



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**SIMULACIÓN Y ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DE  
REDES DE RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE DE LA  
PRODUCCIÓN EN RÉGIMEN TRANSITORIO DEL ACTIVO  
ABKATUN .**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL  
TITULO DE INGENIERO PETROLERO**

**PRESENTA:**

**MARTHA ELENA ARGÜELLES  
DOMÍNGUEZ**

**DIRECTOR DE TESIS: M.I. JOSÉ ÁNGEL GÓMEZ  
CABRERA**

**MÉXICO D.F CD. UNIVERSITARIA,, JUNIO DE 2008**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **AGRADECIMIENTOS:**

A Dios, por permitirme vivir, conocerlo, por estar a mi lado en todo momento.

**A LA MEMORIA DE MIS PADRES:** Carmen Domínguez y Cirilo Argüelles a quienes extraño tanto y siempre los tengo en mi mente y mi corazón, gracias por su cariño y su ejemplo de vida que me dieron.

**AMIS HERMANOS:** Josefa, Tina, Emilio Celestino, Valentín y José Luís gracias por su apoyo, los quiero.

**A MIS SOBRINOS,** Claudia, Citlali, Carmen, Ricardo y Martha.

**A MIS AMIGOS.** Ruth, Maru, Arturo y Oscar.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, gracias por mi formación profesional.

A mis profesores de la Facultad de Ingeniería, Al Instituto Mexicano del Petróleo y a scandpower Petroleum Technology.

Agradezco al M.I. José Ángel Gómez Cabrera, por ser mi director, por su apoyo, espero contar con sus consejos en mi vida profesional y por su confianza.

Al Ing. Manuel Villamar Viguera, por sus asesorías y por apoyarme en todo momento y por su amistad.

Al M.I. Mario Becerra Zepeda, esperando su pronta recuperación.

Al M.I. Carlos Balderas Joers. por su apoyo en esta tesis y en sus clases.

A la Ing. Maria Isabel Villegas Javier, gracias por su apoyo en este trabajo.

Al M. I. Octavio Reyes Venegas, por su asesoría y por su apoyo en el desarrollo de este trabajo.

# SIMULACIÓN Y ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DE REDES DE RECOLECCIÓN Y TRANSPORTE DE LA PRODUCCIÓN EN RÉGIMEN TRANSITORIO DEL ACTIVO ABKATUN .

## INDICE

Introducción.	1
<b>Capitulo I</b>	
Descripción de las redes de recolección	2
<b>Capitulo II</b>	
Creación de tabla de propiedades	6
<b>Capitulo III</b>	
Simulación en régimen transitorio	10
III. 1 Modelo de dos fluidos	13
III.2 El modelo OLGA extendido, de flujo de dos fluidos	14
III.2.1 Ecuaciones de la conservación de la masa	14
III.2.2 Ecuaciones de la cantidad de movimiento.	15
III.2.3 Ecuación del flujo de las gotas de líquido	15
III.2.4 Ecuación combinada de cantidad de movimiento del gas y gotas de líquido	16
III.2.5 La ecuación de energía	19
III. 3 Cálculos térmicos	20
III. 3.1 Propiedades de los fluidos y transferencia de fase.	20
III.3.2 Transferencia de masa en la interfase	21
III.4 Esquema de la solución numérica.	19
III.5. Descripción de régimen de flujo	23
III.5.1 Régimen de flujo separado	23
III.5.2 Factores de fricción	24
III.5.4 Arrastre y/o acumulación	26
III.5.5 Flujo distribuido	27
III.5.6 Transiciones de régimen de flujo	30
III.6 Comparación con experimentos en estado estacionario	31
III.7 Comparación con los experimentos dinámicos	32
III.8 Datos de inestabilidad de flujo por diferencias en elevación de la tubería	32
III.9 Datos de flujo de entrada transitorias	33
III.10 Comparación de los resultados de OLGA en el área de estudio	33
III.11 Resultados.	34

<b>capítulo IV</b> Construcción de Modelos de Simulación	39
<b>capítulo V</b> Modelos de simulación en Olga2000	40
<b>capítulo VI</b> Resultados de la simulación	44
VI.1 resultados de la red de Abkatún D	46
VI.2 Resultados de la red de Abkatún C	49
VI.3 Resultados de la red de Caan C	52
VI.4 Resultados de la red de taratunich	62
<b>capítulo VII</b> Simulación de alternativas de solución	76
Conclusiones y recomendaciones	104
Bibliografía.	105

## Introducción

En esta tesis se presenta el desarrollo y los resultados de la simulación en régimen transitorio de las redes de recolección y las baterías de separación del Activo Abkatún. El análisis en régimen transitorio aquí desarrollado es importante por el hecho de que el flujo multifásico es por naturaleza dinámico, mediante este análisis es posible observar comportamientos y tendencias que es imposible observar a través de la simulación en régimen estacionario.

Las redes de recolección que se simularon son las siguientes:

- La red del campo Caan
- La red de Abkatún-D
- La red de los campos Abkatún y Taratunich

Así como 15 pozos distribuidos entre estas redes. Para llevar a cabo la simulación de estos sistemas se empleó el simulador comercial *OLGA 2000*.

Como resultado del análisis de las simulaciones efectuadas se proponen varias alternativas que tienen por objetivo mejorar la operación de los sistemas de producción ya existentes. Para estas alternativas también se estudio su comportamiento en régimen transitorio con el fin de explorar las ventajas de su implantación en el sistema real.

## CAPITULO I

### Descripción de las redes de recolección.

Las redes de recolección que se simularon se muestran en la Figura 1.

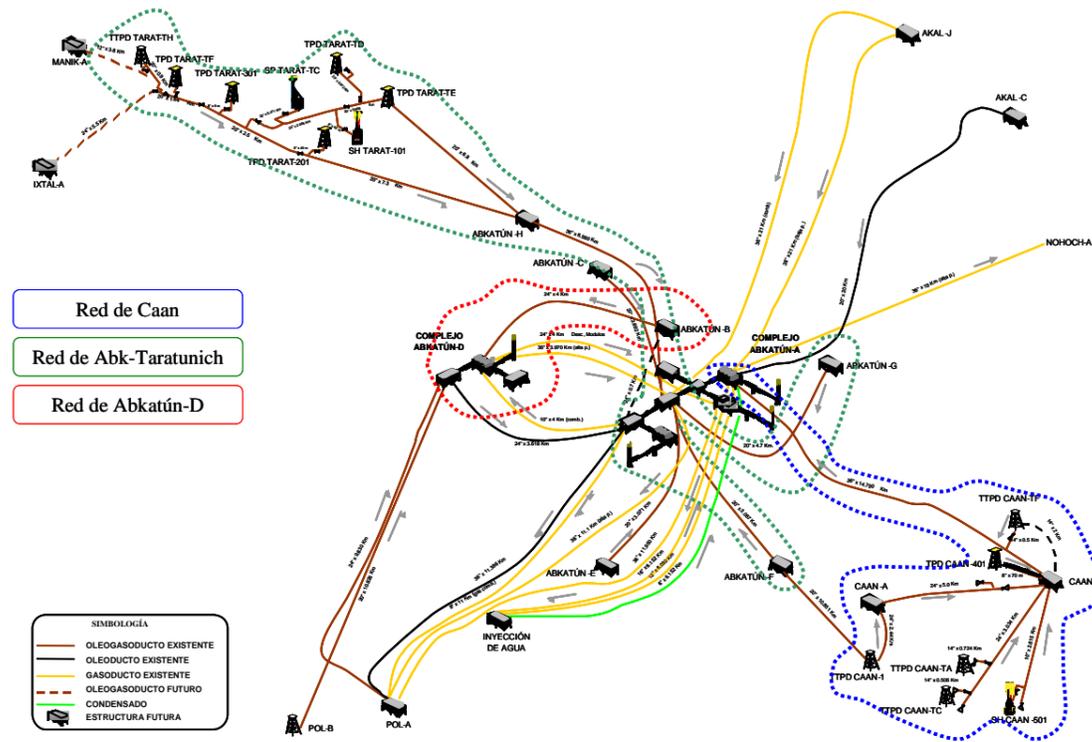
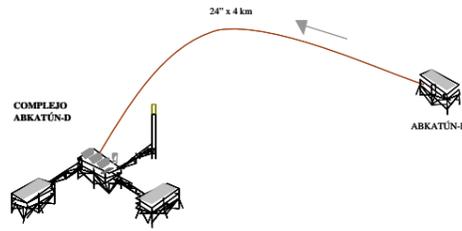


Figura 1. Red integral del Activo Abkatún

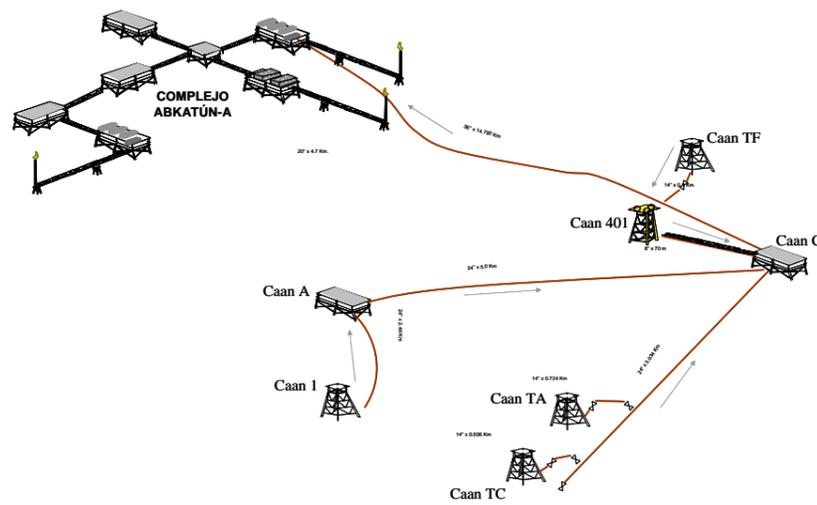
El sistema integral es muy extenso, por ello se simularon y analizaron los subsistemas delimitados por las líneas punteadas con el fin de simplificar el modelo.

La red de Abkatún-D es el sistema más pequeño, consta sólo de dos plataformas y una línea superficial. La representación de la red de Abkatún se muestra en Figura 2.



**Figura 2. Red de Abkatún-D**

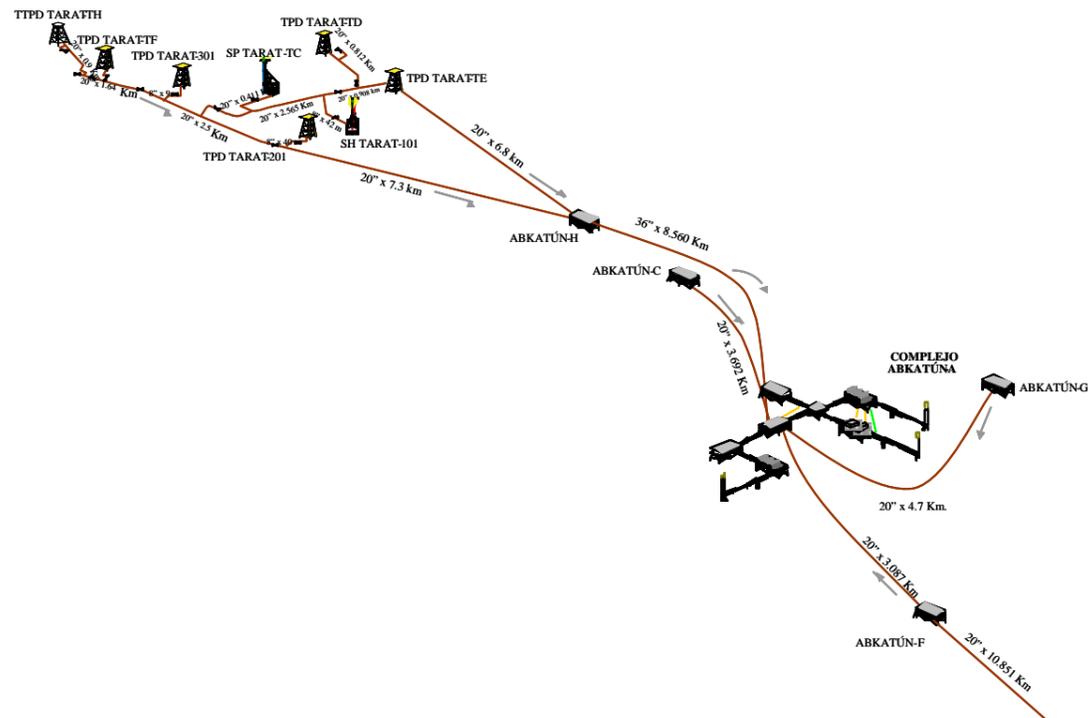
En esta red se simulan tres pozos, el Abkatún-71D, Abkatún-93B y el Abkatún-93D. En la plataforma Abkatún-B existen más pozos aparte de los mencionados, por ello el resto de la producción se modelo mediante una fuente donde entra masa a una velocidad constante. En la plataforma Abkatún-D existe una batería de separación que se incluye en el modelo. El diagrama de la red de Caan se muestra en la Figura 3



**Figura 3. Red del campo Caan**

El sistema esta compuesto por 8 plataformas y una red de recolección convergente. Se simulan en esta red cinco pozos, el Caan-1, Caan-33, Caan-54, Caan-79 y el Caan-95. Cuando se tiene una mayor producción que la proporcionada por lo pozos, se colocan fuentes de masa para completar el volumen. En la plataforma Abkatún-A Permanente se tiene una batería compuesta

por dos trenes de separación, mismos que se simulan de forma detallada. El modelo de la red de Abkatún-Taratunich se muestra en la Figura 4



**Figura 4. Red de Abkatún-Taratunich**

Este se compone de 12 plataformas que forman una red convergente-divergente. Toda la red converge a un punto que es la plataforma Abkatún-A Temporal donde se encuentra la batería de separación pero diverge en Taratunich formando un circuito cerrado. En esta red se modelaron 7 pozos, el Taratunich-12, Taratunich-23, Taratunich-52, Taratunich-63, Taratunich-74, Abkatún-57 y el Abkatún-216, el resto de la producción se modelo mediante fuentes de masa. La batería de separación en Abkatún-A Temporal se incluye dentro del modelo de la red. Dentro de esta red existe un ramal que forma parte del sistema pero que no se incluye dentro del modelo completo, este es el tramo que se dirige hacia Abkatún-A desde Abkatún-C. Este ramal no se reúne con el resto de la producción en Abkatún-A Enlace, se envía a la segunda etapa de separación en Abkatún-A Permanente a través del separador de prueba, por ello modela de independientemente.

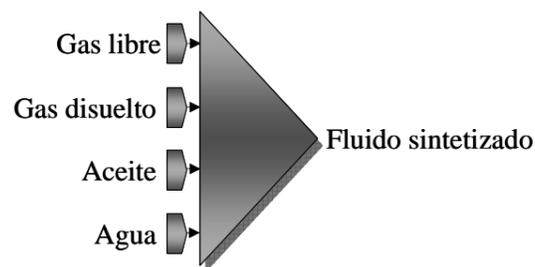
## CAPITULO II

### Creación de tablas de propiedades

Parte fundamental de la simulación en régimen dinámico es la caracterización correcta de los fluidos. Con esta información se construyen las tablas de propiedades empleadas durante la simulación. Si estas tablas son calculadas de forma errónea se corre el riesgo de simular algo diferente a lo que se tiene en la realidad. Para este proyecto, dada la importancia de los fluidos en la simulación de los pozos y redes de recolección, se llevó el muestreo de estos en puntos representativos de la red. Lo ideal es realizar el muestreo en todos los puntos de la red para conocer las características de los fluidos, pero esto es prohibitivo tanto por el punto de vista económico como operativo. Para este proyecto se muestrearon los siguientes pozos por campo.

- Campo Abkatún: Abkatún-93B, Abkatún-93D y Abkatún-216.
- Campo Caan: Caan-1, Caan-33 y Caan-79.
- Campo Taratunich: Taratunich-63, Taratunich-74 y Taratunich-301.

En cada uno de los pozos muestreados se determinó la cantidad de gas libre y disuelto, aceite y agua. Con esta información se sintetizaron los fluidos según el siguiente esquema.



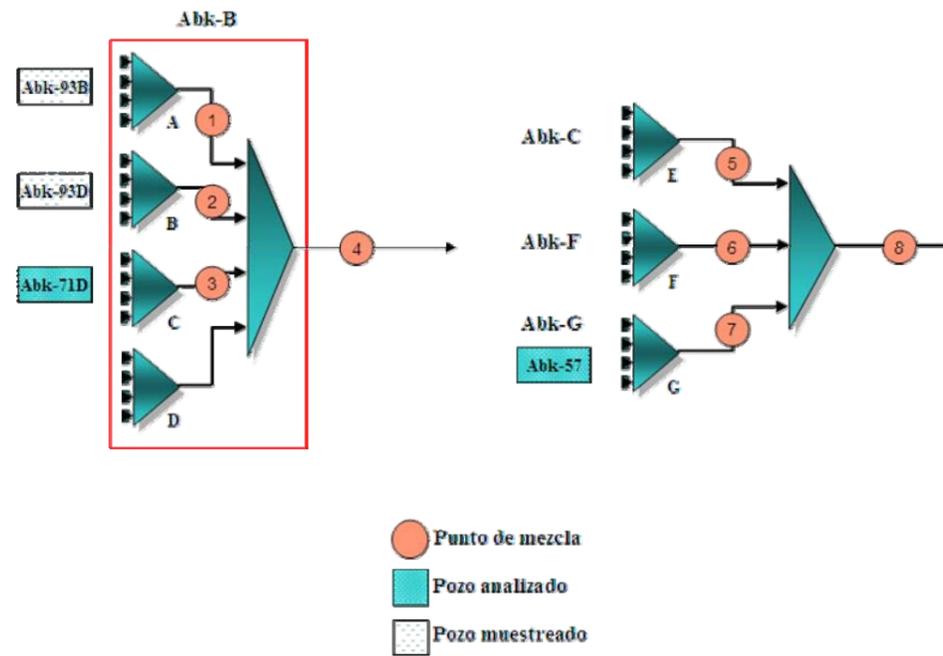
**Figura 5. Fluido sintetizado.**

Para sintetizar cada uno de los fluidos en los tramos que componen la red fue necesario conocer sólo el flujo de aceite, la  $R_{GA}$  y el corte de agua, el gas disuelto se calculo con la  $R_S$  obtenida con la información del muestreo. Todas estas

cantidades se obtuvieron de los aforos de cada pozo y de los totales para cada plataforma.

Para determinar las mezclas presentes en la red se desarrollaron los diagramas mostrados más adelante.

Para el campo Abkatún se tienen las siguientes mezclas.



**Figura 6. Mezclas para el campo Abkatún**

En Abkatún-B se muestrearon dos pozos, el Abkatún-93B y el Abkatún-93D, además se modeló el pozo Abkatún-71D. En esta plataforma se tiene un total de 9 pozos de los cuales sólo 3 forman parte del modelo, el resto de la producción se adiciona mediante una fuente de masa. Se conocen las composiciones de las corrientes A, B, C y D con lo cual se sintetizan los fluidos 1, 2, 3 y 4 que corresponden con los cuatro tramos que componen esta red. Así como se sintetiza este fluido se hace con el resto de las redes a modelar.

Para el campo Caan se tienen las siguientes mezclas, siguiendo la misma metodología.

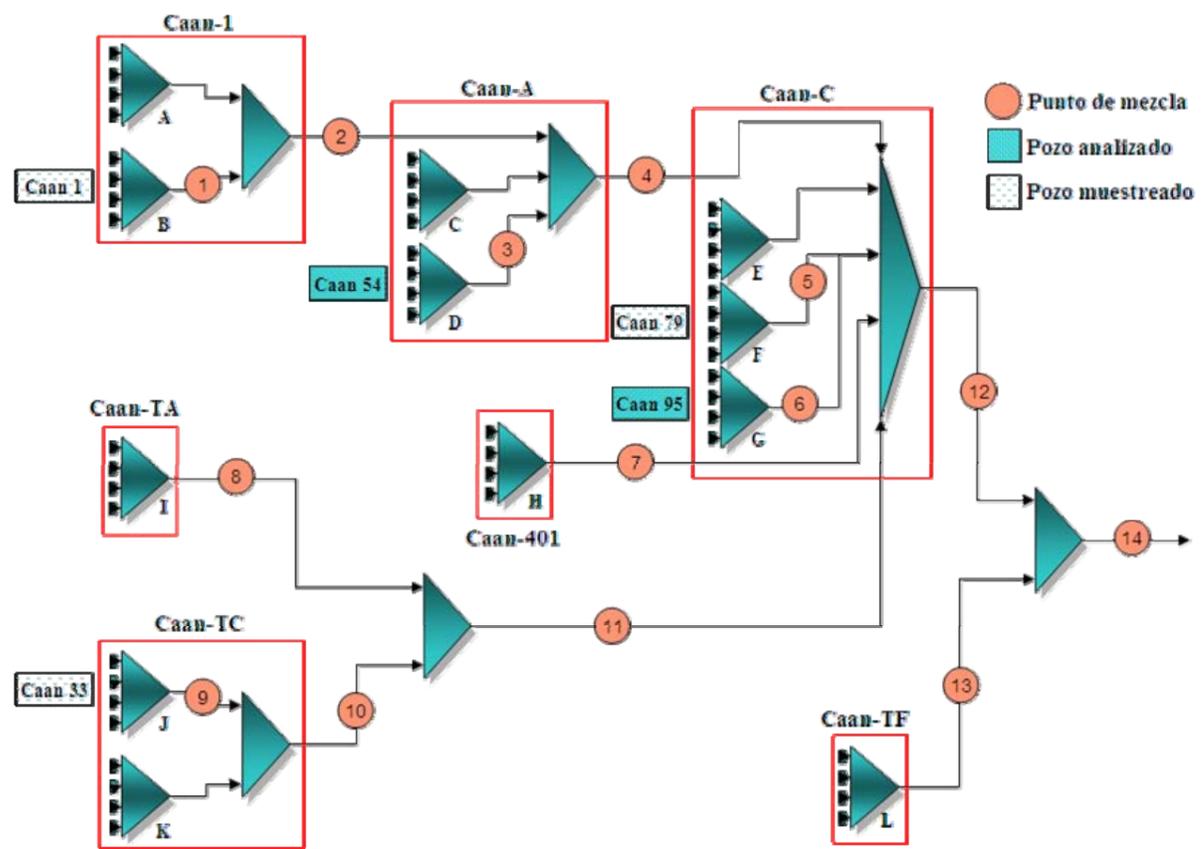
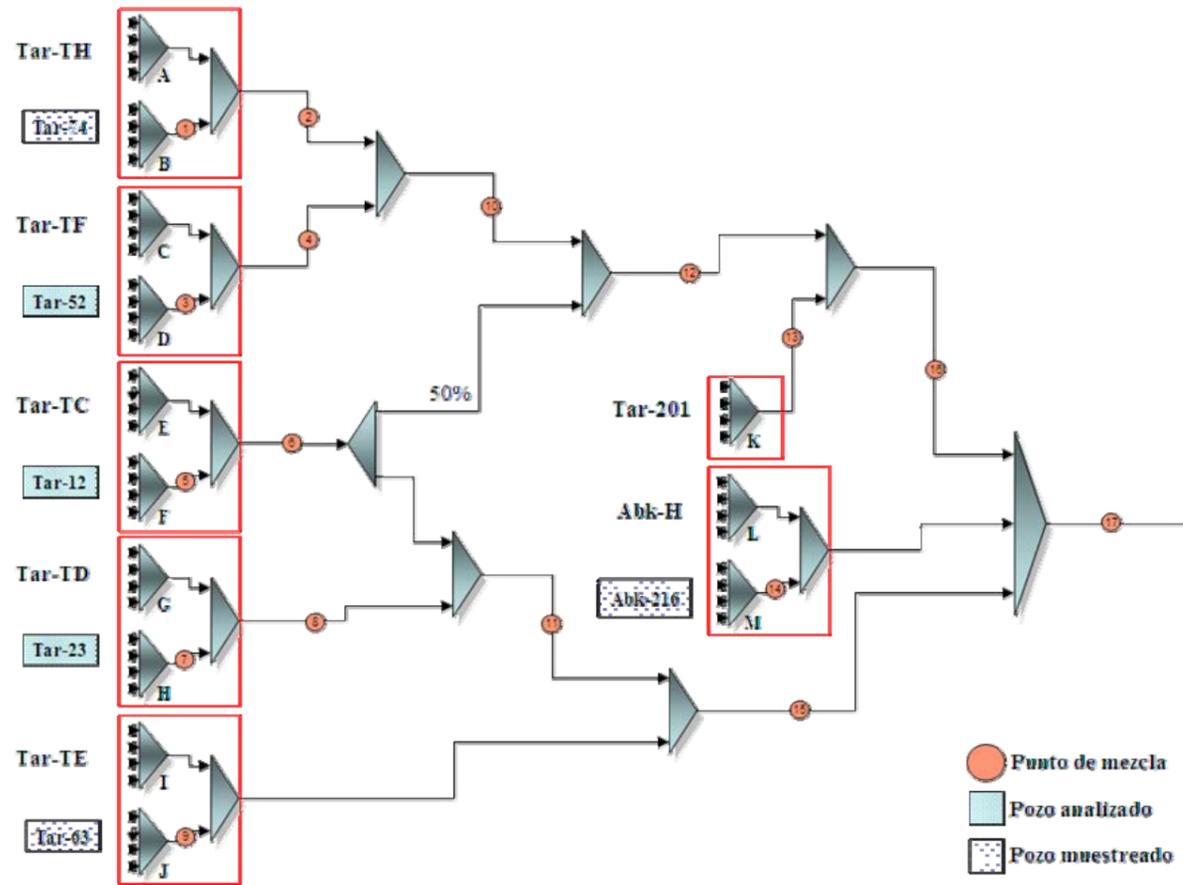


Figura 7.- Mezclas para el campo Caan

Para Abkatún-Taratunich se tienen las siguientes mezclas. Aquí hay que observar que el sistema es más complejo, además de que se tienen pozos de distintos campos.



**Figura 8. Mezclas para el campo Taratunich**

En la síntesis de estos fluidos se hace una suposición que es importante mencionar, dentro de la red existe un circuito cerrado. Aquí es necesario suponer la dirección de flujo (salida de Taratunich-TC en el diagrama anterior) en uno de los ramales, ya que existe una división de flujo es necesario también suponer la fracción de división. Se supuso la dirección mostrada en el diagrama y una división de 50% hacia cada ramal. Esta decisión no es arbitraria, se basa en el modelo de estado estacionario desarrollado con *Pipephase* que supone que esta es la

dirección de flujo. Esta suposición tiene efecto sólo en el cálculo de las propiedades del fluido en este punto, para la simulación en estado transitorio, el simulador en base al balance de presiones toma la decisión sobre la dirección real de flujo.

Se eligieron pozos representativos para sintetizar el resto de los fluidos.

Con esta información y los resultados de la recombinación se generaron las tablas de

propiedades que se emplearon en la simulación y las redes de recolección.

## CAPITULO III

### Simulación en régimen transitorio

Para la simulación de las redes de recolección en régimen transitorio se seleccionó el simulador comercial *OLGA 2000*. el cual recientemente cambio de nombre por *OLGA*. Este Simulador es actualmente el estándar a nivel mundial en la simulación de flujo multifásico en régimen transitorio.

*OLGA* es el simulador más utilizado por las compañías petroleras más importantes a nivel mundial.

Para la simulación de todos los casos se empleó la versión *standard* del simulador junto con el módulo de tres fases, esto debido a que en muchos de los casos se tiene presente agua en las mezclas. La versión *standard* requiere que se construyan por separado un conjunto de tablas con las propiedades físicas, termodinámicas y de transporte de los fluidos presentes tanto en los pozos como en la red de recolección.

La capacidad dinámica del código *OLGA* es su característica más importante, el flujo multifásico es un fenómeno dinámico y debe ser modelado como tal; esto incrementa el rango de aplicabilidad comparado con modelos en estado estacionario. El código *OLGA* es capaz de simular dinámicamente redes de tubería con equipo de proceso incluido tales como compresores, intercambiadores de calor, separadores, válvulas check, controladores y fuentes o sumideros de masa.

Evidentemente, el cálculo de la evaluación en el tiempo de flujo multifásico con un modelo dinámico incrementa el tiempo de CPU, comparado con modelos ordinarios en estado estacionario, además, la variable adicional del tiempo incrementa la cantidad de salidas producidas por el código.

Se incluye un preprocesador en estado estable en el código *OLGA*, donde las ecuaciones de conservación son resueltas en  $t = 0$ , además puede ser usado

independientemente, y utilizado principalmente como generador de valores iniciales para las simulaciones dinámicas.

El código OLGA es un modelo modificado de dos fluidos; se aplican ecuaciones separadas de continuidad para el gas, película líquida de hidrocarburo, película de agua, gotas de hidrocarburo y gotas de agua, estas se acoplan a través de la transferencia de masa interfacial. Se utilizan dos ecuaciones de momento, una para la fase de líquido continuo y una para la posible combinación de gas y gotas. La diferencia entre la velocidad de la película de hidrocarburo y la velocidad del agua es calculada a partir de un balance de fuerzas en estado estable, la velocidad de cualquier gota de líquido arrastrada en la fase gaseosa es dada por una relación de deslizamiento; el modelo supone que las gotas de hidrocarburo y las gotas de agua tienen la misma velocidad. Se aplica una sola ecuación de energía, ya que todas las fases se suponen a la misma temperatura; esto nos deja ocho ecuaciones de conservación a ser resueltas: cinco para masa, dos para momento y una para energía.

Los regímenes de flujo se clasifican en flujo distribuido y separado. El primero contiene flujo burbuja y flujo bache, el segundo, flujo estratificado-niebla y anular-niebla; la transición entre las clases de regímenes es determinada por el código mediante un concepto base de mínimo deslizamiento y otros criterios adicionales.

Para cerrar el sistema de ecuaciones, se requieren condiciones iniciales y de frontera; en particular, la especificación de las condiciones iniciales complica la preparación de la entrada de un modelo dinámico comparado con un modelo en estado estable, donde estas no son requeridas (o no tienen ningún significado). Para un caso sencillo, el preprocesador en estado estable en OLGA puede ser usado para proveer valores iniciales razonables; además, la capacidad de reinicio que contiene el código puede ser usada para iniciar con datos guardados de una simulación previa.

Las condiciones de frontera definen la interfase entre el sistema de tuberías y sus alrededores. Hay varias opciones disponibles, pero básicamente, ya sea el gasto de producción o la presión debe ser especificada a la entrada y salida de cada tubería.

Debido al esquema de solución numérica, el código OLGA es particularmente útil para simular flujos másicos transitorios lentos. La implementación del tiempo en un esquema semi-implícito permite que se usen periodos de tiempo relativamente largos y órdenes de magnitud mayores que un método explícito (el cual es limitado por el criterio basado en la velocidad del sonido de Courant-Friedrich-Levy). Esto es importante para la simulación de líneas de transporte muy largas, donde los tiempos típicos de simulación son del rango de horas y días, lo que requerirá gran cantidad de pasos de tiempo.

Las propiedades del fluido necesarias (fracción de masa gas/líquido, densidades, viscosidades, entalpías, etc.) son funciones solamente de la presión y temperatura, y la composición total de la mezcla multifásica se supone constante tanto en el tiempo como en el espacio dentro de un ramal dado. Se pueden especificar diferentes tablas de propiedades de fluidos para cada ramal, siendo cuidadosos en asegurar una composición realista del fluido cuando algunos de estos ramales se combinen para formar uno solo.

Las leyes de cerradura y ecuaciones adicionales para resolver el sistema de ecuaciones del modelo de OLGA fueron desarrolladas en laboratorio de SINTEF. Estos experimentos han sido desarrollados sobre un amplio rango de configuraciones, variaciones del ángulo de inclinación desde  $-1^\circ$  hasta  $+90^\circ$ , diámetros desde 100 mm hasta 290 mm, con presiones de hasta 90 bar, el laboratorio ha operado con hidrocarburos líquidos, como diesel, aceite lubricante y petróleo crudo. El circuito tiene una longitud horizontal de 950 m y una sección vertical de 50 m.

El simulador Olga utiliza el modelo de dos fluidos. que a continuación se describe.

### **III.1 Modelo de dos fluidos**

La primera versión de OLGA basado en este enfoque, fue probada con éxito en 1983, pero el principal desarrollo fue llevado a cabo en un programa de investigación conjunta realizado entre IFE y SINTEF denominado “el proyecto de flujo en dos fases”.

