

MODELO FLUIDODINÁMICO MULTIFÁSICO EN COLECTOR Y AEROENFRIADOR DE UNA UNIDAD COMERCIAL DE HTNC

MULTI-PHASE FLUIDODYNAMIC MODEL IN MANIFOLD AND AIRCOOLER OF A COMMERCIAL HTNC UNIT

Roberto F. Pereiras^a, Marcela Raviculé^a, Horacio P. Burbridge^a,

^a*Gerencia de Investigación y Desarrollo, YPF Tecnología S.A., Avenida del Petróleo Argentino s/n entre 129 y 143. Berisso, Buenos Aires. C.P: 1923, Argentina, roberto.f.pereiras@ypftecnologia.com, horacio.burbridge@ypftecnologia.com <https://www.y-tec.com.ar>*

Palabras claves: CFD, FLUENT, aeroenfriador, VOF, flujo multifásico, medio poroso

Resumen: Se llevó a cabo un estudio fluidodinámico sobre un conjunto de aeroenfriadores ubicados en una planta de hidrotreamiento de YPF. El sistema consiste en una cañería que alimenta un colector que distribuye una corriente de hidrocarburos bifásica a cuatro aeroenfriadores en paralelo (dos centrales y dos laterales), en los cuales se registraron problemas de corrosión y pérdida de eficiencia. El estudio se realizó en dos etapas. En la primera etapa se estudió la cañería de alimentación al colector que distribuye el flujo hacia los aeroenfriadores y, en la segunda etapa, la distribución interna de flujo en el cabezal y tubos de un aeroenfriador. En la primera etapa se consideró un modelo de flujo bifásico tipo VOF. Adicionalmente se simplificaron los aeroenfriadores reemplazándolos por medios porosos, con el fin de tener en cuenta su pérdida de presión e influencia en la distribución de gas en el colector aguas arriba. En la segunda etapa, se implementó un modelo de condensación en los tubos de un aeroenfriador para estudiar estos efectos sobre la distribución de líquido y gas en el aeroenfriador completo. Para realizar estos cálculos se utilizó el modelo de condensación / vaporización de Lee. La modelización permitió comprender la influencia de la fluidodinámica en la corrosión de los tubos.

Keywords: CFD, FLUENT, air cooler, VOF, multiphase flow, medium porous

Abstract: A fluid dynamic study was carried out on a set of air coolers located at a YPF hydrotreating plant. The system consists of a pipe that feeds a manifold that distributes a two-phase hydrocarbon stream to four parallel air coolers, in which corrosion problems and loss of efficiency were observed. The study was carried out in two stages. In the first stage, the supply pipe to the collector that distributes the flow to the air coolers was studied. In the second stage, the internal distribution of flow in the tubes of an air cooler was analysed. A two-phase VOF model was considered for the first stage analysis. Additionally, the air coolers were simplified by assuming porous media, to consider their pressure loss and influence on the gas distribution. In the second stage, a condensation model was implemented to study these effects on the distribution of liquid and gas in the tubes of the air cooler. Lee's condensation / vaporization model was used to perform these calculations. The model was useful to understand the influence of fluid dynamics on the tube corrosion.

1 INTRODUCCIÓN

En una planta de hidrotreamiento de naftas de YPF se detectaron problemas de corrosión y pérdida de eficiencia en un conjunto de aerofriadores, particularmente en los tubos superiores más cercanos al cabezal. Se sospecha que se originan debido a una mala distribución de flujo bifásico dentro del haz tubular.

Esta hipótesis es compatible con el trabajo de [Gou 2013](#) en el cual mediante termografías y estudios de CFD verificaron que las zonas más propensas de corrosión coinciden con zonas de baja velocidad de gas y baja circulación de líquido.

Dado que la corrosión puede generar taponamiento, disminución de vida útil, pérdida de eficiencia en los aerofriadores y peligro por explosión, surge interés por parte de YPF en estudiar el fenómeno y eventualmente proponer mejoras para la distribución de fluido para mitigar problemas de corrosión.

Es por esto por lo que se realizó un estudio fluidodinámico de un aerofriador y de la distribución de flujo aguas arriba mediante herramientas de CFD. Se utilizaron métodos VOF (volume of fluid) euleriano y DPM (de fase discreta) euleriano-lagrangiano. Adicionalmente se simuló la condensación mediante el modelo de evaporación / condensación de [Lee \(1979\)](#).

2 MODELOS NUMÉRICOS EMPLEADOS

2.1 VOF – Volume Of Fluid

Este modelo se utilizó para hacer un seguimiento de la interfaz del hidrocarburo líquido con su vapor. El modelo VOF tiene un enfoque euleriano, puede modelar dos o más fluidos inmiscibles resolviendo un solo conjunto de ecuaciones de momento y rastrear la fracción de volumen de cada uno de los fluidos en todo el dominio. La aplicación típica de este modelo consiste en el seguimiento la interfaz líquido-gas ([Fluent Theory Guide, Release 19.1,2019](#)).

La formulación de VOF se basa en el hecho de que dos o más fluidos (o fases) no están interpenetrados. Pueden considerarse varias fases y en cada volumen de control las fracciones de volumen de todas las fases suman la unidad. Los campos para todas las variables y propiedades son compartidos por las fases. Así, las variables y las propiedades en cualquier celda dada son representativas de una fase o una mezcla de las fases, dependiendo de los valores de la fracción volumétrica.

2.2 DPM – Modelo de fase discreta Euler-Lagrange

Este modelo se utilizó para simular la dispersión de las gotas de agua de lavado en el vapor de hidrocarburo. En el modelo DPM de fase discreta Lagrangiana, la fase fluida se trata como un continuo resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes, mientras que la fase dispersa se resuelve rastreando una gran cantidad de partículas o gotas a través el campo de flujo calculado y puede intercambiar momento, masa y energía con la fase fluida.

Este enfoque se simplifica considerablemente cuando se pueden despreciar las interacciones partícula-partícula, y esto requiere que la fracción volumétrica de la fase dispersa sea relativamente pequeña ([Fluent Theory Guide, Release 19.1,2019](#)).

