de la altura de la simulación del líquido claro

En el caso de la altura del líquido claro por medio de la simulación, se determinó utilizando la altura de la espuma, obtenida a partir de los datos generados por la simulación. Específicamente, dicha altura se estimó mediante la evaluación de las coordenadas o mediante una observación visual directa de los resultados. Además, se tomó como referencia el parámetro escalar de fracción de volumen establecido previamente mediante la ecuación 31.

$$\phi = \frac{h_{c_s}}{h_f} \tag{33}$$

En el cual:

h_{c_s} , es la altura del líquido claro de la simulación [m]

h_{c_s} , es la altura del líquido claro de la simulación [m]

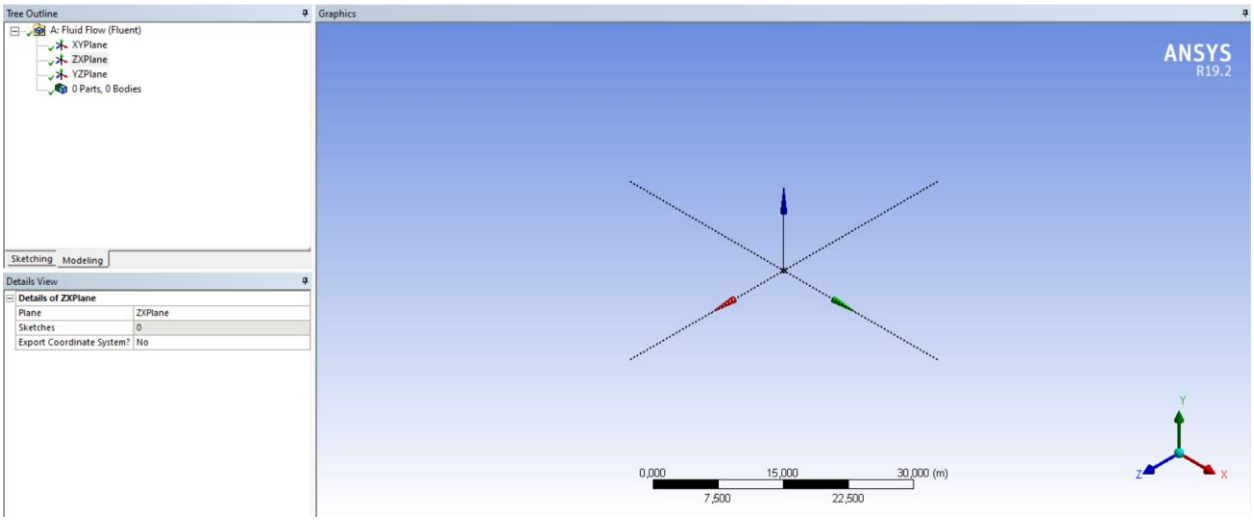
5.2 Creación de geometría

La creación de la geometría se generó a partir de los datos del plato conocidos anteriormente por Solari y Bell. Es relevante crear una geometría bien establecida para garantizar una simulación sin errores, ya que cualquier mínimo error podría interferir en el sistema tanto en el proceso de mallado como en la configuración posterior. Por tanto, el diseño geométrico debe cumplir con las especificaciones requeridas para representar con precisión el sistema bifásico establecido.

Durante el modelado de la geometría, se utilizó DesignModeler para crear un plato perforado y sus componentes asociados. Se inició definiendo un boceto base en el plano ZX (figura 9), donde se dibujó y dimensionó un círculo de 1,213 m de diámetro. Este fue extruido a un espesor de 5 mm para formar el plato principal como se puede observar en la figura 10.

Figura 9.

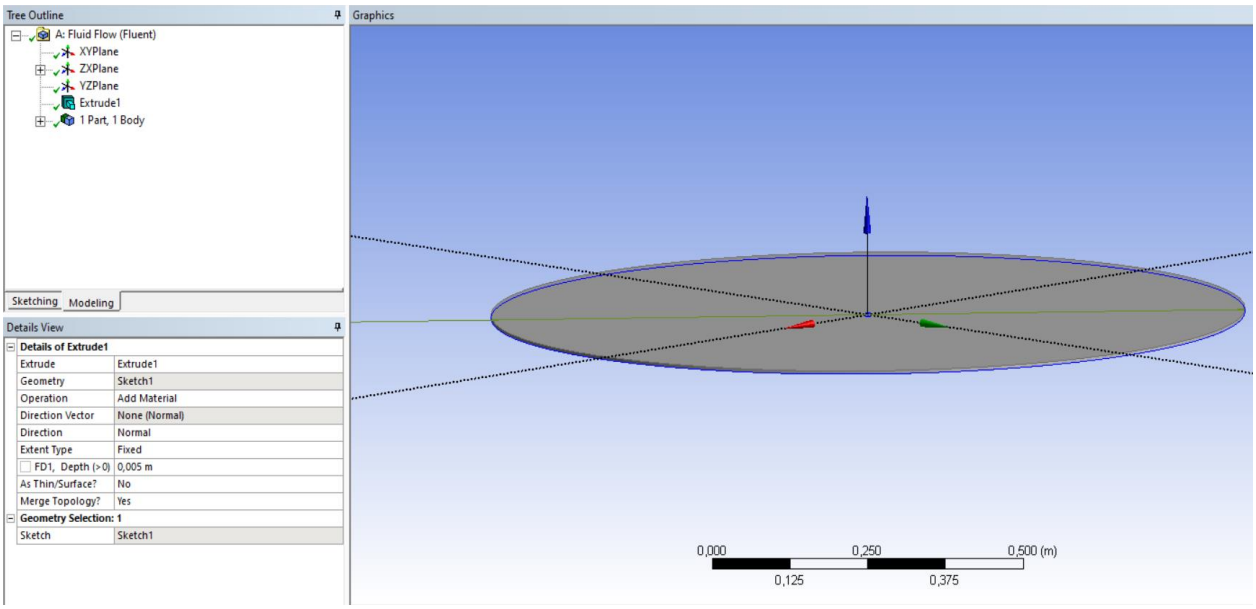
Interfaz de DesignModeler en el plano ZX.



Nota. La figura hace referencia al inicio de la aplicación de Designmodeler en vista 3D, el cual se utiliza en un plano ZX.

Figura 10.

Extrude del círculo con el diámetro establecido.

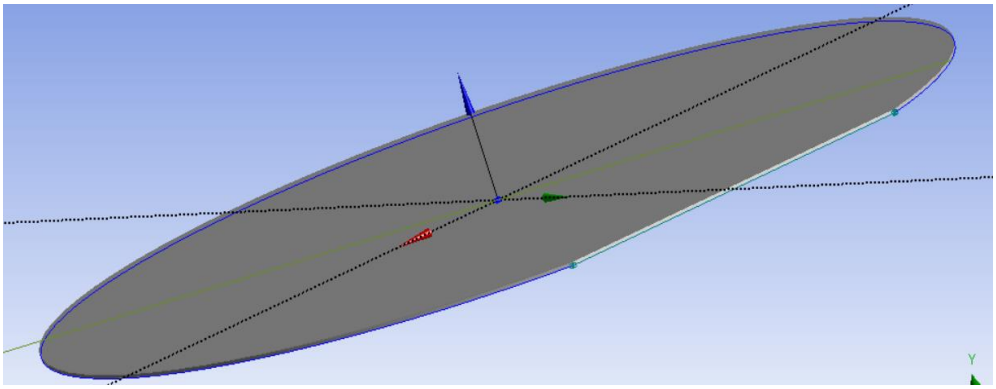


Nota. Se denota a partir de la figura la generación de la base de un círculo para el plato perforado.

Posteriormente, se añadieron planos adicionales para modelar el vertedero y otras zonas clave, ajustando posiciones y dimensiones según las especificaciones del diseño. Mediante herramientas como Trim (Recortar) y Extrude (Extruir), se perfeccionaron las formas y se generaron las estructuras requeridas, como el vertedero y la diferenciación entre la zona receptora y el área de burbujeo como se puede observar en la figura 11 y 12.

Figura 11.

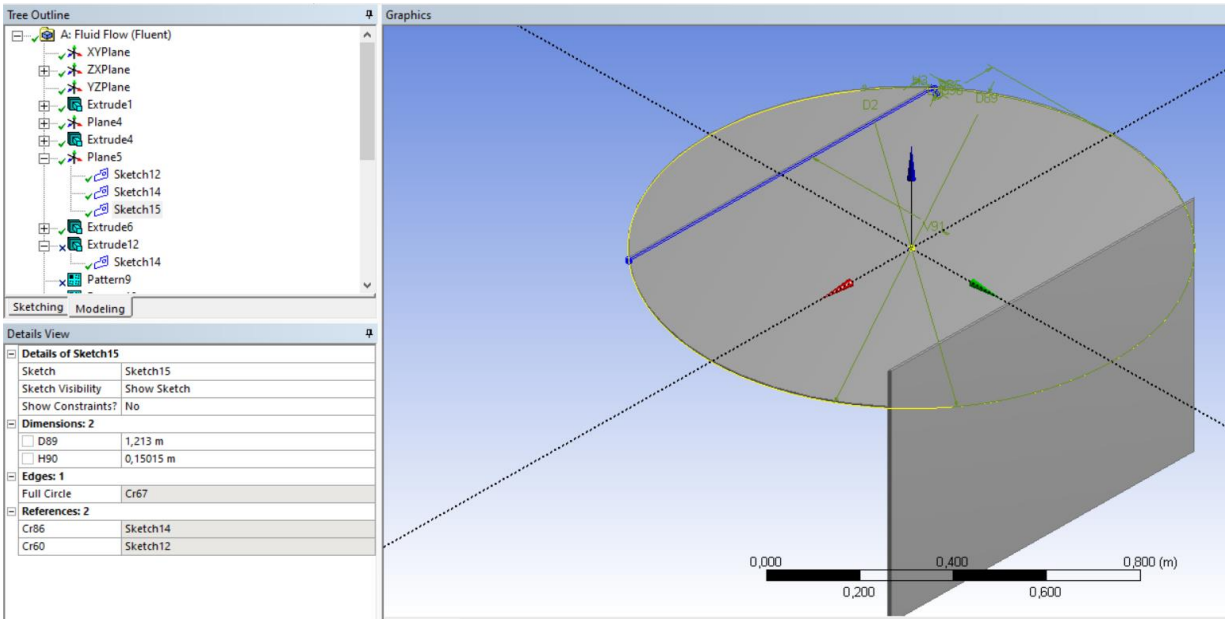
Vista de corte de la línea.



Nota. Realización del corte para la parte del vertedero en el plato perforado.

Figura 12.

Construcción del vertedero y zona receptora.

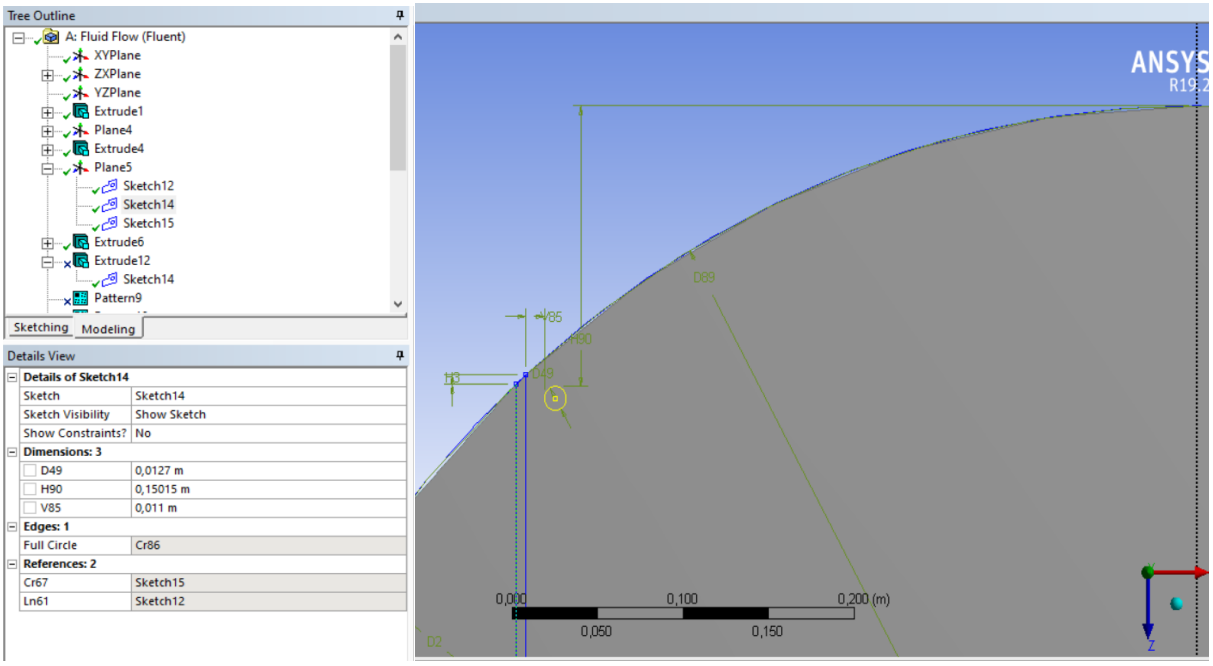


Nota. Obtención de la zona de vertedero y división para la parte receptora del plato perforado mediante herramientas de DesignModeler.

Posteriormente, se añadió un nuevo sketch para los agujeros del plato perforado. En este sketch, se dibujó un círculo con un diámetro de 0,0127 m. Luego, se midió la distancia entre este círculo y la zona receptora definida previamente. Para generar los agujeros, se utilizó la herramienta Extrude (extrusión), configurando la operación en Add Frozen (añadir como sólido independiente) y estableciendo un valor FD1 de 0,05 m. La dirección de la extrusión se definió como Both-Symmetric para garantizar un corte uniforme en ambos lados.

Figura 13.

