



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO NUMÉRICO DEL FLUJO BACHE EN UN OLEOGASODUCTO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE :
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A :
PEREA TÉLLEZ ROQUE



DIRECTOR DE TESIS: DR. EDGAR R. RANGEL GERMÁN

MÉXICO, D.F., DICIEMBRE 2004



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-I-1009

SR. ROQUE PEREA TÉLLEZ
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Edgar R. Rangel Germán y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

ESTUDIO NUMÉRICO DEL FLUJO BACHE EN UN OLEOGASODUCTO

	RESUMEN
I	INTRODUCCIÓN
II	MARCO TEÓRICO
III	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA
IV	METODOLOGÍA
V	APLICACIONES Y DISCUSIÓN
VI	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
	BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

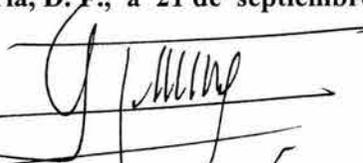
Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

Cd. Universitaria, D. F., a 21 de septiembre de 2004

EL DIRECTOR


M. en C. GERARDO FERRANDO BRAVO

GFB*JAGC*gtg



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

“Estudio Numérico del Flujo Bache en un Oleogasoducto”

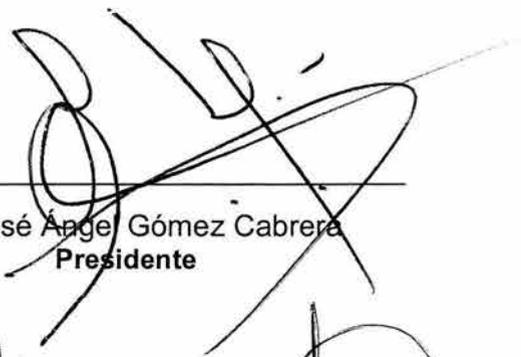
Tesis presentada por:

Perea Téllez Roque

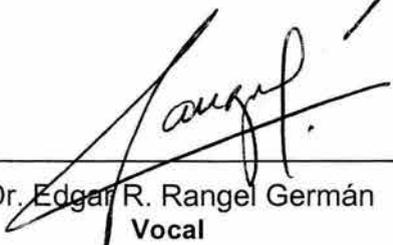
Director de Tesis:

Dr. Edgar R. Rangel Germán

Jurado del Examen Profesional:



M.I. José Ángel Gómez Cabrera
Presidente



Dr. Edgar R. Rangel Germán
Vocal



M.I. Néstor Martínez Romero
Secretario



Ing. Martín Carlos Velázquez Franco
1er. Suplente



Ing. Guillermo Trejo Reyes
2do. Suplente

Agradecimientos

Y bien, llega el momento de escribir unas palabras. Si bien no quiero ser tan extenso y minucioso como lo he visto en varias ocasiones, tampoco quisiera dejar pasar esta oportunidad de dar gracias; de mostrar mi reconocimiento a todos aquellos que han contribuido para hacer posible este trabajo, este momento, este logro.

Agradezco enormemente a todos los profesores, compañeros y amigos que conocí y tuve a través de estos años en la Universidad Nacional Autónoma de México, mi más grande orgullo, y agradezco a Dios por haberme dado la sabiduría justa para tomar de ellos los muchos y diversos conocimientos y experiencias que me han forjado.

Doy gracias, en verdad, por tener la familia que tengo: por su ejemplo y amor incondicional, y por vivir en las condiciones en que he vivido: buscando y construyendo, en todos aspectos, un mejor nivel de vida. Estos dos elementos han sido el motor principal que me ha hecho soñar y trabajar para conseguir todo lo que he logrado.

Gracias Samuel, por ser un verdadero amigo en todo este tiempo; eres una gran persona compadre. Gracias Ing. Gómez Cabrera, su ayuda y orientación los tengo siempre presentes. Muchas gracias Edgar Rangel, por tu apoyo, consejos y ejemplo; llegaste en el momento justo.

Resumen

El estudio y entendimiento del flujo multifásico en tuberías y de los diferentes enfoques que se han desarrollado para el análisis de los procesos que en él ocurren, son aspectos relevantes para la industria petrolera. El *flujo bache* es uno de los mejores ejemplos de procesos *transitorios* o dinámicos, de ahí su complejidad.

En los sistemas de transporte de hidrocarburos se pueden llegar a formar grandes *baches* de líquido y paquetes de gas, como resultado de cambios operativos o debido a condiciones de flujo y características de diseño de las tuberías. El conocimiento claro y detallado de las circunstancias que llevan a la ocurrencia y formación del flujo bache son elementos importantes para el diseño y la operación de estos sistemas, debido a los grandes problemas que éste puede originar; problemas tales como grandes cantidades de producción diferida, bajas eficiencias de los equipos de proceso y dificultad para la operación y daño mecánico de los mismos. El flujo bache es un *patrón de flujo* que se manifiesta en un gran rango de valores de *parámetros* de flujo y de condiciones operativas.

Se observa que los parámetros más importantes que gobiernan el comportamiento del flujo en tuberías son la geometría de éstas, las propiedades físicas de los fluidos y las condiciones operativas del sistema. La variación de uno o más de estos parámetros se ve reflejada, en general, en el desempeño del sistema que se está analizando.

Algunos de los *parámetros y variables* considerados como relevantes, para el desarrollo y análisis del caso de estudio en este trabajo, son el diámetro de la tubería, el gasto a la entrada, la presión a la salida del sistema, la fracción de volumen de agua y la relación gas-aceite. Por otra parte, y con el objetivo de observar de forma cualitativa y cuantitativa el comportamiento del sistema, se eligió estudiar los siguientes *parámetros de medición*: el gasto de líquido a la salida, la presión a la entrada, el contenido de líquido en el sistema y otros parámetros que indican el comportamiento del bacheo tales como el tamaño del bache y la frecuencia de bacheo. El simulador numérico considerado en el presente trabajo, para la realización del *estudio numérico*, es el simulador comercial OLGA™.

La realización de estudios numéricos mediante el empleo de simuladores de flujo constituye una herramienta muy útil y valiosa cuando es utilizada de forma adecuada. Los resultados obtenidos de estos estudios nos indican las condiciones (definidas por una combinación determinada de parámetros de flujo) en las que se presenta el flujo bache y por ende bajo qué condiciones se debe operar si se desea evitarlo.

Paralelamente, el análisis de estos resultados es de gran ayuda para definir alternativas para reducir o evitar el flujo bache, las cuales son válidas ya sea, para el diseño de sistemas o bien aplicables a sistemas ya existentes y que se concretan a cambios en el diseño, cambios operacionales y de procedimientos e implementación de métodos de control.

Contenido

Agradecimientos	iv
Resumen	v
Tabla de Contenido	vii
Lista de Tablas	x
Lista de Figuras	xi
1. Introducción	1
2. Marco Teórico	5
2.1 Flujo Multifásico	5
2.1.1 Definición	5
2.1.2 Clasificaciones	6
2.1.3 Conceptos Básicos	7
2.1.3.1 Gasto Volumétrico	7
2.1.3.2 Velocidades Superficiales	7
2.1.3.3 Velocidad de la Mezcla	7
2.1.3.4 Fracciones de Volumen de Entrada	8
2.1.3.5 Fracción de Volumen de Líquido	8
2.1.3.6 Velocidades Reales Promedio	9
2.1.3.7 Otros Conceptos Importantes	9
2.1.4 Importancia en la Industria	10
2.1.5 Reseña Histórica	16
2.1.5.1 Periodo Empírico	16
2.1.5.2 Periodo de Transición	17
2.1.5.3 Periodo de Modelado	18
2.1.5.4 Periodo Moderno	19

2.1.6 Régimen Estacionario versus Régimen Dinámico o Transitorio	21
2.2 Flujo Multifásico en Estado Estacionario	22
2.2.1 Metodologías Empíricas	22
2.2.1.1 Antecedentes	22
2.2.1.2 Procedimiento General para su Desarrollo	23
2.2.1.3 Diferentes Tipos de Correlaciones para Flujo Estacionario	24
2.2.2 Modelos Mecanísticos	27
2.2.2.1 Introducción	27
2.2.2.2 Patrones de Flujo	28
2.2.2.3 Diferentes Arreglos Mecanísticos	35
2.3 Flujo Multifásico Transitorio	38
2.3.1 Generalidades	38
2.3.2 Diferentes Modelos	38
2.3.3 Simulador TACITE	40
2.3.3.1 Modelo Físico	40
2.3.3.2 Formulaciones Numéricas	43
2.3.4 Simulador OLGA	43
2.3.4.1 Modelo Físico	44
2.3.4.2 Formulaciones Numéricas	45
2.4 Flujo Bache	46
2.4.1 Definición	46
2.4.2 Formación de Baches	48
2.4.2.1 Bacheo Severo	50
2.4.3 Identificación y Seguimiento	52
2.4.4 Consecuencias y Problemática	53
2.4.4.1 Desempeño del Proceso	53
2.4.4.2 Integridad Mecánica del Sistema	53
2.4.5 Soluciones para Evitar o Reducir el Bacheo	54

3. Formulación del Problema	56
3.1 Escenarios	57
3.2 Perfil de la Tubería	58
3.3 Composición	59
3.4 Transferencia de Calor	60
3.5 Condiciones “Estables” de Operación - Caso Base	63
4. Metodología	64
5. Aplicaciones y Discusión	67
5.1 Análisis del Caso Base	67
5.2 Estudios Paramétricos	73
5.2.1 Diámetro de las Tuberías del Sistema	73
5.2.2 Gasto Másico a la Entrada del Sistema	76
5.2.3 Fracción de Volumen de Agua	79
5.2.4 Presión a la Salida del Sistema	82
5.3 Mapas de Patrones de Flujo	86
5.3.1 Sección de Tubería en el Lecho Marino	87
5.3.2 Riser de Llegada	90
5.4 Soluciones para Minimizar el Flujo Bache	94
5.4.1 Cambio del Diámetro del Riser	95
5.4.2 Estrangulamiento Superficial	98
5.4.3 Inyección de Gas en la Base del Riser	101
5.4.4 Combinación de Procedimientos Operativos	104
5.4.5 Métodos de Control	106
5.5 Discusión	108
6. Conclusiones y Recomendaciones	110
6.1 Conclusiones	110
6.2 Recomendaciones	112
Nomenclatura	114
Bibliografía	115
A Definición del caso base de simulación (base.inp)	119

Lista de Tablas

2.1	Correlaciones para flujo multifásico vertical (Brown, 1977)	25
2.2	Correlaciones para flujo multifásico horizontal (Brown, 1977)	26
3.1	Variables y parámetros de medición usados para el estudio paramétrico	58
3.2	Propiedades térmicas de los materiales empleados en el modelo	61
5.1	Principales parámetros y características del sistema para el caso base de simulación	68
5.2	Combinación de procedimientos operativos para eliminar el bacheo ..	105

Lista de Figuras

2.1	Representación esquemática de los patrones de flujo en tuberías horizontales (Shoham, 1982)	30
2.2	Representación esquemática de los patrones de flujo en tuberías verticales (Shoham, 1982)	32
2.3	Mapa de patrones de flujo experimental (Mandhane et al., 1974), sistema aire-agua en tubería horizontal	34
2.4	Mapa de patrones de flujo mecánico (Taitel et al., 1976), sistema aire-agua en tubería ligeramente inclinada	35
2.5	Patrón de flujo bache en tuberías verticales y horizontales (Shoham, 1982)	47
2.6	Frente y cola de un bache normal	47
2.7	Formación de baches por conformación del terreno	49
2.8	Formación de baches en un riser (Drengstig, 2001)	50
2.9	Mediciones que indican un problema de bacheo	52
3.1	Representación esquemática de los sistemas de flujo multifásico	56
3.2	Perfil de la tubería	59
3.3	Espesores de la tubería y material aislante en los risers y tuberías superficiales	60
3.4	Espesores de la tubería y material aislante en el lecho marino	61
3.5	Condiciones ambientales en el modelo	62
3.6	Condiciones “estables” de operación-caso base	63
4.1	Representación de la discretización de las tuberías	66

5.1	Variación de la presión a la entrada del sistema con el tiempo	69
5.2	Variación de la producción de líquido a la salida del sistema con el tiempo	70
5.3	Contenido de líquido en el sistema en el tiempo	71
5.4	Número total de baches en el sistema en el tiempo	72
5.5	Efecto del diámetro de la tubería sobre la presión a la entrada	74
5.6	Efecto del diámetro de la tubería sobre la producción de líquido a la salida	75
5.7	Efecto del diámetro de la tubería sobre el contenido de líquido en el sistema	76
5.8	Efecto del gasto a la entrada sobre la presión a la entrada	77
5.9	Efecto del gasto a la entrada sobre la producción de líquido a la salida	78
5.10	Efecto del gasto a la entrada sobre el contenido de líquido en el sistema	79
5.11	Efecto de la fracción de agua sobre la presión a la entrada	80
5.12	Efecto de la fracción de agua sobre la producción de líquido a la salida	81
5.13	Efecto de la fracción de agua sobre el contenido de líquido en el sistema	82
5.14	Efecto de la presión a la salida sobre la presión a la entrada	83
5.15	Efecto de la presión a la salida sobre la producción de líquido a la salida	84
5.16	Efecto de la presión a la salida sobre el contenido de líquido en el sistema	85
5.17	Regiones de estudio del sistema para la definición de mapas de patrones de flujo	87
5.18	Mapa de Patrones de Flujo: Diámetro-Gasto Másico en lecho marino	88

5.19	Mapa de Patrones de Flujo: Presión-Fracción de Volumen de Gas en lecho marino	89
5.20	Mapa de Patrones de Flujo: Presión-Gasto Másico en Lecho Marino .	90
5.21	Mapa de Patrones de Flujo: Diámetro-Gasto Másico en Riser de Llegada	91
5.22	Mapa de Patrones de Flujo: Presión-Fracción de Volumen de Gas en Riser de Llegada	91
5.23	Mapa de Patrones de Flujo: Presión-Gasto Másico en Riser de Llegada	92
5.24	Presión a la entrada para risers de diferente diámetro	95
5.25	Producción de líquido a la salida para risers de diferente diámetro	96
5.26	Contenido de líquido en el sistema para risers de diferente diámetro ..	97
5.27	Presión a la entrada para diferentes aperturas de la válvula	98
5.28	Producción de líquido a la salida para diferentes aperturas de la válvula	99
5.29	Contenido de líquido en el sistema para diferentes aperturas de la válvula	100
5.30	Esquema de la técnica de eliminación de bacheo por "autolevantamiento"	101
5.31	Presión a la entrada para diferentes gastos de inyección de gas	102
5.32	Producción de líquido a la salida para diferentes gastos de inyección de gas	103
5.33	Contenido de líquido en el sistema para diferentes gastos de inyección de gas	104

1. Introducción

En el presente trabajo se estudia un proceso importante en el transporte y manejo de los hidrocarburos: la formación y presencia del *flujo bache*.

En los sistemas de transporte de hidrocarburos se pueden llegar a formar grandes *baches* de líquido y bolsas o *paquetes* de gas, como resultado de cambios operativos o debido a condiciones de flujo y características físicas de las tuberías. Estos baches de líquido y bolsas de gas pueden originar problemas tales como grandes disminuciones en la producción, bajas eficiencias de los equipos de proceso y dificultad para la operación y daño mecánico de los mismos.

La complejidad que presenta este *régimen de flujo* se debe a su estructura *dinámica* y comportamiento hidrodinámico inestable. Así, en esta tesis se tienen como **objetivos principales**:

- Enfatizar la importancia del *flujo multifásico* en la industria petrolera y citar los diferentes enfoques que han sido desarrollados para su estudio.

- Discutir la relevancia del flujo bache, analizando como se da su formación, identificación y seguimiento y exponer las principales problemáticas y soluciones al mismo.
- Analizar un sistema de transporte de hidrocarburos que presenta flujo bache con el objetivo de estudiar los efectos que, el cambio en los principales *parámetros* operativos, de diseño y del fluido, tienen sobre el comportamiento de los parámetros y condiciones de flujo del mismo, realizando estudios de simulación numérica usando un simulador comercial.
- Discutir la importancia de la realización de estudios numéricos para entender y predecir la ocurrencia y los efectos del flujo bache en los sistemas de transporte de hidrocarburos y proponer diferentes alternativas para reducirlos o eliminarlos.

A lo largo del Capítulo 2 se exponen el marco teórico y los antecedentes en los que se fundamenta el desarrollo del presente trabajo. De esta forma, en la Sección 2.1 se estudia el flujo multifásico, en la que se describen aspectos generales y esenciales como son definiciones, conceptos básicos y la reseña histórica e importancia industrial del flujo multifásico. Se discuten además las particularidades de los sistemas estacionario y transitorio, que son aspectos primordiales para el entendimiento del flujo multifásico en tuberías.

En las Secciones 2.2 y 2.3 se tratan los diferentes procedimientos y puntos de vista bajo los que se ha estudiado y dado solución a los problemas relacionados al flujo multifásico (que se reducen a aspectos de diseño y operación de estos sistemas); estos son los enfoques *estacionario* (correlaciones empíricas y modelos mecánicos) y *transitorio* (códigos de computadora y simuladores).

Se verá que el enfoque transitorio debe considerarse al analizar procesos variables o dinámicos de flujo (como lo es el flujo bache); es decir, en los que sus características son dependientes del tiempo y del espacio, ya que proporciona mejores resultados.

Posteriormente, en la Sección 2.4, se realiza un estudio integral del flujo bache, el cual abarca su definición, formación, identificación, problemática y soluciones. Es importante mencionar nuevamente que el estudio y el entendimiento del flujo bache son aspectos relevantes en el diseño y la operación de sistemas de transporte de hidrocarburos debido a los grandes problemas que éste puede originar. El flujo bache es por mucho, el patrón de flujo que más y mayores retos presenta debido a las variaciones que muestra en la producción, a los problemas operativos que causa y a que se presenta en un gran rango de valores de parámetros de flujo y de condiciones operativas.

En el Capítulo 3 se da la formulación del problema. En éste se definen varios elementos que son indispensables para especificar de forma completa el problema o caso de estudio a tratar. Estos elementos constan de escenarios de simulación, perfil de la tubería, composición de los fluidos, transferencia de calor y condiciones “estables” de operación para el caso base.

La metodología empleada para la solución del problema planteado es definida en el Capítulo 4. El simulador comercial elegido para la realización del estudio numérico en el presente trabajo, es el simulador OLGA™. OLGA es un modelo *unidimensional* y dinámico (válido para régimen transitorio o variable), en el que se especifica y da solución a un sistema de ecuaciones constituido por las *ecuaciones de conservación* de continuidad, momento y energía.

Una parte importante de esta tesis es la que corresponde al Capítulo 5, en el que se presentan las aplicaciones, resultados y discusión de los estudios numéricos realizados con el simulador OLGA. En este capítulo se realizan: el

análisis del caso base de simulación, estudios paramétricos involucrando algunas de las variables más importantes en el flujo multifásico y que tienen mayor influencia sobre el bacheo, elaboración de mapas de patrones de flujo a partir de estos estudios, soluciones para minimizar el flujo bache y una discusión general de los resultados obtenidos.

El Flujo Bache es un proceso de importancia en la Industria Petrolera debido a los grandes retos y problemática que origina y dado que se presenta bajo un gran rango de parámetros de flujo y condiciones operativas. Es necesario tener un conocimiento amplio y detallado de las condiciones bajo las que se presenta el bacheo para definir alternativas que permitan reducir o evitar sus efectos; ya sea en el diseño o en la operación de sistemas ya existentes. La realización de estudios numéricos mediante el empleo de simuladores de flujo constituye una herramienta valiosa para estos fines.

2. Marco Teórico

2.1 Flujo Multifásico

2.1.1 Definición

Dentro de la literatura se encuentran diversas definiciones del proceso denominado flujo multifásico. A continuación se citan dos de ellas, las cuales son sencillas y útiles para los propósitos del presente trabajo.

Wallis (1969) define teóricamente el flujo multifásico como “el flujo simultáneo de dos o tres fases de una o más sustancias, entendiendo por fase alguno de los tres estados fundamentales de agregación molecular: sólido, líquido o gaseoso”.

Una definición aplicada a la práctica de flujo multifásico es aquella dada por Brown (1977): “El flujo multifásico en tuberías es definido como el movimiento concurrente de gas libre y líquido en tuberías”, la cual está referida específicamente al flujo de mezclas de hidrocarburos y no hidrocarburos (como el agua) en tuberías.

En este trabajo definimos flujo multifásico como el transporte simultáneo de dos o tres fases (sólido, líquido o gaseoso) de un compuesto o de una mezcla de compuestos, ocasionado por una diferencia de presión.

2.1.2 Clasificaciones

Una clasificación general para una corriente de flujo, válida tanto para medios porosos como para cualquier elemento de las instalaciones de producción (tuberías, equipo, accesorios, etc.), considerando el número de fases presentes, es la siguiente (Hetsroni, 1982):

- Flujo monofásico
Flujo de gas o líquido
- Flujo multifásico
Flujo simultáneo de:
Gas-líquido
Gas-sólido
Líquido-sólido
Gas-líquido-sólido

En el flujo monofásico, fluido en una sola fase ocupa todo el volumen del medio en el que se transporta; en el multifásico, por el contrario, fluidos en dos o tres fases diferentes ocupan dicho volumen.

Además de esta clasificación general se tienen otras que también son útiles cuando se estudian aspectos de flujo multifásico. Estas otras formas de clasificar el flujo multifásico son:

- De acuerdo con el número de dimensiones: Unidimensional, bidimensional y tridimensional (Hetsroni, 1982).
- De acuerdo a la dirección y al sentido global del flujo: Vertical (ascendente o descendente), inclinado (ascendente o descendente) y horizontal (Brown, 1977).

2.1.3 Conceptos Básicos

Los conceptos básicos y variables que describen los sistemas de flujo multifásico, utilizados en esta tesis, son presentados en este apartado.

2.1.3.1 Gasto Volumétrico

Se define como el volumen de fluidos con respecto al tiempo; es decir:

$$q_F = \frac{V_F}{t}, \quad (2.1)$$

donde q_F = gasto volumétrico

V_F = volumen de fluidos

t = tiempo

2.1.3.2 Velocidades Superficiales

Las velocidades superficiales de las fases líquida y gaseosa (v_{SL} y v_{SG}) son definidas como el gasto volumétrico de la fase considerada dividida entre el área de la sección transversal de la tubería:

$$v_{SL} = \frac{q_L}{A} \quad \text{y} \quad v_{SG} = \frac{q_G}{A}, \quad (2.2, 2.3)$$

en donde q_L y q_G son, respectivamente, los gastos volumétricos de líquido y gas, y A es el área de la sección transversal de la tubería. La velocidad superficial de una fase es la velocidad que tendría dicha fase si ocupara toda la tubería (Garaicochea et al., 1991).

2.1.3.3 Velocidad de la Mezcla

La velocidad de la mezcla está dada por la suma de las velocidades superficiales del líquido y del gas; es decir:

$$v_M = v_{SL} + v_{SG}. \quad (2.4)$$

2.1.3.4 Fracciones de Volumen de Entrada

Las fracciones de volumen de entrada, de las fases líquida y gaseosa (C_L y C_G) son definidas como:

$$C_L = \frac{q_L}{q_L + q_G} = \frac{v_{SL}}{v_M}, \quad (2.5)$$

$$C_G = \frac{q_G}{q_L + q_G} = \frac{v_{SG}}{v_M}. \quad (2.6)$$

Consecuentemente, la suma de las fracciones de líquido y gas es igual a uno.

2.1.3.5 Fracción de Volumen de Líquido

La característica del flujo bifásico es el flujo simultáneo de dos fases de diferente densidad y viscosidad (Chen, 2001). Generalmente, en flujos horizontal o ascendente, la fase menos densa y/o la fase menos viscosa tiende a fluir a una velocidad mayor.

En el flujo gas-líquido, el gas se puede mover mucho más rápido que el líquido, excepto cuando se tiene flujo descendente. La diferencia en las velocidades promedio "in situ" o "reales", entre las dos fases resulta en un proceso muy importante: el "resbalamiento" o "desfase" de una de las fases con respecto a la otra (Govier, 1972). Esto hace que las fracciones de volumen in situ de las fases sean diferentes a las fracciones de volumen de entrada. Aunque el colgamiento puede ser definido como la fracción del volumen de la tubería ocupada por una fase dada, el colgamiento es generalmente definido como la fracción de volumen de líquido in situ, mientras que el término fracción de vacío es usado para la fracción de volumen de gas in situ.

Si el área de la sección transversal de la tubería ocupada por la fase líquida es A_L , el área restante A_G es ocupada por el gas. Así, la fracción de volumen de líquido y la fracción de gas son definidos como:

$$\alpha_L = \frac{A_L}{A} \quad \text{y} \quad \alpha_G = \frac{A_G}{A}. \quad (2.7, 2.8)$$

2.1.3.6 Velocidades Reales Promedio

Una vez que la fracción de volumen in situ es conocida, se puede calcular la velocidad promedio (in situ) para cada fase como sigue:

$$v_L = \frac{q_L}{A_L} = \frac{v_{SL}}{\alpha_L}, \quad (2.9)$$

$$v_G = \frac{q_G}{A_G} = \frac{v_{SG}}{\alpha_G}. \quad (2.10)$$

Estas son las velocidades promedio reales de las fases líquida y gaseosa, cuyos valores son mayores que los de las velocidades superficiales correspondientes.

2.1.3.7 Otros Conceptos Importantes

Mezclas Multicomponentes: Los fluidos hidrocarburos son mezclas de diferentes componentes que poseen propiedades particulares. Dependiendo de las proporciones en que dichos componentes se mezclen se tendrá una mezcla con propiedades definidas y diferentes a la de los componentes.

Pseudocomponentes: Son agrupaciones de dos o más fracciones o componentes de la mezcla de hidrocarburos. Al pseudocomponente se le asignan valores de propiedades que son representativas de todos y cada uno de los componentes que lo constituyen; esto se hace generalmente por la dificultad e inconveniencia de manejar valores para cada uno de los componentes involucrados.

Patrón de Flujo: Es la descripción de la distribución espacial en el volumen de transporte que presentan las diferentes fases en el flujo multifásico, que viajan a través de una tubería. La distinción entre los diferentes patrones o regímenes de flujo se realizaba de forma cualitativa y muchas veces arbitraria; actualmente se utilizan datos en forma cuantitativa, de parámetros tales como la fracción de volumen de líquido, para definirlos. Los patrones de flujo más comunes son: estratificado, anular, burbuja y bache.

Coalescencia: Proceso que se presenta cuando la presión de dos burbujas, separadas por una película de líquido, equilibra la presión por tensión interfacial haciendo que estas se unan o coalescan.

Burbujas de Taylor: Grandes burbujas de gas formadas por la coalescencia de burbujas de menor tamaño, bajo ciertas condiciones, durante el flujo de los fluidos. Llamadas así en honor al investigador G. I. Taylor. Se presenta como parte del flujo bache. Una burbuja de Taylor antecede y procede al bache de líquido siendo transportado.

Relación Gas-Aceite: Se define como el cociente del volumen de gas producido entre el volumen de aceite producido, ambos volúmenes medidos a condiciones estándar.

2.1.4 Importancia en la Industria

El flujo multifásico en tuberías posee gran importancia práctica y económica y tiene mucha aplicación y presencia en la industria petrolera, química, nuclear y geotérmica. Es por ello que ha sido objeto de investigación intensa por varias décadas con el propósito de describir su comportamiento y entender los procesos físico-químicos que en él se presentan.

Para la industria petrolera y más aún en el caso particular de las instalaciones costafuera, por los retos adicionales que éstas presentan, un entendimiento preciso de los procesos fisicoquímicos es crucial para el diseño de sistemas de transporte y equipos de proceso eficientes, desde el fondo del pozo hasta las instalaciones superficiales (Lezeau et al., 1996).

En esta industria, los fluidos involucrados en el flujo multifásico son *mezclas multicomponentes* que tienen comportamientos de fase complejos. Debido a la complejidad de los procesos físicos involucrados en el flujo multifásico y de los modelos utilizados para su estudio, los cuales combinan efectos hidrodinámicos y

termodinámicos; las soluciones analíticas frecuentemente son muy complejas y en ocasiones inexistentes, por lo cual las simulaciones numéricas son las más frecuentemente utilizadas.

Dado que la producción de hidrocarburos costafuera involucra el tener instalaciones en lugares alejados de la costa, resultaría impráctico, riesgoso e incosteable el construir y dar mantenimiento a plataformas que contarán con instalaciones de separación de las mezclas multifásicas producidas. Por ello, la alternativa es utilizar sistemas de producción y transporte submarinos, involucrando un mínimo de tratamiento de estos fluidos multifásicos costafuera, para llevarlos a instalaciones de separación y procesamiento terrestre.

Sin embargo, el realizar lo anterior involucra el transporte simultáneo de los fluidos multifásicos que pueden originar problemas de *aseguramiento de flujo* tales como: corrosión, depósito de asfaltenos, formación de hidratos, etc.

De forma similar al caso de las instalaciones costafuera, no sería rentable ni viable el desarrollar la infraestructura necesaria, para la operación segura de instalaciones de producción y separación en ambientes terrestres lejanos de difícil acceso.

Existe una diferencia fundamental entre el flujo de una sola fase y el flujo multifásico. En el primer caso, una sola fase está fluyendo; esta puede ser un componente puro o una mezcla homogénea de componentes como es el aire. En el segundo caso diversos fluidos fluyen simultáneamente y con esto, en el flujo multifásico, los procesos físico-químicos se tornan más complejos que en el caso monofásico. En el estudio de procesos de flujo multifásico debe tenerse un entendimiento preciso no sólo del comportamiento individual de cada fluido, sino de su interacción con los demás.

En general, el flujo multifásico exhibe características mucho más complicadas que el flujo de una sola fase, debido a la existencia de interfases y porque la distribución espacial de las fases dentro de las tuberías es difícil de cuantificar y determinar con exactitud. Algunas consecuencias de la compleja naturaleza del flujo multifásico en tuberías son:

- La caída de presión en líneas de transmisión de gas se incrementa significativamente aun con la presencia de cantidades muy pequeñas de condensado. La pérdida de energía ocurre cuando se acelera y transporta al líquido, el cual se adhiere a las paredes del ducto y origina la formación de ondas en la interfase gas-líquido. La capa de líquido reduce el área de la tubería e incrementa la rugosidad efectiva.
- En terrenos “montañosos” o sinuosos, la caída de presión entre la base y la cima durante el ascenso (debida a la gravedad), se recupera en la parte baja de la misma, para el caso de flujo monofásico: sin embargo, frecuentemente esto no ocurre cuando se tiene flujo multifásico.
- En terrenos montañosos también se pierde energía al llevar el líquido sobre obstáculos naturales (tales como colinas, cerros, etc.). Si la presión no es suficientemente grande para superar dicho obstáculo, se “inundará la tubería” con lo que se reducirá el área disponible para el flujo del gas, provocando aún mayores caídas de presión.
- En flujo monofásico las caídas de presión disminuyen al incrementar el diámetro de la tubería, pero esto no es necesariamente válido para flujo multifásico.

A continuación se mencionan algunas de las aplicaciones más importantes del cálculo de caídas de presión, durante el transporte de flujo multifásico en tuberías, en ingeniería petrolera (Brown, 1977; Brill, 1987):

- Flujo natural: En la producción de fluidos, desde el fondo del pozo hasta las instalaciones superficiales, se pierde energía. Así, para prolongar la vida fluyente de los pozos al máximo, es necesario minimizar las pérdidas de energía mediante el apropiado diseño de todas las líneas de flujo.
- Análisis total del sistema de producción: Las técnicas utilizadas para este fin son llamadas comúnmente análisis nodalTM; su objetivo es optimar los cálculos de diseño de sistemas de transporte de hidrocarburos. Lo anterior permite conocer el efecto que tiene sobre el sistema la variación de ciertos parámetros del mismo.
- Sistemas artificiales de producción: El diseño de los sistemas artificiales de producción involucra el uso de los cálculos de flujo multifásico en tuberías. Estos son usados, por ejemplo, para determinar el espaciamiento de las válvulas de inyección de gas en el bombeo neumático (BN) y en la determinación de la localización, tamaño y potencia de las bombas de fondo a utilizarse en el bombeo electro centrífugo (BEC).
- Sistemas de recolección y separación: En este tipo de instalaciones es necesario transportar mezclas multifásicas por distancias relativamente largas. El dimensionamiento correcto de las líneas superficiales, usadas en estos sistemas, es importante para reducir las caídas de presión significativas y para establecer la máxima capacidad de transporte.
- Diseño de tuberías inclinadas: Esta práctica es común en operaciones costafuera en las que se perforan pozos direccionales y en el dimensionamiento de líneas en terrenos sinuosos.

Existen otros usos para los cálculos de flujo multifásico. En todas las aplicaciones mencionadas previamente se observa que el aspecto económico

debe involucrarse para lograr la optimación económica en el diseño, dimensionamiento y configuración de todas las tuberías por las que atraviesa el flujo.

Los parámetros más importantes que gobiernan el comportamiento del flujo (ya sea monofásico o multifásico) en tuberías son la geometría de éstas (diámetro, rugosidad y orientación), las propiedades físicas de gases y líquidos (densidad, viscosidad, compresibilidad y tensión superficial) y las condiciones de flujo (velocidades, temperatura y presión) (Ouyang, 1995).

Se han realizado análisis teóricos y experimentales encaminados a predecir los factores clave para el modelado del flujo multifásico; estos son: caída de presión, fracción de volumen de líquido en el sistema y la rapidez de la transferencia de masa y calor; que son elementos esenciales para un adecuado diseño y operación de estos sistemas.

Se ha observado que el flujo multifásico en terrenos sinuosos, tanto para tuberías que van por el lecho marino como en tierra, puede provocar problemas operativos significativos originados por la formación y el desarrollo de flujo inestable e intermitente (Zheng et al., 1992). Dichas variaciones en el relieve inducen y favorecen las interacciones de flujo entre las fases en las secciones de tubería de diferente inclinación.

Estas condiciones y otras, tales como el flujo a través de risers¹ de gran longitud favorecen el desarrollo de tapones o “baches” de líquido, situación que como se analizará más adelante, en un apartado especial, ocasiona diversos problemas operativos y de diseño debido a que el sistema opera en condiciones inestables por la producción variable en el tiempo.

1. “riser”: Término que en idioma inglés se utiliza para referirse a la tubería vertical de llegada o de salida de los fluidos de una plataforma marina; es de uso común en la industria petrolera.

El trabajo experimental ha jugado un papel fundamental en las investigaciones sobre flujo multifásico (Chen, 2001). Debido a la complejidad del problema, los experimentos nos proporcionan la forma más directa y confiable de entender los mecanismos físicos involucrados en el proceso. Así, basados en datos experimentales, varios modelos pueden ser desarrollados y validados.

La física del flujo de fluidos involucra diversos procesos (Lezeau, 1997). Esta incluye un amplio rango de escalas de tiempo y espacio; por ello, su adecuada comprensión es fundamental en muchas aplicaciones en ciencia e ingeniería. Por ello, numerosos modelos de variada complejidad han sido desarrollados. Muy frecuentemente, las ecuaciones que gobiernan los procesos de interés son descritas mediante ecuaciones diferenciales parciales, cuya solución numérica es difícil dado que requiere conocimiento profundo de física y matemáticas.