2.3 Modelo de condensación – vaporización de Lee

Con el modelo VOF, se implementó la condensación en los tubos para estudiar estos efectos sobre la distribución de líquido y gas en el aerofriador.

El modelo de condensación / vaporización de Lee (1979) es un modelo mecanístico simplificado que se utiliza para simular la transferencia de materia entre fases, dependiente de una diferencia de temperaturas entre la de saturación y la del medio. El signo de esta diferencia determina el sentido de la transferencia. Este método requiere un ajuste de parámetros a través de resultados experimentales, el cual se realizó con datos operativos de los aerofriadores.

En el modelo de Lee, la transferencia de masa líquido-vapor (evaporación y condensación) se rige por el transporte de vapor según la ecuación 1.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{V}_v) = \dot{m}_{lv} - \dot{m}_{vl} \quad (1)$$

Donde:

v = vapor phase

α_v = vapor volume fraction

ρ_v = vapor density

\vec{V}_v = vapor phase velocity

$\dot{m}_{lv}, \dot{m}_{vl}$ = the rates of mass transfer due to evaporation and condensation, respectively.

These rates use units of kg/s/m³

Basándose en los regímenes de temperatura, la transferencia de masa se describe en las ecuaciones 2 y 3.

$$\begin{aligned} &\text{If } T_l > T_{sat} \text{ (evaporation):} \\ \dot{m}_{lv} &= coeff * \alpha_l \rho_l \frac{(T_l - T_{sat})}{T_{sat}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &\text{If } T_v < T_{sat} \text{ (condensation):} \\ \dot{m}_{vl} &= coeff * \alpha_v \rho_v \frac{(T_{sat} - T_v)}{T_{sat}} \end{aligned} \quad (3)$$

Donde T_{sat} es la temperatura de saturación o evaporación, $coeff$ es un coeficiente que debe ser ajustado y puede ser interpretado como un tiempo de relajación, α es la fracción volumétrica de la fase y ρ la densidad (Fluent Theory Guide, Release 19.1, 2019).

3 SISTEMA ANALIZADO

Se realizó un estudio fluidodinámico (campos de velocidad, distribución de las fases y perfiles de condensación de hidrocarburo) de un sistema compuesto por el piping de alimentación a un conjunto de aerofriadores.

El estudio se dividió en dos etapas: Piping con medio poroso (A) y Aerofriador (B)

3.1 A – Piping con medio poroso

Se estudió la cañería de alimentación a los aerofriadores. Se adoptó la suposición de simetría y se modelaron los aerofriadores como zonas de tipo “medio poroso”. En esta primera etapa el objetivo era representar el aerofriador como un accesorio con una dada

perdida de presión, para analizar la distribución de flujo en la cañería. Se realizaron dos simulaciones: A1, A2. Estas son descriptas en dichas secciones.

3.2 B – Aeroenfriador

Se estudió en detalle la fluidodinámica del aeroenfriador, centrándose en la zona donde aparece la corrosión (tubos del primer paso). Se simuló parte de la cañería de alimentación, el cabezal de entrada y sus tubos. Una suposición fue que la simetría adoptada en el aeroenfriador implica, a su vez, la simetría en la distribución de flujo. El resultado de este estudio son las cantidades de líquido y velocidades por cada tubo. Se realizaron dos simulaciones: B1, B2 descriptas en dichas secciones.

4 CONDICIONES INICIALES Y DE OPERACIÓN

Como se mencionó anteriormente, se realizaron simulaciones en CFD que se dividen en: el piping de alimentación a los aeroenfriadores (A1 y A2) y el aeroenfriador en detalle (B1, B2).

4.1 Condiciones operativas y propiedades físicas de la hoja de diseño

Las condiciones operativas fueron extraídas de las hojas de datos provistas por los ingenieros de planta y datos de la operación. El flujo de ingreso es una mezcla de hidrocarburos líquidos con sus vapores y agua de lavado (menor al 5% de volumen respecto de la fase hidrocarburo líquido). La fracción volumétrica del gas ronda entre el 80% al 90%. La función del agua de lavado es disolver depósitos de sales que generan corrosión, razón por la cual se realizó este estudio. Se consideró como simplificación que la variación las propiedades físicas del vapor y el líquido eran despreciables (densidad y viscosidad constantes).

4.2 Determinación del patrón de flujo mediante método empírico

Con los datos de la operación, se empleó la correlación de Lockart y Martinelli para calcular el patrón de flujo y la retención de líquido. Este es un dato útil para establecer la condición de contorno a la entrada de la tubería y comenzar con las simulaciones CFD. Según esta correlación el flujo en la cañería se encuentra en la zona de spray o dispersa y la retención¹ resultó ser 0.065. Estos datos permitieron establecer una condición de entrada al ducto. La distribución fue posteriormente validada mediante CFD.

5 A - ESTUDIO DEL PIPING CON MEDIO POROSO

5.1 Geometría

A partir de los planos provistos por los ingenieros de la planta se generaron las geometrías para realizar las simulaciones.

En la figura 1 se muestra la geometría generada para el piping de alimentación.

¹ Retención o holdup, es la fracción volumétrica ocupada por el líquido.

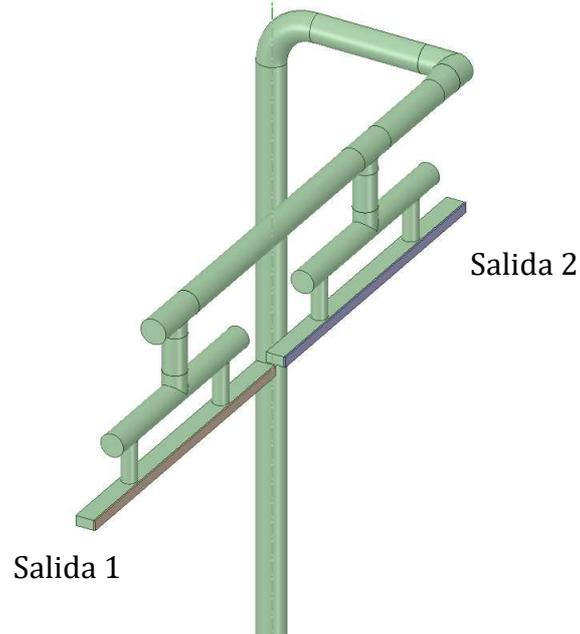


Figura 1: Geometría generada. Salidas coloreadas para representar los medios porosos

