

SIMULACIÓN CFD DE SEPARADOR BIFÁSICO TIPO “SLUG CATCHER”

CFD SIMULATION TWO PHASE SEPARATOR “SLUG CATCHER” TYPE

Roberto F. Pereiras^a, Horacio Burbridge^a, Diego A Palmerio^a

^a*Mision Midstream, 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, diego.palmerio@ypftecnologia.com, <https://www.y-tec.com.ar>*

Palabras claves: Slug-Catcher, ANSYS FLUENT, flujo bifásico, gas, líquido, CFD, pigging, oleoducto, inundación

Resumen: A una planta de tratamiento de Gas ingresa una mezcla bifásica de gas y líquido. Esta mezcla es recibida por dos Slug-Catchers, equipos cuya función es la de darle tiempo al líquido y al gas para que se asienten y separen. Cada equipo consiste en tres caños de gran diámetro que funcionan como acumuladores, conectados entre sí por los colectores de entrada y salida de los fluidos. Durante la limpieza mediante piggeo de los ductos aguas arriba de la planta, se producen bolsones (slugs) de líquido que deben ser retenidos en los Slug-Catchers para no generar problemas operativos. El objetivo del trabajo fue evaluar mediante CFD la capacidad del sistema para manejar el líquido ante un evento de Slug. Adicionalmente evaluar la capacidad del colector de entrada para distribuir simétricamente el líquido en ambos slug-Catchers. Se utilizó para la resolución del problema la suite de ANSYS, SpaceClaim para la geometría, Meshing para el mallado y Fluent R2020 para la simulación. Como resultado, en los Slug-Catchers no se registraron cantidades significativas de líquido escapando por la salida de gas, sino más bien un llenado uniforme y segregado, sin llegar a la inundación del estos. Se observó un llenado parejo de los 3 dedos, distribuyéndose en los dedos principales desde la entrada y en el tercer dedo por vaso comunicante. De esta forma se observa que el sistema puede manejar correctamente el Slug.

Keywords: Slug-Catcher, ANSYS FLUENT, two-phase flow, gas, liquid, CFD, pigging, pipeline, flood

Abstract: A two-phase mixture of gas and liquid enters a Gas treatment plant. This mixture is received by two Slug-Catchers, devices used to settle and separate liquid and gas phases. A Slug-Catcher is constituted by three large diameter tubes (also called “fingers”) that act as liquid accumulators, connected to each other by some inlet and outlet manifolds. During the pigging of the upstream ducts of the plant, slugs of liquid are produced and must be retained in the Slug-Catchers to avoid operational risks. The objective of this work was to evaluate through CFD the system's capacity to handle the liquid in a slug event. Additionally, to assess the capacity of the inlet manifold to symmetrically distribute the liquid in both slug-Catchers. The ANSYS suite was used to solve the problem, SpaceClaim to generate the geometry, Meshing to generate the mesh and Fluent R2020 for the simulation. The results are that no significant amount of liquid through the gas outlet in the Slug-Catchers, but rather a uniform and segregated filling, without flooding the system is observed. A uniform filling of the 3 finger was observed, distributing in the main fingers from the entrance and in the third finger through a communicating pipe. Therefore, it is concluded that the system can correctly handle the Slug.

1 INTRODUCCIÓN

A una planta de tratamiento de Gas de ingresa una mezcla bifásica de gas y líquido. Esta mezcla es recibida por dos Slug-Catchers, equipos cuya función es la de darle tiempo al líquido y al gas para que se asienten y separen. Cada equipo consiste en tres caños de gran diámetro que funcionan como acumuladores, conectados entre sí por los colectores de entrada y salida de los fluidos. Durante la limpieza mediante piggeo de los ductos aguas arriba de la planta, se producen bolsones (slugs) de líquido que deben ser retenidos en los Slug-Catchers para no generar problemas operativos.

En el presente estudio se realizaron simulaciones de fluidodinámica computacional (CFD) para determinar la capacidad del sistema de Slug-Catchers para desagotar el líquido ante un evento de Slug. Se analizó un Slug-Catcher y la cañería aguas arriba para verificar la capacidad para distribuir correctamente el Slug de líquido generado. Para validar el funcionamiento del Slug-Catcher, el caudal de líquido debería poder desagotarse, distribuyéndose en los dedos del equipo, sin dirigirse a la zona de salida de gas (parte superior del equipo).