Se requiere del uso de enfoques experimentales y teóricos, para un adecuado entendimiento del flujo multifásico en tuberías. Como en todas las áreas de ingeniería, la solución de problemas tiene diferentes niveles de precisión: correlaciones empíricas, técnicas de modelado y simulación numérica y solución analítica de ecuaciones (por ejemplo de las ecuaciones de Navier-Stokes), cada una de ellas más rigurosa que la anterior.

Las correlaciones se basan en estudios experimentales de observación, de medición y de estimación, los cuales están sujetos a un gran número de errores, los cuales se van acumulando hasta provocar diferencias muy significativas, entre las predicciones que con ellas se hacen y los valores reales medidos, para determinado proceso o parámetro de interés.

Las técnicas de modelado, por otra parte, son más adecuadas ya que consideran leyes físicas fundamentales como son la conservación de materia y de cantidad de movimiento y principios de mecánica de fluidos. Estos modelos

utilizan, sin embargo, algunas correlaciones empíricas, por lo que están sujetas a cierta incertidumbre.

Las ecuaciones de Navier-Stokes son el grupo de ecuaciones diferenciales parciales fundamentales, completas y generales que describen y gobiernan el flujo de fluidos. Cuando estas ecuaciones se combinan con las ecuaciones de continuidad de flujo de fluidos se tornan muy complicadas, presentando varias incógnitas. Estas ecuaciones sólo pueden ser resueltas de forma exacta para geometrías muy simples; para otros casos deben hacerse aproximaciones que permitan resolverlas de forma adecuada. Las ecuaciones de Navier-Stokes satisfacen conservaciones de masa, momento² y energía.

2.1.5 Reseña Histórica

La tecnología de flujo multifásico en tuberías ha experimentado cambios significativos en los últimos 30 años, aunque la mayoría de ellos ocurrieron después del artículo publicado por Brill (1987) (artículo en el que el autor hace una revisión histórica del desarrollo de las herramientas de diseño, utilizadas para el estudio del complejo flujo multifásico).

A continuación se resume la cronología de la tecnología de flujo multifásico, descrita en el trabajo presentado por Brill (1992).

2.1.5.1 Periodo Empírico

La tecnología de flujo multifásico comenzó en la industria petrolera alrededor de 1950. Los primeros investigadores usaban datos obtenidos de instalaciones o laboratorios de prueba y también datos de campo.

2. "momento": También conocido como momentum o cantidad de movimiento, se define, para una partícula, como el producto de su masa por su velocidad. Es una cantidad vectorial; es decir, posee magnitud y dirección. La cantidad de momento de un sistema se conserva.

Los fluidos eran considerados como “mezclas homogéneas”, por lo que la problemática involucrada en su estudio se simplificaba significativamente. Fueron desarrolladas ecuaciones de gradiente de presión para estado estacionario, bajo los principios de conservación de masa y momento aplicados a estas mezclas homogéneas.

Debido a la naturaleza compleja del flujo multifásico el problema fue abordado, primeramente, de forma empírica. Este enfoque se basa en relaciones empíricas o semiempíricas y dominó, por muchos años, los procedimientos prácticos de diseño. Estas correlaciones deben ser utilizadas con reserva cuando sus parámetros se hallan fuera del rango de investigación del trabajo experimental, lo cual ocurre casi siempre.

Lo anterior quiere decir que cuando se decide utilizar una correlación para estudiar flujo multifásico, se debe garantizar que las condiciones del mismo (tipo de fluidos, diámetro e inclinación de tuberías, gastos, etc.) sean semejantes a aquellas bajo las cuales se desarrolló dicha correlación, para obtener resultados confiables.

Gran parte de las correlaciones existentes se desarrollaron trabajando con sistemas aire-agua o vapor-agua. Esto no necesariamente significa que puedan utilizarse de forma confiable en sistemas tales como gas-aceite o aceite-agua; por lo tanto, deben ser usadas con precaución en otros sistemas de fluidos.

2.1.5.2 Periodo de Transición

La aparición y desarrollo de la computadora personal ayudó en gran medida a mejorar y a agilizar diversos procedimientos prácticos; sin embargo, pronto se detectaron numerosos problemas en los métodos disponibles: los mapas de patrones de flujo empíricos eran inadecuados, la transición entre patrones de flujo dependía de diversos parámetros (especialmente de las velocidades superficiales de los fluidos y del ángulo de inclinación de la tubería) y la simplificación realizada

al considerar a los fluidos como una mezcla homogénea, llevaba a resultados erróneos.

Pronto fue claro que, no importando cuánta información se recolectara de los laboratorios de prueba o qué tan cuidadosamente se hicieran mediciones en instalaciones de campo, la aproximación de las predicciones no podía mejorarse sin la introducción de fundamentos teóricos y mecanismos físicos básicos en el desarrollo de dichos procedimientos.

Alrededor de 1970 la industria petrolera comenzó a considerar algunos conceptos físicos y fundamentos teóricos, ya utilizados en otras industrias, para el entendimiento del flujo multifásico; como por ejemplo los adelantos realizados por las industrias nuclear, en el perfeccionamiento de los sistemas de enfriamiento de los reactores nucleares y aeronáutica, para el desarrollo de tecnologías de enfriamiento utilizadas en los satélites. Aunque los fluidos usados en estos estudios (vapor y agua) son mucho más simples, en comparación con aquellos encontrados en la industria petrolera, los métodos empleados para la formulación de ecuaciones de conservación eran mucho más avanzados y la metodología usada se encontró igualmente válida para todos estos diferentes sistemas de fluidos.

2.1.5.3 Periodo de Modelado

Este periodo comienza alrededor de 1980 al iniciarse un esfuerzo por mejorar el entendimiento de la teoría de flujo multifásico. Los investigadores comprendieron que se requería la introducción de una metodología que no sólo involucrara la experimentación sino que además considerara fundamentos teóricos. Esto llevó al desarrollo de los llamados modelos mecanísticos, que describen mejor los procesos físico-químicos que se presentan en el transporte de fluidos en tuberías.

Este enfoque se basa en los fundamentos del flujo multifásico y de la dinámica de fluidos. El postulado principal de esta metodología es la existencia de patrones o regímenes de flujo. Estos modelos pueden ser utilizados en un rango más amplio de condiciones de flujo que en el caso de las correlaciones empíricas. Sin embargo, los modelos mecanísticos no han sido ampliamente aceptados para el diseño de sistemas, principalmente debido a que hacen uso de elementos que son de carácter empírico tales como correlaciones y otras relaciones para su ajuste (para parámetros como intercambio de masa, momento y energía interfaciales, factores de fricción interfacial y fracción de volumen de líquido).

En aplicaciones de ingeniería petrolera, las tres características hidrodinámicas más importantes son el *patrón de flujo*, la fracción de volumen de líquido y la caída de presión. Para estimar de manera correcta la caída de presión y la fracción de volumen de líquido es necesario conocer el patrón de flujo existente, bajo las condiciones de flujo específicas. De ahí que la predicción del patrón de flujo sea el aspecto fundamental en el análisis de flujo multifásico. A pesar de que los procedimientos para determinar los patrones de flujo no son triviales, las discontinuidades o transiciones que surgen al cambiar de un régimen de flujo a otro pueden ocasionar problemas de convergencia en el cálculo de las caídas de presión y de la fracción de volumen de líquido.

2.1.5.4 Periodo Moderno

Se han realizado mejoras importantes a la teoría de los modelos mecanísticos, para estado estacionario, al desarrollar metodologías que permiten predecir la transición entre diversos patrones de flujo para todos los ángulos de inclinación. Esto permitió el perfeccionamiento de diferentes modelos de patrones de flujo individuales ya existentes y el surgimiento de modelos unificados, que se aplican en el estudio de flujo de fluidos en tuberías, sin importar el ángulo de inclinación de las mismas.

En el presente trabajo se analizan, en la Sección 2.2, los enfoques que, desde el punto de vista estacionario, han sido desarrollados para estudiar el flujo multifásico; ellos son las correlaciones empíricas y los modelos mecanísticos.

Por otra parte, la aproximación de modelado para flujo bifásico, implementada de forma pionera por las industrias nuclear y aeroespacial, ha sido adoptada para el desarrollo de códigos de computadora que toman en consideración el flujo de fluidos en régimen dinámico o transitorio, para el estudio del transporte de fluidos en la industria petrolera. Esta metodología involucra el considerar ecuaciones interdependientes que describen la conservación de masa, momento y energía, para cada una de las fases, lo cual da como resultado una serie de ecuaciones que deben ser resueltas de forma simultánea, haciendo uso de técnicas numéricas.

Estos códigos y simuladores en régimen transitorio siguen en investigación y desarrollo, ya que se han mostrado capaces de simular una gran variedad de procesos dependientes del tiempo. Estos incluyen cambios en los gastos de entrada o salida en el sistema, bacheo, rompimiento de tuberías y fugas y variación de las presiones en el sistema, lo cual representa grandes ventajas operativas y de diseño.

Aunque los simuladores en régimen transitorio son ahora mucho más fáciles de usar, requieren más datos y de mejor calidad que aquellos que trabajan en régimen estacionario (Bendixsen et al., 1991). Dependiendo del sistema simulado, éstos pueden requerir mucho tiempo computacional.

En la Sección 2.3 se estudian, de forma breve y concisa, los principales fundamentos teóricos y características de dos de las descripciones matemáticas más desarrolladas y comunes con que se cuenta para analizar el flujo multifásico transitorio: el modelo de flujo de deriva (Drift-Flux Model) y el modelo de dos fluidos (Two-Fluid Model). Una explicación más amplia de los procedimientos,

herramientas y metodología que se utilizan para analizar un sistema, haciendo uso de un simulador comercial, se presenta en el Capítulo 4 de este trabajo.

2.1.6 Régimen Estacionario versus Régimen Dinámico o Transitorio

El estado estacionario es la condición que se tiene cuando las propiedades del sistema en un punto no varían con respecto al tiempo y el estado transitorio, por el contrario se presenta cuando las propiedades del sistema en un punto varían con respecto al tiempo.

La producción de hidrocarburos involucra siempre el flujo multifásico de aceite y gas en pozos y líneas de descarga (Ouyang, 2001). Diversos modelos de flujo, tanto transitorios como estacionarios, están siendo usados actualmente para el análisis y el diseño de estos sistemas de transporte multifásicos.

Para la mayor parte de la investigación de flujo multifásico en tuberías se ha considerado que el flujo se encuentra bajo condiciones estacionarias. Sin embargo, los modelos de flujo en estado estacionario son inadecuados durante periodos o condiciones transitorias, para predecir las presiones y las variaciones de la fracción de volumen de líquido, lo cual provoca errores al determinar patrones de flujo, distribución de las fases, gastos y gradientes de presión, los cuales son parámetros esenciales para un diseño y operación confiables y adecuados de estos sistemas.

2.2 Flujo Multifásico en Estado Estacionario

El flujo multifásico en estado estacionario se entiende como aquel flujo multifásico que puede ser estudiado bajo la consideración de que la magnitud de cualquier propiedad de flujo, como son velocidad promedio, densidad y fracciones másicas de las fases, en un punto no varía con respecto al tiempo, aunque éstas pueden tener valores diferentes para distintos puntos dentro de un sistema dado.

Para el estudio del flujo multifásico en estado estacionario se han utilizado dos enfoques principales: el primero de ellos ha sido mediante el desarrollo de ecuaciones y correlaciones de tipo empírico, utilizadas para el cálculo de caídas de presión a través del flujo en circuitos experimentales de tuberías y el segundo, un tanto más válido en su formulación al considerar leyes fundamentales, desarrollado desde el punto de vista mecanístico.

A continuación se realiza una descripción de las principales características, alcances y desarrollo histórico de ambas perspectivas.

2.2.1 Metodologías Empíricas

2.2.1.1 Antecedentes

La existencia del flujo multifásico y los problemas asociados con este, han sido reconocidos desde 1797 (Brown, 1977). Numerosas correlaciones y ecuaciones referentes a los temas de flujo multifásico en tuberías horizontales y verticales han sido presentadas en la literatura técnica. Sin embargo, las contribuciones que pueden considerarse como más significativas han sido realizadas a partir de 1945.

Como ya se mencionó, las metodologías empíricas usadas en el estudio del flujo multifásico en tuberías se basaron en el desarrollo de correlaciones y ecuaciones, a partir del análisis de datos obtenidos en campo y en laboratorios de prueba. Los principales inconvenientes de estos estudios (incluyendo sus

resultados y modelos correspondientes) eran las limitaciones en cuanto al rango de datos en que fueron desarrollados; es decir, sólo se analizaba su comportamiento bajo determinados gastos, consideraban exclusivamente ciertos diámetros, longitudes y materiales de tuberías (generalmente vidrio y plástico) y se desarrollaron para sistemas aire-agua o vapor-agua a presiones bajas.

Al considerar a los fluidos como mezclas homogéneas, los procedimientos para su análisis se simplificaban significativamente. De esta forma, fueron desarrolladas ecuaciones de gradiente de presión para estado estacionario bajo los principios de conservación de masa y momento.

2.2.1.2 Procedimiento General para su Desarrollo

La mayoría de las correlaciones para flujo multifásico hace uso del análisis dimensional, para obtener grupos adimensionales de variables, para correlacionar parámetros. Muchas de estas correlaciones fueron desarrolladas mediante el uso del teorema π de Buckingham, el cual ayuda a determinar grupos de variables adimensionales de forma pertinente.

Muchos de los investigadores de flujo multifásico han usado la ecuación general de energía escrita en alguna de sus formas. Poettmann y Carpenter, y Hagedorn y Brown la utilizaron en forma de balance de energía. Duns y Ros la usaron en forma de balance de presión. Otros han sugerido un balance de energía mecánica, pero todas las formas son esencialmente equivalentes.

La ecuación general de energía expresa un balance entre dos puntos del sistema de flujo y es finalmente una forma de representar la ley de conservación de la energía de forma matemática. La ecuación general de energía es usada para resolver muchos problemas relacionados con flujo multifásico.

Ecuaciones de gradiente de presión, tales como la Ec. 2.11, constituyen un primer intento lógico por describir el flujo multifásico (Brill, 1987). Algunas

ecuaciones para flujo monofásico en estado estacionario, fueron modificadas mediante el reemplazo de variables de flujo y de propiedades físicas con variables de la mezcla.

$$\frac{dp}{dL} = \frac{\rho_M g \text{sen}\theta}{g_c} + \frac{f_M \rho_M v_M^2}{2 D g_c} + \frac{\rho_M v_M D v_M}{g_c D L}, \quad (2.11)$$

Cualquier error en la ecuación era automáticamente incorporado dentro de un único factor de fricción de la mezcla (f_M), obtenido de forma empírica, el cual se correlacionaba para su ajuste con datos de campo.

2.2.1.3 Diferentes Tipos de Correlaciones para Flujo Estacionario

La mayor parte de las correlaciones para flujo multifásico fueron desarrolladas considerando flujo en tuberías verticales o flujo en tuberías horizontales; sin embargo también se encuentran algunos métodos que toman en cuenta el ángulo de inclinación y otros que fueron desarrollados para tuberías inclinadas.

En la Tabla 2.1 se presentan aquellas correlaciones que han contribuido a la comprensión del problema del flujo multifásico vertical.

Las correlaciones más importantes y de mayor uso para flujo multifásico vertical son aquellas desarrolladas por Duns y Ros, Orkiszewski, Hagedorn y Brown (1965), Beggs y Brill y Govier y Aziz. Otras correlaciones están limitadas a un tamaño de tubería y algunas otras ofrecen mejores resultados para propiedades particulares del fluido usado, tal como la viscosidad del líquido.

De forma similar a como se hizo para citar las correlaciones que han sido desarrolladas para analizar el flujo multifásico vertical, también se describen, en la Tabla 2.2, a aquellos autores que más han contribuido al entendimiento del flujo multifásico horizontal.

TABLA 2.1
CORRELACIONES PARA FLUJO MULTIFÁSICO VERTICAL (Actualizada de Brown, 1977)

Año	Autor (es)	Tipo de Trabajo	Tamaño de tuberías (pulgadas)	Fluidos	Comentarios
1952	Poettmann y Carpenter	Método semi-empírico usando datos de campo	2, 2.5, 3	Aceite, agua y gas	Desarrollo de una solución práctica para estos diámetros de tuberías. Para relaciones gas-líquido menores a 1500 pies ³ /bl y gastos menores a 420 bpd.
1954	Gilbert	Datos de campo	2, 2.5, 3	Aceite, agua y gas	Se presentó una serie gráficas para flujo multifásico vertical.
1961	Duns y Ros	Laboratorio experimental y datos de campo	Todos	Todos	Buenas correlaciones para amplios rangos de gasto. Método fácil de entender.
1963	Fancher y Brown	Experimentación en campo	2	Gas, agua	Se recolectó información para ampliar la correlación de Poettmann y Carpenter para predecir adecuadamente las caídas de presión, a bajos gastos y relaciones gas-líquido altas.
1963	Hagedorn y Brown	Experimentación en campo (tubería de 1500 pies)	1.25	Aire, crudo	Desarrollo de correlaciones con el objetivo de establecer los efectos de la viscosidad en una tubería de 1.25 pulgadas.
1965	Hagedorn y Brown	Experimentación en campo	1 - 4	Aceite, agua y gas	Desarrollo de una correlación generalizada para manejar amplios rangos de gasto.
1967	Orkiszewski	Revisión de todos los métodos y desarrollo de una correlación propia	Todos	Aceite, agua y gas	Utilizaron los trabajos de Ros y de Griffith y Wallis para preparar su propia correlación general para predecir caídas de presión, para amplios rangos de gasto.
1972	Govier y Aziz	Datos de laboratorio y de campo	Todos	Todos	Se presentaron correlaciones desarrolladas de forma mecanística, probadas contra datos de campo.
1972	Beggs y Brill	Laboratorio	1, 1.5	Aire y agua	Desarrollo de correlaciones generalizadas para manejar amplios rangos de gasto y para cualquier ángulo de inclinación de tuberías.

TABLA 2.2
CORRELACIONES PARA FLUJO MULTIFÁSICO HORIZONTAL (Actualizada de Brown, 1977)

Año	Autor (es)	Tipo de Trabajo	Comentarios
1949	Lockhart y Martinelli	Laboratorio y experimental	Es considerado como uno de los primeros intentos por estudiar el flujo horizontal. Presentaron cuatro regímenes de flujo.
1954	Baker	Práctico, a partir de datos de campo	Describió siete patrones de flujo. Presentó ecuaciones para el cálculo de las caídas de presión. Bueno para flujo bache.
1964	Dukler	Recolectó datos para análisis de similitud	Desarrolló una buena correlación para amplios rangos de gasto y diversos tamaños de tubería.
1966	Eaton	Campo y experimental	Desarrolló soluciones al problema con correlaciones para colgamiento y factor de fricción. Es una de las mejores correlaciones.
1967	Andrews	Campo y experimental	Desarrolló una buena correlación; aplicable a tuberías de 2 pulgadas.
1973	Beggs y Brill	Laboratorio	Presentaron correlaciones que toman en consideración el ángulo de inclinación de la tubería.
1973	Govier y Aziz	Todos	Presentaron un libro en el que se cubren en detalle diversos aspectos del flujo multifásico en tuberías.

Las correlaciones que brindan mejores resultados para flujo multifásico horizontal, cuando son utilizadas empleando rangos de gasto amplios y diversos tamaños de tuberías, son aquellas de Dukler, Eaton y Beggs y Brill. Algunas otras, como son las de Lockhart y Martinelli, Baker y Andrews, aunque limitadas, ofrecen muy buenos resultados para ciertos gastos y tamaños de tuberías.

Una explicación detallada de los fundamentos, consideraciones, metodologías y procedimientos utilizados en el desarrollo de las correlaciones antes citadas (por haber sido consideradas de las más importantes), y de otras que no fueron citadas, para el flujo multifásico a través de tuberías verticales, horizontales e inclinadas, es presentada por Brown (1977).

2.2.2 Modelos Mecanísticos

2.2.2.1 Introducción

Se ha observado que los modelos empíricos son inadecuados dado que están limitados en cuanto al rango de los datos y equipo en el que fueron desarrollados, además de que no pueden ser usados con confianza para los diferentes tipos de fluidos y condiciones que se presentan en el campo (Ouyang, 1995). Tales modelos presentan considerables discontinuidades al darse la transición entre diferentes patrones de flujo.

Los modelos mecanísticos, por otro lado, se basan en leyes fundamentales de flujo multifásico y dinámica de fluidos, lo cual permite un modelado y una representación más exactos de las variaciones geométricas y de las propiedades de los fluidos.

El desarrollo de estos modelos, para predecir el comportamiento de los sistemas multifásicos, comenzó con los trabajos de Taitel (1976) y Taitel et al. (1980). Aún y cuando en ellos sólo se estudió la predicción de patrones de flujo (el cálculo de las caídas de presión y de la fracción de volumen de líquido no fueron incluidos), estas ideas han sido extendidas para desarrollar técnicas de diseño más apropiadas. El desarrollo y perfeccionamiento de modelos mecanísticos, para cálculos de flujo multifásico, mejora en forma notable nuestra habilidad para predecir el patrón de flujo, las caídas de presión y la fracción de volumen de líquido en tuberías; variables que son factores relevantes en el diseño y la operación de sistemas de transporte multifásico.

Como se mencionó anteriormente, el postulado fundamental de esta clase de enfoque es la existencia de diferentes regímenes o patrones de flujo y es fuertemente dependiente del entendimiento básico de la naturaleza del flujo multifásico (Ouyang, 1995; Ouyang, 2000; Gomez et al., 2000a).

Como en todo trabajo de modelado matemático, los modelos mecanísticos aún tienen que ajustarse utilizando aproximaciones de tipo empírico. Aunque un modelo mecanístico representa las condiciones de flujo que se presentan en situaciones reales, carece aún del conocimiento exacto de las relaciones entre ciertos parámetros (tales como factores de fricción interfacial e intercambio de masa, momento y energía interfaciales), ya que algunas de ellas son obtenidas de forma empírica, lo que afecta la calidad de los resultados. Por otra parte, la predicción de las caídas de presión y de la fracción de volumen de líquido, mediante la aproximación con modelos mecanísticos, puede ser inexacta cuando se analizan fronteras o regiones de transición entre diferentes patrones de flujo, debido a problemas de convergencia.

2.2.2.2 Patrones de Flujo

Uno de los aspectos más importantes que deben ser tomados en cuenta al diseñar y operar las instalaciones de producción, es el tipo o patrón de flujo que ocurrirá o existe, según el caso, en las tuberías de transporte.

Cuando se tiene flujo simultáneo de gas y líquido dentro de una tubería, las dos fases se pueden distribuir en diversas configuraciones de flujo o patrones de flujo, dependiendo de las condiciones de operación (velocidades, temperatura y presión), de las variables geométricas de la tubería (diámetro, inclinación y rugosidad), así como de las propiedades físicas de cada una de las fases (densidad, viscosidad, compresibilidad y tensión superficial).

Se ha observado y determinado que se pueden producir diferentes transiciones entre los patrones de flujo principales, además de que existen transiciones entre sus subregímenes. En muchos casos, mecanismos físicos específicos pueden ser asociados con estas transiciones. Así, diferentes mecanismos de transición y sus subsecuentes modelos han sido propuestos por diversos autores; entre ellos Taitel (1976), Barnea (1987) y Joseph et al. (1996).

En el flujo gas-líquido, la interfase puede existir en una amplia variedad de formas. Hubbard y Dukler (1966) sugirieron tres patrones de flujo básicos: flujo segregado, intermitente y distribuido.

- a) Patrón de flujo segregado: Ambas fases son continuas. Pueden o no existir algunas gotas o burbujas de una fase en la otra. El patrón de flujo segregado incluye:
 - a.1) Flujos estratificados: Flujo laminar y flujo ondulado.
 - a.2) Flujos anulares: Anular y anular-niebla (en el que gotas de líquido entran al núcleo de gas).

- b) Patrón de flujo intermitente: Al menos una de las fases es discontinua. Dentro de este se incluyen:
 - b.1) Flujo bache.
 - b.2) Flujo anular-bache (una zona de transición entre flujo bache y flujo niebla).

- c) Patrones de flujo distribuido: En estos regímenes de flujo la fase líquida es continua, mientras la fase gaseosa es discontinua. Incluye los patrones:
 - c.1) Flujo burbuja.
 - c.2) Flujo niebla (en el que existen finas burbujas distribuidas dentro de una fase líquida continua).

Patrones de Flujo en Tuberías Horizontales (Chen, 2001)

En la Fig. 2.1 se muestran, de forma esquemática, los patrones de flujo observados en tuberías horizontales:

- En el flujo estratificado, el líquido y el gas fluyen de forma separada, con la fase líquida en la porción inferior de la tubería. Este régimen de flujo se

subdivide en estratificado laminar, en el que la superficie del líquido es laminar y estratificado ondulado donde la interfase presenta ondulaciones. El primero de ellos se presenta en gastos bajos de líquido y gas. Cuando se incrementa el gasto se presenta inestabilidad en la superficie del líquido, resultando la aparición del régimen estratificado ondulado.

- Los patrones de flujo intermitentes son caracterizados por la aparición alternada de baches de líquido y burbujas de gas en las tuberías. El flujo bache, que es un patrón de flujo intermitente, será estudiado con mayor detalle en la Sección 2.4. y al analizar el caso de estudio definido en el Capítulo 3.
- Cuando se incrementa el gasto de gas se presenta el flujo anular. El líquido fluye formando una película alrededor de la pared de la tubería, dando lugar a la formación de un núcleo de gas, que fluye a través de la parte central de la misma. Dentro de la masa central de gas en la tubería pueden existir pequeñas gotas de líquido. En este régimen de flujo el gasto de gas debe ser lo suficientemente grande para garantizar la existencia del núcleo de gas en el centro de la tubería y evitar que la película de líquido resbale por las paredes.

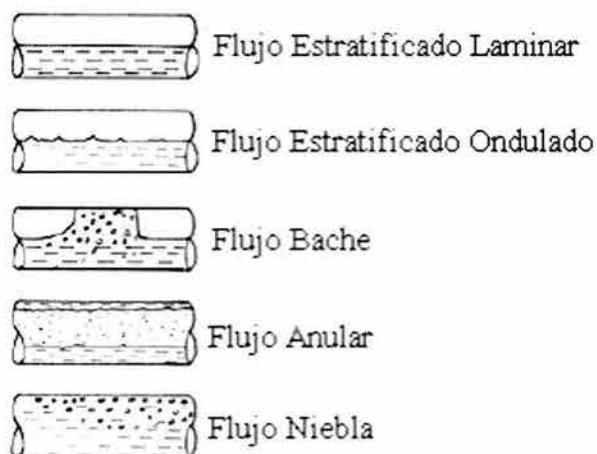


Fig. 2.1. Representación esquemática de los patrones de flujo en tuberías horizontales (Shoham, 1982; Chen, 2001).

Patrones de Flujo en Tuberías Verticales (Chen, 2001)

En la Fig. 2.2 se ilustran de forma esquemática los patrones de flujo observados en tuberías verticales:

- a) Para bajas velocidades de líquido, el gas se encuentra disperso en forma de pequeñas burbujas. El régimen de flujo que se presenta es llamado de tipo burbuja. Cuando se incrementa el gasto de líquido, el tamaño de las burbujas se incrementa por el proceso de *coalescencia*. Generalmente, la fase de gas es discreta en forma de burbujas y la fase líquida es continua.
- b) Partiendo del flujo burbuja, con un incremento mayor en el gasto de gas, se presentará coalescencia entre las burbujas de gas, las cuales aumentarán cada vez más su tamaño, hasta constituir grandes burbujas con la cara al frente del flujo de forma redondeada. Estas grandes burbujas son llamadas *burbujas de Taylor*. El flujo bache consiste de burbujas de Taylor, separadas por tapones de líquido. Una película delgada de líquido fluye alrededor de las burbujas de Taylor.
- c) En el flujo agitado, las burbujas y los baches de líquido se presentan en formas altamente distorsionadas; esto ocurre para altos gastos de gas. Otra diferencia entre los flujos bache y agitado es que la película de líquido que rodea a las grandes burbujas de gas y que resbala por las paredes de la tubería, no puede ser observada en el régimen tipo agitado.
- d) De forma similar a como ocurre para el caso de flujo anular-niebla en tuberías horizontales, aquí el flujo anular se caracteriza por la presencia de una película de líquido fluyendo, en las paredes de la tubería, la cual rodea a un núcleo de gas que viaja a gran velocidad por el centro de la tubería, y que puede contener pequeñas gotas de líquido. El movimiento de la película de líquido en contra de las fuerzas gravitatorias debe a las fuerzas ejercidas por el rápido movimiento del núcleo de gas.

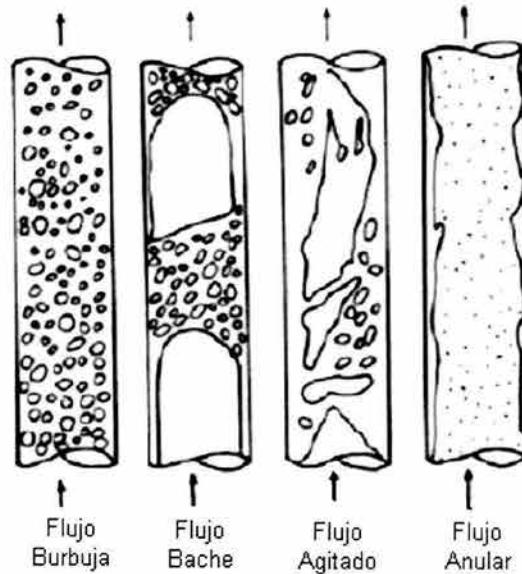


Fig. 2.2. Representación esquemática de los patrones de flujo en tuberías verticales (Shoham, 1982; Chen, 2001).

Es muy importante mencionar que los ángulos de inclinación de las tuberías tienen una gran influencia en las transiciones entre patrones de flujo. Shoham (1982) mostró de forma experimental, que en la transición de flujo estratificado a flujo no estratificado, un cambio pequeño en el ángulo de la tubería tiene un efecto significativo. Otros aspectos importantes en la determinación y transición de regímenes de flujo, aunque han recibido mucho menor atención si se comparan con las investigaciones sobre los ángulos de inclinación, son las propiedades de los fluidos (densidad, viscosidad y tensión interfacial) (Chen, 2001).

Procedimiento General para su Evaluación

Mediante la solución de las ecuaciones de balance de momento se examina la estabilidad del patrón de flujo (Petalas, 1996; Xiao et al., 1990). Si el patrón de flujo elegido se muestra estable y consistente para las condiciones operacionales existentes, el procedimiento ha finalizado; la caída de presión y las fracciones de volumen para cada fase son obtenidas directamente de las ecuaciones de balance de momento. Si el patrón de flujo no existe bajo las condiciones definidas, se asume un nuevo régimen de flujo y el procedimiento se repite hasta que se logre determinar un patrón de flujo estable.

Mapas de Patrones de Flujo

La identificación y clasificación del flujo en regímenes de flujo, aunque subjetivo, ha presentado un enfoque útil para el modelado de dichos patrones (Pickering et al., 2001). La caída de presión y la fracción de volumen de líquido difieren significativamente de un patrón a otro y por ello, el estudio del flujo multifásico se beneficia del conocimiento de los patrones de flujo y de la subsecuente aplicación de relaciones específicas apropiadas al patrón de flujo en cuestión, para el cálculo de los parámetros antes mencionados.

Para la predicción de los patrones de flujo, diversos investigadores han buscado definir mapas bidimensionales de patrones de flujo. Para un sistema determinado, dados un gasto de líquido y uno de gas, resultará un patrón de flujo en particular (Chen, 2001). Estos regímenes de flujo son generalmente mostrados utilizando un mapa de patrones de flujo, el cual es un arreglo bidimensional que describe las fronteras o transiciones entre patrones de flujo. La selección de las variables apropiadas para presentar de forma clara y efectiva los diferentes regímenes de flujo ha sido un tema de investigación por muchos años.

Aunque las variables adimensionales son preferidas en la teoría, otras como las velocidades superficiales o la velocidad de la mezcla son mucho más utilizadas en la práctica, debido principalmente a la conveniencia de relacionar una magnitud a determinadas unidades. Los mapas de patrones de flujo son generados de forma experimental y de forma mecanística.

La generación de mapas de patrones de flujo de forma experimental se realiza a partir de una gran cantidad de datos experimentales, como el mostrado en la Fig. 2.3. Estos son completamente empíricos y limitados a los datos en los cuales se basan. Para tomar en cuenta los efectos de las propiedades de los fluidos y de la inclinación de la tubería deben considerarse correlaciones adicionales.

Esta aproximación, aunque útil en su tiempo, es de aplicación limitada (Pickering et al., 2001). El problema esencial es que la transición de un régimen de flujo a otro no puede ser definida con el solo uso de dos parámetros.

En años recientes, motivados por esta limitación, los investigadores han tratado de predecir de manera más adecuada la transición de un patrón de flujo a otro, por medios mecánicos.

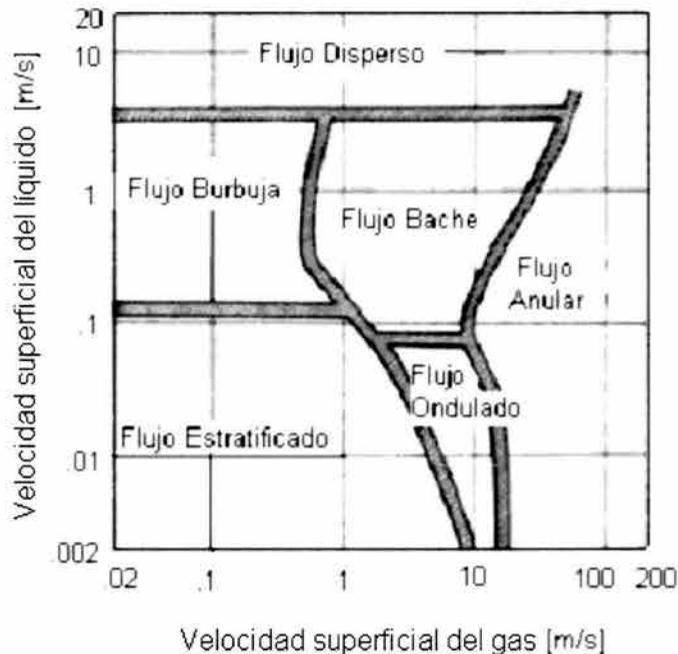


Fig. 2.3. Mapa de patrones de flujo experimental (Mandhane et al., 1974), sistema aire-agua en tubería horizontal.

Por otro lado, se tienen los mapas de regímenes de flujo mecánicos. Estos son desarrollados a partir del análisis de mecanismos físicos de transición, los cuales son modelados con el uso de ecuaciones fundamentales. Un ejemplo de ellos se muestra en la Fig. 2.4. Ciertas correlaciones empíricas son aún requeridas, para ajustar los modelos mecánicos.