En la figura 2 se muestra el detalle del medio poroso. La zona en rosa establece el grosor de dicho medio

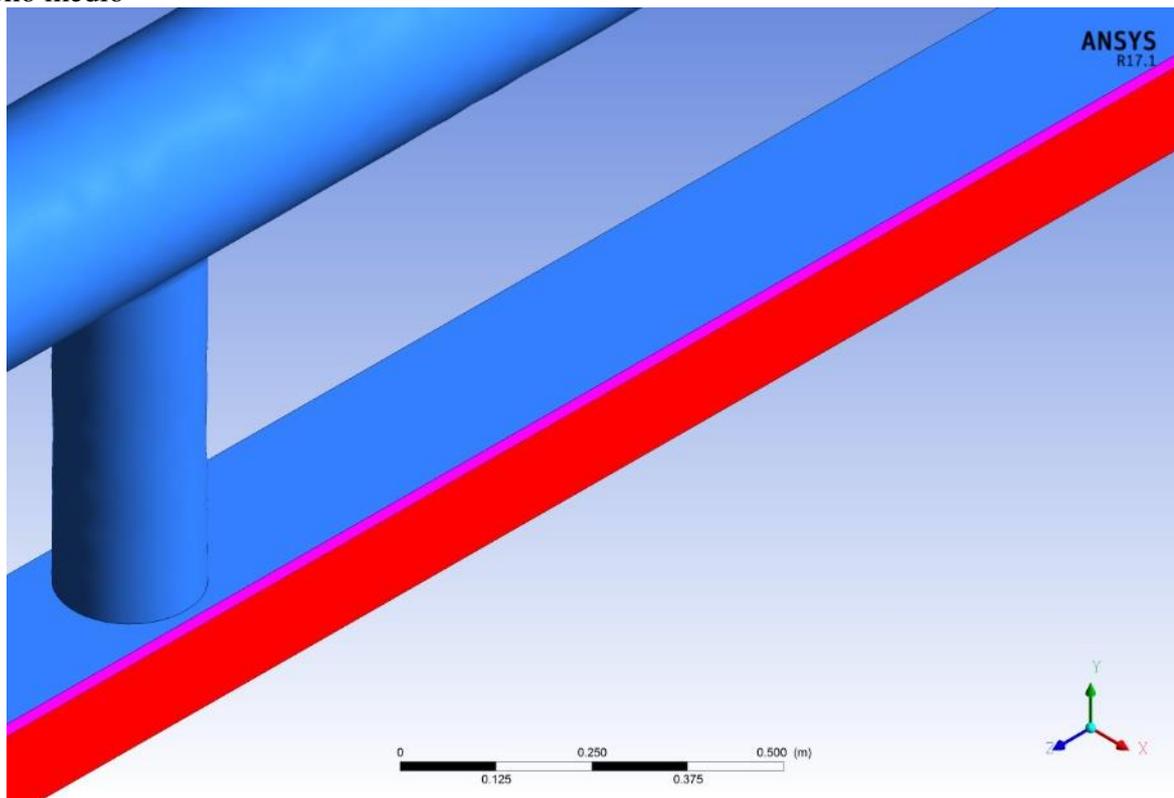


Figura 2: Detalle del medio poroso (salida en rojo, espesor medio poroso en rosa).

El medio poroso es una zona cuya pérdida de presión que viene dada por la ecuación (4):

$$\Delta P = C2 * \left(\frac{1}{2} * \rho * v^2\right) \quad (4)$$

Esta pérdida de presión se calculó con base en la hoja de datos de los aerofriadores. La velocidad media viene dada por el caudal volumétrico de gas dividido por la sección total del

medio poroso. La constante $C2$ debe ajustarse con datos de la operación. La utilidad de esta aproximación es tener en cuenta la pérdida de presión de los aerofriadores a efectos de calcular la distribución de flujo aguas arriba de los mismos, sin tener que simularlos detalladamente y que el problema no se vuelva muy grande generando dificultades a nivel de cómputo.

5.2 Resultados – A1. Piping con medio poroso – Modelo de gotas DPM

En este modelo la interacción se da solo entre el campo de velocidad del vapor y las gotas de agua de lavado. Se supone que las gotas no modifican el campo de velocidad del vapor y no colisionan entre sí. El objetivo es estudiar cómo se distribuyen las gotas de agua en el piping hacia los aerofriadores.

En la figura 3 se muestra el perfil de velocidad en parte del piping y cabezales de ingreso. Se observa que el perfil de velocidad del vapor tiene máximos hacia la zona inferior del cabezal de entrada.