Se analizó la condición operativa normal, que es la condición de diseño, con caudales uniformes de gas y líquido. Para la condición de Slug se consideró un aumento puntual del caudal de líquido (Slug) y una disminución del caudal de gas.

Para la resolución del problema en CFD, se generó la geometría con ANSYS-SpaceClaim, el mallado se realizó con ANSYS-Meshing y la resolución con ANSYS-Fluent.

El flujo se consideró bifásico, compuesto por una fase gas y otra de líquido. Las propiedades de los fluidos (densidad y viscosidad) fueron estimadas en función de la composición y cálculos con HYSYS.

2 MODELOS NUMÉRICOS EMPLEADOS

2.1 Modelado numérico y aproximaciones

Los fluidos fueron considerados incompresibles, tanto la fase gas como la de líquido.

El modelo de turbulencia RANS empleado fue el k-omega SST.

Para la mezcla gas - líquido se implementó el modelo de dos fases VOF (Volume of Fluid) con un tratamiento de la interfaz SHARP/DISPERSED, por tener una buena relación entre calidad de resultados y tiempos de cómputo. Los pasos de tiempo fueron de 0.015 segundos.

Esta simulación requirió más 8000 segundos simulados, que redundó en 3 semanas en un cluster con 256 núcleos y 16 GB de ram por núcleo.

Se utilizó el esquema PISO para el acoplamiento Presión-Velocidad. En cuanto a la discretización: “PRESTO!” para la presión, “Second Order Upwind” para momento y “Compressive” para la fracción de volumen. Para la formulación transitoria se implementó un esquema “Bounded Second Order Implicit” para obtener una buena convergencia para un mayor paso de tiempo.

2.2 VOF – Volume Of Fluid

Este modelo se utilizó para hacer un seguimiento de la interfaz del hidrocarburo líquido y gas. El modelo VOF tiene un enfoque euleriano, puede modelar dos o más fluidos inmiscibles

resolviendo una sola ecuación de momento para todas las fases y calcular 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.

Según lo indicado en la documentación de ANSYS/Fluent, el seguimiento de la(s) interfaz(es) entre las fases se logra mediante la solución de una ecuación de continuidad para la fracción de volumen de una (o más) de las fases. Para la fase q^{th} , esta ecuación tiene la siguiente forma:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \bar{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (1)$$

donde $\dot{m}_{qp}$ es la transferencia de masa de la fase q a la fase p y $\dot{m}_{pq}$ es la transferencia de masa de la fase p a la fase q . De forma predeterminada, el término de fuente en el lado derecho de la ecuación (1), S_{α_q} , es cero, pero puede especificar una fuente de masa constante o definida por el usuario para cada fase.

La ecuación de la fracción de volumen no se resolverá para la fase gas; La fracción de volumen de la fase primaria se calculará en función de la siguiente restricción:

$$\sum_{p=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2)$$

La ecuación de la fracción de volumen puede resolverse mediante discretización de tiempo implícita o explícita. En este caso, se utilizó un esquema implícito. Cuando se utiliza el esquema implícito para la discretización del tiempo, se utilizan los esquemas de interpolación de diferencias finitas estándar de ANSYS Fluent, QUICK, Second Order Upwind y First Order Upwind, y los esquemas HRIC modificados, para obtener los flujos frontales de todas las celdas, incluidas las cercanas a la interfaz

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_f^{n+1} U_f^{n+1} \alpha_{q,f}^{n+1}) = \left[S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right] V \quad (3)$$

Dado que esta ecuación requiere los valores de la fracción de volumen en el paso de tiempo actual (en lugar de en el paso anterior, como para el esquema explícito), se resuelve iterativamente una ecuación de transporte escalar estándar para cada una de las fracciones de volumen de la fase secundaria en cada paso de tiempo. El esquema implícito se puede utilizar tanto para cálculos dependientes del tiempo como para cálculos de estado estacionario.

3 SISTEMA ANALIZADO

Se simuló la condición de operación normal y la de slug de líquido. Durante la operación normal tanto gas como líquido entran en los sistemas (Piping y Slug-Catcher). Durante la

condición de slug ingresa un gran caudal de líquido, permitiendo al sistema que vaya agotando el gas que queda en el sistema. El equipo tiene como restricción que solo puede agotar un máximo caudal de líquido, que viene dado por el de la operación normal. Esto es así por la dinámica del sistema de control del Slug-Catcher, ya que en caso de que se produzca un Slug de líquido, el sistema de control no responde inmediatamente a dicha perturbación como para poder desagotar el líquido, debiendo funcionar como un acumulador.