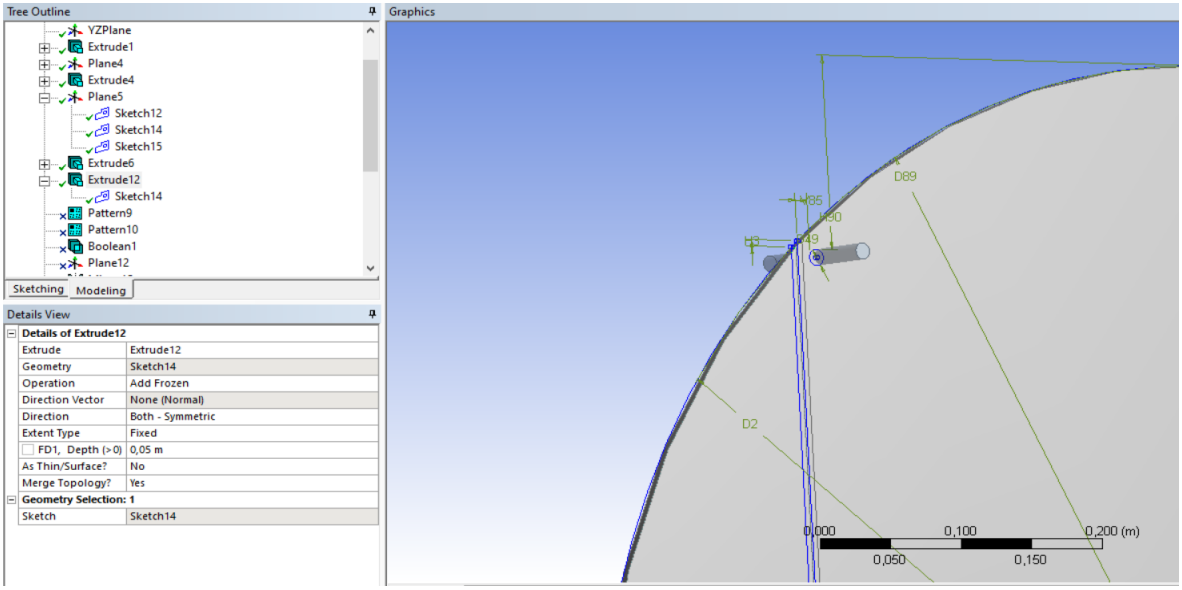
Creación y configuración del sketch para un hueco.



Nota. La figura muestra la configuración en el cual se efectuó el boceto o sketch de un hueco mediante herramientas de distancia.

Figura 14.

Generación del extrude en el hueco.

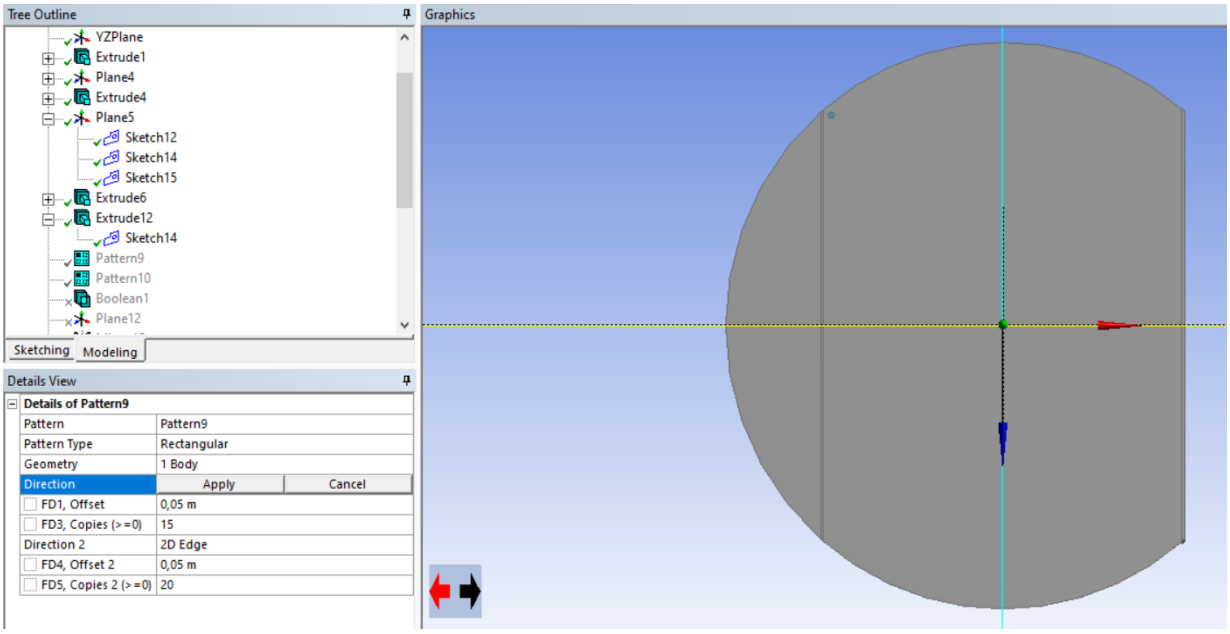


Nota. Resultado de la configuración de extrusión para un hueco para su posterior corte.

Con la función de crear patrón, se realizó una réplica en forma rectangular de los huecos u orificios según las especificaciones del diseño como se puede identificar en la figura 15. Se generaron un total de 336 elementos en el patrón inicial. Sin embargo, algunos agujeros quedaron fuera del área deseada, por lo que se eliminaron o suprimieron los cuerpos, dejando un total de 326 agujeros. Posteriormente, se generó un nuevo patrón (figura 16) para completar los agujeros necesarios, ajustando las direcciones y parámetros para garantizar la correcta distribución y eliminando nuevamente los elementos sobrantes, hasta obtener un total de 348 agujeros correctamente alineados.

Figura 15.

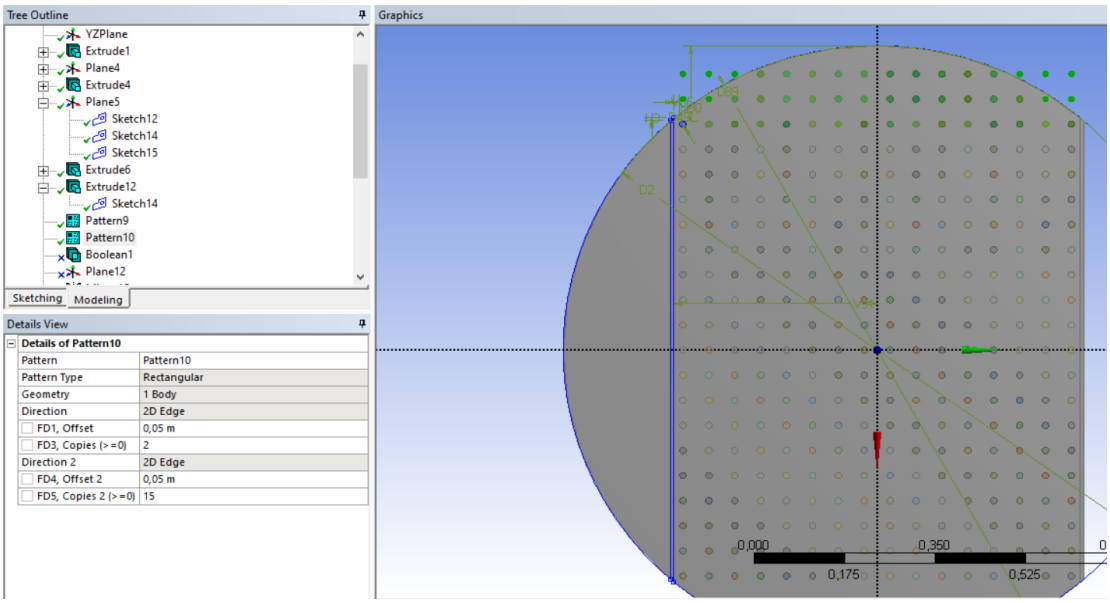
Primera función de patrón.



Nota. La figura presenta la configuración de la opción de patrón, donde se resalta la primera parte de construcción de los huecos.

Figura 16.

Segunda función de patrón.

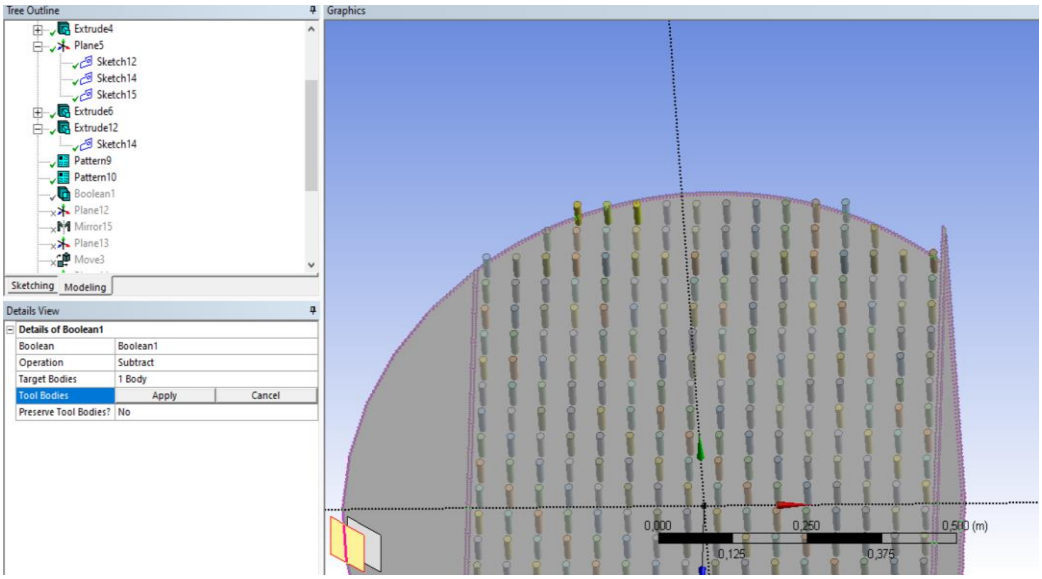


Nota. Se presenta la continuación de la segunda forma de patrón para la finalización de los huecos necesarios del plato perforado.

Finalmente, se utilizó la herramienta Boolean (Booleana) para realizar la operación de sustracción, seleccionando todos los elementos creados en los patrones y eliminando las áreas correspondientes de la geometría base, garantizando la creación precisa de los huecos en el plato perforado observado en la figura 18.

Figura 17.

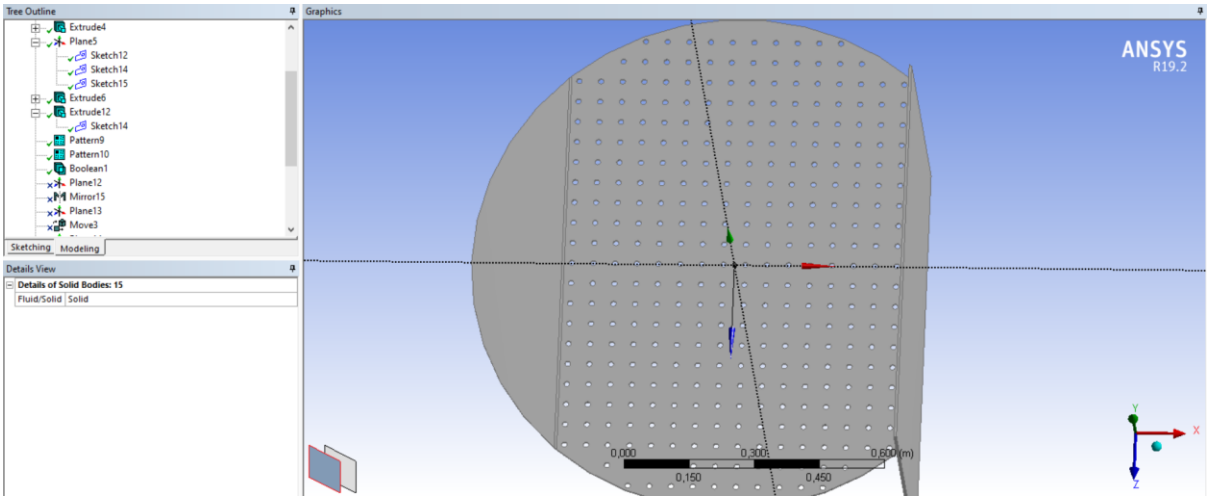
Elementos de patrón en el plato perforado.



Nota. Finalización de todos los elementos de patrón, eliminando los elementos restantes que se encontraban fuera del límite.

Figura 18.

Perforación del plato.

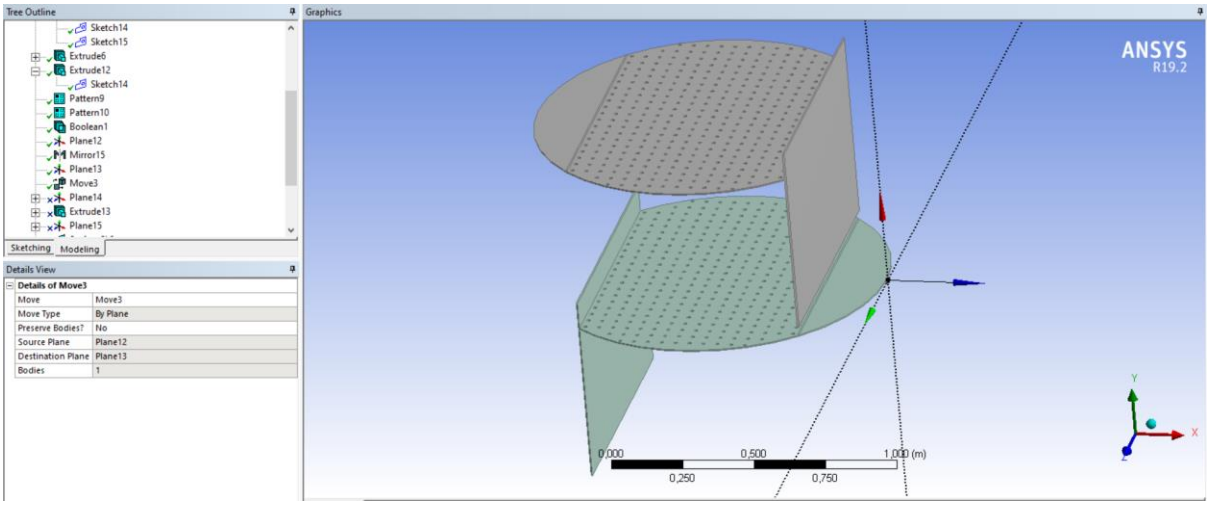


Nota. La figura presenta la realización de los cortes o agujeros correspondientes al plato perforado.

