

Estudio Fluidodinámico del Sistema de Distribución de Flujo Multifásico en el Ingreso a un Tren de Aeroenfriadores.

Marcela Ravicule¹, Agustín Marticorena, Eduardo Carosio², Roberto Benini²

¹ Y-TEC (YPF Tecnología S.A.) - Argentina
E-mail: marcela.ravicule@ypftecnologia.com
² YPF S.A.

Sinopsis

Se realizó un estudio fluidodinámico mediante CFD (Computational Fluid Dynamics) del sistema de cañerías de ingreso a los aero enfriadores (AC) de la unidad de Isomax que opera la Refinería Lujan de Cuyo en Mendoza. El sistema distribuye una corriente de proceso trifásica caliente (gas-hidrocarburo-agua) proveniente del efluente del reactor en un tren de diez intercambiadores de calor. El caudal de cada fase debe ser distribuido proporcionalmente entre los AC, para mayor eficiencia operativa, y para asegurar que cada uno de los haces tubulares del equipo recibe la misma cantidad de agua de lavado, con el propósito de remover los depósitos de sales de amonio que se forman. En esta unidad se han detectado pérdidas de espesores en los tubos de los AC debido a corrosión bajo depósito, siendo necesarias frecuentes intervenciones en los equipos para reparación y/o reemplazo. Se destaca que, según reporta la bibliografía, las consecuencias de una pérdida han llevado a siniestros graves en otras unidades similares. La configuración asimétrica del sistema de cañerías de ingreso parece ser la causa principal de la mala distribución de caudales, originando los problemas de corrosión.

Las características del flujo trifásico estudiado son: alta velocidad, alta presión, pequeña fracción de líquido y bajo porcentaje de agua. Bajo estas condiciones es posible representar al flujo trifásico gas-líquido-líquido, como un sistema bifásico gas-líquido, cuyas estructuras son mucho más simples de estudiar que en el caso de flujo de tres fases.

En las simulaciones gas-líquido se utilizó un modelo VOF (Volume of Fluid) disponible en el software comercial ANSYS Fluent. El modelo es capaz de predecir los diferentes regímenes de flujo para tuberías horizontales y verticales, así como la separación gas-liquido en los cambios de dirección y en las conexiones T. Los resultados se validaron utilizando correlaciones y mapas de patrones de flujo en tuberías disponibles en bibliografía.

Se verificó la distribución no-uniforme de flujo. Se identificaron puntos críticos en el sistema de cañerías. Se logró un nuevo diseño del sistema de cañerías de ingreso a los AC trabajando en conjunto con los departamentos de procesos y de ingeniería de la refinería. La nueva configuración tiene en cuenta limitaciones de espacio en la unidad y la ubicación de estructuras de soporte existentes, será implementada en el próximo paro de la unidad.

Introducción

Se estudia el flujo multifásico (gas – líquido – líquido) en un sistema de cañerías de distribución de flujo que alimenta un tren de condensación compuesto por 10 aerofriadores. Se trata de la corriente de salida de un reactor de Hidrocracking ubicado en el Complejo Industrial Luján de Cuyo (unidad Isomax).

La fase gaseosa es principalmente hidrógeno y representa alrededor del 90% del volumen de flujo total, es decir que el sistema tiene baja carga de líquido. Las dos fases líquidas son: agua e hidrocarburos. Los hidrocarburos, tanto líquidos como gaseosos, provienen del reactor. La fase acuosa corresponde principalmente al agua de lavado que se inyecta en distintos puntos de la cañería.

El efluente gaseoso del reactor para este tipo de unidades presenta H_2S y NH_3 en su composición. Al ponerse en contacto con la superficie fría del aerofriador se deposita NH_4HS y NH_4Cl en estado sólido que propicia el ataque corrosivo bajo depósito. Esta situación puede tener consecuencias graves. La inyección de agua de lavado en las cañerías tiene el propósito de aumentar la solubilidad de las sales en la fase líquida para evitar su deposición.

En la unidad bajo análisis se ha reportado que la mitad de los haces tubulares del aerofriador presentan problemas de corrosión severa, lo que indicaría una deficiente distribución del agua de lavado. La corrosión genera costos de mantenimiento elevados porque obliga a reemplazar equipos o partes de ellos con mucha frecuencia, y puede llevar a paradas de planta no programadas. Por otro lado, dadas las condiciones operativas (alta presión y temperatura) existe riesgo de fallas catastróficas capaces de originar fuegos o explosiones. El American Petroleum Institute (API) y tecnólogos como Chevron y UOP han estudiado estos problemas. A raíz de dichos estudios se elaboraron buenas prácticas de diseño y operación para controlar la corrosión. Una de sus recomendaciones, que en este caso no se cumple, consiste en adoptar un arreglo simétrico de cañerías de distribución.

Los flujos multifásicos resultan más difíciles de caracterizar que los monofásicos debido a que ocurren diversos fenómenos de interacción entre las fases. Las herramientas de mecánica computacional de fluidos (CFD) incorporan en sus códigos varios modelos multifásicos. Un estudio CFD permite contemplar el amplio rango de variables geométricas, caudales, propiedades físicas y patrones de flujo que pueden encontrarse en casos de aplicación real. Equivale a construir un prototipo virtual tridimensional en el que se pueden evaluar velocidades u otras variables de interés. Los resultados numéricos pueden ser visualizados en el espacio y el tiempo de manera gráfica para comprender el fenómeno y observar tendencias sin recurrir a costosas experimentaciones.

Mediante la utilización del software de CFD ANSYS Fluent se estudió un flujo trifásico del tipo líquido-líquido-gas. Se elaboró un diagnóstico de falla, validado con los antecedentes de planta y se rediseñó el sistema a fin de asegurar una distribución homogénea de cada fase entre los 10 AC.

Desarrollo

La Figura 1 muestra el sistema de cañerías estudiado. Las cañerías distribuyen un flujo multifásico del tipo gas-líquido-líquido a un tren de condensación compuesto por 10 aerofriadores.

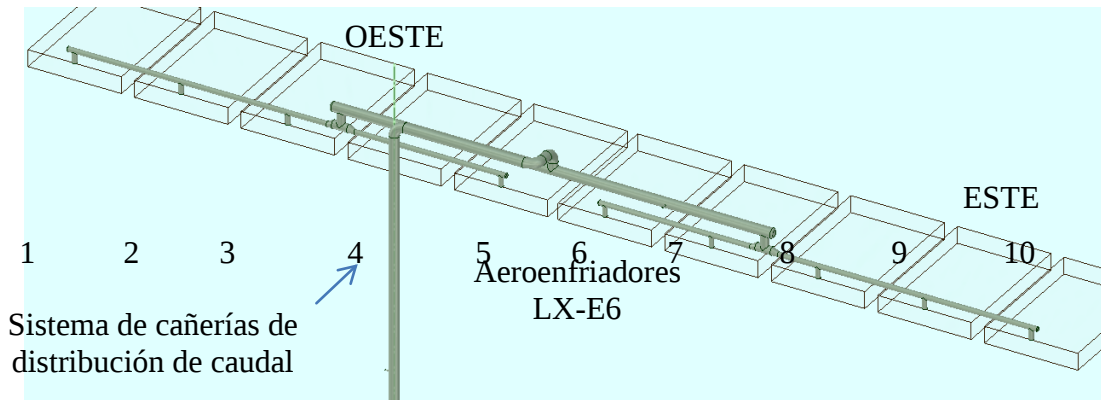


Figura 1 – Sistema de cañerías de distribución de caudal

La fase gaseosa es principalmente hidrógeno, el caudal volumétrico de la fase gas es el 90% del caudal total, es decir que se trata de un sistema de baja carga de líquido. Las fases líquidas son: una mezcla de hidrocarburos y agua. La fase líquida de hidrocarburos es una corriente de procesos. La fase agua constituye alrededor del 10% del líquido total, está compuesta por agua de lavado que se inyecta en las cañerías para evitar problemas de corrosión. Las cañerías operan a alta presión (140 kg/cm²).