Tradicionalmente, el flujo en dos fases ha sido modelado por correlaciones empíricas para fracción volumétrica de gases, caídas de presión y regímenes de flujo, aunque estos sean físicamente interrelacionados.

El modelo físico de OLGA originalmente se basó en datos de diámetros pequeños para flujos de agua-aire a baja presión. Cuando los resultados de 1983 del laboratorio de SINTEF de flujo en dos fases estuvieron disponibles, se observó que el flujo burbuja y flujo bache fue descrito apropiadamente mientras que el flujo anular estratificado no. En el flujo anular vertical, la caída de presión descrita fue 50% de mayor que el esperado, como se ve en la figura 1. En el flujo vertical el colgamiento del líquido predecido fue demasiado alto por un factor de 2 en casos extremos.

Estas discrepancias se explican por despreciar la influencia de las gotas de líquido, que se mueven aproximadamente a la velocidad del gas. Este patrón de flujo, denotado como flujo estratificado o anular-niebla ha sido incorporado en OLGA84 y versiones posteriores, donde el flujo de líquido puede estar en contacto con la pared del conducto y un posible flujo de gotas inmersas en el flujo de gas.

### III.2 El modelo OLGA extendido, de flujo de dos fluidos

Modelos físicos para el flujo de gas, de la capa de líquido y de las gotas de líquido, se aplica una ecuación de continuidad específica para cada uno de ellos; las cuales se pueden asociar o combinar en la transferencia de masa en la interfase. Se usan únicamente dos ecuaciones de cantidad de movimiento, una combinada para el gas y las gotas de líquido y otro para la capa de líquido. En consecuencia, OLGA aplica las siguientes ecuaciones de conservación:

#### III.2.1 Ecuaciones de la conservación de la masa:

Ecuación del flujo de la fase gaseosa.

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_G \rho_G) = -\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} [A f_G \rho_G v_G] + \psi_G + G_L \quad (1)$$

Ecuación del flujo de la fase líquida en la pared.

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_L \rho_L) = -\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} [A f_L \rho_L v_L] - \psi_G + \psi_d + G_L \quad (2)$$

Ecuación del flujo de las gotas de líquido.

$$\frac{\partial}{\partial t}(f_D \rho_L) = -\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} [A f_D \rho_L v_D] - \psi_G \frac{f_L}{f_L + f_D} + \psi_e - \psi_d + G_D \quad (3)$$

Donde,  $f_L$ ,  $f_D$ , representan la fracción de gas, la fracción de la capa de líquido y la fracción volumétrica de las gotas de líquido;  $\rho$ ,  $v$ ,  $p$  y  $A$  constituyen la densidad, la velocidad, la presión y la sección transversal de la tubería respectivamente. Los subíndices  $G$ ,  $L$ ,  $i$  y  $D$  indican el gas, el líquido, la

interfase y las gotas de liquido. El parámetro  $\psi_G$ , representa la tasa de transferencia de masa entre las fases;  $\psi_e$  y  $\psi_D$  constituye el arrastre y la tasa de acumulación; y  $G_f$  la fuente de masa de la fase.

### III.2.2 Ecuaciones de la cantidad de movimiento.

Ecuación del flujo de la fase gaseosa:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(f_G \rho_G v_G) = & \\ - f_G \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) - \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} [A f_G \rho_G v_G^2] - \lambda \frac{1}{2} \rho_G |v_G| v_G \frac{S_G}{4A} - \lambda_i \frac{1}{2} \rho_G |v_R| v_R \frac{S_i}{4A} & \\ + f_G \rho_G g \cos \alpha + \psi_G v_o - F_D & \end{aligned} \quad (4)$$

### III.2.3 Ecuación del flujo de las gotas de líquido:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(f_D \rho_L v_D) = & \\ - f_D \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) - \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} [A f_D \rho_L v_D^2] + f_D \rho_L g \cos \alpha - \psi_G \frac{f_D}{f_L + f_D} v_o + \psi_e v_i - \psi_d v_D + F_D & \end{aligned} \quad (5)$$

### III.2.4 Ecuación combinada de cantidad de movimiento del gas y gotas de líquido:

Las ecuaciones anteriores han sido aumentadas, obteniéndose una ecuación de cantidad de movimiento combinada, donde la relación de arrastre del gas y las gotas de líquido,  $F_D$ , se cancela:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial z}(f_G \rho_G v_G + f_D \rho_L v_D) = \\
 & -(f_G + f_D) \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) - \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z} [A f_G \rho_G v_G^2 + A f_D \rho_L v_D^2] \\
 & - \lambda_G \frac{1}{2} \rho_G |v_G| v_G \frac{S_G}{4A} - \lambda_i \frac{1}{2} \rho_G |v_R| v_R \frac{S_i}{4A} \\
 & + [f_G \rho_G + f_D \rho_L] g \cos \alpha + \psi_G \frac{f_L}{f_L + f_D} v_o + \psi_e v_i - \psi_d v_D
 \end{aligned} \tag{6}$$

Ecuación del flujo de la capa de líquido en la pared del tubo:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial z}(f_L \rho_L v_L) = \\
 & - f_L \left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z} [A f_L \rho_L v_L^2] \\
 & - \lambda_L \frac{1}{2} \rho_L |v_L| v_L \frac{S_L}{4A} + \lambda_i \frac{1}{2} \rho_G |v_R| v_R \frac{S_i}{4A} \\
 & + f_L \rho_L g \cos \alpha - \psi_G \frac{f_L}{f_L + f_D} v_o - \psi_e v_i + \psi_d v_D \\
 & - f_L d (\rho_L - \rho_G) g \frac{\partial \gamma_L}{\partial z} \sin \alpha
 \end{aligned} \tag{7}$$

Donde  $\alpha$  representa la inclinación del tubo con respecto al eje vertical. La fuente interna,  $G_f$ , se asume que entra en la pared del tubo con un ángulo de  $90^\circ$ . Los parámetros  $S_G$ ,  $S_L$  y  $S_i$  son los perímetros mojados del gas, líquido y la interfase respectivamente.

$$\begin{aligned}
 v_o &= v_L && \text{para } \psi_G > 0 \text{ (y la evaporación de la capa del líquido)} \\
 v_o &= v_D && \text{para } \psi_D > 0 \text{ (y la evaporación de las gotas de líquido)} \\
 v_o &= v_G && \text{para } \psi_G > 0 \text{ (y la condensación)}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Las ecuaciones anteriores, se aplican para cualquier patrón de flujo. Observe, sin embargo, que ciertos términos pueden ser cancelados para ciertos regímenes de flujo. Por ejemplo, en el flujo bache y flujo burbuja todos los términos de gotas de líquido desaparecen. Para el flujo bache los términos de caídas de presión por fricción son combinados, cada uno de los términos de arriba consiste de tres términos; el bache de líquido, la burbuja y la capa de líquido, y la aceleración de la caída de presión del flujo de la capa del líquido.

La velocidad relativa  $v_R$  se define por la siguiente fórmula de resbalamiento:

$$v_G = R_D [v_L + v_R] \tag{9}$$

donde  $R_D$  es una distribución de la relación de resbalamiento causada por una distribución irregular de fases y velocidades en la sección transversal del tubo, como se bosquejará en la próxima sección.

Análogamente, la velocidad de las gotas de líquido se define como:

$$v_D = v_G - v_o \cos \alpha \tag{10}$$

donde  $v_{oD}$  representa la caída de velocidad de las gotas de líquido. La velocidad en la interfase,  $v_i$  es aproximadamente igual a  $v_L$ .

*En OLGA se reformula el problema antes de discretizar la ecuación diferencial para obtener una ecuación de presión. Esta ecuación, junto con las ecuaciones de cantidad de movimiento, se resuelven simultáneamente para obtener la presión y la velocidad de fase, y de esta manera se integra con respecto al tiempo.*

Las ecuaciones de conservación de masa (1-3) se pueden extender con respecto a la presión, temperatura y la composición, considerando las densidades como dadas:

$$\rho_f = \rho_f(p, T, R_s) \quad (11)$$

donde la fracción masica de gas,  $R_s$ , se define por la ecuación (17).

Para la ecuación del gas (1) el lado izquierdo se puede expresar como:

$$\begin{aligned} \frac{d_G \rho_G}{dt} &= \rho_G \frac{d_G}{dt} + f_G \frac{d \rho_G}{dt} = \\ \rho_G \frac{d_G}{dt} &+ f_G \left[ \left( \frac{\partial \rho_G}{\partial p} \right)_{T, R_s} \frac{dp}{dt} + \left( \frac{\partial \rho_G}{\partial T} \right)_{p, R_s} \frac{dT}{dt} + \left( \frac{\partial \rho_G}{\partial R_s} \right)_{p, T} \frac{dR_s}{dt} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

Dividiendo las extensiones en la ecuación (12) para cada fase por las densidades, y sumando las tres ecuaciones a la ecuación de conservación volumétrica se obtiene (despreciando los últimos dos términos en la expansión (12), como estos son despreciados en los problemas de transporte en tuberías, debido a las bajas temperaturas prevalecientes):

$$\left[ \frac{f_G}{\rho_G} \left( \frac{\partial \rho_G}{\partial \hat{p}} \right)_{T,R_s} + \frac{1-f_G}{\rho_L} \left( \frac{\partial \rho_L}{\partial \hat{p}} \right)_{T,R_s} \right] \frac{\partial \hat{p}}{\partial \hat{t}} = \frac{1}{\rho_G} \frac{\partial m_G}{\partial \hat{t}} + \frac{1}{\rho_L} \frac{\partial m_L}{\partial \hat{t}} + \frac{1}{\rho_L} \frac{\partial m_D}{\partial \hat{t}} \quad (13)$$

insertando las ecuaciones de conservación de masa para cada fase, y considerando  $f_G + f_L + f_D = 1$  se obtiene:

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{f_G}{\rho_G} \left( \frac{\partial \rho_G}{\partial \hat{p}} \right)_{T,R_s} + \frac{1-f_G}{\rho_L} \left( \frac{\partial \rho_L}{\partial \hat{p}} \right)_{T,R_s} \right] \frac{\partial \hat{p}}{\partial \hat{t}} = \\ & - \frac{1}{A\rho_G} \frac{\partial (Af_G \rho_G v_G)}{\partial z} - \frac{1}{A\rho_L} \frac{\partial (Af_L \rho_L v_L)}{\partial z} - \frac{1}{A\rho_L} \frac{\partial (Af_D \rho_L v_D)}{\partial z} \\ & + \psi_G \left( \frac{1}{\rho_G} - \frac{1}{\rho_L} \right) + G_G \frac{1}{\rho_G} + G_L \frac{1}{\rho_L} + G_D \frac{1}{\rho_L} \end{aligned} \quad (14)$$

La ecuación (14) proporciona una simple ecuación para la presión y los flujos de fase. Observe, que si el término de transferencia de fase  $\psi_G$  es función de la presión, la temperatura y composición:

$$\psi_G = \psi_G(p, T, R_s) \quad (15)$$

### III.2.5 La ecuación de energía

Se aplica una mezcla de la ecuación de conservación de energía:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \hat{t}} \left[ m_G \left( E_G + \frac{1}{2} v_G^2 + gh \right) + m_L \left( E_L + \frac{1}{2} v_L^2 + gh \right) + m_D \left( E + \frac{1}{2} v_D^2 + gh \right) \right] \\ & = - \frac{\partial}{\partial z} \left[ m_G v_G \left( H_G + \frac{1}{2} v_G^2 + gh \right) + m_L v_L \left( H_L + \frac{1}{2} v_L^2 + gh \right) \right] \\ & + m_D v_D \left( H_D + \frac{1}{2} v_D^2 + gh \right) + H_s + U \end{aligned} \quad (16)$$

donde,  $E$ , representa la energía interna por unidad de masa,  $h$  la elevación,  $H_s$  la entalpía de la fuente de masa y  $U$  la transferencia de calor de las paredes de la tubería.

### **III.3 Cálculos térmicos**

El modelo OLGA es capaz de simular una tubería de pared totalmente aislada, o por una pared compuesta de capas de diferentes espesores con capacidad calorífica y conductividad dadas. La descripción de la pared puede cambiar a lo largo de la tubería por simular, por ejemplo, un pozo rodeada de roca de cierto perfil vertical de temperatura, conectado a una línea de flujo con material aislante y concreto, y un riser no aislado.

El coeficiente de transferencia de calor en la pared interior de la tubería con el fluido fluyendo se calcula con el programa, mientras que el coeficiente de transferencia de calor externo de la tubería se debe de especificar por el usuario. Se asume geometría circunferencial, si este es analizado en segmentos; por ejemplo, con una tubería enterrada parcialmente en el fondo del mar, el coeficiente promedio de transferencia de calor debe ser especificado.

Se incluyen fenómenos especiales, tal como el efecto, Joule-Thompson. El paquete PVT, que se aplica para generar las tablas de las propiedades de los fluidos es capaz de describir tales efectos.

#### **III.3.1 Propiedades de los fluidos y transferencia de fase.**

Todas las propiedades de los fluidos (densidad, compresibilidad, viscosidades, tensión superficial, entalpías, capacidades caloríficas y conductividad térmica) son

dadas como tablas junto con las presiones y temperaturas, y los valores en un punto dado en el tiempo y espacio se obtienen por interpolación en estas tablas.

### III.3.2 Transferencia de masa en la interfase.

El modelo aplicado en la transferencia de masa en la interfase es capaz de tratar tanto la condensación o evaporación y la condensación retrograda en la cual una fase pesada condensa de la fase gaseosa mientras la presión cae. Se define, una fracción masica de gas en condiciones de equilibrio como:

$$R_s = \frac{m_G}{m_G + m_L + m_D} \quad (17)$$

la tasa de transferencia de masa puede ser calculada como:

$$\psi_G = \left[ \left( \frac{\partial R_s}{\partial p} \right)_T \frac{\partial p}{\partial t} + \left( \frac{\partial R_s}{\partial p} \right)_T \frac{\partial p}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} + \left( \frac{\partial R_s}{\partial T} \right)_p \frac{\partial T}{\partial t} + \left( \frac{\partial T}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} \right) \right] (m_G + m_L + m_D) \quad (18)$$

donde el termino,  $\left( \frac{\partial R_s}{\partial p} \right)_T \frac{\partial p}{\partial t}$ , representa la transferencia de fase de una masa presente en la sección debido al cambio en la presión en esa sección. Él termino,  $\left( \frac{\partial R_s}{\partial p} \right)_T \frac{\partial p}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t}$ , constituye la transferencia de masa debido a la masa fluyendo de una sección a la otra. Mientras únicamente, las derivadas de  $R_s$  aparecen en la ecuación (18) y los errores debido a la suposición de la composición constante se minimizan.

### III.4 Esquema de la solución numérica.

El problema físico, proporciona una ecuación no lineal de primer orden y una ecuación diferencial parcial lineal con coeficientes más complejos. Debido a esta no-linealidad, no existe un simple método numérico que sea óptimo desde cualquier punto de vista. De hecho, los códigos TRAC, RELAP, CATHARE y OLGA usan un esquema de solución diferente. Los detalles han sido presentados por Bendiksen et. al.. La vasta mayoría de los modelos de dos fluidos aplican diferencias finitas. En los métodos de integración implícita el intervalo de tiempo  $\Delta t$  es limitado por el criterio de Courant Friedrich Levy basado en la velocidad del sonido.

$$\Delta t \leq \text{Min}_{vj} \left\{ \frac{\Delta z_j}{v} \right\} \quad (19)$$

Los métodos implícitos no son limitados por (19) pero para problemas dinámicos un criterio de transporte de masa aplica:

$$\Delta t \leq \text{Min}_{vj} \left\{ \frac{\Delta z_j}{|v_{\bar{f}j}|} \right\} \quad (20)$$

Como la velocidad del sonido típicamente es del orden  $10^2$ - $10^3$  más grande que las velocidades de fase promedio, los métodos de integración explícita requieren intervalos de tiempo arriba de  $10^3$  más pequeños que los métodos implícitos.

Tradicionalmente la mayoría de los códigos de análisis de seguridad de los reactores nucleares (e.g. NORA Malnes et. al.) aplican métodos explícitos, ya que estos son más simples de formular y codificar y la escala de tiempo de interés para los problemas típicos (presiones transitorias) fueron dados por la velocidad del sonido. Sin embargo, debido a los problemas de estabilidad y a la necesidad de simular flujos en pequeños intervalos de tiempo los métodos implícitos son ahora favorecidos.

### **III.5 Descripción de régimen de flujo**

Los factores de fricción y los perímetros mojados son regímenes de flujo dependientes. Dos clases de régimen de flujo son aplicadas; flujo distribuido y flujo separado. El primero, contiene flujo burbuja y flujo bache, él ultimo flujo estratificado y flujo anular niebla. OLGA es un modelo unificado, que no requiere separar las correlaciones especificadas por el usuario para colgamiento de líquidos, etcétera. Esto significa, que para cada sección del tubo, una predicción de régimen de flujo dinámico es requerida, proporcionando el régimen de flujo correcto como una función de los parámetros de flujo promedio.

#### **III.5.1 Régimen de flujo separado**

El flujo estratificado y anular son caracterizados por las dos fases moviéndose separadamente, como se ve en la figura 2. Las distribuciones de fase a través del área de fase respectiva son asumidas constantes. La razón de distribución de resbalamiento,  $R_D$ , en la ecuación (9) entonces se convierte en 1.0. La transición entre el flujo estratificado y flujo anular se basa en el perímetro mojado de la capa del líquido; el flujo anular resulta, cuando esta llega a ser igual a la circunferencia interna de la capa.

El flujo estratificado puede ser o suave u ondulado. Una expresión para la altura de la onda promedio,  $h_w$ , puede ser obtenido asumiendo que las fuerzas de flujo de masa, en el balance gravitacional de gas y las fuerzas de tensión superficial, o:

$$\frac{1}{2} \rho_G (v_G - v_L)^2 = h_w (\rho_L - \rho_G) g \sin \alpha + \frac{\sigma}{h_w} \quad (21)$$

o

$$h_w = \frac{1}{2} \left[ \frac{\rho_G (v_G - v_L)^2}{2(\rho_L - \rho_G) g \sin \alpha} + \sqrt{\left[ \frac{\rho_G (v_G - v_L)^2}{2(\rho_L - \rho_G) g \sin \alpha} \right]^2 - \frac{4\sigma}{(\rho_L - \rho_G) g \sin \alpha}} \right] \quad (22)$$

Cuando la expresión en la raíz cuadrada es negativa,  $h_w$ , es cero y se obtiene flujo estratificado. La aparición de las ondas empieza con las ondas capilares con longitud del orden de 2-3 mm. Mientras las fuerzas de flujo masico aumentan, la tensión superficial llega a ser despreciable y la gravedad domina, obteniéndose longitudes de ondas más grandes. Para el flujo de aire y agua en un tubo a 1 bar la aparición de las ondas en dos dimensiones corresponden muy bien con los datos de Andreussi y Persen.

### III.5.2 Factores de fricción

Los factores de fricción en la pared aplicados para el gas y líquidos son aquellas utilizadas en el flujo turbulento o flujo laminar (en la practica, se escoge, el valor máximo de 1), dados como.

$$\lambda_i = 0.0055 \left[ 1 + \left( \frac{2 \cdot 10^4 \varepsilon}{d_h} + \frac{10^6}{N_{Re}} \right)^{1/3} \right] \quad (23)$$

$$\lambda_i = \frac{64}{N_{Re}} \quad (24)$$

donde  $\varepsilon$  es la rugosidad absoluta de la tubería y  $d_h$  es el diámetro hidráulico. Para el flujo estratificado niebla, la fracción de líquido en la pared, perímetros mojados, y otros parámetros de flujo son definidos por el ángulo mojado.

Wallis propuso la siguiente fórmula para la fricción interfacial en el flujo anular.

$$\lambda_i = 0.02 [1 + 75(1 - f_G)] \quad (25)$$

Esta correlación ha sido aplicada para el flujo vertical. Se usa la siguiente fórmula para tuberías inclinadas con flujo anular.

$$\lambda_i = 0.02 [1 + K f_L] \quad (26)$$

donde,  $K$ , es un coeficiente determinado empíricamente con la ecuación:

$$K = K \left( \frac{h_f}{d}, \left( \frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_G)} \right) \right) \quad (27)$$

para flujo estratificado suave, se usan los factores de fricción estándar con rugosidad cero y para flujo ondulado el valor mínimo de la ecuación (26) y

$$\lambda_i = \frac{h_w}{d_{hi}} \quad (28)$$

es usado, cuando en la ecuación (26) se asume obtener un valor límite superior para el flujo ondulado. La ecuación (28), entonces proporciona una descripción mejorada en la región de flujo suave para velocidades más altas, donde (26) se aplica.

### III.5.3 Arrastre y/o acumulación

En la versión original de OLGA el flujo de gotas de líquido, no fue incorporado. En la comparación con los datos del flujo en dos fases del laboratorio de SINTEF, la caída de presión predicha para el flujo anular vertical fue 50% superior. Mientras la caída de presión en el flujo horizontal fue predicha correctamente, pero el colgamiento del líquido fue demasiado alto por un factor de dos en casos extremos.

Para la acumulación de gotas, la formula siguiente para flujo vertical se puede obtener de los datos de Andreussi.

$$\psi_d = \frac{4}{d} \frac{f_D \rho_L}{f_G} * 2.3 * 10^{-4} \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0.8} \left( 1 + \frac{1}{0.1 + vL} \right) \quad (29)$$

Para otras tuberías inclinadas, se aplica la correlación extendida. Una expresión modificada es propuesta para el arrastre del líquido, basado en los trabajos de Dallman, Barclay y Hanratty para flujo vertical, y Laurinat, Hanratty y Dallman para flujo horizontal.

### III.5.3 Flujo distribuido

Como mostró Malnes en el caso del flujo burbuja o flujo bache la velocidad de fase promedio satisface la siguiente relación de resbalamiento.

$$v_G = R_D [v_L + v_R] \quad (30)$$

donde  $v_R$  y  $R_D$  son determinados de los requerimientos de continuidad, como se ve en Malnes. Para  $f_{GS} = 0$ , la ecuación (30) se reduce a la expresión general para el flujo bache.

$$v_G = \frac{1-f_G}{\frac{1}{C_0} - f_G} \left[ v_L + \frac{v_0 B}{C_0(1-f_G)} \right] \quad (31)$$

Para un desarrollo completo del flujo bache turbulento con longitudes de baches suficientemente grandes ( $\geq 10D$ ), la velocidad del bache o de la burbuja,  $v_B$  se puede aproximar, para todas las inclinaciones, por la siguiente expresión de Bendiksen:

$$v_B = C_0(v_{0L} + v_{0G}) + v_{0B} \quad (32)$$

con

$$C_0 = \begin{cases} 1.05 + 0.15 \cos^2 \alpha & \text{para } N_{F_v} \leq 3.5 \\ 1.20 & \text{para } N_{F_v} \geq 3.5 \end{cases} \quad (33)$$

y

$$\begin{cases} v_{0v} \cos \alpha + v_{0h} \sin \alpha & \text{para } N_{Fr} \leq 3.5 \\ v_{0B} = & \\ v_{0v} \cos \alpha & \text{para } N_{Fr} \geq 3.5 \end{cases} \quad (34)$$

donde  $v_{0v}$  y  $v_{0h}$  son las velocidades de la burbuja en el líquido estancado (despreciando la tensión superficial) en tuberías verticales y horizontales respectivamente:

$$v_{0v} = 0.35\sqrt{gd} \quad (\text{Tubería vertical}) \quad (35)$$

$$v_{0h} = 0.54\sqrt{gd} \quad (\text{Tubería horizontal}) \quad (36)$$

Para flujo burbuja, la ecuación (30) se reduce a:

$$v_G = R[v_L + v_{0s}] \quad (37)$$

donde

$$R = \frac{1 - f_G}{K - f_{GS}} \quad (38)$$

y  $K = \frac{1}{C_0}$  es un parámetro de distribución.

El aumento promedio de la velocidad de la burbuja es dado por Malnes como:

$$v_{0S} = 1.18 \left[ \frac{g \rho (\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right]^{1/4} \left[ (1 - f_G) |\cos \alpha| \right]^{1/2} \quad (39)$$

con valores positivos hacia arriba.

Basado en los datos de Gregory et. al., Malnes propuso la siguiente formula para la fracción de burbujas en el bache de liquido.

$$f_{GS} = \frac{v_{SG} + v_{SL}}{CC + v_{SG} + v_{SL}} \quad (40)$$

donde  $CC$ , representa una constante determinado empíricamente, y la fracción de burbujas es limitada hacia arriba.

La correlación (40), se aplica para sistemas a escala pequeña únicamente. Para altas presiones, las tuberías de diámetro grande, otro conjunto de correlaciones empíricas basado en los datos de dos fases del laboratorio de SINTEF, han sido empleados.

La caída de presión total en flujo bache consta de tres términos:

$$\left( \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \frac{1}{L} (\Delta p_s + \Delta p_B + \Delta p_{ac}) \quad (41)$$

donde  $\Delta p_s$  representa la caída de presión por fricción en el flujo bache,  $\Delta p_B$  es la caída de presión por fricción en el flujo burbuja y  $\Delta p_{ac}$  es la aceleración de la caída de presión requerida para acelerar el liquido bajo la burbuja, con la velocidad  $v_{LB}$ , arriba de la velocidad del bache  $v_{LS}$  ( $\Delta p_{ac} = 0$ ).  $L$  es la longitud total del bache y la burbuja. Estos términos son dependientes con respecto a la fracción de baches, la

fracción vacía de burbuja bache y la velocidad de la capa bajo el bache y la burbuja. La fracción de vacíos en la burbuja bache  $f_{GB}$ , es obtenido, tratando el flujo en la capa bajo el bache burbuja como flujo estratificado o anular. Esto es descrito mas adelante en Malnes, donde se encuentra una formula adicional. Para el flujo bache, el término de la fricción en la pared será mas complicado que el mostrado en las ecuaciones (6-7), mientras que la fricción del liquido será dependiente de  $v_G$  tanto como de la fricción de gas en  $v_L$ .

### III.5.4 Transiciones de régimen de flujo

Los factores de fricción y perímetros mojados constituyen regímenes de flujo dependiente. La transición entre el flujo distribuido y separado esta basada en suposiciones de fracciones de burbuja promedio y es determinado en función de un resbalamiento mínimo. Es decir, se escoge, el régimen de flujo que proporciona la mínima velocidad del gas. Un criterio similar ha sido previamente encontrado empíricamente por Wallis para describir la transición de un flujo anular a un flujo bache excelentemente. Este criterio considera las siguientes transiciones:

Flujo estratificado a flujo burbuja

Flujo estratificado a flujo bache

Flujo anular a flujo bache

Flujo anular a flujo burbuja

En flujo distribuido, el flujo burbuja es obtenido continuamente cuando todo el gas es transportado por los baches de liquido (cuando la fracción de bache  $F_S$  es aproximado a 1.0). Esto ocurre cuando la fracción de burbujas en el bache de líquidos  $f_{GS}$  llega a ser más grande que la fracción de burbuja promedio.

La transición del flujo estratificado al anular se obtiene cuando la altura de la onda  $h_w$ , ecuación (22), alcanza la parte superior del tubo (o  $S_L = \pi D$ ).

### III.6 Comparación con experimentos en estado estacionario

El modelo OLGA ha sido comparado con datos de diferentes instalaciones experimentales, cubriendo un amplio rango de tamaños y geometrías, tipos de fluidos, niveles de presión e inclinaciones de tuberías. La gran cantidad de datos han sido obtenidos de experimentos en el laboratorio de dos fluidos de SINTEF, sin embargo, y son particularmente estos datos los que han aumentado nuestra confianza en la aplicación del modelo de dos fases

Los resultados de Beniksen et. al. y muestra una comparación de colgamiento predecidos y medidos para flujo estratificado de diesel y nitrógeno a 30 bar y 30 °C. Las predicciones están dentro de  $\pm 10\%$ .

Los gradientes de presión predecidos o pronosticados y las fronteras del flujo bache de OLGA son comparados con los datos de flujo de dos fases del laboratorio de SINTEF. Las predicciones son bastante buenas, aunque la caída de presión en el bache es demasiado bajo.

Barnea et. al. midieron los patrones de flujo para flujo de aire y agua en tuberías horizontales e inclinadas a condiciones aproximadamente atmosféricas con diámetros de 1.95 y 2.55 centímetros. Como un ejemplo típico, las transiciones de régimen de flujo predecidos han sido comparados con los mapas de flujos experimentales para +2 grados de inclinación.

Crouzier midió la caída de presión y colgamiento en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas para flujo de aire y agua a presiones cercanamente a las atmosféricas en un tubo de 4.5 cm.

Las predicciones de OLGA son comparados con los datos de Cruzier. Generalmente la caída de presión calculada y medida y el colgamiento concuerdan bastante bien, considerando la dispersión en los datos. Las transiciones de régimen de flujo son observadas cuando los cálculos del colgamiento del líquido para flujo bache superan predicciones del flujo estratificado-anular-niebla. El régimen con un colgamiento mínimo es el régimen predicho por OLGA y los resultados son excelentes.

### **III.7 Comparación con los experimentos dinámicos**

El modelo OLGA ha sido comparado con los datos de dos tipos de experimentos. Schmidt et. al. llevaron a cabo experimentos a condiciones de laboratorio con tuberías de diámetro interno de 5.08 centímetros a presión atmosférica. El laboratorio de flujo de dos fases de SINTEF ha reproducido datos para flujo de gas y aceite en tuberías de 8" con longitud total de 450 metros ha presiones arriba de 100 bars.

### **III.8 Datos de inestabilidad de flujo por diferencias en elevación de la tubería**

Un flujo inestable es un tipo de flujo transitorio asociado con bajas tasas de flujo. Esto puede por ejemplo ser observado en tuberías donde un tubo inclinado termina en un raiser. La inestabilidad es iniciada por la acumulación de líquido en punto bajo. Una descripción con mas detalle del fenómeno es encontrado en los artículos de Schmidt et. al. y Bendiksen et. al.

### **III.9 Datos de flujo de entrada transitorias**

Los experimentos dinámicos en el laboratorio de flujo de dos fase de SINTEF con el tiempo dependiente en la tasa de flujo de entrada fueron llevado a cabo con una línea de flujo horizontal terminando en riser. Los fluidos fueron Nafta y Nitrógeno,

la velocidad superficial en el líquido de entrada fue mantenida constante a 1.08 m/s, mientras que la velocidad superficial del gas fue incrementada de 1.0 a 4.2 m/s en un periodo de 20 segundos. El incremento en la tasa de flujo de gas, resulta en una disminución del colgamiento del líquido. Esta discontinuidad en el colgamiento del líquido tiende a extenderse y a convertirse en bache mientras viaja a lo largo de la tubería. El modelo OLGA describe el flujo bache y también es capaz de simular la evolución en el tiempo del colgamiento y la respuesta de presión en las condiciones de entrada. El tiempo de respuesta es bueno pero ligeramente bajo.

### **III.10 Comparación de los resultados de OLGA en el área de estudio**

Para probar las capacidades de extrapolación de OLGA ha sido llevado a cabo un estudio, comparando los resultados de este modelo con datos obtenidos en otros modelos en el área, ver Bendiksen et. al.. Los resultados de uno de estos estudios, los de VIC Bilh-Lacq, en una tubería con gas y aceite serán presentados con más detalle mas adelante. Se trata de un campo petrolero de crudo pesado, situado en el Suroeste de Francia.

La longitud de la línea es de 43.8 km., el diámetro interno de 25.1 cms. y la rugosidad absoluta de 0.03 mm. Las condiciones de flujo son caracterizados por velocidades superficiales de líquido alrededor 0.17 m/s y velocidades superficiales del gas en un rango de 0.02 m/s a 0.4 m/s, como se ve en Lagiere et. al. y Corteville para más detalles. Las inclinaciones son muy grandes, obteniéndose en las secciones de arriba casi llenas de aceite y las secciones de abajo llenas de gas. Debido a las velocidades muy bajas, las caídas de presión son mayoritariamente por gravedad en las secciones pendiente arriba, con una ligera recuperación en las secciones pendiente abajo.

Los datos de caída de presión son reportados a lo largo de la tubería en cuatro puntos para una presión en Lacq de 17.0 bars abs. y un flujo de 700 m<sup>3</sup>/dia, que se ha asumido representar el flujo de masa total de 7.28 Kg/s. En la Tabla 1, los resultados de OLGA (versión 87.0) y el modelo de estado estacionario PEPITE, Lagiere et. al. (1984) son comparados para valores medidos usando el perfil de arrastre reportados en Lagiere et. al.. Se observa que la caída de presión calculada por OLGA es de 15% mas bajo, mientras que los resultados calculados por PEPITE son extremadamente buenos.