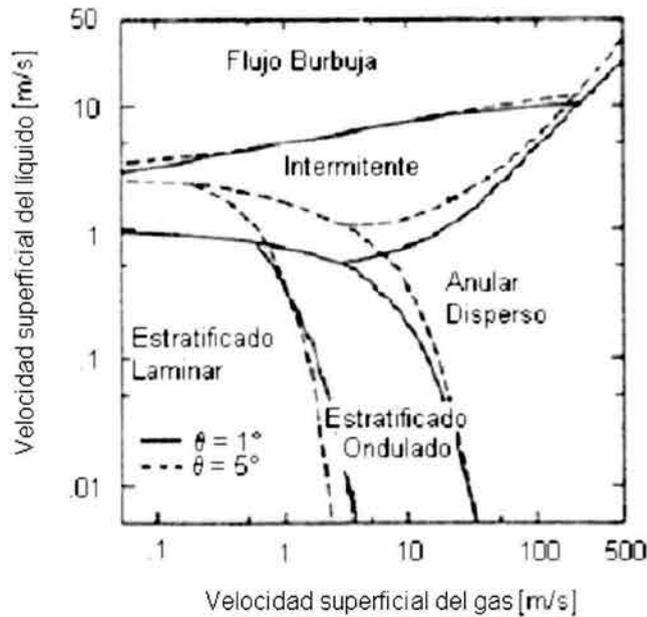


Fig. 2.4. Mapa de patrones de flujo mecánico (Taitel et al., 1976), sistema aire-agua en tubería ligeramente inclinada.

A través del estudio y de la experimentación con modelos mecánicos de las zonas de transición entre regímenes de flujo, se espera que finalmente sea posible predecir de forma confiable las fronteras entre patrones de flujo en un espacio de parámetros multidimensional, y de esta forma predecir, de una manera más exacta, las características del flujo multifásico.

Se necesita realizar un mayor esfuerzo antes de que una “gran teoría unificadora” sea desarrollada para la determinación correcta de patrones de flujo y sus transiciones, bajo diversas condiciones operativas (Pickering et al., 2001).

2.2.2.3 Diferentes Arreglos Mecánicos

Los modelos mecánicos desarrollados a lo largo de los años 80's y 90's han sido formulados de manera separada para pozos y para líneas superficiales (Gomez et al., 1999; Gomez et al., 2000a). A continuación se realizará una breve revisión bibliográfica de los principales modelos e investigadores en esta área.

Modelos para Líneas Superficiales (Horizontales)

Estos modelos se aplican para condiciones de flujo en tuberías horizontales o casi horizontales (con un máximo de desviación con respecto a la horizontal de $\pm 10^\circ$). El modelo para predicción de patrones de flujo pionero y de mayor uso en su tiempo fue el desarrollado por Taitel (1976). Otros estudios han sido elaborados para la predicción de transiciones específicas entre regímenes de flujo, o para diferentes condiciones operativas, tales como flujo a altas presiones. Se han desarrollado modelos separados para flujo estratificado (Taitel, 1976; Shoham, 1984), flujo bache (Dukler, 1975), flujo anular (James, 1987) y flujo burbuja (Wallis, 1969). Un modelo mecanístico más completo, que incorpora la predicción de patrones de flujo y modelos separados para cada uno de los diferentes regímenes de flujo, fue presentado por Xiao et al. (1990) para el diseño de líneas superficiales.

Modelos para Pozos (Verticales o Desviados)

Estos modelos se aplican principalmente para el flujo de fluidos en tuberías verticales; sin embargo, son válidos aún cuando la tubería presenta ángulos de inclinación de $60^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ (Gomez et al., 2000a). Un modelo para la predicción de patrones de flujo fue propuesto por Taitel et al. (1980) para flujo vertical, posteriormente ampliado para ser usado en tuberías que presentaban cierto ángulo de desviación con respecto a la vertical por Barnea (1985). Por otra parte, se han desarrollado modelos específicos para la predicción del comportamiento del flujo, para flujo burbuja (Caetano et al., 1992), flujo bache (Fernández et al., 1983) y flujo anular (Oliemans et al., 1986).

Modelos Unificados

En años recientes se han realizado numerosos intentos para desarrollar modelos unificados que puedan ser aplicados para un rango de inclinaciones entre el flujo horizontal (0°) y el flujo ascendente vertical (90°). Estos modelos son bastante prácticos, dado que incorporan, dentro de sus consideraciones, el ángulo de inclinación. Por ende, no existe la necesidad de aplicar diferentes modelos para

diferentes ángulos de inclinación encontrados en tuberías horizontales, inclinadas y verticales. Un modelo unificado para la predicción de patrones de flujo fue presentado por Barnea (1987), el cual es válido para el rango entero de inclinaciones ($-90^{\circ} \leq \theta \leq 90^{\circ}$). Algunos otros modelos de este tipo, que han sido desarrollados, son los de Petalas (1996), el cual fue probado usando una gran cantidad de datos de campo y de laboratorio, y el de Gomez et al. (2000b), quienes presentaron una correlación unificada para la predicción de la fracción de volumen de líquido.

2.3 Flujo Multifásico Transitorio

2.3.1 Generalidades

El flujo multifásico transitorio (también conocido como régimen variable o dinámico) en tuberías se caracteriza por la dependencia de: la presión, la fracción de volumen de líquido, las velocidades del gas y del líquido y otros parámetros de flujo con respecto al tiempo y al espacio.

El flujo bache presenta estas características. Éste régimen de flujo intermitente se presenta muy frecuentemente en instalaciones de transporte de hidrocarburos y en un gran rango de valores de parámetros de flujo y de condiciones operativas; a ello se debe la importancia de su estudio y entendimiento.

“El flujo transitorio representa una clase especial de problema, en el que la producción puede llegar a ser inestable, con flujo intermitente de gas y líquido. Este tipo de flujo transitorio es llamado flujo bache. Los baches de líquido pueden, dependiendo de la geometría de la tubería y de las condiciones operativas, llegar a ser muy grandes y amenazar la seguridad y la confianza del sistema de producción” (Klebert, 1997).

2.3.2 Diferentes Modelos

Existen dos descripciones matemáticas comunes para analizar el flujo multifásico transitorio: el modelo de flujo de deriva (Drift-Flux Model) y el modelo de dos fluidos (Two-Fluid Model) (Lezeau, 1997; Pickering, 2001). La formulación del modelo de flujo de deriva es muy parecida a aquella que se hace en el modelo homogéneo (el cual asume que las fases están mezcladas uniformemente y viajan a la misma velocidad); sin embargo, en el primero, la restricción de que las fases viajen a la misma velocidad es eliminada, requiriendo relaciones empíricas adicionales para ajustar las fracciones de volumen de líquido y de gas, para los flujos de las fases separadas.

Este tipo de modelo se caracteriza por hacer una combinación de las ecuaciones de momento para cada fase, formando una ecuación total de momento. Para lograr ajustar el modelo, la ecuación de momento de la mezcla debe complementarse con correlaciones de parámetros, que describen la interacción entre las fases presentes.

Por otra parte, en el modelo de dos fluidos, se establecen ecuaciones de conservación de masa, momento y energía para cada una de las fases (líquido y gas), dando como resultado una serie de ecuaciones que describen el flujo de forma bastante completa. En estos modelos también es necesario incluir correlaciones de parámetros relacionados a la interacción entre las fases. Este es un aspecto crucial y difícil en el modelado multifásico, ya que el número de estas correlaciones es grande y su complejidad se incrementa con respecto al flujo monofásico.

Aún cuando el modelo de dos fluidos es derivado en forma rigurosa, su exactitud no se ha establecido de modo preciso debido principalmente a las aproximaciones y simplificaciones realizadas para obtener grupos de ecuaciones de fácil manejo. En el modelo básico se asume que cada fase puede ser descrita como continua y así, gobernada por ecuaciones diferenciales parciales (por ejemplo las ecuaciones de Navier-Stokes) que expresan conservaciones de masa, momento y energía, para el flujo de cada una de las fases.

Cuando los códigos y modelos de flujo transitorio se utilizan para el desarrollo de simuladores de flujo, llegan a constituir importantes herramientas computacionales, dado que la ocurrencia de procesos de flujo multifásico, tales como la presencia de baches de líquido en tuberías, generalmente representa un factor limitante de los sistemas de manejo y proceso de la producción. En realidad, el bacheo en tuberías que transportan mezclas multifásicas generalmente causa problemas operacionales serios al sistema de producción y manejo de hidrocarburos.

El impacto que los simuladores multifásicos transitorios han tenido en el desarrollo de yacimientos petroleros ha sido muy importante (Klebert, 1997). Estos simuladores han servido como instrumentos valiosos para los ingenieros del área petrolera y han sido elementos esenciales para el diseño y la operación de sistemas de transporte basados en la tecnología de flujo multifásico.

Dado que estos simuladores han tenido como uno de sus principales propósitos el modelar y representar un amplio rango de condiciones de flujo, se han vuelto bastante complejos, requiriendo gran capacidad de cómputo y la introducción de una mayor cantidad de información detallada (condiciones iniciales y de frontera, propiedades de los fluidos y parámetros para el control de la simulación).

Lopez et al. (1997), analizaron el contenido físico (modelos hidrodinámico y termodinámico) y las formulaciones numéricas, de dos de los simuladores más conocidos para estudiar el flujo multifásico en tuberías: el simulador TACITE™, que se basa en el modelo de flujo de deriva y el simulador OLGA™, fundamentado en el modelo de dos fluidos. A continuación se realiza una breve descripción de sus principales características.

2.3.3 Simulador TACITE

El simulador TACITE fue desarrollado por el Instituto Francés del Petróleo (IFP) con el apoyo del consorcio de las empresas petroleras Total y Elf Exploración y Producción. Como se mencionó anteriormente, está basado en el modelo de flujo de deriva.

2.3.3.1 Modelo Físico

Modelo Hidrodinámico

TACITE es un modelo de flujo de deriva; esto significa que resuelve sólo una ecuación de momento (para la mezcla de líquido y gas) al contrario de OLGA, que resuelve dos (o tres, al considerar el agua como una fase separada). En TACITE

la información que se desconoce acerca del resbalamiento entre las fases es incorporada por medio del uso de correlaciones empíricas, dependiendo del patrón de flujo que se tenga.

Para ilustrar la complejidad del problema, a continuación se escribirá la ecuación de conservación de masa para la fase líquida, en la pared de la tubería.

$$\frac{\partial}{\partial t}(R_L \rho_L) = -\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z}(AR_L \rho_L v_L) - \psi_g \frac{R_L}{R_L + R_D} - \psi_e + \psi_d + G_L. \quad (2.12)$$

En la ecuación anterior R_L y R_D son las fracciones de volumen de la película de líquido y de las gotas de líquido, respectivamente, ψ_g es el ritmo de transferencia de masa entre las fases, ψ_e y ψ_d son, respectivamente, las velocidades de entrada y depósito de masa y G_L es una posible fuente de masa de líquido.

En primera instancia, los creadores de TACITE trataron de resolver este tipo de ecuación incluyendo un coeficiente de ritmo de transferencia de masa, pero los especialistas no encontraron una manera de modelar este término, el cual parece ser dependiente del régimen de flujo. Además, dependiendo del gasto y del perfil de la tubería, el líquido puede acumularse en las partes bajas de la misma (en las que se tendrían fracciones de volumen de líquido cercanas a uno) y el gas se mantendría preferentemente en los puntos altos (en los que las fracciones de volumen de líquido serían casi cero).

Es claro que se tienen componentes mucho más pesados en las partes bajas de las tuberías que en los puntos altos y, por lo tanto, es erróneo considerar una composición molar constante a lo largo de toda la tubería. Este hecho origina mayores errores cuando se tienen gastos bajos y presencia de baches.

Tomando en cuenta todo lo mencionado anteriormente se decidió, en la versión más reciente de TACITE, no continuar resolviendo sólo dos ecuaciones de conservación de masa (una para cada fase, como en su primera versión), sino N ecuaciones de conservación de masa. En este caso, N es un número de componentes no mayor al número real de componentes fluyendo a través de la tubería, pero suficientemente grande como para ser representativo de las condiciones reales dentro de la tubería.

Como resultado, TACITE resuelve N ecuaciones de conservación de masa (una para cada *pseudocomponente*), una ecuación de momento y una ecuación de energía (para la mezcla de gas y líquido). Dependiendo de la composición real del fluido, N puede ser igual a 6 ó 7. Lo anterior implica que es posible reproducir adecuadamente las propiedades termodinámicas del fluido real considerando, dado que se consideran N pseudocomponentes.

La selección del régimen de flujo es basada en la consideración de que cada patrón de flujo es una combinación espacial-temporal de dos patrones de flujo básicos: el flujo separado, que incluye el flujo estratificado y el flujo anular y el flujo disperso, que incluye los flujos burbuja y bache. El flujo intermitente es considerado como una combinación de los flujos separado y disperso.

La transición entre todos estos regímenes de flujo se basa en el concepto de mínimo resbalamiento; esto es, se elige el régimen de flujo que presenta el mínimo valor en la velocidad del gas.

Modelo Termodinámico

Como fue mencionado anteriormente, TACITE resuelve N ecuaciones de conservación de masa, correspondientes a los diferentes pseudocomponentes, lo cual hace posible considerar la variación de la composición del fluido a lo largo de la tubería. Esto es realizado mediante el empleo de un modelado termodinámico que permite calcular las propiedades originales de la mezcla como sigue:

- Primero, la composición total de los fluidos en la entrada del sistema es dividida en N pseudocomponentes.
- Los propiedades de los N pseudocomponentes son estimadas.
- Finalmente, las propiedades de los N pseudocomponentes son optimadas sucesivamente para recobrar las diversas propiedades originales de la mezcla a ciertos valores de presión y temperatura.

Entonces, los valores de las propiedades del fluido original son calculados por un módulo específico dentro de TACITE, el cual calcula las propiedades de los N pseudocomponentes.

2.3.3.2 Formulaciones Numéricas

Las ecuaciones de conservación pueden ser escritas como sigue:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial X} = S, \quad (2.13)$$

donde W representa a las variables que se conservan, F representa el flujo y S los términos fuente. Esta serie de ecuaciones constituye un sistema no lineal hiperbólico.

2.3.4 Simulador OLGA

El simulador OLGA fue desarrollado por los Institutos Noruegos SINTEF (Consortio de Institutos de Investigación) e IFE (Instituto para la Tecnología de la Energía). Desde el inicio del proyecto, el código OLGA ha sido continuamente mejorado gracias al incremento de la base de datos experimental del laboratorio de SINTEF y al uso extensivo de pruebas numéricas del IFE y las compañías petroleras involucradas en el proyecto. Para mayores referencias consultar el trabajo de Bendiksen (1991).

2.3.4.1 Modelo Físico

Modelo Hidrodinámico

El simulador OLGA está basado en los conceptos del modelo de dos fluidos. Éste resuelve tres ecuaciones separadas de continuidad: para las fases gaseosa, líquida, y gotas de líquido; dos ecuaciones de momento: una para la película de líquido en las paredes de la tubería y otra para la posible combinación de gas y gotas de líquido y una ecuación de energía para la mezcla.

Cuando estas seis ecuaciones son definidas se tiene que el número de incógnitas es mayor a seis; por lo tanto, deben incorporarse ecuaciones o correlaciones para completar el modelo y resolver las ecuaciones de conservación. La forma general en que suele escribirse la ecuación de conservación de masa, que ya ha sido citada para el modelo TACITE es:

$$\frac{\partial}{\partial t}(R_L \rho_L) = -\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial z}(A R_L \rho_L v_L) - \psi_g \frac{R_L}{R_L + R_D} - \psi_e + \psi_d + G_L. \quad (2.12)$$

Algunas de las correlaciones de ajuste son dependientes del régimen de flujo. Por lo tanto es necesario seleccionar el patrón de flujo antes de resolver las ecuaciones. OLGA puede seleccionar un patrón de flujo entre dos tipos básicos: el flujo separado, que incluye el flujo estratificado y el flujo anular-niebla y el flujo distribuido, que incluye el flujo burbuja y el flujo bache. La transición entre todos estos regímenes de flujo está basada en el concepto de mínimo resbalamiento; esto es, se elige el régimen de flujo que presenta el mínimo valor en la velocidad del gas.

El simulador OLGA cuenta con un módulo llamado “slugtracking”, el cual puede ser utilizado cuando el proceso de bacheo es detectado en cualquier punto de la tubería. En el caso de tuberías sinuosas, el líquido se acumula en las partes bajas de la misma provocando la generación y el crecimiento de baches. Este proceso es llamado bacheo por conformación del terreno (que será visto con más detalle

en la Sección 2.4). El módulo *slugtracking* es capaz de detectar y dar seguimiento en forma individual a estos baches.

Modelo Termodinámico

Los valores de las propiedades termodinámicas tales como las densidades y las viscosidades del gas y del líquido, la tensión interfacial y el coeficiente de transferencia de calor, son calculados a partir de tablas proporcionadas en los datos de entrada. Estas tablas contienen una descripción de las propiedades de los fluidos en función de la presión y de la temperatura.

2.3.4.2 Formulaciones Numéricas

Las ecuaciones de conservación mencionadas anteriormente son una serie de ecuaciones diferenciales parciales de primer orden, no lineales y unidimensionales, con coeficientes complejos. Su no linealidad implica que ningún método de solución es óptimo desde todos los puntos de vista. Dado que la industria petrolera está mayormente interesada en transitorios relativamente lentos, los métodos semi-implícitos han sido seleccionados para resolver esta serie de ecuaciones dentro de OLGA.

2.4 Flujo Bache

2.4.1 Definición

Por mucho, el patrón de flujo que más y mayores retos presenta (por las variaciones que presenta en su producción y por los problemas operativos que causa) y el más común en el flujo multifásico en tuberías, es el flujo bache. Éste régimen de flujo intermitente se presenta muy frecuentemente en instalaciones de transporte de hidrocarburos y en un gran rango de valores de parámetros de flujo y de condiciones operativas.

El patrón de flujo tipo bache es además uno de los más complejos debido a la naturaleza irregular de su distribución de fases (Marcano et al., 1988). El flujo bache puede causar variaciones significativas en los gastos de aceite y de gas que entran a las instalaciones de proceso y causar daño mecánico a las tuberías y demás elementos debido a la presencia de baches de líquido grandes y pesados que se mueven a gran velocidad.

Brown (1977) define bacheo como el “régimen de flujo caracterizado por cambios cíclicos regulares o irregulares de la presión, en cualquier punto dentro de la tubería. Este flujo además carece de homogeneidad de la mezcla de fluidos”.

Como ya se mencionó en la Sección 2.2, al hablar de los diferentes patrones de flujo, el régimen de flujo bache se caracteriza por la presencia de una serie de tapones (baches) de líquido, separados por “paquetes” de gas (burbujas de Taylor) relativamente grandes. Las características físicas del flujo resultante son variables, alternando entre altos porcentajes de líquido y de gas (Fig. 2.5).

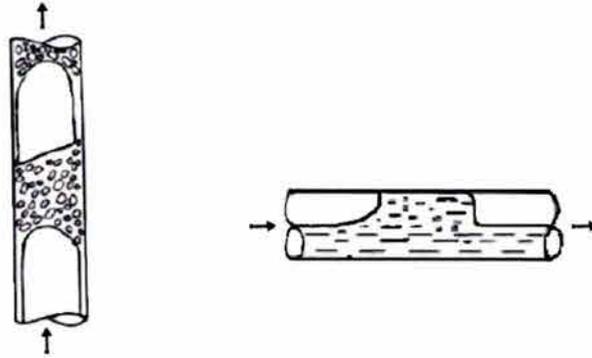


Fig. 2.5. Patrón de flujo bache en tuberías verticales y horizontales (Shoham, 1982).

Un bache “normal” consiste de un frente y una cola de bache, los cuales son mostrados en la Fig. 2.6, a continuación:

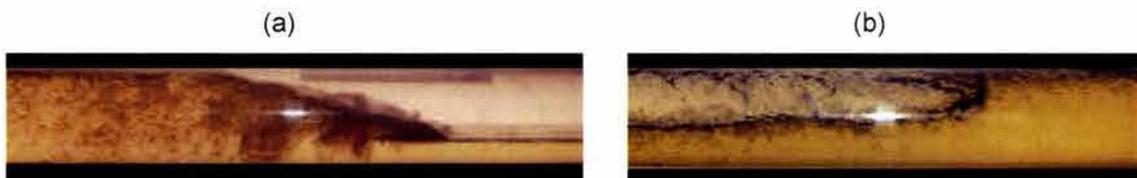


Fig. 2.6. Frente (a) y cola (b) de un bache normal.

El proceso llamado bacheo normalmente ocurre durante las etapas finales de la vida fluyente de un pozo petrolero, pero su ocurrencia se ha identificado en diferentes etapas, a diferentes gastos de aceite y gas.

Los aspectos transitorios del flujo bache permanecen relativamente desconocidos, principalmente debido a las dificultades que se presentan en el desarrollo de experimentos confiables, que buscan definir su naturaleza (Hout, 2000). La gran cantidad de información experimental que se tiene sobre las formas de las interfases gas-líquido, distribución espacial de los baches de líquido, etc., son aparentemente insuficientes para modelar de forma adecuada, el flujo transitorio tipo bache. La complejidad que presenta este régimen de flujo se debe a su estructura dinámica y comportamiento hidrodinámico inestable.

Durante la última década, el interés por cuantificar, discretizar, dar seguimiento y controlar los baches en la industria petrolera ha aumentado. La principal razón es que un gran número de campos petroleros se encuentra en las etapas finales de producción y que los gastos de aceite, gas y agua cambian constantemente. Por lo anterior, las tuberías de producción existentes no operan de manera óptima bajo las nuevas condiciones, presentándose así, en la mayoría de los casos, formación y producción de baches que ocasionan diversos problemas operativos.

Es importante lograr un adecuado conocimiento de las características del flujo bache; Sharma (2002) cita las siguientes aplicaciones:

- (i) Diseñar las instalaciones y equipo de proceso tales como separadores y trampas de baches,
- (ii) Analizar el impacto de la presión, creado por este flujo complejo, en el yacimiento y
- (iii) Conocer los efectos sobre la rapidez de la corrosión ocasionada por el bacheo.

2.4.2 Formación de Baches

Govier (1972) estableció que la ocurrencia del flujo bache se inicia cuando se forman burbujas en forma de bala y con longitud igual al diámetro de la tubería. Los baches pueden ser clasificados de acuerdo al modo en que se forman. La estructura del flujo tipo bache puede ser iniciada por inestabilidades en el seno del flujo; en otros casos la geometría de la tubería juega un papel muy importante y, finalmente, la formación de los baches puede ser ocasionada por condiciones transitorias en el flujo.

De esta manera, el flujo bache puede ser resultado de las condiciones hidrodinámicas existentes en el flujo, inducido por las características del terreno o consecuencia de procesos transitorios (Taitel, 1999; Taitel, 2000):

- Bacheo hidrodinámico: Los baches de tipo hidrodinámico también son llamados baches de ocurrencia normal. Estos baches son generados en algún punto del sistema de flujo, resultado de inestabilidades que no permiten al líquido colocarse y fluir en el fondo de la tubería y al gas en la parte superior de la misma o a ambos como una mezcla uniforme. Estos baches son relativamente cortos (del orden de 20 a 40 veces el valor del diámetro de la tubería a la entrada). Posteriormente, en su flujo hacia las instalaciones de proceso, estos baches pueden aumentar o disminuir de tamaño, cuando cambia el ángulo de inclinación de la tubería o debido a efectos de compresibilidad.
- Bacheo por conformación del terreno: En este caso el líquido tiende a acumularse en las partes bajas de las tuberías, dando lugar a la formación de grandes baches que se moverán a través del sistema. El gas "atrapado" antes de cada bache de líquido es comprimido y, una vez que su presión alcanza un valor que supera al de la presión hidrostática de la columna de líquido, ocurre una expansión y expulsión violenta de los fluidos (Fig. 2.7). Este proceso es muy complejo y no es fácil de analizar.

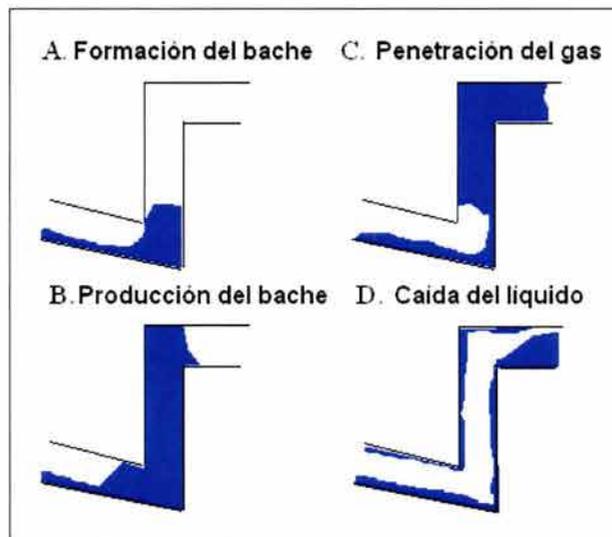


Fig. 2.7. Formación de baches por conformación del terreno.

- Bacheo transitorio: Este tipo de bacheo puede aparecer de forma temporal cuando se presenta un cambio en las condiciones operativas (una variación en el gasto o en la producción) o debido a cualquier otro proceso transitorio:

corrida de diablos, ruptura de tuberías, inicio de operaciones (arranque de pozo), etc.

2.4.2.1 Bacheo Severo

El bacheo originado por las características del terreno es más dinámico y más difícil de estudiar que el bacheo hidrodinámico (Havre, 2002). Cada tubería tiene su propio perfil de elevación y por ende sus propias características de bacheo. La peor clase de bacheo por conformación del terreno es llamado “bacheo severo”, el cual se origina por un cambio abrupto en la dirección del flujo, pasando de una tubería horizontal o casi horizontal a una vertical, en donde el líquido se acumula en las partes bajas y bloquea la línea.

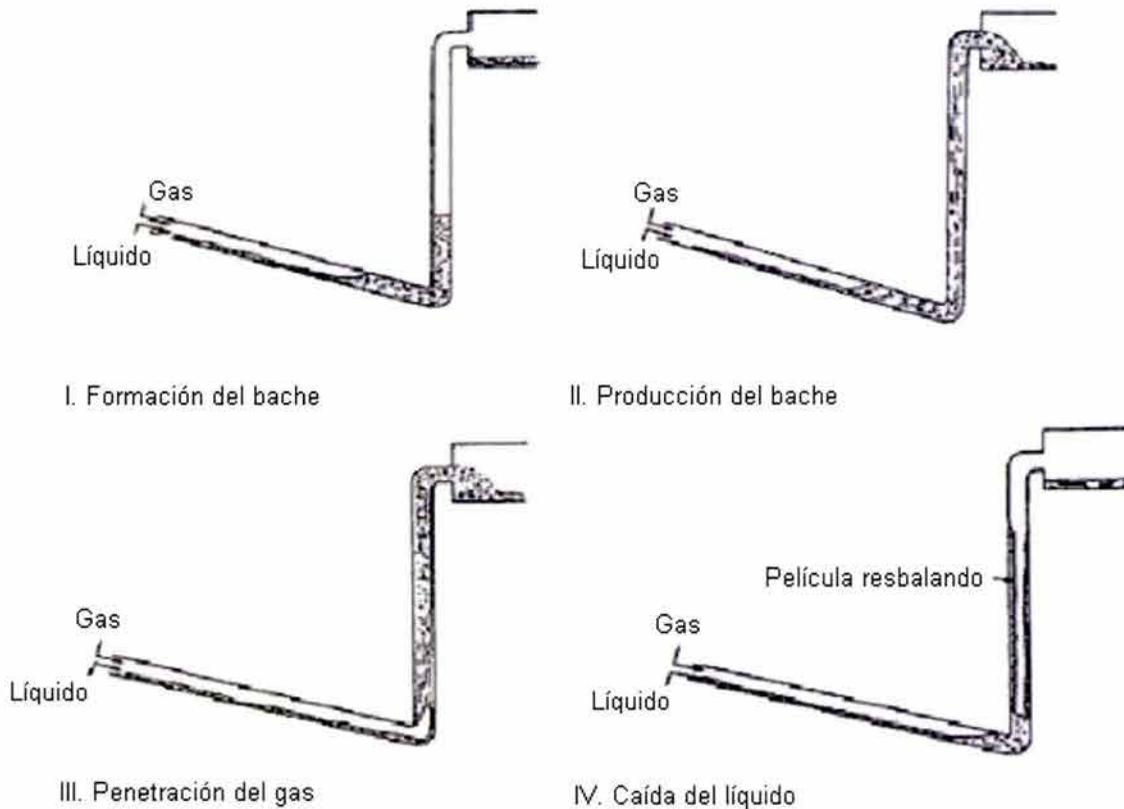


Fig. 2.8. Formación de baches en un riser (Drengstig, 2001).

El proceso denominado bacheo severo es ilustrado en la Fig. 2.8 (arriba). Éste ocurre frecuentemente en risers; se presenta cuando se tienen gastos relativamente bajos de aceite y de gas y depende de la relación gas-aceite.

Este fenómeno se manifiesta, principalmente, por la producción variable de líquido y gas, fluctuaciones cíclicas de la presión y un contenido variable de fluidos en el sistema.

La primera fase del ciclo de bacheo en un riser (Fig. 2.7) se da con la acumulación de líquido en el fondo del mismo (I. Formación del bache). Después de algún tiempo, el líquido bloquea el paso del gas. Pequeñas burbujas de gas pueden fluir mezcladas en el bache de líquido, pero la mayor cantidad de éste se acumulará corriente arriba del bache, causando un incremento en la presión. El bache continúa creciendo hasta que las fuerzas actuando sobre éste son suficientemente grandes como para acelerarlo y desplazarlo.

A cierta presión, el bache de líquido comienza su movimiento debido a las fuerzas que actúan sobre él. Esto puede ser identificado como un decremento de la presión corriente arriba del bache de líquido y un incremento de la presión corriente abajo del mismo, seguido por un gasto constante en la producción de líquido. Dependiendo de las características geométricas de la tubería corriente abajo del bache de líquido y de las condiciones operativas, el bache puede descomponerse o ser transportado hasta la tubería de descarga (II. Producción del bache). En el periodo de movimiento del bache la presión es casi constante.

Cuando la cola del bache alcanza la base del riser, el gas comienza a penetrar hacia las partes altas del riser (III. Penetración del gas). Esto provoca que la presión en la base del riser disminuya como resultado de una caída en la presión hidrostática de la columna de fluidos. Lo anterior favorece la entrada de más gas dentro del riser y un incremento rápido en el gasto. Conforme el líquido y el gas son transportados hacia la tubería de descarga, la presión corriente arriba del bache continúa disminuyendo.

Cierto tiempo después, la fase gaseosa penetra completamente en el bache de líquido y alcanza la parte más alta del riser. El flujo de líquido termina y el remanente del mismo cae de regreso al fondo del riser (IV. Caída del líquido).

Al incrementar el tamaño del riser se aumenta también la severidad del bacheo, la cual es medida en términos de magnitud de las fluctuaciones de presión y del tamaño de los baches. Lo anterior causa problemas en diversas instalaciones tales como separadores, plantas de proceso, unidades de compresión, etc.

2.4.3 Identificación y Seguimiento

La detección del flujo bache debe efectuarse no sólo al diseñar las instalaciones de producción para evitar su ocurrencia, sino también periódicamente a lo largo de la vida productiva de los pozos.

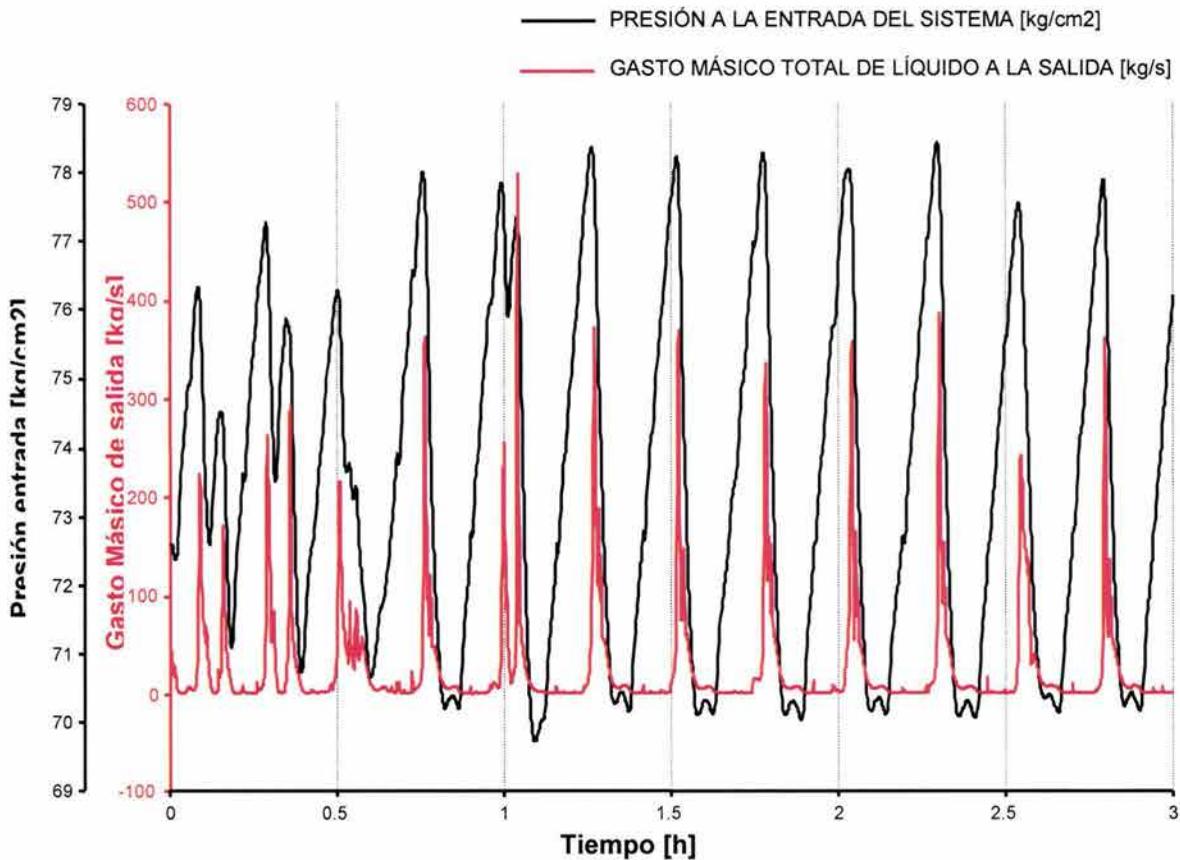


Fig. 2.9. Mediciones que indican un problema de bacheo.

El bacheo puede ser identificado mediante mediciones y registros de presión, flujo y composición, tal y como se muestra en la Fig. 2.9. En general, el gasto y la presión cambian de forma considerable con una determinada frecuencia,

dependiendo del tipo de bacheo presente (hidrodinámico, por conformación del terreno o transitorio).

Generalmente, las instalaciones tienen que diseñarse y construirse para ser capaces de manejar los picos de máxima producción, originados por la llegada de grandes baches de líquido. Por ello es importante que dichas instalaciones sean dimensionadas correctamente.

2.4.4 Consecuencias y Problemática

Las dos áreas principales en las que la presencia de flujo bache puede causar problemas son la operabilidad de las instalaciones de proceso de aceite y gas y la integridad mecánica de todas estas instalaciones, lo que se traduce en bajas eficiencias, daño mecánico y desgaste en los equipos de proceso.