Originalmente, la cañería tenía sólo un cambio de dirección antes de la T principal (Ver Figura 2 derecha). El tramo de 4 metros horizontal estaba ubicado en el mismo plano de los distribuidores. El cambio de este tramo de cañería fue realizado durante una parada de la unidad ante evidencias de que el flujo de líquido se dirigía preferentemente hacia el Este.

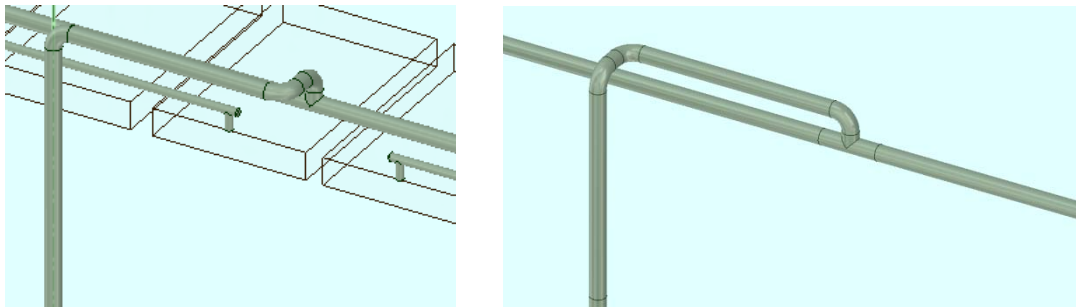


Figura 2 – Modificación en la conexión a la T principal, geometría actual (izquierda) y geometría original (derecha)

Características del modelado mediante CFD.

Para las simulaciones CFD se utilizó el código ANSYS Fluent. Se tuvieron en cuenta datos de planta, información de las condiciones operativas y resultados de las simulaciones con HYSYS.

En un flujo trifásico del tipo líquido-líquido-gas, como el caso actual, las fases líquidas inmiscibles pueden estar: estratificadas, parcialmente dispersas o totalmente dispersas dependiendo de la velocidad y proporción de cada fase.

En este caso, la fracción de agua es baja (10% de agua en líquido total) y el caudal volumétrico de líquido total es bajo frente al de la fase gas (10% v/v de líquido en gas). A su vez, las velocidades en la línea principal son altas. La literatura consultada indica que bajo estas condiciones se espera

que el agua esté dispersa en la fase de hidrocarburos formando una emulsión inestable. Por este motivo, las fases líquidas inmiscibles de hidrocarburos y agua serán modeladas como una única fase líquida (emulsión inestable). Esta simplificación tiene las siguientes ventajas:

- Posibilidad de validar resultados con diversas correlaciones clásicas de flujo bifásico. Para flujos trifásicos no existen hoy en día correlaciones unificadas equivalentes.
- Los modelos bifásicos consumen menor cantidad de recursos computacionales.
- Se requieren menor cantidad de datos de entrada en el modelo numérico.

La metodología de simulación numérica utilizada fue V.O.F., disponible en ANSYS Fluent. Permite modelar flujos multifásicos con interfases definidas, como el caso de gas-líquido.

La Tabla 1 muestra las propiedades de los fluidos y las condiciones de entrada. Las propiedades de la fase líquida son propiedades promedio de las fases de hidrocarburos y agua ponderadas por concentración.

FASE	Líquida	Gaseosa
CAUDAL MÁSSICO (Tn/h)	111,6	46,8
DENSIDAD (kg/m ³)	650	25
VISCOSIDAD (kg/m s)	0,0029	0,000145

Tabla 1 – Condiciones de simulación

Para sistematizar el estudio, se dividió la geometría descrita en dos partes:

- Primera parte: Cañería principal y T principal hasta la entrada a cada distribuidor
- Segunda parte: distribuidores Oeste y Este.

CASO 1: Resultados en T principal, diseño actual.

La simulación de la primera parte comprende la cañería principal hasta la bajada a los distribuidores Oeste y Este. La Figura 3 muestra la fase líquida en distintos planos de corte dentro de la cañería en un instante determinado.

Se observa que existe flujo anular a lo largo del tramo vertical. Luego del primer codo a 90°, en el tramo horizontal se mantiene el flujo anular, pero con una concentración mayor de la fase líquida en el fondo de la cañería por efecto de la gravedad. Luego del tramo horizontal, antes de llegar a la T principal, la cañería sufre dos cambios de dirección prácticamente inmediatos, sin longitud suficiente para estabilizar el flujo. Esto genera un patrón de flujo en espiral para la fase líquida que hace que se dirija preferencialmente hacia el distribuidor Oeste.

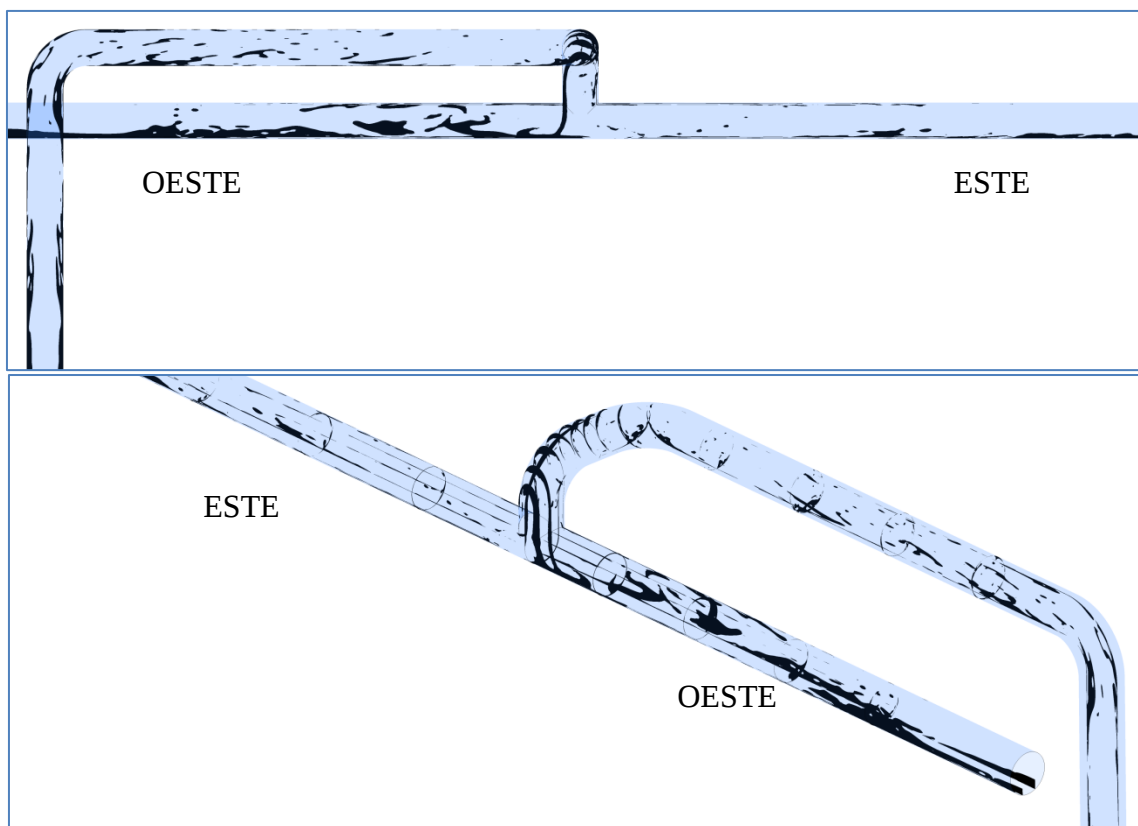


Figura 3 - Diseño actual, fase líquida en distintos planos de corte de la cañería