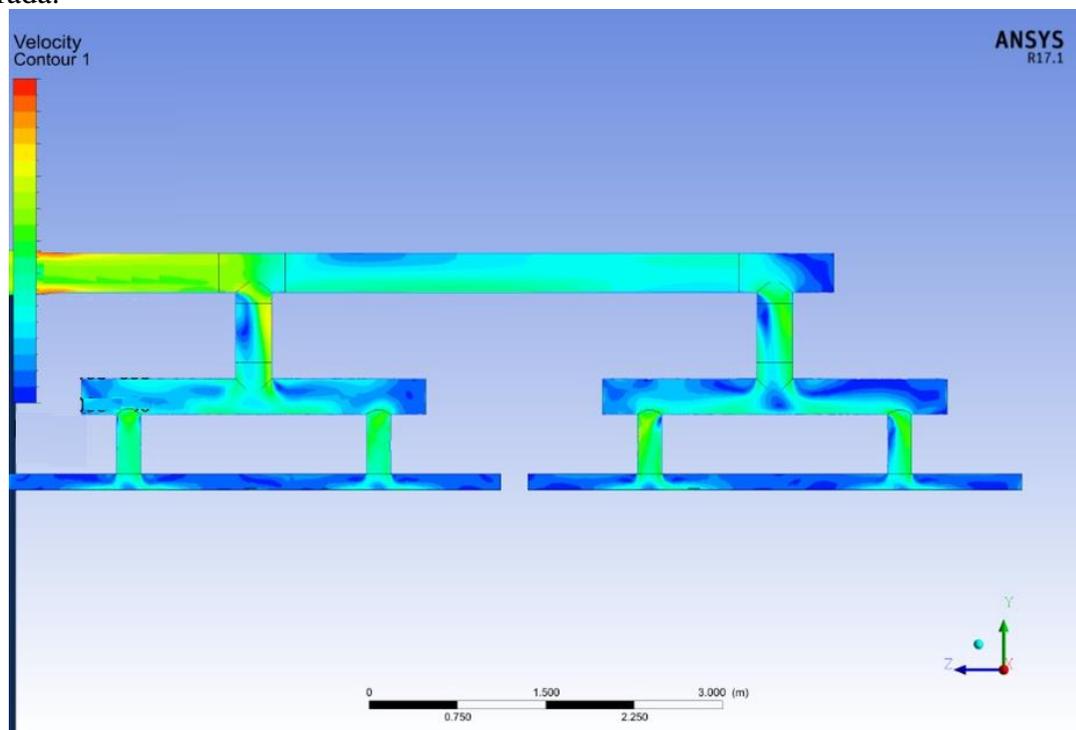


Figura 3: Magnitud de la velocidad del vapor en la alimentación a los aerofriadores

En la figura 4 se muestran trayectorias de gotas. Se observó que las partículas (gotas) se desvían considerablemente de las líneas de corriente del vapor, dado que tienen mayor densidad e inercia.

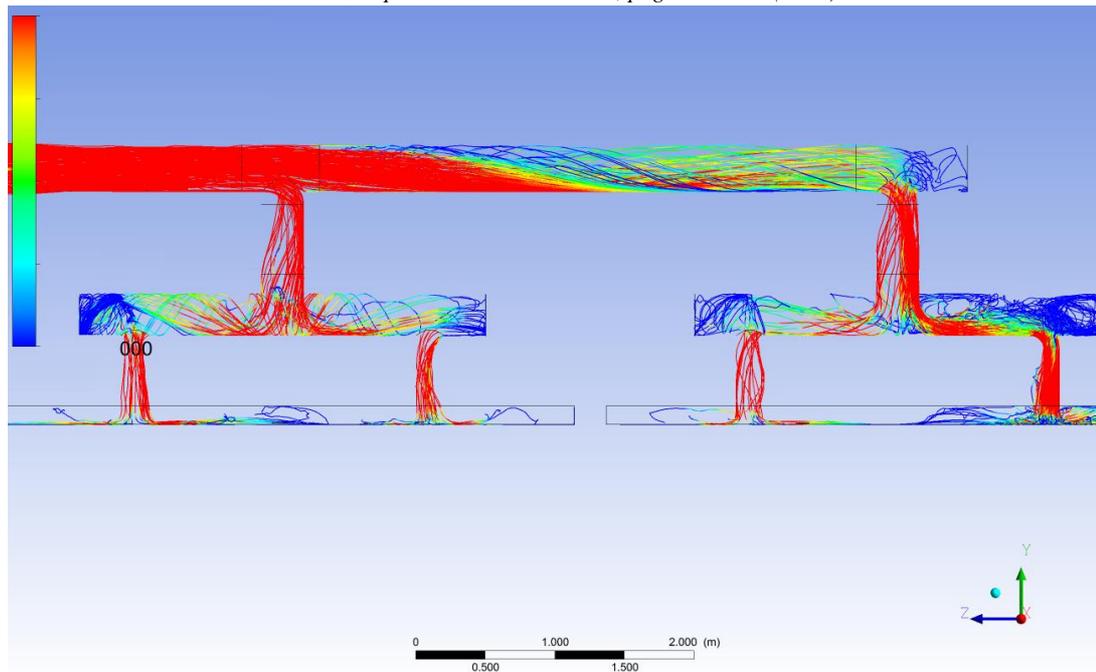


Figura 4: Trayectorias de gotas de líquido (coloreada por velocidad, rojo es el máximo).

Se observa asimetría en la distribución de gotas hacia los aerofriadores. Esto es evidencia de que el líquido no se está distribuyendo en forma homogénea, lo cual indica que la corrosión observada en los aerofriadores de los extremos (donde se dirigen menos gotas de agua de lavado) puede ser a causa de mala distribución de flujo.

5.3 Resultados – A2. Piping con medio poroso. Modelo VOF Euleriano.

El objetivo de este modelado consiste en determinar cómo se distribuye la fase líquida de hidrocarburo en el piping de ingreso hacia los aerofriadores. Este modelo considera dos fases (vapor y líquido) separadas mediante una interfaz que puede tener cierta difusión (modelo VOF con tratamiento de interfaz sharp / diffusive, [Fluent Theory Guide, Release 19.1,2019](#)).

En la figura 5 se muestra cómo se generó la condición de ingreso, consistente en un flujo anular del líquido con el vapor fluyendo por el centro. En este modelo es necesario que el vapor y el líquido ingresen separadamente. Se muestra la distribución de líquido sobre la pared del piping. Las zonas rojas representan una zona de circulación de líquido constante.