2.4.4.1 Desempeño del Proceso

El primer efecto del flujo bache se observa en el nivel de líquido en las trampas de baches y en los separadores. El gasto de líquido debido a la llegada de un bache es muchas veces mayor que el gasto promedio; así, cuando se tienen baches de dimensiones significativas, habrá un aumento apreciable en el nivel de líquido a menos que los gastos de salida sean controlados adecuadamente.

2.4.4.2 Integridad Mecánica del Sistema

Los baches pueden viajar a velocidades relativamente altas; valores mayores a 16 m/s han sido detectados. Baches grandes, con fracciones de volumen de líquido considerables, viajando a velocidades altas pueden tener un momento bastante grande. Para ilustrar lo anterior, un bache de 150 metros de longitud, con una fracción de volumen de líquido de 0.8, viajando en una tubería de 24 pulgadas tiene una masa de unas 30 toneladas.

Por otra parte, uno de los impactos más importantes del flujo bache es el aplazamiento y reducción de la producción causados por (Kovalev, 2003):

- Utilización ineficiente de la primera etapa de separación, dado que parte del volumen del separador es utilizado para capturar los baches.
- Inestabilidades en los procesos, las cuales reducen la eficiencia de separación y afectan la operación de otros equipos.
- Implementación de un “bombeo mecánico” lento para evitar la formación de baches grandes.
- Estrangulamiento superficial, restringiendo la producción de líquido.
- Pérdida de una cantidad considerable de condensados al ser mandados al quemador a través de la corriente de gas.

2.4.5 Soluciones para Evitar o Reducir el Bacheo

El enfoque intuitivo para solucionar el problema del bacheo ha sido detectar los baches y tratar de determinar su tamaño, para estimar su efecto sobre los separadores, compresores y demás instalaciones de producción. En general, se tienen tres áreas principales sobre las que se puede actuar para evitar o reducir los efectos negativos del bacheo (Havre, 2002):

- a) Cambios en el diseño.
- b) Cambio operacionales y de procedimientos.
- c) Métodos de control.

Dos ejemplos típicos de técnicas para el manejo de los baches, que implican cambios en el diseño, son la instalación de trampas de baches (en instalaciones terrestres) o el incremento en el tamaño del (los) separador (es) de la primera etapa, para proporcionar la capacidad de manejo requerida y la disminución de los diámetros de las tuberías por las que se transportan a los fluidos, para favorecer el mezclado y “empaquetamiento” de las fases.

Un cambio operacional puede ser incrementar la presión de las líneas de flujo para que el flujo en el pozo y en las líneas de descarga opere fuera de régimen tipo bache. Ésta no es una opción viable para pozos viejos con índices de productividad pequeños. Para pozos con bombeo neumático sería una opción el incrementar el gasto del gas de inyección. Sin embargo, mayor flujo de gas no siempre produce el efecto deseado.

Otro cambio operativo consiste en instalar válvulas y regular su apertura, efectuando un “estrangulamiento”; este procedimiento, aunque muy económico, presenta la gran desventaja de llegar a restringir la producción de hidrocarburos en forma significativa, al buscar estabilizar su flujo.

Estos cambios en el diseño y en los procedimientos, podrían ser no apropiados para instalaciones ya existentes y que presentan problemas de bacheo ni para unidades de separación pequeñas.

El enfoque y la tendencia hacia la aplicación de los métodos de control como alternativa para minimizar el flujo bache, se ha incrementado en los últimos años en la Industria Petrolera. Los métodos de control para el manejo de los baches se caracterizan por el uso de información obtenida de las tuberías por las que atraviesa el flujo proveniente de las instalaciones de proceso, para realizar ajustes dinámicos en elementos específicos del sistema.

Estas técnicas no presentan las desventajas de las soluciones “pasivas” para la minimización del bacheo como lo son el estrangulamiento superficial y los cambios en el diseño y/o configuración de las instalaciones.

3. Formulación del Problema

Los sistemas de flujo multifásico que representan los procesos estudiados en esta tesis, y de flujo multifásico en general, pueden ser esquematizados, de forma simplificada, como sigue:

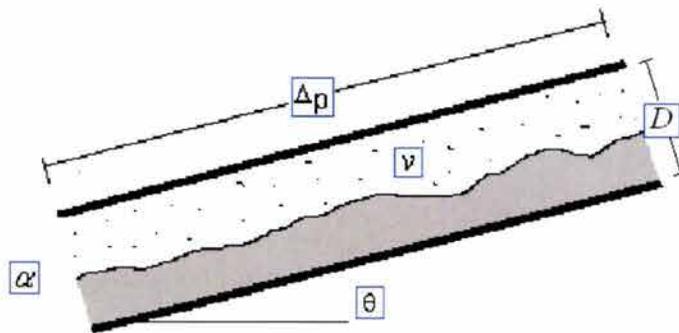


Fig. 3.1. Representación esquemática de los sistemas de flujo multifásico.

En la Fig. 3.1 se muestra una tubería de diámetro D , que tiene un cierto ángulo de inclinación θ , por la que fluye un fluido que posee ciertas propiedades (ρ , μ , v , α , etc.), el cual sufre una caída de presión Δp en su recorrido.

En el presente trabajo se estudia un sistema de flujo particular. Para definir el problema en forma integral se establecerán los siguientes aspectos: escenarios de simulación, perfil de la tubería, composición de los fluidos, transferencia de calor a través de la tubería y condiciones “estables” de operación del caso base.

3.1 Escenarios

Este es uno de los aspectos elementales al realizar cualquier estudio de simulación, independientemente de la herramienta o metodología que se esté utilizando. Al precisar los diferentes escenarios que se desean analizar se tendrán metas claras y serán mayores las posibilidades de efectuar un estudio exitoso.

Como ya se mencionó, en este trabajo será analizado un sistema de transporte de hidrocarburos que presenta flujo bache con los siguientes objetivos:

- Estudiar los efectos que, el cambio en los principales parámetros operativos (presión a la salida p_s y gasto total a la entrada del sistema q_e), de diseño (diámetro D) y del fluido (fracción de volumen de agua α_w), tienen sobre el comportamiento de los parámetros y condiciones de flujo del mismo (gasto total de líquido a la salida q_L , presión a la entrada p_e , contenido total de líquido en el sistema y tamaño y frecuencia de bacheo), mediante estudios de simulación numérica, utilizando un simulador comercial. Estos resultados serán obtenidos a partir de estudios paramétricos, involucrando las variables de interés.
- Definir cuáles son los parámetros y/o variables que tienen un mayor efecto sobre el bacheo, a partir del análisis de los resultados obtenidos de estas simulaciones numéricas.
- Analizar la información obtenida y elaborar mapas de patrones de flujo que indiquen las condiciones en que se tendría flujo bache.

En la Tabla 3.1 se muestran las variables y parámetros que serán utilizados para realizar los estudios paramétricos; es decir, que serán modificados y que llamaremos “variables”. Aunque se tomen como *independientes* presentan cierta dependencia entre sí. También aquellos que servirán para definir las condiciones operativas del sistema; es decir, los parámetros a observar y que serán llamados “parámetros de medición”.

TABLA 3.1
VARIABLES Y PARÁMETROS DE MEDICIÓN USADOS PARA EL ESTUDIO PARAMÉTRICO

Variables	Parámetros de Medición
Diámetro de la tubería, D [m]	Gasto de líquido a la salida, q_L [BPD]
Gasto másico a la entrada, q_e [kg/s]	Presión a la entrada, p_e [kg/cm ²]
Fracción de volumen de agua, α_w	Tamaño del bache, L_s [m ³]
Presión a la salida, p_s [kg/cm ²]	Contenido de líquido en el sistema [barriles]
	Frecuencia de bacheo, f [baches/h]

3.2 Perfil de la Tubería

Es muy importante definir de forma adecuada el perfil de la tubería para realizar buenas predicciones de parámetros y condiciones de flujo. Esta información consiste de: elevación de las tuberías como función de la distancia, diámetros internos, rugosidad, etc. Puede incluir, además, información de equipos accesorios y de proceso.

Los sistemas de flujo dentro del simulador numérico usado están constituidos por uno o más ramales o “branches”. Cada ramal consiste de una secuencia de tuberías o “pipes” y cada tubería está dividida en secciones. Estas secciones corresponden a las *celdas* de discretización empleadas en el modelo numérico.

En este trabajo se utiliza un modelo cuyo perfil de tuberías se muestra en la Fig. 3.2. El sistema, así constituido, representa un arreglo típico de tuberías y equipo en instalaciones marinas.

Éste consiste de un solo ramal el cual une a dos plataformas marinas y está compuesto por las siguientes tuberías: una tubería horizontal que sale de la plataforma-1, un riser-1 que desciende hasta el fondo marino, 25 tuberías (interconectadas entre sí) que viajan por el lecho marino y que se desplazan horizontalmente aproximadamente 7.5 km. a partir del riser-1, un riser-2 que asciende y una tubería horizontal que conecta el riser-2 con un separador, ubicado en la plataforma-2. Cada tubería está compuesta, a su vez, de entre 2 y 5 secciones, dependiendo del nivel de detalle que se requiera en cuanto a los diversos cálculos que se realizan y en cuanto a la información que se solicita como salida.

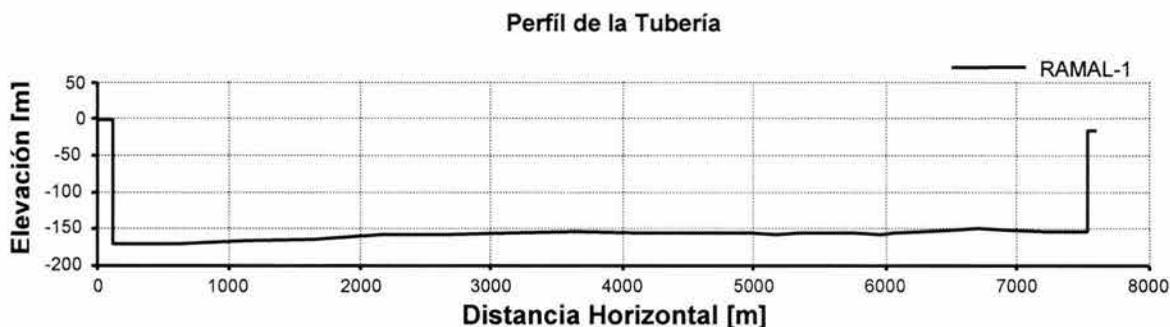


Fig. 3.2. Perfil de la tubería.

Todas las tuberías son de diámetro y rugosidad interna de 0.37 m y 0.00005 m, respectivamente. Como ya se mencionó, el perfil de la elevación con respecto a la distancia se muestra en el Fig. 3.2.

3.3 Composición de los Fluidos

Se requiere información completa de las propiedades físicas de los componentes y pseudocomponentes definidos para la mezcla; ésta consiste de composición molar, caracterización de componentes pesados y cambios en la composición con respecto al tiempo, la cual puede ser generada a partir de un análisis composicional y mediante ecuaciones de estado.

3.4 Transferencia de Calor

Los cálculos de transferencia de calor pueden ser trascendentes en algunas simulaciones y no muy significativos en otras. La información con que se disponga debe conducir al conocimiento del perfil de temperatura a lo largo de las tuberías en estudio.

Para resolver el problema, dentro del simulador comercial utilizado, se tienen diferentes niveles de rigurosidad para el cálculo de las transferencias de calor a través de las tuberías: definir de forma "manual" el perfil de temperatura en el sistema, asignar coeficientes de transferencia de calor generales para cada sección de tubería y, finalmente, elegir la opción de un cálculo riguroso del flujo de calor a través de la tubería, los materiales aislantes y el medio externo al sistema. En el presente trabajo se eligió la última de estas opciones, que incluye el modelaje de capas concéntricas, definiéndose la siguiente información:

- *Espesor de cada capa:*

La configuración de las paredes concéntricas de los diferentes materiales-capas que están recubriendo las tuberías determina la rapidez de la transferencia de calor del fluido durante su transporte. La información de esta configuración, para las diferentes secciones de tuberías del modelo, se muestra en las Figs. 3.3 y 3.4:

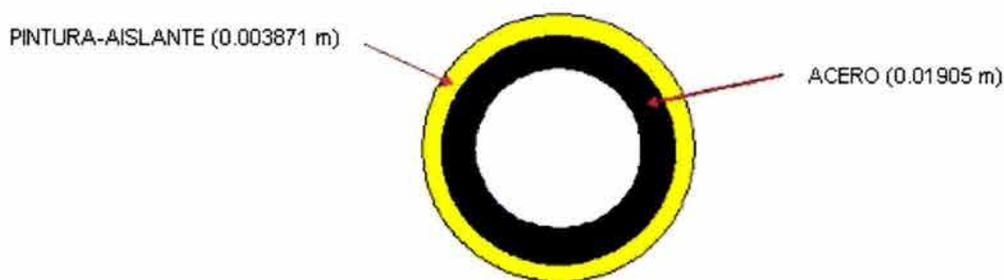


Fig. 3.3. Espesores de la tubería y material aislante en los risers y tuberías superficiales.

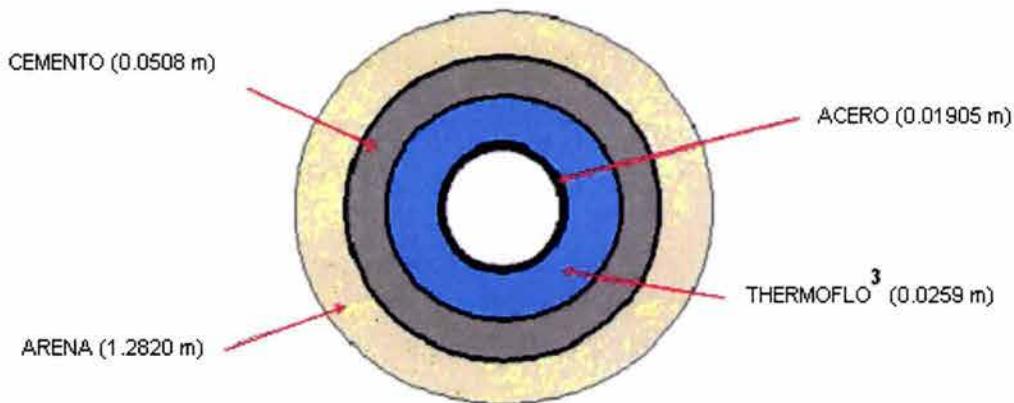


Fig. 3.4. Espesores de la tubería y material aislante en el lecho marino.

- *Propiedades térmicas de cada capa y paredes:*

En la Tabla 3.2 se presentan los tipos de pared y las propiedades de cada uno de los materiales empleados para definir y calcular la transferencia de calor.

TABLA 3.2
PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES EMPLEADOS EN EL MODELO

Material	Capacidad Calorífica (J / kg - °C)	Conductividad (W / m - K)	Densidad (Kg / m ³)
Acero	500	45.000	7850
Cemento	419	1.5000	2643
Pintura - Aislante	1900	0.3000	900
Thermoflo ³	1710	0.1695	805
Arena	1256	2.3000	1700

3. "thermoflo": Recubrimiento termo-aislante con propiedades anticorrosivas, compuesto por capas de polipropileno que son adheridas a la tubería por medio de calentamiento de la superficie a recubrir y de presionamiento con un rodillo. El proceso se repite cuantas veces sea necesario hasta alcanzar el espesor necesario de acuerdo a los requerimientos de aislamiento térmico. Estos procesos son importantes para reducir las pérdidas de calor del fluido a lo largo de la línea de transporte.

- *Condiciones ambientales del mar y del aire en el modelo:*

Se considera al agua de mar a una temperatura promedio de 16°C ; la temperatura del aire es considerada a 25°C , como se indica en la Fig. 3.5.

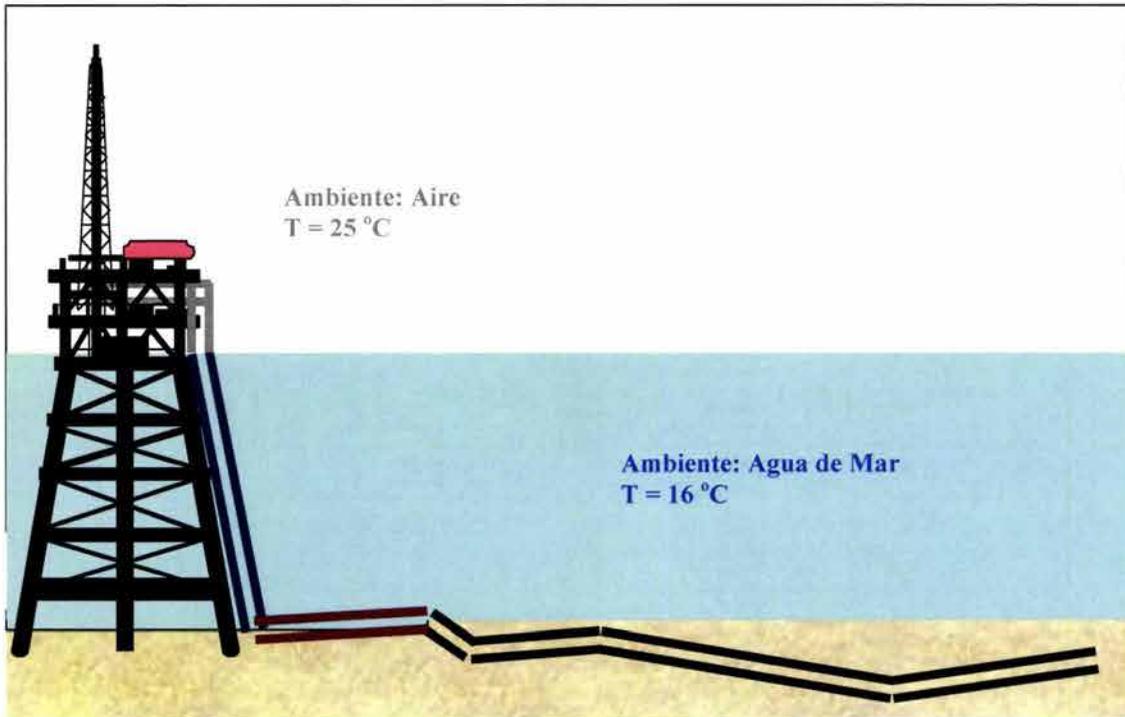


Fig. 3.5. Condiciones ambientales en el modelo.

3.5 Condiciones “Estables” de Operación - Caso Base

Las condiciones estables de operación, para el caso base, son las mostradas en la Fig. 3.6.

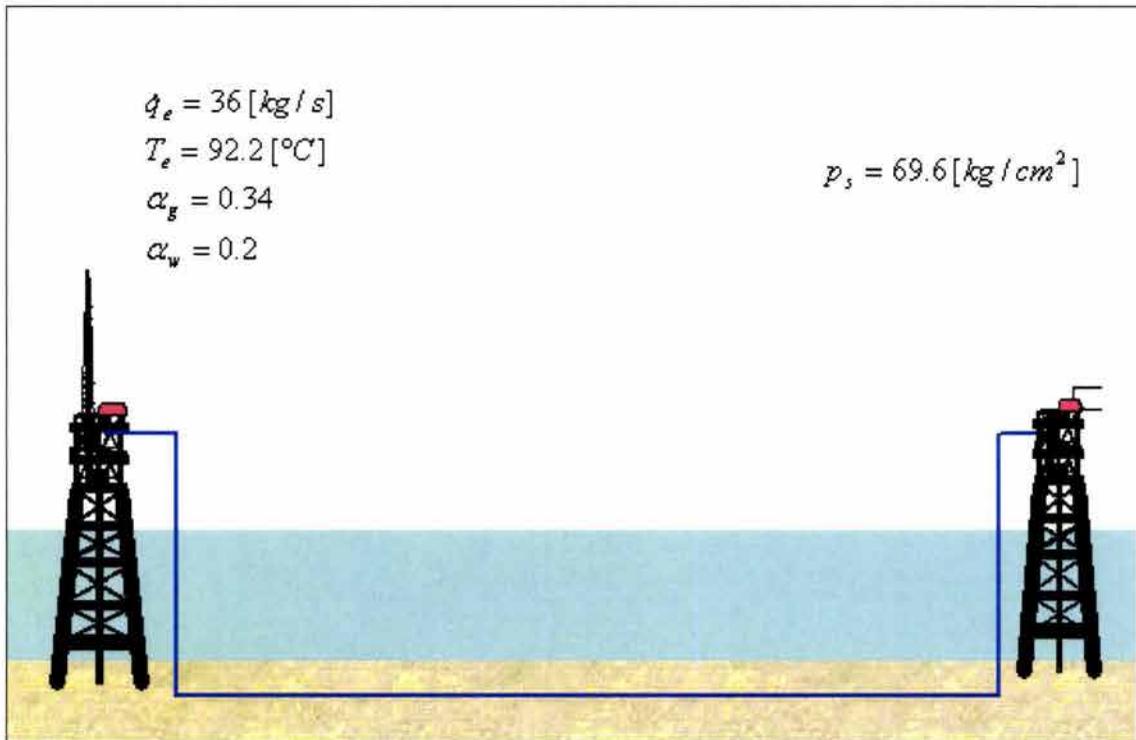


Fig. 3.6. Condiciones “estables” de operación-caso base.

4. Metodología

El simulador numérico utilizado en el presente trabajo es el simulador comercial OLGA™, de la empresa Noruega Scandpower. OLGA fue originalmente desarrollado por un programa conjunto de investigación, en el que estaban involucradas organizaciones de investigación y diversas compañías petroleras (Bendiksen et al., 1991). El objetivo era simular transitorios lentos asociados con transporte de masa, importantes en el bacheo por conformación del terreno y durante variaciones de gasto. Con OLGA se puede simular el flujo de hidrocarburos en tuberías, en redes de tuberías y en equipo de proceso que formen parte de estos sistemas.

OLGA es un modelo de dos fluidos, unidimensional y dinámico (válido para régimen transitorio o variable), en el que se especifica un sistema de ecuaciones constituido por las ecuaciones de conservación de continuidad, momento y energía y ecuaciones de ajuste, definidas mediante correlaciones de parámetros tales como la fracción de volumen de líquido y el factor de fricción interfacial, además de condiciones iniciales y de frontera. Para resolver esta serie de

ecuaciones dentro de OLGA, se seleccionaron los métodos implícitos por ser los más adecuados al tratar con transitorios lentos.

La especificación de condiciones iniciales permite que el simulador genere las condiciones de operación del sistema en estado “estable”, lo cual es esencial, para modelar y simular un evento transitorio o dinámico, al ser tomadas como punto de partida.

La información que se necesita como entrada a OLGA consiste de 7 archivos. Dos de ellos son indispensables y cinco opcionales. El primero de los archivos necesarios contiene la información particular del caso de estudio tal como la geometría, las condiciones operativas, las variables que se solicitan como salida, etc. Toda esta información está organizada en grupos de elementos físicos similares.

El segundo de estos archivos contiene las tablas de propiedades de los fluidos, el cual es una parte clave para el correcto funcionamiento de OLGA. El grupo de propiedades de transporte del fluido que requiere OLGA para resolver el sistema de ecuaciones es generado por el simulador PVTsimTM, el cual es una parte integral de OLGA. PVTsim es de índole predictivo, lo que significa que es capaz de estimar las propiedades PVT del fluido a partir de ecuaciones de estado, además de poseer una base de datos con las propiedades de los principales fluidos hidrocarburos y no hidrocarburos.

La información opcional está constituida por datos de equipo de proceso como bombas y compresores (cuando se desean incorporar al sistema de estudio), de otros datos (cuando se requieren realizar, por ejemplo, estudios de depósito de asfaltenos o de formación de hidratos) y de archivos como el de reinicio o “restart” (cuando se desea que el sistema realice determinados cálculos, tomando como punto de partida la información referente a un cierto tiempo, resultado de cálculos anteriormente realizados).

Los sistemas de flujo dentro de OLGA están constituidos por uno o más ramales o “branches”. Cada ramal consiste de una secuencia de tuberías o “pipes” y cada tubería está dividida en secciones. Estas secciones corresponden a las *celdas* de discretización empleadas en el modelo numérico.

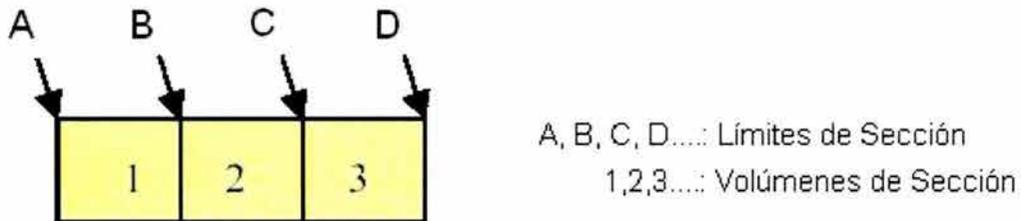


Fig. 4.1. Representación de la discretización de las tuberías.

Las variables de flujo (velocidades, gastos, etc.) son definidas en los límites de sección (A, B, C y D en la Fig. 4.1), mientras que otras variables como son presión, temperatura, etc. Son reportados como valores promedio dentro de los volúmenes de sección (1, 2 y 3 en la Fig. 4.1).

5. Aplicaciones y Discusión

En este Capítulo se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas realizadas para diferentes casos y estudios paramétricos considerados. Esta información es mostrada en forma de gráficas, mapas y tablas. Asimismo, se realiza una discusión de éstos, la cual gira en torno al estudio, problemática y minimización del flujo bache.

La información obtenida de estas simulaciones numéricas será dividida, para su análisis, en cuatro grandes apartados: análisis del caso base, estudios paramétricos, mapas de patrones de flujo y soluciones para minimizar el flujo bache, además de incluir una discusión de la misma.

5.1 Análisis del Caso Base

En las siguientes figuras (Figs. 5.1 a 5.4) se presentan los resultados de la simulación del caso base, el cual fue definido de forma holista en el Capítulo 3. En la Tabla 5.1 se muestra un resumen de los principales parámetros y características para este caso.

TABLA 5.1
PRINCIPALES PARÁMETROS Y CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA PARA EL CASO BASE
DE SIMULACIÓN

Geométricas	Operativas	De los Fluidos	Accesorios	De Simulación
$L_{TOTAL} = 7800 [m]$	$T_{amb} = 25 [^{\circ}C]$	$\alpha_g = 0.34$	Apertura de la Válvula: 100 %	$t_{simulación} = 8 [h]$
$D = 0.37 [m]$	$q_e = 36 [\frac{kg}{s}]$	$\alpha_w = 0.20$	Con Inyección de Gas: NO	$\Delta t_{start} = 0.01 [s]$
$\varepsilon = 0.00005 [m]$	$T_e = 92.9 [^{\circ}C]$			$Min\Delta t = 0.01 [s]$
	$p_s = 69.6 [\frac{kg}{cm^2}]$			$Max\Delta t = 10 [s]$

Como ya se mencionó en la Sección 2.4, al estudiar el flujo bache, uno de los procedimientos empleados para definir si un sistema de transporte presenta algún tipo de bacheo es mediante el análisis de registros de presión y flujo con respecto al tiempo, en algún punto del mismo. Se observa que, si se tiene flujo bache, estos parámetros presentarán variaciones con el tiempo, las cuales serán mayores en la medida en que el bacheo presente sea más significativo.

La primera de las figuras presentadas para el análisis del caso base de simulación, es la que muestra el comportamiento de la presión en la entrada del sistema con respecto al tiempo (Fig. 5.1).

En ésta se observa que bajo las condiciones definidas para el caso base (constituida por aspectos geométricos, condiciones operativas y características de los fluidos), el sistema presenta una gran variación en el valor de la presión en la entrada del sistema (el valor medio $\pm 4 [kg/cm^2]$).

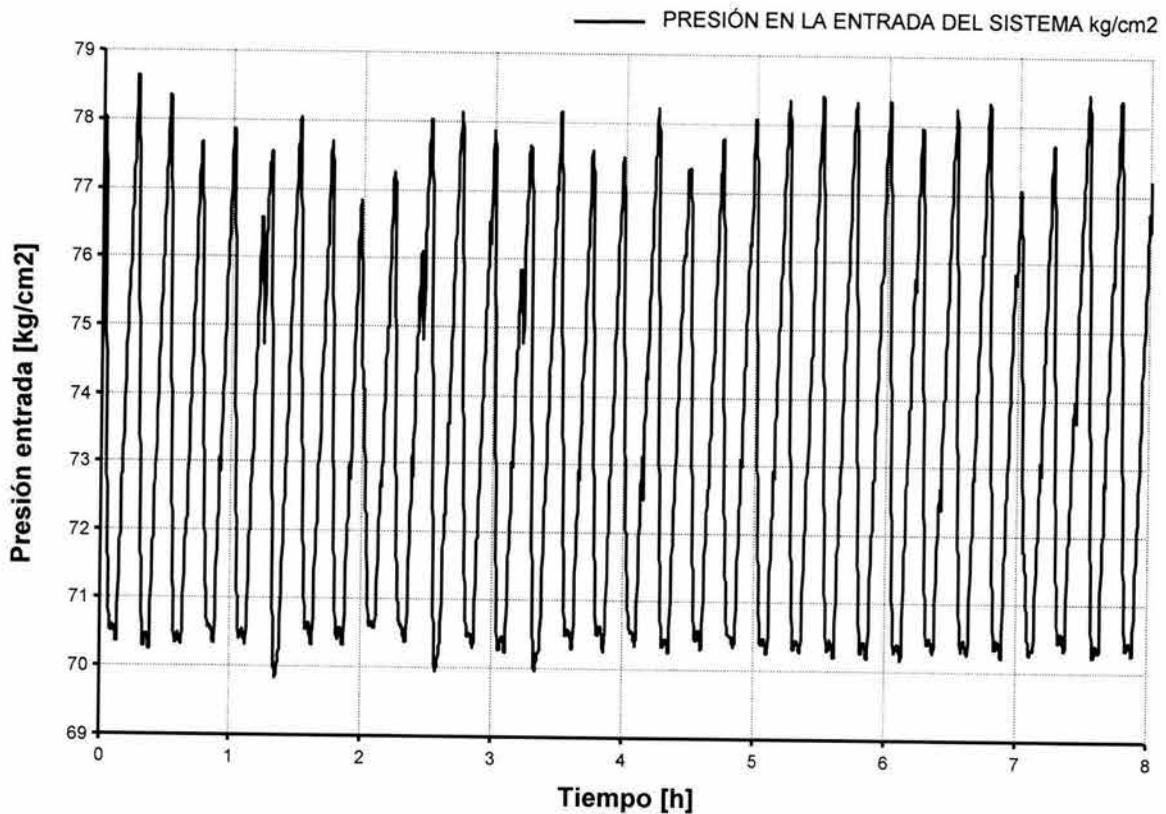


Fig. 5.1. Variación de la presión a la entrada del sistema con el tiempo.

Por otra parte, en la Fig. 5.2 se muestra como se comporta el gasto (producción) en la salida del sistema. Como se observa, existe una variación considerable en la producción que reciben las instalaciones de proceso ubicados en la salida, lo cual, como ya fue ampliamente discutido, ocasiona muchos problemas operacionales a dichas instalaciones (inestabilidad del flujo, dificultad en el manejo de los procesos, baja eficiencia de los equipos, etc.). En este caso, los flujos instantáneos pueden llegar a ser hasta de 250,000 BPD.

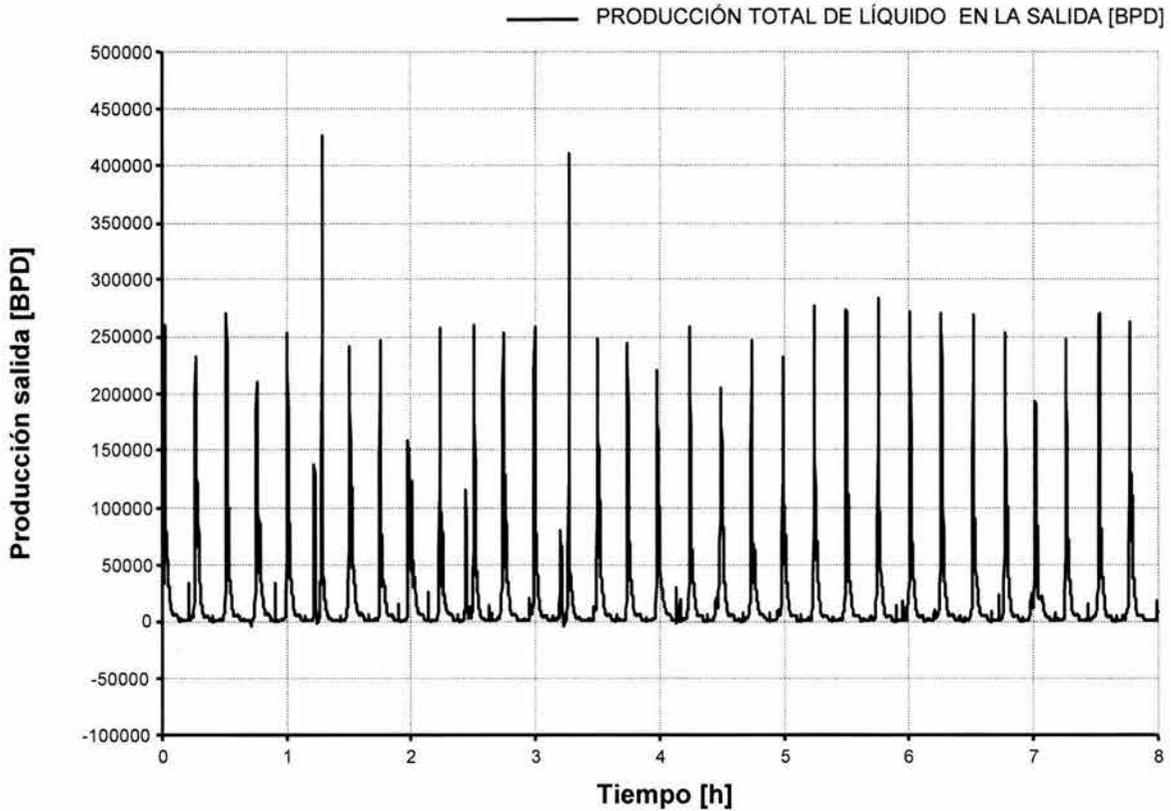


Fig. 5.2. Variación de la producción de líquido a la salida del sistema con el tiempo.

En la Fig. 5.3 se tiene que el contenido total de líquido en el sistema también exhibe variaciones con respecto al tiempo, el cual fluctúa entre 2,100 y 2,275 barriles. El análisis de estos parámetros nos indica que el sistema presenta bacheo y que éste es considerable.

Adicionalmente, una gráfica que presenta el número de baches presentes en el sistema con respecto al tiempo, confirman las predicciones realizadas del análisis de las figuras anteriores. En este caso, el número de baches varía entre 1 y 50, siendo en promedio de 17 (Fig. 5.4).