Para verificar los datos de entrada se corrió una versión disponible de PEPITE con los mismos datos de entrada utilizados en OLGA. Como se puede observar en la Tabla, la caída de presión de PEPITE es aún mas bajo que los valores de OLGA, de orden de 28% más bajos.

Las discrepancias encontradas se debieron al perfil de arrastre reportados en Lagiere et. al., siendo demasiados burdos. Nuevamente, los resultados substancialmente mejores de OLGA, basados en un perfil de tubería detallado.

### **III.11 RESULTADOS**

El modelo OLGA ha sido presentado, enfatizando particularmente el modelo de dos fluidos, y la descripción del régimen de flujo. La importancia de incluir el flujo de las gotas de líquido ha sido discutido. Despreciando las gotas de líquido en un flujo anular vertical fue mostrado para dar sobre predicciones de la presión del orden de 50% en casos típicos.

El modelo es aún semimecanístico y requiere verificación experimental. OLGA ha sido probado con información experimental en un amplio rango de geometrías (diámetros de 1" a 8", en algunos casos hasta 30", las relaciones de longitud a diámetro de las tuberías es del orden de 5000, las inclinaciones de las tuberías es de -15 a 90 grados), presiones de 1 a 100 bars y con una amplia variedad de fluidos.

El modelo proporciona resultados razonables comparados con datos de flujo transitorio en la mayoría de los casos. Los mapas de flujo predecidos y las frecuencias de inestabilidades por bacheo se comparan muy favorablemente con los experimentos.

El modelo OLGA ha sido probado en un gran número de oleogasoductos y las predicciones del modelo son generalmente muy aproximadas con las mediciones en campo, ver Bendiksen et. al.. La línea de gas-aceite de Vic Bilh-Lacq del Suroeste de Francia, ha sido una buena prueba, debido a las condiciones de arrastre y de flujo extremadamente crítico. La caída de presión predecida por OLGA fue de 68.5 bars, comparado con 68 bars como valor medido en campo.

## Nomenclatura

$A$	Área transversal de la tubería
$C_o$	Parámetro de distribución del resbalamiento
$c$	Velocidad del sonido
$d$	Diámetro
$E$	Energía Interna por unidad de masa
$f_F$	Fracciones volumétricas (F=G, L, D)
$F_D$	Fuerza de arrastre
$F_S$	Fracción de bache ( $= L_S / (L_B + L_S)$ )
$g$	Constante gravitacional
$G$	Fuente de masa
$h$	Altura
$h_f$	Espesor promedio de la película
$H$	Entalpía
$H_S$	Entalpía de la fuente de masa
$K$	Coefficiente, parámetro de distribución de resbalamiento
$L$	Longitud
$m_G$	$f_{G\rho G}$
$m_L$	$f_{L\rho G}$
$m_D$	$f_{D\rho L}$
$p$	Presión
$U$	Fuente de calor por unidad de volumen
$N_{Fr}$	Numero de Froude
$N_{Re}$	Numero de Reynolds
$R_S$	Relación masica gas-aceite
$R$	Relación de resbalamiento
$S$	Perímetro

$R_D$	Relación de distribución de resbalamiento
$S_f$	Perímetro mojado, fase $f$
$t$	Tiempo
$v$	Velocidad
$v_B$	Velocidad del la burbuja bache
$z$	Longitud de la coordenada
$\alpha$	Angulo con respecto al vector gravitación
$\beta$	Angulo
$\Delta p$	Caída de presión
$\Delta t$	Intervalo de tiempo
$\Delta z$	tamaño del Mesh
$\varepsilon$	Rugosidad absoluta
$\mu$	Viscosidad
$\lambda$	Coefficiente de fricción
$\pi$	Pi
$\rho$	Densidad
$\sigma$	Tensión superficial
$\psi$	Termino de transferencia de masa

#### Subíndices

$ac$	aceleración
$B$	Burbuja
$D$	Gota
$d$	Acumulación de gotas
$e$	Arrastre de gotas
$F$	Fricción
$f$	fase $f$ (G,L,D)

<i>G</i>	Gas
<i>GB</i>	Gas, Burbuja
<i>GS</i>	Gas, bache
<i>h</i>	Hidráulico, horizontal
<i>h<sub>i</sub></i>	Hidráulico, interfacial
<i>i</i>	Interfacial
<i>L</i>	Líquido
<i>o</i>	Flujo relativo cero del líquido en el infinito.
<i>v</i>	Vertical
<i>LB</i>	Líquido, Burbuja
<i>LS</i>	Líquido, bache
<i>R</i>	Relativo
<i>s</i>	Superficial
<i>S</i>	Bache
<i>sG</i>	Superficial, gas
<i>sL</i>	Superficial, líquido
<i>w</i>	Onda
<i>W</i>	Pared

en régimen transitorio, este simulador utiliza el modelo de dos fluidos

## **CAPITULO IV**

### **Construcción de modelos de simulación**

La construcción de los modelos de simulación es una tarea ardua que requiere de mucha información la cual fue proporcionada por personal del activo. La construcción de los modelos se divide en las siguientes etapas:

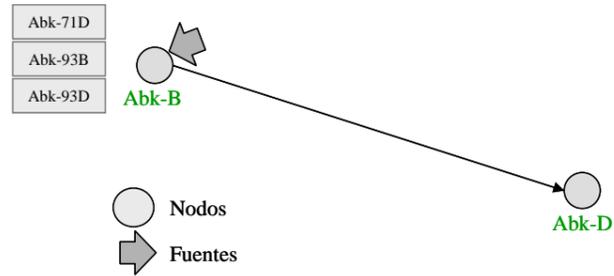
- Clasificación de la información proporcionada.
- Elaboración de configuración física de la red de recolección y pozos.
- Elaboración de modelo térmico.
- Construcción de modelos de equipo en plataforma.
- Creación de tablas de propiedades de los fluidos.
- Obtención de estados pseudoestacionarios.
- Ajuste con datos de campo.

En cada una de las etapas se desarrollaron una serie de actividades específicas de forma independiente para finalmente reunir los resultados y obtener el modelo final de cada una de las redes de recolección.

## CAPITULO V

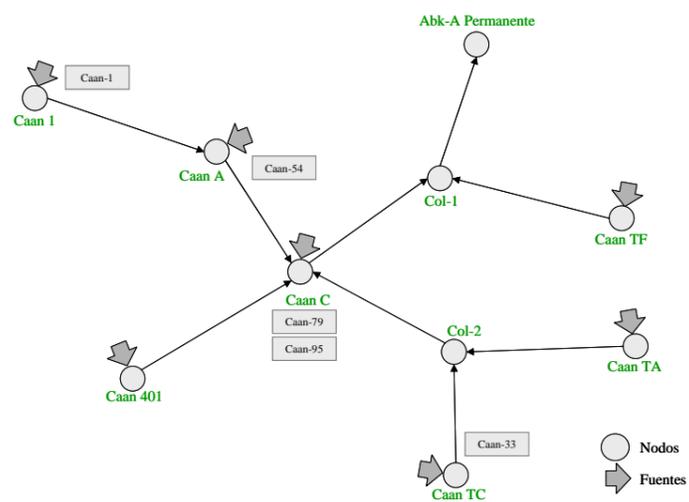
### Modelos de simulación en OLGA 2000

Se muestran a continuación los modelos de simulación desarrollados, para facilitar su construcción se elaboraron diagramas de nodos y enlaces para cada red. Así, la red de Abkatún-D Permanente se representa en el siguiente diagrama.



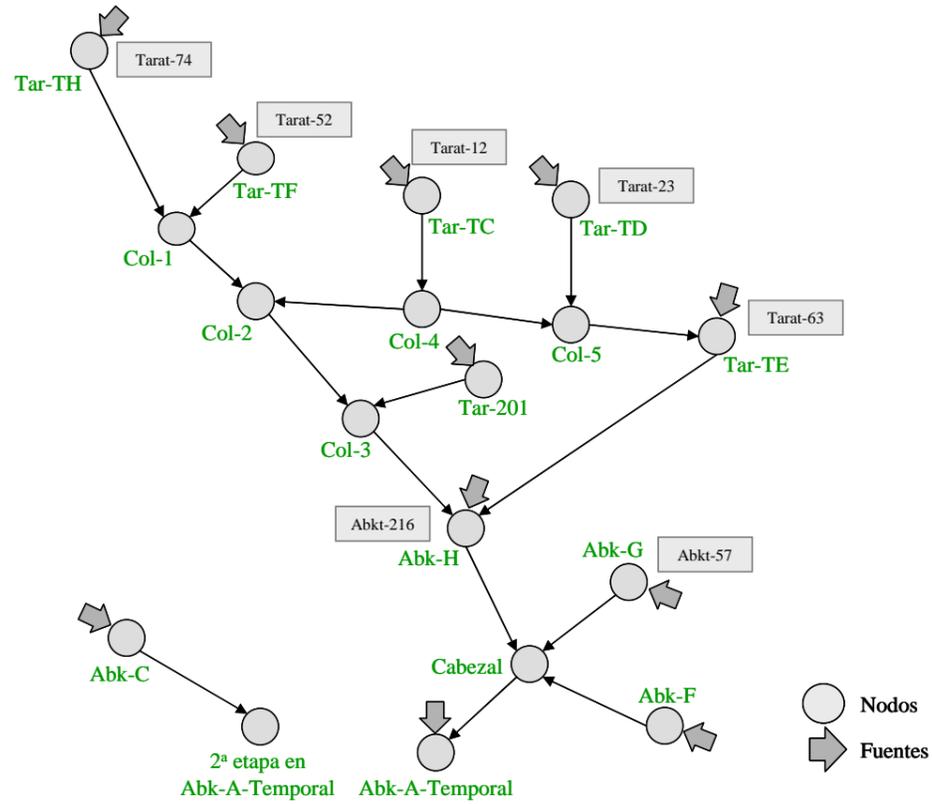
**Figura 9. Modelo de nodos y enlaces de Abkatún-D**

La red del campo Caan como sigue.



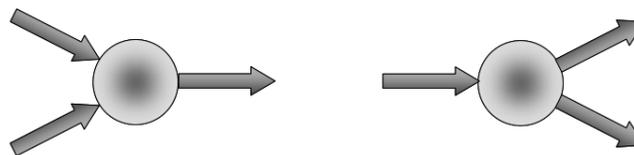
**Figura 10. Modelo de nodos y enlaces de Caan**

Todas estas redes son convergentes. El caso de la red de Abkatún-Taratunich es diferente, esta es una red convergente-divergente.



**Figura 11. Modelo de nodos y enlaces de Abkatún-Taratunich**

En la red convergente-divergente se presenta un circuito cerrado. Hay un punto importante a discutir acerca de ella. Las redes de recolección deben armarse con nodos de enlace y nodos de división como los mostrados a continuación.

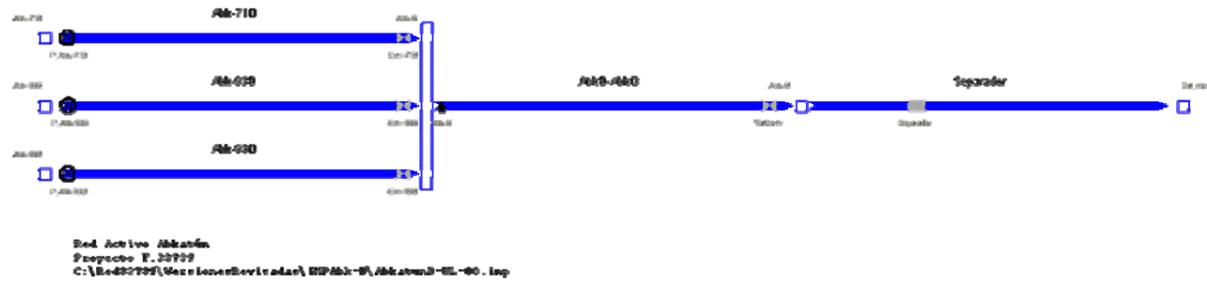


**Figura 12. Nodos de enlace y nodos de división**

Para ensamblar el circuito cerrado a partir de estos elementos es necesario establecer la dirección de flujo en alguno de los ramales de la red. En este caso se supuso que el nodo al que llega Taratunich-TC sea un nodo de división. Esta

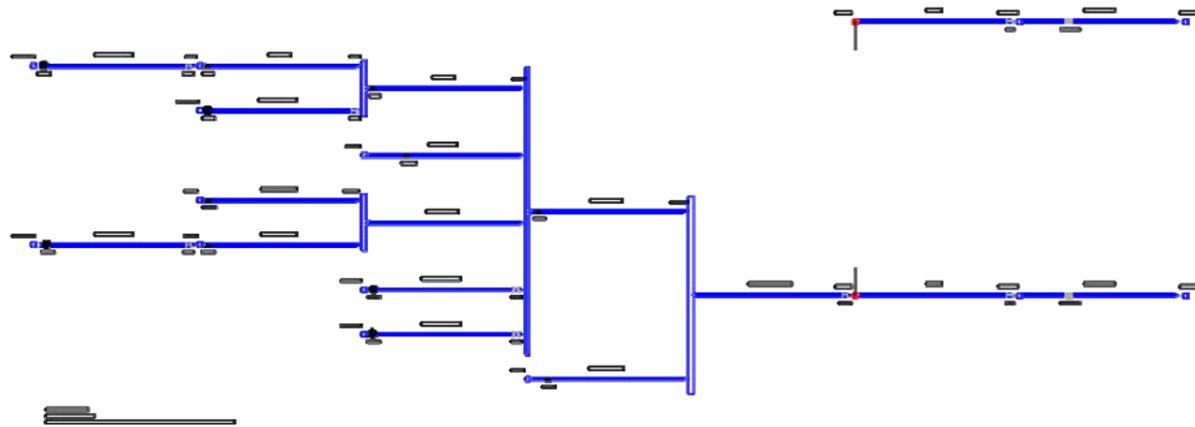
decisión no se toma de forma arbitraria, esta dirección de flujo es la supuesta en el modelo de estado estacionario desarrollado con *Pipephase*. Dentro de *OLGA 2000* estrictamente hablando, en este nodo no se fija la dirección de flujo, al final el simulador en base al balance de presiones es capaz de determinar cual es la dirección de flujo real.

En el entorno de *OLGA 2000* las redes de recolección citadas tienen el siguiente aspecto. La red de Abkatún-D.



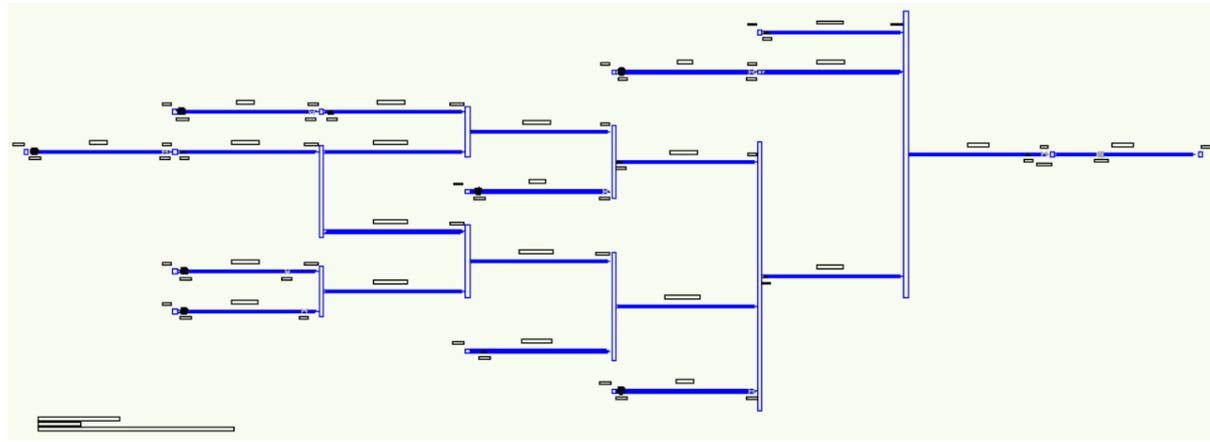
**Figura. 13 Modelo de simulación de Abkatún-D**

La red de Caan.



**Figura 14. Modelo de simulación de Caan**

Y finalmente la red de Taratunich.



**Figura 15. Modelo de simulación de Abkatún-Taratunich**

Para la simulación de las redes de recolección es necesario obtener para cada una de ellas estados pseudo estacionarios, estos son la representación del estado actual de estos sistemas y son punto de partida para efectuar los estudios que sean de interés. Posterior a la obtención de estados pseudo estacionarios, o más precisamente, de determinar los tiempos en que estos se alcanzan, se procede a efectuar el ajuste de los resultados de simulación con los datos de campo, tal como se hizo en la simulación en estado estacionario. En estos sistemas se tomó la variación del inventario líquido dentro de las tuberías como parámetro que permite reconocer la existencia de estados pseudo estacionarios. En todos los casos se obtuvo un buen ajuste respecto a la información medida en campo.

## CAPITULO VI.

### Resultados de la simulación.

Una de las enormes posibilidades que ofrece la simulación en régimen transitorio radica en la capacidad de observar el comportamiento dinámico de los sistemas y a través de su respuesta formular un diagnóstico de su estado. Para el análisis de los resultados expuestos más adelante, se emplea la siguiente metodología. En base a las fluctuaciones de las siguientes variables:

- La presión.
- La temperatura.
- La fracción líquida.
- El flujo instantáneo de gas.
- El flujo instantáneo de líquido.

Es posible evaluar el comportamiento dinámico de los sistemas, se pueden reconocer tendencias o comportamientos típicos. Se enunciarán a continuación los resultados relevantes de cada una de las redes de recolección.

En la red de Abkatún-B/Abkatún-D se encontró que según el modelo de simulación, el sistema opera de forma muy estable, en la línea superficial se tiene flujo en *baches*, los tapones de líquido son cortos con los que se tiene prácticamente un flujo cuasi estacionario. Este comportamiento es benévolo para el sistema, la presencia de *baches* de líquido en este caso no se debe confundir con el taponeo o *batcheo* severo que desfavorece la estabilidad del sistema.

En los resultados de la simulación de la red de Abkatún-C/Abkatún-A, se delata la presencia de *batcheo* severo en la línea superficial. En este sistema a pesar de haberse resuelto empleando tiempos de integración muy largos, no se logró estabilizar el inventario líquido dentro de la tubería, esto es consecuencia del *batcheo* severo que se presenta en la línea superficial.

En la simulación de la red del campo Caan se tiene un elemento adicional que forma parte del modelo, la válvula de seccionamiento o *aérea* ubicada en Abkatún-A Permanente. La complicación con esta válvula es que fue diseñada para operar completamente abierta o completamente cerrada, en tanto que actualmente tiene una apertura parcial, misma que estrangula a la línea. No fue posible simular a aperturas parciales la válvula con la información del fabricante ya que esta no está disponible de forma abierta. Por ello la simulación se llevó a cabo empleando una válvula de características similares sólo que de otra marca. Con esta aproximación fue posible reproducir la caída de presión en el accesorio con la apertura que actualmente se tiene en campo. Con el modelo construido se simula el comportamiento de la red del campo Caan. Se encontró evidencia de *batcheo* severo en varias de los tramos, tales como Caan-1/A y Caan-A/C principalmente, pero también se encontró que este efecto no se propaga hasta el complejo por el tramo de 36 pg. que va de Caan-C a Abkatún-A. El sistema opera de forma muy estable, se encontró también que las válvulas de control ubicadas a la carga, permanecen abiertas todo el tiempo, lo cual es coincidente con la información conocida de campo.

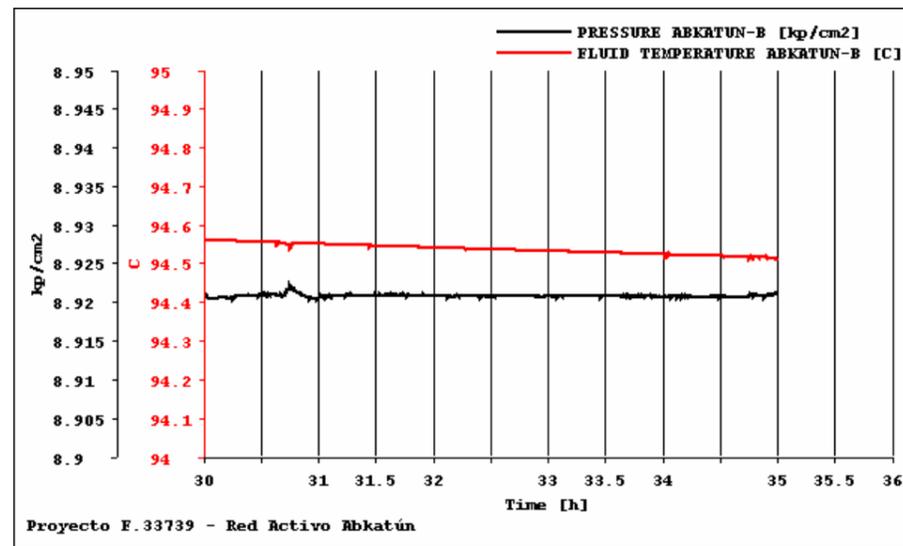
La red de Abkatún-Taratunich es el sistema que más dificultades presentó para su solución, esto debido principalmente a su configuración y a la naturaleza de los fluidos que en ella se transportan. El primer resultado de interés es la determinación de la dirección de flujo en el circuito cerrado, se encontró que la dirección inicialmente propuesta es correcta, además de que existe flujo preferencia de aceite en el punto de división. En ductos de la red de Taratunich no se presenta *batcheo* severo, lo cual si ocurre en el tramo Abkatún-H/Abkatún-A, lo que se atribuye en principio al diámetro de la línea. En los tramos Abkatún-C/Abkatún-A, Abkatún-F/Abkatún-A y Abkatún-G/Abkatún-A si se presenta *batcheo* severo el cual se atribuye principalmente a que las líneas quedan ya muy holgadas para el flujo que se transporta. A pesar de todo esto, dadas las dimensiones del separador, este opera de forma estable aunque ocasionalmente

se presentan transitorios que hacen que se eleve momentáneamente el flujo de líquido.

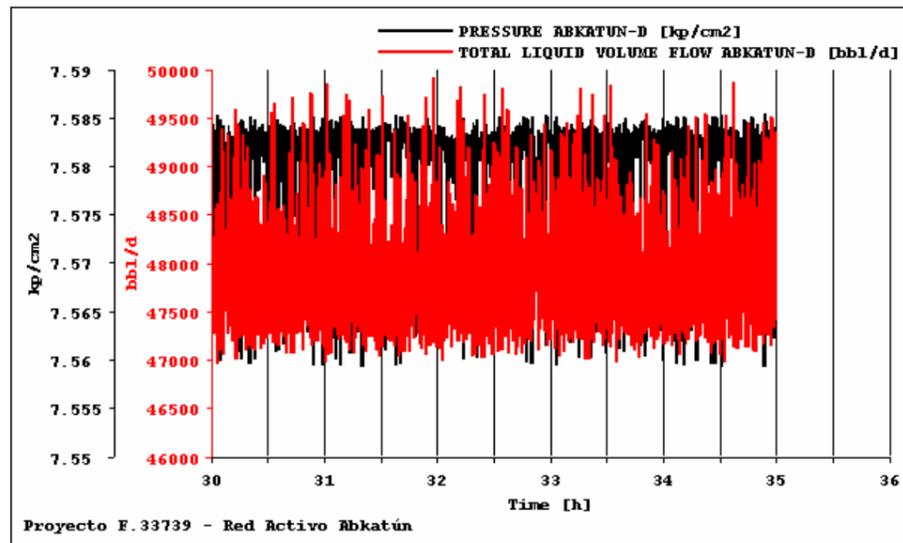
A continuación se muestran los resultados de la simulación de las redes de recolección en régimen transitorio. Todas las presiones aquí mostradas son absolutas.

### VI.1 Resultados de la red de Abkatún-D.

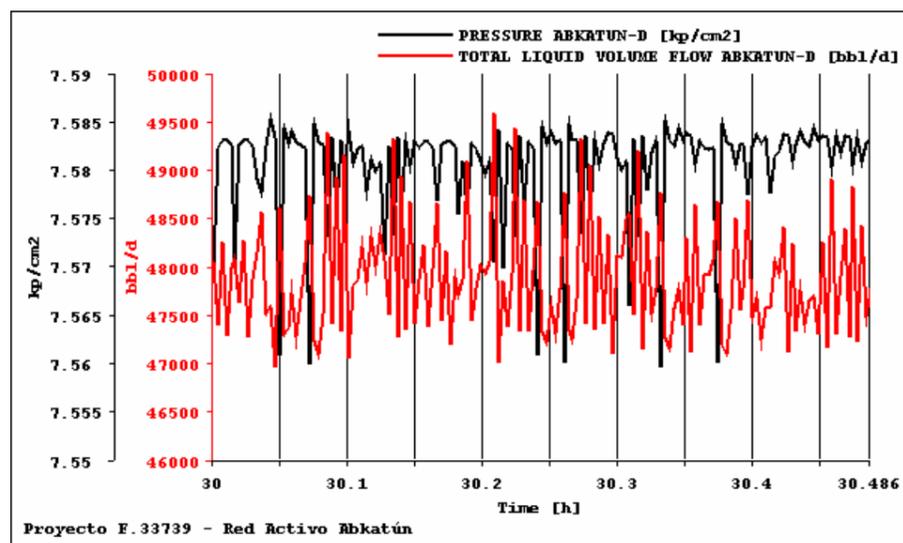
Se muestran en esta sección los resultados obtenidos para la red de Abkatún-D. Se principia por estudiar el comportamiento de la línea superficial que parte de Abkatún-B hacia Abkatún-D.



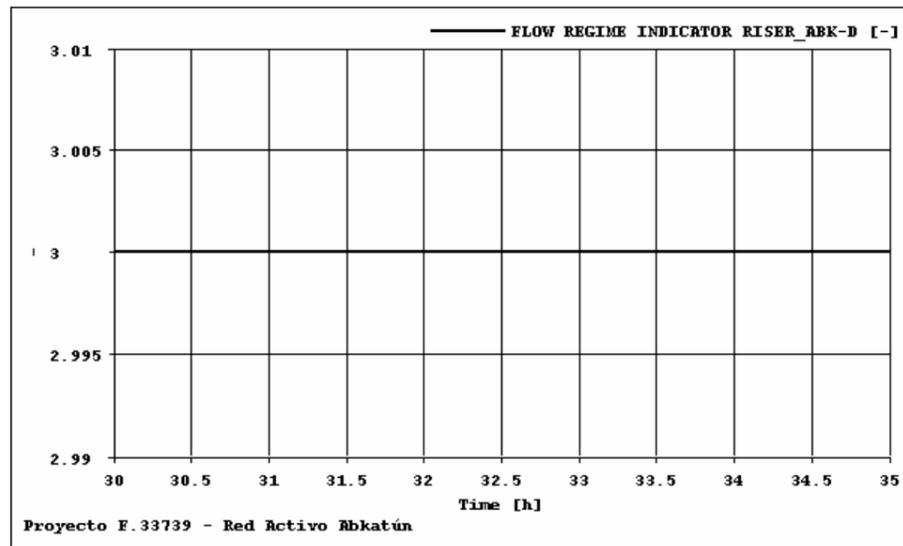
No se observan variaciones apreciables de la presión y temperatura a la salida de la plataforma. En la llegada a Abkatún-D, el flujo de líquido y la presión tienen el siguiente comportamiento



Lo cual muestra variaciones periódicas de la presión y el flujo. Si se traza la gráfica en media hora de tiempo, se tiene el siguiente comportamiento.



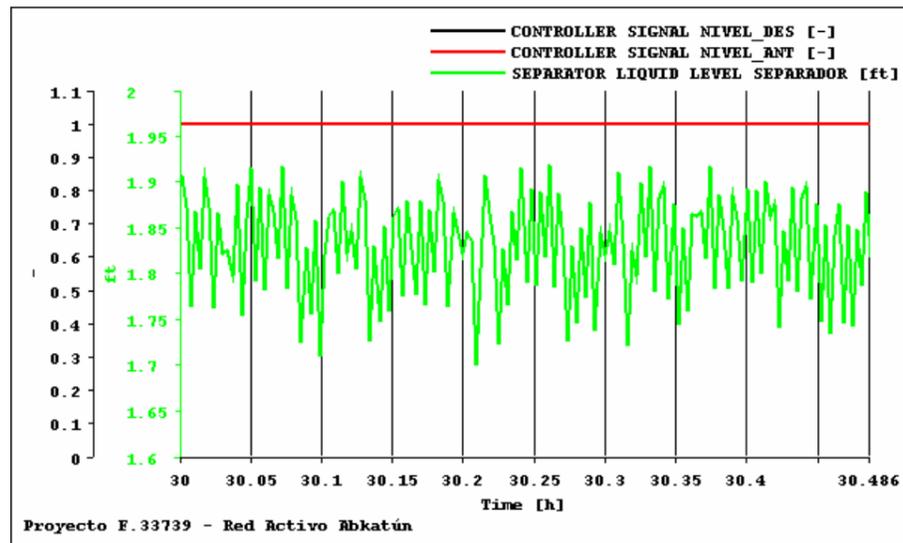
Se observa que la presión varía en realidad dentro de un intervalo muy estrecho. El comportamiento del flujo de líquido es en taponés, típico en el riser. Esto lo podemos ver con el siguiente gráfico.



Se dibuja el indicador de patrón de flujo. Este indicador de flujo toma los siguientes valores:

- Si IF = 1: Flujo estratificado.
- Si IF = 2: Flujo anular.
- Si IF = 3: Flujo en tapones o *baches*.
- Si IF = 4: Flujo en burbujas.

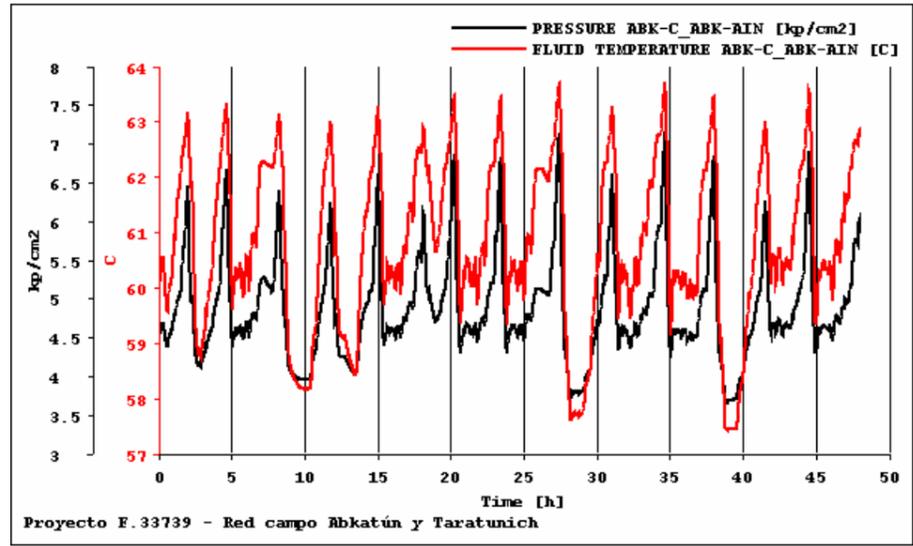
En el punto muestreado que es la base de la tubería ascendente se tiene de forma permanente un patrón de flujo en tapones o *baches*. Si se revisa la actividad de la válvula de control y el nivel de líquido obtenemos lo siguiente.