La capacidad del Slug-Catcher para acumular y desagotar un gran Slug de líquido consiste en que el líquido se distribuya en los dedos (caños de gran diámetro) sin dirigirse a la zona del gas. Si se dirigiera líquido a la zona de gas, significaría que el slug catcher se encuentra subdimensionado para esa condición.

3.1 Condiciones Operativas

Se considera una capacidad de drenaje equivalente a la cantidad de líquido que ingresa en condiciones operativas normales. De esta manera, considerando la composición del fluido, P y T, puede determinarse con HYSYS las cantidades de líquido y gas que entran y salen del sistema.

En la siguiente [Tabla 1](#) se muestra la composición del fluido informada por el cliente

Cromatografía - % Molar	
Gases inertes	1.14
C1	63.5
C2	16.03
C3	10.2
C4	6
C5	2.27
C6	0.61
C7	0.21
C8+	0.04

Tabla 1: Composición del fluido informada por el cliente

Con estos datos se calcularon las composiciones y propiedades de ambas fases,

Se puede realizar en HYSYS, que utiliza el modelo de [Beggs et al. 1979](#), un análisis de régimen de flujo. Considerando la utilidad “Pipe-Segment” es posible estimar el hold-up (retención) de líquido en el ducto aguas arriba del Slug-Catcher, presentado en la [Tabla 2](#):

Fracción de vapor	0.84
Regimen de flujo	Intermitente
Liquid-HoldUp	0.12
Liquid Velocity	0.39 m/s
Gas Velocity	12.9 m/s

Tabla 2: Régimen de flujo calculado con HYSYS

El Hold-Up y régimen de flujo calculados anteriormente sirven para establecer condiciones de borde lo más cercanas a la realidad a la entrada del piping aguas arriba del sistema de Slug catcher y establecer condiciones de borde más precisas. Dicho régimen de flujo puede continuar así o modificarse en función de los cálculos más exactos proporcionados por el análisis CFD en el piping de alimentación al Slug-Catcher. A partir de los resultados de salida de piping, se estableció la condición de entrada para el Slug-Catcher.

3.2 Condiciones de Contorno

En las siguientes [Figura 1](#) y [Figura 2](#) se muestra el dominio analizado para el Slug-Catcher con las condiciones de contorno especificadas.

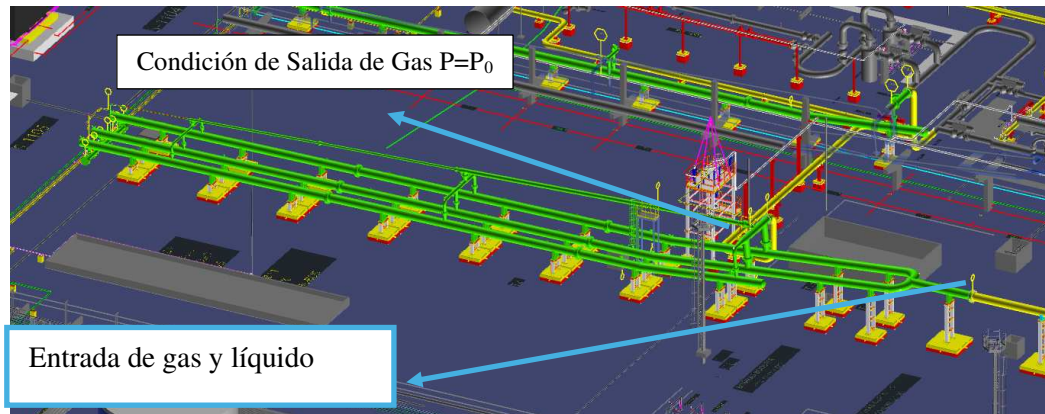


Figura 1: Dominio del Slug-Catcher. Condición de entrada y salida de Gas.