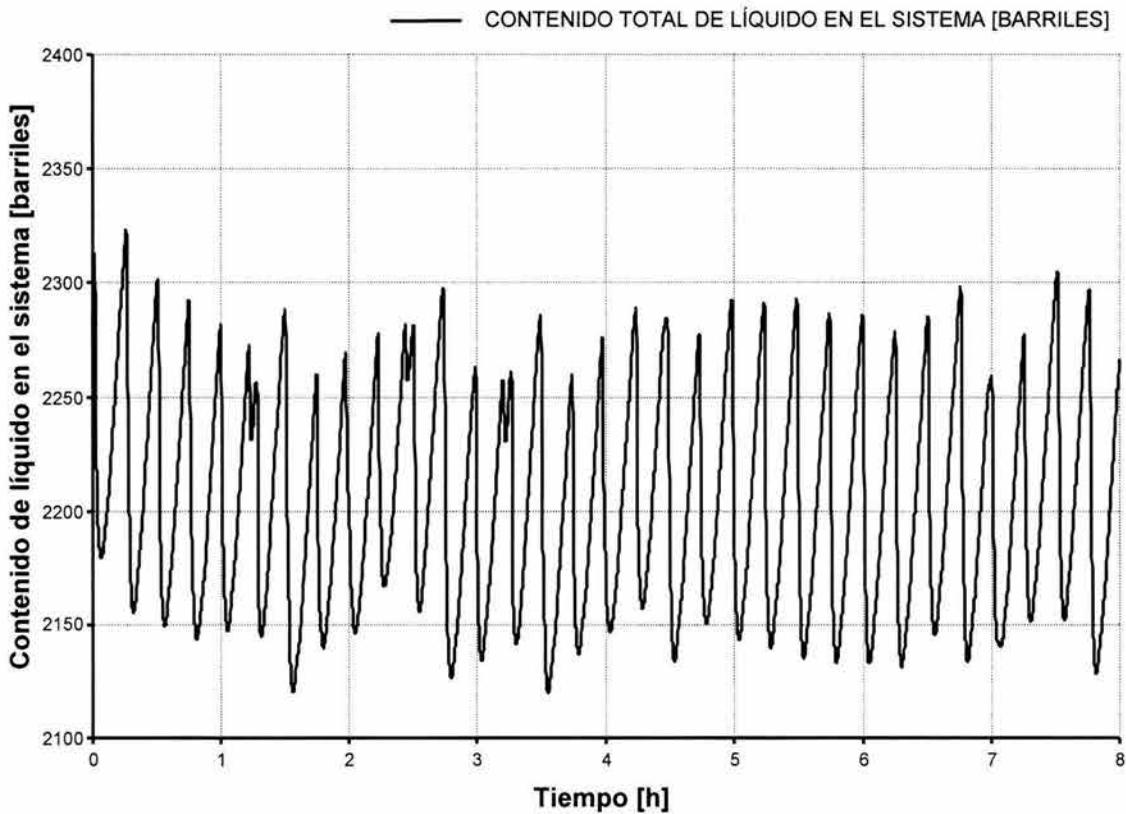


Fig. 5.3. Contenido de líquido en el sistema en el tiempo.

De esta manera, el análisis de los resultados obtenidos de la simulación para el caso base, nos indican que se tiene presencia de flujo bache en el sistema. Por ende, los estudios posteriores estarán enfocados, como ya se ha mencionado, a la determinación de cuáles son los parámetros que más influyen en este bacheo, mediante la realización de estudios paramétricos, el análisis de sus resultados y la propuesta de diferentes acciones para minimizarlo.

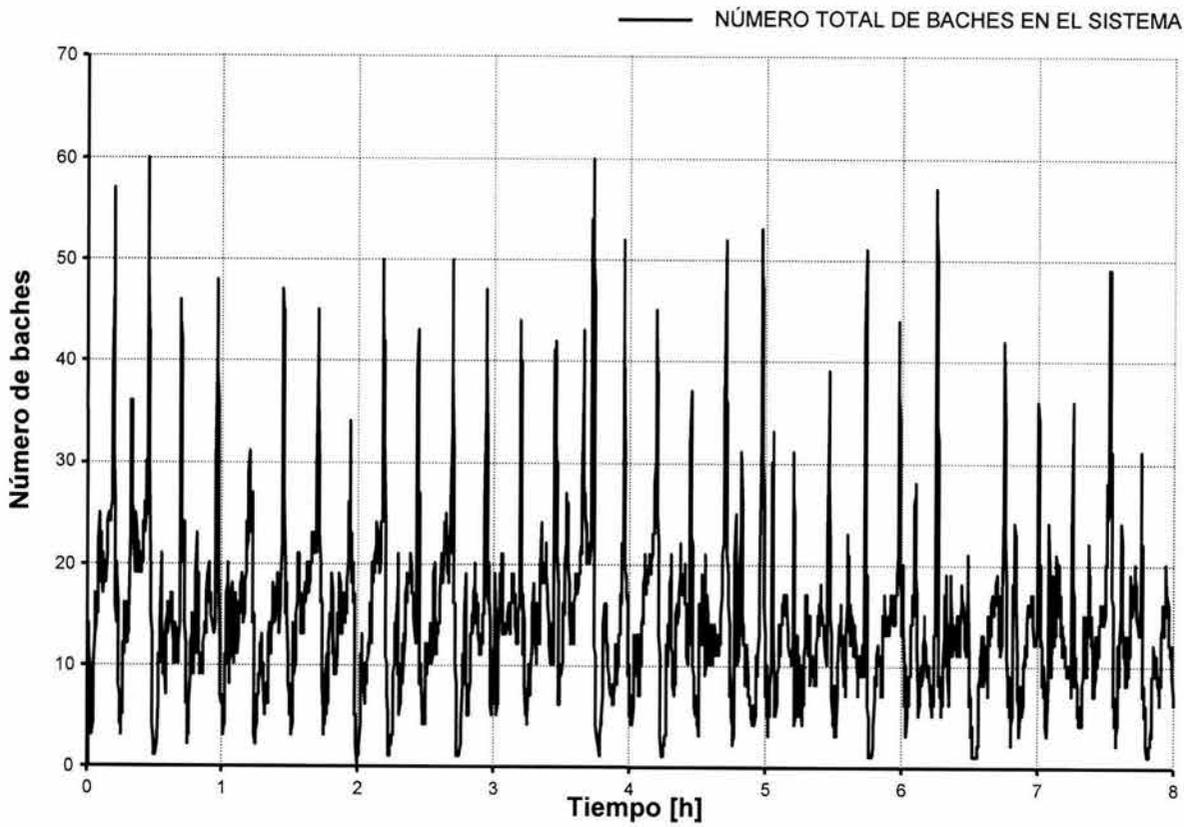


Fig. 5.4. Número total de baches en el sistema en el tiempo.

5.2 Estudios Paramétricos

Es importante escribir nuevamente la Tabla 3.1, definida en el Capítulo 3, con el propósito de recordar las variables y/o parámetros elegidos para realizar los estudios paramétricos y, de igual manera, aquellos que serán analizados para especificar el comportamiento del sistema, puntualizando que el objetivo principal es estudiar el efecto de la variación de los primeros sobre el bacheo en el sistema.

TABLA 3.1
VARIABLES Y PARÁMETROS DE MEDICIÓN USADOS PARA EL ESTUDIO PARAMÉTRICO

Variables	Parámetros de Medición
Diámetro de la tubería, D [m]	Gasto de líquido a la salida, q_L [BPD]
Gasto másico a la entrada, q_e [kg/s]	Presión a la entrada, p_e [kg/cm ²]
Fracción de volumen de agua, α_w	Tamaño del bache, L_s [m ³]
Presión a la salida, p_s [kg/cm ²]	Contenido de líquido en el sistema [barriles]
	Frecuencia de bacheo, f [baches/h]

5.2.1 Diámetro de las Tuberías del Sistema

De esta manera, el primer parámetro estudiado es el diámetro de las tuberías del sistema. Los tres gráficos que se mostrarán, al igual que al analizar las otras variables (gasto total a la entrada, fracción de volumen de agua y presión a la salida) indican el comportamiento de la presión a la entrada, la producción de líquido a la salida y el contenido de líquido en el sistema, además de que se discutirá sobre la frecuencia de bacheo y el tamaño de los baches.

La Fig. 5.5 muestra el efecto tan importante que tiene el diámetro de las tuberías sobre el valor de la presión a la entrada del sistema p_e . Como es de esperarse, a medida que este diámetro es menor se logra estabilizar el sistema como resultado de una mayor contrapresión y un mejor mezclado y *empaquetamiento* de las fases presentes. Así, si conservamos constantes todas las otras condiciones en el sistema, se observa que para un diámetro de 0.3 [m] ya no se tienen variaciones considerables en el valor de p_e .

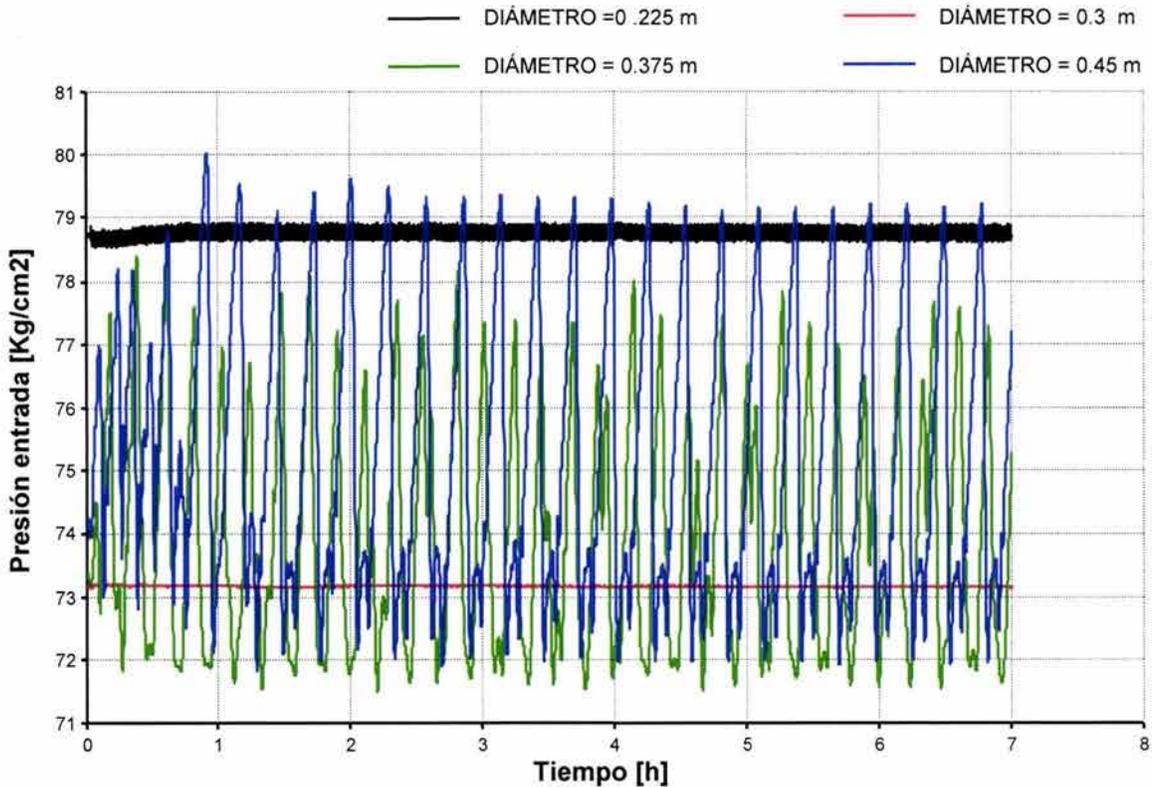


Fig. 5.5. Efecto del diámetro de la tubería sobre la presión a la entrada.

De forma similar al análisis anterior, al estudiar el comportamiento de la producción de líquido a la salida (Fig. 5.6) y el contenido total de líquido en el sistema (Fig. 5.7), se tiene que para diámetros pequeños el sistema se comporta de forma más estable, teniéndose menores variaciones en la producción y en el inventario de líquido, que para el caso de diámetros grandes.

Además, la observación de las dos figuras siguientes indican que a medida que el diámetro de las tuberías del sistema son menores se tendrá mayor frecuencia de bacheo pero de menores magnitudes, aspecto que beneficia la operación y el desempeño del sistema, como resultado de la estabilización del mismo.

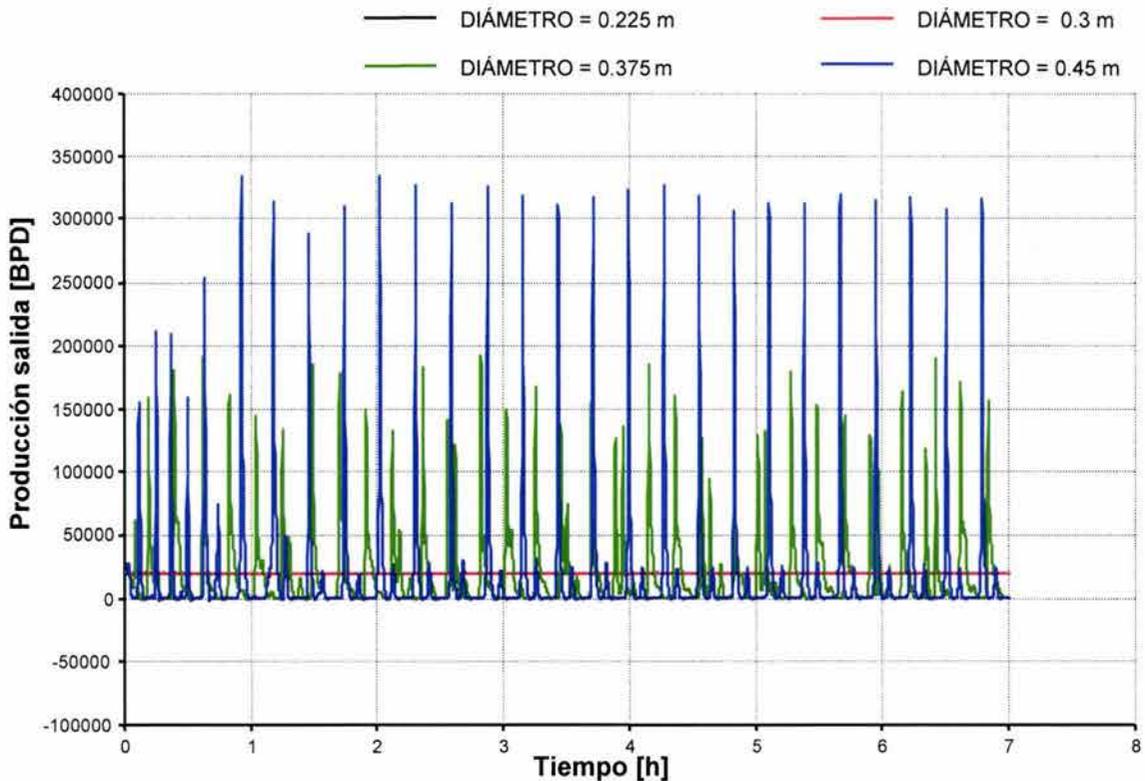


Fig. 5.6. Efecto del diámetro de la tubería sobre la producción de líquido a la salida.

El establecimiento del valor más conveniente para el diámetro de las tuberías; es decir, aquel que permita el manejo de la producción esperada en las instalaciones con las menores caídas de presión y un flujo más estable, es un aspecto que debe decidirse durante el diseño de las mismas, ya que resultaría impráctico instalar nuevas tuberías a lo largo de la vida productiva de instalaciones ya existentes.

Por otra parte, resulta claro que a medida que se tengan menores producciones y condiciones operativas que favorezcan flujos inestables y bacheo en el sistema, se tendrán que recurrir a otras técnicas operativas y de control para reducir la presencia del flujo bache en las instalaciones de producción.

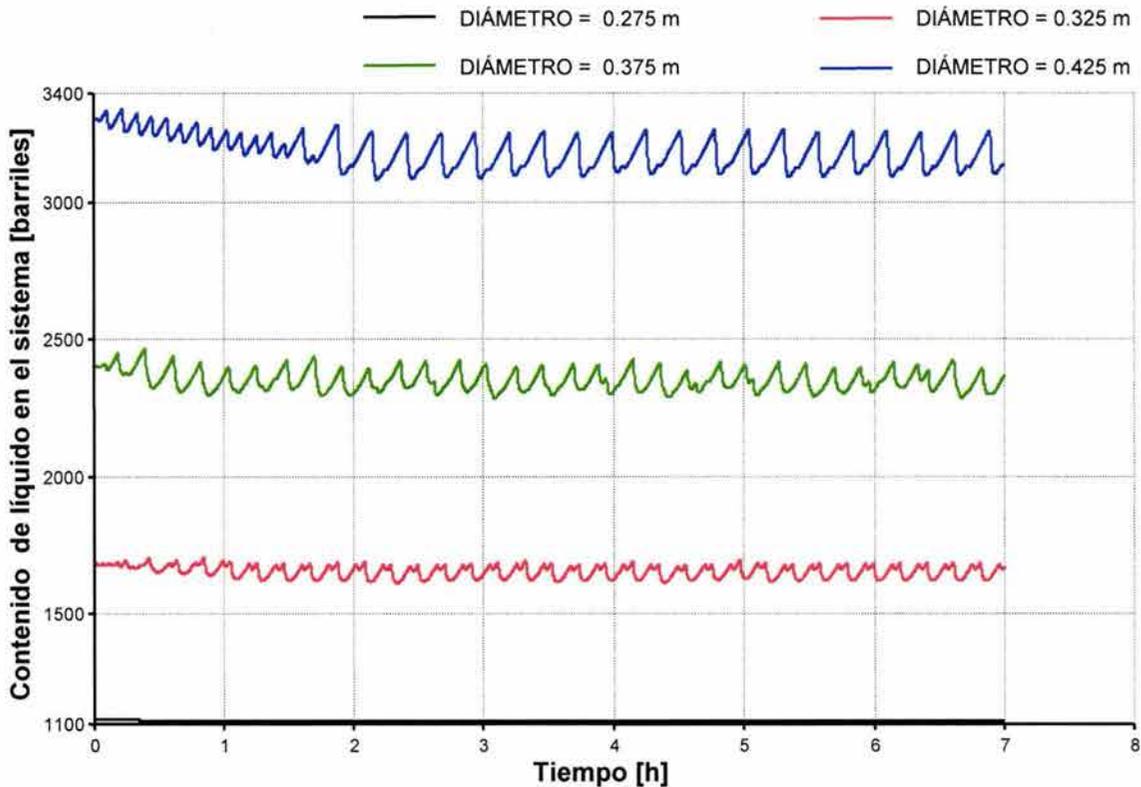


Fig. 5.7. Efecto del diámetro de la tubería sobre el contenido de líquido en el sistema.

En las siguientes páginas se desarrollarán con más detalle algunas técnicas para reducir el flujo bache: la primera que puede llamarse de diseño y/o configuración de las instalaciones y que estudia la instalación de un riser de diferente diámetro, dos técnicas de tipo operativo y que analizan el estrangulamiento del flujo a la salida y la inyección de gas en la base del riser y una discusión sobre los métodos de control, que hacen uso de la medición de parámetros de flujo en tiempo real.

5.2.2 Gasto Másico a la Entrada del Sistema

Las siguientes tres figuras (Figs. 5.8, 5.9 y 5.10) muestran los resultados para los casos en los que la variable estudiada es el gasto total a la entrada del sistema. En ellas se observa que cuando se tienen gastos o producciones grandes en el sistema, las instalaciones operan de una manera más estable; es decir, muestran una menor variación en los parámetros y condiciones de flujo estudiados.

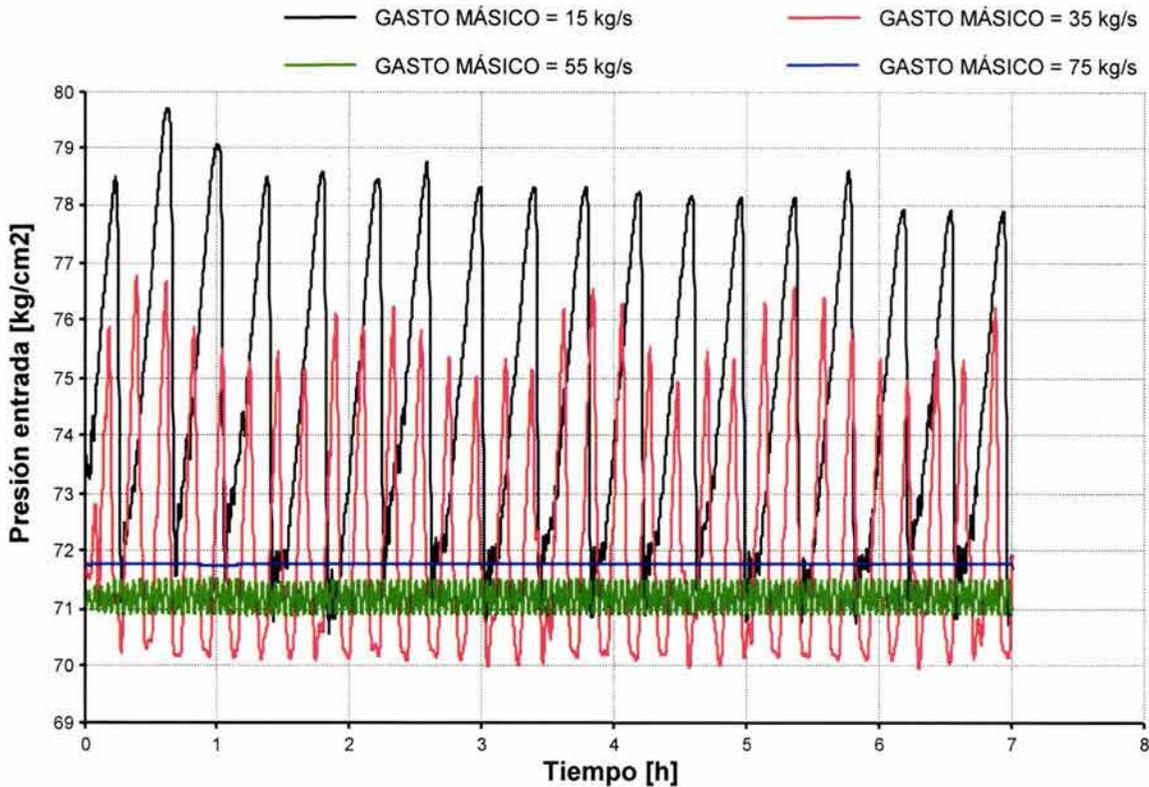


Fig. 5.8. Efecto del gasto a la entrada sobre la presión a la entrada.

Estas producciones grandes se presentan, por ejemplo, en etapas tempranas de producción, cuando se tiene una gran productividad y cuando se incorpora mayor producción al sistema, entre otros. Desafortunadamente, la tendencia natural de las fuentes de hidrocarburos es una reducción y agotamiento constante de su energía, reservas, gastos y calidad de los fluidos, lo que trae como consecuencia la presencia de un flujo cada vez más inestable, que origina, entre otros muchos problemas e inconvenientes, la presencia y desarrollo del flujo bache a lo largo de las instalaciones de producción.

Así, en la Fig. 5.8 se observa que para gastos máxicos grandes y mayores a 55 kg/s en la entrada del sistema, la presión en ésta se mantiene aproximadamente constante, con lo que se evitan gran parte de los problemas expuestos en la Sección 2.4, en que se analizó el flujo bache. Sin embargo, en la medida en que la producción disminuye; es decir, el gasto que entra en el sistema es cada vez

menor, se comenzarán a presentar condiciones de flujo e inestabilidades que afectarán negativamente el desempeño del sistema en general.

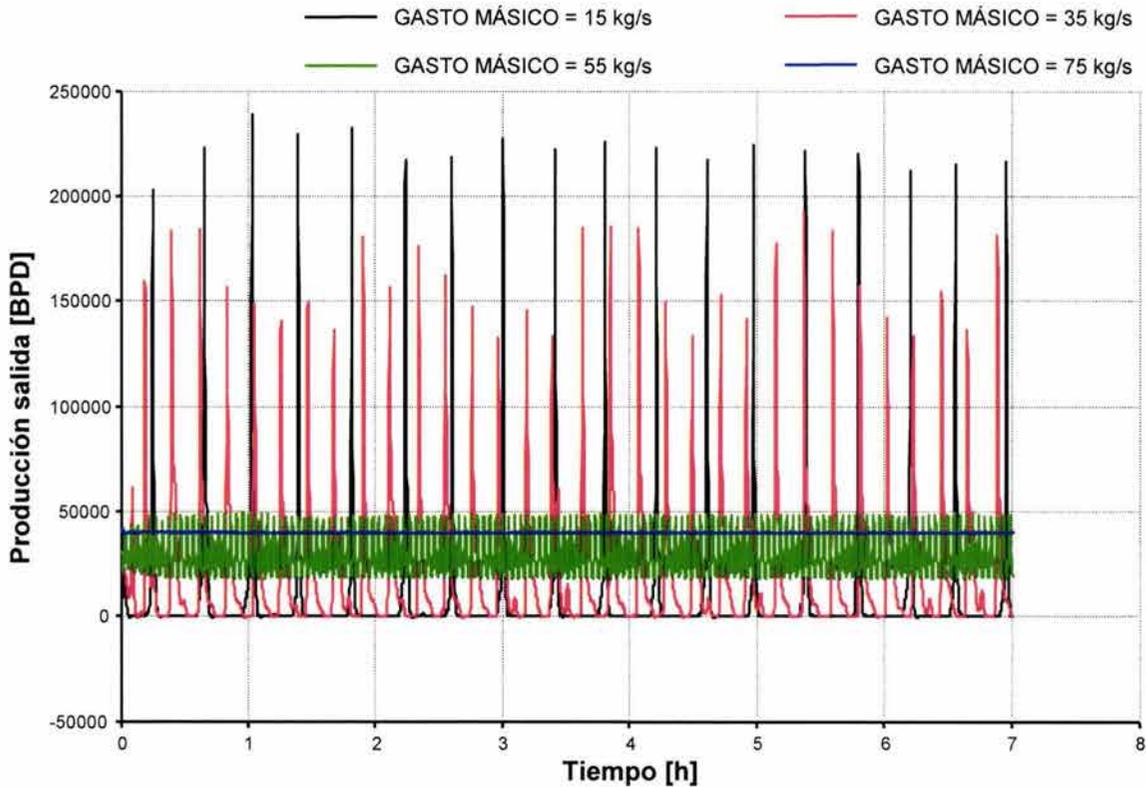


Fig. 5.9. Efecto del gasto a la entrada sobre la producción de líquido a la salida.

Como puede observarse en la Fig. 5.9, uno más de los beneficios de tener gastos grandes en el sistema es que se consigue tener una producción regular y estable a la salida de las instalaciones. En este caso, si a la salida se tiene un separador o algún otro equipo de proceso, para gastos grandes en la entrada se tiene la gran ventaja de que la producción que se recibirá no presentará variaciones considerables y se le podrá dar un mejor tratamiento, además de que originará menos problemas operativos y hará más seguros y eficientes dichos equipos.

Como consecuencia, para gastos pequeños se presentarán producciones mucho más inestables. En esta misma figura se observa que para el sistema definido si se tienen gastos máxicos de tan solo 35 kg/s se pueden llegar a

presentar gastos de líquido instantáneos a la salida de hasta 150,000 BPD, lo que trae consigo muchas desventajas.

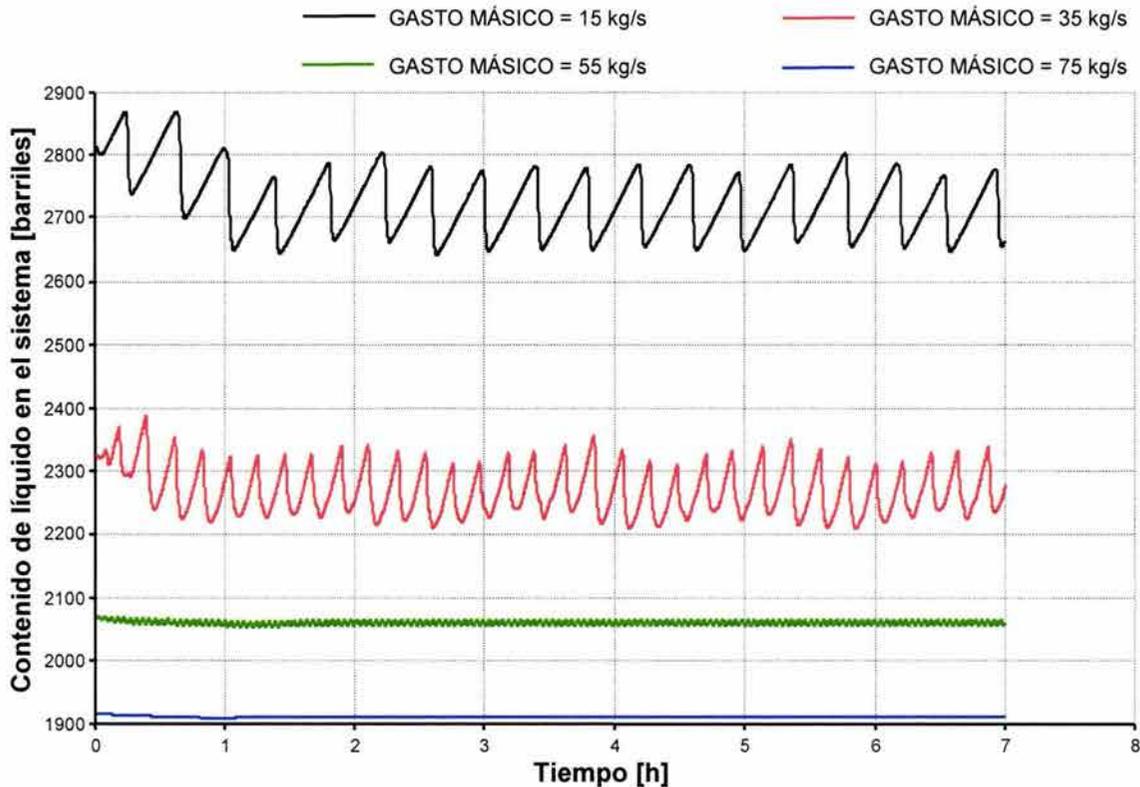


Fig. 5.10. Efecto del gasto a la entrada sobre el contenido de líquido en el sistema.

Adicionalmente, en la Fig. 5.10 se observa nuevamente que en la medida en que el gasto de entrada es mayor se tienen condiciones más estables: los inventarios de líquido en el sistema presentan menores variaciones, el tamaño de los baches es menor y la producción de los mismos deja de ser tan caótica e incierta.

5.2.3 Fracción de Volumen de Agua

La siguiente variable a estudiar es la fracción de volumen de agua. A medida que se da la explotación de un campo petrolero y que estos se van haciendo maduros, se observa una tendencia generalizada hacia una producción cada vez mayor de agua, tanto para producciones primarias como secundarias. Por lo

anterior, en las figuras siguientes se analizará el efecto que tiene el incremento de la producción de agua sobre el flujo bache en un sistema.

En la Fig. 5.11 se presenta el efecto que sobre la presión a la entrada del sistema p_e , tiene el valor de la fracción de volumen de agua α_w . En esta figura se observa que a medida que α_w es mayor las variaciones en la presión a la entrada también aumentan. Para el caso en que $\alpha_w = 0.05$; es decir, muy pequeña, la presión a la entrada varía entre 70 y 74 kg/cm². Cuando $\alpha_w = 0.5$, p_e oscila entre 71 y 79 kg/cm² aproximadamente. Lo anterior indica que una mayor presencia de agua en el sistema lo hace más inestable.

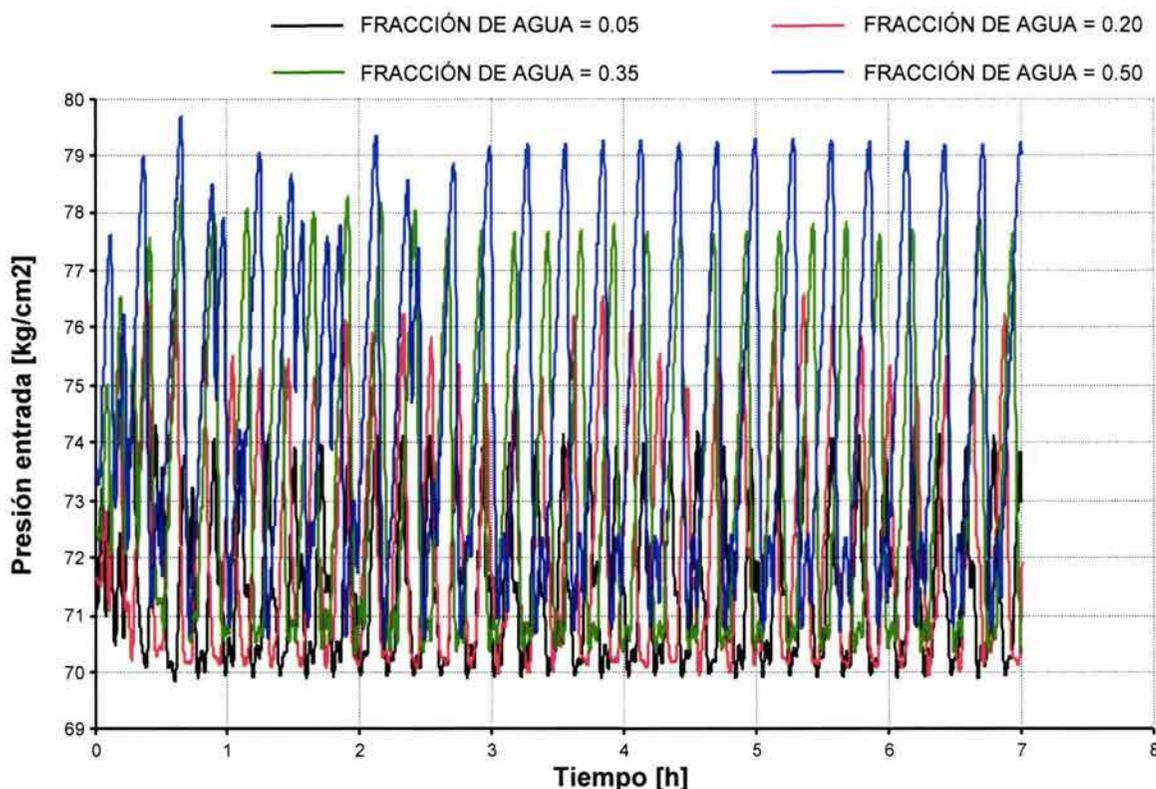


Fig. 5.11. Efecto de la fracción de agua sobre la presión a la entrada.

La Fig. 5.12 muestra de igual manera que para flujo con fracciones de volumen de agua pequeños se tiene mayor estabilidad en el sistema, lo cual se ve reflejado

en menores variaciones en la producción de líquido y menores valores pico de producción instantáneos en la salida del sistema.