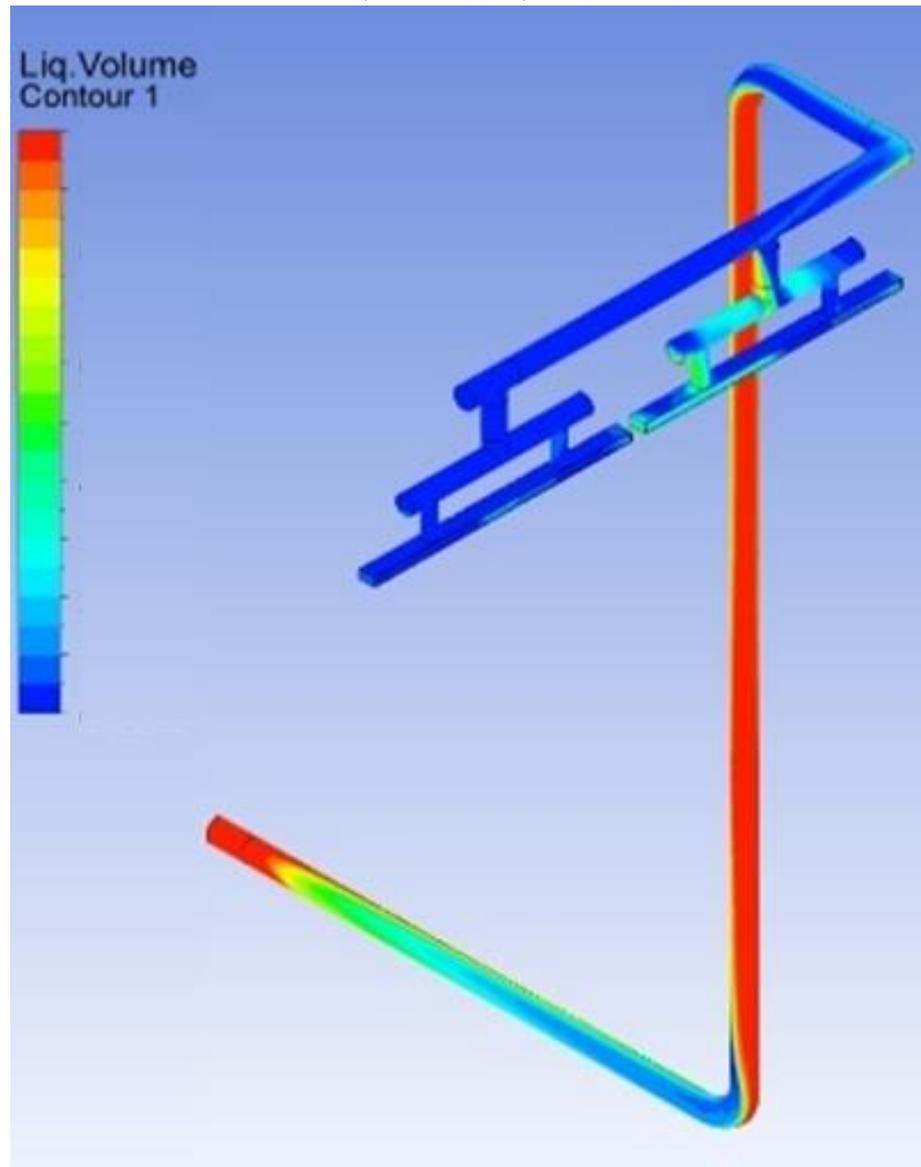


Figura 5: Perfil promedio temporal de mojado sobre la pared.

En cuanto al perfil de presión obtenido, debido a la implementación de medio poroso se obtiene una distribución homogénea de vapor. No obstante, esta distribución de presión no afecta directamente a la distribución de la fase líquida, ya que los efectos inerciales son más importantes.

Según este modelo, la distribución de líquido es preferencial para los aerofriadores intermedios.

Se observaron similitudes entre los resultados de las simulaciones A1 y A2, correspondientes a modelos VOF y DPM, para la distribución de líquido. Esto confirma que existe una distribución no homogénea de líquido a los tubos de los aerofriadores, que se origina en el distribuidor de alimentación.

6 B - AEROENFRIADOR

Haciendo uso de la simetría del aerofriador se dividió en dos partes. En la figura 6 se muestra la vista superior de la geometría de medio aerofriador.

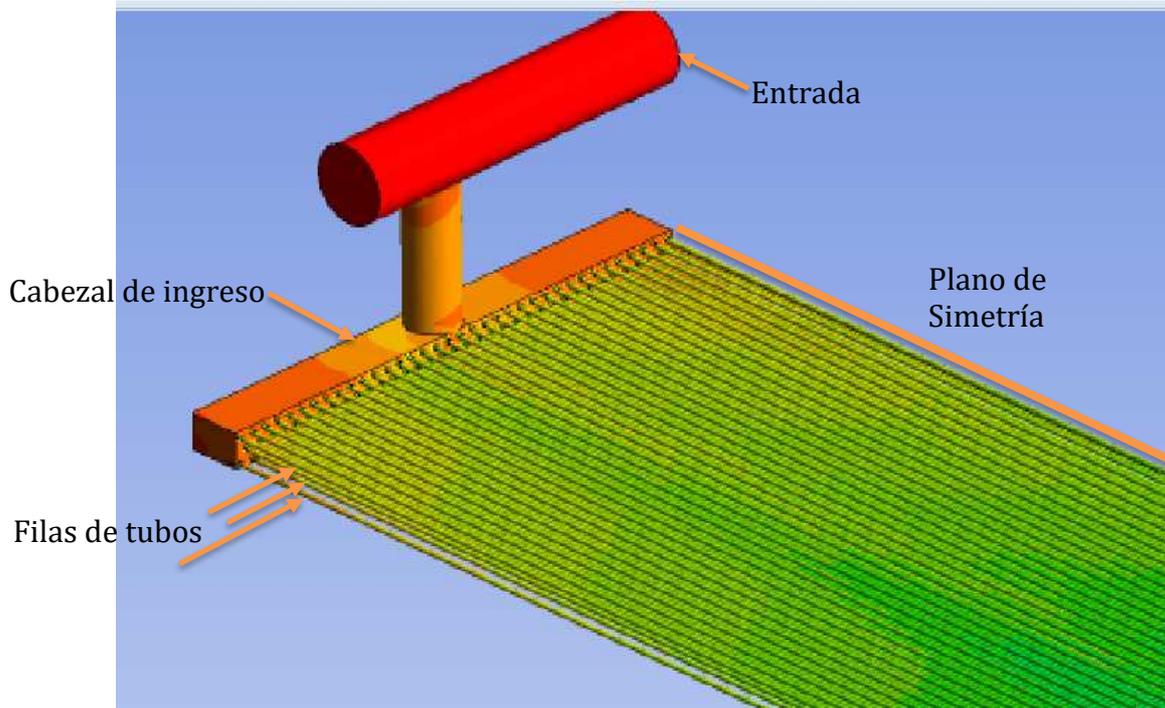


Figura 6: Geometría generada del primer paso. Sólo se generó la mitad de este, gracias a que posee simetría bilateral.