Una vez terminado el primer plato, se procedió a crear otro a partir del primero. Para ello, se definió un nuevo plano denominado Plano 12, con un valor de -0,62 m, que permitió posicionarlo correctamente para la operación de reflejo. Se utilizó la herramienta de espejo y se seleccionó el plano, obteniendo una copia reflejada del primer plato, siendo así, el segundo plato de manera simétrica.

Figura 19.

Generación de la función Move.

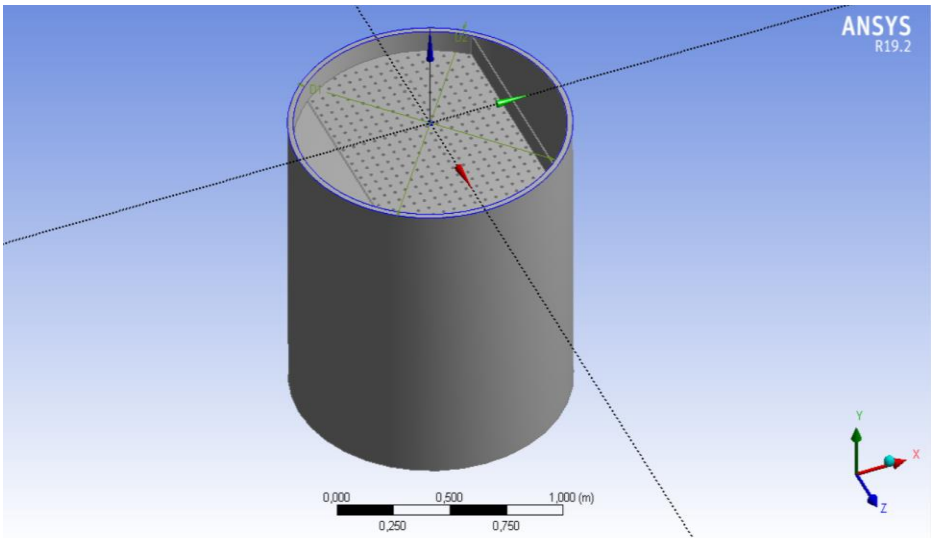


Nota. Por medio de la figura se evidencia la representación del segundo plato perforado por medio de la herramienta de movimiento en DesignModeler.

Consecuentemente, se procedió a crear la cubierta para los platos perforados. Para ello, se seleccionó un nuevo plano donde se añadió un nuevo boceto o sketch, en el cual, se dibujaron dos círculos con diámetros de 1,213 m y 1,263 m respectivamente. Por último, se generó la geometría de la cubierta a partir de este sketch configurando el valor que define la profundidad de la extrusión como 1,344 m para contornear completamente los platos con la nueva cubierta, como se puede identificar en la figura 20:

Figura 20.

Generación del Extrude de los dos círculos.



Nota. Generación de la carcasa que rige los dos platos perforados.

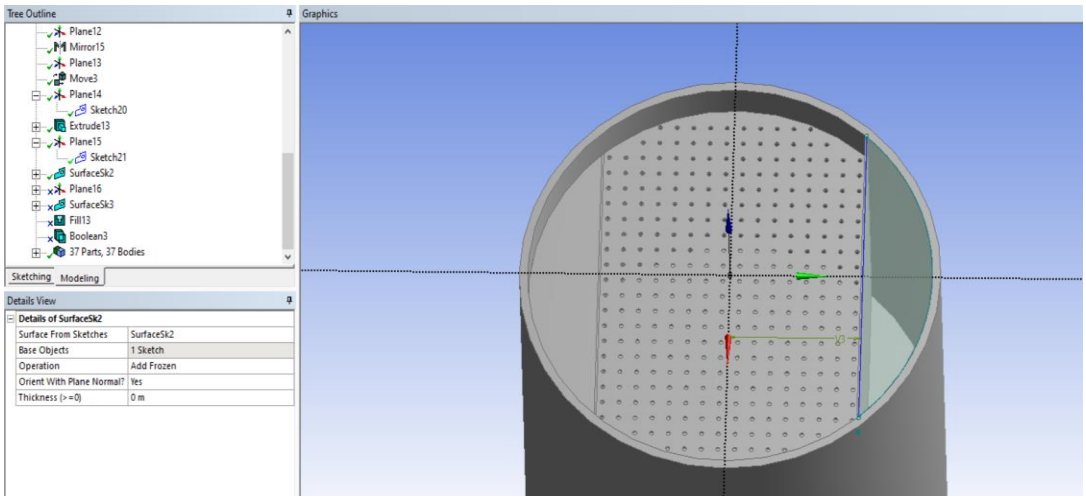
Para el apartado del ingreso del líquido al sistema, se crearon dos tapas utilizando un nuevo plano basado en el plano 4 previamente empleado para el vertedero. Siendo necesario, un nuevo boceto en el que se dibujó un círculo con un diámetro de 1,213 m para definir la forma de la tapa con respecto al plato perforado.

Con respecto a lo anterior, se dibujó una línea sobresaliente del círculo, siguiendo la forma indicada en el diseño se eliminó la parte sobrante, dejando únicamente la geometría necesaria para la entrada del líquido. Posteriormente, se alinearon la línea vertical del círculo y la línea previamente dibujada, asignando un valor de 0,39735 m para posicionar la tapa con precisión.

Finalmente, por medio de la función de superficies desde bocetos (Surfaces From Sketches) se obtuvo la superficie de las tapas correctamente definida y alineada con el diseño establecido como es notablemente visible en la figura 22 y figura 23 sin la visibilidad de la carcasa.

Figura 21.

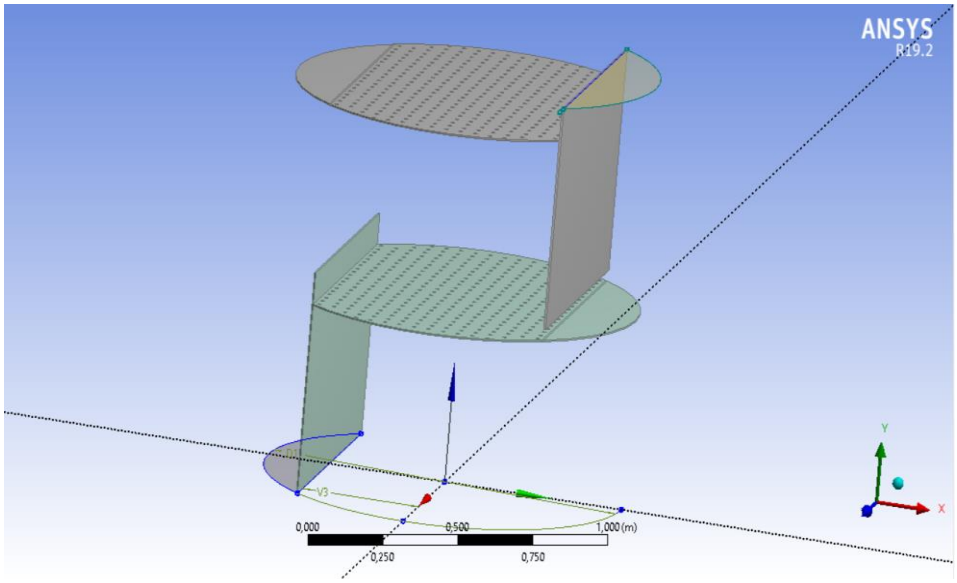
Vista de la función Surfaces From Sketches.



Nota. A través de la figura se evidencia la creación de regiones sombreadas donde se identifica la región del vertedero

Figura 22.

Vista de los platos sin la carcasa.



Nota. Vista de las zonas especificas desde bocetos sin la visualización de la carcasa.

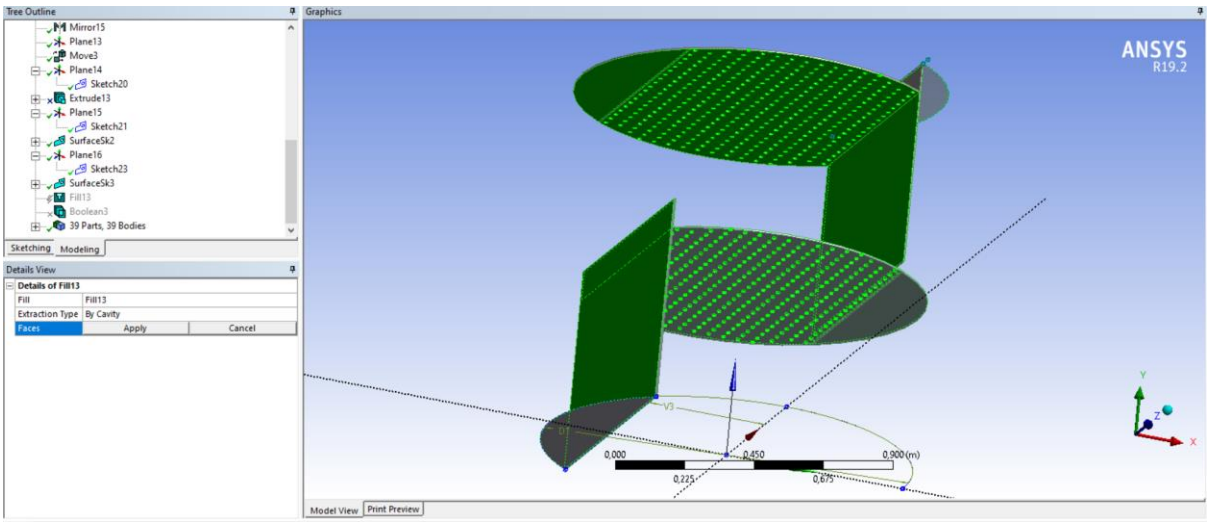
Para generar el dominio interno entre los componentes, donde se va a realizar la simulación, se utilizó la función Fill (relleno) mediante la opción By Cavity (Por cavidad), en donde, se seleccionaron un total de 708 elementos, que incluyeron:

- El total de huecos del plato superior e inferior.
- La parte inferior del plato superior y la parte superior del plato inferior.
- Las tapas de entrada y salida del líquido.
- La sección del vertedero conectada a las tapas y a los platos superior e inferior.

Tras aplicar la función de relleno, se utilizó la herramienta Boolean (booleana) para unificar las 4 regiones en una sola pieza. Se seleccionaron las partes del relleno de dominio y se determinó la geometría combinada para la posterior configuración de mallado.

Figura 23.

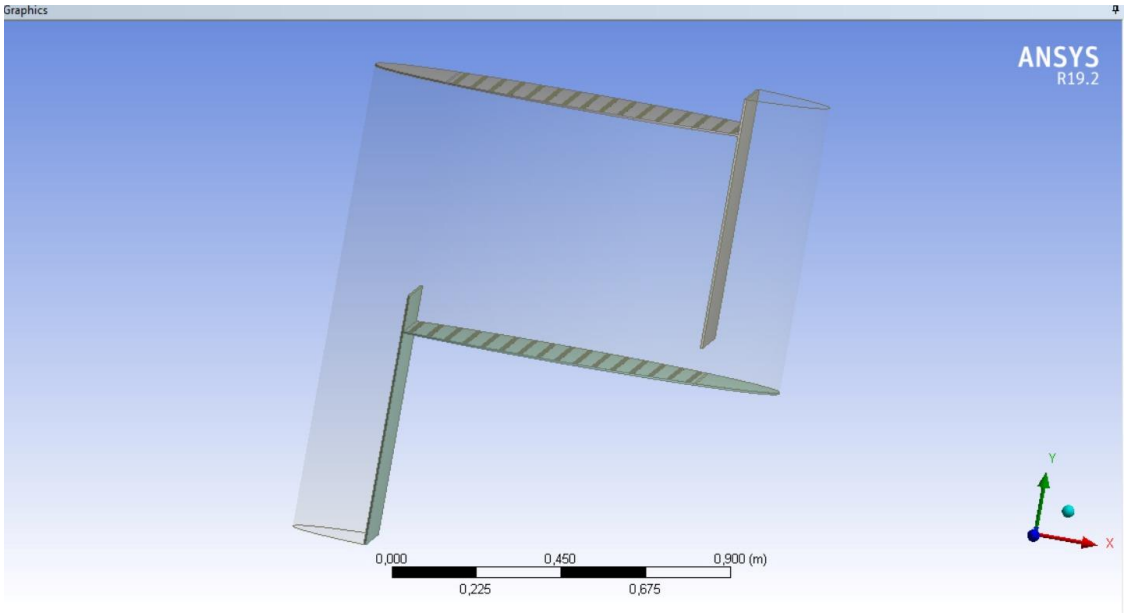
Selección de zonas con la función Fill.



Nota. Esta figura representa las zonas seleccionadas para crear la opción de llenado del dominio en la geometría.

Figura 24.

Generación limpia del dominio.



Nota. Generación del dominio a partir de las zonas seleccionadas.

Como último paso, se ocultaron las tapas generadas previamente para facilitar la visualización del modelo y se procedió a realizar un nuevo extrude (extrusión) de la carcasa. En esta operación, se cambió la configuración a Add Frozen (agregar congelado), asegurando que la carcasa se integrara correctamente al modelo sin fusionarse con las otras partes de la geometría.

5.3 Generación del mallado (mesh)

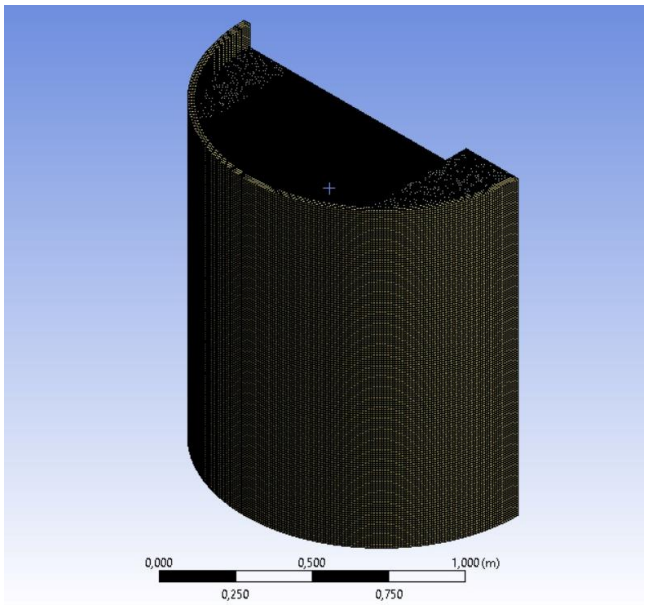
El proceso de generación de mallado consiste en la división del dominio continuo, es decir, la geometría que se está simulando, en pequeñas celdas o elementos finitos, en la cual su subdivisión permite resolver numéricamente las ecuaciones complejas que rigen el comportamiento de los fluidos de la estructura en cada una de estas celdas, ayudando a un análisis más preciso, enfático y detallado del sistema.