La distribución de caudal de la fase líquida es de 70% hacia la Oeste y 30% hacia el Este. El mayor caudal de líquido hacia el Oeste genera una restricción al flujo de gas en esa dirección, es decir que el gas se distribuye con una tendencia opuesta a la del líquido: 35% al Oeste y 65% al Este. Por lo tanto se obtienen altos caudales de líquido con bajos caudales de gas en el distribuidor Oeste y lo contrario en el Este.

La Figura 4 muestra las velocidades de gas en la cañería. En concordancia con lo explicado en el párrafo anterior, se observa que las velocidades hacia el distribuidor Oeste (de 3 a 5 m/s) son menores que hacia el Este (de 5 a 8 m/s).

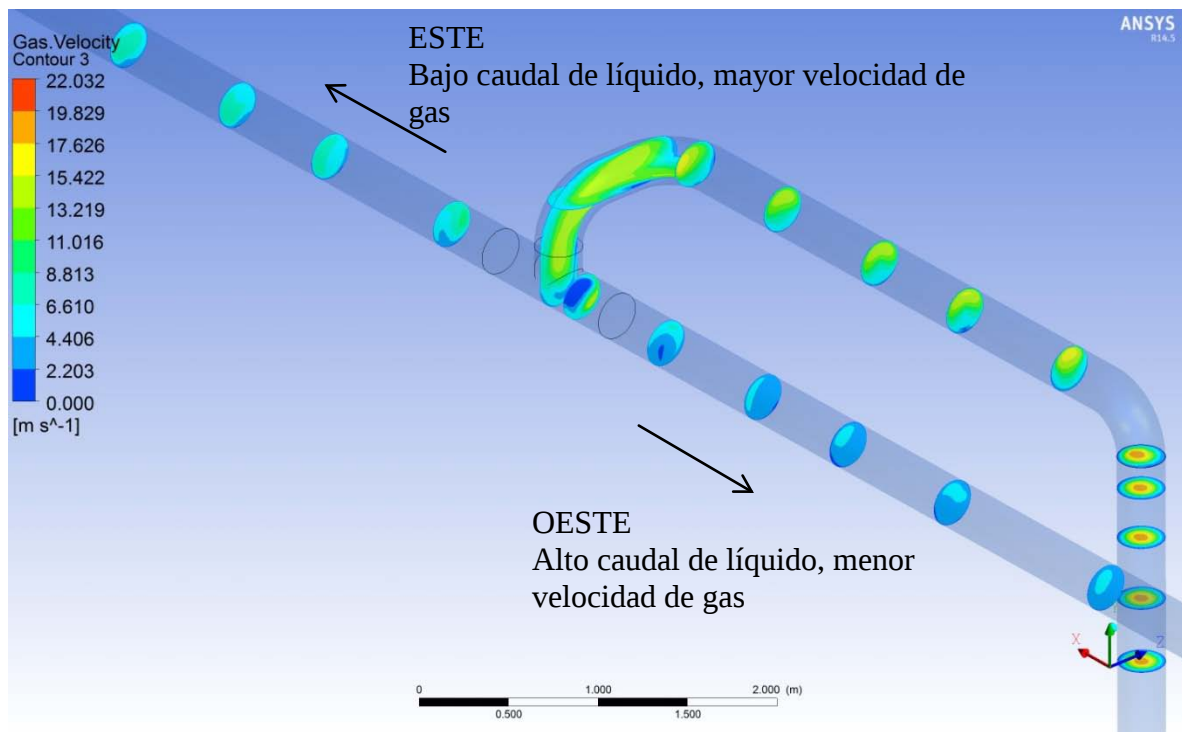


Figura 4 – Diseño actual, contornos de velocidad de gas

CASO 2: Resultados en T principal, diseño original

Originalmente, la cañería tenía sólo un cambio de dirección antes de la T principal. El tramo de 4 metros horizontal estaba ubicado en el mismo plano de los distribuidores. La modificación de este tramo de cañería fue realizada ante la sospecha de que el flujo de líquido se dirigía preferentemente hacia el Este.

Se simuló la configuración original de la cañería bajo las mismas condiciones de operación que el CASO 1.

Como resultado de la simulación del CASO 2, se verificó una situación contraria a la actual (ver Figura 5). La fase líquida se dirigía preferentemente hacia el Este (aproximadamente 70% al Este y 30% al Oeste). Este resultado concuerda con lo que se sospechaba antes de realizar la modificación.

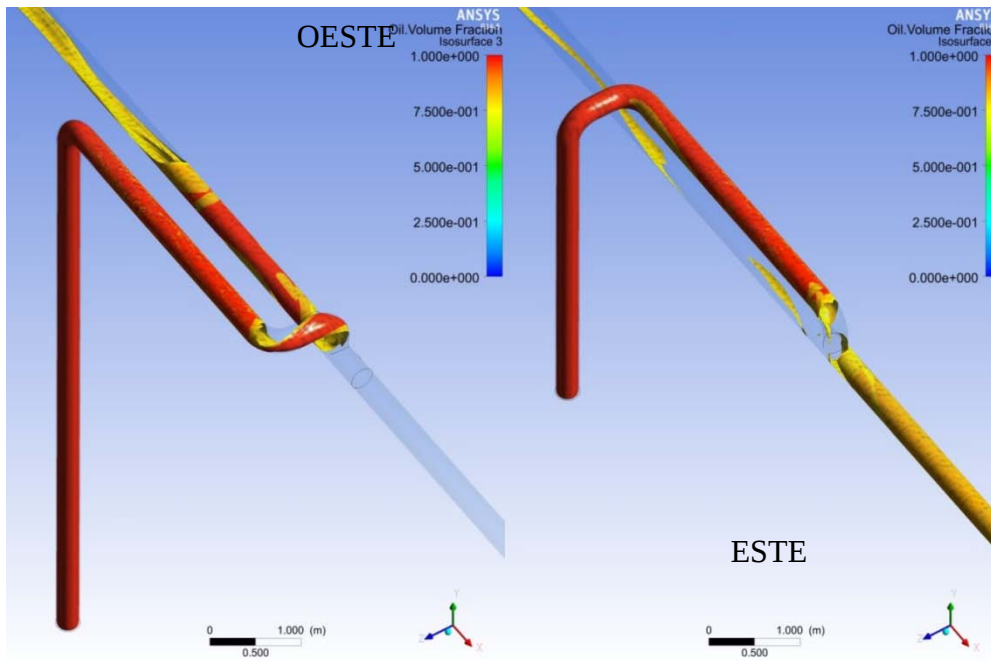


Figura 5 – Envoltentes de fase líquida para diseño actual (izquierda) y diseño original (derecha)

Resultados en distribuidores Este y Oeste para el CASO 1.