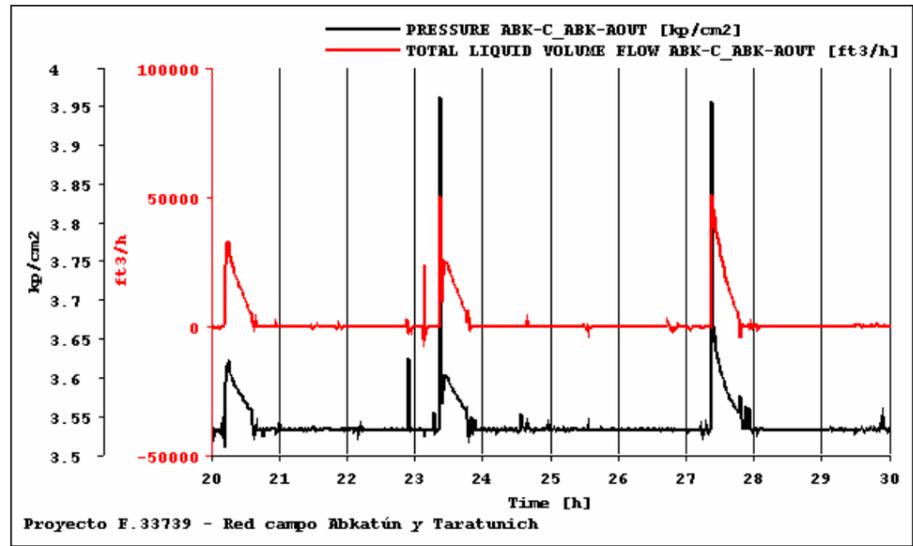
La válvula está permanentemente abierta y el nivel de líquido oscila pero no rebasa el punto de ajuste. En el gráfico se muestra la señal de dos válvulas de control, la rotulada NIVEL\_ANT es la válvula de la entrada, en tanto que NIVEL\_DES es la ubicada en la línea de aceite, la cual es obligatorio poner en el modelo desarrollado en *OLGA 2000* aunque no tenga actividad. El sistema muestra ser sumamente estable. En este se tienen tapones de líquido de tamaño pequeño y con alta frecuencia lo que hace que se tenga un flujo cuasiestacionario que lleva a que el sistema sea estable

## VI.2 Resultados de la red de Abkatún-C

Se muestran en esta sección los resultados obtenidos para la red de Abkatún-C. Este tramo llega a la plataforma Abkatún-A Enlace y a través del separador de prueba se envía al separador de segunda etapa en Abkatún-A Permanente. Para esta red, sólo se simula la línea superficial y el fluido se alimenta con una fuente de masa. Las variaciones de la temperatura y la presión a la salida de Abkatún-C se muestran a continuación.



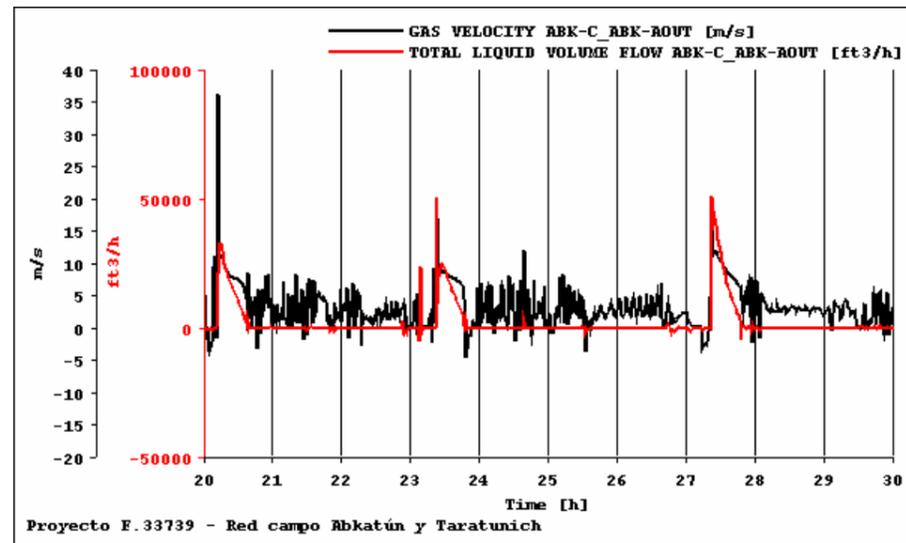
Se tienen variaciones importantes tanto en la presión como en la temperatura, lo cual presupone la presencia de un taponeo severo en la línea superficial. Los valores instantáneos del flujo de líquido y la presión a la salida del ducto se muestran en la figura siguiente.



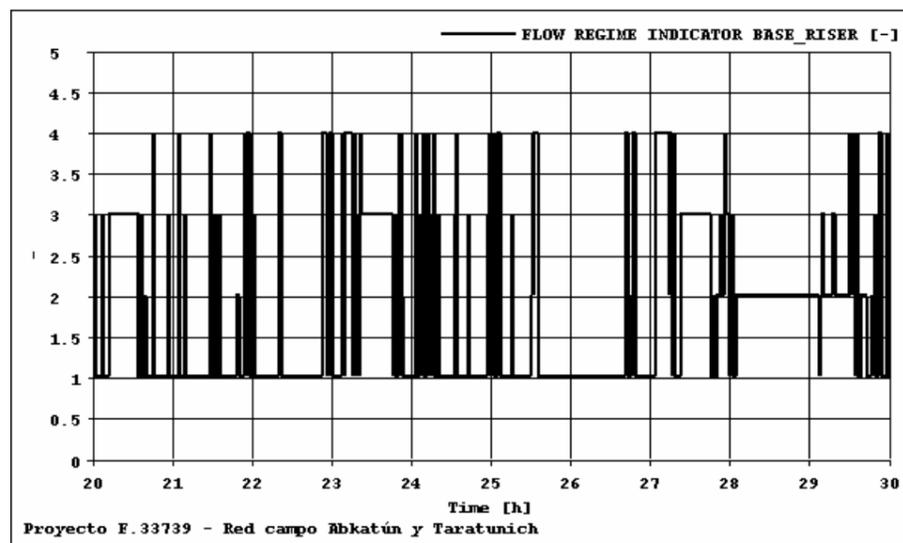
Este gráfico es típico del taponeo severo.

A diferencia del gráfico correspondiente para Abkatún-D, la línea del flujo de líquido en ciertos momentos toca la línea base, cuando esto ocurre se entiende

que existen periodos de tiempo en los que por la salida del ducto sólo fluye gas, esto se puede observar en figura siguiente.



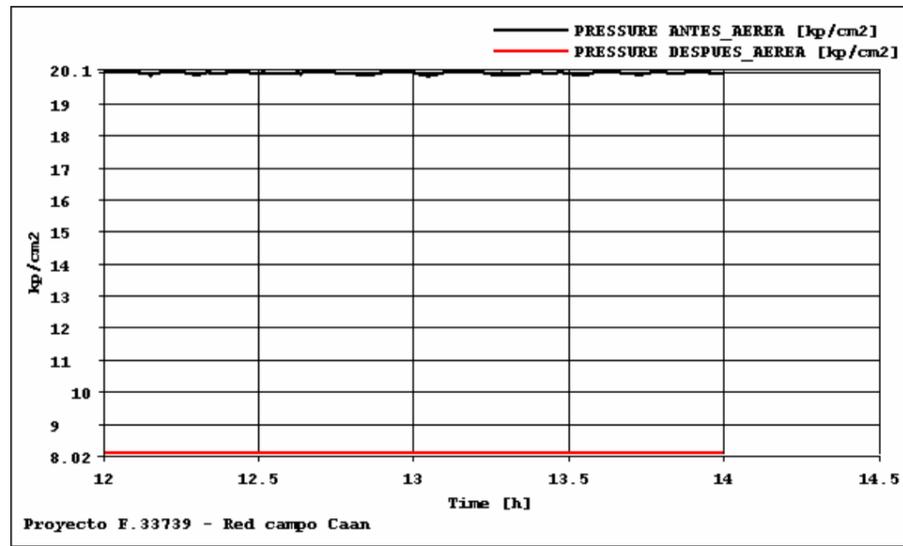
Este comportamiento hace al sistema inestable, ya que durante periodos de tiempo muy cortos ingresará al separador una gran cantidad de líquido con riesgo que este se inunde. Para confirmar la afirmación antes expuesta, se muestra el valor del indicador de flujo en la base de la tubería ascendente en Abkatún-A.



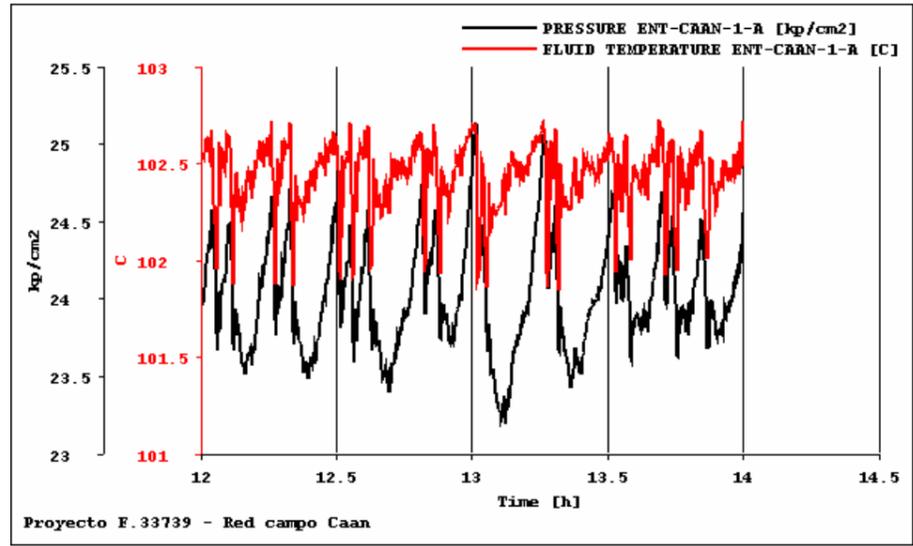
Se observa que en este punto se presentan todos los patrones de flujo durante periodos de tiempo cortos. Se tienen en el sistema tapones de líquido largos con una frecuencia baja, lo cual no es adecuado para ningún sistema de producción.

### VI.3 Resultados del campo Caan

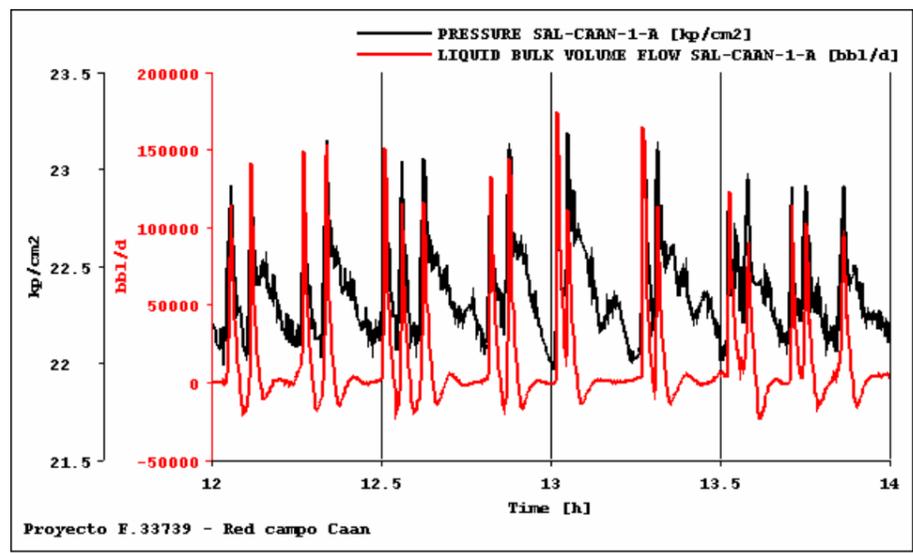
Se muestran en esta sección los resultados de la simulación de la red del campo Caan. Esta es una red con mayor complejidad que las anteriormente analizadas. A propósito se ha dejado este análisis en tercer lugar con el fin de que los resultados mostrados en las secciones anteriores sirvan como antecedente. En principio es de interés mostrar que se modela de forma correcta la válvula de seccionamiento o *aérea*, esta es una válvula de bola que está diseñada para operar ya sea totalmente abierta o cerrada, no con aperturas parciales. En una primera fase se optó por modelar esta válvula como un orificio con un diámetro equivalente tal que reprodujera los datos medidos en campo. Esta opción no mostró ser adecuada, por lo que se realizó una búsqueda de información la cual no fue exitosa para la marca de la válvula instalada. Se optó entonces por buscar información de una válvula equivalente pero de otra marca. Esta opción mostró ser más apropiada. En la gráfica siguiente se muestra la caída de presión que provoca la válvula aérea dentro del modelo de simulación.



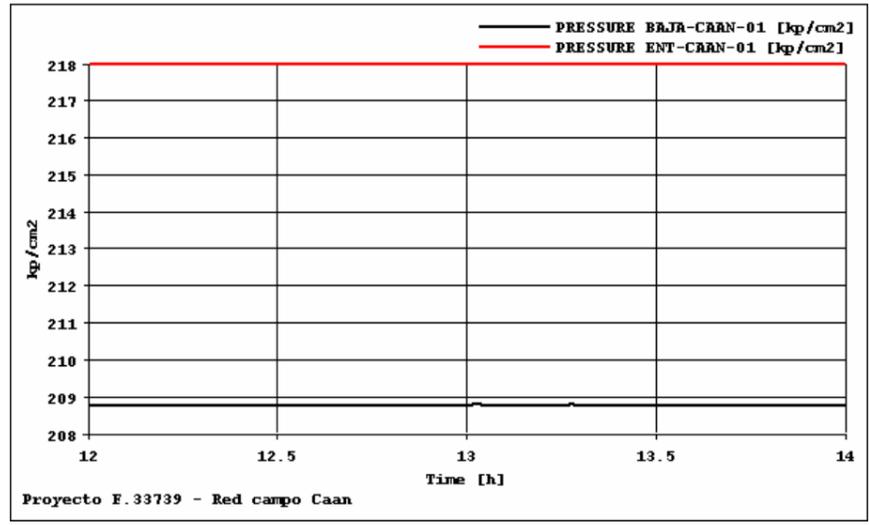
En el modelo la apertura es de 40%, sin ningún ajuste se logra reproducir de muy buena manera el valor reportado en campo. Este punto se destaca ya que buena parte del análisis de este campo y de las alternativas propuestas dependen fuertemente de que tan bien se modele este punto del sistema. Dado que el campo Caan es más extenso y por ende se tiene una gran cantidad de información, se mostrará el análisis en los puntos que a criterio del grupo de trabajo son más relevantes. Algunos puntos como Caan-401 y Caan -TF no se consideran relevantes para el estudio. Así pues, se tienen los siguientes resultados, en la salida de Caan-1.



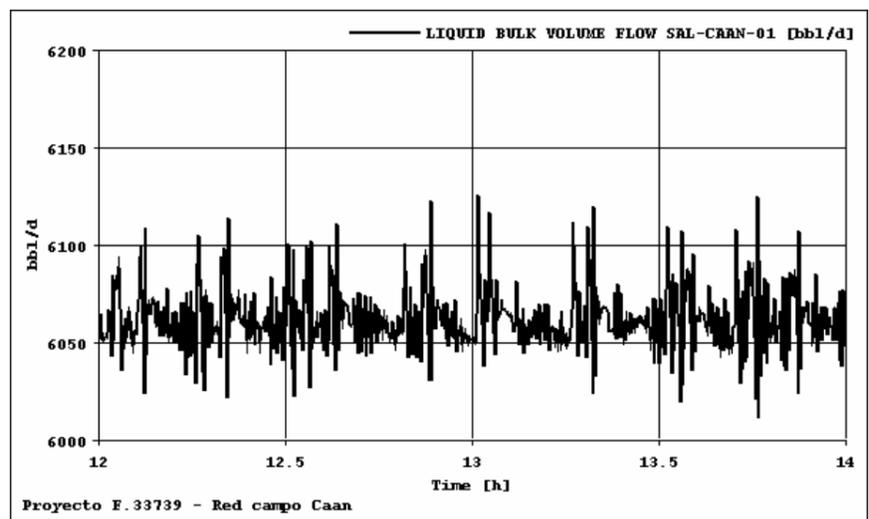
Se sospecha la presencia de bacheo severo en la línea. El flujo de líquido y la presión a la llegada en Caan-A son los siguientes.



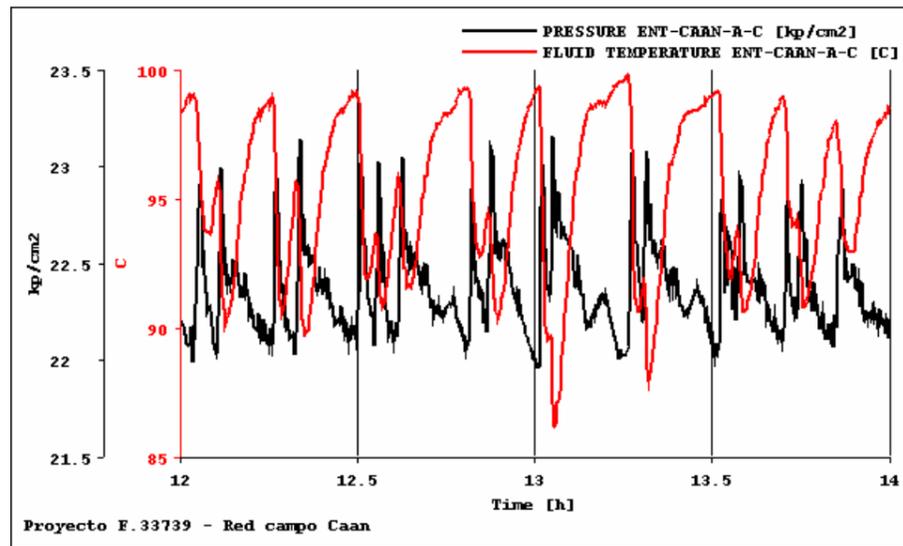
Con lo que se confirma la presencia de bacheo severo, obsérvese que la línea de flujo de líquido toca e incluso rebasa la línea base. Según el reporte de flujo en la válvulas estranguladoras, la del pozo Caan-1 opera en condición subcrítica, eso haría pensar que las perturbaciones exteriores se propagaran al interior, en la gráfica siguiente se muestran las presiones en la parte baja del pozo.



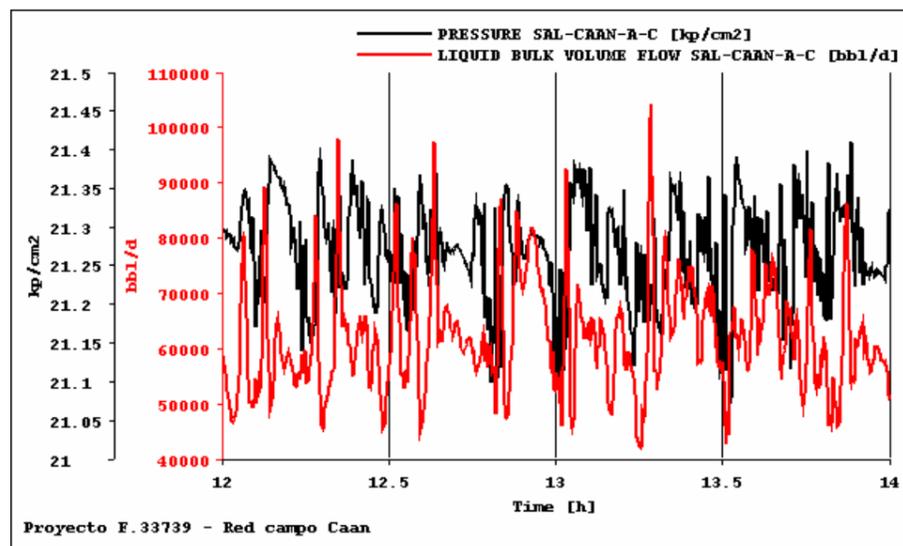
La línea roja es la presión de fondo fluvente en tanto que la negra es la presión en un punto más elevado. Según la simulación realizada por *OLGA 2000*, las perturbaciones del exterior no se propagan hacia el interior del pozo. Lo que es cierto es que se tiene un sistema inestable en la línea de recolección. El flujo de líquido en la salida del pozo Caan-1 es el siguiente.



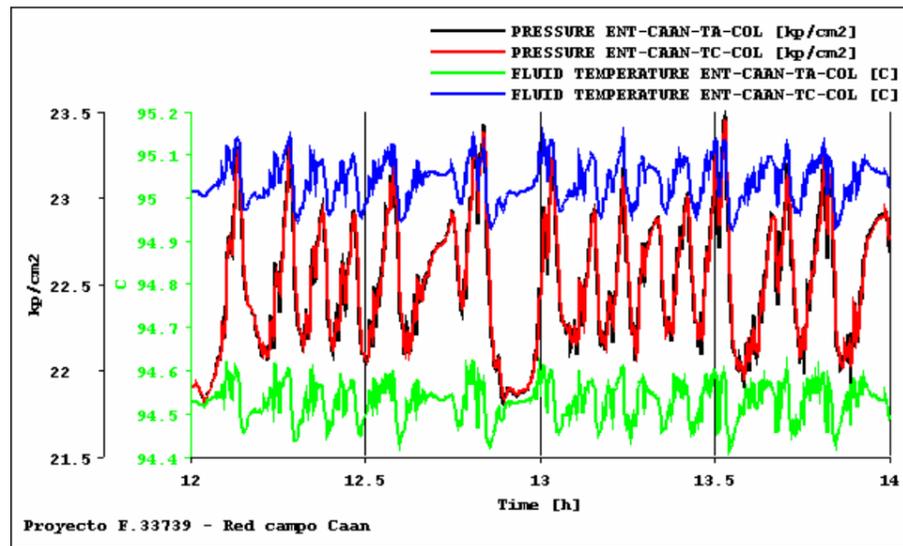
Las contrapresiones provocan inestabilidad (ligera por cierto) en el flujo de líquido que fluye del pozo. Para la salida de Caan-A se tienen los siguientes resultados.



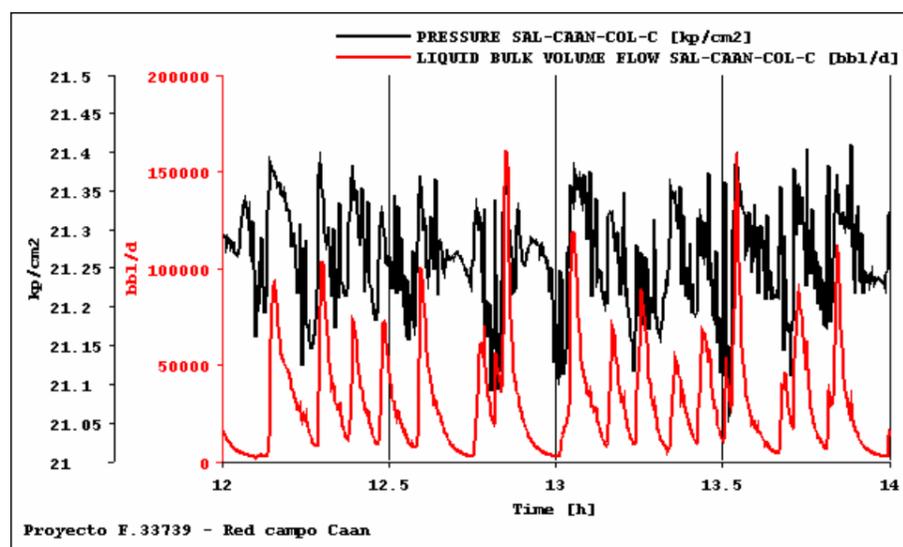
Lo que aquí observamos es propiamente el efecto de propagación de la inestabilidad del tramo Caan-1/Caan-A. A la salida del tramo Caan-A/Caan-C se tienen lo siguiente.



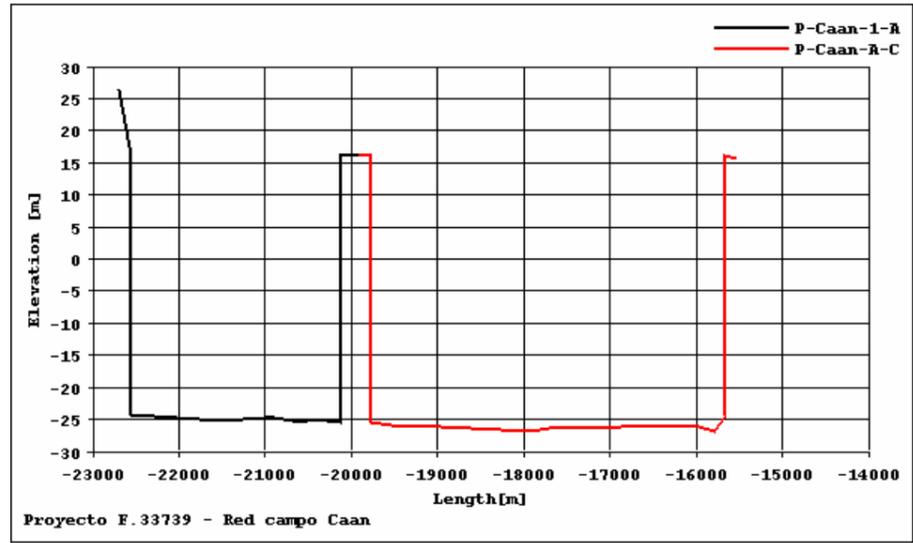
Que es la misma historia. Por el otro ramal se tienen los siguientes resultados en la salida de Caan-TA y Caan-TC.



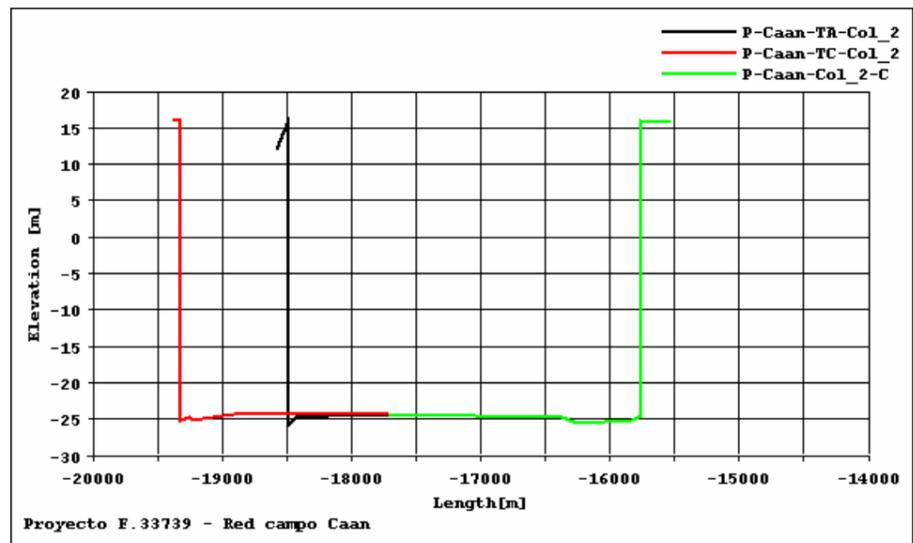
En la salida del tramo que parte de la conexión submarina y llega a Caan-C se tienen las siguientes variaciones de temperatura y flujo de líquido.



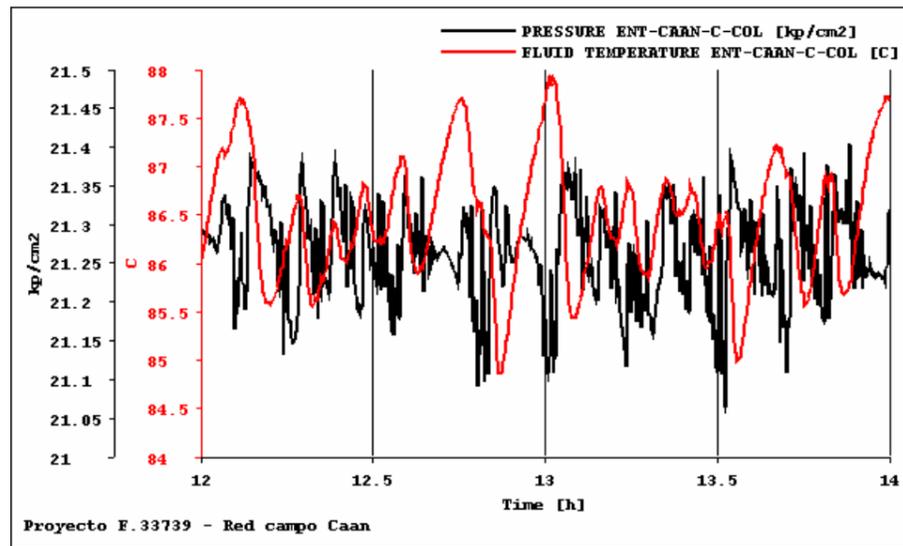
La línea presenta también un bacheo severo. Existe una razón para este fenómeno. A continuación se muestra el perfil del tramo que parte de Caan-1 a Caan-C.



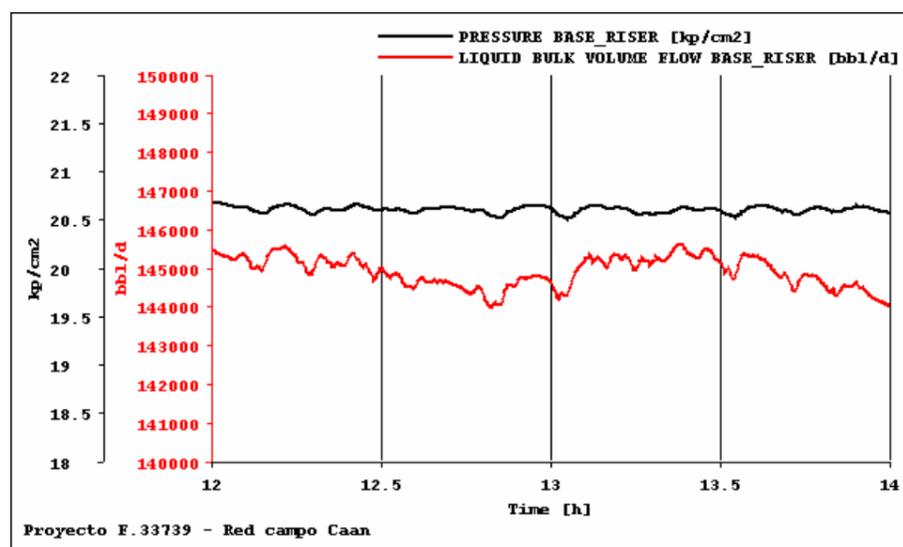
Es una tubería descendente, por lo que el bacheo es inherente debido a la conformación del terreno. A esto se suma el efecto de que la línea de Caan-1 a Caan-A tiene un diámetro de 24 in para un flujo de 12 MBPD aproximadamente. El otro ramal tiene el siguiente perfil.



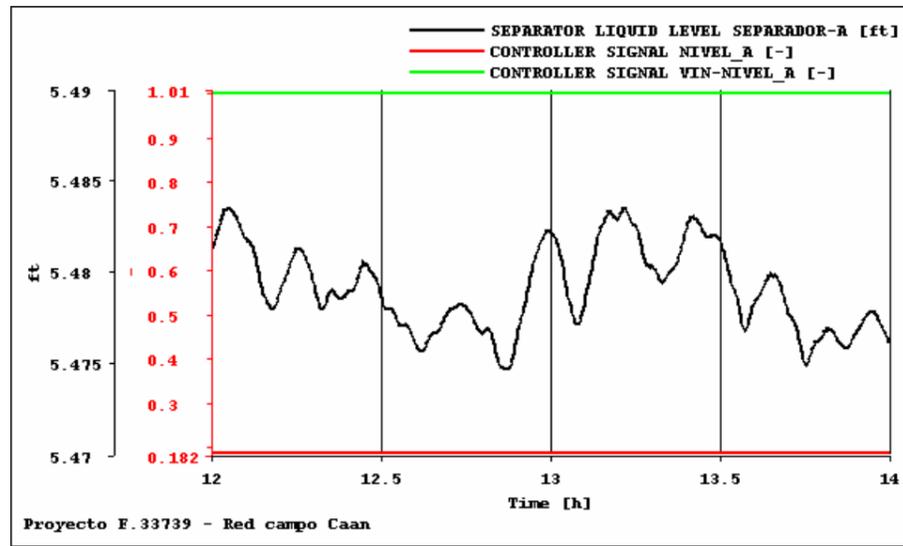
Este efecto es menos significativo salvo en la parte final del ducto. En la parte final de la red se tiene el siguiente comportamiento.



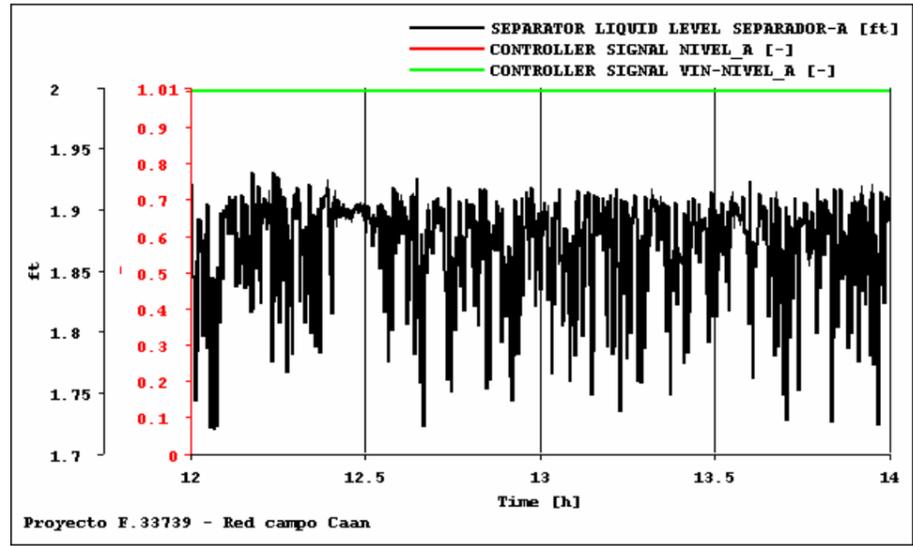
En la base de la tubería ascendente en Abkatún-A Permanente se tiene el siguiente comportamiento.