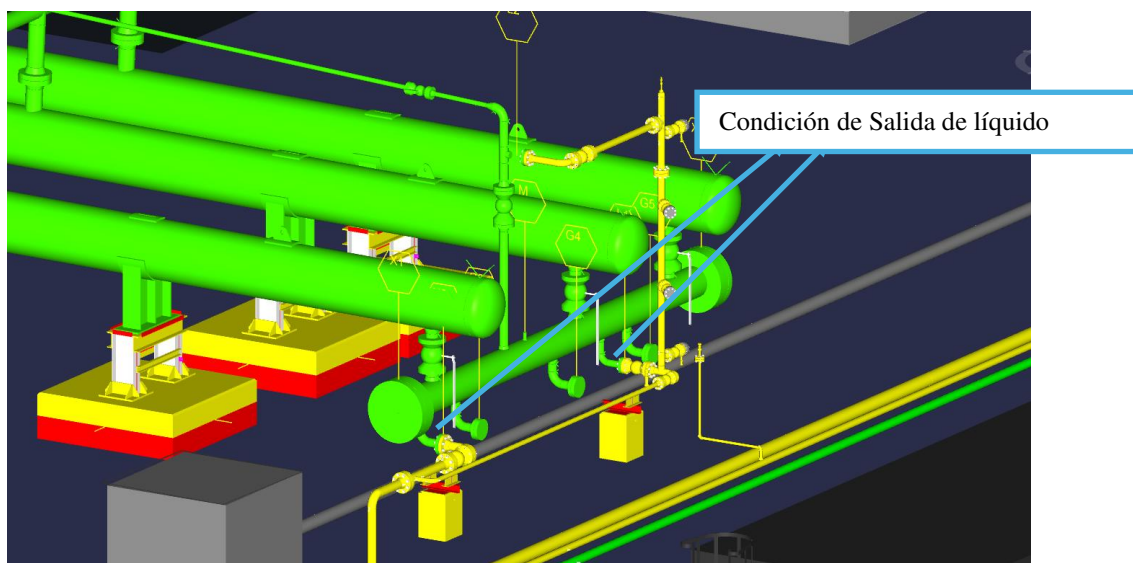


Figura 2: Dominio del Slug-Catcher. Condición de salida.

En la salida de gas, la condición establecida es de presión prescrita. La salida de líquido por los colectores se restringe al especificado por el proceso, condicionado a que no se vacíe el colector (para no producir inconsistencias en las condiciones de borde que puedan generar volúmenes de líquido negativo) Sin embargo, una vez alcanzado el volumen mínimo del acumulador, la salida de líquido es constante e igual la requerida por el proceso, por lo que se produce una acumulación en el equipo durante el evento de Slug.

3.3 Geometría y Mallado

En la [Figura 3](#) se muestra la geometría de un Slug-Catcher respectivamente

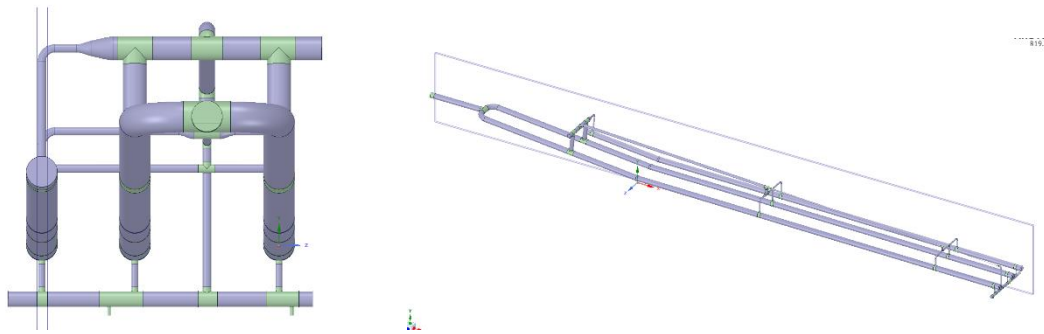


Figura 3: Vistas de la geometría del Slug-Catcher

En la [Figura 4](#) y [Figura 5](#) se muestra el detalle del mallado en la zona del Slug-Catcher. Se utilizó mallado tetra y hexaédrico. La cantidad de elementos implementada fue de 2.1 millones de elementos con una calidad ortogonal mínima de 0.25.