6.1 Condición de entrada

En la figura 7 se muestra cómo se establecieron las condiciones de contorno. La condición de simetría se establece al costado del cabezal y cruza a la mitad un tubo del aire.

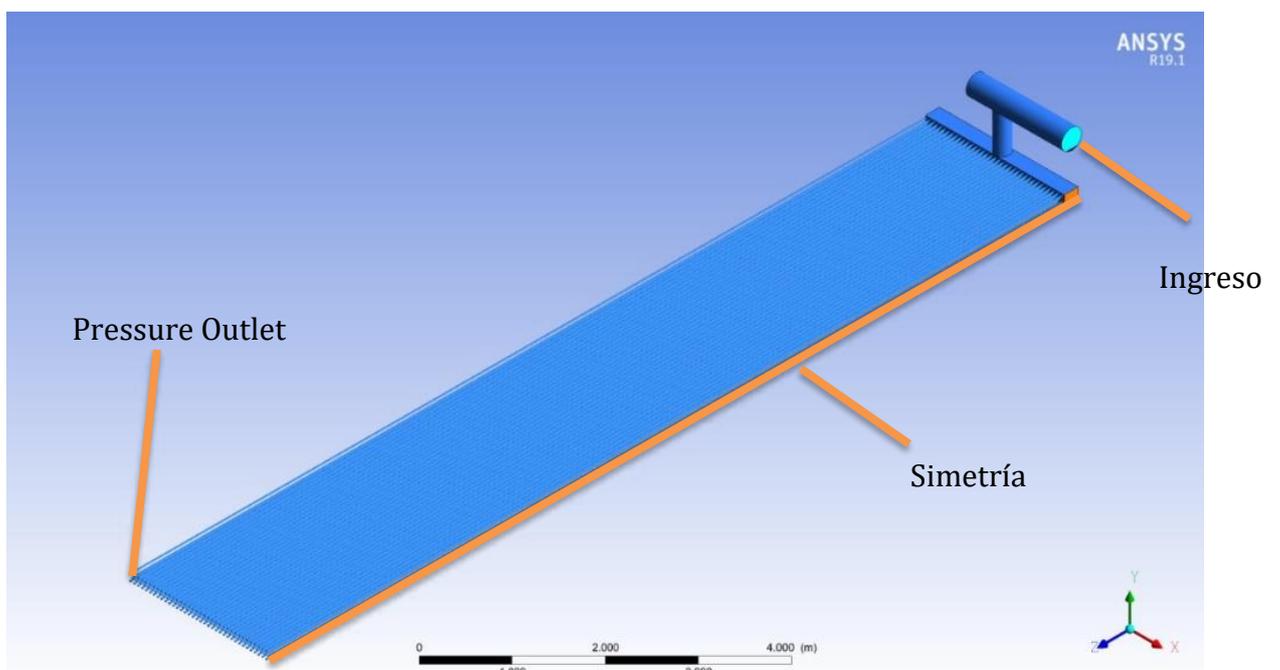


Figura 7: Condiciones de contorno.

Por la entrada puede ingresar tanto un flujo constituido por una fase vapor y otra líquida (de forma segregada, VOF) o una fase vapor y gotas (DPM), dependiendo del modelo. La condición establecida a la salida es de presión uniforme, ya que los tubos del primer paso descargan al cabezal de retorno, que está a una misma presión.

6.2 B1. Modelo VOF - Condensación

Como se mencionó anteriormente, se utilizó el modelo de Vaporización de Lee. Para ajustar los parámetros del modelo se consideraron datos de planta de los aeroenfriadores, caudales y eficiencia de condensación.

La vaporización tiene efectos sobre el perfil de presión y velocidad a lo largo del tubo, donde ejerce su influencia sobre la distribución de vapor y líquido en los tubos. Sin embargo, al no ser tan grande la condensación (inferior al 30% en el primer paso), no genera un impacto significativo en la distribución de líquido hacia los tubos, aunque sí sobre la pérdida de carga y la velocidad a la salida.

Los resultados que se obtienen muestran que la distribución de líquido es preferencial hacia los tubos de la zona inferior, sobre todo hacia la derecha. Se observa que los tubos inferiores hacia el centro reciben un poco menos de líquido.

En los tubos hacia donde fluye más líquido la velocidad es menor. Particularmente esto sucede en la fila de tubos inferior.

En la figura 8 se observa el perfil de velocidad en el cabezal, cerca de la zona de ingreso a los tubos. Se observa mayor uniformidad de velocidades en las entradas a los tubos de arriba.