Se simularon por separado los distribuidores Este y Oeste. Las condiciones de entrada para cada caso fueron definidas a partir de los resultados de la simulación de la primer parte con la geometría actual.

Las Figuras 6 y 7 muestran la fase líquida en un corte de plano medio y la velocidad del gas en los distribuidores Este y Oeste.

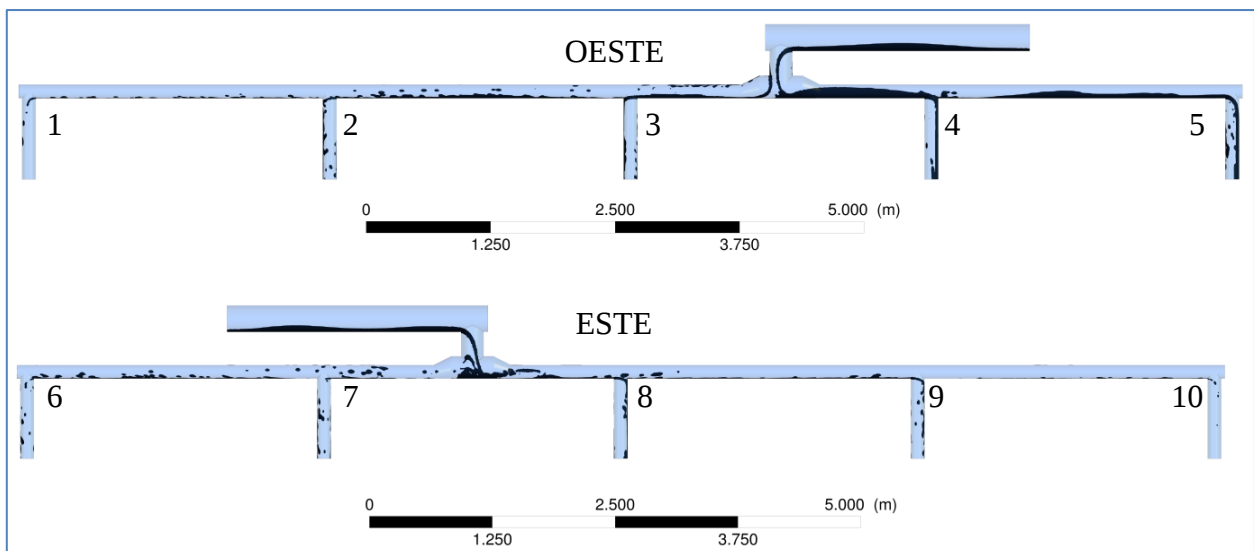


Figura 6 – Diseño actual, fase líquida en distribuidores Este y Oeste

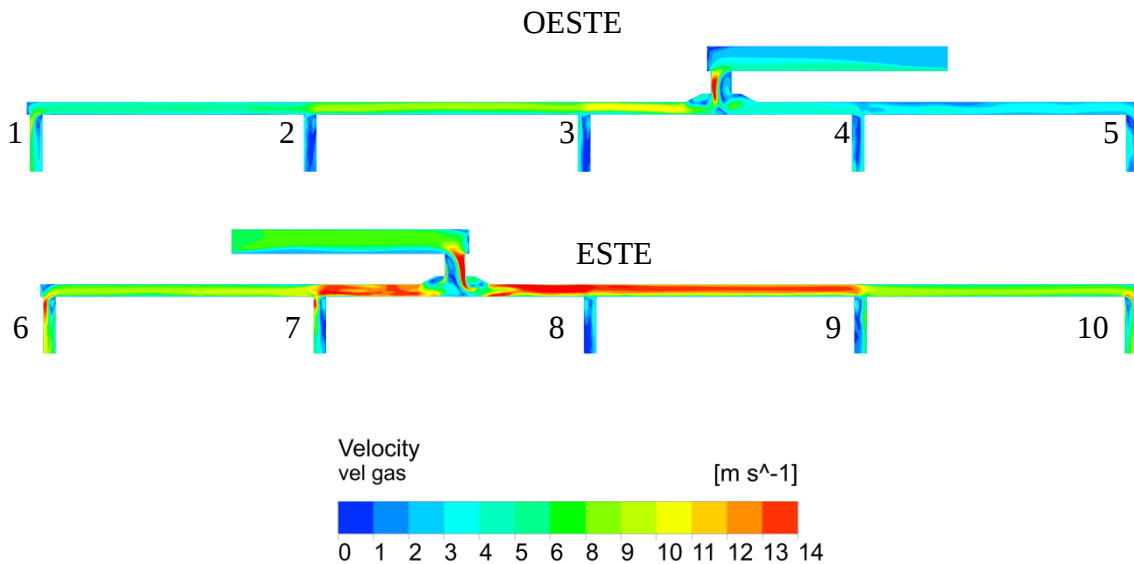


Figura 7 – Diseño actual, contornos de velocidad de gas en distribuidores Este y Oeste.

Se observa que en el distribuidor Oeste hay bajas velocidades. Entre 3 y 5 m/s en el colector de 6", y entre 2 y 4 m/s en las salidas. Hay mayor carga de líquido debido a la mala distribución en la T principal. Las salidas Nro. 4 y 5 se llevan mucho más líquido (más del 20% del total cada una); mientras que la 1, 2 y 3 llevan entre el 6% y 10% del líquido total.

Las bajas velocidades pueden hacer que el agua contenida en la corriente se estratifique y se distribuya de manera no uniforme junto con la fase de hidrocarburos.

En el distribuidor Este hay mayores velocidades, entre 5 y 14 m/s en el colector de 6", y entre 3 y 8 m/s en las salidas. La carga del líquido es más baja que en el distribuidor Oeste. Por cada salida fluye entre el 5% y 8% del total de líquidos. La distribución de líquidos es más uniforme debido a las altas velocidades de gas.

El gráfico de barras de la Figura 8 resume estos resultados, donde se observa la mala distribución de fase gas y líquido en cada salida. La distribución ideal, marcada con línea de puntos, es de un 10% de caudal de líquido y gas en cada una de las 10 salidas.