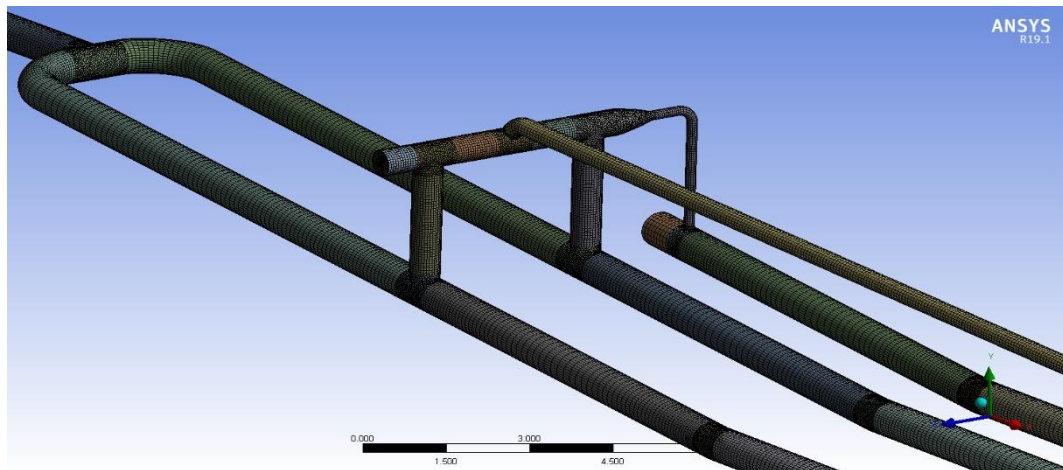


Figura 4: mallado del Slug-Catcher

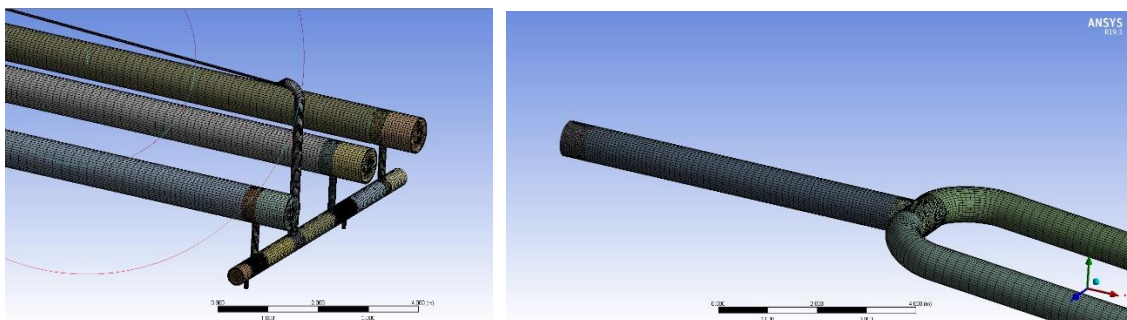


Figura 5: detalle del mallado del Slug-Catcher

4 RESULTADOS

4.1 Slug-Catcher. Condición normal de operación

En la [Figura 6](#) se muestra la fracción de líquido sobre la pared de Slug-Catcher una vez alcanzado el estado estacionario. En este momento, la cantidad de gas y líquido que ingresan equivale a la que sale por la zona del colector (líquido) y gas por la zona superior (no se registra salida de líquido por zona de gas). Se observa que el tercer dedo permanece solo con gas, ya

que solo puede llenarse por vaso comunicante una vez que el líquido no alcance a desagotarse correctamente, en la condición de Slug.

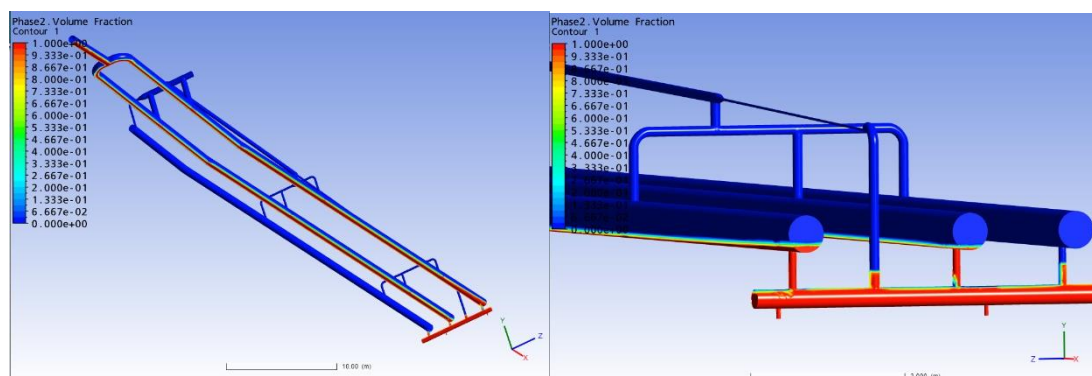


Figura 6: Fracción volumétrica de líquido sobre la pared del tubo.