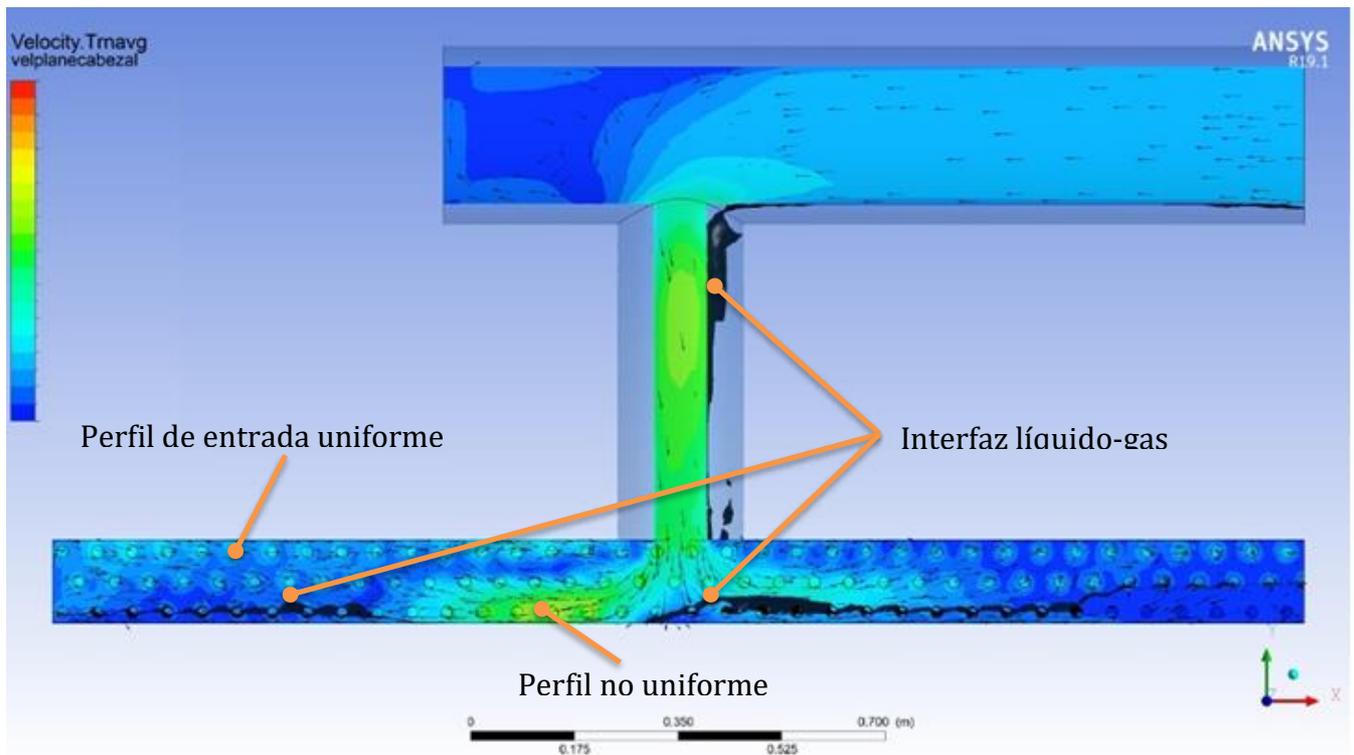


Figura 8: Perfil de velocidad en el cabezal – Modelo VOF Vap. / Cond.

En la figura 9 se presenta la velocidad a la salida de cada tubo.

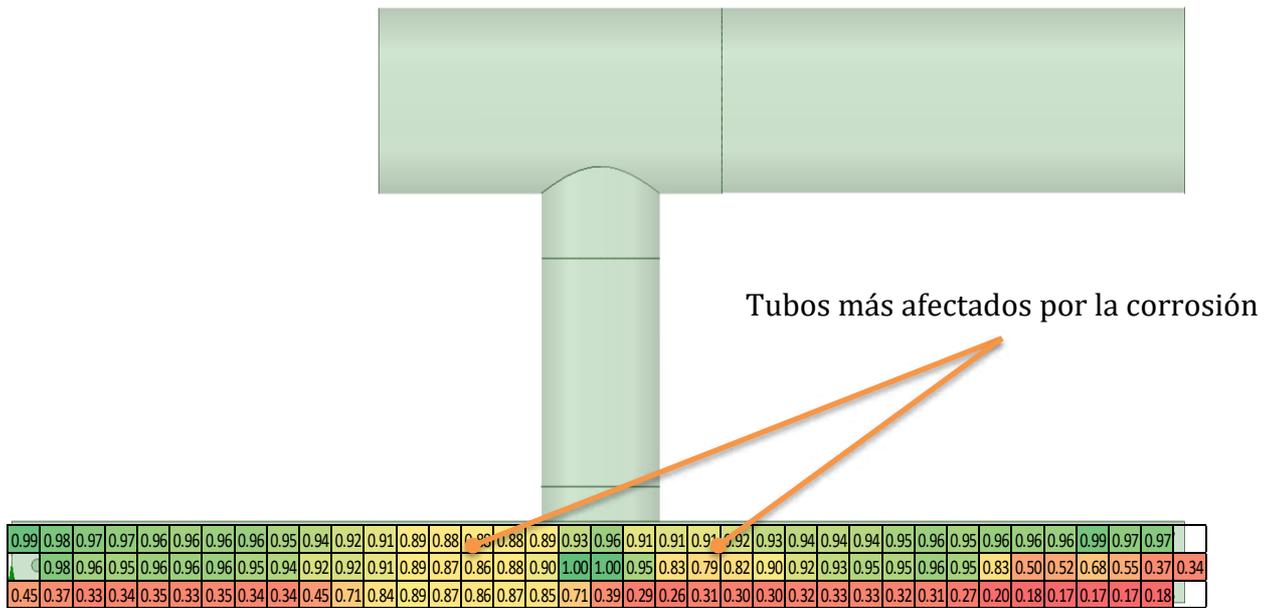


Figura 9: Velocidad normalizada a la salida de cada tubo

Se observó que la incorporación del modelo de vaporización / condensación aumenta la complejidad del cálculo sin aportar más información sobre la distribución de fases que se obtendría con un modelo VOF sin vaporización / condensación, dado que la condensación no es tan significativa respecto de la distribución de líquido a la entrada. El principal resultado de este modelo es que los tubos inferiores reciben mayor cantidad de líquido y por eso no son tan afectados por la corrosión. Los más afectados son los tubos superiores por no recibir el líquido suficiente, sobre todo a ambos lados del ingreso. Estos resultados son validados con las observaciones en la planta.

6.3 B2. Simulación monofásica – con modelo de gotas sin interacción

Este modelo considera una fase vapor que se distribuye en el aroenfriador con su perfil de velocidad, el cual influye sobre las trayectorias de las gotas de líquido. Se supone en este caso que la fracción volumétrica de gotas de líquido es tal que no afecta dicho perfil de velocidad, ni tampoco interaccionan entre ellas. Se estudió la distribución de las gotas considerando dos diámetros: 1 mm y 0.1 mm. Este modelo no contempla condensación / vaporización.

En la figura 10 se muestra el perfil de presión entre cabezal de entrada y salida.