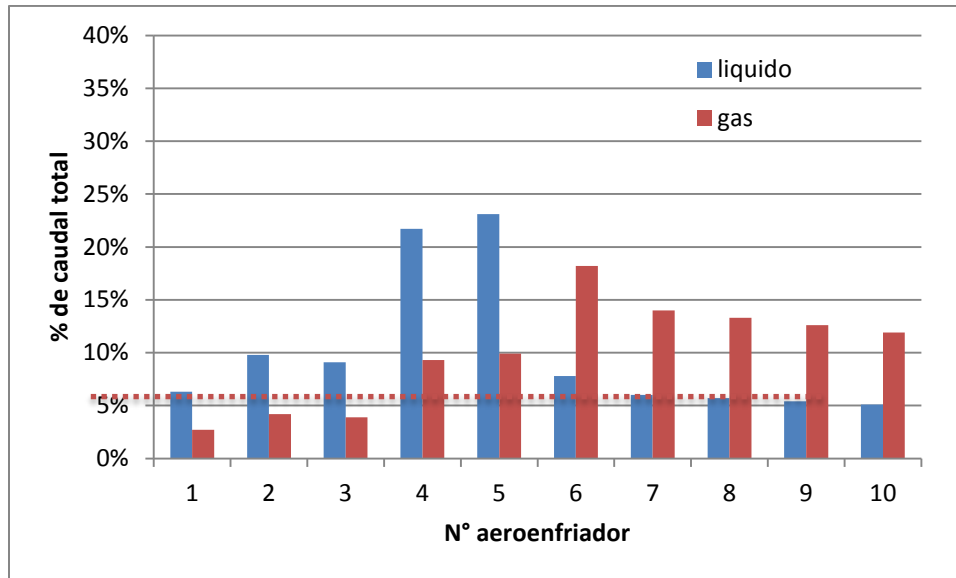


Figura 8 –Distribución porcentual de caudal de gas y líquido

CASO 3: Descripción del Nuevo diseño

Se aplicó la misma metodología de simulación mediante CFD y se analizaron resultados de varias alternativas de diseño para resolver la mala distribución de las fases. En esta sección se presenta solamente el diseño final, cuyo objetivo no sólo ataca los puntos críticos identificados, sino que además cumple con las restricciones de layout de la planta.

Para solucionar la mala distribución en la T principal, primer punto de conflicto, se propuso ubicar el ramo horizontal de la cañería principal a un nivel lo más bajo posible (ver Figura 9), tal que la cañería recorra un tramo vertical centrada respecto de los distribuidores antes de llegar a la T principal. La altura total de este tramo vertical se estableció en 9,2 m (incluyendo los codos de los extremos), corresponde a la altura máxima posible acotada por otras cañerías y equipos existentes.

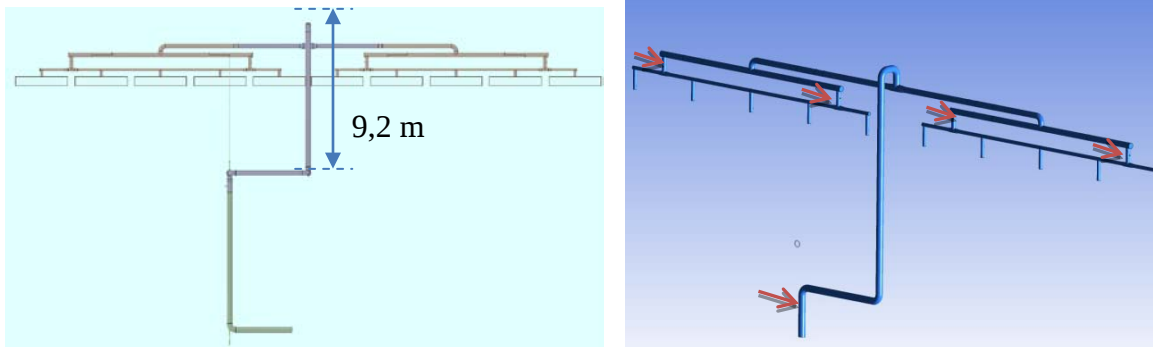


Figura 9 – Diseño propuesto

Se propuso también un nuevo diseño de distribuidores este y oeste, de tal modo que el sistema resulte lo más simétrico posible (ver Figura 10). La propuesta consiste en incorporar un colector intermedio de 10" para cada distribuidor, conectado con el colector final de 6" por medio de dos bajadas. En cada una de estas bajadas se instalará una inyección de agua, tal como se indican con flechas rojas en la Figura 9.

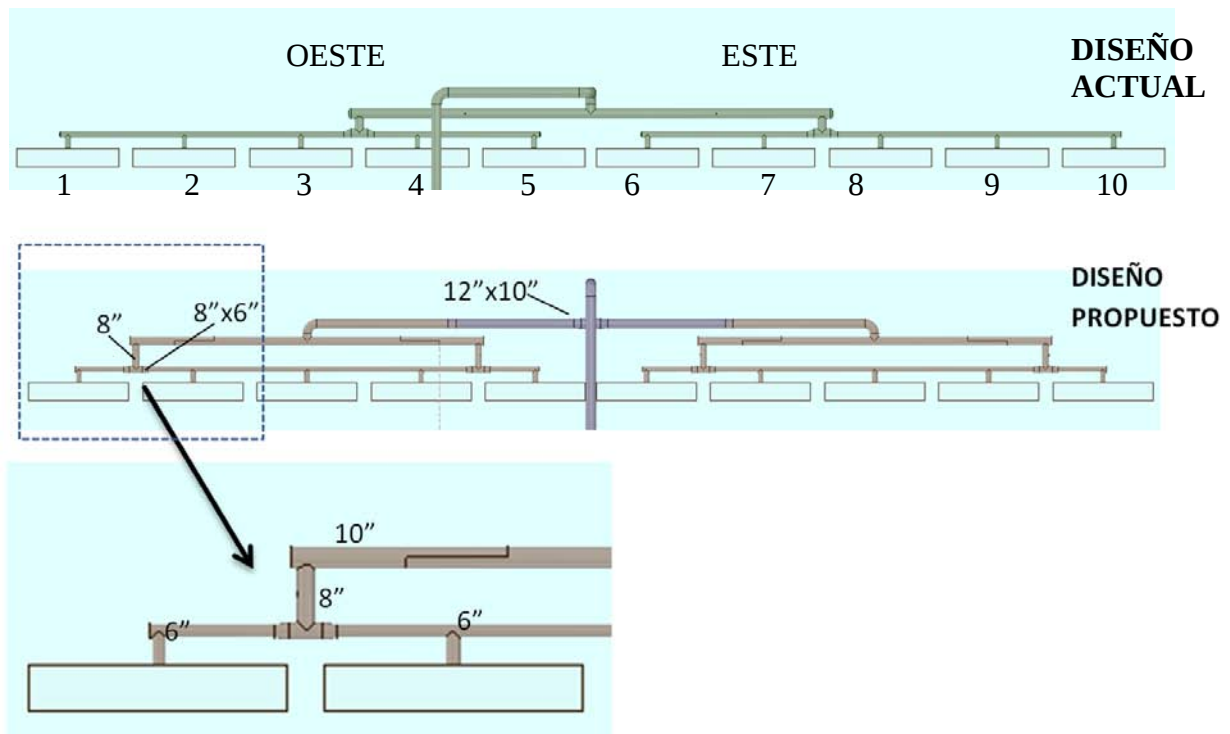


Figura 10 – Diseño propuesto, distribuidores Este y Oeste

Resultados en T principal.

La Figura 11 muestra la interfase gas-líquido para la sección de la cañería principal y la T principal. Se observa de manera cualitativa que la distribución en la T principal es pareja. Los resultados numéricos cuantitativos indican que es de 49,4% oeste y 50,6 este. Esto también se aprecia en la Figura 12, que muestra igual velocidad de gas hacia Este y Oeste (entre 8 y 10 m/s en la sección de flujo).

Se verificó que no existirá régimen slug (tapón) en el nuevo tramo horizontal. El patrón de flujo en esta sección es anular y estratificado con olas.