Para la configuración del mallado, se dirigió a la interfaz del apartado Mesh (malla) y, dentro del panel Outline (esquema), se seleccionó la opción Mesh, donde se estableció un tamaño de elemento deseado de 0,009 m (9 mm) y 0,006 m (6 mm). De esta manera, se determinó la

resolución del mallado, y, finalmente se generó dando como resultado la figura 25 como se muestra a continuación:

Figura 25.

Generación de mesh.

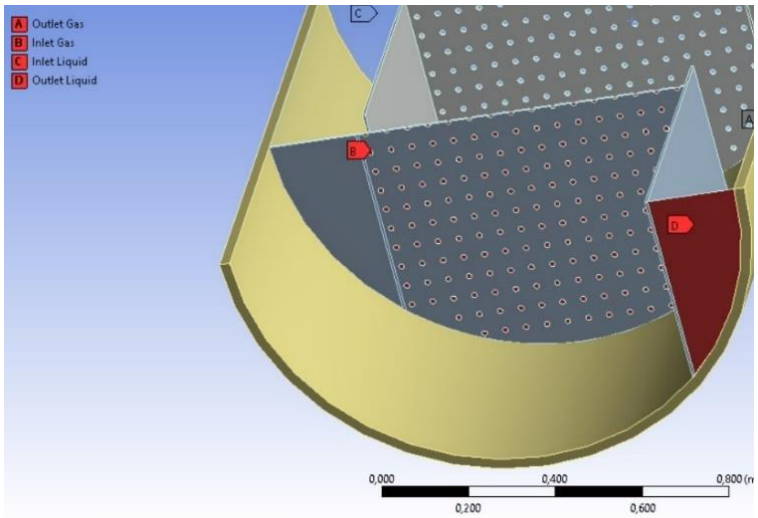


Nota. Esta figura representa la obtención del mallado por medio de toda la geometría y dominio.

Posteriormente, se seleccionaron las regiones de entrada y salida del líquido y gas mediante la opción Create Named Selection (crear selección nombrada), lo que permitió asignar nombres específicos a estas áreas. Como resultado, en la figura 26 se muestra que las zonas resaltadas en rojo corresponden a las áreas seleccionadas.

Figura 26.

Selección de las entradas y salidas de los fluidos.

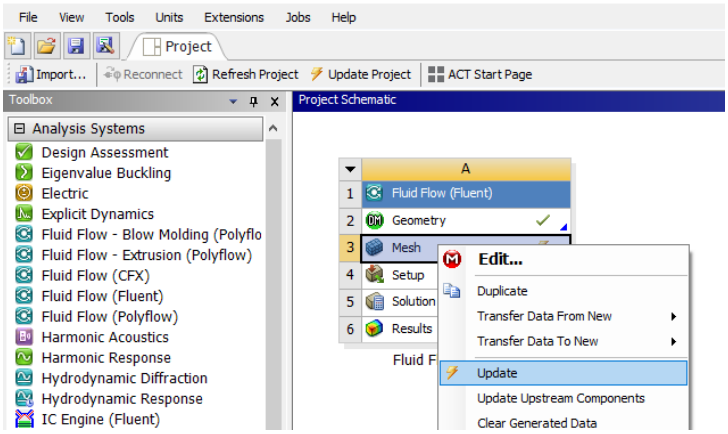


Nota. Esta figura denota la selección de las zonas de entrada y salida de los diversos elementos de los fluidos.

Una vez terminado el proceso de mallado, para finalizar el proceso, se seleccionó la opción Update (actualizar), lo cual aseguró que todos los cambios realizados se aplicaran correctamente y que la geometría estuviera lista para la simulación.

Figura 27.

Interfaz del Workbench para actualizar mesh.



Nota. Se representa la opción de actualizar para que el mallado se integre en la aplicación de workbench.

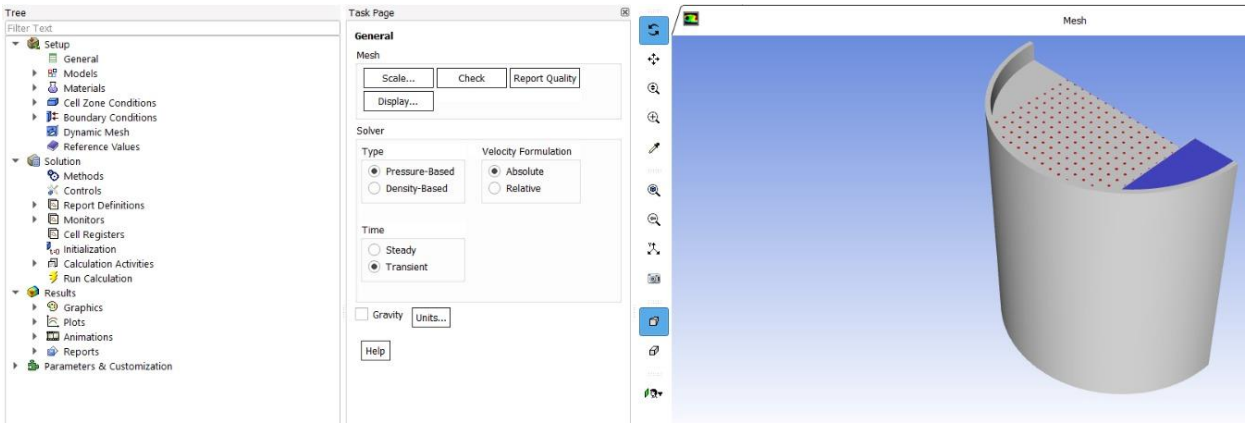
5.4 Configuración del Setup

La configuración del setup (parámetros) es el proceso más relevante en la simulación, donde se establecen los parámetros necesarios para definir el comportamiento del modelo. Durante esta etapa, se pueden activar o desactivar ecuaciones y métodos especializados que permiten representar diversos mecanismos físicos, como la transferencia de calor, la interacción multifásica y la viscosidad de los fluidos, siendo necesaria una correcta configuración de estos parámetros para el análisis numérico.

Primeramente, para la configuración, en la parte izquierda de la interfaz del software, dentro de la sección Tree (árbol), se drigió a la sección general del setup. Luego, dentro de esta sección, se localizó el Time (tiempo) y se realizó un cambio del modelo a Transient (Transitorio), donde, se determinó la fase primaria para el agua líquida y la secundaria para el gas con un diámetro de partícula de 0,005 m. A continuación, en la sección Models (modelos), se habilitó y configuró el mecanismo Multifase (Multiphase) del modelo Euleriano, posteriormente, se habilitó la ecuación de energía y viscosidad en términos laminares. Con esto, se administró el modelo para simular el flujo multifásico utilizando la formulación de Euler, además de considerar la transferencia de energía y el comportamiento viscoso bajo condiciones laminares.

Figura 28.

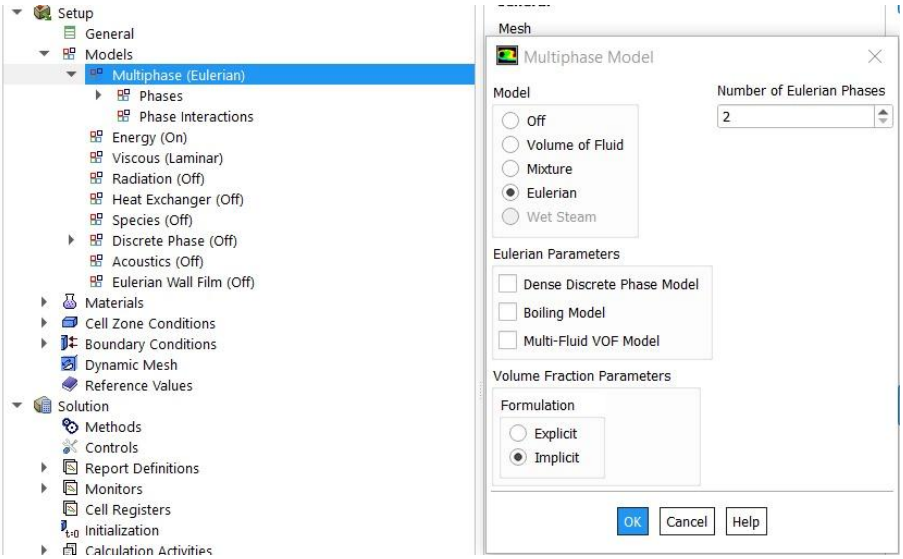
Interfaz de inicio del Setup.



Nota. A través de la figura se evidencia las distintas opciones, modelos y características que se pueden seleccionar en el procedimiento a realizar, asimismo, se muestra la entrada y salida de los fluidos en su geometría.

Figura 29.

Configuración en multifase.



Nota. Se identifica la configuración del modelo multifase en la opción euleriana.

Se procede a asignar como fluido el agua líquida, para esto, se creó un nuevo material en el apartado de Fluids (fluidos). Luego, en la ventana de Fluent Database (base de datos Fluent), se seleccionó el fluido y se aplicaron sus propiedades mediante la opción Change/Create (cambiar/crear). Finalmente, se eliminó el material predeterminado, denominado como Fluid-1 y la Mesh Interfaces (interfaces de malla) que la aplicación de Ansys Fluent generó por defecto.

Por otro lado, en el apartado de Boundary Conditions (condiciones de frontera), se realizaron los siguientes cambios:

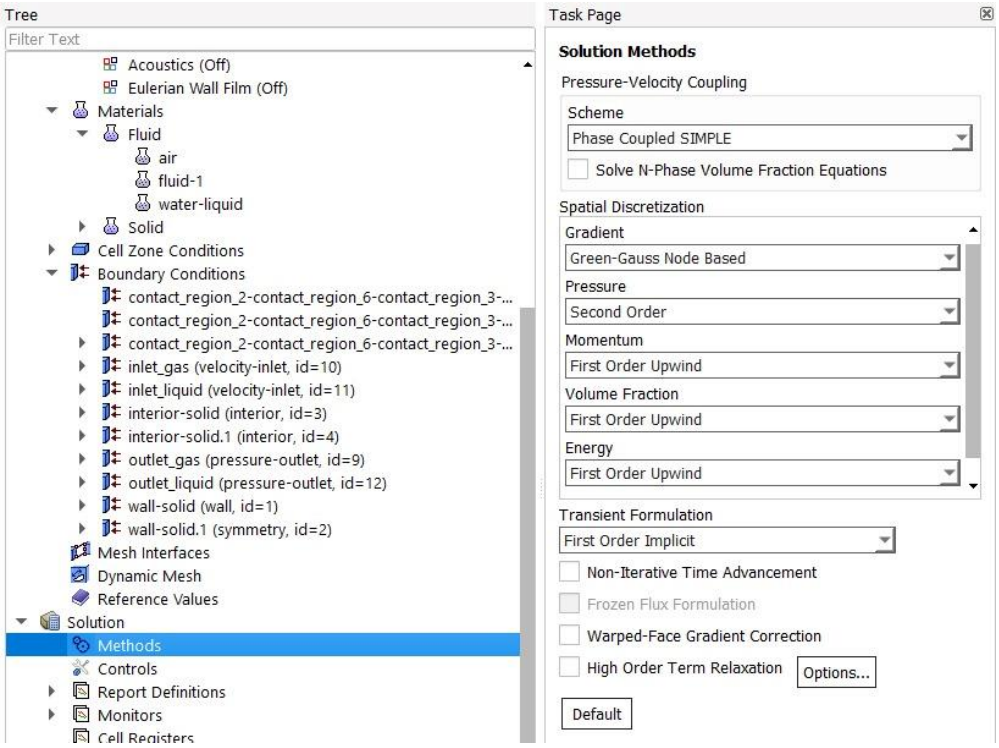
1. Contact: Se cambió el tipo de elemento a Wall (Pared).
2. Wall-Solid.1: Se cambió el tipo a Symmetry (Simetría).
3. Intel_Gas e Intel_Liquid: Se configuraron como Velocity Inlet (Entrada de velocidad).
4. Outlet_Gas y Outlet_Liquid: Se configuraron como Pressure Outlet (Salida de presión).

En el mismo apartado de frontera, para la entrada de los fluidos se asignaron su fase correspondiente y su respectiva velocidad calculada previamente mediante los datos del articulo base de Solari y Bell: 0,1339 m/s para el líquido y 0,5918 m/s para el gas.

Finalmente, en el Tree, se accedió a la opción de Methods (Métodos) dentro de la solución, donde se configuraron los parámetros para la resolución de la simulación a partir de configuraciones de esquema, discretización espacial (proceso de división en cuadrículas) y la formulación transitoria como se puede observar en la figura 30:

Figura 30.

Configuración de métodos de solución.



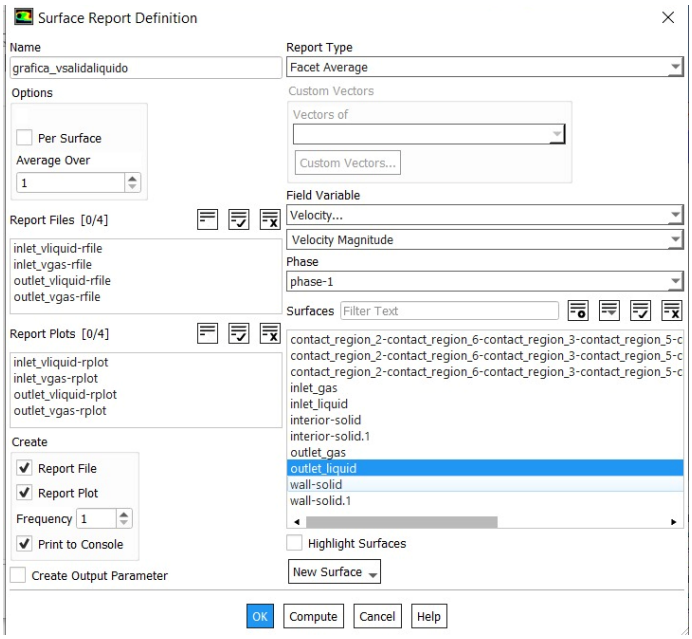
Nota. La figura muestra las opciones de discretización espacial y de configuración de los diversos parámetros de solución.