En el estado estacionario, el volumen de líquido retenido se mantiene constante debido a que las entradas y salidas de gas y líquido se equiparan.

En la simulación se comprueba que el equipo funciona correctamente en la condición normal de operación.

4.2 Slug-Catcher. Condición de slug

La condición inicial para la simulación del evento de Slug se obtiene a partir del volumen retenido en el Slug-Catcher por la operación normal, que es estable en el tiempo (alcanza un estado estacionario).

Dado que hay un mayor caudal de entrada que de salida, el llenado es total si no se toman medidas de control en el nivel de líquido. En la [Figura 7](#) se presentan algunos volúmenes de llenado del Slug-Catcher para distintos tiempos.

El volumen de líquido que debe ser retenido en la condición de Slug sumado al ya retenido en la condición normal superan al máximo admisible. Este estado de operación no es recomendable ya que, de prolongarse en el tiempo, si bien el equipo tiene margen de seguridad, puede eventualmente escapar líquido por la zona de gas, sobre todo en el momento que se reestablezcan altos caudales de gas con el Slug Catcher “inundado”. Esta simulación requirió 8000 segundos simulados para alcanzarse.

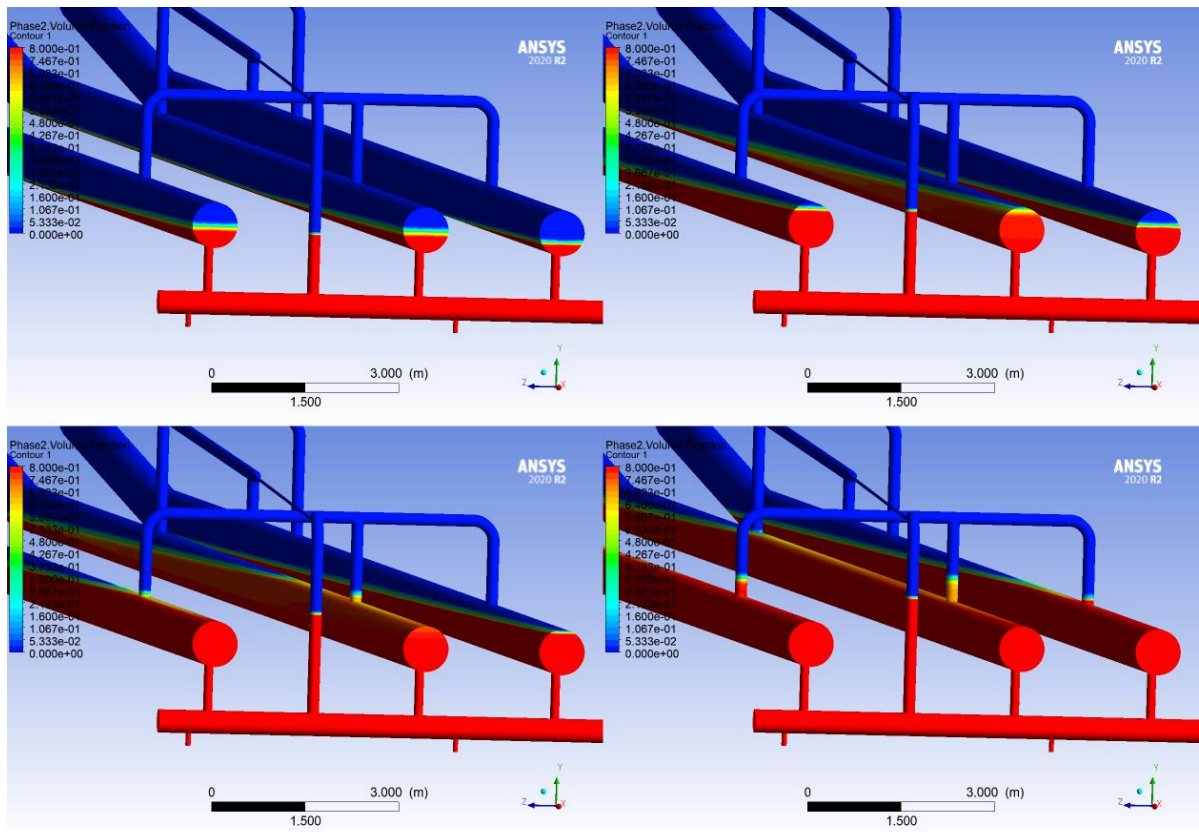


Figura 7: Distintas alturas de líquido, para los tiempos, de izq. a der. y de arriba abajo de: 900 seg, 2500 seg, 4100 seg, y 5750 seg.