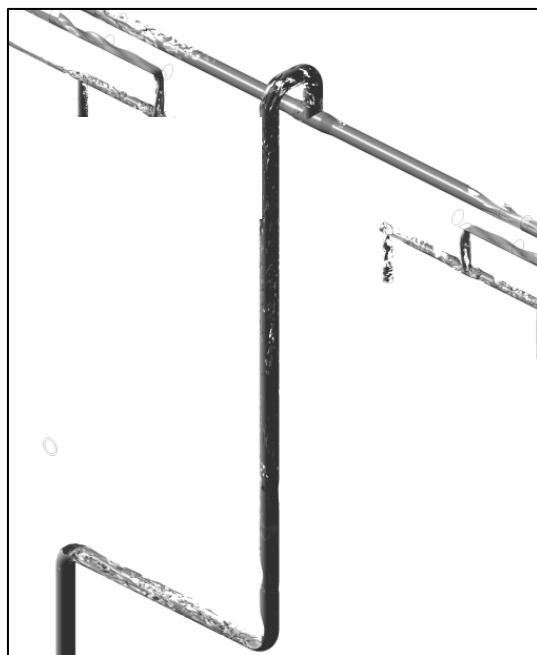


Figura 11 – Diseño propuesto, envoltente de fase líquida en T principal

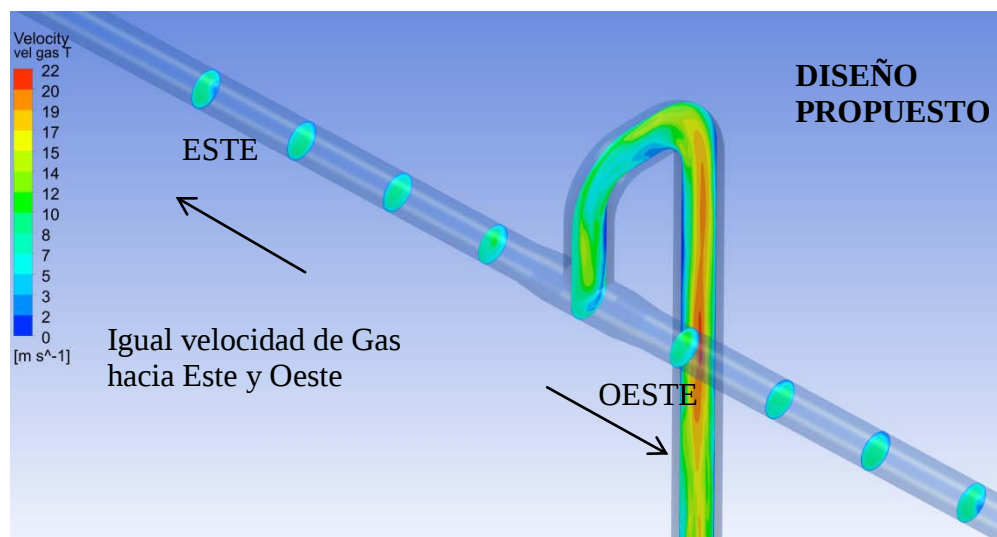


Figura 12 – Diseño propuesto, contornos de velocidad de gas en T principal

Resultados en distribuidores Este y Oeste

La distribución de líquido en cada salida mejora significativamente frente a los resultados de la situación actual, tal como se muestra en la Figura 13.

También se consiguen velocidades más uniformes en cada salida de los distribuidores Figura 14.

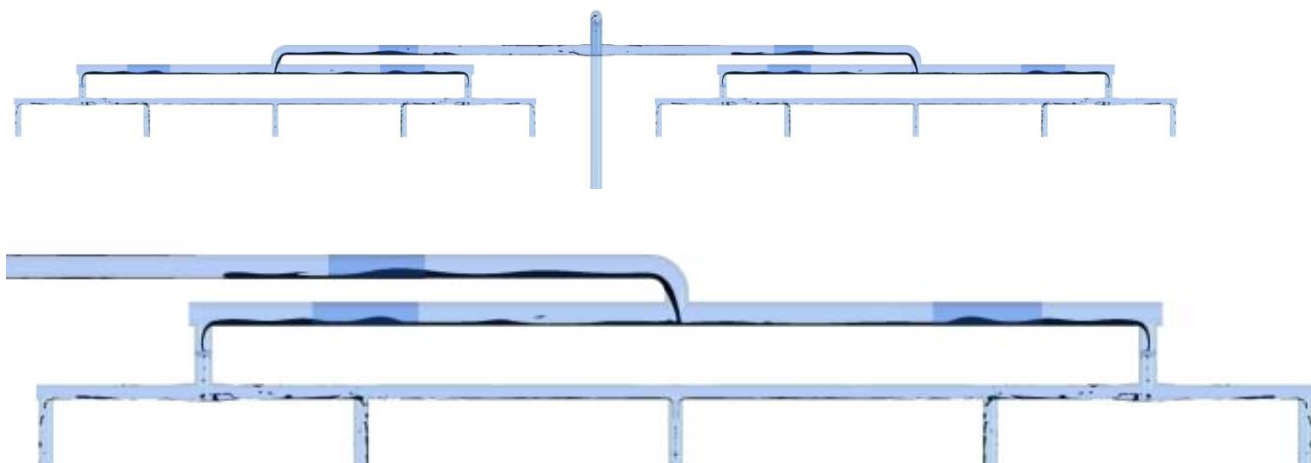


Figura 13 – Diseño propuesto, envoltente de fase líquida en distribuidores Este y Oeste

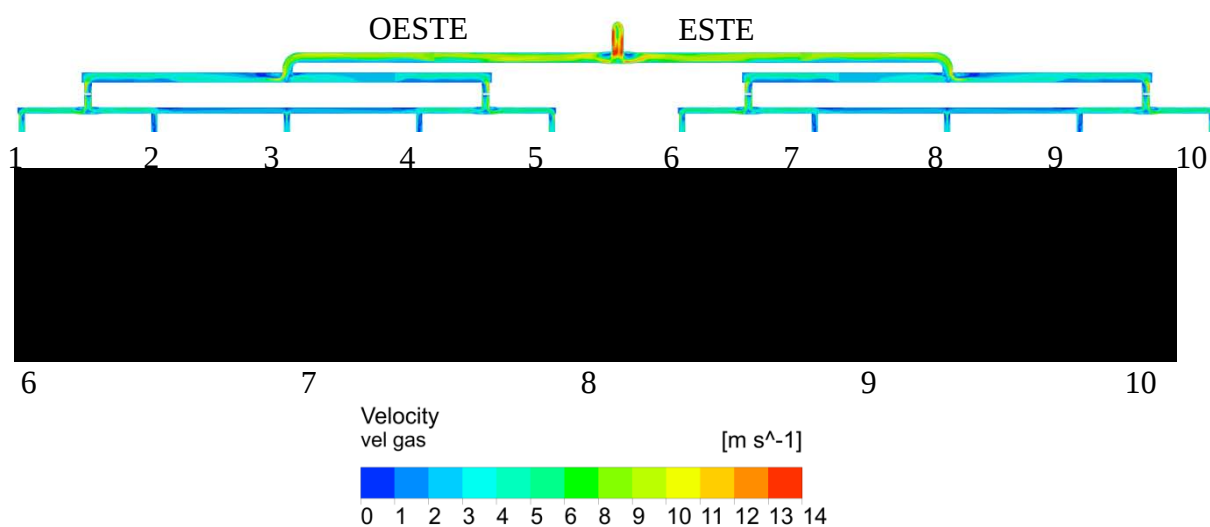


Figura 14 – Diseño propuesto, contornos de velocidad en distribuidores Este y Oeste

La Figura 15 es un gráfico de barras que muestra la nueva distribución de gas y líquido esperada con el nuevo diseño. Los nuevos valores son más uniformes y cercanos al valor ideal de 10%.