En el apartado de solución, se accedió a la sección de Report Definitions para configurar reportes relacionados con las superficies de entrada y salida de los fluidos. Se creó un nuevo reporte seleccionando la opción Surface Report (reporte de superficie) y el método Facet Average

(promedio por faceta). Se definió como variable principal la velocidad para analizar el comportamiento del fluido en las superficies establecidas. Para cada fluido, se seleccionó la fase correspondiente, definiendo si se trataba de una superficie de entrada o salida como se muestra en la siguiente figura:

Figura 31.

Vista de Surface report definition

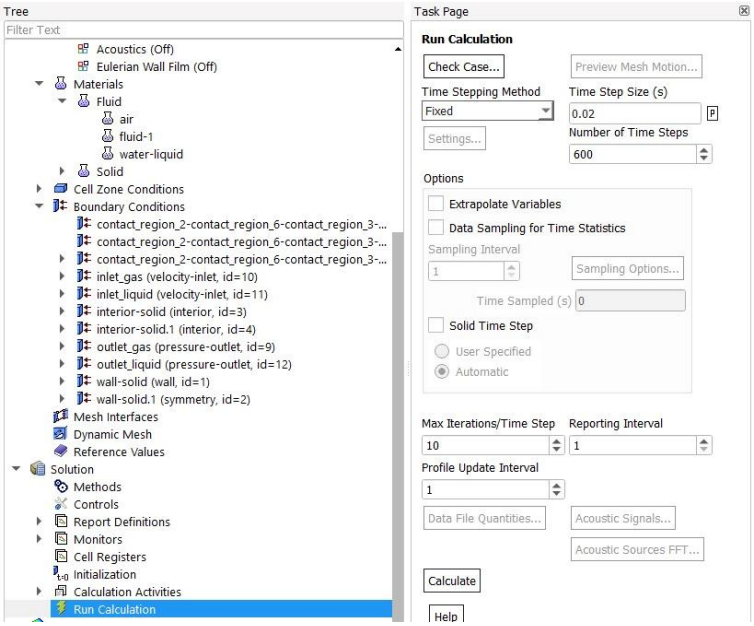


Nota. Por medio de la figura se identifica la configuración para la generación de las gráficas de velocidad promedio.

En el apartado Solution, se ingresó a la sección Initialization (inicialización), donde se estableció el método Hybrid Initialization (inicialización híbrida), que combina las ventajas de la inicialización estándar y el método de solución. Tras completar la inicialización, en el apartado Run Calculation (ejecución del cálculo), se configuró la simulación variando las iteraciones y los segundos de tiempo simulados con el paso del tiempo.

Figura 32.

Vista de simulación de cálculos.



Nota. La figura muestra la configuración del paso del tiempo para la simulación y el número de iteraciones que son necesarias para el reporte de intervalos.

Finalmente, en el apartado de resultados, se analizaron los datos generados mediante gráficas de contorno de fracción de volumen y otras herramientas como la animación para visualizar y evaluar los resultados obtenidos.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

6.1 Generación de geometría (esquema detallado)

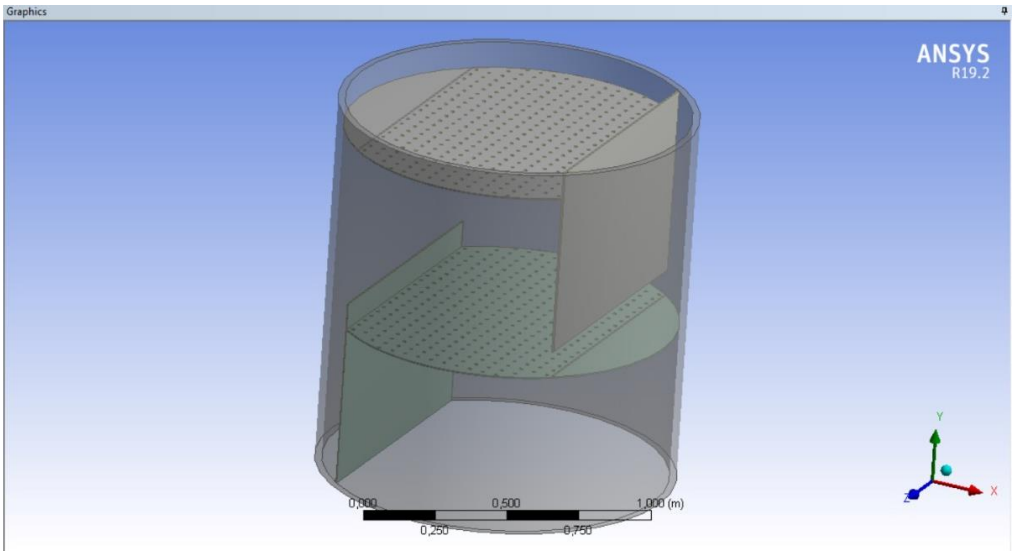
La creación de la geometría y la definición del dominio por donde fluyen los fluidos (siendo el líquido el que ingresa desde el canal de bajada del plato superior, mientras que el vapor por medio de los orificios) que se van a simular se realiza mediante diversos bocetos, planos y diseños estructurales en la aplicación DesignModeler de Ansys Fluent. Este proceso se constituyó con el uso de funciones avanzadas como lo es extrude (extruir), fill (rellenar), trim (recortar), entre otras herramientas de modelado para garantizar un diseño preciso y funcional. Como se puede observar en la figura 33, se generó un dominio completamente transparente (limpio), lo cual es esencial, ya que cualquier tipo de intercalado o superposición en las superficies afectaría negativamente la solución a presentar en la simulación y en el mallado.

El esquema resultante corresponde a una geometría basada en los detalles del plato perforado proporcionados por el artículo de Solari y Bell [6]. La geometría consta de dos platos perforados, cada uno con 348 huecos u orificios, que están compactos dentro de una carcasa. Asimismo, se incluyen los vertederos y las zonas receptoras, elementos relevantes en el diseño de la torre de destilación. El dominio definido es esencial para representar el flujo de los fluidos dentro del sistema, asegurando que el comportamiento hidrodinámico sea procesado con precisión, en el cual se considera las interacciones entre el flujo de gas y líquido, así como las características físicas de los elementos estructurales: los orificios en los platos, las áreas de contacto entre las fases y las trayectorias del flujo. Por lo tanto, el dominio no solo delimita las regiones por donde los fluidos deben transitar, sino que también garantiza que los gradientes de presión, velocidad y demás parámetros sean calculados con exactitud en cada etapa de la simulación.

Este diseño integral y detallado permitió asegurar que la simulación represente fielmente las condiciones experimentales, logrando una comparación confiable con los resultados obtenidos por Solari y Bell y de las investigaciones que se han realizado por CFD para el sistema.

Figura 33.

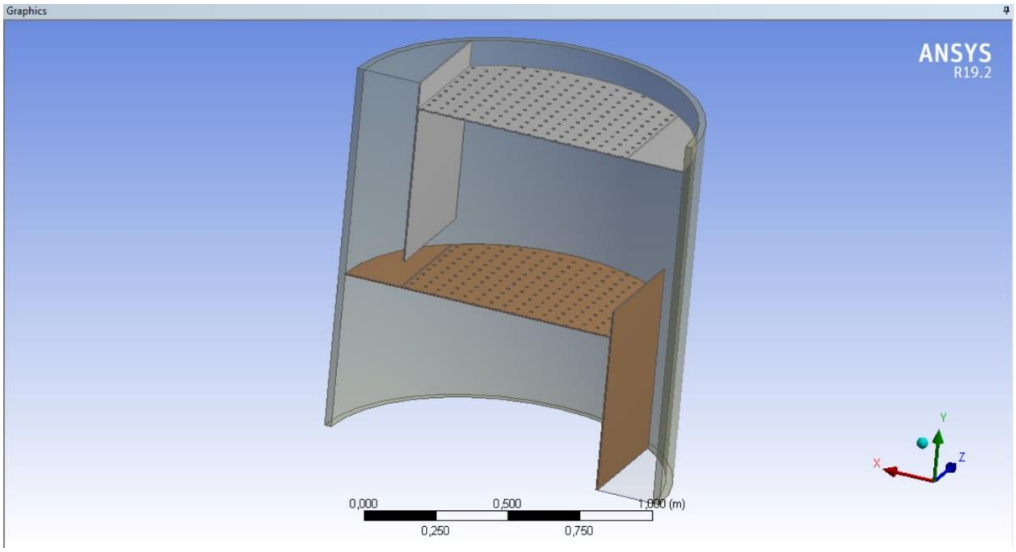
Geometría completa de dos platos perforados.



Nota. Por medio de la figura se observa la geometría completa de los dos platos perforados.

Figura 34.

Vista de la simetría en el dominio y geometría.



Nota. La figura muestra la función de simetría, en el cual se puede observar el corte del dominio y de la geometría creada.

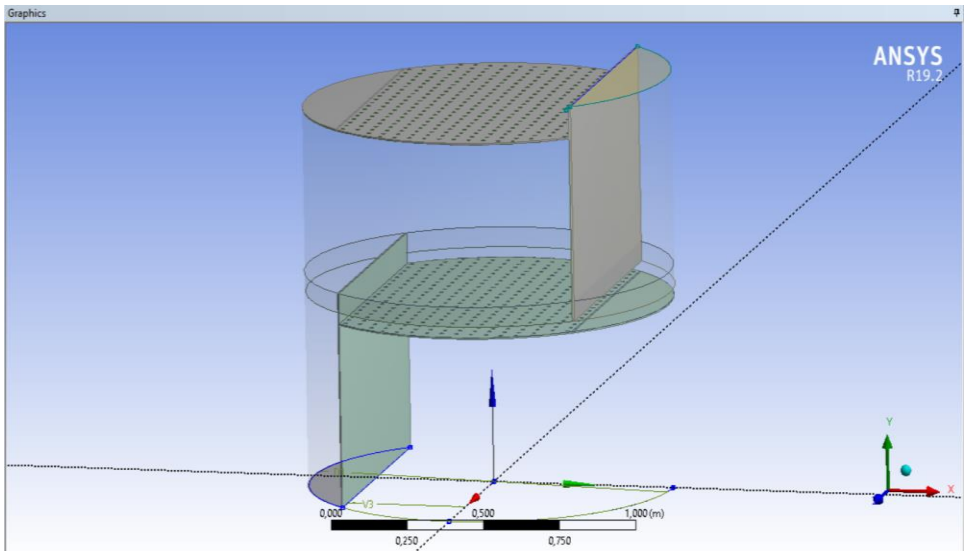
Como se muestra en la figura, se aplicó una simetría en la geometría del dominio para reducir los costos computacionales asociados al modelado completo del plato perforado. Esta estrategia permite simular el comportamiento hidrodinámico del sistema al conservar las características físicas y operativas del plato, pero optimizando los recursos necesarios para el análisis.

Durante la creación de la geometría, se presentaron ciertas limitaciones que afectaron el desarrollo inicial del modelo. En un principio, los huecos de los platos perforados se generaron utilizando una función de corte o perforación. Sin embargo, este método resultó problemático al intentar generar la malla, ya que las superficies creadas con dicha función quedaban incompletas, generando inconsistencias en el dominio y errores durante el proceso de mallado. Para solucionar este problema, se implementó mediante el uso de la opción Add Frozen (añadir como sólido independiente) en la etapa de modelado y, posteriormente, se aplicó una operación booleana con la herramienta Subtract (restar) para obtener el resultado final perforado. Este enfoque permitió generar una geometría limpia y bien definida, asegurando que la geometría no presentara errores ni superficies problemáticas que pudieran afectar la solución de la simulación.

Por otro lado, inicialmente se generaron intersecciones o entrelazados en el dominio como se observa en la figura 35, el cual pueden afectar significativamente el sistema, debido a que representaron inconsistencias en la representación geométrica que interfieron con el mallado y, especialmente, en la configuración de los métodos de control o en la resolución numérica del modelo, alterando la continuidad entre los componentes y afectando la precisión de los resultados simulados.

Figura 35.

Intersecciones provenientes en el dominio.



Nota. A través de la figura se puede identificar diversas intersecciones por parte del dominio, específicamente en la parte superior del rebosadero.

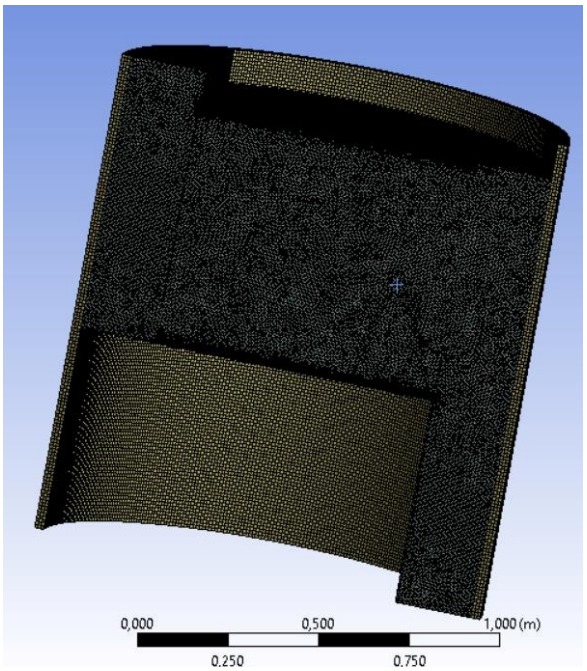
6.1.1 Construcción del mallado

La generación de la malla para la simulación se realizó con un tamaño ajustado de 0.009 m (9 mm) y 0,006 m (6 mm), lo que permitió definir una resolución adecuada para la malla. Estos tamaños tienen un impacto directo en la precisión de los resultados y en el tiempo computacional requerido para completar la simulación. En términos estadísticos, la malla generada alcanzó un total de 1039037 nodos y 4533072 elementos, en el cual se refleja un nivel de detalle adecuado para representar correctamente el dominio y capturar los fenómenos físicos relevantes en la simulación.