No se presenta bacheo severo. Esto se explica por la presencia de la válvula aérea que mitiga este efecto. La apertura parcial represiona el sistema con lo que el *bacheo* severo se controla a costa de aumentar la contrapresión hacia los pozos. A continuación se muestra el resultado de la simulación de los separadores.



Esta simulación se lleva a cabo con una filosofía de control distinta a la que actualmente se emplea en el sistema real. En este caso la válvula ubicada a la entrada del separador permanece permanentemente abierta y el nivel se controla con la válvula ubicada a la salida. Para este ejercicio se eleva el punto de ajuste de nivel a 40% en los separadores de primera etapa. La simulación muestra que es factible operar el sistema siguiendo esta filosofía. Si el sistema opera con la filosofía actual con la válvula de entrada regulando el nivel y con el punto de ajuste de nivel en 25%, el desempeño del sistema de control es el siguiente.



La válvula de control se encuentra permanentemente abierta. En este caso todas las inestabilidades como se mencionó antes son amortiguadas por la válvula aérea.

## VI.4 Resultados del campo Taratunich

La red del campo Taratunich es la más compleja de las construidas y analizadas en el proyecto, en principio por la presencia de un circuito cerrado y por la complejidad de los fluidos. Originalmente se supuso que la dirección de flujo es la mostrada en el siguiente diagrama.

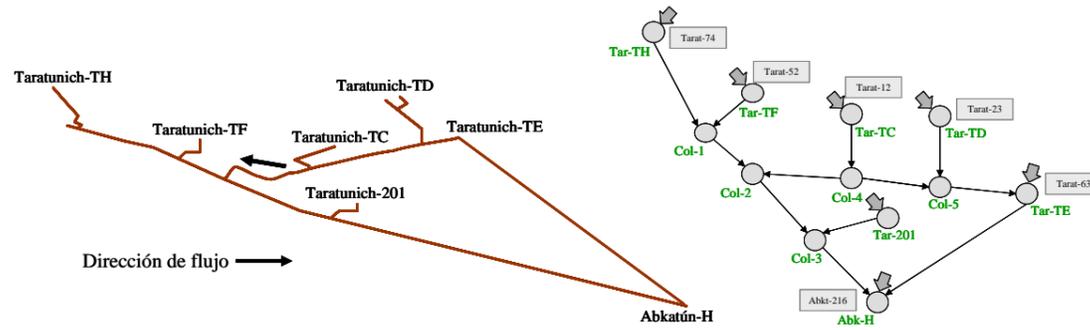
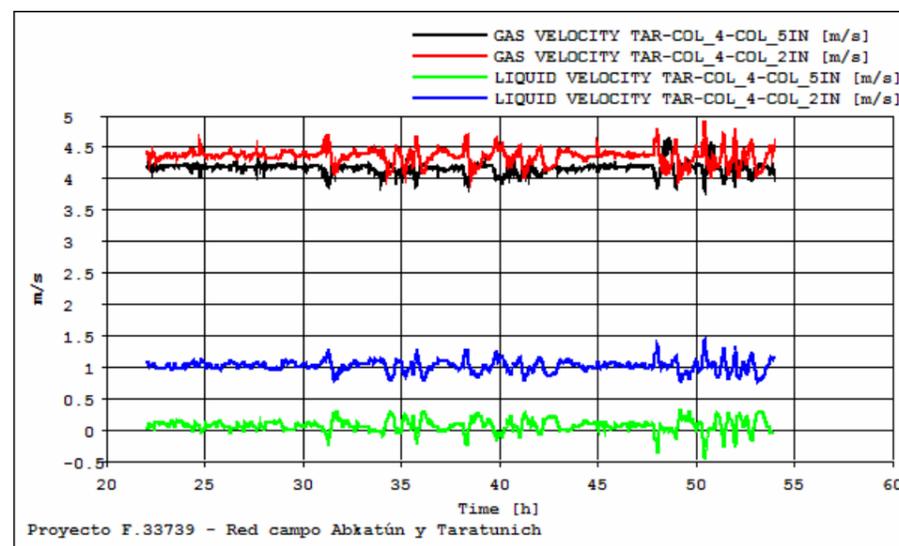
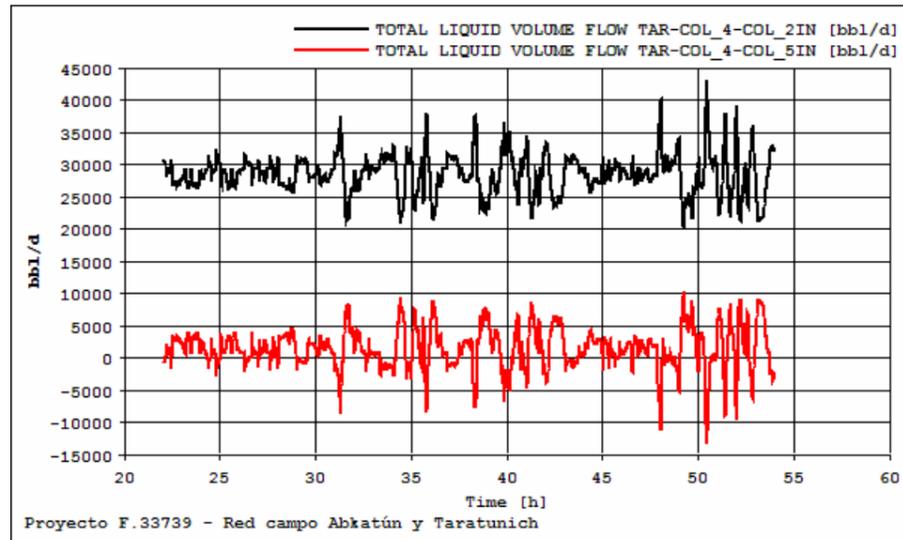


Figura 16. Red de Taratunich

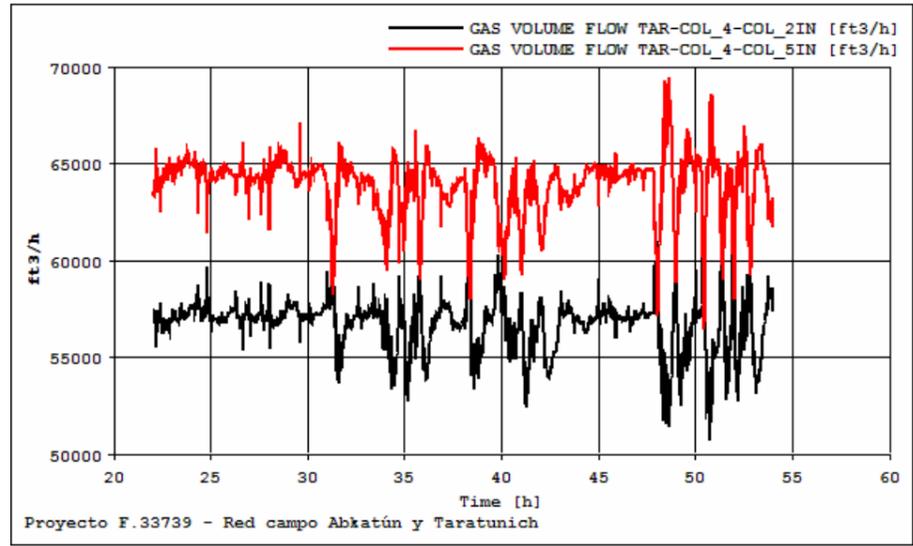
Por ello si la velocidad en el tramo indicada es positiva, se espera que el sentido de flujo sea en esa dirección. En la siguiente gráfica se muestran las velocidades de las fases a ambos lados de la T, la nomenclatura empleada en las gráficas es la misma utilizada en el dibujo del lado derecho de la figura anterior.



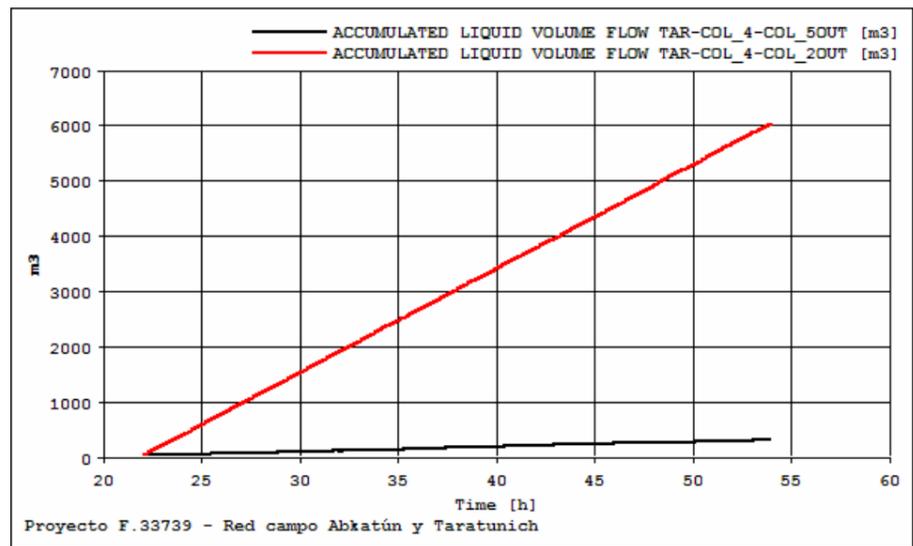
Las líneas negra y verde corresponden a la velocidad hacia la conexión submarina de Taratunich-TD, las líneas roja y azul a las velocidades en el lado contrario. Obsérvese que todas son predominantemente positivas, por lo que la dirección de flujo dominante es la que previamente se había establecido. Es importante notar que las velocidades de gas son del mismo orden de magnitud en tanto que la velocidad de líquido es mayor hacia al tramo que se dirige a la conexión submarina de Taratunich-TF/TH. Esto sugiere que una buena parte del aceite va en esta dirección en tanto que el gas se reparte de forma cercanamente equitativa. Los flujos de líquido que salen de la T son los siguientes.



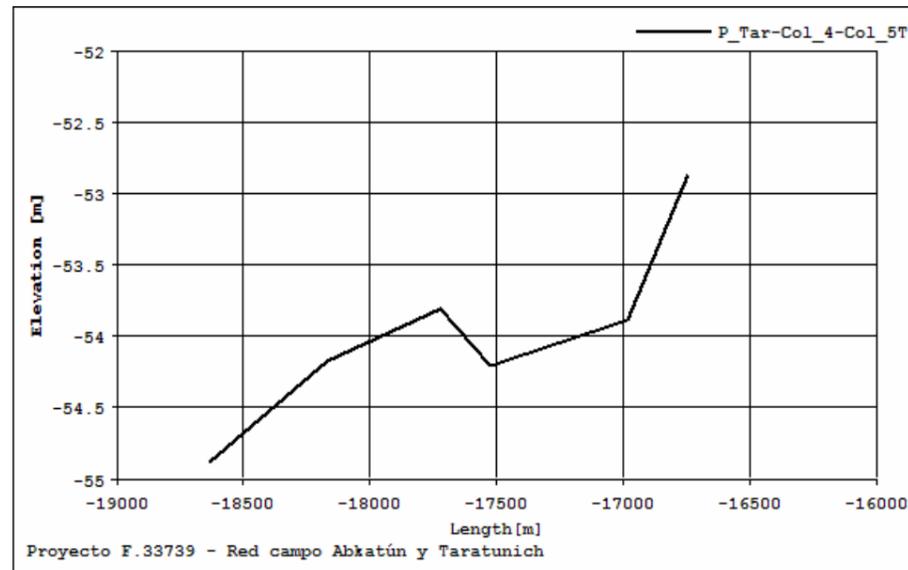
Aquí se confirma lo antes mencionado. Los flujos de gas que salen de la T son los siguientes.



Cerca del 52% del gas fluye por el tramo hacia la conexión submarina de Taratunich-TF/TH y el resto por el otro extremo. Se concluye que por el tramo hacia la conexión submarina de Taratunich-TF/TH fluye buena parte del aceite y casi la mitad del gas producido en Taratunich-TC, esto se demuestra con el siguiente gráfico que muestra los volúmenes acumulados de líquido a ambos extremos de la T.



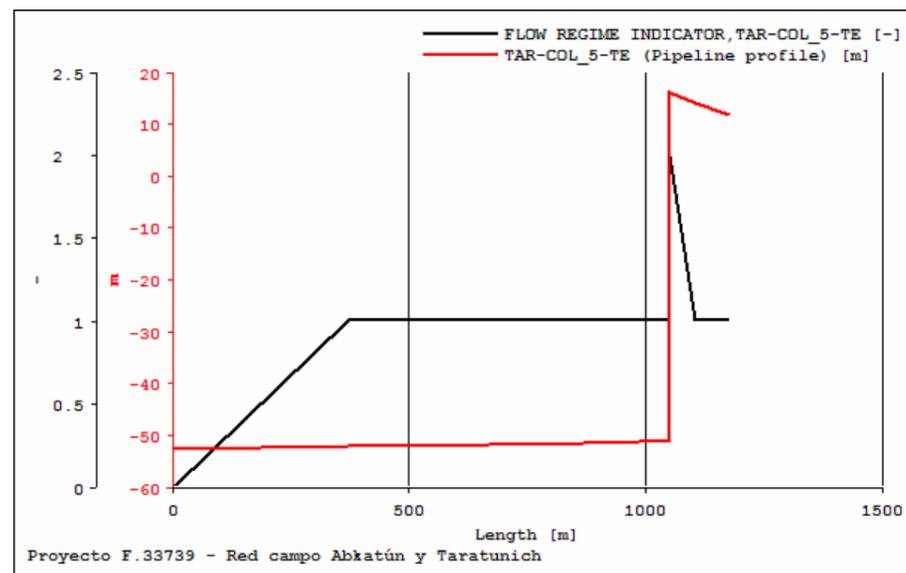
Por el extremo que se dirige hacia la conexión submarina de Taratunich-TD fluye predominantemente gas. Una de las razones por la cual existe flujo preferencial de líquido fluye en una dirección se debe a que el tramo hacia la conexión submarina en TD es ascendente.



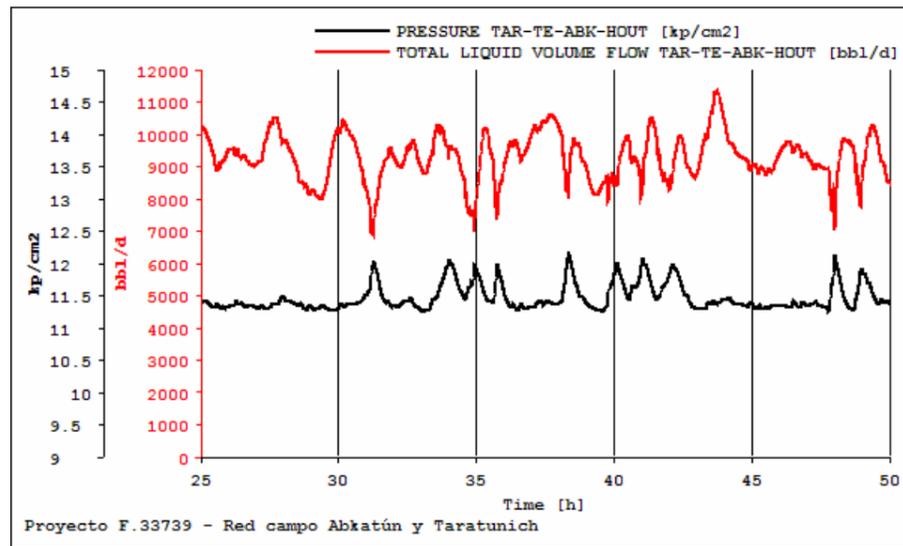
En tanto que el tramo en el sentido contrario es descendente.



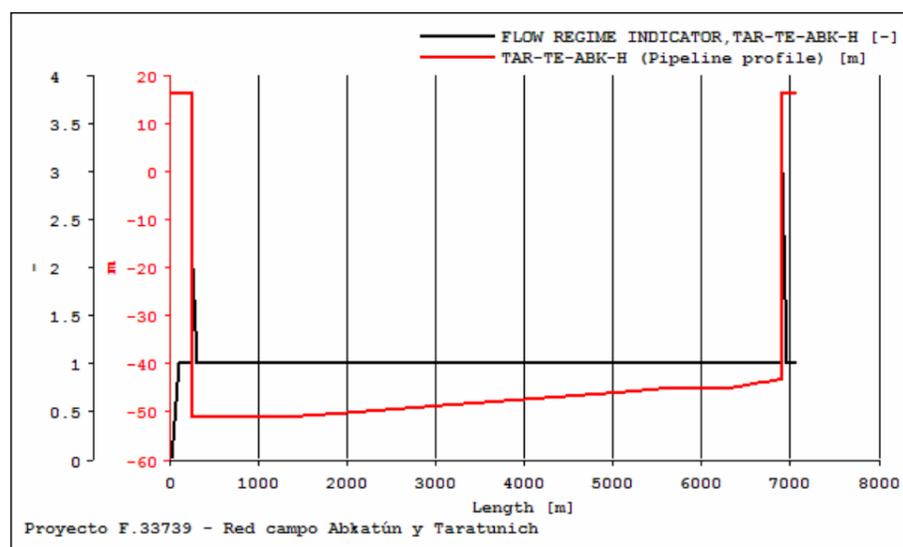
Estos son los resultados obtenidos con el simulador, puede ser que exista una diferencia entre el comportamiento aquí mostrado y el que se registra en la realidad, una de las razones de esta diferencia es que en el modelo no se considera la presencia de obstrucciones en los ductos que induzcan un comportamiento diferente al aquí expuesto.



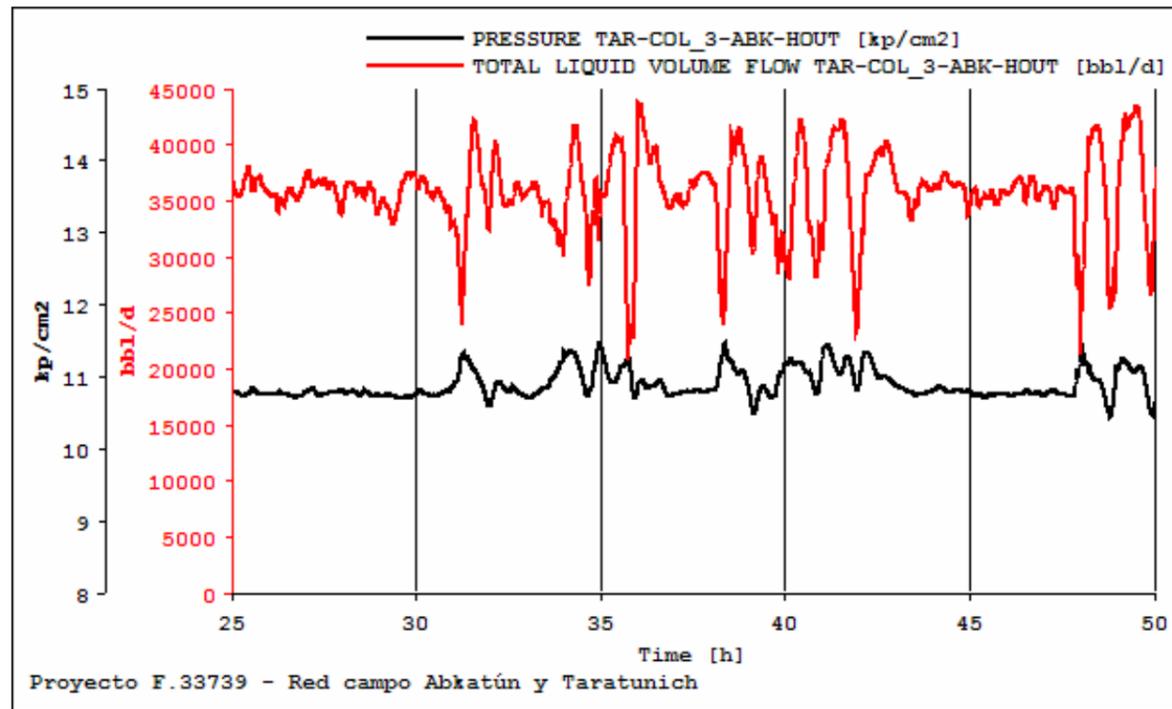
En todo el ducto el flujo es estratificado (ID=1) y sólo en la tubería ascendente es anular. Este mismo análisis para el tramo Taratunich-TE/Abkatún-H se desarrolla a continuación, la presión y flujo de líquido a la llegada en Abkatún-H son las siguientes.



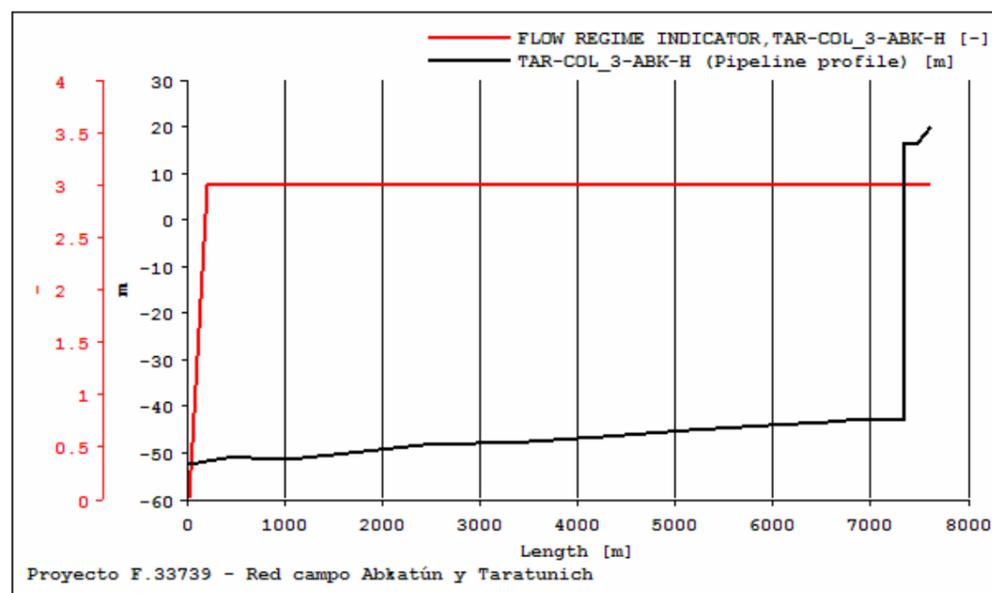
No existen variaciones significativas, si se grafica el identificador de flujo se encuentra que este es invariante con el tiempo.



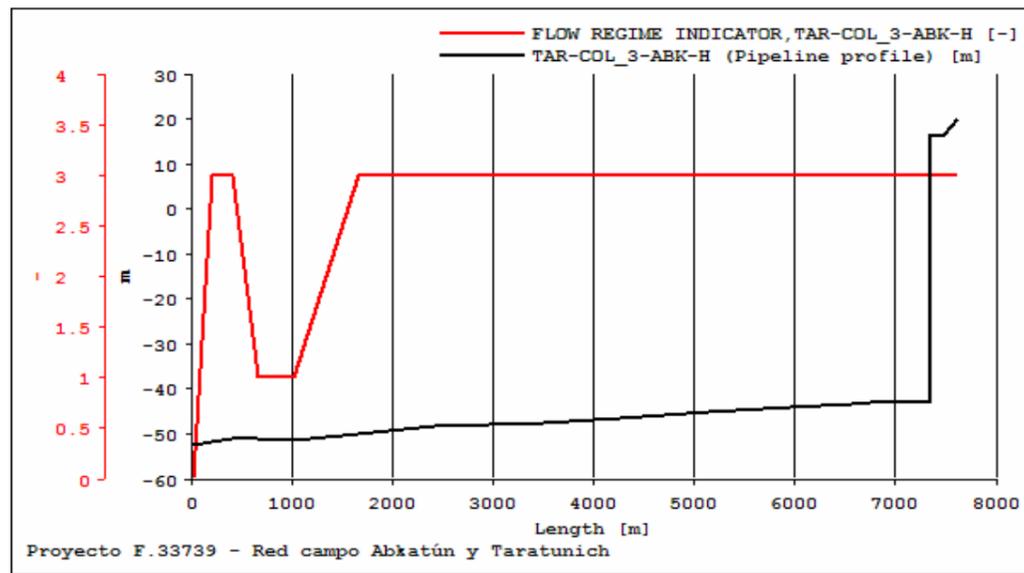
Durante el transporte se tiene flujo estratificado (ID=1) y sólo en la tubería ascendente en Abkatún-H se presenta flujo en tapones (ID=3). Esto se entiende al observar que la línea pendiente del ducto es siempre positiva. La presión y flujo de líquido a la llegada en Abkatún-H del lado de Taratunich-201 son las siguientes.



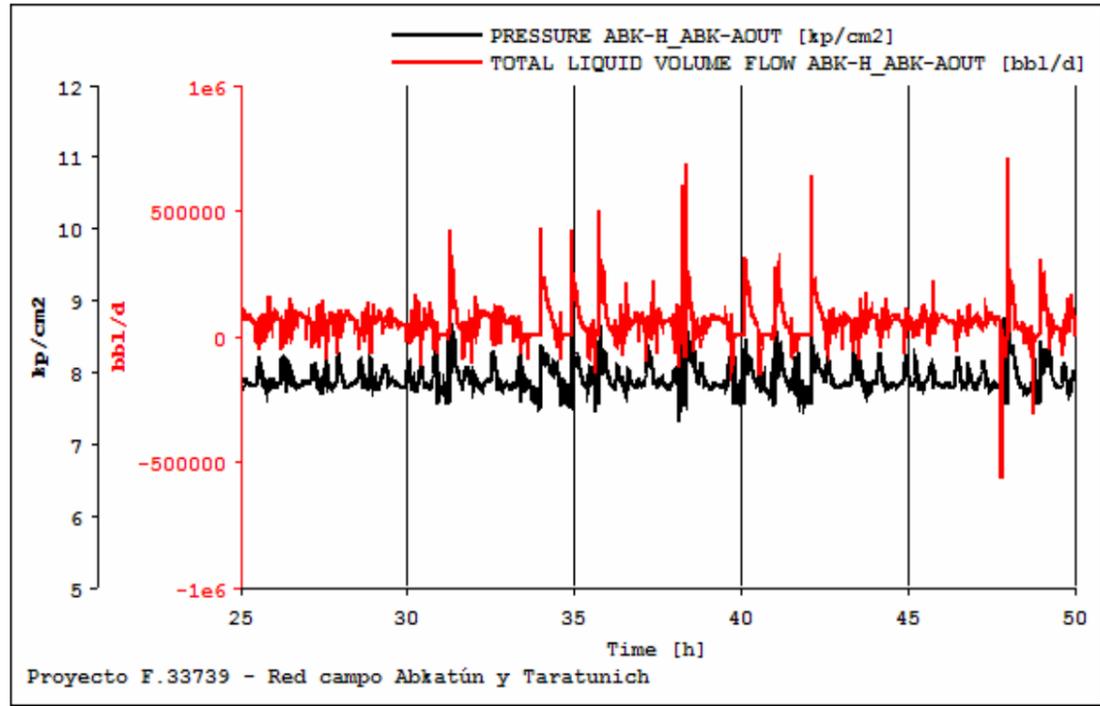
No se tienen variaciones importantes en la presión y el flujo de líquido lo hace pero nunca se tiene flujo cero en la llegada a Abkatún-H. Para este ducto el identificador no es invariante con el tiempo, pero predominantemente es el siguiente.



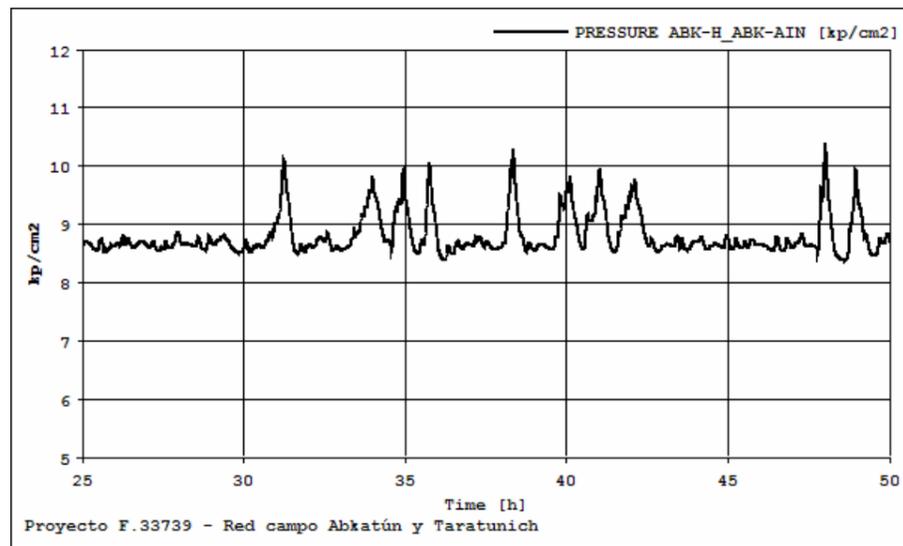
Sólo por periodos cortos de tiempo es como sigue en diferentes tramos del ducto.



El patrón es predominantemente en tapones (ID=3) pero puede cambiar a estratificado durante un periodo de tiempo corto. No se presenta *batcheo* severo en la línea, se infiere la presencia de tapones cortos. No se tiene *batcheo* severo ya que en ningún momento en la llegada se tiene sólo gas. Nótese que la línea tiene también una pendiente positiva. Todo este análisis lleva a concluir que la red de este campo opera de forma estable, favorecida en cierta forma por la configuración del terreno. El siguiente punto de interés es el tramo de Abkatún-H a Abkatún-A-Enlace. La presión y el flujo de líquido en Abkatún-A-Enlace son los siguientes.



Que es comportamiento típico de un bacheo severo. La presión a la salida de Abkatún-H es la siguiente.

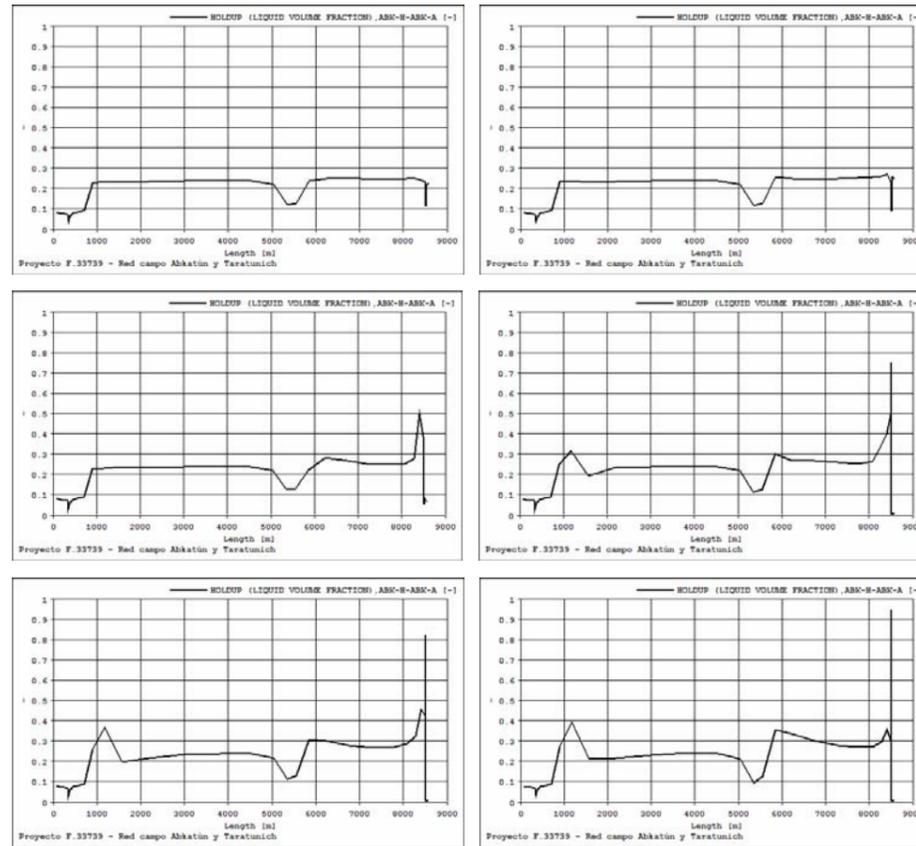


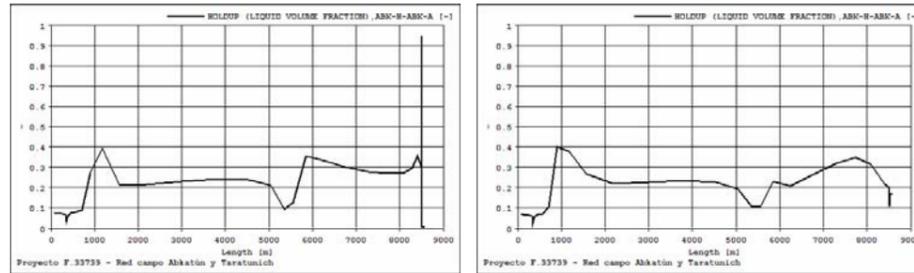
Es interesante notar que no se conserva el comportamiento observado en las líneas que llegan a Abkatún-H, más bien se tiene un comportamiento totalmente diferente. Para entender la razón se proporciona la siguiente tabla.