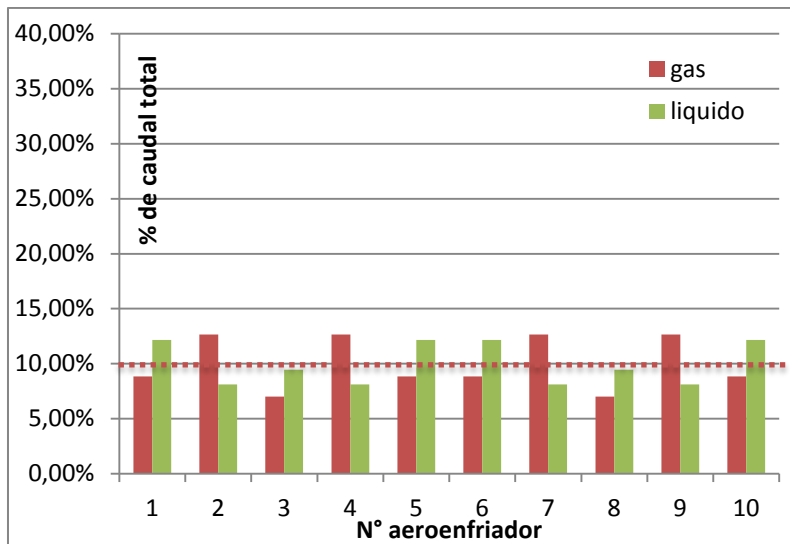


Figura 15 – Diseño propuesto, distribución porcentual de caudal de gas y líquido

Verificación de regímenes de flujo

La verificación de resultados numéricos se realizó comparando resultados en distintos tramos de las cañerías con correlaciones y mapas de patrones de flujo gas-líquido.

Tanto en las simulaciones como en las correlaciones se observa que el régimen es anular en los tramos verticales, y de transición de anular a estratificado con olas (stratified-wavy) en tramos horizontales.

La Figura 16 muestra los tramos de la cañería utilizados para la validación:

- Tramo A: 12" vertical (caudal total)
- Tramo B: 12" horizontal (caudal total)
- Tramo C: 10" horizontal (mitad del caudal total)
-

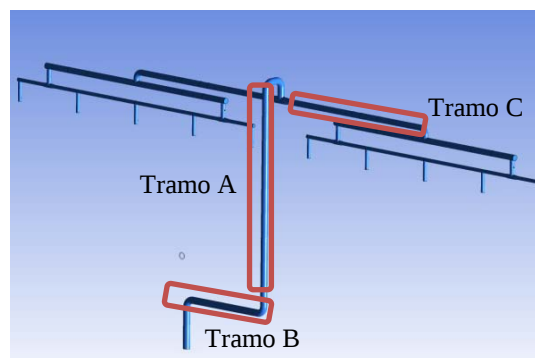


Figura 16 – Tramos de cañerías utilizados en la verificación de regímenes de flujo

Para flujo vertical se utiliza el mapa de Hewit y Roberts (1969). Las coordenadas del mapa de flujo se obtienen a partir de la cantidad de movimiento de cada fase. Se observa que el régimen de flujo obtenido en la simulación (anular) concuerda con el indicado en el mapa.

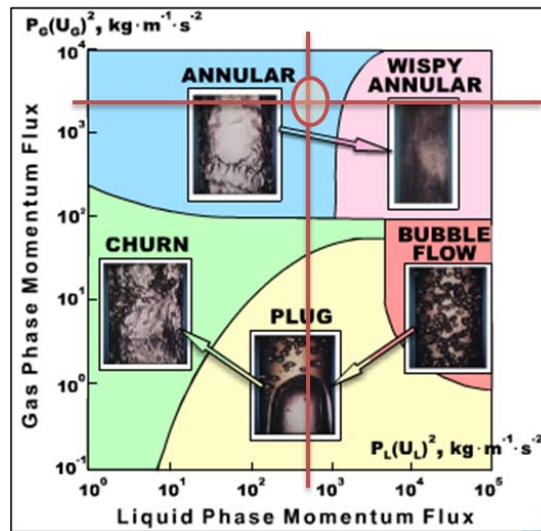


Figura 17 – Verificación régimen de flujo, Tramo A

Para flujo horizontal se utiliza el mapa de Taitel and Dukler (1976). Las coordenadas se calculan en función de los siguientes parámetros:

$$\chi^2 = \frac{(dp_F/dz)_L}{(dp_F/dz)_G}$$

$$F = \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G}} \frac{U_G}{\sqrt{Dg \cos \alpha}}$$

$$K^2 = F^2 Re_L = \frac{\rho_G U_G^2}{(\rho_L - \rho_G) Dg \cos \alpha} \frac{DU_L}{\nu_L}$$

$$T = \left[\frac{(dp_F/dz)_L}{(\rho_L - \rho_G) g \cos \alpha} \right]^{1/2}$$

Donde $(dp_F/dz)_L$ y $(dp_F/dz)_G$ son los valores de gradiente de presión para las fases líquida y gaseosa respectivamente, evaluadas en flujo monofásico en la cañería (calculadas con correlaciones clásicas de flujo monofásico); ρ_L y ρ_G son las densidades de cada fase, U_L y U_G son las velocidades superficiales de cada fase, D es el diámetro del tubo, ν_L la viscosidad cinemática del líquido, g la aceleración de la gravedad y α el ángulo de inclinación de la cañería.