La figura 36 muestra la construcción de la malla a partir de la geometría y del dominio definidos para la simulación. En la figura, también se puede observar claramente la implementación de la simetría establecida, lo cual optimiza los recursos computacionales al modelar solo una sección representativa del sistema.

Figura 36.

Simetría en el proceso de mallado.



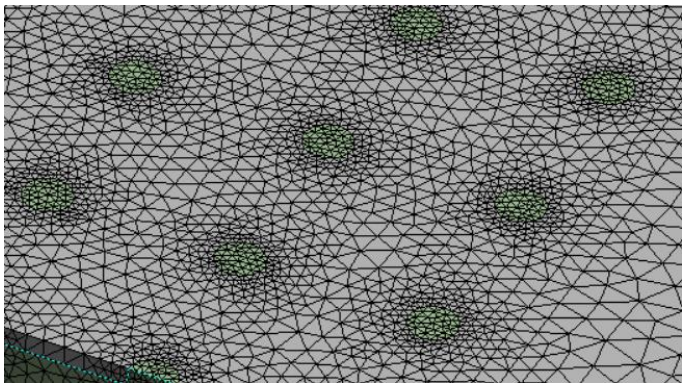
Nota. La figura denota el mallado en todo el apartado de la geometría y el dominio.

Si se genera una malla demasiado fina (por ejemplo, con un tamaño de 0,001 m), el proceso puede tardar un tiempo considerable dependiendo de los recursos del equipo en el que se esté generando. Esto se debe a que una malla de este tipo podría generar hasta 57 millones de elementos y 9 millones de nodos, lo que incrementa significativamente el tiempo de cálculo y la demanda computacional. Se recomienda ajustar el tamaño de la malla de acuerdo con las capacidades del sistema para evitar tiempos de procesamiento excesivos.

Al acercarse a la región de los orificios en los platos perforados, se puede identificar que la malla es notablemente más fina en estas áreas, logrando que la densidad de los elementos aumente, permitiendo una mayor compactación. Esto es relevante, ya que estas zonas presentan gradientes más pronunciados de velocidad, presión y flujo, requiriendo un mayor nivel de detalle en el mallado para garantizar una representación precisa de los fenómenos físicos.

Figura 37.

Mallado en los huecos u orificios.



Nota. La figura muestra la densidad del mallado en la parte de los huecos, donde es relativamente mayor con respecto al general.

La longitud mínima de borde del mallado fue configurada en 5,7e-003 m, garantizando una definición precisa en las regiones críticas. Para evaluar y mejorar la calidad del mallado, se configuró un sesgo objetivo predeterminado de 0,900000, y la suavización se estableció como "Media" (nivel intermedio de ajuste de la calidad). Esto asegura que las transiciones entre elementos sean suaves, minimizando deformaciones y errores, en cuanto a las características específicas del mallado se conservan las siguientes:

- **Inflación**: Se seleccionó la opción de "Transición Suave" (*Smooth Transition*), con una relación de transición configurada en 0,272. Este ajuste asegura que las capas de la malla en las cercanías de las superficies tengan un crecimiento gradual, lo que es crítico para capturar los gradientes en las regiones cercanas a las paredes.

- **Capas de inflación**: Se estableció un máximo de 5 capas, con una tasa de crecimiento de 1,2. El algoritmo de inflación utilizado fue "Pre" (Pre-Inflation), que permite generar la malla inflada antes de completar el mallado general, optimizando la calidad en zonas de contacto fluido-superficie.

Además, los elementos de lado recto fueron configurados como "Reducidos Dimensionalmente" (Reduced Dimensionality), lo que mejora el manejo computacional en áreas específicas. El mallador de superficies triangulares fue controlado automáticamente por el programa, con la verificación de topología habilitada para asegurar que no existan errores estructurales en la malla. La tolerancia de pellizco (Pinch Tolerance) se configuró en un valor predeterminado de 8,1e-005 m, lo cual es crucial para evitar intersecciones no deseadas entre superficies cercanas.

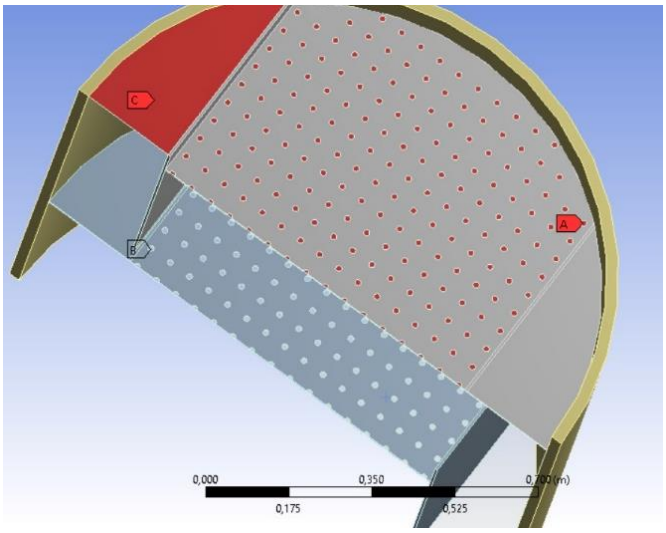
6.1.2 Selección de zonas de entrada y salida de los fluidos

En esta sección se asignaron los nombres específicos a las regiones de entrada y salida de los fluidos (agua y aire) con el objetivo de facilitar su identificación durante las etapas posteriores de la simulación. Este proceso asegura que cada entrada y salida quede claramente definida y etiquetada en el apartado de la malla, lo que resulta fundamental para configurar adecuadamente los parámetros en la etapa de setup (configuración).

De esta manera, las regiones asignadas aparecerán con sus respectivos nombres en el software, permitiendo implementar las configuraciones necesarias, como las condiciones de frontera y las propiedades de los fluidos de manera ordenada, permitiendo simplificar el proceso de configuración y reducir la posibilidad de errores al asignar condiciones específicas a cada región del dominio.

Figura 38.

Zonas seleccionadas entrada y salida de fluidos.



Nota. A través de la figura se identifican las zonas de entrada y liquido de los fluidos para una fácil comprensión de las zonas en el setup.

6.1.3 Configuración del setup

Por medio de la configuración del setup (configuración) en Ansys Fluent, se estableció un marco de modelo transitorio para la simulación y, el modelo elegido para representar el flujo multifásico se basó en la formulación de Euler, identificando como fase primaria el líquido y como fase secundaria el aire. Para la fase secundaria se definió un valor de diámetro de partícula de 5×10^{-3} m y, además, se incorporó la transferencia de energía y el comportamiento viscoso en condiciones laminares, garantizando una representación más precisa del sistema.

Los fluidos se definieron tanto en la entrada como en la salida del esquema, asignándoles sus propiedades específicas como densidad, viscosidad y demás parámetros para la simulación, en el cual se estableció que ambos mantuvieran una temperatura de 300 K. Los datos experimentales, previamente calculados, se utilizaron para especificar la velocidad superficial de los fluidos a su entrada, en donde también se definió una fracción de volumen inicial del aire de 1 tanto en la entrada como en la salida del dominio.

En cuanto a las condiciones de frontera (boundary conditions), se asignaron configuraciones específicas para las diferentes superficies del dominio: para el apartado de la geometría se estableció como wall (pared), se identificó la simetría, la parte interna del fluido se configuró según el dominio interno, y la salida se definió como pressure outlet (salida de presión). Para garantizar una simulación estable, se realizó una inicialización híbrida, abarcando ambos fluidos en el dominio permitiendo generar un campo inicial de condiciones más uniforme, combinando una inicialización estándar con un procedimiento iterativo que asegura una convergencia más rápida en sistemas multifásicos.

Por consiguiente, se realizaron diversas configuraciones y ajustes para el cálculo, entre estos se incluyen cambios en parámetros como el paso de tiempo y el número de iteraciones. Estos ajustes se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 3.

Configuración de las simulaciones realizadas por CFD.

Número de simulación	Tamaño de malla (mm)	Discretización espacial			Tamaño del paso de tiempo (s)	Número de pasos de tiempo	Iteraciones
		Presión	Fracción de volumen	Otros parámetros			
1	9	Primer orden	Primer orden	Primer orden	0,03	400	10
2	6	Segundo orden	Segundo orden	Primer orden	0,001	12000	20
3	6	Segundo orden	QUICK	Primer orden	0,005	2400	20

Nota. La tabla evidencia la configuración que se empleó a través de las diversas simulaciones por CFD.

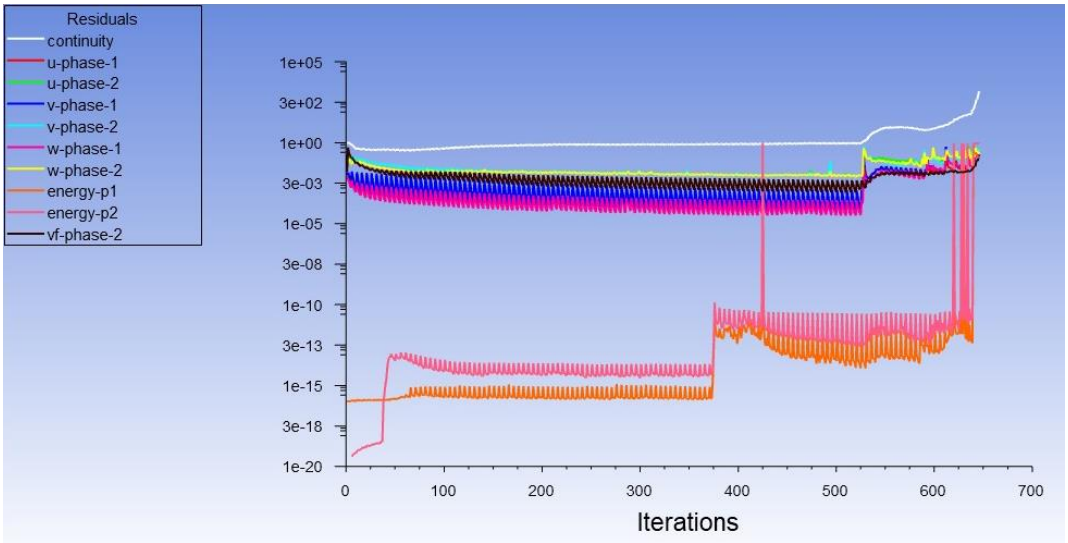
6.2 Solución e hidrodinámica de la simulación

6.2.1 Primera simulación

Una vez terminada la simulación, se registró la gráfica de residuales que se presenta en la figura 39, la cual refleja el comportamiento de las ecuaciones gobernantes resueltas durante la simulación, incluyendo la ecuación de continuidad, las ecuaciones de momento y la ecuación de energía, en el cual, los residuales representan la diferencia entre los valores calculados y los valores esperados que satisfacen estas ecuaciones. Para esta simulación, se utilizó una configuración de mallado con un tamaño de celda de 9 mm, y un tiempo total de 15 horas de simulación:

Figura 39.

Gráfica de residuales a 0,03 s.



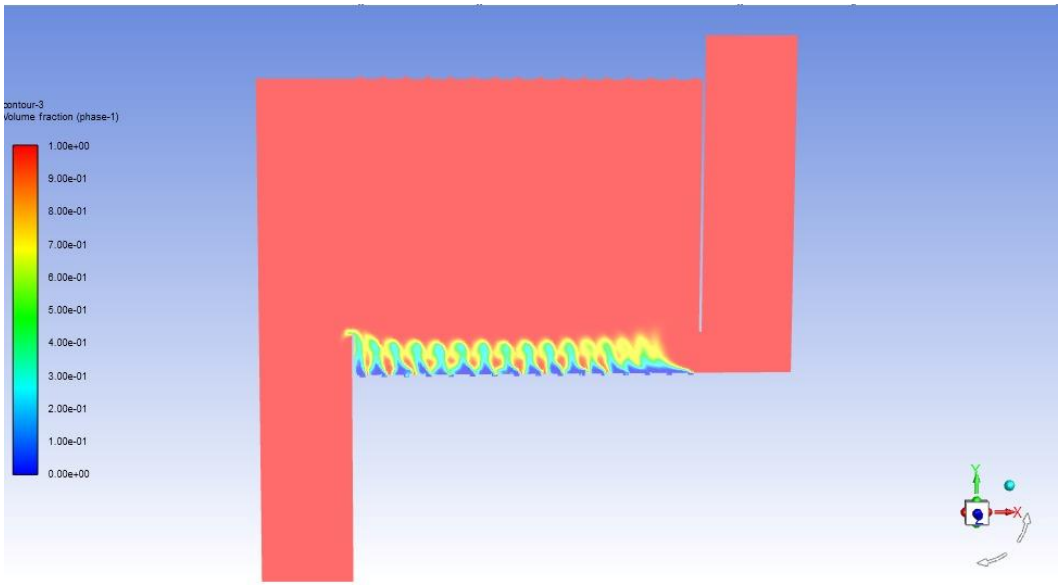
Nota. La figura representa la gráfica de residuales de la simulación, en la que se identifican las ecuaciones o modelos que se integraron en el procedimiento de configuración.

Como se puede observar en la figura 39, los residuos disminuyen en las primeras iteraciones, mientras que para la parte de energía de la fase 2 se encuentra estabilizándose. Sin embargo, existen oscilaciones persistentes en variables asociadas con las fases (u-phase, v-phase, w-phase) que reflejan la naturaleza transitoria y las interacciones complejas entre el aire y el agua.

En iteraciones avanzadas (aproximadamente 425 y 620), se observan discontinuidades significativas en los residuos, con incrementos marcados en las variables relacionadas con energía (energy-p1 y energy-p2) y continuidad. Esto indica posibles problemas de inestabilidad numérica, que podrían deberse a una resolución insuficiente de malla, donde, 9 mm podría no ser adecuada para capturar los detalles del flujo en regiones críticas, combinada con el uso de "First Order Upwind" para variables clave en un modelo transitorio, lo cual puede introducir mayor difusión numérica y afectar la precisión. Es decir que, los problemas de convergencia y las discontinuidades observadas pueden ser atribuidos a la combinación de factores numéricos y físicos: una malla que podría requerir refinamiento, el uso de esquemas de primer orden en un modelo transitorio, y el posible régimen transitorio o turbulento del flujo en ciertas áreas.

Figura 40.

Gráfica de contorno (0,03 s) de fracción de volumen en la fase 1.



Nota. La figura representa la gráfica de contorno de la fracción de volumen de la fase primaria, donde se muestra el movimiento o la interacción con su fase secundaria.