Tramo	Diámetro nominal (in)
Taratunich-TE/Abkatún-H	20
Taratunich-201/Abkatún-H	20
Abkatún-H/Abkatún-A	36

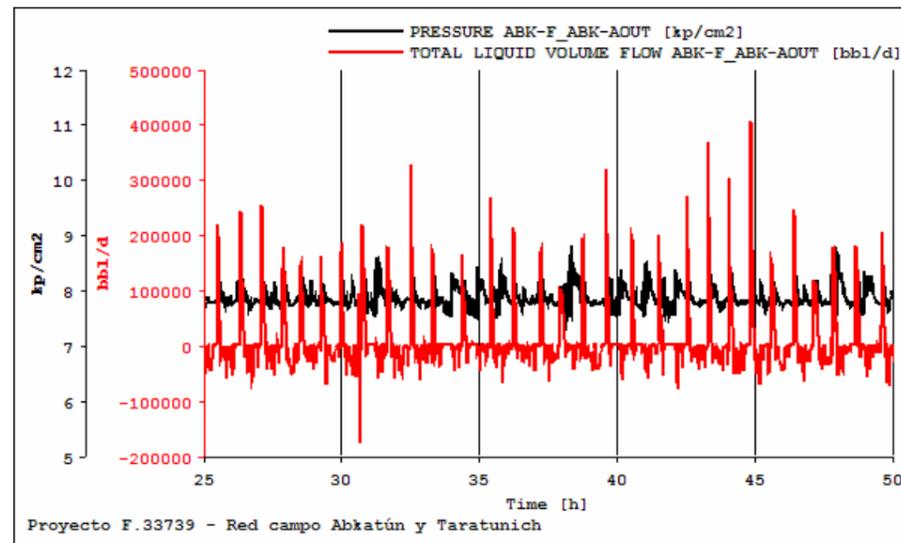
### Diámetros de algunas líneas de Taratunich

Se presume *batcheo* severo por efecto del diámetro del ducto. En la simulación en régimen transitorio es posible observar el proceso dinámico mediante el cual se forman los tapones de líquido, en las siguientes instantáneas este se muestra, descrito en términos de la fracción líquida.

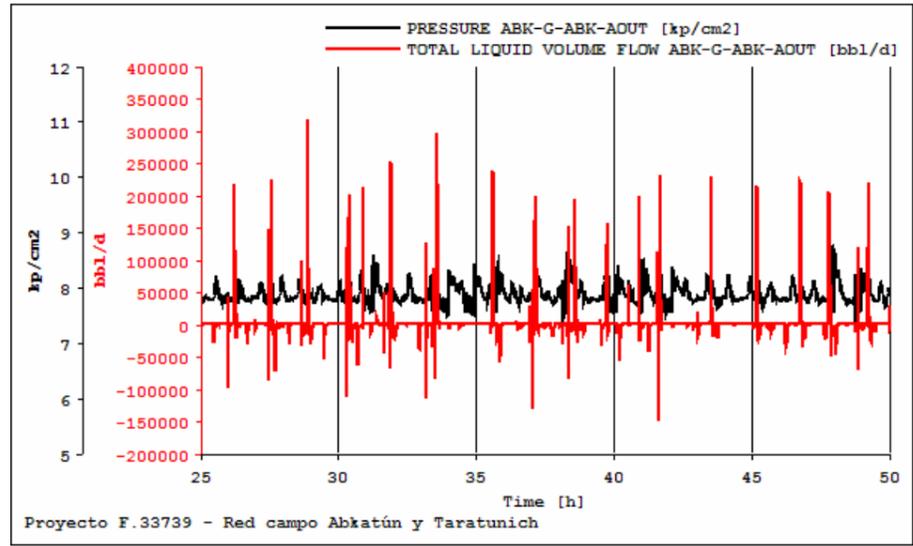




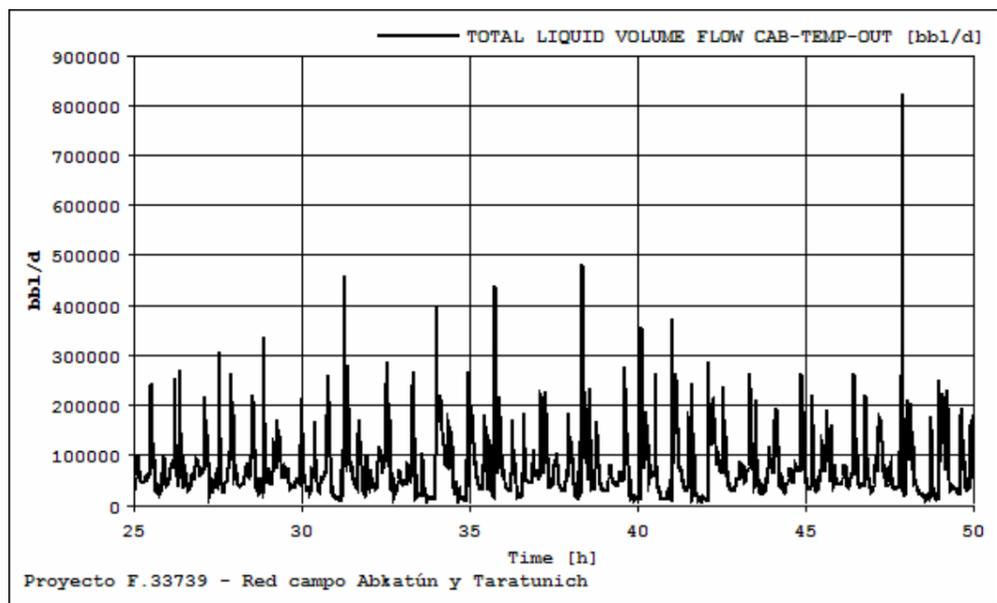
Se tiene ubicada en la parte extrema derecha de las gráficas anteriores la tubería ascendente. En la secuencia anterior se describe el proceso de llenado del codo (variación de la fracción líquida desde 0.1 hasta 0.95) y posteriormente el vaciado de la tubería ascendente. El *batcheo* severo parece ser producido por el diámetro de la tubería. Dentro de la red de Abkatún-Taratunich se incluye a las plataformas Abkatún-F y Abkatún-G. La presión y flujo de líquido en Abkatún-A-Enlace en la llegada del ducto proveniente de Abkatún-F son las siguientes.



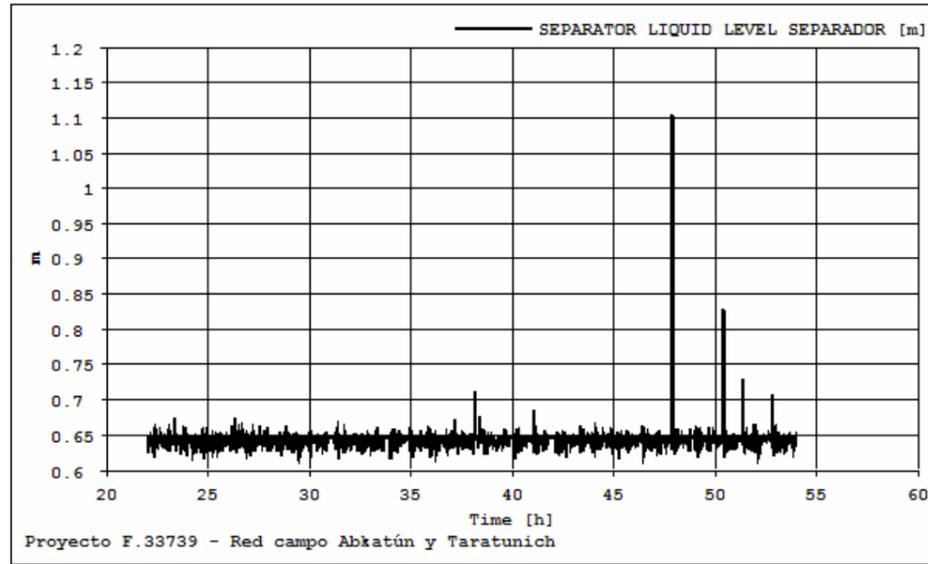
Se presenta un taponeo severo, en la llegada del ducto proveniente de Abkatún-G se tienen las siguientes presión y temperatura.



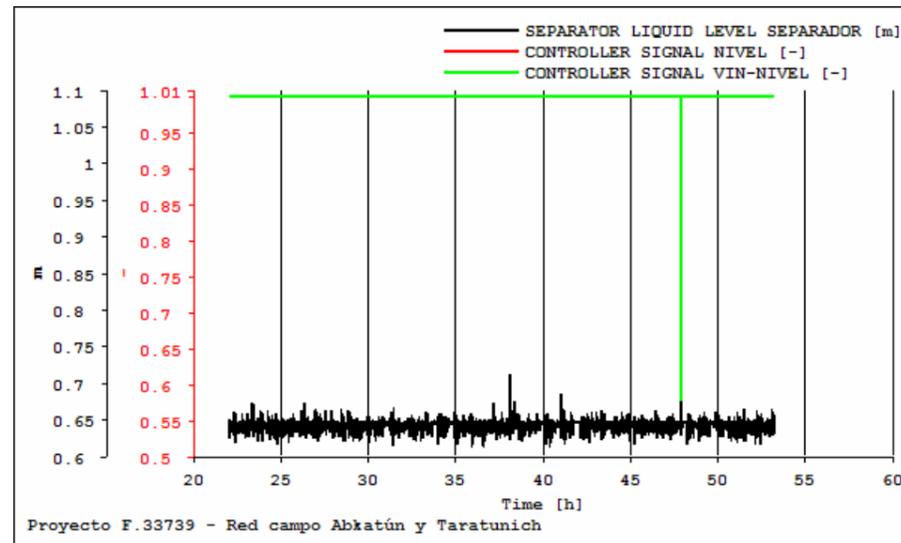
Se presenta en esta línea también un *batcheo* severo. En flujo de líquido hacia el separador, ya en el complejo en Abkatún-A Enlace es el siguiente.



El flujo es sumamente inestable, en la siguiente gráfica se muestra el nivel en el separador ubicado en Abkatún-A-Temporal.



El separador tiene un diámetro de 4.406 m, en tanto que el nivel promedio es de 0.65 m lo que representa el 14.75%, existe en el periodo analizado un brinco a 1.1 lo que corresponde a 25% en nivel. En este caso se hizo la simulación con un control manual que mantiene la válvula de control siempre abierta. Se repitió la simulación con el sistema de control ajustado a 25% de nivel con lo que se tiene el siguiente comportamiento.



Se tiene el mismo comportamiento, sólo se tiene el cierre súbito de la válvula de control por la admisión de un flujo muy alto de líquido en un periodo de tiempo corto (la línea verde es la apertura de la válvula de control ubicada a la entrada del separador. El separador opera establemente salvo cuando se presentan transitorios de flujo de líquido como el mostrado anteriormente, que pone en acción al sistema de control.

## CAPITULO VII

### Simulación de alternativas de solución

Tomando como base los resultados de la simulación en estado estacionario y en régimen transitorio, se propuso un conjunto de alternativas con el propósito de mejorar la operación de los sistemas de producción. De este conjunto de alternativas, algunas se simularon en régimen transitorio con el fin de evaluar su comportamiento dinámico y conocer su impacto tras su posible implantación. Las alternativas analizadas fueron las siguientes:

- Instalación de interconexiones submarinas en el campo Caan
- Envío de la producción de Caan-1 y Caan-A hacia Abkatún-F
- División de Taratunich en redes de alta y baja presión

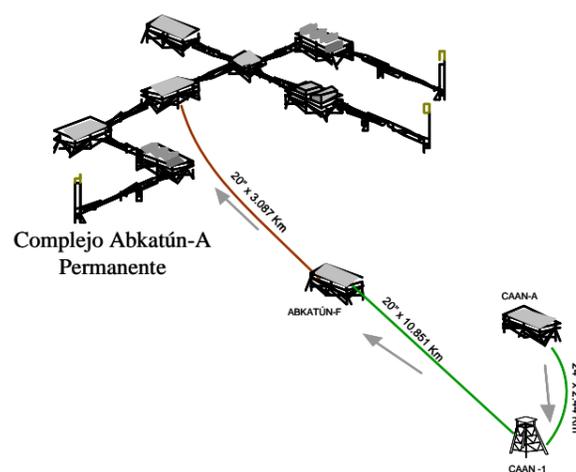
Los resultados obtenidos se expondrán a continuación. En las interconexiones submarinas en el campo Caan, se propone realizar lo esquematizado en el siguiente dibujo



**Figura 17. Interconexiones submarinas**

Esto en las plataformas Caan-A y Caan-C, se sugiere evitar las líneas ascendan y en su lugar se propone que existan conexiones submarinas. Con este arreglo se

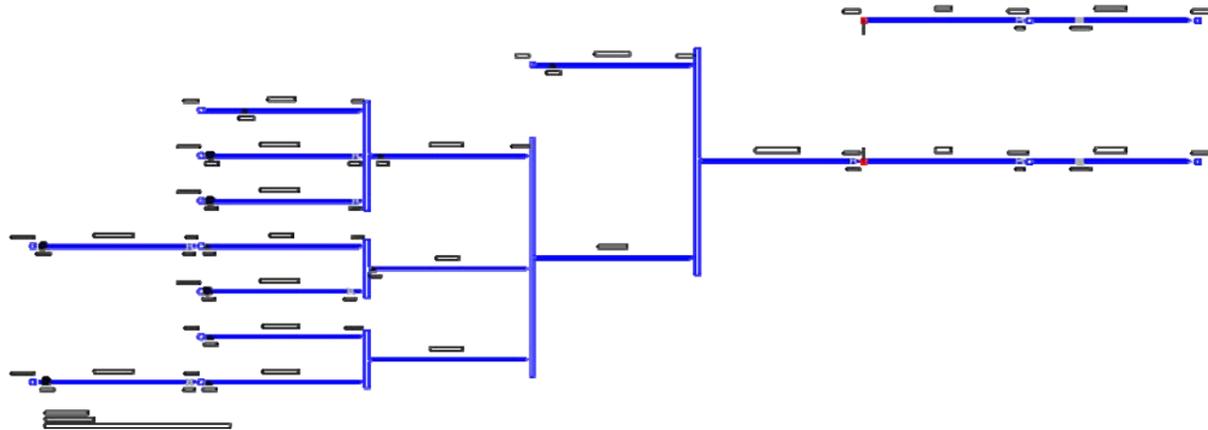
gana en dos aspectos, el primero se reduce la presión hacia atrás ya que se evita la presión extra requerida para que el fluido ascienda hasta la plataforma, pero lo más importante es que se gana en estabilidad, las variaciones que se tenían tanto en presión como en flujo de líquido en los puntos de llegada desaparecen. Esta forma de operar se volverá más importante en cuanto la producción del campo descienda y estas variaciones se vuelvan inmanejables, por ello aunque con esta alternativa no se gane en lo económico en el corto plazo, en el futuro permitirá la operación del sistema. Otra alternativa analizada, fue el envío de la producción de Caan-1 y Caan-A hacia Abkatún-F.



**Figura 18. Envío de producción de Caan-1/A hacia Abkatún-F**

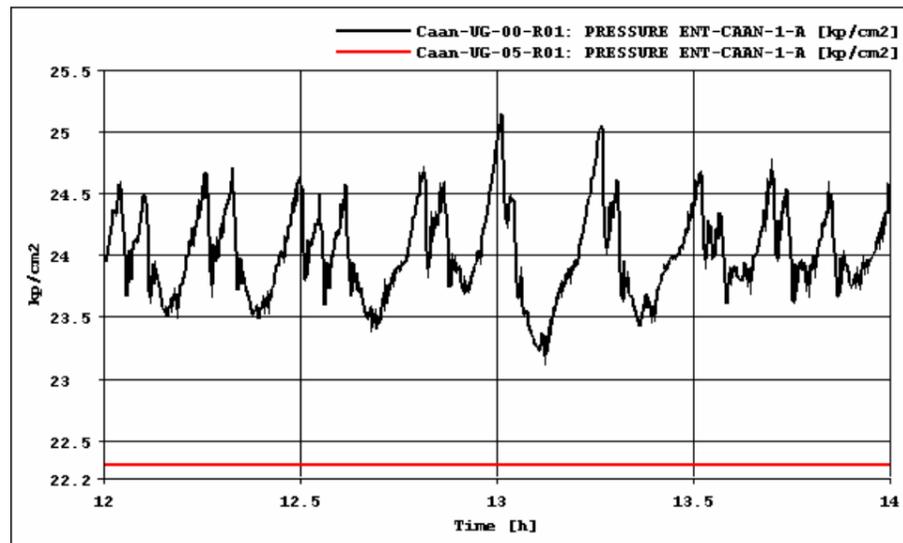
En esta alternativa se analizó el efecto tanto en la red de Caan como en la de Abkatún. Del análisis en la red de Abkatún se concluye que el tramo Abkatún-F/Abkatún-A puede transportar la producción proveniente de Caan-1 y Caan-A, al realizar este movimiento operativo desaparece el *bacheo* severo encontrado en el caso base, no se tiene además ninguna afectación a la batería de separación ubicada en Abkatún-A Temporal. En el modelo empleado para la simulación en régimen transitorio no se contempla ningún pozo de Abkatún-F, por lo cual en el estudio no fue posible evaluar el efecto de la contrapresión extra hacia los pozos, pero esto si fue estudiado en la simulación en estado estacionario y ahí puede

tenerse más detalle. El efecto en la red de Caan al desviar la producción de Caan-1 es imperceptible, al desviar la producción de Caan-A se tiene dentro del modelo un efecto insignificante, no se presenta *batcheo* severo en el tramo de Caan-C a Abkatún-A, pero el sistema comienza a inestabilizarse ligeramente. La implantación de esta alternativa es viable. modelo de simulación tiene el siguiente aspecto dentro del entorno de *OLGA 2000*.

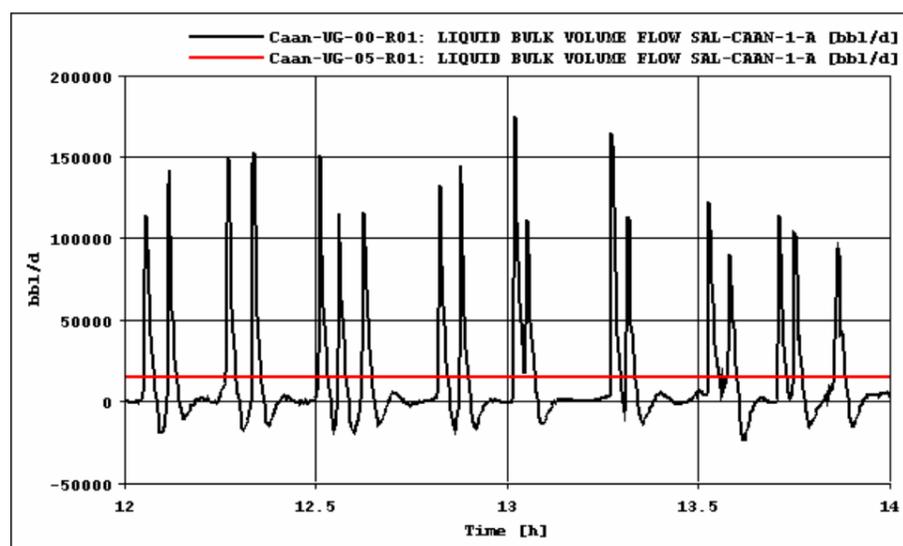


**Figura 19. Modelo para interconexiones submarinas en Caan**

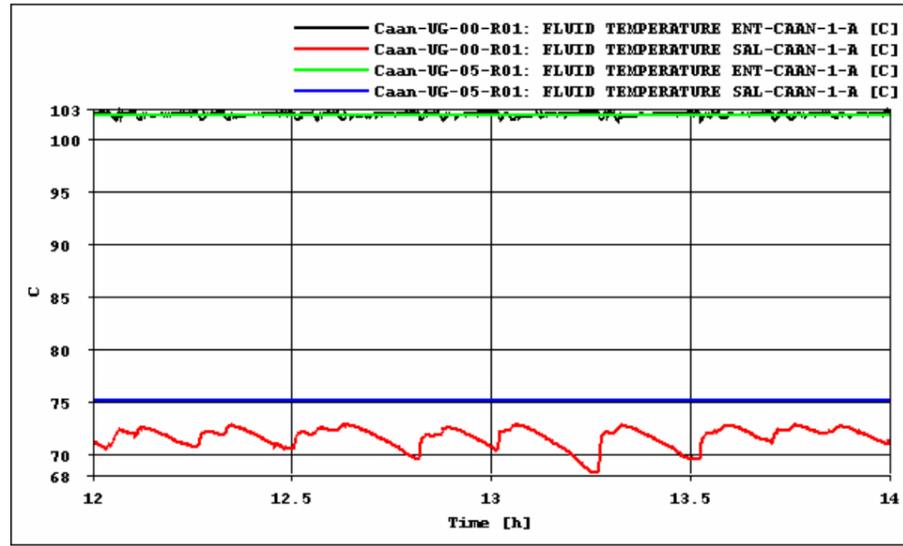
A continuación se compararán las presiones, temperaturas y flujos de líquido del caso con y sin interconexiones submarinas en los puntos indicados. A la salida de Caan-1 se tienen los siguientes resultados.



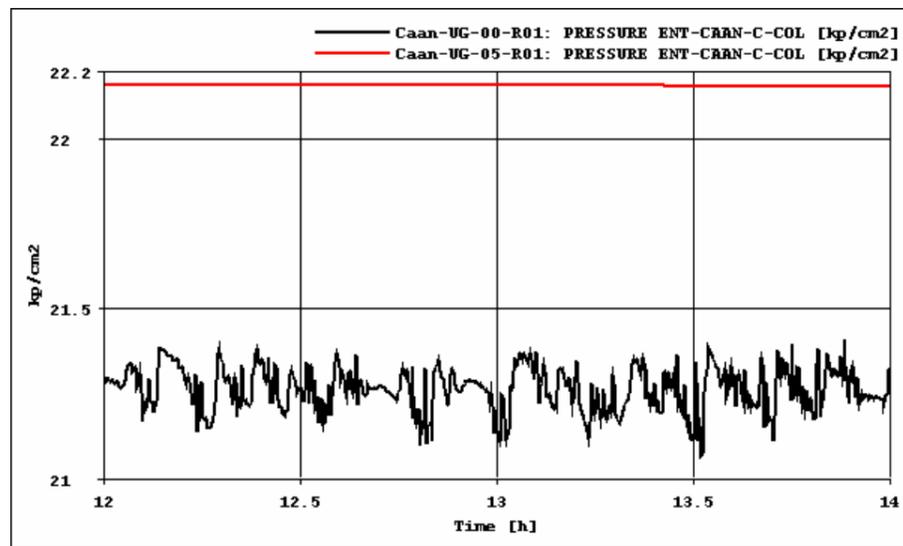
La línea negra corresponde al caso original ya descrito en tanto que la roja al caso con conexiones submarinas. A la salida del ducto Caan-1/Caan-A se tienen los siguientes flujos de líquido.



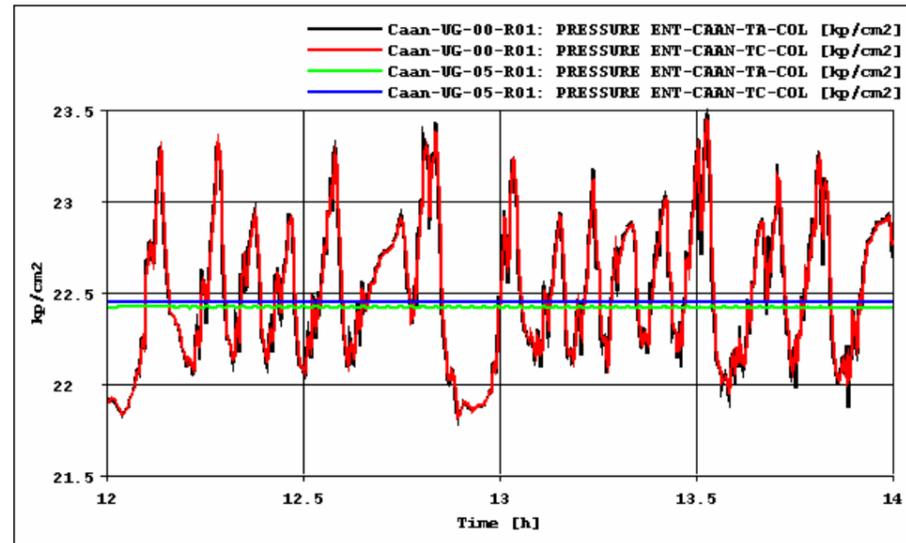
Se elimina el bacheo severo. Las temperaturas en los puntos estudiados son las siguientes.



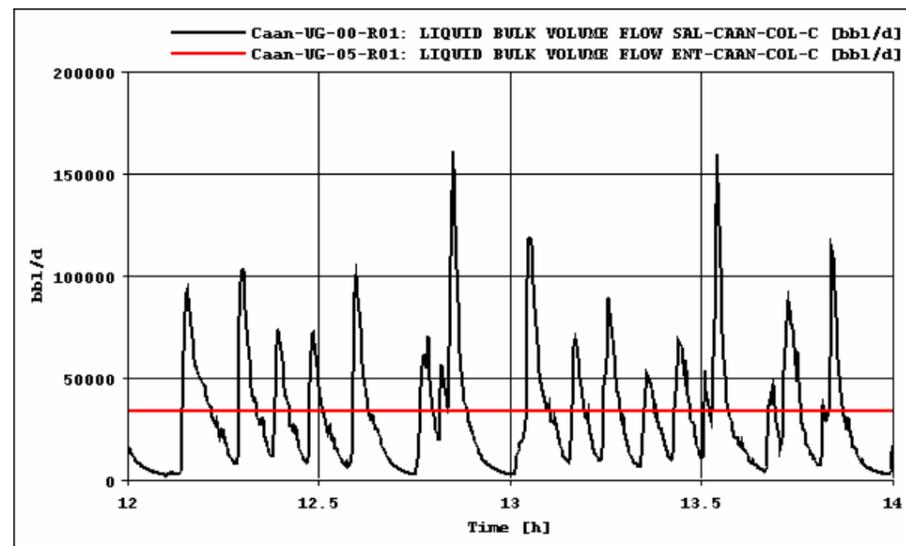
Las líneas negra y roja pertenecen al caso original, las verde y azul al caso con interconexiones submarinas. Se eliminan las variaciones en la temperatura. La temperatura a la salida del tramo con conexión submarina debe tomarse como una aproximación, ya que el modelo térmico sobreestima la transferencia de calor, en el nuevo modelo no se encuentra presente la tubería ascendente que es donde se pierde la mayor cantidad de calor. Para las salidas de Caan-C se tiene el siguiente comportamiento.



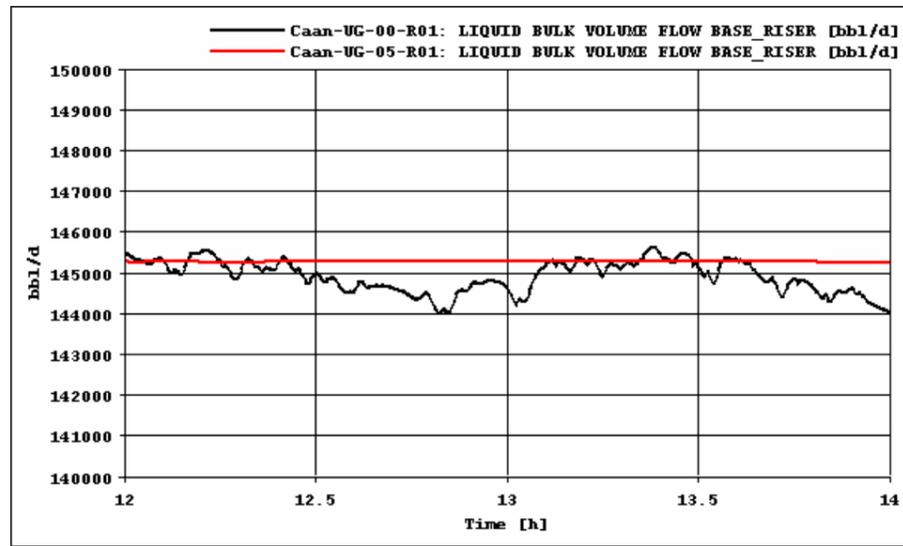
Se eliminan las variaciones y las contrapresiones, el efecto de propagación desaparece. En el otro ramal la situación es la siguiente.



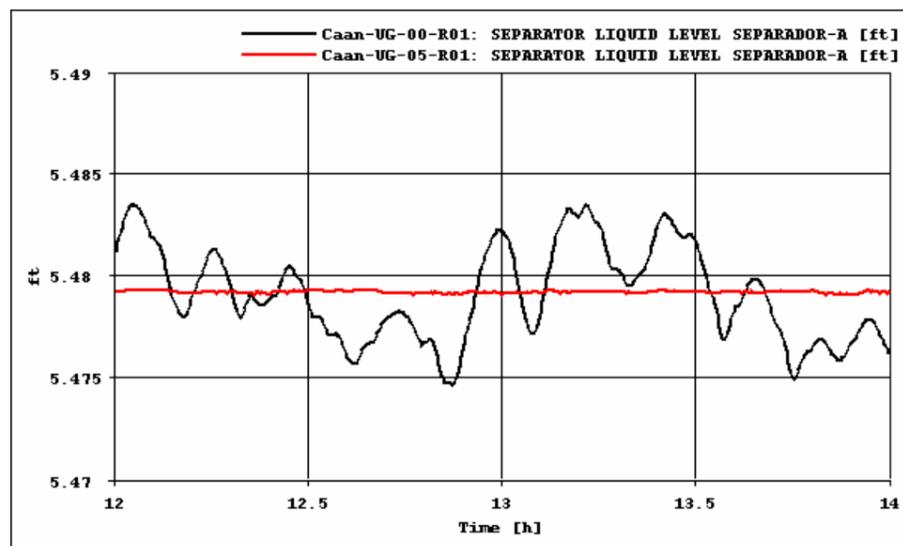
Las líneas negra y roja pertenecen al caso original, las verde y azul al caso con interconexiones submarinas. En la llegada a Caan C se tiene lo siguiente.



Con lo que se elimina el bacheo severo. El efecto global es el siguiente, si se observa el comportamiento en la base de la tubería ascendente.



Se elimina el efecto de propagación, con lo que el efecto del último tramo es mitigado con la válvula aérea. El sistema de control tiene el siguiente desempeño.



El sistema de control de esta simulación controla el nivel con la válvula ubicada en la línea de aceite. La aplicación de esta alternativa mejoraría de manera sustancial la operación del sistema. También estos resultados deben tomarse en cuenta al

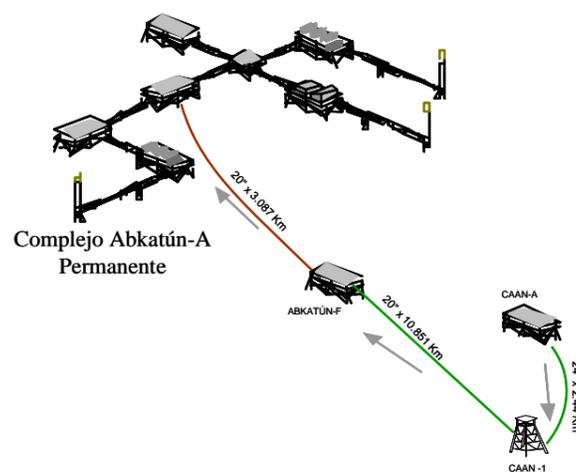
momento de diseñar sistemas de producción nuevos, en el sentido de preferir las conexiones submarinas a múltiples tuberías ascendentes en las plataformas.