4.3 Finalización del Slug – Volumen final:

Finalizado el tiempo de Slug, a 8000 seg, se supera el volumen máximo admisible y se produce un aumento muy grande en la presión de salida de líquido. Si bien aún no llega el líquido hasta la salida principal de gas, se está muy cerca de dicha situación (inundación).

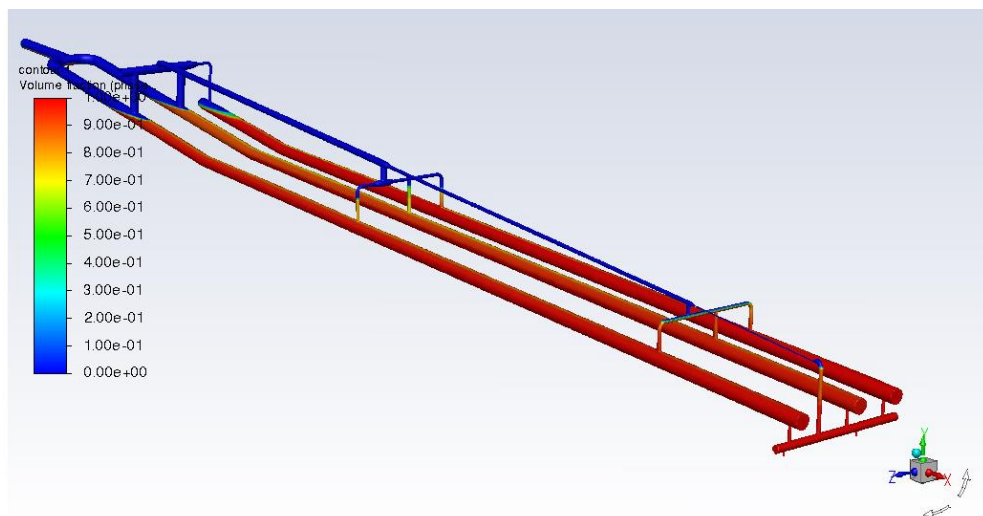


Figura 8: Esquema de llenado del Slug-Catcher, para fin de Slug, 8000 seg.

En la [Figura 8](#) se muestra una instantánea del nivel de llenado al finalizar el Slug.

Si se continua con el llenado del Slug-Catcher con el mismo caudal, superando el tiempo del Slug, se tapan las salidas principales de gas. Si posteriormente se continua con dicha operación, eventualmente saldría el excedente de líquido por la salida superior.

5 CONCLUSIONES

- La distribución de flujo tanto de gas como de líquido es pareja para ambos Slug-Catchers, por lo que ambos equipos tienen una carga de trabajo equilibrada, tanto en la operación normal como de Slug.
- El modelo de CFD no predice líquido arrastrado por el gas, la distribución de flujo es uniforme y segregada en todos los casos.
- La condición que tiene mayores velocidades de gas es la de operación normal y la que puede arrastrar más líquido a la salida.
- Si bien se alcanza a procesar el volumen en la condición de Slug, queda muy cerca de la zona de “inundación”, que arrastraría gran cantidad de líquido por la zona de gas.
- El volumen de inundación se alcanzaría en el hipotético caso de que la condición de Slug se extendiera 200 segundos más.
- En la simulación el equipo alcanza a contener el líquido, pero queda al límite, por lo que no es recomendable trabajar en dicha condición y se recomienda tomar medidas de mitigación, como un control más activo de la altura de columna de líquido en el equipo o piggeo con bypass.
- Se debe verificar si el equipo que recibe el gas que se encuentra aguas abajo del Slug-Catcher puede procesar este arrastre de líquido.
- Cuando se reestablece la condición normal de operación se asume que se mantiene el nivel de líquido. Esta aproximación es conservativa, ya que en la realidad el Slug-Catcher se va a ir drenando con el tiempo luego del evento de Slug.

REFERENCIAS

- Ansyes Fluent Theory Guide, 2024, ANSYS INC
- Beggs, H.D. and Brill, J.P., “A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes,” J. Pet. Tech. (May 1973) 607-617
- Perry chemical engineers' handbook, 2008, McGraw-Hill Companies.