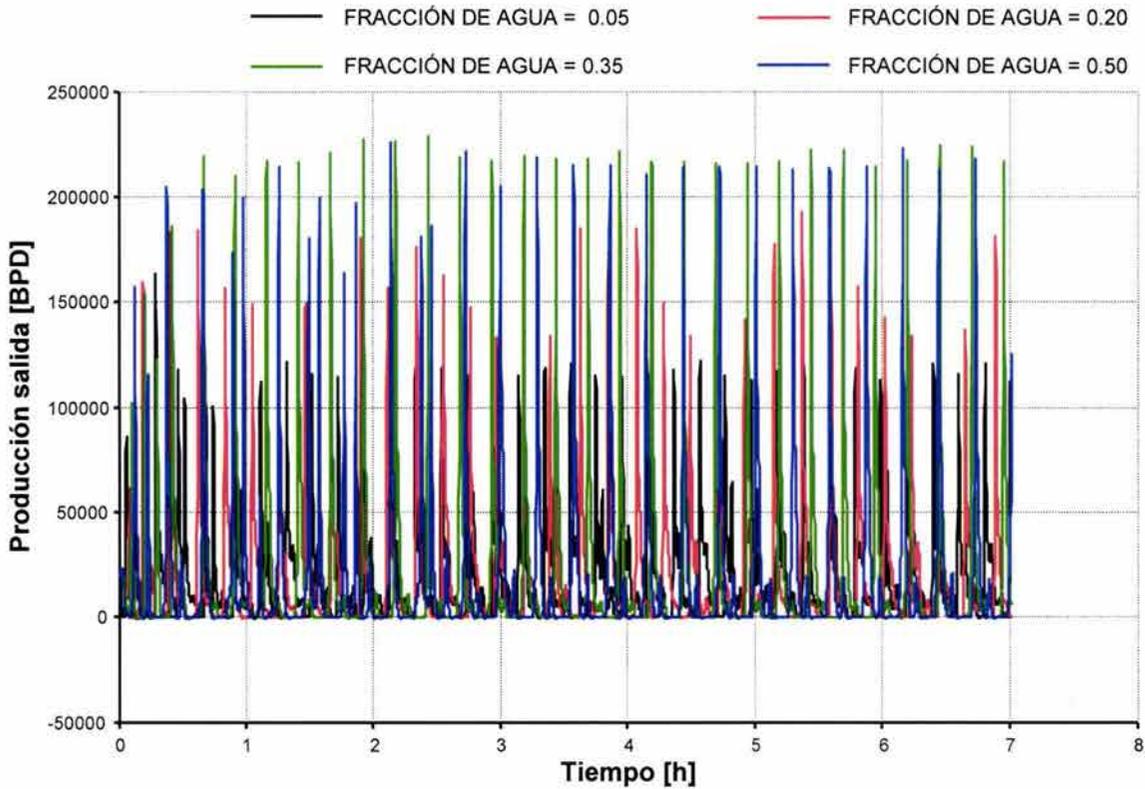


Fig. 5.12. Efecto de la fracción de agua sobre la producción de líquido.

Finalmente, el contenido total de líquido en el sistema para diferentes valores de α_w puede observarse en la Fig. 5.13. Una vez más se tiene que para valores pequeños de α_w el sistema se muestra más estable.

Es importante señalar que el sistema no llega a estabilizarse completamente (no se presentan valores “constantes” en la presión a la entrada, producción de líquido a la salida y contenido de líquido en el sistema) aún en los casos en que se tienen valores muy pequeños de α_w (que son los casos que más se acercan a dicha condición). Al tener presencia de agua es muy probable que se presente bacheo, por lo que sólo podrá minimizarse.

En cuanto a la frecuencia de bacheo y el tamaño promedio de los baches, se observa que conforme α_w es menor, el tamaño de los baches es menor y se producen con mayor frecuencia, teniéndose un comportamiento menos caótico a la salida del sistema.

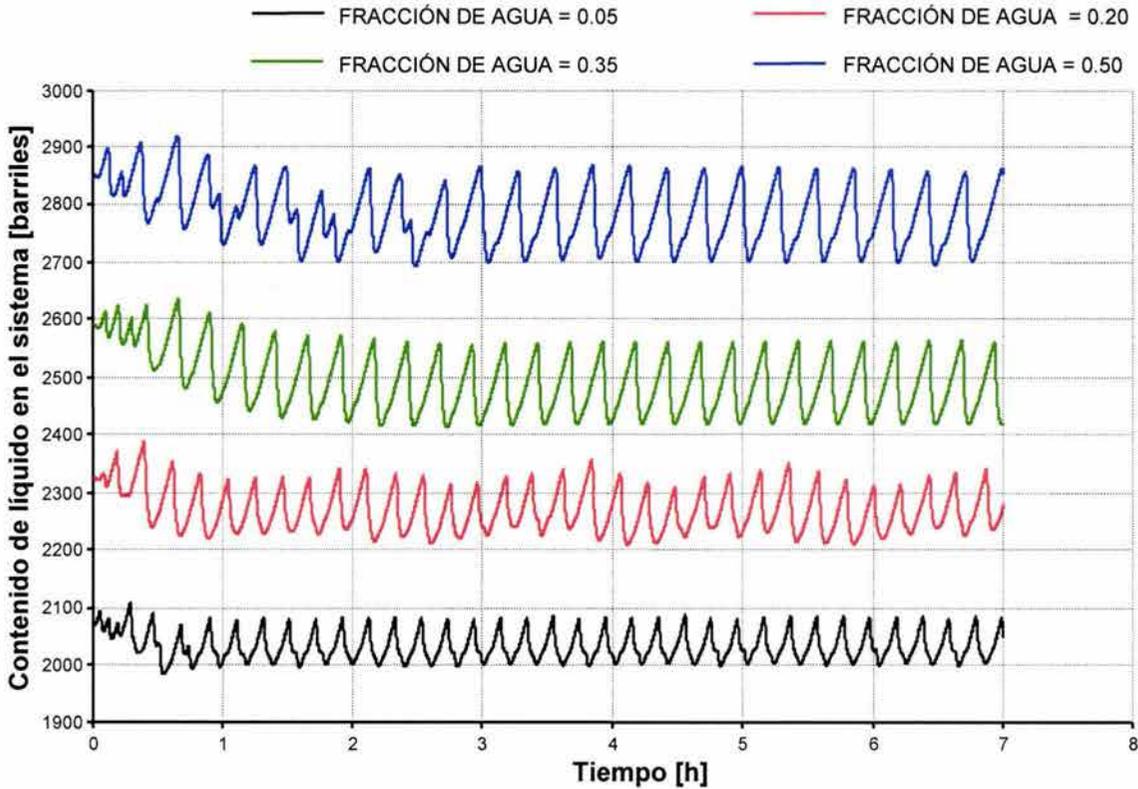


Fig. 5.13. Efecto de la fracción de agua sobre el contenido de líquido en el sistema.

5.2.4 Presión a la Salida del Sistema

La última de las variables por analizar es la presión a la salida del sistema p_s . El valor de este parámetro es, en la mayoría de los casos, un valor que se fija (por ejemplo, si a la salida del sistema se tiene un separador u otros equipos de proceso) o que puede regularse por medio de una válvula o estrangulador. En lo discutido hasta ahora, cualquiera que sea el caso (establecida en el separador o por medio de un estrangulador o válvula) este valor es estático y permanece fijo hasta que, debido a condiciones operativas, decide modificarse, para seguir nuevamente fijo.

El efecto del valor de presión que se fije a la salida del sistema es un parámetro muy importante ya que éste determina la contrapresión a que estará sometido el flujo y establece, en gran medida, el grado de empaquetamiento e interacción entre las fases presentes en el sistema.

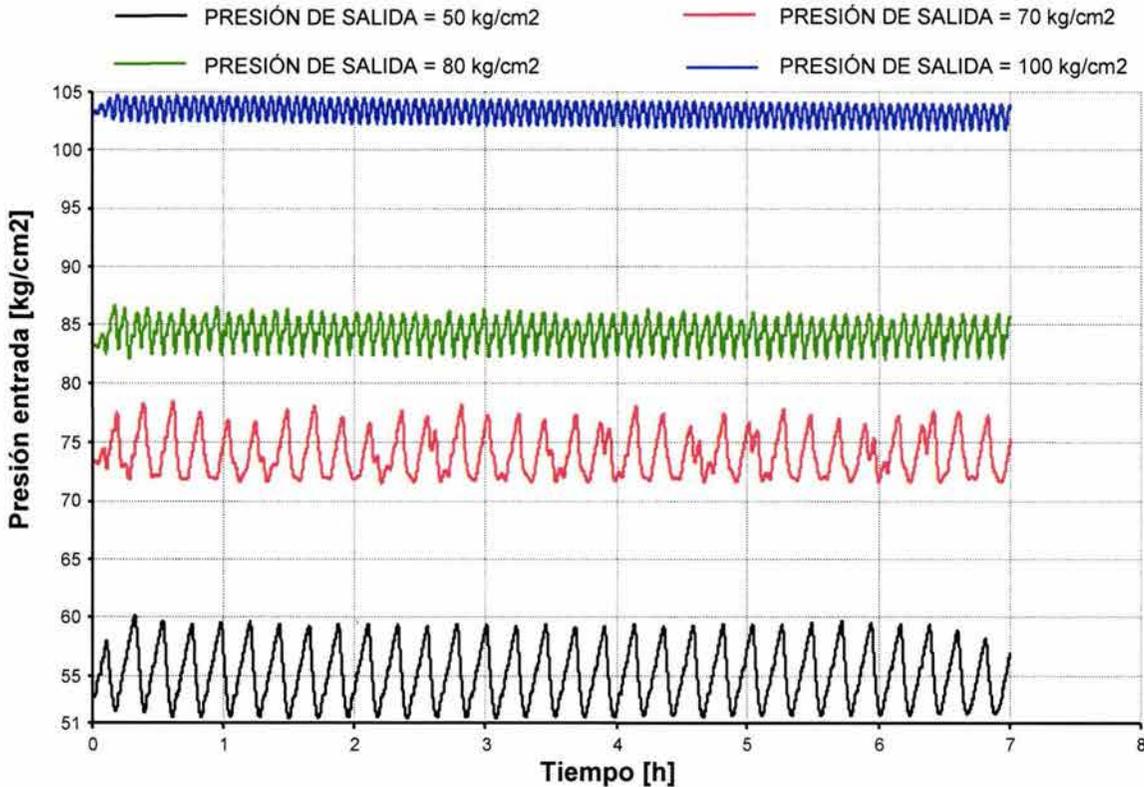


Fig. 5.14. Efecto de la presión a la salida sobre la presión a la entrada.

Los resultados de la simulación muestran, en la Fig. 5.14, que a medida que p_s es mayor, la presión a la entrada también lo será; lo anterior permite que se de el flujo bajo las condiciones especificadas en el caso de estudio. Es importante observar que para valores en la presión a la salida grandes se logra estabilizar el flujo, presentándose, en este caso, menores variaciones en la presión a la entrada y con ello una reducción del bacheo y de todos los inconvenientes que éste origina.

Sin embargo, aún y cuando el aumento en el valor de la contrapresión ayude a estabilizar el flujo se tienen varios factores que limitan el valor máximo que puede

asignarse a la presión a la salida, entre ellos se tienen los siguientes: valores muy grandes en la contrapresión pueden reducir significativamente la producción e incluso volver a un sistema no fluyente y se tienen límites mecánicos en la resistencia de los materiales; es decir, las tuberías y equipos pueden presentar rupturas y daños mecánicos al rebasar cierta presión de operación.

Las siguientes dos figuras (Fig. 5.15 y Fig. 5.16) también nos muestran el beneficio que se consigue en cuanto a estabilización del sistema cuando se tienen valores grandes de p_s . En los campos viejos o en aquellos en que se tienen producciones pequeñas, las condiciones operativas propician que se asignen valores bajos a la presión a la salida, lo cual puede originar que se desarrolle el flujo bache y se tengan producciones variables que, como se muestra en la Fig. 5.15, pueden presentar gastos instantáneos muy grandes (en este caso hasta de 300,000 BPD para una $p_s = 50 \text{ kg/cm}^2$) que, nuevamente mencionamos, originan muchos problemas.

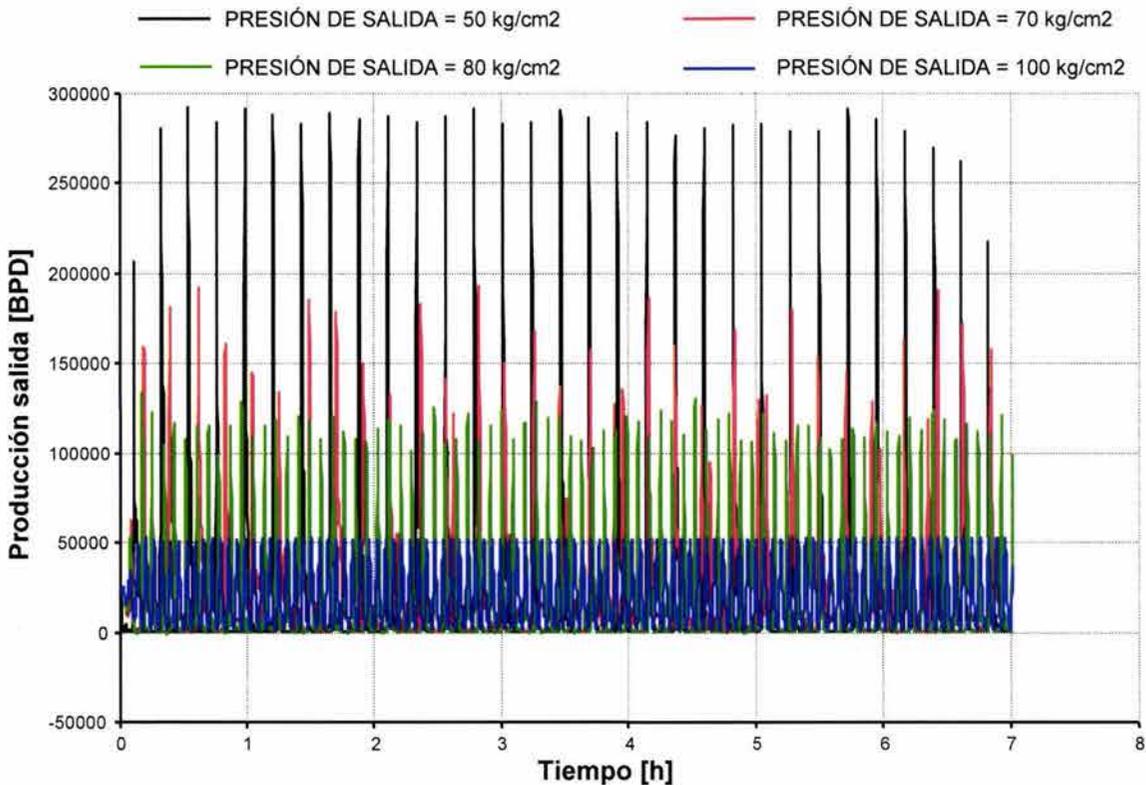


Fig. 5.15. Efecto de la presión a la salida sobre la producción de líquido a la salida.

En la medida en que p_s es mayor se tiene un flujo más estable y el contenido o inventario de líquido en el sistema (Fig. 5.16) presenta menos variaciones. De forma similar, la problemática de manejar baches de gran tamaño, que se producen tan irregularmente y con poca frecuencia también se reduce al incrementar la presión en el sistema.

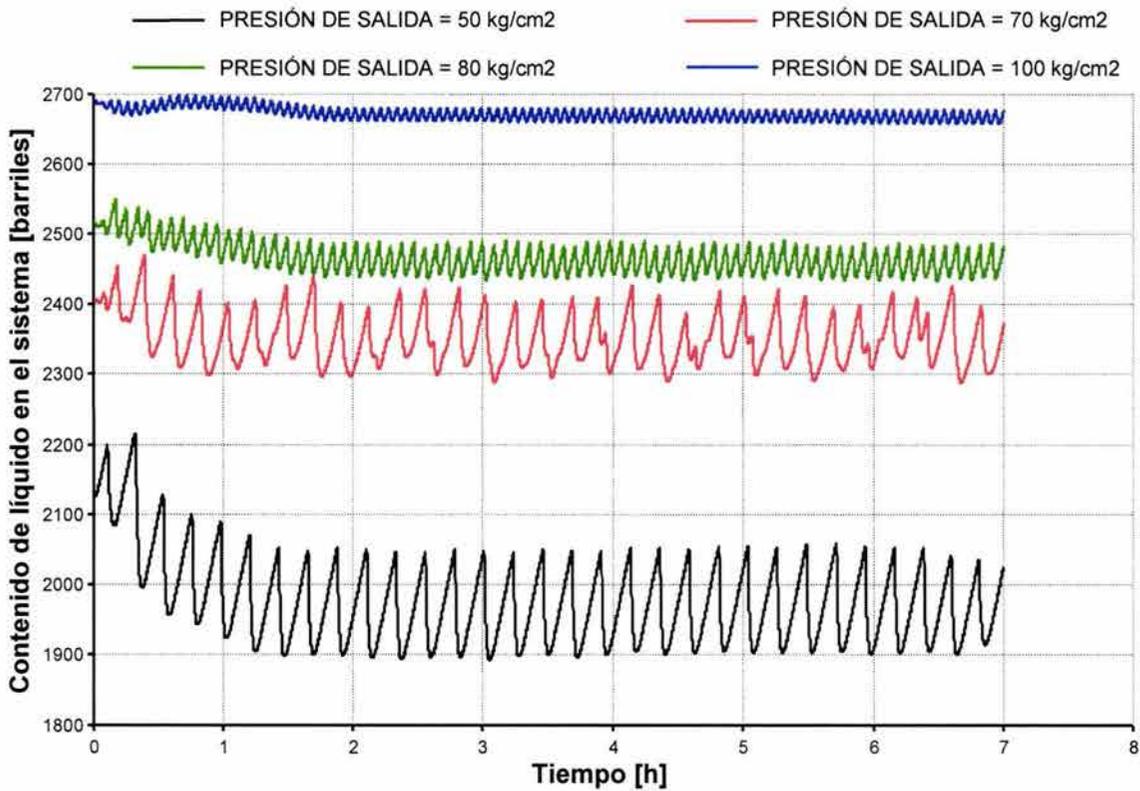


Fig. 5.16. Efecto de la presión a la salida sobre el contenido de líquido en el sistema.

5.3 Mapas de Patrones de Flujo

Como ya ha sido mencionado, en aplicaciones de ingeniería petrolera, las tres características hidrodinámicas más importantes son: el patrón de flujo, la fracción de volumen de líquido y la caída de presión. Para estimar de manera correcta la caída de presión y la fracción de volumen de líquido es necesario conocer el patrón de flujo existente, bajo las condiciones de flujo específicas. De ahí que la predicción del patrón de flujo sea el aspecto fundamental en el análisis de flujo multifásico, tanto para el diseño como en la operación de las instalaciones de producción.

Para la predicción de los patrones de flujo, diversos investigadores han buscado definir mapas bidimensionales de patrones de flujo. Para un sistema determinado, dados un gasto de líquido y uno de gas, resultará un patrón de flujo en particular (Chen, 2001). Estos regímenes de flujo son generalmente mostrados utilizando un mapa de patrones de flujo, el cual es un arreglo bidimensional que describe las fronteras o transiciones entre patrones de flujo. La selección de las variables apropiadas para presentar de forma clara y efectiva los diferentes regímenes de flujo ha sido un tema de investigación por muchos años.

Aunque las variables adimensionales son preferidas en la teoría, otras como las velocidades superficiales o la velocidad de la mezcla son mucho más utilizadas en la práctica. En este apartado, se proponen mapas de patrones de flujo para el análisis del sistema en estudio, generados a partir de estudios paramétricos en los que se involucran algunas de las variables y/o parámetros que se consideran más importantes en el flujo bache; estos son: el diámetro de la tubería, la presión a la salida, el gasto másico a la entrada del sistema y la fracción de volumen de gas.

Estos mapas se definirán para dos regiones en particular, las cuales se muestran en la Fig. 5.17 y han sido llamados "secciones de observación". La primera de ellas es una sección de tubería que se encuentra sobre el lecho

marino, cuya posición dentro del sistema se indica en esta figura. La segunda región de estudio es el riser de salida.

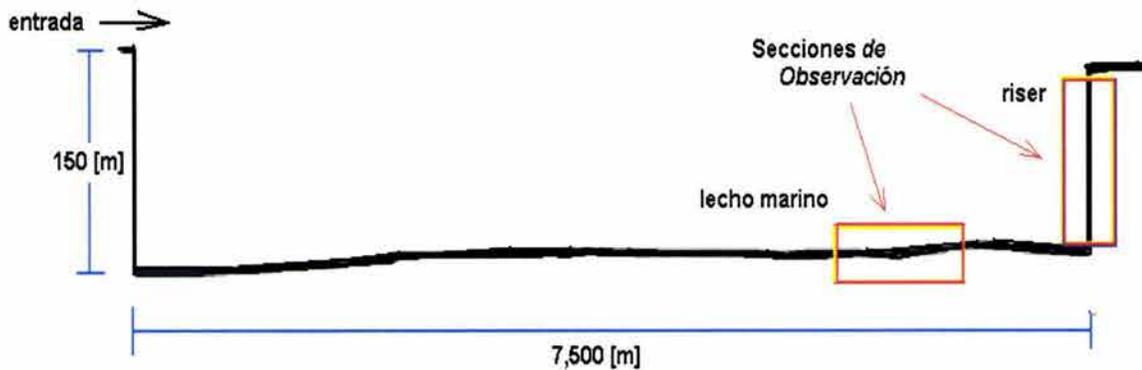


Fig. 5.17. Regiones de estudio del sistema para la definición de mapas de patrones de flujo.

Para la construcción de estos mapas de regímenes de flujo se utilizó la información obtenida de los estudios paramétricos, realizados con los siguientes parámetros geométricos, operativos y de los fluidos: diámetro de la tubería D , gasto másico a la entrada q_e , presión a la salida p_s , y fracción de volumen de gas α_g , por haber sido considerados algunos de los parámetros y variables que más influyen en el bacheo, a partir del análisis de estos estudios paramétricos.

5.3.1 Sección de Tubería en el Lecho Marino

Para esta parte del sistema se elaboraron tres mapas de patrones de flujo. Los estudios paramétricos considerados son: diámetro vs gasto másico (Fig. 5.18), presión vs fracción de volumen de gas (Fig. 5.19) y presión vs gasto másico (Fig. 5.20).

En las figuras mencionadas anteriormente se muestran los regímenes de flujo que se tendrían en el sistema de estudio, en la sección de tubería ubicada en el lecho marino, para diferentes valores en los parámetros que en ellas se indican (por ejemplo: diámetro y gasto másico en la Fig. 5.18), conservando constantes los otros parámetros (es decir, presión a la salida, y propiedades de los fluidos en la Fig. 5.18).

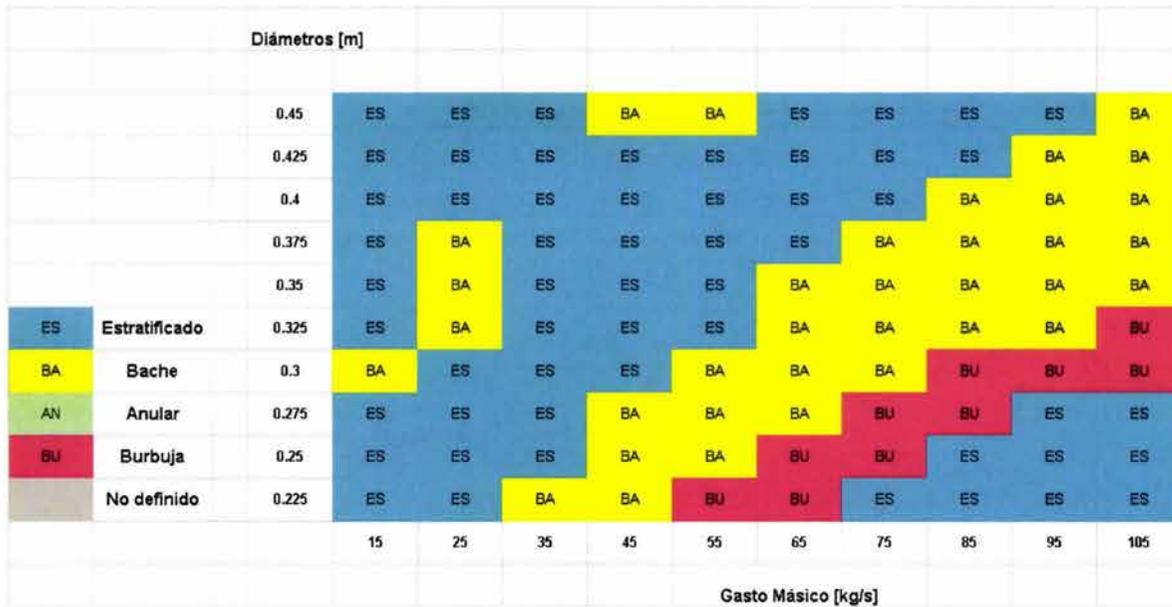


Fig. 5.18. Mapa de Patrones de Flujo: Diámetro-Gasto Másico en lecho marino.

La información con la cual se elaboraron estos mapas fue generada a partir de un gran número de simulaciones numéricas (100 estudios o corridas diferentes para cada uno de ellos), por lo que la información que puede obtenerse de ellos es muy valiosa y puede ser utilizada para el análisis de sistemas de transporte de hidrocarburos existentes o bien para el diseño de los mismos, dependiendo de los parámetros y/o variables que hayan sido elegidos o requeridos para su construcción.

El mapa presentado en la Fig. 5.18, al involucrar al diámetro de la tubería y al gasto másico a la entrada del sistema como parámetros de estudio, puede ser útil en la etapa de diseño, ya que con él podemos predecir cuál sería el régimen de flujo predominante en esta sección del sistema considerando diferentes tuberías, tomando en cuenta además, los diferentes gastos que se tendrían a lo largo de la vida productiva de las instalaciones. En este caso observamos que si bien no se presenta un comportamiento uniforme en el patrón de flujo para las diferentes condiciones, el cambio o transición de un régimen de flujo a otro no es caótico, como lo puede llegar a ser en una tubería vertical.

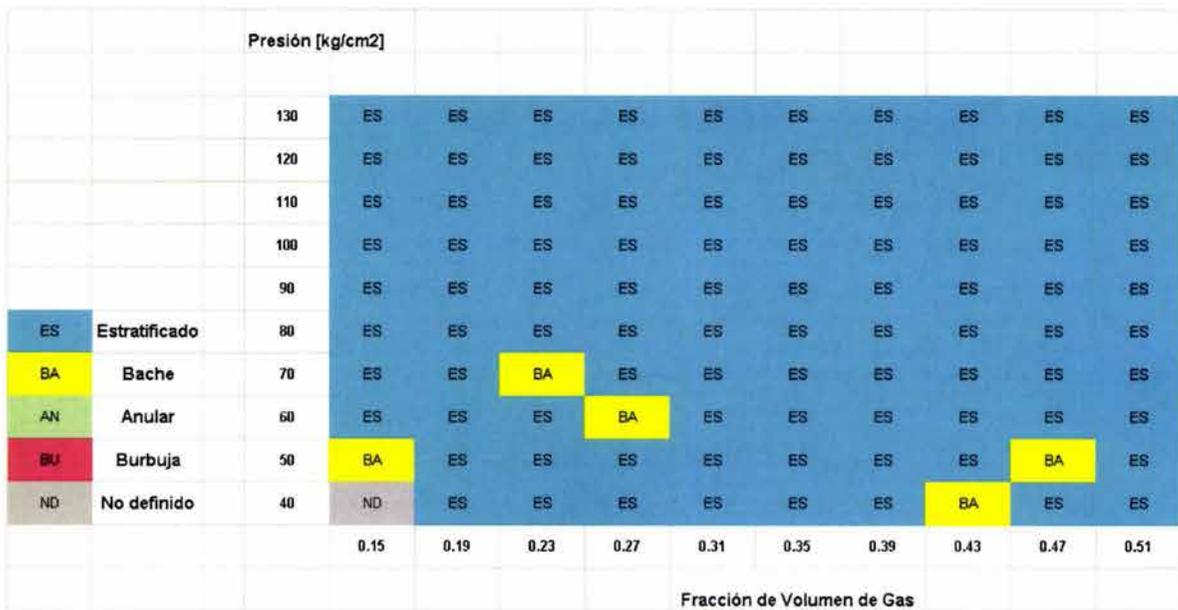


Fig. 5.19. Mapa de Patrones de Flujo: Presión-Fracción de Volumen de Gas en lecho marino.

En la Fig. 5.19 se muestra un mapa que puede ayudarnos a entender el comportamiento de un sistema ya existente, debido a que las variables consideradas para el estudio paramétrico son la presión a la salida y la fracción de volumen de gas, que son parámetros que varían (fracción de gas) o podemos modificar (presión) a lo largo de la vida productiva de las instalaciones. En este caso se observa que para un gran rango de valores en estas variables, el patrón de flujo predominante es el estratificado, lo que muestra una vez más que el proceso de bacheo no es tan grave en tuberías horizontales o casi horizontales comparado al que se tiene en tuberías verticales o en terrenos sinuosos.

Finalmente se muestra, en la Fig. 5.20, otro mapa de patrones de flujo de presión vs gasto másico. Un aspecto interesante de este mapa es la presencia de una gran región en la que el patrón de flujo es llamado “no definido”. Analizando la figura observamos que la región en la que el régimen de flujo no puede ser definido es aquella en la que se tienen presiones y/o gastos másicos bajos. Una explicación del por qué el simulador no puede definir un patrón de flujo predominante es que no se tendría flujo para estas condiciones de presiones a la salida y gastos a la entrada tan pequeños.

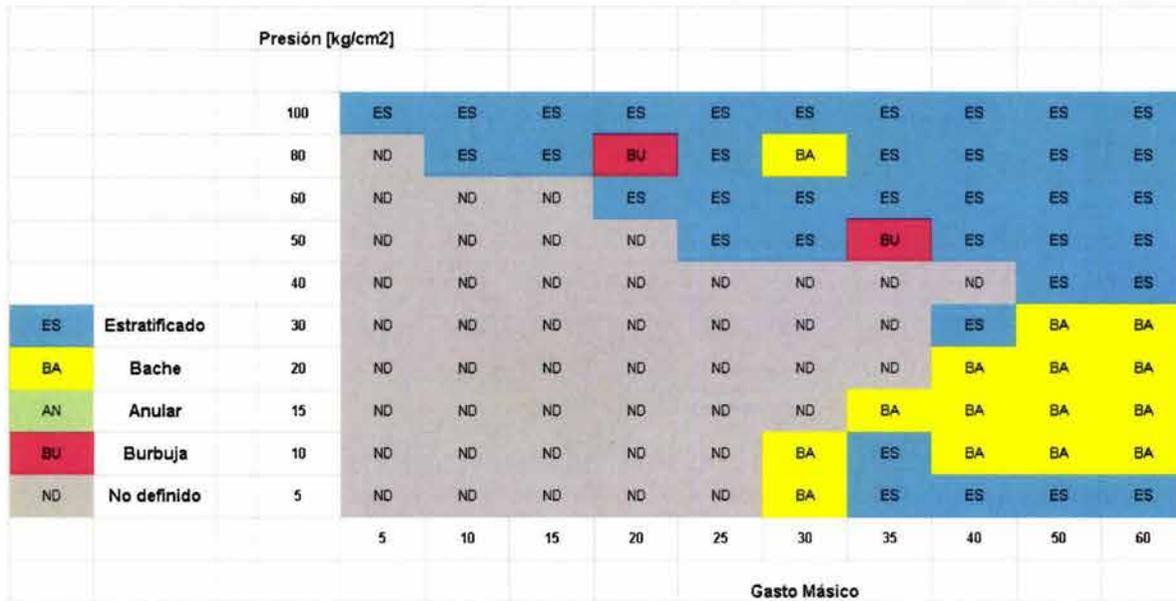


Fig. 5.20. Mapa de Patrones de Flujo: Presión-Gasto Másico en Lecho Marino.

5.3.2 Riser de Llegada

Al igual que para el caso anterior, se elaboraron tres mapas de patrones de flujo, tomando los estudios paramétricos para esta sección del sistema. En la Fig. 5.21 se muestra el primero de ellos, resultado de simulaciones numéricas realizadas para diferentes diámetros y gastos másicos.

En este mapa se puede observar que la región del flujo bache es considerable. Las recomendaciones para evitarlo son: reducir el diámetro de las tuberías de transporte o bien incrementar el gasto másico en el sistema, con el fin de manejar un flujo más compacto y estable.

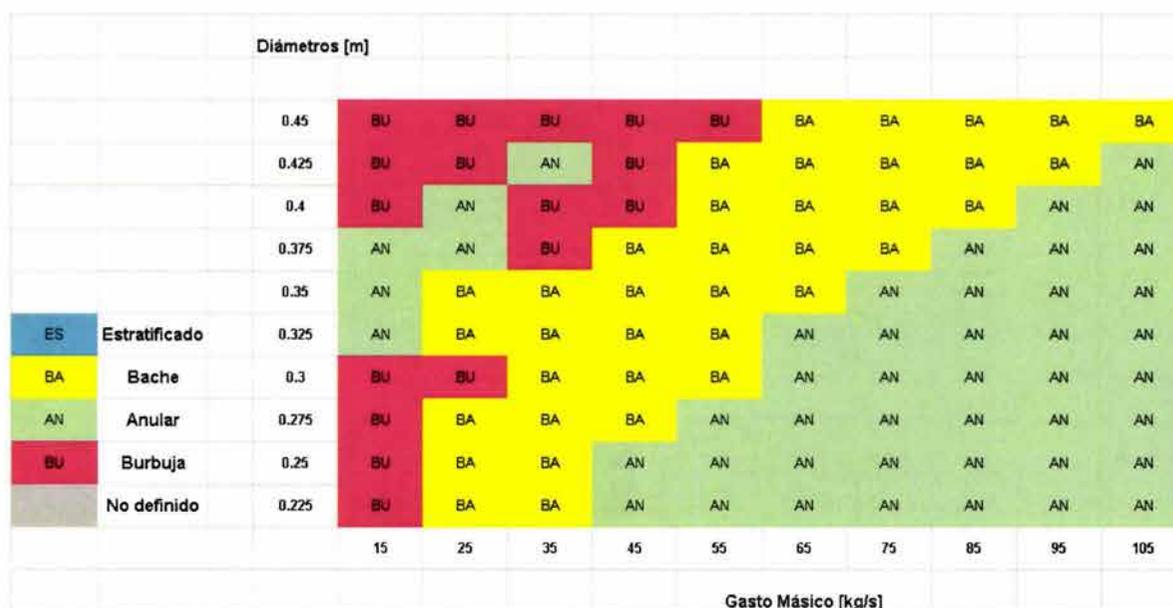


Fig. 5.21. Mapa de Patrones de Flujo: Diámetro-Gasto Másico en Riser de Llegada.

La determinación del diámetro adecuado de las tuberías en un aspecto que debe definirse en la etapa de diseño de las instalaciones y que es difícil modificar durante la vida productiva de las mismas; por otra parte, incrementar el gasto que se maneja en el sistema es factible para etapas tempranas de explotación en las que la tendencia es incorporar producción al sistema conforme se da el desarrollo de los campos; sin embargo, no puede evitarse la declinación de la misma a medida que estos campos se vuelven maduros.