### VII.1 Alternativas para Abkatún-Taratunich

En la presente sección se muestran diversas alternativas que tienen como fin mejorar la operación de la red del campo Taratunich.

### VIII.2 Envío de producción de Caan-1 y Caan-A hacia Abkatún-F

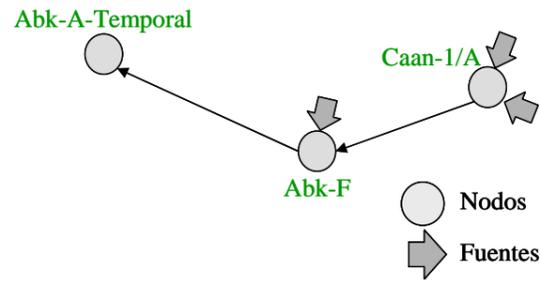
Esta alternativa impacta en su aplicación a las redes de los campos Caan y Abkatún. Para su análisis se estudia el impacto de la alternativa en las redes de ambos campos. En la alternativa se propone enviar la producción de Caan-1 y Caan-A por el ducto Caan-1/Abkatún-F tal como se muestra en la figura.



**Figura 20. Envío de Caan-1/A por Abkatún-F**

El ducto por el cual se pretende enviar la producción existe y actualmente esta fuera de uso. Por simplicidad y con el fin de que los modelos de simulación requieran de menos tiempo de cómputo, se estudiaron por separado los

subsistemas que componen esta alternativa. El subsistema anteriormente mostrado puede representarse con el siguiente diagrama.



**Figura 21. Modelo de nodos y enlaces para alternativa de envío de Caan-1/A por Abkatún-F**

Con este se creó el modelo de simulación en OLGA 2000, el cual tiene el siguiente aspecto.

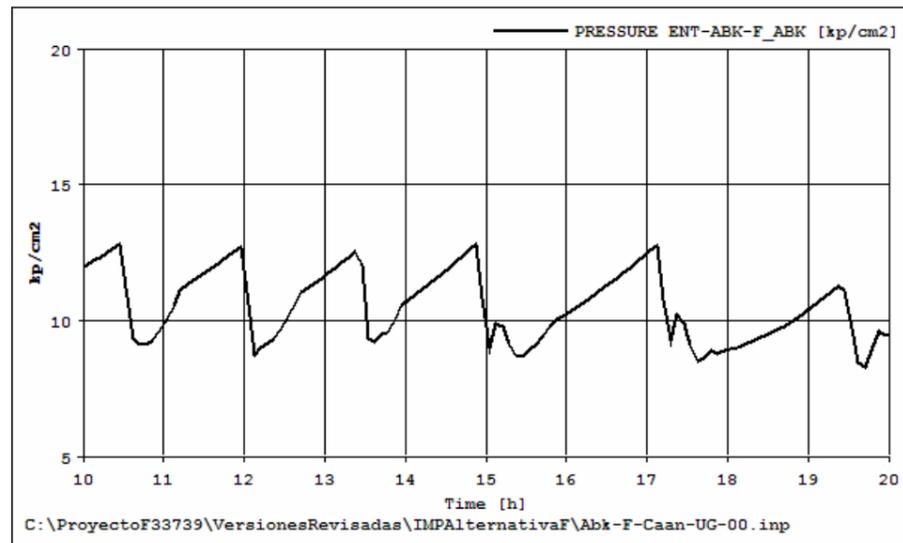


**Figura 22. Modelo para simulación de envío de Caan-1/A por Abkatún-F**

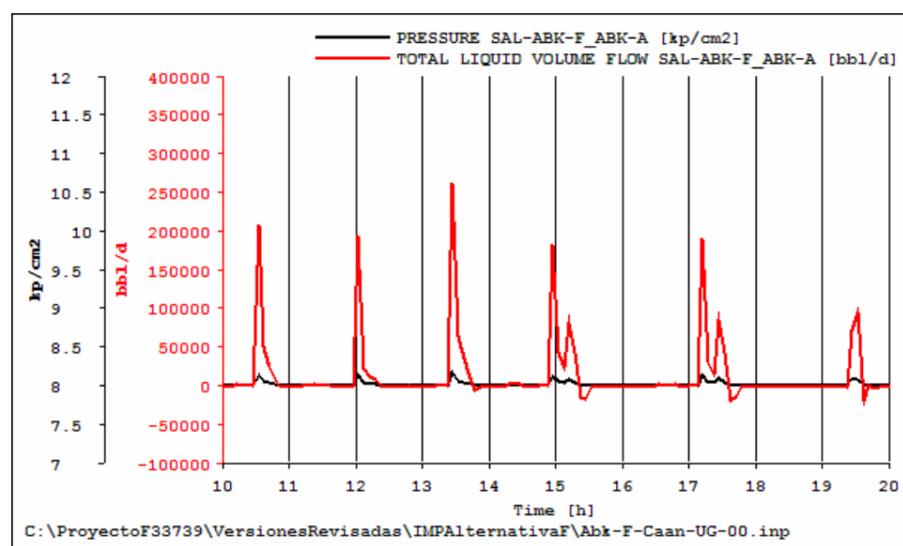
En principio se estudia el efecto del desvío de la producción en el tramo Abkatún-F/Abkatún-A. El sistema se simula por 50 horas con el siguiente programa de tiempo.

Hora	Evento
0:00	Inicio de simulación
10:00	Obtención de estado pseudoestacionario
20:00	Incorporación de Caan-1
30:00	Incorporación de Caan-A
50:00	Fin de la simulación

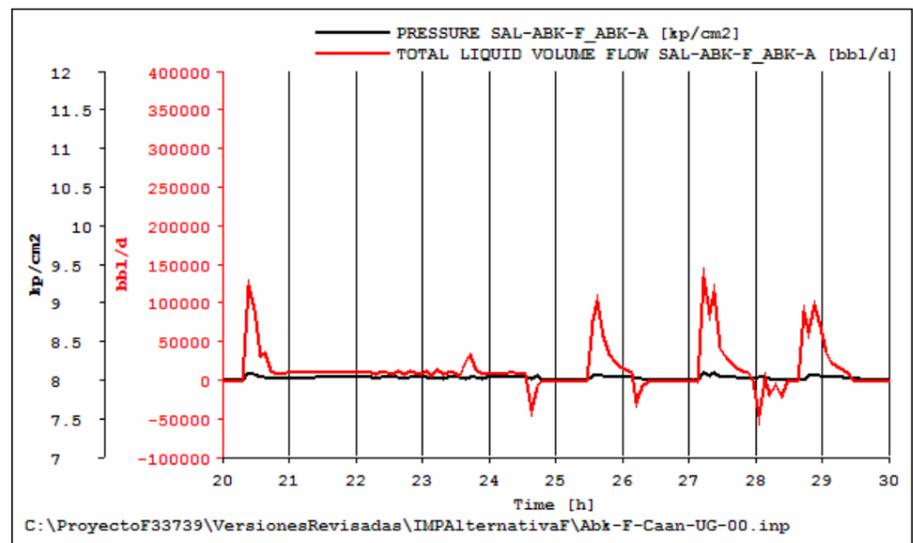
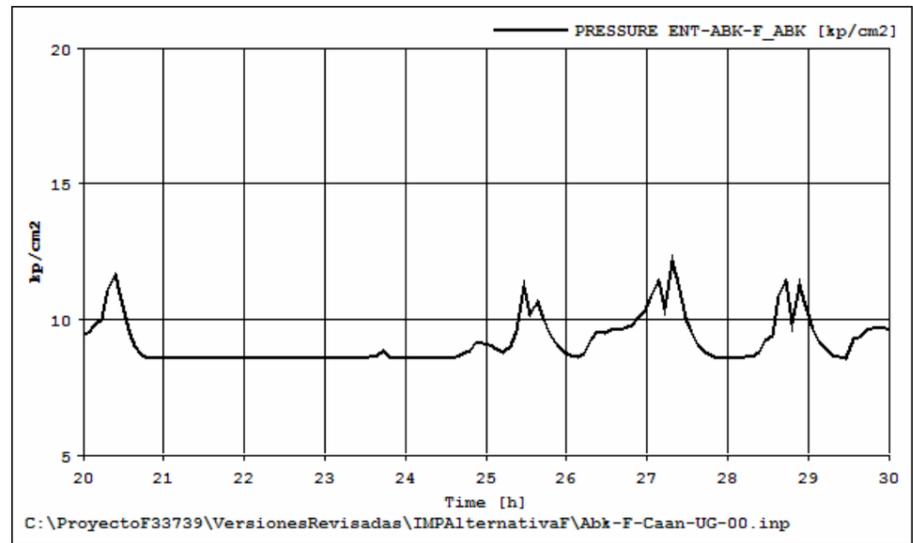
Entre las horas 10 y 20 se tienen el caso base o situación actual. La presión a la salida de Abkatún-F es la siguiente.



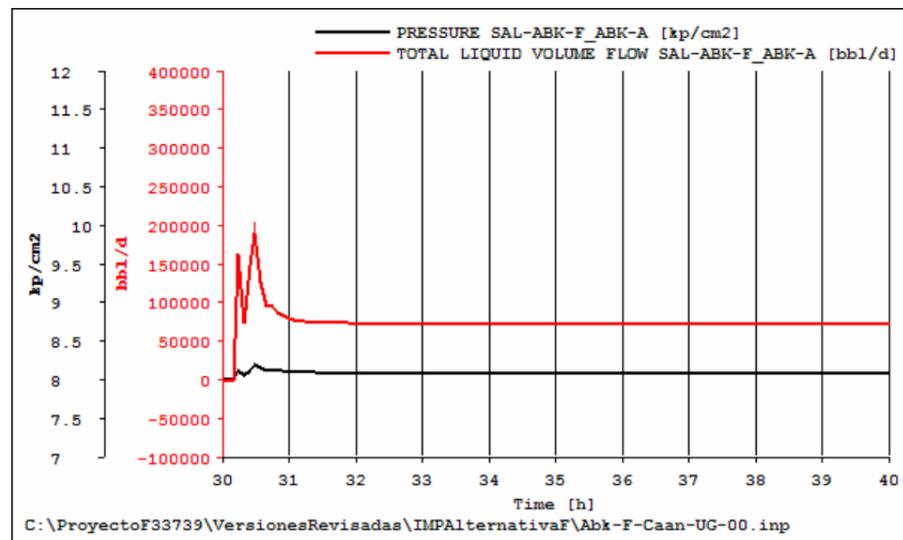
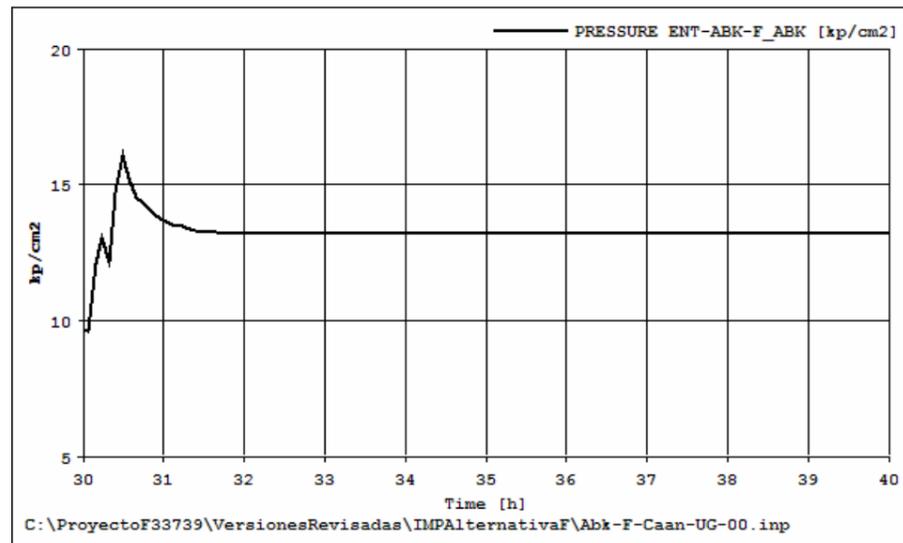
En ese periodo de tiempo, a la salida del tramo Abkatún-F/Abkatún-A se tienen la siguiente presión y flujo de líquido.



Donde es evidente la presencia de bacheo severo en el ducto, ya que existen periodos de tiempo en los cuales no ingresa líquido a la plataforma y cuando lo hace es en un alto volumen en periodos cortos de tiempo. A partir de la hora 20 se adiciona la producción de Caan-1 con los siguientes efectos en la presión a la salida de Abkatún-F y a la llegada a Abkatún-A

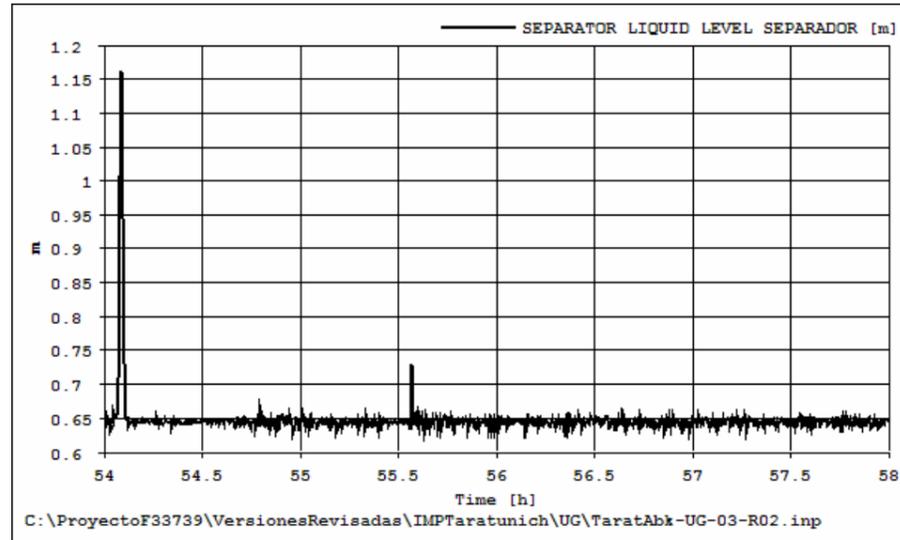


Se tiene una mejora en las condiciones de flujo durante las primeras horas de operación, pero esta no tiene una consecuencia importante después de este efecto inicial. Después de la hora 30 se adiciona la producción de Caan-A con lo que se tienen los siguientes efectos en los puntos estudiados.



Con lo que el bacheo severo desaparece. Esto nos hace concluir que es posible llevar a cabo este movimiento operativo. Es importante mencionar que este análisis se lleva a cabo sin tomar en cuenta el efecto de las contrapresiones hacia los pozos, en el caso original la presión promedio a la salida de Abkatún-F es cercano a 10 kg/cm<sup>2</sup>, en tanto que una vez que son incorporados Caan-1 y Caan-A, la presión de salida aumenta a 13.1 kg/cm<sup>2</sup> con lo que algunos de los pozos en Abkatún-F pueden dejar de fluir. Por otro lado, se estudia el efecto en el separador ubicado en Abkatún-A Temporal, esto se hace variando en la fuente de Abkatún-F

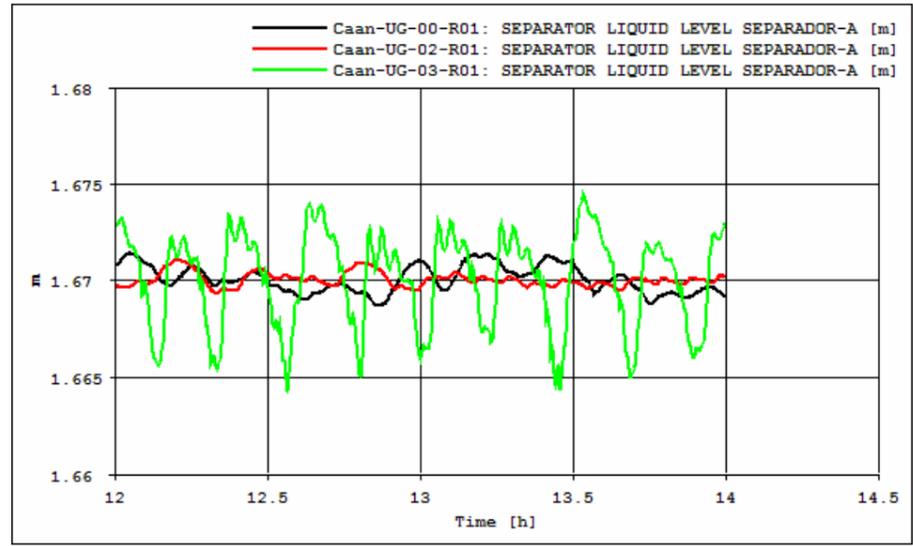
el flujo de aceite y la RGA. Se tiene el siguiente resultado en el nivel en el separador.



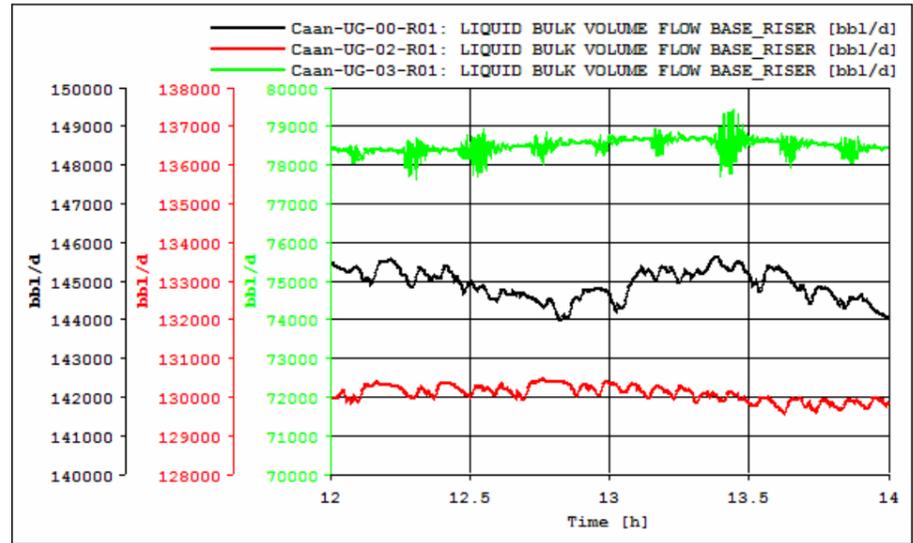
El salto en el nivel es debido a la incorporación brusca de producción de Caan-1 y Caan-A, después de este transitorio el nivel de líquido se comporta de forma estable con lo que es posible enviar toda esta producción extra hacia el separador en Abkatún-A Temporal. La situación presentada en este gráfico no se presentaría tal cual durante un movimiento operativo, ya que la adición de la producción de Caan-1 y Caan-A se llevaría a cabo de forma paulatina. El otro punto que hay que considerar es el efecto en la red de Caan por la reducción en el flujo. El punto importante es la batería de separación en Abkatún-A Permanente. Si observamos el nivel en el separador A para los siguientes casos

- Caso base
- Sin producción de Caan-1
- Sin producción de Caan A

Tenemos el siguiente resultado.



La línea negra es el caso base, la roja el caso sin Caan-1 y la línea verde el caso sin Caan-A y Caan-1. Al no ingresar la producción de Caan-1 se tienen un efecto leve en la variación del nivel en el separador, al desviar Caan-A el nivel de líquido empieza a variar, pero esta variación no es importante si observamos la escala y observamos que son variaciones de  $\pm 5$  cm. lo cual no es significativo. El flujo de líquido en la base de la tubería ascendente para los tres casos se muestra a continuación, la asignación de colores es la misma que en la figura anterior.



A pesar de la variación en el flujo de líquido no hay presencia de bacheo severo. Se concluye que la alternativa es viable en tanto que los flujos de gas y aceite no varíen demasiado de los empleados para esta simulación, la situación puede ser diferente en el caso de tener una mayor cantidad de gas presente en el sistema de producción.

### Separación remota en Abkatún-H

Con el fin de mejorar la operación en la red de Abkatún-Taratunich se propone llevar a cabo una separación remota en Abkatún-H tal como se muestra en el diagrama siguiente.

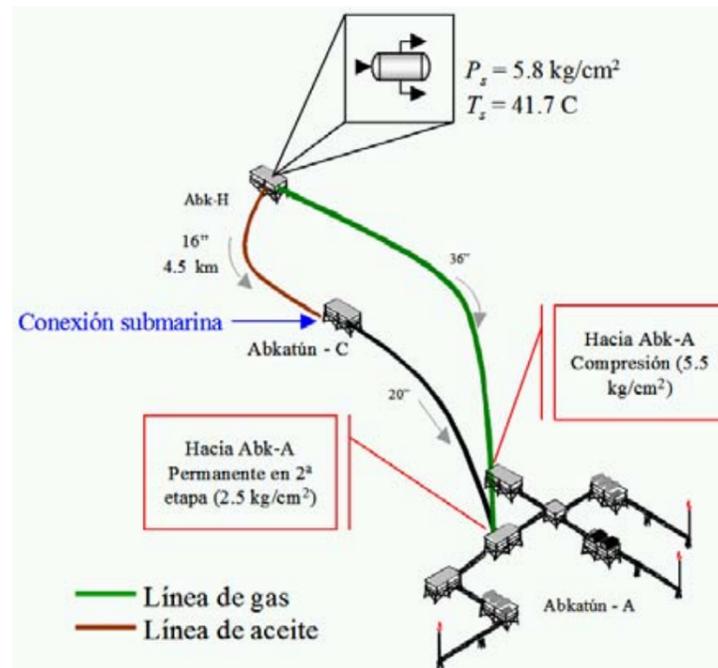
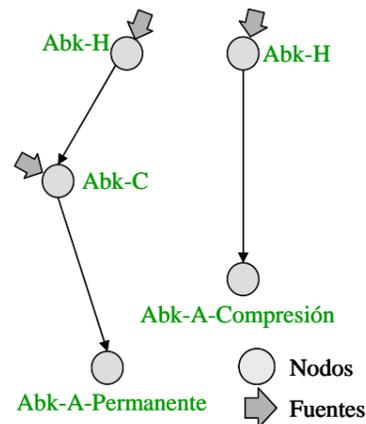


Figura. 23 Separación remota en Abkatún-H

Se pretende enviar por el ducto de 36 in la fase gaseosa y por un ducto nuevo que sería necesario construir al aceite que se conectaría en forma submarina con el tramo Abkatún-C/Abkatún-A Enlace. Dentro del esquema se propone enviar la mezcla gas-aceite hacia la segunda etapa de separación en Abkatún-A-

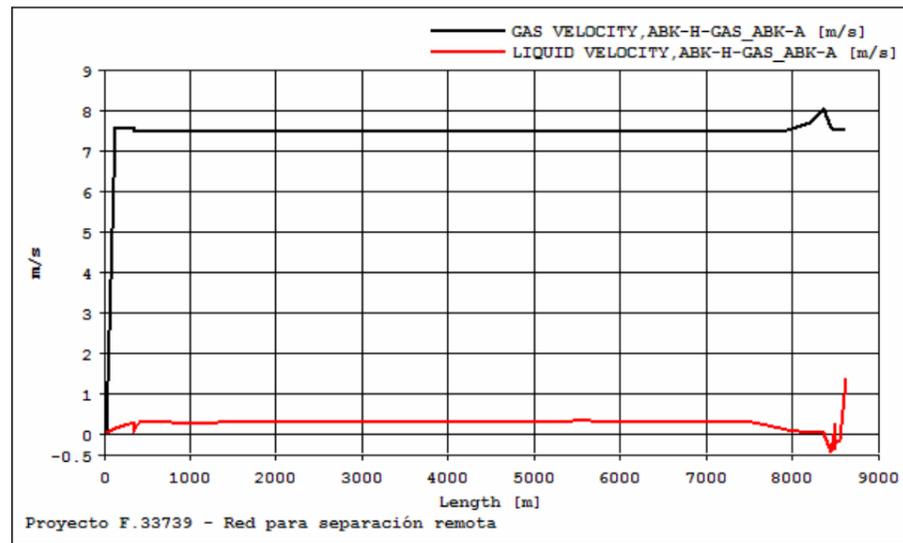
Permanente tal como actualmente se hace con la producción proveniente de Abkatún-C. El gas sería enviado a compresión. Por simplicidad el estudio se lleva a cabo con el subsistema mostrado arriba, se estudiará el comportamiento de la línea de gas y de la línea de aceite, para ello se construyen dos modelos de simulación los cuales se muestran a continuación.



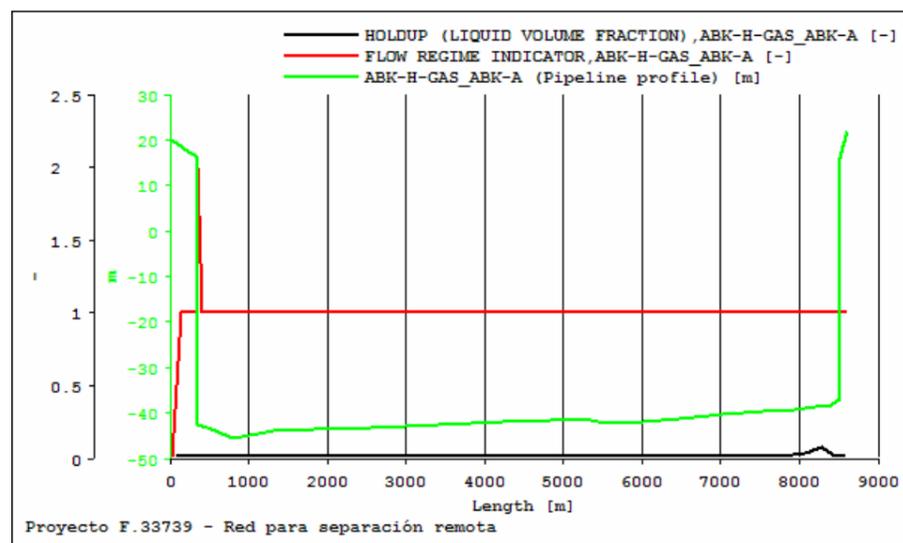
**Figura 24. Modelo de nodos y enlaces para separación remota**

Para realizar este estudio se deben de sintetizar nuevamente los fluidos necesarios para simular la red, esto debido a que ninguno de los que se tienen es cercanamente similar a los necesarios. Para ello se lleva a cabo una separación en equilibrio a la temperatura de 41.7 C y la presión 5.8 kg/cm<sup>2</sup>. Con esto se tiene la fase gaseosa y la líquida, el fluido que se transporta al complejo se sintetiza mezclando este aceite con la mezcla multifásica de Abkatún-C.

Se inicia el estudio por la línea de gas, para este, es importante conocer la fracción líquida a lo largo de la tubería y las velocidades de las fases, esto para establecer la formación de condensados. Para ello se hizo una corrida por un periodo de tiempo largo empleando OLGAS para establecer los valores iniciales. Los perfiles de velocidad de cada fase son prácticamente invariantes con respecto al tiempo tal como se muestra en la siguiente figura.

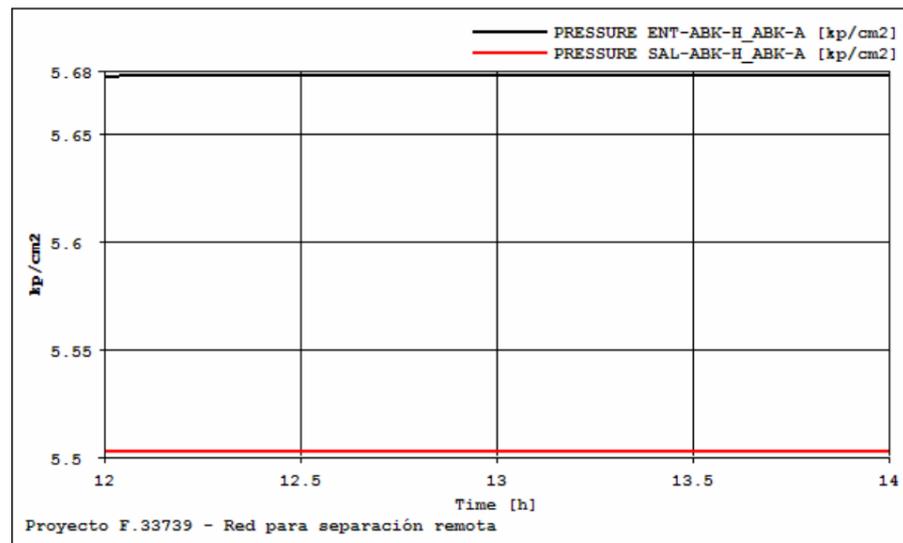


La velocidad del gas es alta en tanto que la del líquido es muy baja, esto lleva a pensar que el gas es capaz de arrastrar todo el líquido y mantener un volumen muy bajo en la línea. Se muestra a continuación la fracción líquida en ducto.

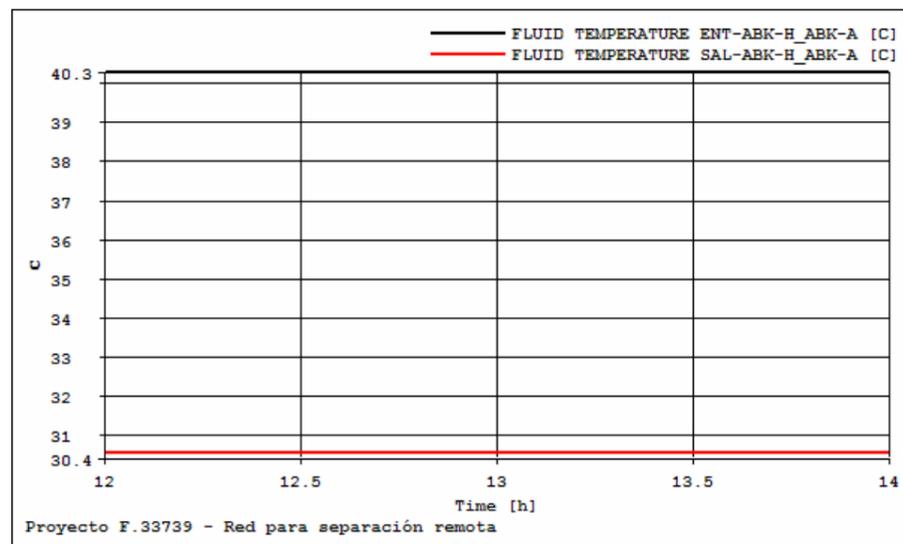


Se tiene una cantidad ínfima de líquido en toda la línea, este sólo se acumula en la base de la tubería ascendente para ser desalojado (línea negra del gráfico anterior), el flujo es siempre estratificado. Este análisis muestra que la acumulación de condensados en la línea es muy lenta, esto no quiere decir que no serían necesarias las corridas de limpieza, quiere decir que el proceso de

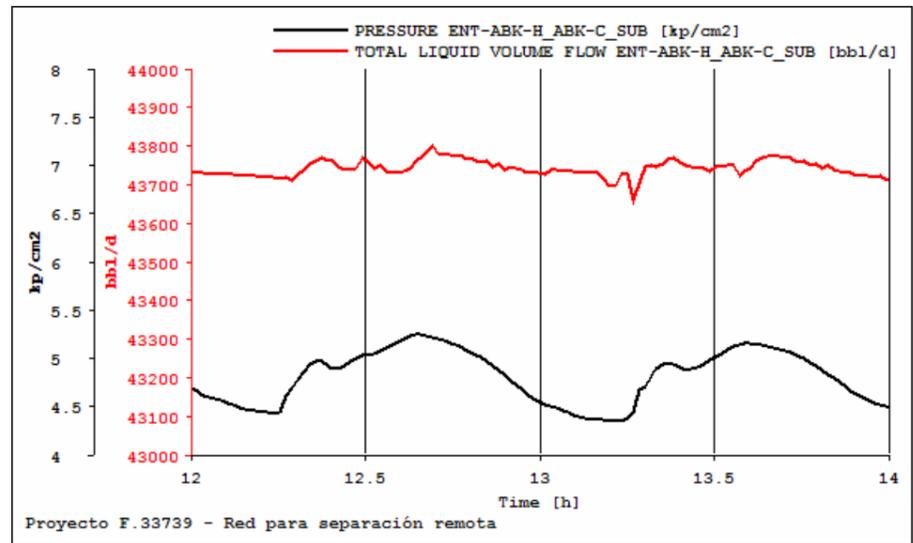
acumulación es lento. La presión a la entrada y salida del ducto durante el periodo simulado son las siguientes.