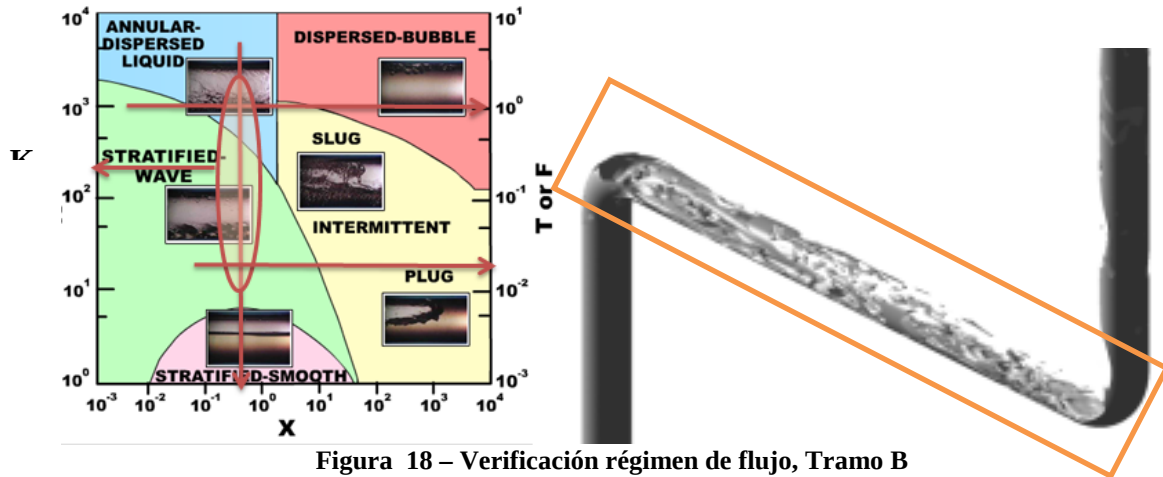


Figura 18 – Verificación régimen de flujo, Tramo B

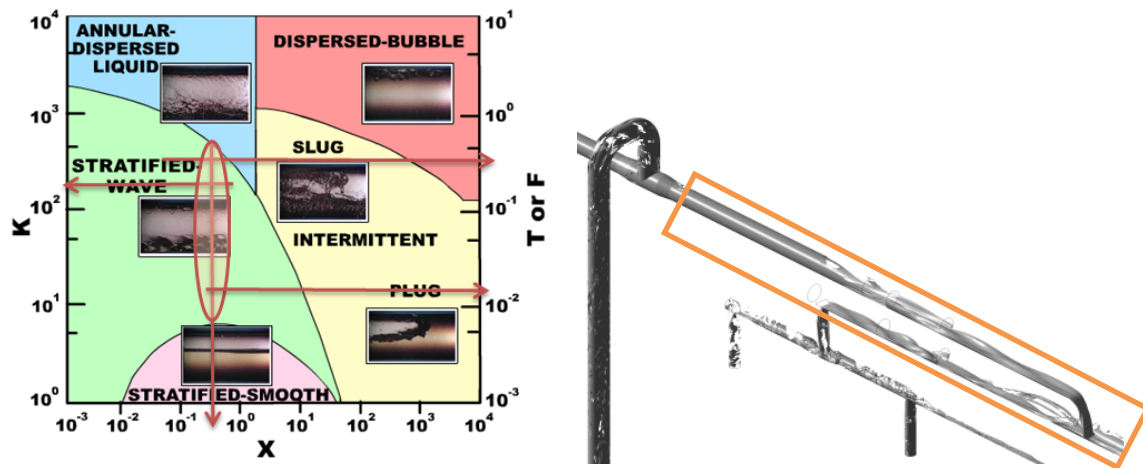


Figura 19 – Verificación régimen de flujo, Tramo C

Para cada caso se obtienen 3 puntos, dados por K, T y F. En el caso de 12", el mapa indica que el flujo es entre anular y estratificado con olas. En el caso de 10" el mapa indica que el flujo es estratificado con olas. Los resultados de la simulación concuerdan con lo indicado en los mapas.

Para verificar que no se trabaja en régimen de slug en los tramos horizontales, se compara los resultados con una compilación de diversos autores realizada por Reiman. En esta compilación se trazan curvas de transición de régimen anular-slug en función de las velocidades superficiales de gas y líquido. Los puntos operativos que caen a la izquierda de las curvas corresponden a régimen slug. Se observa que las curvas de los distintos modelos difieren entre sí no sólo en magnitudes sino en tendencia. Sin embargo, los puntos operativos del caso estudiado se encuentran fuera de la región de slug para cualquiera de las curvas.

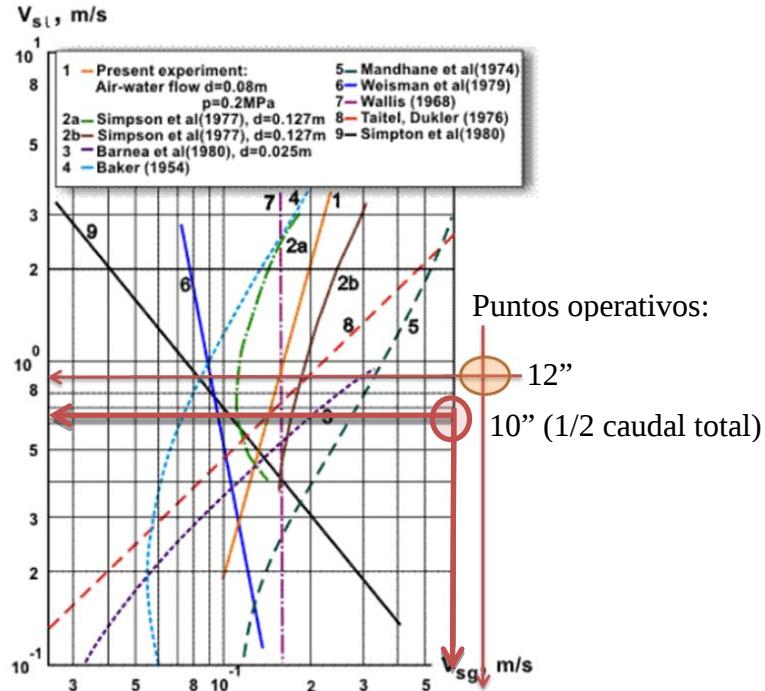


Figura 20 – Verificación de ausencia de régimen Slug en tramos horizontales

Conclusiones

Actualmente en la primera T de la línea principal existe una distribución asimétrica del flujo por fases. Se observan altas velocidades de gas y baja carga de líquido en el distribuidor Este, mientras que en el Oeste ocurre lo contrario.

En el diseño original de la cañería principal ocurría un efecto contrario al que ocurre actualmente: altas velocidades de gas y baja carga de líquido en el distribuidor Oeste.

En el distribuidor Oeste, los caudales son muy variables. Se registran mayores caudales en las salidas 4 y 5. Las bajas velocidades de gas pueden hacer que haya estratificación de agua de lavado en la fase orgánica y por ende una mala distribución de agua.

En el distribuidor Este la alta velocidad de gas genera una distribución más uniforme en cada salida, pero con caudales de líquido bajo y caudales de gas altos

El nuevo trazado de las cañerías propuesto muestra una distribución uniforme en T principal. Adicionalmente se consiguen mejoras en la distribución de caudal de gas y líquido hacia cada aroenfriador, con valores cercanos al valor ideal de 10% en cada salida. Las velocidades de gas en los distribuidores Este y Oeste resultan más uniformes

Los nuevos puntos de inyección de agua de lavado están más cerca de los equipos, por lo tanto se espera que las operaciones de lavado frecuente sean más efectivas.

Bibliografía

- Experimental Study on the Flow Regimes and Pressure Gradients of Air-Oil-Water Three Phase Flow in horizontal Pipes. Luai M Al-Hadhrami et.al. CER, King Fahd University of Petroleum and Minerals, SAudi Arabia.
- An experimental study of low liquid loading gas-oil-water flow in horizontal pipes. H Dong, H Q Zhang, C Sarica; University of Tulsa, USA
- Identification and Clasification of New Three-Phase Gas/Oil/Water Flow Patterns Keskin y Zhang, Univertisy of Tulsa.
- Intermittent Three-Phase Flow of Oil, Water and Gas in Horizontal Pipes, M. NtJdler and D. Mewes. Institut fiir Verfahrenstechnik, Universitiit Hannover; Hannover, Germany
- www.thermopedia.com; Gas-Liquid Flow; Hewitt, Geoffrey F.
- Multiphase Flow Handbook, Clayton T.Crowe
- ANSYS user manual