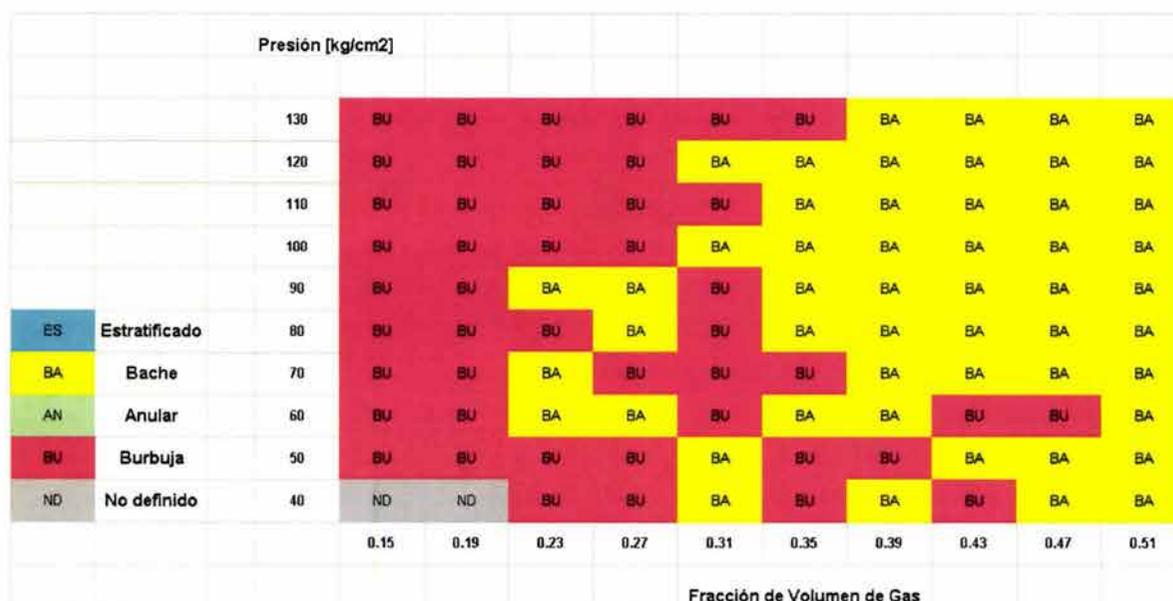


Fig. 5.22. Mapa de Patrones de Flujo: Presión-Fracción de Volumen de Gas en Riser de Llegada.

En la Fig. 5.22 se presentan los resultados para cuando el estudio paramétrico considerado es presión vs fracción de volumen de gas. En éste se observa que se tienen dos patrones predominantes: el flujo burbuja y el flujo bache bajo las condiciones existentes en el sistema. El flujo burbuja se presentaría para fracciones de volumen de gas pequeñas y el flujo bache para fracciones de volumen de gas grandes, preferentemente.

También puede observarse que se tiene una gran región en la que el flujo se comportaría de forma inestable, pasando de flujo burbuja a flujo bache. Para este caso en específico es recomendable operar en la región de flujo burbuja por ser un régimen de flujo más estable comparado con el flujo bache.

Adicionalmente, en la Fig. 5.23 se observa nuevamente, al igual que para el caso en que se analizó la tubería que va por el lecho marino, que se tienen condiciones determinadas (presiones y/o gastos muy pequeños), en las que no se tendría flujo en el sistema y no se puede definir, por lo tanto, algún patrón de flujo. Una vez más se tiene que la región de flujo bache es muy grande y que la magnitud del bacheo es mayor para el caso de tuberías verticales que para tuberías horizontales.

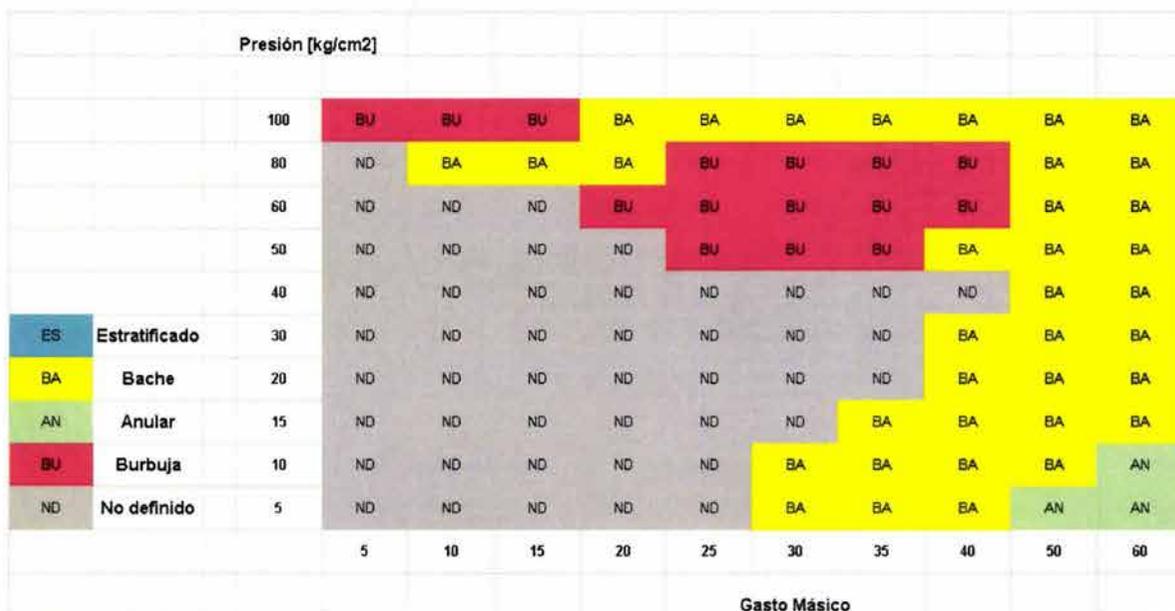


Fig. 5.23. Mapa de Patrones de Flujo: Presión-Gasto Másico en Riser de Llegada.

Algunos aspectos importantes de resaltar con respecto a la elaboración, interpretación y uso de los mapas de patrones de flujo anteriormente presentados son los siguientes:

- La elaboración de estos mapas de regímenes de flujo se realizó a partir del análisis de los resultados obtenidos de estudios numéricos paramétricos.
- El criterio elegido para la selección de los parámetros y/o variables, para la construcción de estos mapas, fue tomar aquellos que tuvieran mayor peso sobre el proceso de bacheo, aunque no es común encontrarlos en la literatura.
- El flujo bache es más frecuente y severo en tuberías verticales con flujo ascendente (risers) y en terrenos sinuosos que en tuberías horizontales o casi horizontales.
- El uso de la información contenida en los mapas generados como ya fue explicado, debe realizarse con cautela y criterio, ya que su exactitud y confiabilidad se ve afectada al existir algún grado de interdependencia de las variables consideradas en la elaboración de los estudios paramétricos.
- Estos mapas pueden ser elementos útiles tanto para el diseño de sistemas de transporte de hidrocarburos como para la toma de decisiones al operar instalaciones ya existentes.
- Aun y cuando cada uno de los mapas fue generado a partir de los resultados obtenidos de un gran número de corridas o simulaciones numéricas, la determinación de las diferentes regiones y de la transición entre diferentes patrones de flujo es aún burda, por lo que se requiere aumentar el número de casos a simular para hacerla más refinada. Esta decisión depende básicamente del tiempo de cálculo y de análisis que se esté dispuesto a destinar para su elaboración.
- Un correcto estudio y análisis de los mapas de patrones de flujo, para un sistema en particular, permite definir las regiones o condiciones más estables y apropiadas para su operación.

5.4 Soluciones para Minimizar el Flujo Bache

Como ya fue estudiado en la Sección 2.4 de este trabajo, las soluciones que han sido propuestas para minimizar el flujo bache pueden agruparse en tres grandes apartados:

- a) Cambios en el diseño.
- b) Cambio operacionales y de procedimientos.
- c) Métodos de control.

Como parte de los estudios numéricos paramétricos realizados, en esta tesis se consideran las siguientes soluciones para minimizar el bacheo en el sistema en estudio: la instalación de un riser de diámetro diferente al del caso base (que implica un cambio en el diseño), el estrangulamiento superficial mediante el cierre de una válvula, la inyección de gas en la base del riser de llegada y una combinación de ambos procedimientos (que son cambios operacionales) y una breve revisión de la literatura referente a los métodos de control.

La filosofía que se utilizará para definir la presencia y magnitud del bacheo en el sistema en estudio, es la misma que se empleó al realizar los estudios paramétricos en la Sección 5.2; es decir, se analizará el comportamiento de la presión a la entrada, la producción de líquido a la salida y el contenido de líquido en el sistema, además de que se hablará sobre la frecuencia de bacheo y el tamaño de los baches.

El estudio de los parámetros y elementos antes mencionados nos dará una idea del grado en que logra minimizarse el bacheo, así como de las implicaciones y desventajas, desde el punto de vista técnico, de la aplicación de las diferentes técnicas consideradas.

5.4.1 Cambio del Diámetro del Riser

La primera de las soluciones analizadas es el cambio del riser por otro de diferente diámetro (menor al original). Es importante mencionar que los estudios paramétricos resultaron de considerar que en el sistema se tienen risers de diversos diámetros, son diferentes a los obtenidos en la Sección 5.2 en los que se plantearon diferentes valores para el diámetro de todas y cada una de las tuberías del sistema y no sólo del riser como ahora se hace.

En la Fig. 5.24 se observa como se consigue estabilizar, cada vez más, el comportamiento de la presión a la entrada del sistema a medida que se toma un riser de menor diámetro. De esta forma, si en el sistema en estudio se instalara un riser de diámetro igual a 0.1 m, la presión a la entrada se estabiliza y sería aproximadamente de 82 kg/cm².

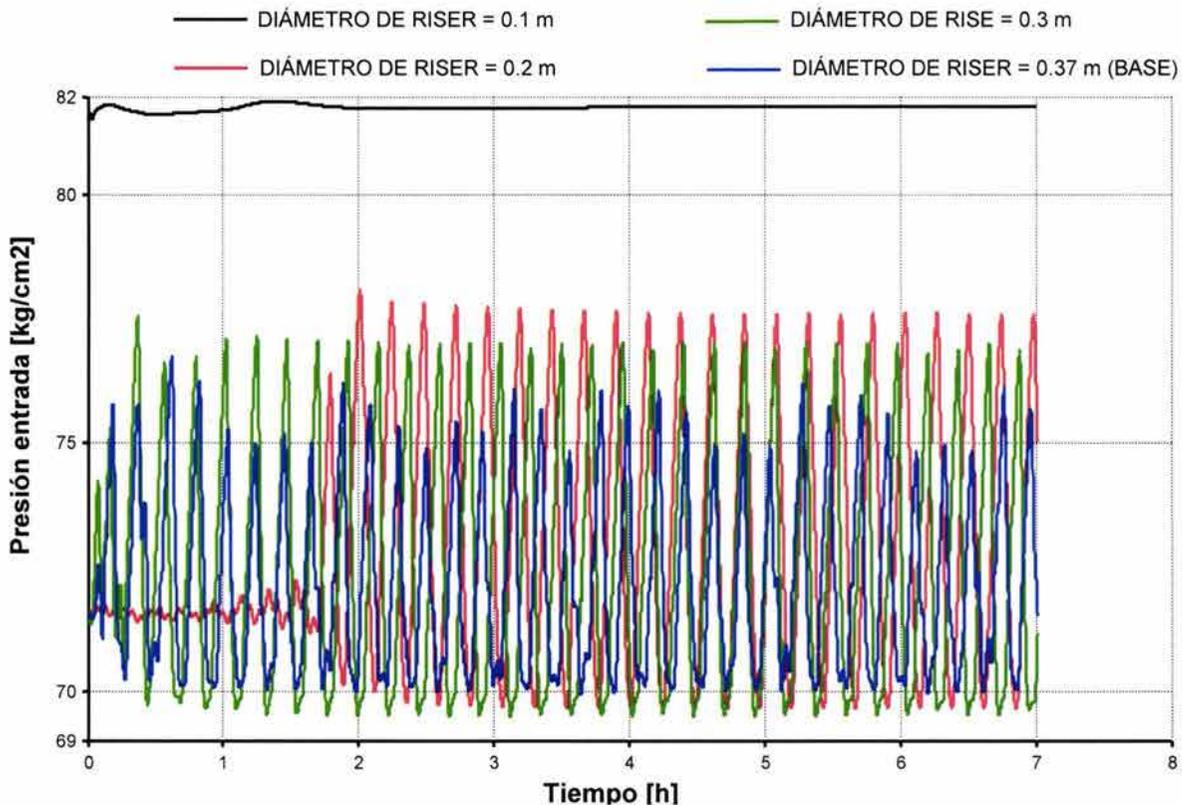


Fig. 5.24. Presión a la entrada para risers de diferente diámetro.

En esta misma figura se observa además que, al instalar un riser de un diámetro menor se tiene la ventaja de que ya no se presentan variaciones tan importantes en la presión a la entrada del sistema; sin embargo, el riser que debería utilizarse para estabilizar el sistema es de un diámetro mucho menor al que se considera para el caso base.

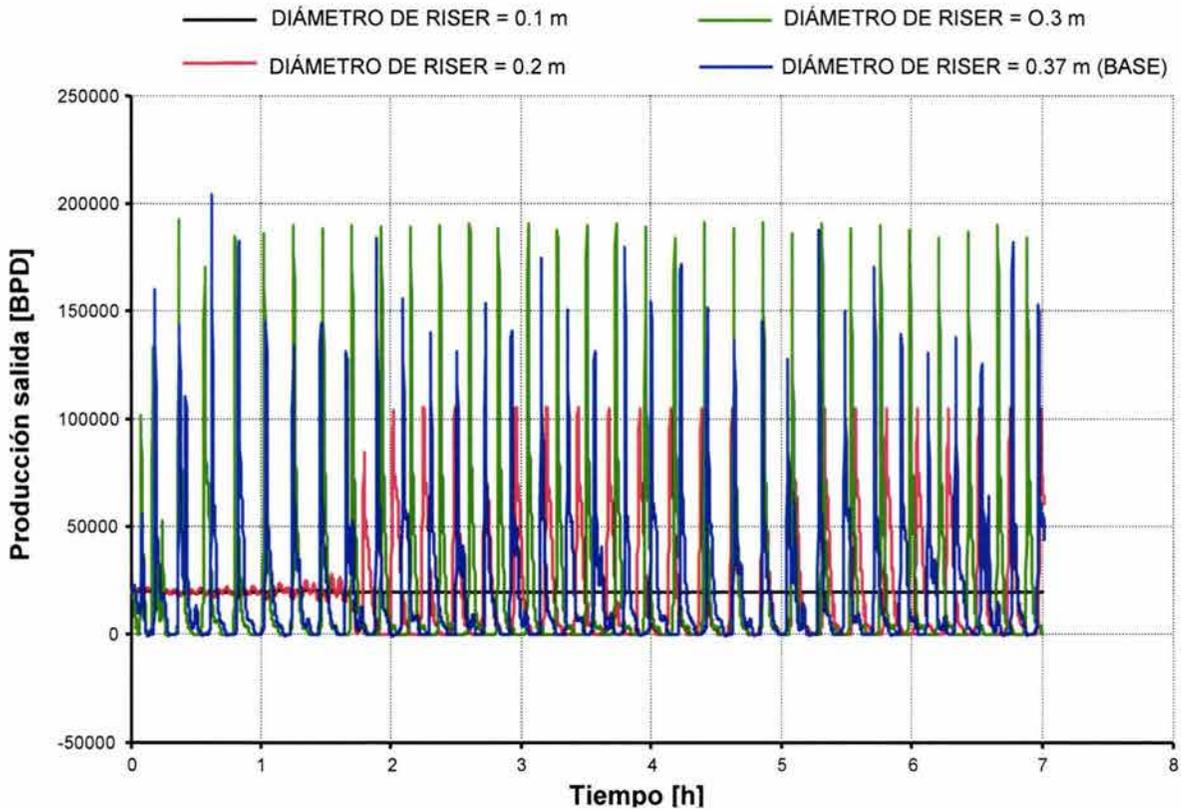


Fig. 5.25. Producción de líquido a la salida para risers de diferente diámetro.

Este cambio hacia un comportamiento estable también puede observarse en la Fig.5.25, en la que se muestra el comportamiento de la producción de líquido a la salida respecto al tiempo de simulación. Uno de los aspectos negativos que se presentan al crear una mayor contrapresión, instalando un riser de diámetro pequeño, es que la producción de hidrocarburos puede disminuirse significativamente. Por ejemplo, si se considerara un riser de diámetro igual a 0.1 m, la producción a la salida, aunque constante, sería de apenas unos 20,000 BPD.

Esta disminución tan importante en la producción, al reducir el diámetro del riser, se refleja directamente en un incremento en el contenido o inventario de líquidos en el sistema, como se observa en la Fig. 5.26. En esta figura también es claro que para diámetros grandes (mayores a 0.1 m) el sistema es inestable, presentándose grandes variaciones en el inventario de líquidos del sistema.

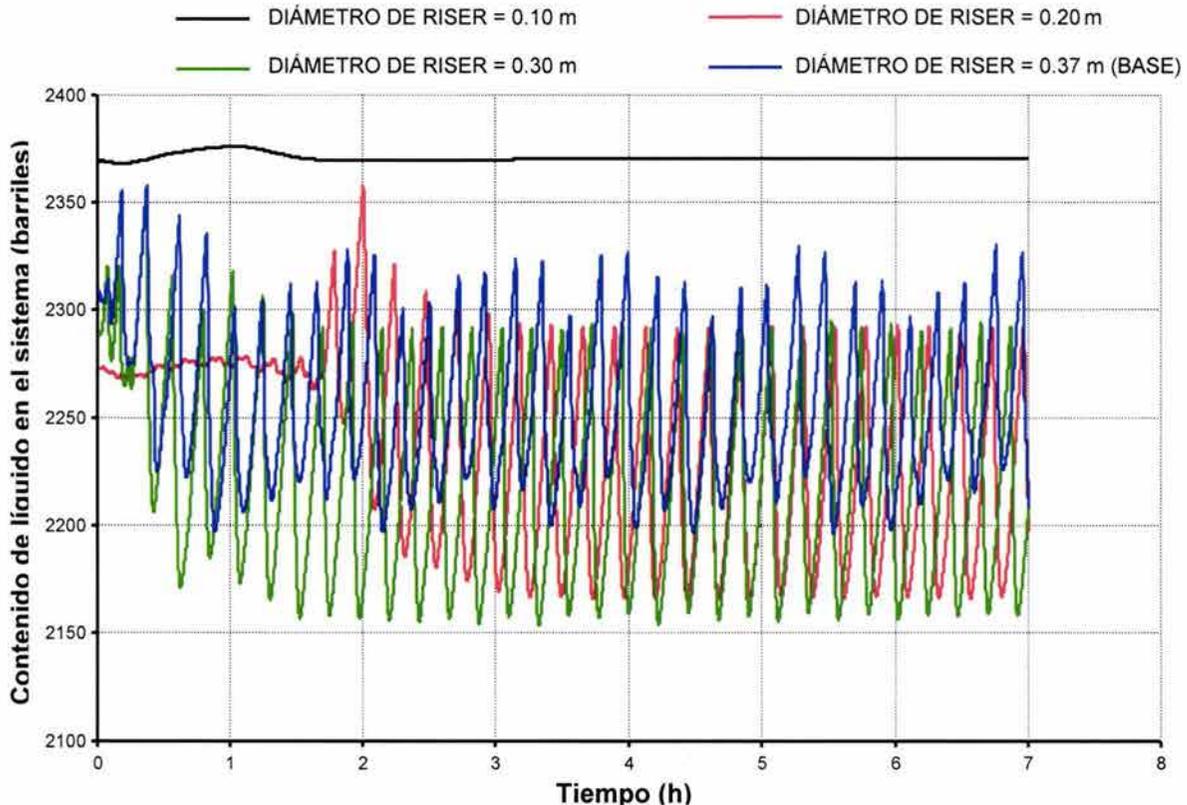


Fig. 5.26. Contenido de líquido en el sistema para risers de diferente diámetro.

Por otra parte, se observa que el tamaño de los baches se incrementa y la frecuencia de bacheo disminuye cuando el diámetro del riser es grande; aspectos característicos de un sistema inestable que origina mayores problemas en las instalaciones de producción.

La decisión de instalar un riser de diámetro diferente debe evaluarse no sólo desde el punto de vista técnico sino también considerando la parte económica. Esta alternativa podría ser aceptable para risers cortos, pero no recomendable cuando son de grandes dimensiones o cuando las condiciones operativas llegaran

a dificultar su reemplazo. Este es un procedimiento que afecta al diseño o configuración de las instalaciones.

5.4.2 Estrangulamiento Superficial

Como ya se mencionó, colocar una válvula superficial para estrangular el flujo es una acción considerada como un cambio operacional o de procedimientos. En las Figs. 5.27, 5.28 y 5.29 observaremos como el flujo se estabiliza al estrangularlo, reduciendo la apertura de esta válvula.

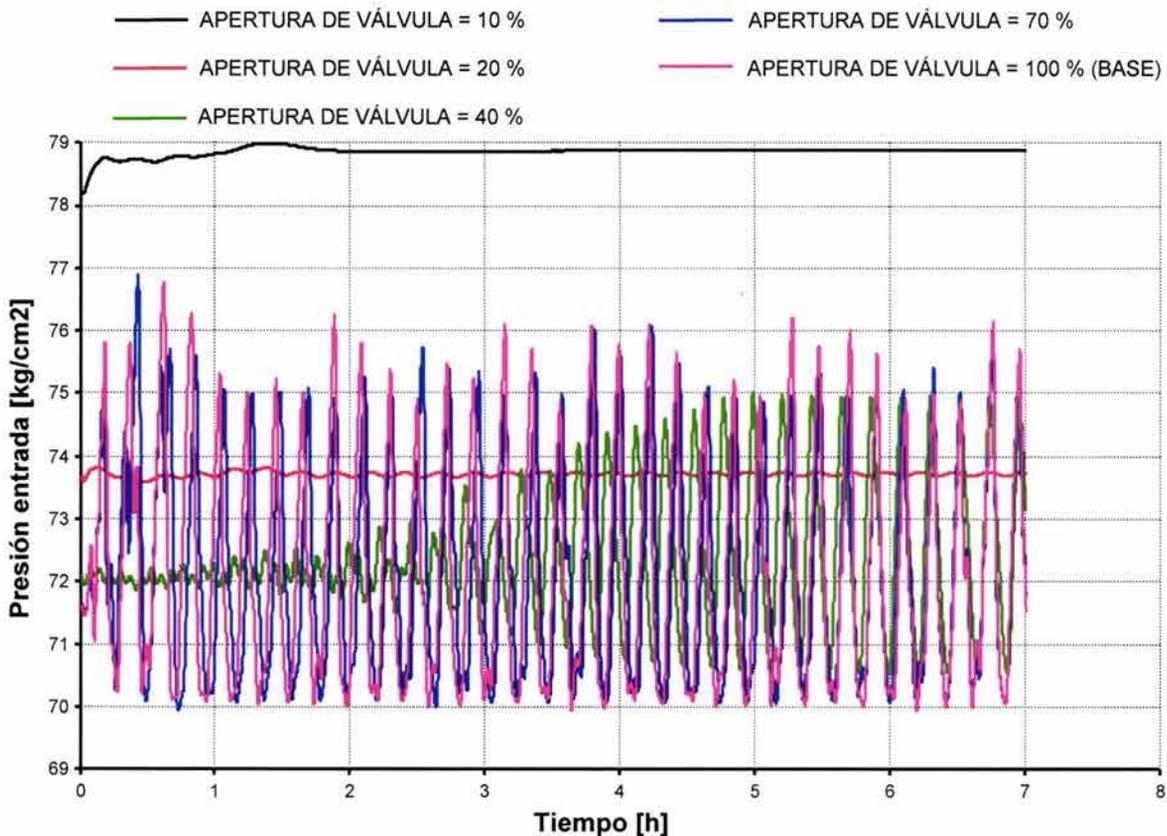


Fig. 5.27. Presión a la entrada para diferentes aperturas de la válvula.

En la Fig. 5.27 se puede observar que, bajo las condiciones existentes en el sistema, se requiere estrangular considerablemente (dejando una apertura de la válvula de sólo el 20%) para estabilizar la presión a la entrada del sistema. En este caso su valor sería aproximadamente de 73.7 kg/cm² y se mantendría casi constante. Para aperturas de la válvula menores al 20% el sistema se estabiliza

pero se crea, como es de esperarse, una mayor contrapresión, que tiene un efecto directo sobre la producción que puede obtenerse del sistema, la cual se reduce.

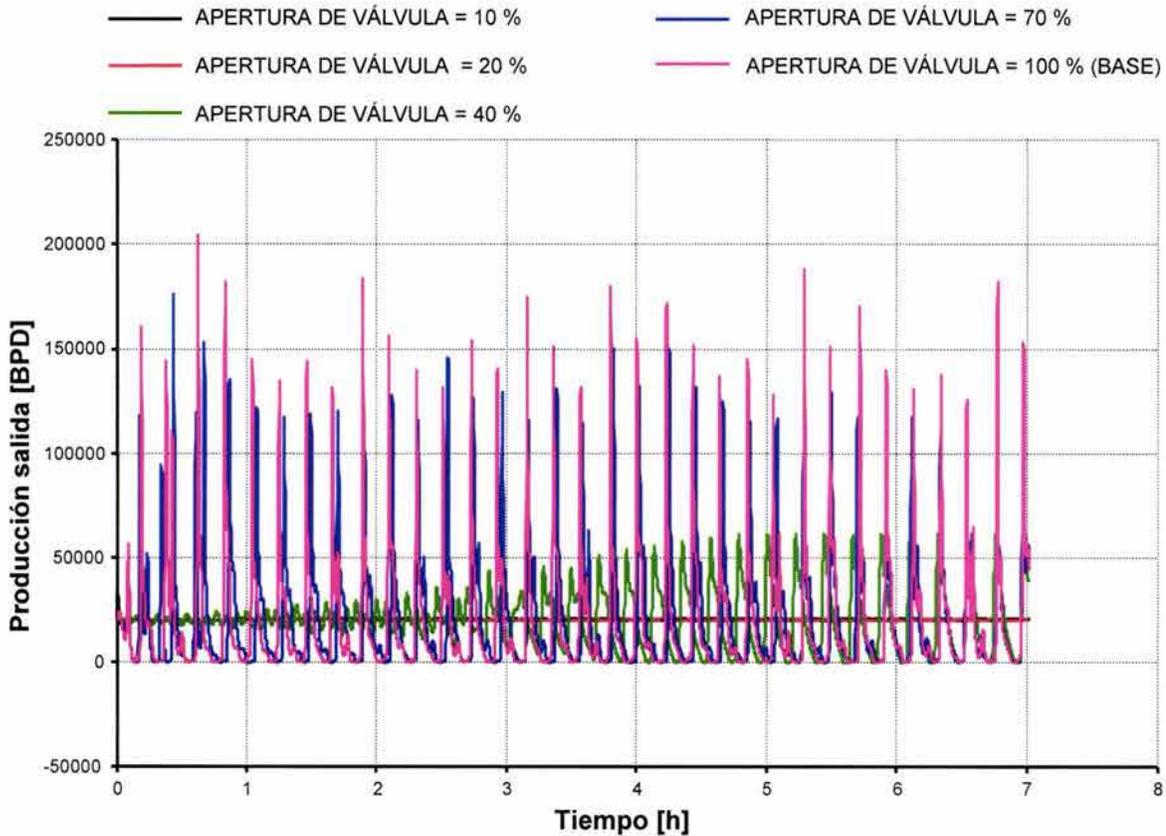


Fig. 5.28. Producción de líquido a la salida para diferentes aperturas de la válvula.

La producción que puede aportar el sistema puede observarse en la Fig. 5.28. Al igual que en lo estudiado en la Fig. 5.27, para aperturas grandes de la válvula, se tiene un sistema muy inestable que presenta, en este caso, variaciones importantes en la producción de líquido a la salida. Por el contrario, si se consideran aperturas pequeñas (estrangulamiento importante) el sistema se estabiliza. En este caso se observa que la producción a la salida es prácticamente la misma (aproximadamente de 20,000 BPD) si se consideran aperturas del 10% y del 20%. Por lo tanto, si se eligiera al estrangulamiento como opción para eliminar el bacheo, se tendría que analizar el comportamiento de otros parámetros para decidir el valor más adecuado de la apertura de la válvula.

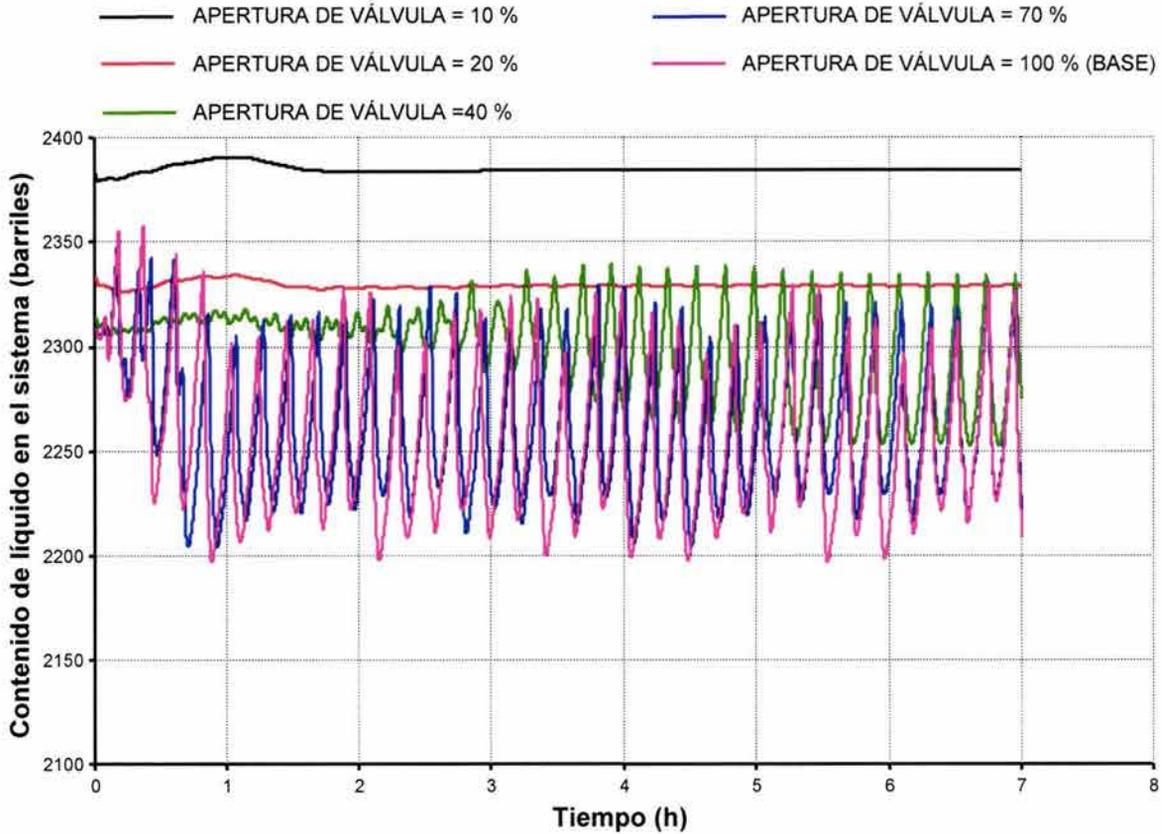


Fig. 5.29. Contenido de líquido en el sistema para diferentes aperturas de la válvula.

Una vez más, al analizar el comportamiento del contenido total de líquidos en el sistema, con ayuda de la Fig. 5.29, se tiene que se requiere por lo mucho de una apertura de la válvula del 20% para que el inventario de líquidos se mantenga “constante”. Del análisis de estas tres figuras puede concluirse que la apertura más adecuada, para fines técnicos (más no necesariamente también económicos) en el sistema en estudio considerado, es del 20%.

La técnica de estrangular el flujo, aunque efectiva y económica, no es muy recomendable, ya que, como ha sido mencionado, tiene la desventaja de reducir significativamente la producción de hidrocarburos, por lo que su aplicación debe ser evaluada minuciosamente, tomando en cuenta aspectos técnicos y económicos.

5.4.3 Inyección de Gas en la Base del Riser

Esta técnica es también del tipo que implica cambios operativos o de procedimientos. El caso considerado ha sido particularmente aquel en el que el gas de inyección es obtenido directamente de la línea de transporte; es decir, el principio de esta técnica radica en la transferencia de gas de la línea hacia el riser en posiciones arriba de la base de éste (Fig. 5.30), también conocido como "autolevantamiento".

El proceso de transferencia reduce la columna hidrostática en el riser y la presión en la línea, disminuyendo o eliminando el bacheo presente. Es importante señalar que al considerar esta técnica de inyección de gas, la cantidad de éste está limitado al gasto que puede obtenerse de la mezcla transportada en el sistema.

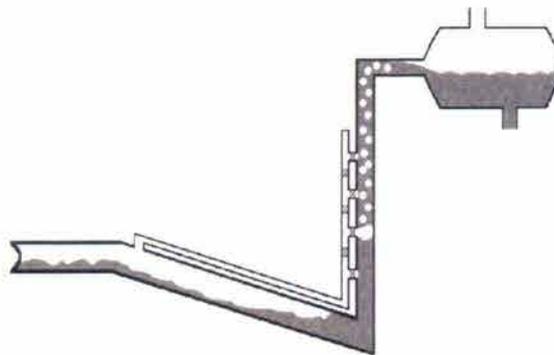


Fig. 5.30. Esquema de la técnica de eliminación de bacheo por "autolevantamiento".

En la Fig. 5.31 se muestra el comportamiento esperado de la presión a la entrada del sistema al aplicar esta técnica de minimización del flujo bache. Como se puede ver, el comportamiento de la presión no llega a estabilizarse aún y para gastos de inyección de gas tan grandes como 8 kg/s, ya que para este caso, ésta aún exhibe variaciones de aproximadamente 1 kg/cm².

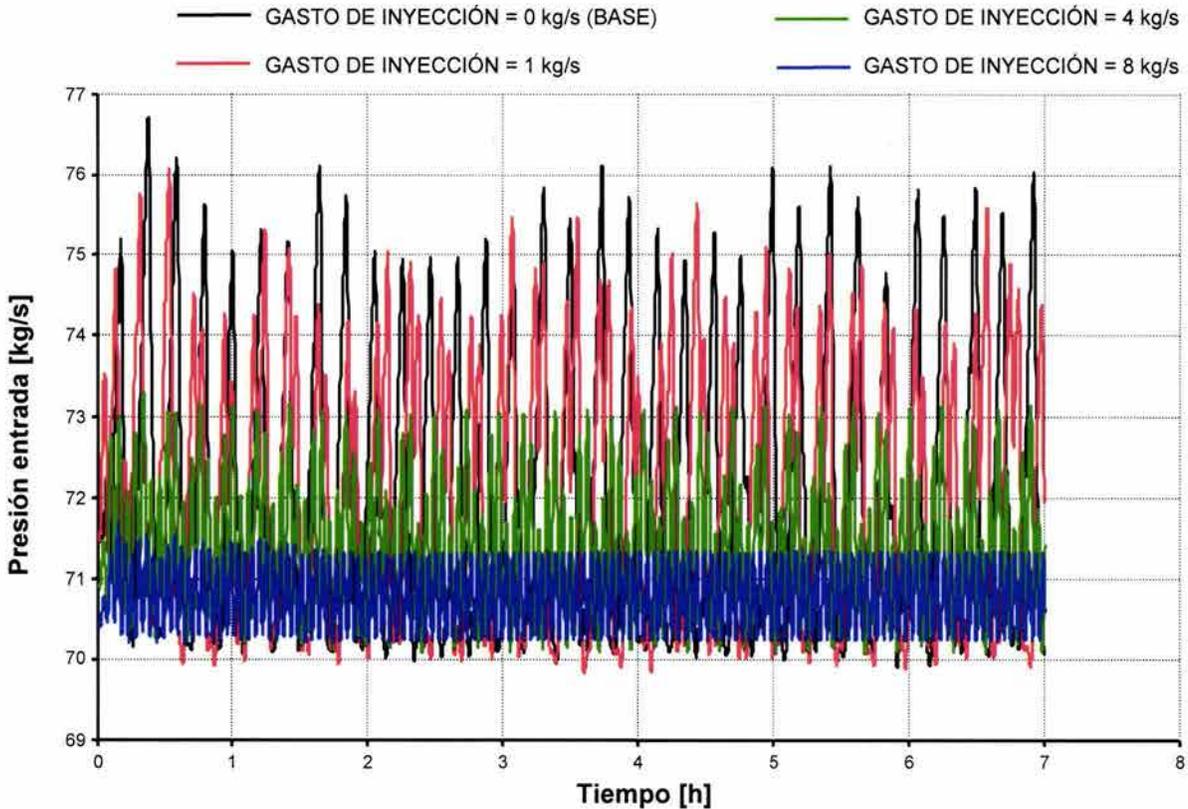


Fig. 5.31. Presión a la entrada para diferentes gastos de inyección de gas.