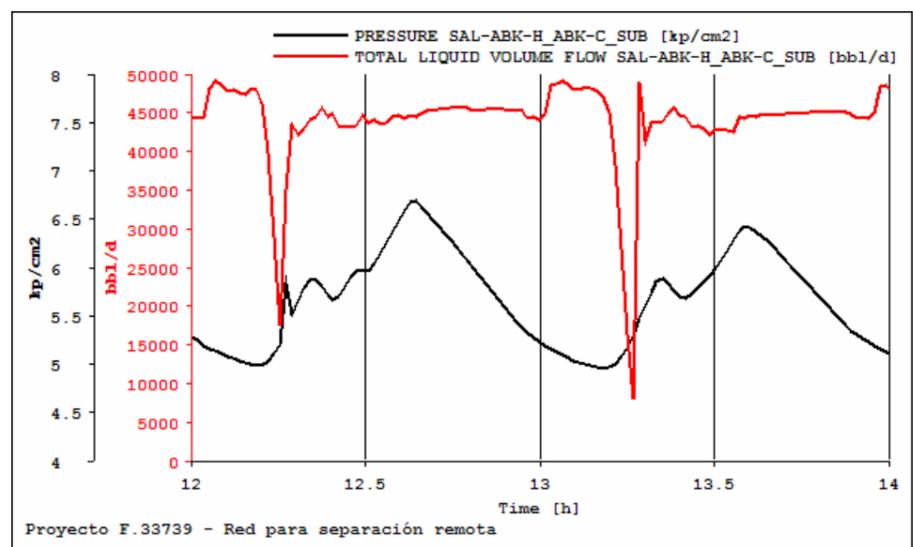
Las temperaturas a la entrada y la salida se muestran a continuación.



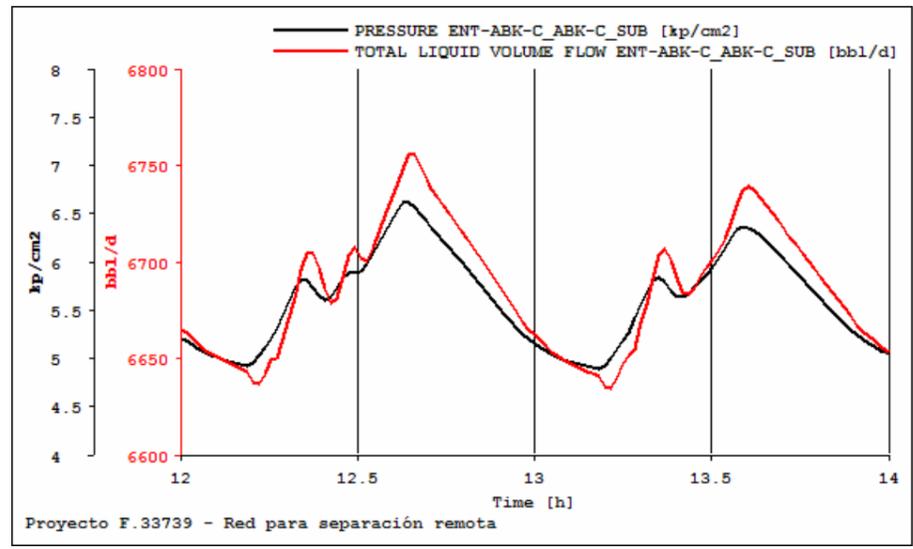
La operación es sumamente estable. Los resultados de la línea de líquido son los siguientes. Para el tramo Abkatún-H/Abkatún-C la presión y flujo de líquido en la salida de Abkatún-H son los siguientes.



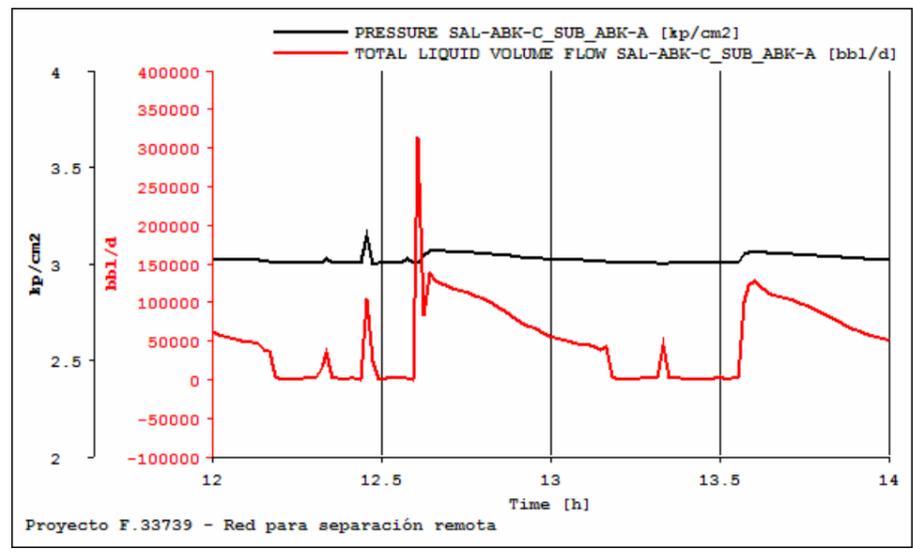
En la llegada a la interconexión submarina en Abkatún-C se tienen las siguientes presión y flujo de líquido.



Este es un resultado inesperado en base a la experiencia que se tuvo con las conexiones submarinas en Caan. El flujo a la salida se puede considerar cercanamente estable, pero en la salida se tienen variaciones que pueden atribuirse a un efecto de propagación, el comportamiento del tramo Abkatún-C/Abkatún-A se muestra a continuación.

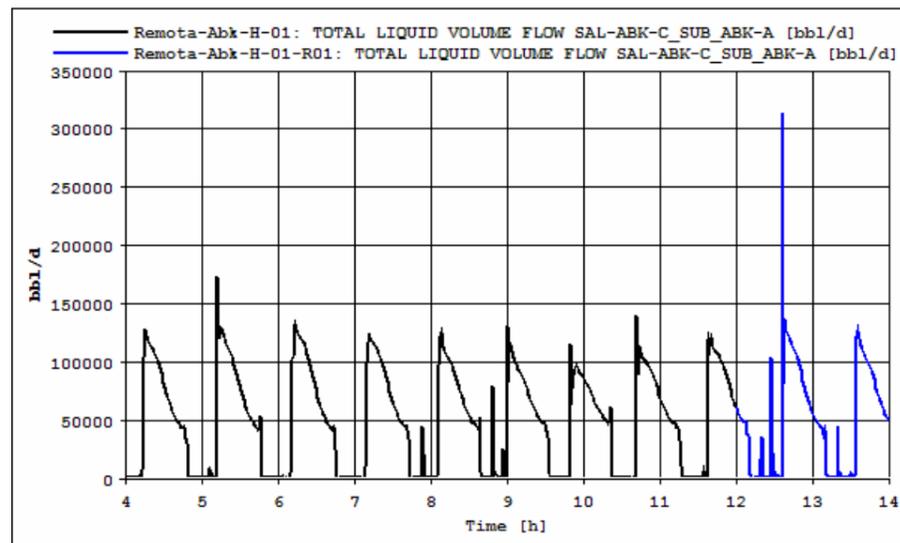


Este comportamiento es una imagen en presión al gráfico a la salida del ducto procedente de Abkatún-H. A la llegada al complejo se tiene la siguiente variación de la presión y el flujo de líquido.



El comportamiento parecer ser periódico, esto sólo puede corroborarse comparando resultados obtenidos con tiempo de integración superiores, el

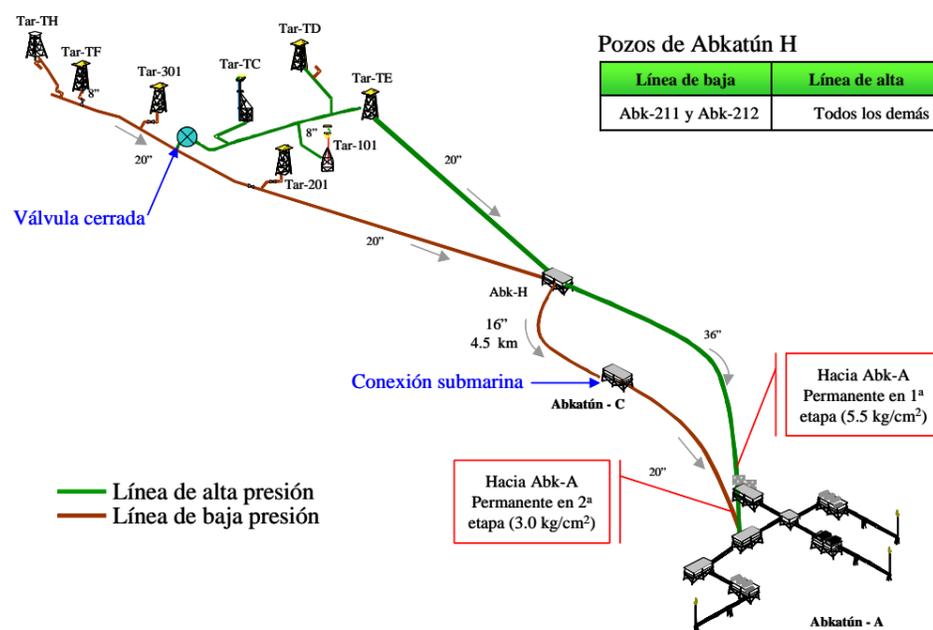
siguiente gráfico muestra la variación del flujo de líquido a lo largo de 10 h de integración.



Aquí si es posible observar a detalle que se tiene un comportamiento periódico con un pico entre las horas 12 y 13 que bien puede ser un resultado no físico debido al método numérico empleado para la solución del modelo. Los picos de líquido son de alrededor de 125 MBPD y se tiene periodos de tiempo donde no ingresa aceite al separador. Este comportamiento periódico se propaga al resto del sistema, lo que da como resultado el comportamiento observado en las gráficas de las páginas anteriores. Con la separación remota se mejora la operación del sistema, ya que se elimina el *batcheo* severo en el ducto Abkatún-H/Abkatún-A y se tiene un comportamiento estable en la línea de aceite, ya que los picos de producción son de menor magnitud que los obtenidos en el caso base cuando se simula el campo Taratunich en su situación actual. En el capítulo de simulación en estado estacionario se tiene un modelo que incluye a todos los pozos de la red en donde se observa la ganancia obtenida con este arreglo.

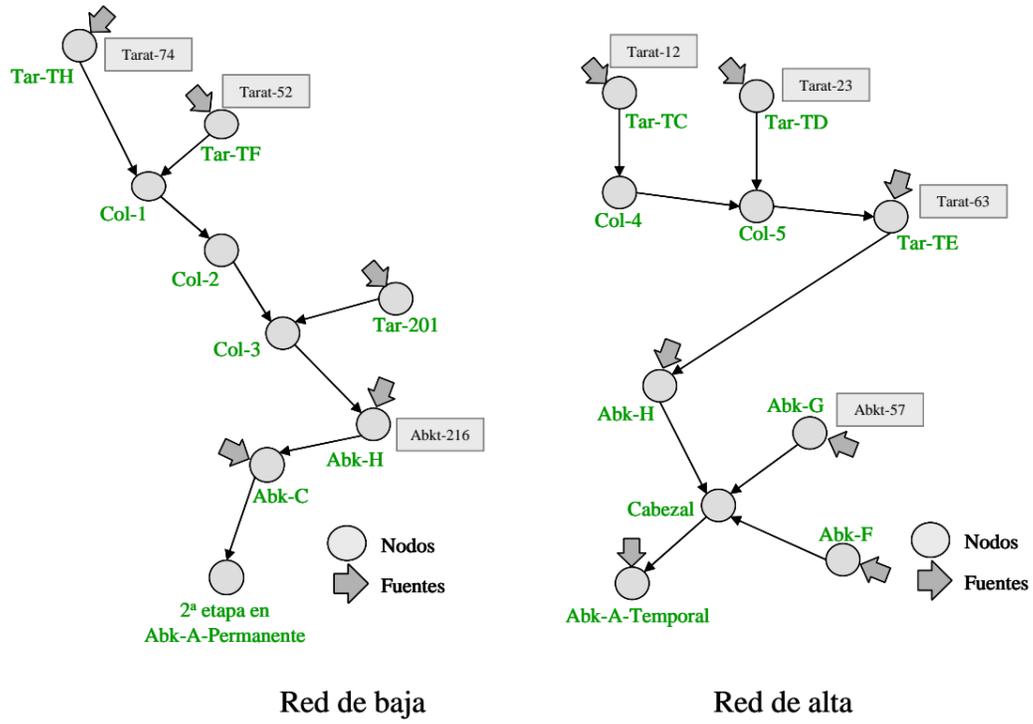
#### Redes de alta y de baja presión en Taratunich

Para esta alternativa se propone realizar los cambios mostrados en el siguiente diagrama.



**Figura 25. Red de alta y baja presión en Taratunich**

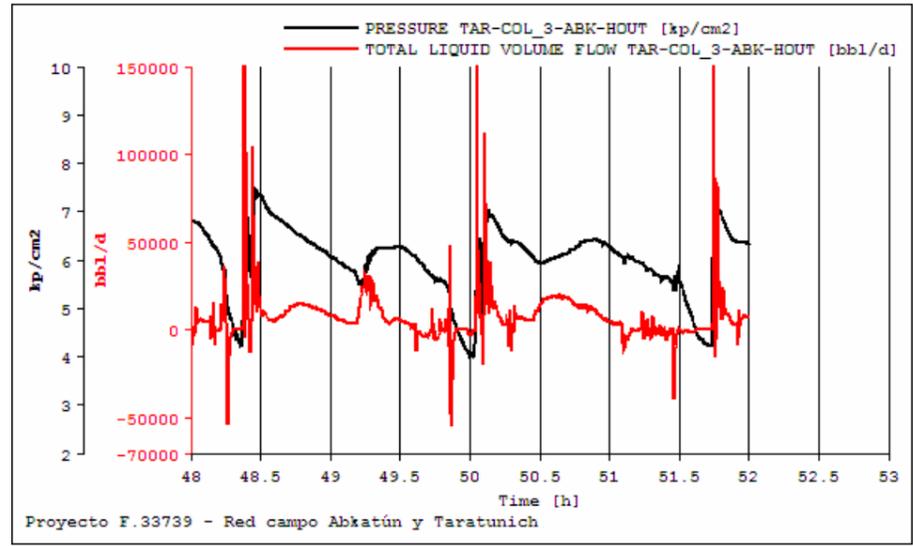
Se propone eliminar el circuito existente en la red del campo Taratunich y dirigir la producción de un conjunto de pozos hacia un punto de alta presión y el resto hacia un punto de baja presión con lo que Taratunich se compondría de dos redes independientes. Con esto se busca que pozos que actualmente no fluyen debido a la contrapresión puedan hacerlos al disminuir esta. en la presente sección se desarrolla un estudio con el fin de evaluar dinámicamente esta alternativa. Las redes de alta y baja presión se pueden representar conceptualmente mediante los siguientes diagramas.



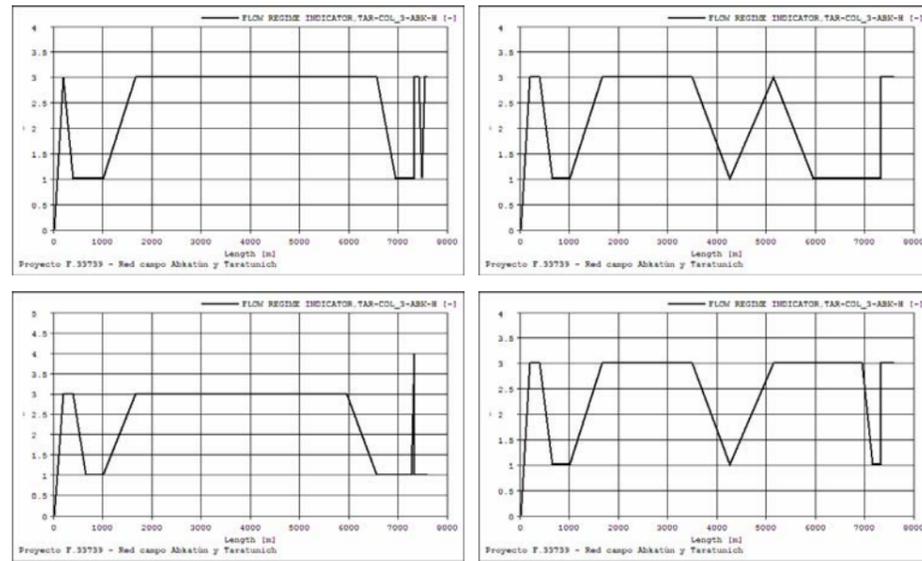
**Figura 26. Modelo de nodos y enlaces para red de alta y baja presión**

**Modelo para simulación de redes de alta y baja presión**

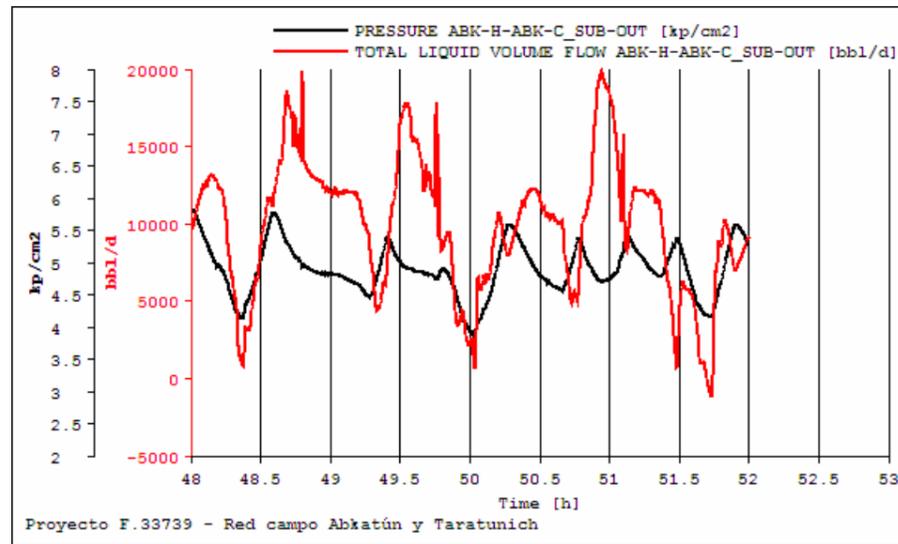
Ambos modelos son independientes por lo cual el análisis se hace de forma separada. Se muestran a continuación los resultados de la red de baja presión. La presión y el flujo de líquido a la llegada a Abkatún-H son los siguientes.



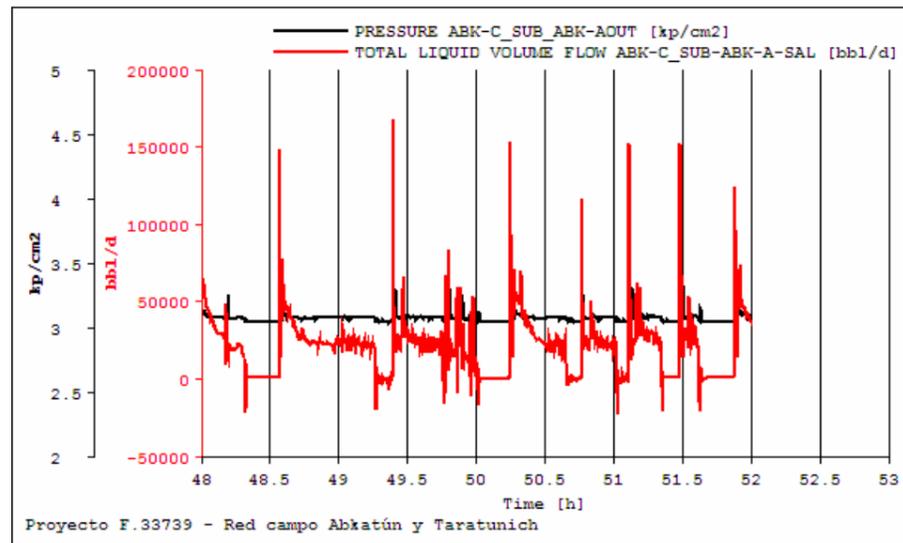
El flujo de líquido varía dentro de un intervalo muy amplio y en ocasiones se tienen picos que comprometen la estabilidad del sistema, se presume la presencia de taponeo severo, lo cual se confirma al observar la variación del indicador de patrón de flujo a lo largo del ducto. Este varía constantemente con el tiempo tal como se observa en las siguientes instantáneas tomadas a diversos tiempos.



Las presiones también varían dentro de un intervalo muy amplio. En el tramo nuevo de Abkatún-H a Abkatún-C se tiene el siguiente comportamiento. Este efecto se puede explicar por la disminución de la presión en el ducto.

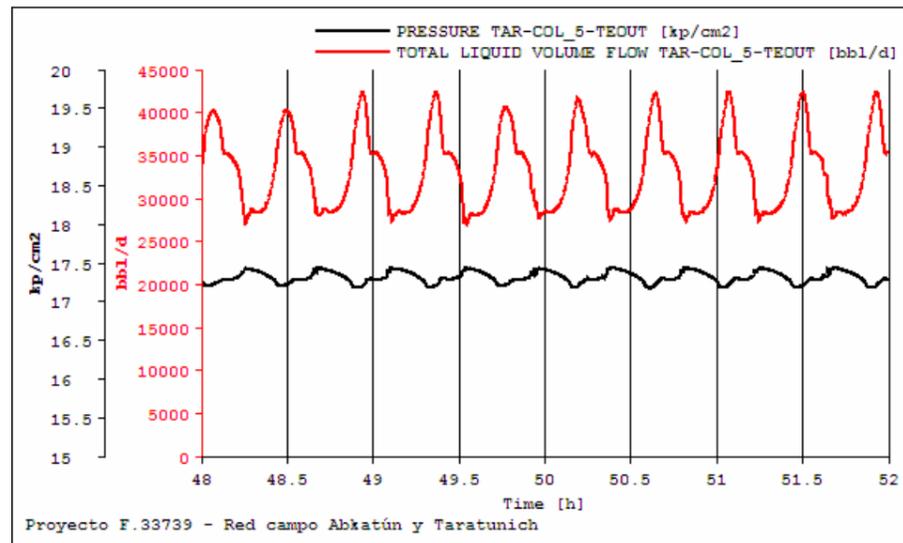


Existen variaciones muy amplias tanto del flujo de líquido como de la presión, es importante recordar que los flujos de líquido mostrados aquí son valores instantáneos y reflejan que durante periodos de tiempo cortos pasan grandes cantidades de líquido por el punto estudiado. Si bien el flujo de líquido varía no se tiene un taponeo tan severo como en el ducto analizado anteriormente. Esto se debe en parte que el diámetro del ducto que se propone construir es de 16 in, además de que la conexión con Abkatún-C es submarina. En el tramo Abkatún-C/Abkatún-A se tiene el siguiente comportamiento.

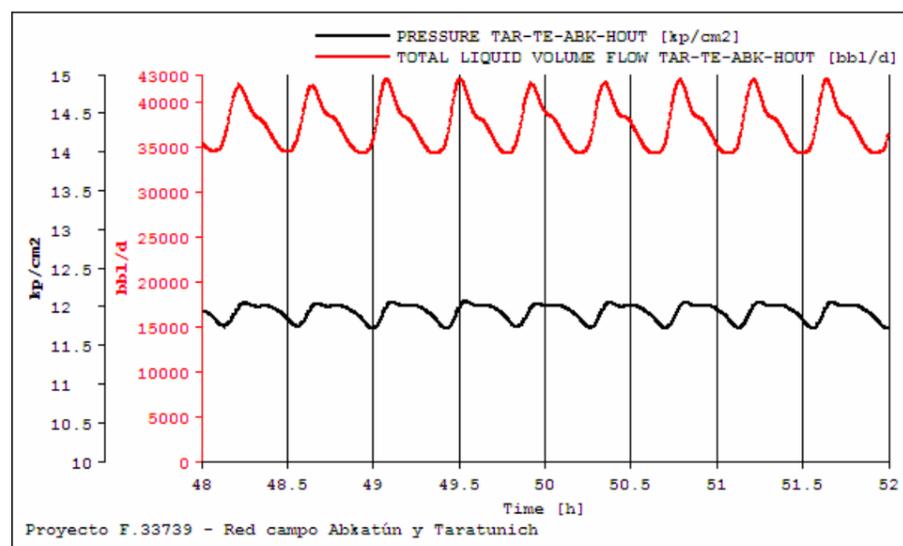


En la línea que llega al complejo se tiene taponeo severo con periodos de tiempo en los cuales no ingresa líquido a Abkatún-A. Desde el punto de vista de mejorar la estabilidad del sistema, poco se gana, la alternativa se justifica con la ganancia que se tiene al disminuir la presión y permitir que pozos que actualmente no fluyen lo puedan hacer al tener una menor presión en contra. Es importante notar que en el modelo de la red de baja presión sólo se encuentran presentes tres pozos, por ello no es posible modelar la variación de la producción ante las nuevas condiciones. También la presencia de taponeo severo puede deberse a la disminución de la presión en la línea.

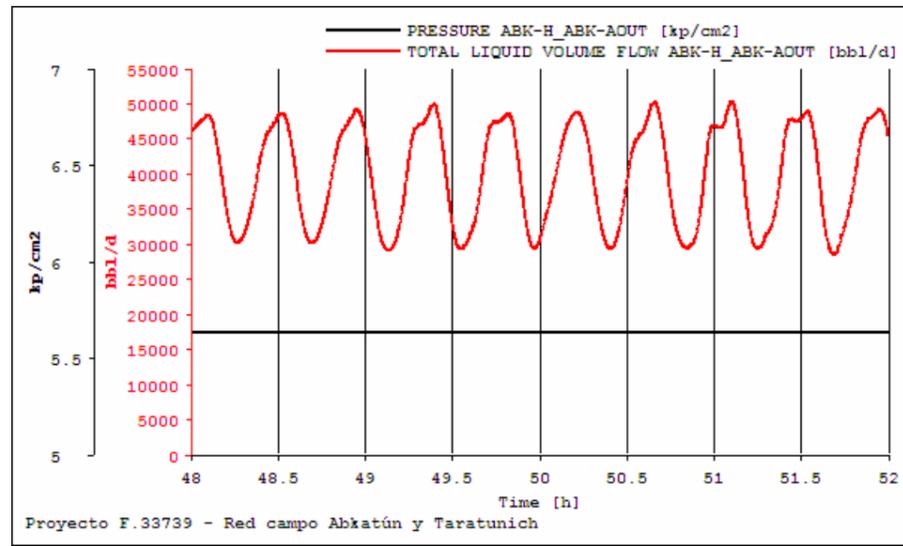
Se analiza a continuación la red de alta presión. En la llegada a Taratunich-TE procedente de Taratunich-TE/TD se tiene la siguiente variación de la presión y la temperatura.



Se tienen variaciones de la presión y del flujo de líquido pero en ningún momento se tiene flujo nulo, la línea opera de forma estable. En la llegada a Abkatún-H procedente de Taratunich-TE tiene el siguiente comportamiento.



El comportamiento es estable, se tienen variaciones acotadas dentro de intervalos cortos. Es importante notar que ambos ductos estudiados tienen un diámetro de 20 in. En el último tramo, en la llegada a Abkatún-H, se tiene el siguiente comportamiento.



Se tienen variaciones pero no del orden de magnitud del caso base mostrado. Según esta simulación el sistema se espera que sea estable. Es interesante el comportamiento del sistema y la desaparición de taponeo severo que antes se observaba en la simulación de la red completa. Anteriormente se atribuía este comportamiento al diámetro de la línea Abkatún-H/Abkatún-A, pero según los resultados de la simulación en las redes de alta y baja presión, se debe a un efecto de propagación en la línea. En ninguna de las redes se analiza el comportamiento de los separadores, esto se hace por simplicidad, ya que el plan es enviar esta producción hacia Permanente junto con la producción de Caan, con lo que el modelo de simulación se hace tremendamente más complejo. Este análisis aunque simplificado es revelador del comportamiento de transporte a través de los ductos.

## **Conclusiones y recomendaciones**

Como resultado de este trabajo se crearon modelos de simulación de estos sistemas, mismos que pueden ser empleados para la simulación de movimientos operativos o para el ensayo de escenarios de producción.

Los modelos de simulación han mostrado su utilidad para el diagnóstico del estado actual de estos sistemas de producción y para planear modificaciones que permitan asegurar el flujo de hidrocarburos. Se presenta por ello, una herramienta valiosa para el personal de Ingeniería de Instalaciones, misma que les permitirá predecir el comportamiento del sistema de producción ante situaciones diferentes a las actuales.

En torno a las alternativas presentadas, se recomienda evaluar seriamente su implantación, todas ellas representan una mejoría respecto a la situación actual tal como fue reproducida por los modelos de simulación. Específicamente en el caso de las conexiones submarinas en el campo Caan, se tiene una alternativa atractiva que debe complementarse con un estudio de integridad en los ductos que confirme la posibilidad de llevar a cabo las acciones propuestas. En la alternativa que propone enviar la producción de Caan1/A hacia Abkatún-F, se debe notar que el movimiento puede llevar a una reducción de la producción en Abkatún-F, por lo cual la implantación de esta alternativa sería sólo una medida temporal. En el caso de las alternativas para el campo Taratunich, en ambas se gana en estabilidad respecto a la situación actual, con estas alternativas se garantiza el flujo en el campo, la decisión final de la implantación es económica.

#### BIBLIOGRAFIA.

- 1.-Garaicochea Petirena Francisco. Transporte de hidrocarburos por ductos, 1991  
Colegio de Ingenieros Petroleros de México.
- 2.-Crane, *Flow of fluids. Through valves, fittings and pipe*, Technical Paper 410, New York, USA, 1985.
- 3.-Danesh, Ali, *PVT and phase behaviour of petroleum reservoir fluids*, Elsevier, 1998
- 4.-McCain, William D., *The properties of petroleum fluids*. Penn Well Books, Tulsa, Oklahoma, 1990.
- 5.- SPT, *User's manual V3.0, OLGA 2000*, Kjelles, Norway, 2003.
6. H. Dale Beggs, 1991, *Production Optimization: Using Nodal Analysis*, OGGI Publication, Oil & Gas Consultants International Inc. Tulsa Oklahoma.
7. H. Dale Beggs, 1984, *Gas Production Operations*, OGGI Publication, Oil & Gas Consultants International Inc. Tulsa Oklahoma.
8. James P. Brill and Hemanta Mukherjee, 1999, *Multiphase Flow in Wells*, First Printing, Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME, Society of Petroleum Engineers Inc., Richardson Texas.
9. Michael J. Economides and A. Daniel Hill, 1994, *Petroleum Production Systems*, Prentice Hall, Inc., Simon & Schuster Company, Upper Saddle River, New Jersey 07458.
10. Michael Golan and Curtis H. Whitson, 1991, *Well Performance*, Prentice Hall, Inc., Simon & Schuster Company, Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
11. T. E. W. Nind, *Principles of Oil Well Production*, Second Edition, McGraw hill Book Company, Peterborough, Ontario, Canada.
12. M. A. Mian, P. E, 1992, *Petroleum Engineering Handbook for the Practicing Engineer*, PennWell Publishing Company, Tulsa Oklahoma.

13. Ken Arnold and Maurice Stewart, 1986, *Surface Production Operations: Design of Oil-Handling System and Facilities*, Volumen I, Gulf Publishing Company, Houston Texas.
14. Ken Arnold and Maurice Stewart, 1986, *Surface Production Operations: Design of Oil-Handling System and Facilities*, Volumen II, Gulf Publishing Company, Houston Texas.
15. Tarek Ahmed, *Reservoir Engineering Handbook*, Second Edition, 2001, Gulf Publishing Company, Houston Texas.
16. Adam T. Burgoyne Jr., Keith K. Millheim, Martin E. Chenevert, and F. S. Young Jr. *Applied Drilling Engineering*, Second Edition, 1991, Society of Petroleum Engineers
17. Henry Liu, 2003, *Pipeline Engineering*, Willbros Engineers, Inc., Tulsa, OK.