Por otro lado, se obtiene una gráfica de contorno (figura 40), en la cual se muestra la fracción de volumen de la fase líquida representada en una escala de colores. El rojo (1) indica regiones completamente llenas de líquido, mientras que el azul (0) corresponde a regiones ocupadas

únicamente por gas. Los colores intermedios (verde, amarillo, cian) reflejan zonas de mezcla entre las fases líquida y gaseosa.

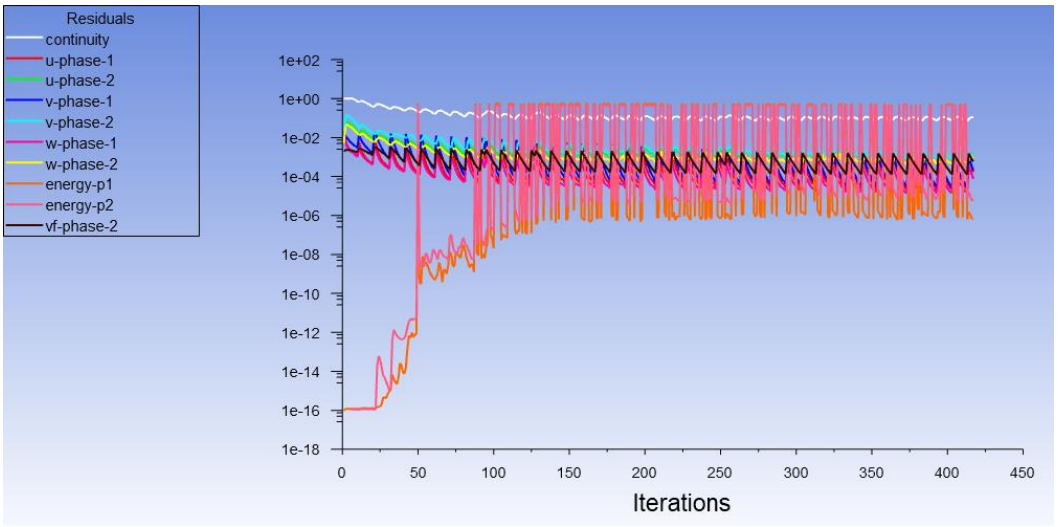
En la región superior, completamente roja, el líquido domina, lo cual es consistente con el diseño del sistema. En los huecos de los platos perforados se observan patrones ondulatorios de colores desde verde hasta amarillo, lo que sugiere la interacción entre las fases al atravesar los orificios. Esto indica un fenómeno típico en sistemas multifásicos, donde la fuerza de cizalla y la diferencia de densidad generan estructuras complejas.

El comportamiento observado puede estar relacionado con diversos factores, como el tamaño de la malla, que podría no ser lo suficientemente fino para capturar con precisión los detalles de la interfaz líquido-gas. También podrían influir los métodos numéricos empleados o la configuración del cálculo, en particular el paso de tiempo establecido en 0,03 segundos, con 10 iteraciones por paso y un total de 400 pasos de tiempo. Estas condiciones podrían haber contribuido a la falta de estabilidad en el sistema, dificultando la convergencia completa de la simulación.

Se realizó una segunda estimación de los parámetros, ajustando el paso de tiempo a 0,02 segundos. En esta configuración, se observó una mejor estabilidad en la energía para ambas fases, lo que indica un avance en el comportamiento del sistema. Sin embargo, esta mejora no resultó ser óptima, ya que la simulación no logró alcanzar la convergencia deseada, definida por un valor residual del orden de 1e-06 constante. Además, persiste la misma limitante en la representación de la gráfica

Figura 41.

Gráfica residual a 0,02 s.



Nota. Por medio de la figura se denota la oscilación y el nivel de estabilidad de las escalas residuales.

6.2.2 Segunda simulación

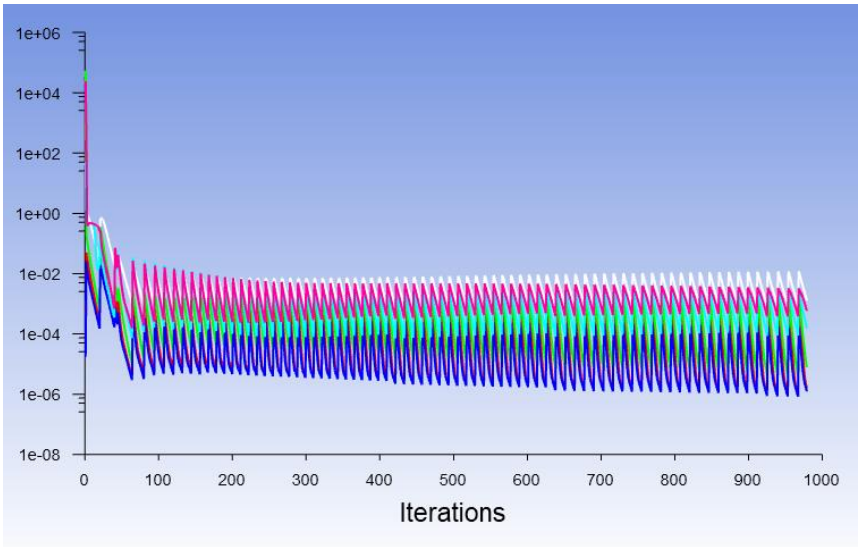
Para la segunda simulación, se puede observar por medio de la figura 42, un nivel de estabilidad mayor al ajustar diversas variables, tales como el paso de tiempo reducido a 0,001 segundos con 20 iteraciones por paso, un tamaño de malla refinado de 6 mm, y una discretización espacial de segundo orden para la presión y la fracción de volumen, mientras que para otras variables se empleó una aproximación de primer orden. Estas configuraciones mejoraron la precisión de los cálculos, permitiendo observar cómo las soluciones convergen y reflejan el comportamiento transitorio del sistema. La simulación abarcó un tiempo total de 12 segundos, lo cual implicó aproximadamente 144 horas de cálculo, dependiendo del equipo computacional y el hardware utilizado.

Se empleó el modelo Euleriano, ideal para simulaciones multifásicas como la presente, donde ambas fases (agua y aire) se tratan como continuos interpenetrantes, resolviendo las ecuaciones de conservación para cada fase de manera independiente, pero acopladas mediante términos de interacción, como el arrastre entre fases. El arrastre es una interacción típica en este tipo de

simulaciones, donde una fase (en este caso, el agua) puede influir sobre la otra (aire) debido a fuerzas interfaciales y fricción. Para garantizar la estabilidad del modelo, se utilizó el método Phase-Coupled SIMPLE (simple acoplado de fases), una variante del método SIMPLE que acopla las ecuaciones de continuidad y momento para todas las fases simultáneamente, esto con el fin de mejorar la estabilidad en flujos multifásicos con fuertes interacciones entre las fases. Asimismo, se aplicaron las opciones de segundo orden en el apartado de presión y fracción de volumen para capturar flujos más pronunciados, proporcionando mayor precisión en zonas de alta convección, como la interfaz líquido-gas, pero consiguiendo mayor gasto computacional.

Figura 42.

Gráfica de residuales a 0,001 s.



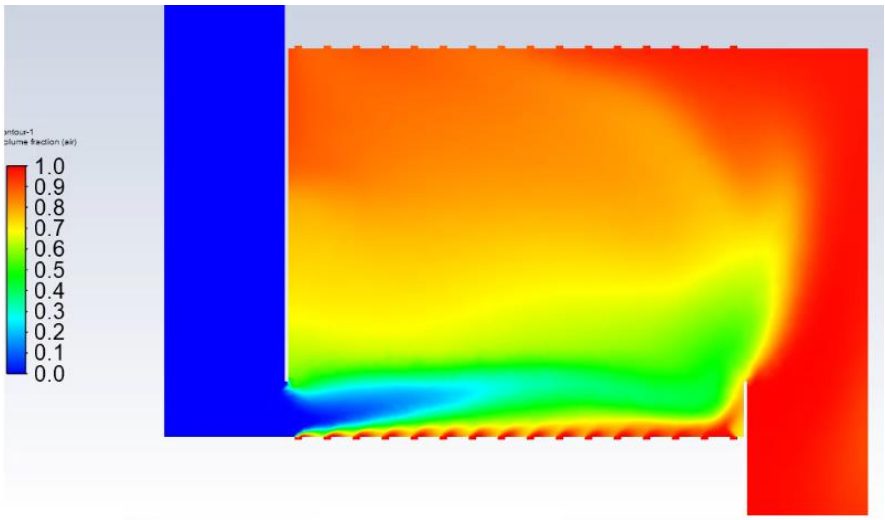
Nota. La figura identifica la convergencia a partir del paso del tiempo de la simulación, en la cual se alcanza una estabilidad a lo largo de las iteraciones.

En la gráfica de contorno establecida, figura 43, se muestra la distribución de las fases, donde el color rojo representa el aire y el azul el agua. Aunque se observa una separación clara entre ambas fases, no se aprecia una interacción significativa entre el aire en los huecos y el agua, lo cual podría deberse a que el tiempo de simulación aún es insuficiente para que el sistema alcance un estado completamente desarrollado. Este comportamiento puede también estar relacionado con la limitación del tamaño de malla, que, aunque mejorado en esta simulación, podría requerir un

refinamiento adicional para capturar detalles más finos de la interfaz líquido-gas y/o la necesidad de ajustar un parche (patch) para arreglar las limitaciones presentadas.

Figura 43.

Gráfica de contorno (0,001 s) de fracción de volumen.



Nota. A través de la figura podemos identificar el paso de la fracción de volumen a través de la geometría, donde además se puede observar la interacción entre las dos fases establecidas.

6.2.3 Tercera simulación

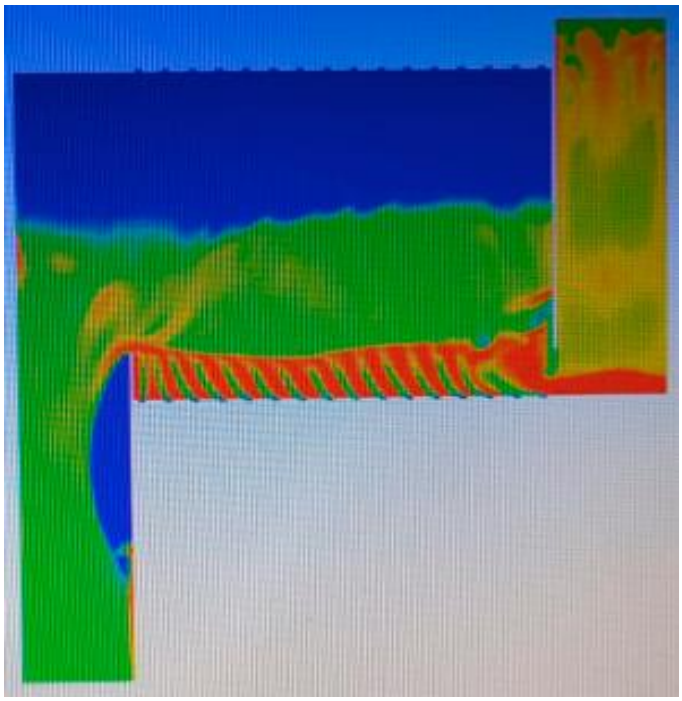
En la última simulación, se utilizó un parche (patch) en Ansys Fluent para corregir las limitaciones observadas en las simulaciones anteriores, relacionadas con la interacción entre las fases (aire y agua). Un parche, se conoce como una herramienta que permite establecer condiciones iniciales o valores específicos en regiones determinadas del dominio, lo que facilita la resolución de problemas asociados a inestabilidades o distribución inexacta de variables críticas. En este caso, el parche fue aplicado para mejorar la representación de la fracción de volumen y otros parámetros clave en zonas de interacción compleja, logrando así una mayor precisión en los resultados.

La simulación tuvo una duración de 12 segundos, en la cual se utilizó el esquema de interpolación QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics) para la fracción de

volumen, ya que este método ofrece una mayor precisión en flujos altamente convectivos al capturar mejor los gradientes en estas situaciones. En la figura 44, se observa con claridad la altura de espuma que se forma y fluye sobre el vertedero (es decir, el comportamiento deseado), además, se refleja cómo el agua (representada en rojo) domina la parte superior, mientras que, la interfase agua-aire genera espuma. Esto es característico de sistemas con caídas significativas del agua con respecto a sus velocidades, donde el aire es atrapado y mezclado con el flujo líquido, formando burbujas que contribuyen a la formación de espuma, que es la parte que sobrepasa el vertedero a partir de la interacción con el aire.

Figura 44.

Gráfica de contorno (0,005 s) de fracción de volumen.



Nota. La figura muestra la interacción entre las dos fases en la simetría, donde el líquido sobrepasa el rebosadero.

En el plato perforado, se puede apreciar la interacción entre fases con zonas donde el aire (en azul) se mezcla con el agua debido a las fuerzas interfaciales y la fricción generada al atravesar los orificios. Estas interacciones generan gradientes dinámicos visibles en la gráfica, mostrando

patrones ondulados que reflejan la complejidad de la mezcla representativos de sistemas multifásicos donde las fuerzas de arrastre y turbulencia incluyen un papel importante.

6.3 Comparación de la altura del líquido claro

6.3.1 Comparación de dato experimental y teórico de la altura del líquido claro

A partir de la ecuación teórica (ecuación 29) para determinar la altura del líquido claro, se realizó un análisis basado en las coordenadas establecidas para evaluar la altura de la espuma en la simulación, obteniendo los resultados representados en la Tabla 4. Los datos revelaron un error relativo del 26,6 % entre la altura simulada y la teórica, lo que indica una discrepancia atribuible, en parte, a la necesidad de refinar ciertos aspectos de la simulación, entre estos se incluye el uso de mallas más densas, que permitirían capturar mejor las características del flujo, y la implementación de esquemas de control numérico de mayor orden, como los métodos QUICK o de segundo orden, particularmente en la formulación de parámetros transitorios, estas características tienen el potencial de mejorar significativamente la precisión del modelo bifásico.

Tabla 4.

Resultados teóricos y experimentales de la altura del líquido claro.