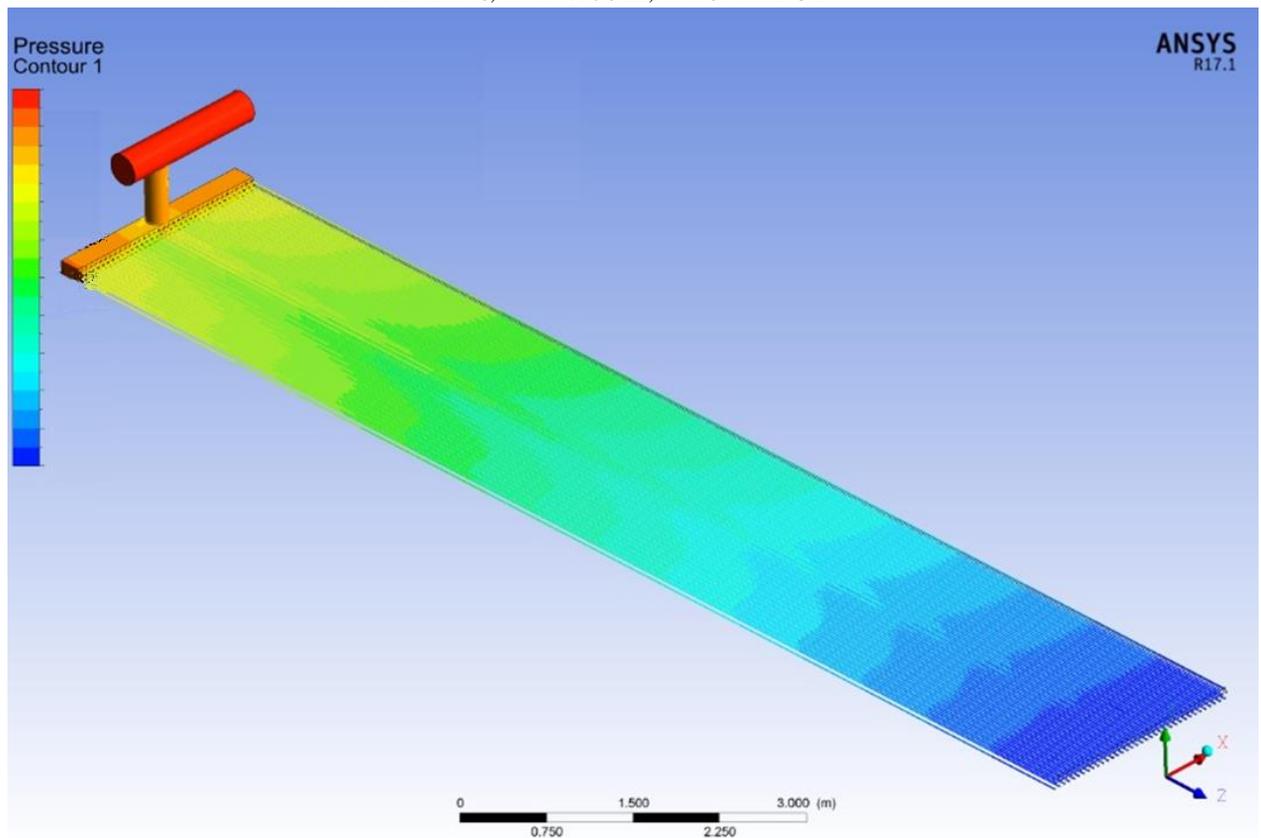


Figura 10: Perfil de presión en aerofriador para modelo monofásico – gotas.

Los perfiles de velocidad en las distintas filas de tubos son similares al caso anterior (B1), los tubos de la primera fila presentan una velocidad de ingreso más homogénea que las filas de tubos inferiores. Los tubos de la parte de abajo presentan una distribución no homogénea de flujo (ver figura 12). Esta distribución no-homogénea, puede guiar las gotas hacia la zona inferior, favoreciendo la cantidad de líquido dirigida hacia la primera fila de tubos, similar al modelo VOF.

En la figura 11 se observa algunas trayectorias de gotas y como se distribuyen en los tubos (preferencialmente hacia los inferiores)

7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Modelar como medio poroso al aerofriador para considerar la pérdida de carga genera que la distribución de gas calculada sea más parecida a la realidad
- Si bien es importante considerar todas las fases para predecir correctamente la distribución de las gotas del modelo lagrangiano, por cuestiones de simplicidad del modelo es posible desprestigiar la fase líquida de hidrocarburo y considerar solo la gaseosa. Esto permitió ahorrar tiempo de cómputo sin afectar la precisión de los resultados.
- Se utilizó el método de Lockart y Martinelli para predecir la fracción volumétrica de entrada que, si bien el método es de índole orientativo, resultó un buen método para tener un primer resultado y comenzar la iteración. La distribución fue finalmente validada con metodologías CFD.
- Los resultados de distribución de flujo permiten realizar ajustes operativos para mejorar la distribución de agua de lavado o incluso para rediseñar el distribuidor de ingreso y el sistema de inyección de agua.
- Se observó distribución de líquido no homogénea en el piping de ingreso a los aerofriadores.
- Se observa una distribución de líquido no homogénea en los tubos del aerofriador, favoreciendo a los tubos inferiores del primer paso y evitando la corrosión en los mismos. Este líquido arrastra las sales y/o las disolvería, evitando la formación de depósitos.
- Es esperable mayor corrosión en los aerofriadores de los extremos, ya que reciben un menor flujo de agua de lavado en comparación con los aerofriadores centrales.

8 REFERENCIAS

- ANSYS, Inc. (2019) ANSYS Fluent Theory Guide, Release 19.1.
- Guofu Ou, Kuanxin Wang, Jianliang Zhan, Meng Tang, Huihui Liu, Haozhe Jin. *Failure analysis of a reactor effluent air cooler. 2013*
- Li Sun, Min Zhu, Guofu Ou*, Haozhe Jin, Wang Kai, Kuanxin Wang *Corrosion investigation of the inlet section of REAC pipes in the refinery. Mayo - 2016*
- W. H. Lee. "A Pressure Iteration Scheme for Two-Phase Modeling". *Technical Report LA-UR 79-975. Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico. 1979.*
- Zhijian Zheng, Guofu Ou, Haojie Ye, Jinlong Tan, Haozhe Jin. *Analysis on the under deposit corrosion of air cooler tubes: Thermodynamic, numerical and experimental study - Mayo 2017*