$\boldsymbol{h_{c_t}}$	0,0551 m
ϕ	0,3086
F_c	0,0207 m/s
q_L	0,0327 m^3/s.m
Q_L	0,0177 m^3/s
h_{c_s}	0,0404 m
h_f	0,0131 m

Nota. La tabla muestra los resultados teóricos y experimentales de la altura del líquido claro.

Rahimi y Parizi [9], subrayan que los resultados obtenidos por CFD en su trabajo fueron notablemente más cercanos a los datos experimentales de Solari y Bell, así como a la correlación de Bennett et al., en comparación con los estudios de Gesit et al., quienes asumieron simetría en

sus modelos. Este enfoque simplificado generó desviaciones, ya que, aunque la geometría de la bandeja pueda parecer simétrica, el flujo no presenta un comportamiento simétrico en la práctica. Por lo tanto, los autores recomiendan utilizar la geometría real del equipo en los modelos CFD, siempre que los recursos computacionales lo permitan, para reflejar con mayor precisión las condiciones reales del flujo y sus interacciones. [7]

Los autores también comentan que, aunque aumentar el número de celdas en la malla mejora la predicción CFD sobre la altura del líquido claro, las mejoras observadas en su estudio fueron insignificantes después de cierto punto. En su análisis, trabajaron con un rango de celdas relativamente limitado, entre 100000 y 500000 elementos, lo que no permitió profundizar en los efectos de una malla mucho más refinada. Sin embargo, al incrementar significativamente el número de celdas o elementos, es posible que surjan mejoras sustanciales en el detalle y la precisión de la simulación, particularmente en modelos complejos como los bifásicos que se presentaron en un tamaño de malla de 6 mm. Sin embargo, el análisis numérico tiene una limitación inherente el cual comprende la existencia de un punto a partir del cual aumentar el número de celdas no genera cambios significativos en los resultados. Esto se debe a que, más allá de cierto nivel de refinamiento, la solución CFD comienza a converger, lo que significa que el modelo captura adecuadamente los fenómenos físicos relevantes dentro de la resolución establecida.

6.3.2 Comparación de los datos experimentales de investigaciones de la altura del líquido claro

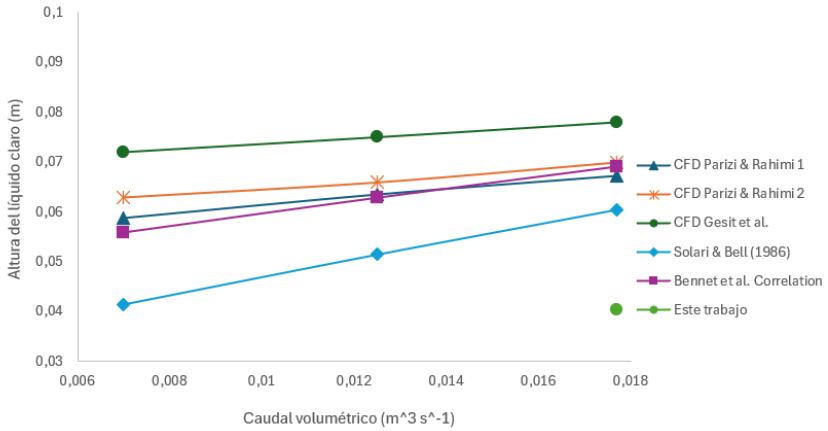
A partir de la altura del líquido claro obtenida de los datos de simulación, se realizó una comparación con los trabajos de [8,9,10], los datos experimentales de Solari y Bell [6] y la correlación de Bennett et al. [23]. En la gráfica 45, se observa que el presente trabajo presenta un error relativo del 33 % en relación con los datos experimentales de Solari y Bell. Este error puede explicarse por las interpretaciones previas relacionadas con la simetría y el refinamiento del modelo adoptado, lo que indica oportunidades de mejora. Sin embargo, los resultados obtenidos son adecuados para el desarrollo de la metodología prevista, considerando niveles bajos de altura de espuma y líquido claro como factores clave.

La simulación realizada, limitada a un caudal volumétrico cercano a 0,018 m^3/s debido a restricciones de tiempo y recursos computacionales, demuestra un acercamiento aceptable a los

valores registrados por Solari y Bell en su artículo. Este modelo ofrece una base para avanzar en el diseño y la implementación de métodos CFD aplicados a la industria, particularmente en el análisis y optimización de columnas de destilación enfocado en el sistema aire-agua.

Figura 45.

Gráfica altura del líquido claro en función del caudal volumétrico.



Nota. La figura denota la comparación de los trabajos realizados por CFD con la simulación realizada a partir de los datos experimentales de Solari y Bell.

Según Barrera y Baquero [24], cuando la altura del líquido claro en una columna de destilación es demasiado alta, se generan diversas problemáticas que afectan el desempeño del equipo, en donde una altura elevada puede reflejar acumulación excesiva de líquido sobre los platos, incrementando la caída de presión y reduciendo la capacidad de transferencia de masa entre las fases líquida y vapor. Esto, a su vez, representa un riesgo de inundación por arrastre, lo que afecta gravemente la eficiencia de separación. Por otro lado, una altura del líquido claro demasiado baja disminuye el contacto efectivo entre las fases, lo que reduce la transferencia de masa y la eficiencia de la columna. [24]

Con respecto a la altura de la espuma, una altura excesiva puede generar espumado severo, llevando el arrastre excesivo de líquido hacia los platos superiores. Siendo asi que, se incrementaría la caída de presión en la columna, dificulte el desplazamiento del gas y afecte

negativamente el equilibrio líquido-vapor, reduciendo la eficiencia del sistema y generando problemas operativos como la acumulación de líquido [24].

En este contexto, considerando la altura del líquido claro de 0,0404 m obtenida en el presente trabajo y comparándola con los datos experimentales de Solari y Bell, cuya altura registrada se aproxima a 0,06 m, se observa una diferencia que, si bien es inferior a la experimental, se encuentra dentro de un rango aceptable para evaluar la metodología aplicada. De manera similar, el trabajo de Gesit et al. presenta resultados por encima de los datos experimentales, lo que permite identificar áreas de mejora en términos de simulación y diseño, con el objetivo de orientar la simulación hacia aplicaciones industriales.

Cabe destacar que el resultado más preciso, el más cercano a los datos experimentales o el que presenta una menor probabilidad de desviaciones significativas en la estimación de la altura del líquido claro, es el de Parizi y Rahimi [9]. En su estudio, emplearon un modelo completo, es decir, no simétrico, para la simulación, con un tamaño de celda más pequeño y ajustado a las características del hardware disponible. Si bien la suposición de simetría habría reducido el costo computacional, se optó por este enfoque no simétrico porque los resultados se obtenían más rápido, aunque no necesariamente con mayor precisión.

Las simulaciones realizadas tomaron un alrededor de 144 horas para alcanzar un nivel de precisión aceptable, lo cual fue más eficiente bajo una configuración con simetría, aunque esto habría comprometido la exactitud de las predicciones. Los autores de [9] resaltan que la elección de un modelo completo es particularmente relevante debido a que confirma que el flujo de líquido en las bandejas no solo es asimétrico, sino que varía constantemente en el tiempo para cada bandeja, siendo esto cerca de la salida del vertedero, donde se observa un aumento del flujo en dirección vertical. Si bien las simulaciones podrían realizarse bajo la suposición de simetría para reducir el tiempo de cómputo, esto implicaría una disminución en la precisión de los resultados observados en el error relativo del 33 %.

7 CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) en Ansys Fluent para simular la hidrodinámica de un plato perforado en una columna de destilación. El proceso incluyó la creación de un esquema detallado de la geometría del plato mediante DesignModeler, seguido por el mallado y la configuración del set-up, donde se definieron los métodos de control y solución para establecer las condiciones iniciales y de frontera, tales como las velocidades y las fracciones de volumen de las fases involucradas. A lo largo de la simulación de los fluidos, se identificaron inicialmente ciertas limitaciones en la creación tanto de la geometría como del dominio. No obstante, mediante la aplicación de diversas técnicas dentro del software, como la operación de unión booleana, fue posible corregir estos inconvenientes y obtener resultados satisfactorios.

A partir de las simulaciones realizadas, se obtuvieron diversas gráficas de contorno que permitieron describir la hidrodinámica del sistema, observando la interacción y el arrastre de la fase primaria en función de la fase secundaria. Asimismo, se determinó la altura de espuma obtenida en la simulación y se determinó la altura del líquido claro en relación con la correlación de Bennett utilizada, en las cuales se identificaron los efectos negativos asociados a niveles elevados, como la posible inundación del plato, lo que podría afectar masivamente la eficiencia en la transferencia de masa dentro del sistema. Además, se evaluaron las dificultades presentadas en las primeras simulaciones, señalando que un menor paso de tiempo proporciona una mayor estabilidad al sistema, al igual que la importancia de una adecuada discretización espacial para el desarrollo numérico.

Por otro lado, se compararon los resultados obtenidos con investigaciones previas de CFD para el mismo sistema aire-agua operando al mismo caudal de $17{,}7 \times 10^{-3}$ m^3/s, utilizando como referencia los datos experimentales de Solari y Bell, donde se determinó un error relativo del 33 % con respecto a estos datos, resaltando la necesidad de mejorar el refinamiento del mallado y los métodos de control, así como de eliminar la suposición de simetría. Estas mejoras permitirían reducir el error y lograr una mayor aproximación a los valores experimentales, facilitando la futura implementación del modelo en aplicaciones industriales de destilación.

REFERENCIAS

[1] J. M. van Baten y R. Krishna, «Modelling sieve tray hydraulics using computational fluid dynamics», Chem. Eng. J., vol. 77, n.o 3, pp. 143-151, 2000.

[2] A. Zarei, S. H. Hosseini, y R. Rahimi, «CFD and experimental studies of liquid weeping in the circular sieve tray columns», Chem. Eng. Res. Des., vol. 91, n.o 12, pp. 2333-2345, 2013.

[3] R. Rahimi, M. Mazarei Sotoodeh, y E. Bahramifar, «The effect of tray geometry on the sieve tray efficiency», Chem. Eng. Sci., vol. 76, pp. 90-98, 2012.

[4] R. R. Parizi M., «Hydrodynamics of Sieve Tray Distillation Column Using CFD Simulation», Journal of Chemical and Petroleum Engineering, Vol. 49, No.2, pp. 119-129, 2015.

[5] J. A. Mancera-Apolinar, D. F. Mendoza, y C. A. M. Riascos, «CFD simulation and verification of distillation sieve tray hydrodynamics by clear liquid height», Chem. Eng. Trans.

[6] R. B. Solari y R. L. Bell, «Fluid flow patterns and velocity distribution on commercial-scale sieve trays», AIChE J., vol. 32, n.o 4, pp. 640-649, 1986.

[7] M. S. Lavasani, R. Rahimi, y M. Zivdar, «Hydrodynamic study of different configurations of sieve trays for a dividing wall column by using experimental and CFD methods», Chem. Eng. Process., vol. 129, pp. 162-170, 2018.

[8] Theoretical and simulation investigation of separation technology: http://193.6.1.94:9080/JaDoX_Portlets/documents/document_40883_section_38532.pdf

[9] D. Noriler, A. A. C. Barros, M. R. W. Maciel, y H. F. Meier, «Simultaneous momentum, mass, and energy transfer analysis of a distillation sieve tray using CFD techniques: Prediction of efficiencies», Ind. Eng. Chem. Res., vol. 49, n.o 14, pp. 6599-6611, 2010.

[10] C. D. Argyropoulos y N. C. Markatos, «Recent advances on the numerical modelling of turbulent flows», *Appl. Math. Model.*, vol. 39, n.º 2, pp. 693-732, 2015.

[11] M. Tang et al., «CFD simulation of gas flow field distribution and design optimization of the tridimensional rotational flow sieve tray with different structural parameters», Chem. Eng. Sci., vol. 201, pp. 34-49, 2019.

[12] V. Vishwakarma, S. A. Haq, E. Schleicher, M. Schubert, y U. Hampel, «Experimental analysis of the hydrodynamic performance of an industrial-scale cross-flow sieve tray», Chem. Eng. Res. Des., vol. 174, pp. 294-306, 2021.

[13] V. B. R. E. Silva y J. Cardoso, «Introduction and overview of using computational fluid dynamics tools», en Computational Fluid Dynamics Applied to Waste-To-energy-processes, Elsevier, 2020, pp. 3-28.

[14] A. Dadvand y S. Y. Motlagh, «Introduction on principle of computational fluid dynamics», en Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes, Elsevier, 2022, pp. 1-26.

[15] K. Stefan y R. Gunther, «CFD-simulations in the early product development», Procedia CIRP, vol. 40, pp. 443-448, 2016.

[16] B. A. R. A. L. H. M. M. R. S. B. van Wachem, Computational Fluid Dynamics for Engineers. 2012.

[17] R. Krishna, J. M. Van Baten, J. Ellenberger, A. P. Higler, y R. Taylor, «CFD simulations of sieve tray hydrodynamics», Chem. Eng. Res. Des., vol. 77, n.o 7, pp. 639-646, 1999.

[18] N. Llorente-Remartínez y S. Galán, «CFD simulation of sieve tray hydraulics using the lattice Boltzmann method», en Computer Aided Chemical Engineering, Elsevier, 2017, pp. 37-42.

[19] R. Krishna y J. M. Van Baten, «Modelling sieve tray hydraulics using computational fluid dynamics», Chem. Eng. Res. Des., vol. 81, n.o 1, pp. 27-38, 2003.

[20] B. E. Rapp, «Conservation of mass: The continuity equation», en Microfluidics: Modelling, Mechanics and Mathematics, Elsevier, 2017, pp. 265-271.

[21] ANSYS, Inc, «Ansys Fluent Theory Guide», 2024.

[22] H. Liu, «Description of single-point wind time series along railways», en Wind Forecasting in Railway Engineering, Elsevier, 2021, pp. 69-136.

[23] O. Castellanos, P. Bejarano, G. Rodríguez, D. Bernal, *Análisis y diseño de platos y columnas de platos*, Bogotá, Colombia: Editorial UNAL. 2011. [En línea]. Disponible en: https://portaldelibros.unal.edu.co/gpd-anyalisis-y-disey-o-de-platos-y-columnas-de-platos-9789587199253.html

[24] B. C. Barrera Natalia, «Evaluación de la operación en la unidad de destilación de un complejo de aromáticos para condiciones operacionales diferentes al diseño», Universidad de América, 2018.