De igual forma se observa, al analizar los comportamientos de la producción de líquido a la salida en la Fig. 5.32 y del contenido total de líquido en el sistema en la Fig. 5.33, que se requieren de mayores gastos de inyección de gas para estabilizar completamente el sistema, ya que estos dos parámetros de medición muestran aún variaciones importantes con respecto al tiempo.

Paralelamente a este procedimiento podrían evaluarse otros, en los que el suministro de gas para la inyección proviniera de fuentes externas al sistema de transporte. La implementación de estas otras técnicas debe evaluarse ya que al implicar mayores inversiones y costos pueden hacerlos no rentables. Desde el punto de vista de la simulación, inyectar un gas de composición diferente al que se está transportando en el sistema, implica incorporar un archivo que contenga la información de las propiedades de este nuevo fluido, de tal manera que se puedan determinar las características y el comportamiento de la mezcla resultante.

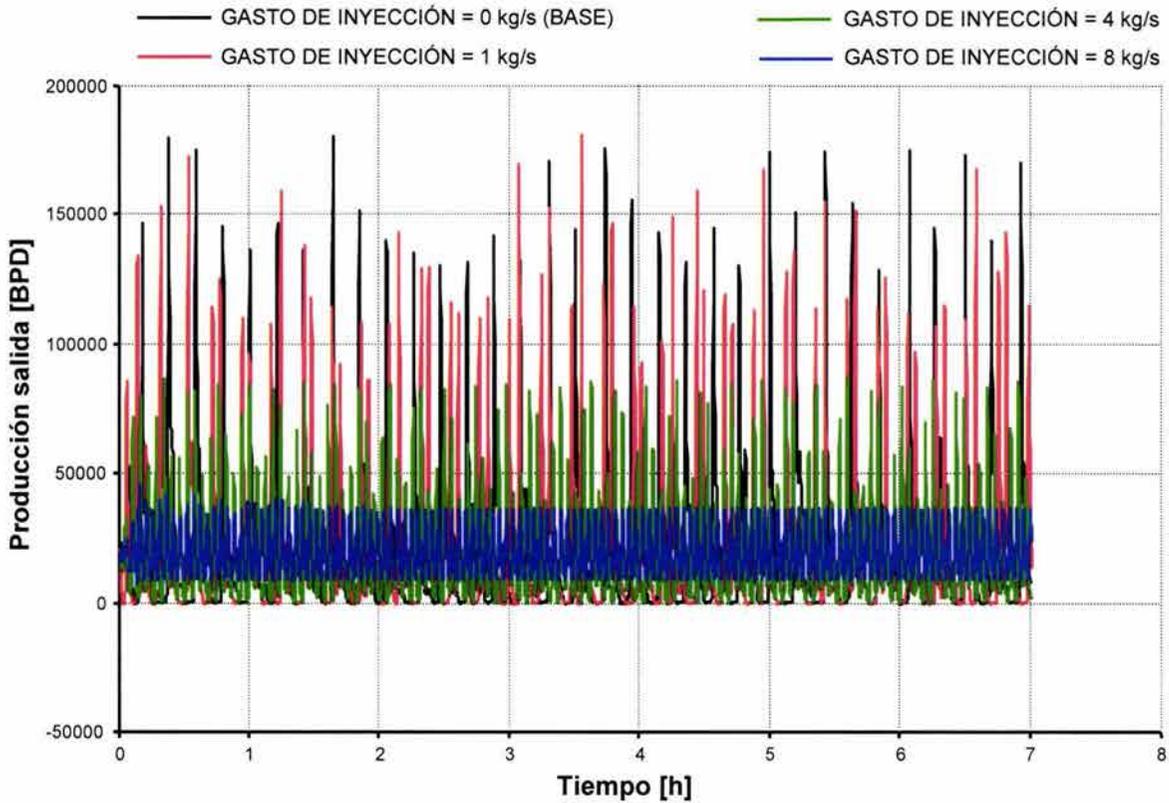


Fig. 5.32. Producción de líquido a la salida para diferentes gastos de inyección de gas.

En las Figs. 5.32 y 5.33 se observa, además, que cuando se consideran gastos de inyección de gas grandes, la frecuencia de bacheo aumenta y el volumen de estos baches disminuye (la variación es menor en el eje de las ordenadas y se tienen líneas más continuas en el eje de las abscisas), por lo que se tiene un sistema más estable en el que el bacheo causará menos problemas debido a que la llegada de los fluidos será más continua y homogénea y los volúmenes más pequeños.

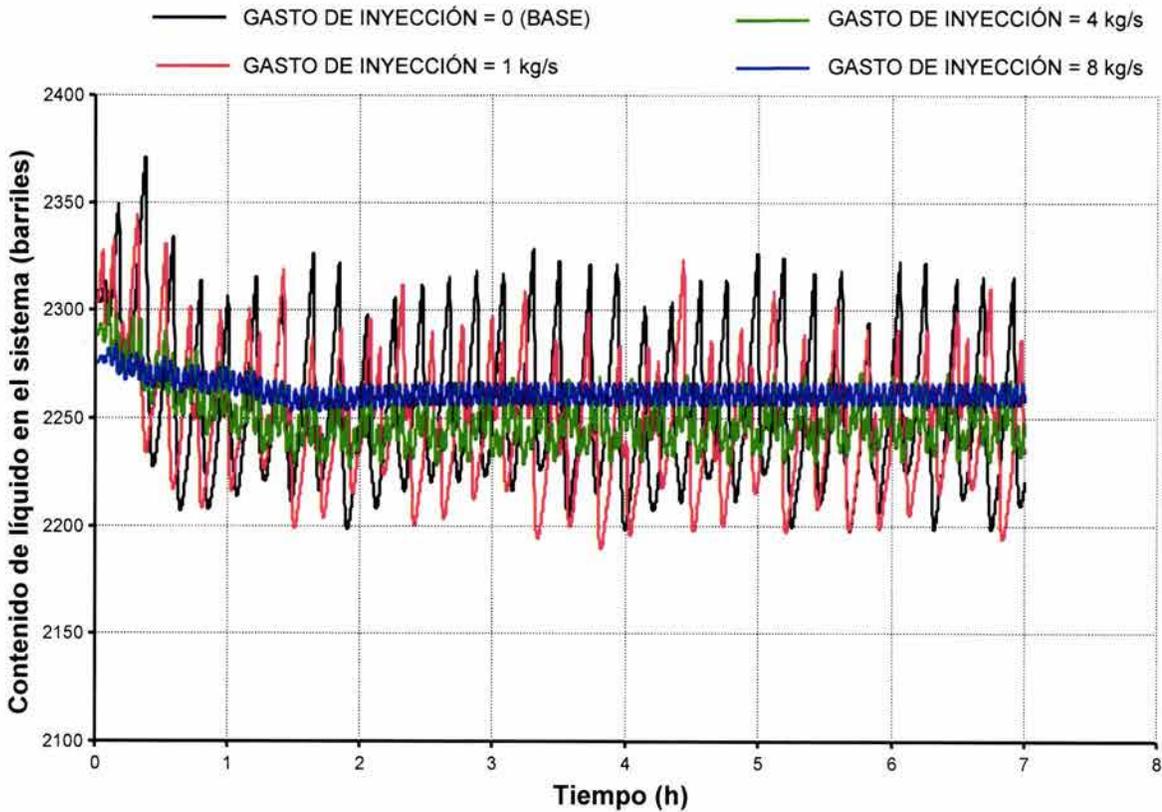


Fig. 5.33. Contenido de líquido en el sistema para diferentes gastos de inyección de gas.

5.4.4 Combinación de Procedimientos Operativos

Aunado a los estudios anteriores, se realizó uno más en el que se considera la combinación de las técnicas de estrangulamiento superficial e inyección de gas en la base del riser. Estos estudios fueron realizados de la siguiente manera: se determinó cuál sería el gasto mínimo de inyección de gas para estabilizar el sistema, eliminando el bacheo, definidas diferentes aperturas de la válvula que van del 70% al 5%.

Este procedimiento es importante, por ejemplo, cuando la implementación de una sola de las técnicas, en forma independiente, no es posible o recomendable; ya sea porque se tiene una cantidad pequeña de gas para inyección o cuando estrangulamientos grandes de la válvula resultarían en la generación de grandes contrapresiones y en considerables volúmenes de la producción diferidos. Los resultados se muestran en la Tabla 5.2

TABLA 5.2

COMBINACIÓN DE PROCEDIMIENTOS OPERATIVOS PARA ELIMINAR EL BACHEO

Apertura de Válvula %	Gasto Másico de Gas Kg/s	¿Elimina bacheo por conformación del terreno?
70	≥ 8	SÍ
40	≥ 6	SÍ
37	≥ 6	SÍ
33	≥ 5	SÍ
30	≥ 4	SÍ
27	≥ 3	SÍ
23	≥ 2	SÍ
20	≥ 1	SÍ
17	≥ 0	SÍ
15	≥ 0	SÍ
12	≥ 0	SÍ
10	≥ 0	SÍ
7	≥ 0	SÍ
5	≥ 0	SÍ

En la Tabla 5.2 se puede observar, como es de esperarse, que a medida que la apertura de la válvula es menor se requiere cada vez un menor gasto de inyección de gas para eliminar el bacheo. Así, para aperturas grandes de la válvula (70%) se requieren gastos de inyección grandes (8 kg/s o mayores), mientras que no se requiere inyectar gas, para estabilizar el sistema, cuando la apertura de la válvula es igual o menor a 17%.

Si recordamos los resultados para cuando se consideraron las técnicas de estrangulamiento e inyección de gas en la base del riser, de manera independiente, se tiene que para conseguir “estabilizar” el flujo en el sistema y reducir el bacheo, las condiciones requeridas fueron: apertura máxima de la válvula de 20 % y gastos másicos de inyección mayores a 8 Kg/s.

Por otra parte, considerando una combinación de las técnicas antes descritas, bastaría con implementar alguna de las combinaciones de apertura de la válvula y gasto de inyección correspondiente, presentadas en la Tabla 5.2, para lograr

condiciones estables en el sistema. Como puede observarse, algunas de ellas implican condiciones menos extremas, en cuanto a cierre de la válvula y gastos de inyección, lo que representa mayores posibilidades para su aplicación y una menor afectación al sistema.

Como se ha mencionado, la selección de la técnica o técnicas más adecuada para la minimización del bacheo, en un sistema de transporte, no sólo implica el estudio del aspecto técnico, sino además requiere involucrar la parte económica, con tal de determinar la mejor opción en todos aspectos.

En este trabajo sólo se estudian algunos aspectos técnicos más no el análisis económico, para evaluar la factibilidad de su aplicación.

5.4.5 Métodos de Control

El enfoque y la tendencia hacia la aplicación de los métodos de control como alternativa para minimizar el flujo bache, se ha incrementado en los últimos años en la Industria Petrolera. Lo anterior debido principalmente a la tendencia generalizada hacia la implementación de sistemas integrales de control en los procesos industriales y como una alternativa de los métodos tradicionales que presentan grandes desventajas.

Los métodos de control han demostrado ser técnicas eficientes y económicas para el control del bacheo y consisten, en general, en la implementación de válvulas controladas de forma automática y dinámica, basándose en la información recibida de mediciones de presión y de otras características del flujo, en tiempo real, a lo largo de la tubería de transporte (Havre, 2002). Así, el parámetro a controlar y regular, de forma dinámica, es la apertura de estas válvulas con el objetivo de estabilizar el flujo.

Se ha observado que pequeños ajustes en la apertura de las válvulas, las cuales reciben señales del sistema de control, son suficientes para estabilizar el

comportamiento del sistema y eliminar, entre otros inconvenientes, el flujo bache (Kovalev, 2003). Estas técnicas no presentan las desventajas de las soluciones “pasivas” para la minimización del bacheo como lo son el estrangulamiento superficial y los cambios en el diseño y/o configuración de las instalaciones.

Más que eliminar o reducir el bacheo presente en un sistema, de la manera en que los procedimientos tradicionales (estrangulamiento, cambios en el diseño, cambios operativos) lo hacen, estas técnicas están enfocadas a la predicción y evaluación de las características del flujo que está por llegar a determinado punto del sistema, con el objetivo de realizar las acciones necesarias para evitar que inestabilidades del flujo causen problemas y daños a los equipos del sistema de producción.

La implementación y evaluación de diversos sistemas que hacen uso de los métodos de control han sido reportados en la literatura (Kovalev, 2003; Havre, 2002; Drengstig, 2001). Los resultados muestran que estos métodos son eficientes, económicos y confiables en la predicción de las características del flujo bache y en su control.

5.5 Discusión

El estudio del caso base de simulación mostró que el sistema en cuestión presentaba bacheo, por lo que se realizaron análisis paramétricos para definir el comportamiento que éste tendría cuando en él se tuvieran cambios en los valores de los parámetros y/o variables más importantes, tales como el diámetro de las tuberías, el gasto que entra al sistema, la presión a la salida, y algunas propiedades importantes de los fluidos como son las fracciones de volumen de agua y de gas.

Al analizar los parámetros de medición obtenidos de los estudios paramétricos se obtiene una idea clara de cuales son los parámetros más importantes que deben considerarse al revisar las características del flujo bache y el comportamiento del sistema. A partir de estos resultados se elaboraron mapas de patrones de flujo que, no obstante, presentan las siguientes limitaciones:

- El criterio elegido para la selección de los parámetros y/o variables, para la construcción de estos mapas, fue tomar aquellos que tuvieran mayor peso sobre el proceso de bacheo con un criterio particular ya que *no es común* encontrarlos en la literatura.
- El uso de la información contenida en los mapas generados como ya fue explicado, debe realizarse con cautela y criterio, ya que su exactitud y confiabilidad se ve afectada al existir algún grado de *interdependencia* de las variables consideradas en los estudios paramétricos.
- Aun y cuando cada uno de los mapas fue generado a partir de los resultados obtenidos de un gran número de corridas o simulaciones numéricas, la determinación de las diferentes regiones y de la transición entre diferentes patrones de flujo aún no es detallada, por lo que se recomienda aumentar el número de casos a simular. Esta decisión depende

básicamente del tiempo de cálculo y de análisis que se esté dispuesto a destinar para su elaboración.

Una de las contribuciones más importantes de este trabajo son los resultados obtenidos en la Sección 5.4, en la que se analizaron algunas de las soluciones más frecuentes para tratar el problema del bacheo en sistemas de transporte y que se refieren, en general, a cambios en el diseño (analizando la instalación de un riser de diferente diámetro), cambios operacionales (estudiando el comportamiento del sistema al estrangular el flujo, inyectar gas en la base del riser y una combinación de ambas técnicas) y la implementación de métodos de control (realizando una revisión de la literatura).

Considerar una combinación de las técnicas operativas estudiadas, para la minimización del bacheo (estrangulamiento e inyección de gas) es una buena opción para lograr condiciones estables en el sistema. Algunas combinaciones de apertura de la válvula y gasto de inyección presentan mayores posibilidades para su aplicación y una menor afectación al sistema.

Como ya se ha comentado, la selección de la propuesta de solución más adecuada debe realizarse tomando en cuenta aspectos técnicos y económicos. En este caso, el uso adecuado de simuladores de flujo juega un papel muy importante, ya sea para el diseño de instalaciones o para el análisis de sistemas existentes.

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

1. El Flujo Bache es un proceso de importancia en la Industria Petrolera debido a los grandes retos y problemática que origina y dado que se presenta bajo un gran rango de parámetros de flujo y condiciones operativas. Este proceso adquiere gran relevancia en instalaciones marinas en donde la presencia de risers inducen el desarrollo o la presencia del bacheo.
2. El conocimiento detallado de las características del flujo bache permite seleccionar las herramientas más adecuadas para su estudio. El flujo bache es un proceso dinámico o variable y requiere del uso de metodologías que consideren flujo multifásico transitorio para su análisis.
3. Los registros y mediciones de parámetros tales como presión, producción y volúmenes de los fluidos en el sistema, demostraron ser instrumentos valiosos que nos ayudan a identificar y medir el grado de estabilidad o inestabilidad del mismo.

4. Los siguientes parámetros: diámetro de las tuberías, gasto a la entrada, presión a la salida del sistema y las fracciones de volumen de agua y de gas, son algunos de los más importantes en el estudio del flujo multifásico y que más afectan al bacheo.
5. Los resultados obtenidos de los estudios paramétricos indican que el flujo bache es más frecuente y severo en tuberías verticales con flujo ascendente (risers) y en terrenos sinuosos, que en tuberías horizontales o casi horizontales. Un correcto estudio y análisis de los mapas de patrones de flujo, para un sistema en particular, permite definir las regiones o condiciones más estables y apropiadas para su operación.
6. Los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas para el problema definido en este trabajo, muestran que las regiones en las que se tiene un flujo “estable” son aquellas en las que: el diámetro de las tuberías es menor de 0.3 [m], se tienen gastos máxicos de entrada mayores de 65 [kg/s] y la presión a la salida del sistema es mayor a 70 [kg/cm²].
7. Se mostró que el estrangulamiento del flujo, la inyección de gas en la base del riser o una combinación de ambos procedimientos, son buenas técnicas para la minimización del bacheo; sin embargo, podrían originar problemas como reducciones importantes de la producción e importantes gastos operativos, por lo que su aplicación debe evaluarse meticulosamente.
8. Este estudio mostró que la inyección de gas en la base del riser considerando “autolevantamiento” en una técnica eficiente, desde el punto de vista técnico, y que presenta grandes ventajas operativas; su implementación debe ser evaluada de manera completa, para determinar la factibilidad de su aplicación en instalaciones reales que presenten algún grado de bacheo.

9. Los métodos de control han demostrado ser técnicas eficientes y económicas para el control del bacheo, las cuales consisten en la regulación dinámica de la apertura de válvulas con información del flujo, tomada en tiempo real.
10. Es necesario tener un conocimiento amplio y detallado de las condiciones bajo las que se presentará el flujo bache para definir alternativas que permitan reducir o evitar sus efectos; ya sea en el diseño o en la operación de sistemas ya existentes. La selección de las técnicas más adecuadas debe involucrar no sólo el aspecto técnico, sino también la parte económica.
11. La realización de estudios numéricos mediante el empleo de simuladores de flujo constituye una herramienta muy útil y valiosa, cuando es utilizada de forma adecuada.

6.2 Recomendaciones

1. El problema presentado en este trabajo representa un primer paso en el estudio del flujo bache y posibles métodos de minimización; se recomienda analizar sistemas menos simplificados que incluyan equipos de proceso y otros accesorios más cercanos a los sistemas reales. Si es posible debe tomarse información de instalaciones reales.
2. Analizar con más detalle otros aspectos del modelo y de los elementos que utiliza para trabajar, tales como parámetros de simulación, archivos de composición y características físicas del sistema, con el propósito de obtener resultados más confiables y de una forma más rápida y eficiente.
3. El uso de la información contenida en los mapas generados en este trabajo, debe realizarse con cautela y criterio, ya que su exactitud y confiabilidad se ve afectada al existir algún grado de interdependencia de las variables consideradas en la elaboración de los estudios paramétricos.

4. El número de corridas de simulación deberán ser suficientes para definir claramente las diferentes regiones y la transición entre los diferentes patrones d flujo. Esta decisión depende básicamente del tiempo de cálculo y de análisis que se esté dispuesto a destinar para su elaboración.
5. Incluir, en estudios futuros, resultados para la minimización del flujo bache, usando la técnica de inyección de gas en la base del riser, considerando que el fluido de inyección se toma de fuentes alternas al sistema en estudio y utilizando diferentes gases.
6. No perder de vista las consideraciones económicas para determinar la solución más adecuada, al analizar sistemas en estudios futuros.
7. En estudios futuros pueden incluirse, además del bacheo, algunos otros aspectos que originan problemas en el flujo multifásico como son la formación y el depósito de asfaltenos y parafinas, la formación de hidratos, corrosión, etc., los cuales pueden ser incluidos en el modelo base considerado en este trabajo.

Nomenclatura

Cantidades

v_s	Velocidad superficial	[m/s]
\dot{q}	Gasto másico	[kg/s]
q	Gasto volumétrico	[BPD]
A	Área transversal de la tubería	[m ²]
C	Fracción de volumen de entrada	
α_L	Fracción de volumen de líquido	
α_G	Fracción de volumen de gas	
α_w	Porcentaje de agua	
v	Velocidad real	[m/s]
V	Volumen	[m ³]
t	Tiempo	[s]
D	Diámetro	[m]
f	Factor de fricción, frecuencia de bacheo	
p	Presión	[kg/cm ²]

Subíndices

G	Relativo a la fase gaseosa
L	Relativo a la fase líquida
M	Relativo a la mezcla
O	Relativo al aceite
W	Relativo al agua
F	Relativo a los fluidos
e	Relativo a la entrada del sistema
s	Relativo a la salida del sistema
amb	Relativo a condiciones ambientales

Símbolos Griegos

θ	Ángulo de inclinación con respecto a la horizontal
Δ	Cambio o Variación
ε	Rugosidad

Bibliografía

- Barnea, D. (1987): "A Unified Model for Predicting Flow-Pattern Transitions for the Whole Range of Pipe Inclinations". *Int. J. Multiphase Flow*, 13, No. 1, 1-12.
- Barnea, D. (1985): "Gas-Liquid Flow in Inclined Tubes: Flow Pattern Transition for Upward Flow". *Chem. Eng. Sci.*, 40, 131.
- Bendiksen, K.H., Malnes, D., Moe, R. y Nuland, S. (1991). *The Dynamic Two-Fluid Model OLGA: Theory and Application*. SPE 19451.
- Brill, J.P. (1987): "Multiphase Flow in Wells". *Journal of Petroleum Technology (JPT)*, enero, 15-21.
- Brill, J.P. y Arirachakaran, S.J. (1992): "State of the Art in Multiphase Flow". *Journal of Petroleum Technology (JPT)*, mayo, 538-541.
- Brown, K.E. (1977). *The Technology of Artificial Lift Methods*. Vols. 1 y 4. E.U.A.: PennWell Publishing Co.
- Caetano, E.F., Shoham, O. y Brill, J.P. (1992): "Upward Vertical Two Phase Flow through an Annulus Part II: Modeling Bubble, Slug and Annular Flow". *ASME J. Energy Resour. Technol.*, 114, 13.
- Chen, Y. (2001). *Modeling Gas-Liquid Flow in Pipes: Flow Pattern Transitions and Drift-Flux Modeling*. E.U.A. Tesis de Maestría, Universidad de Stanford.
- Drengstig, T. y Magndal, S. (2001). *Slug Control of Production Pipeline*. Stavanger, Noruega. Departamento de Ingenierías Eléctrica y en Computación, Universidad de Stavanger (paper).
- Dukler, A.E. y Hubbard, M.G. (1975): "A Model for Gas-Liquid Slug Flow in Horizontal and Near Horizontal Tubes". *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 14, 377.
- Fernandes, R.C., Semiat, R. y Dukler, A.E. (1983): "Hydrodynamic Model for Gas-Liquid Slug Flow in Vertical Tubes". *AIChE Journal*, 29, 981.
- Garaicochea, F., Bernal, C. y López, O. (1991). *Transporte de Hidrocarburos por Ductos*. México, D.F.: Colegio de Ingenieros Petroleros de México, A.C.
- Gomez, L.E., Shoham, O., Schmidt, Z., Chokshi, R.N. Brown, A. y Northug, T. (1999). *A Unified Mechanistic Model for Steady-State Two-Phase Flow in*

- Wellbores and Pipelines*. SPE 56520. Artículo presentado en la Conferencia y Exhibición Técnica Anual de la Sociedad de Ingenieros Petroleros (SPE), Houston, Texas, 3-6 octubre.
- Gomez, L.E., Shoham, O., Schmidt, Z., Chokshi, R.N. y Northug, T. (2000a) "Unified Mechanistic Model for Steady-State Two-Phase Flow: Horizontal to Vertical Upward Flow". *SPE Journal*, septiembre, 5, 339-350.
 - Gomez, L.E., Shoham, O., y Taitel, Y. (2000b): "Prediction of Slug Liquid Holdup -Horizontal to Upward Vertical Flow". *Int. J. Multiphase Flow*, 26, No. 3, 517.
 - Govier, G.W. y Aziz, K. (1972). *The Flow of Complex Mixtures in Pipes*. New York, NY.: Van Nostrand Reinhold Company.
 - Havre, K. y Dalsmo, M. (2002). *Active Feedback Control as a Solution to Severe Slugging*. SPE 79252. Artículo presentado en la Conferencia y Exhibición Técnica Anual, New Orleans, 30 septiembre-3 octubre.
 - Hetsroni, G. (1982). *Handbook of Multiphase Systems*. E.U.A.: Hemisphere Publishing Co.
 - Hout, R., Barnea, D. y Shemer, L. (2000). *On The Statistical Parameters of Vertical Gas-Liquid Slug Flow*. Artículo presentado en la 38ª Reunión Europea de Flujo Multifásico, Karlsruhe, Alemania, 29-31 de mayo.
 - Hubbard, M.G. y Dukler, A.E. (1966). *The Characterization of Flow Regimes for Horizontal Two-Phase Flow*. E.U.A. Recopilación de artículos sobre transferencia de calor y mecánica de fluidos. Universidad de Stanford.: Press.
 - James, P.W. (1987): "Developments in the Modeling of Horizontal Annular Two Phase Flow". *Int. J. Multiphase Flow*, 13, No.2, 173.
 - Joseph, D.D., Bannwart, A.C. y Liu, Y.J. (1996): "Stability of Annular Flow and Slugging". *Int. J. Multiphase Flow*, 22, No. 6, 1247-1254.
 - Klebert, P. y Nydal, O.J. (1997). *Object Oriented Simulation of Multiphase Flow*. Noruega. Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología (NTNU) (paper).
 - Kovalev, K., Cruickshank, A. y Purvis, J. (2003). *The Slug Suppression System in Operation*. SPE 84947. Artículo presentado en la Reunión "Instalaciones Marinas en Europa, 2003", Aberdeen, Reino Unido, 2-5 septiembre.

- Lezeau, P.A. (1997). *An Adaptive Quasi-Newton Coupled Multigrid Solver for the Simulation of Steady Multiphase Flows*. U.K. Tesis de Doctorado, Universidad de Cranfield.
- Lezeau, P.A. y Thompson, C.P. (1996). *Numerical Simulation of One-Dimensional Transient Multiphase Flow*. U.K.: Grupo de Matemáticas Aplicadas y Computación, Universidad de Cranfield (paper).
- Lopez, D., Dhulesia, H., Leporcher, E. y Duchet-Suchaux, P. (1997). *Performances of Transient Two-Phase Flow Models*. SPE 38813. Artículo presentado en la Conferencia y Exhibición Técnica Anual, San Antonio, Texas, 5-8 octubre.
- Mandhane, J.M., Gregory, G.A. y Aziz, K. (1974): "A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes". *Int. J. Multiphase Flow*, 1, 537-553.
- Marcano, R., Chen, X.T., Sarica, C. y Brill, J.P. (1988). *A Study of Slug Characteristics for Two-Phase Horizontal Flow*. SPE 39856. Artículo presentado en la Conferencia y Exhibición Petrolera Internacional, Villahermosa, México, 3-5 marzo.
- Oliemans, R.V.A., Pots, B.F.M. y Trompe, N. (1986): "Modeling of Annular Dispersed Two-Phase Flow in Vertical Pipes". *Int. J. Multiphase Flow*, 12, No.5, 711.
- Ouyang, L.-B. (1995). *Stratified Flow Model and Interfacial Fraction Factor Correlations*. E.U.A.: Tesis de Maestría, Universidad de Stanford.
- Ouyang, L.-B., y Aziz, K. (2000): "A Homogeneous Model for Gas-Liquid Flow in Horizontal Wells". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Elsevier, 27, 119-128.
- Ouyang, L.-B., y Aziz, K. (2001): "Transient Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes with Radial Influx or Efflux". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Elsevier, 30, 167-179.
- Petalas, N. y Aziz, K. (1996). *Development and Testing of Mechanistic Models for Multiphase Flow in Pipes. Phase Two: An Improved Model for Stabilized Flow at All Inclinations*. E.U.A. Reporte entregado a los miembros del área de Simulación de Yacimientos y de Proyectos de Inyección y Productividad de Pozos Horizontales, Universidad de Stanford (paper).
- Pickering, P.F., Hewitt, G.F., Watson, M.J. y Hale, C.P. (2001). *The Prediction of Flows in Production Risers- Truth & Myth*. U.K. Departamento de Ingeniería y Tecnología Química, Colegio Imperial de Ciencia, Tecnología y Medicina (paper).

- Sharma, Y., Ihara, M. y Manabe, R. (2002). *Simulating Slug Flow in Hilly-Terrain Pipelines*. SPE 74359. Artículo presentado en la Conferencia y Exhibición Petrolera Internacional, Villahermosa, México, 10-12 febrero.
- Shoham, O. (1982) *Flow Pattern Transitions and Characterization in Gas-Liquid Two Phase Flow in Inclined Pipes*. Tel-Aviv, Israel. Tesis de Doctorado, Universidad de Tel-Aviv.
- Shoham, O., y Taitel, Y. (1984): "Stratified Turbulent-Turbulent Gas-Liquid Flow in Horizontal and Inclined Pipes". *AIChE Journal*, 30, 377.
- Taitel, Y., y Barnea, D. (2000). *Slug-Tracking Model for Hilly Terrain Pipelines*. SPE 61445. Artículo revisado para su publicación a partir del artículo 56521, presentado en la Conferencia y Exhibición Técnica Anual, Houston, Texas, 3-6 octubre.
- Taitel, Y., y Barnea, D. (1999). *Slug Tracking in Hilly Terrain Pipelines*. SPE 56521. Artículo presentado en la Conferencia y Exhibición Técnica Anual, Houston, Texas, 3-6 octubre.
- Taitel, Y., Barnea, D. y Dukler, A.E. (1980): "Modeling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes". *AIChE Journal*, 26, No.3, 345-354.
- Taitel, Y. y Dukler, A.E. (1976): "A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow". *AIChE Journal*, 22, No.1, 47-55.
- Wallis, B.G. (1969). *One Dimensional Two-Phase Flow*. E.U.A.: McGraw-Hill Inc.
- Xiao, J.J., Shoham, O. y Brill, J.P. (1990). *A Comprehensive Mechanistic Model for Two-Phase Flow*. SPE 20631. Artículo presentado en la 65ª Conferencia y Exhibición Técnica Anual de la Sociedad de Ingenieros Petroleros (SPE), New Orleans, L.A., 23-26 septiembre.
- Zheng, G.H., Brill, J.P. y Shoham, O. (1992). *An Experimental Study of Two-Phase Slug Flow in Hilly Terrain Pipelines*. SPE 24788. Artículo presentado en la 67ª Conferencia y Exhibición Técnica Anual de la Sociedad de Ingenieros Petroleros (SPE), Washington, D.C., 4-7 octubre.

Apéndice A

Definición del caso base de simulación (base.inp)

```
*****
!- CASE Definition
!-----
CASE AUTHOR="Roque Perea", \
  DATE="Septiembre del 2004", \
  INFO="Caso de estudio para realizar las aplicaciones para la tesis de licenciatura ", \
  PROJECT="Estudio Numérico del Flujo Bache", \
  TITLE="Definición de caso base"

!
*****
!- OPTIONS Definition
!-----
OPTIONS COMPOSITIONAL=OFF, DEBUG=ON, PHASE=THREE, POSTPROCESSOR=ON,
SLUGVOID=SINTEF, \
  STEADYSTATE=ON, TEMPERATURE=WALL

!
*****
!- FILES Definition
!-----
FILES PVTFILE="ol-water-1.tab"

!
*****
!- INTEGRATION Definition
!-----
INTEGRATION CPULIMIT=1 d, DTSTART=0.01 s, ENDTIME=7 h, MAXDT=10 s, MAXTIME=0 s,
\
  MINDT=0.01 s, MINTIME=0 s, NSIMINFO=10, STARTTIME=0 s

!
*****
!- TABLE Definition
!-----
TABLE LABEL=TABLE-1, XVARIABLE=OPEN, YVARIABLE=CV
TABLE POINT=( 0, 0 )
TABLE POINT=( 0.1, 114 )
TABLE POINT=( 0.2, 209 )
TABLE POINT=( 0.3, 319 )
TABLE POINT=( 0.4, 457 )
TABLE POINT=( 0.5, 662 )
TABLE POINT=( 0.6, 1000 )
TABLE POINT=( 0.7, 1510 )
TABLE POINT=( 0.8, 2180 )
TABLE POINT=( 0.85, 2520 )
TABLE POINT=( 0.9, 2860 )
```

TABLE POINT=(1, 3310)

```
*****
! MATERIAL Definition
*****
MATERIAL LABEL=Acero, CAPACITY=500 J/kg-C, CONDUCTIVITY=45 W/m-K, DENSITY=7850
kg/m3, \
    TYPE=SOLID
MATERIAL LABEL=Formacion, CAPACITY=1200 J/kg-C, CONDUCTIVITY=2.5 W/m-K,
DENSITY=1600 kg/m3, \
    TYPE=SOLID
MATERIAL LABEL=Caricita, CAPACITY=2000 J/kg-C, CONDUCTIVITY=0.165 W/m-K,
DENSITY=700 kg/m3, \
    TYPE=SOLID
MATERIAL LABEL=Arena, CAPACITY=1260 J/kg-C, CONDUCTIVITY=2.51 W/m-K,
DENSITY=2240 kg/m3, \
    TYPE=SOLID
MATERIAL LABEL=Cemento, CAPACITY=419 J/kg-C, CONDUCTIVITY=1.5 W/m-K,
DENSITY=2643 kg/m3, \
    TYPE=SOLID
MATERIAL LABEL=Salmuera, CAPACITY=4180 J/kg-C, CONDUCTIVITY=0.7 W/m-K,
DENSITY=1100 kg/m3, \
    EXPANSION=0.0005 1/C, INNEREMISSIVITY=0 , OUTEREMISSIVITY=0 ,
RADIATION=YES, \
    TYPE=FLUID, VISCOSITY=1 cp
MATERIAL LABEL=Lodo, CAPACITY=1800 J/kg-C, CONDUCTIVITY=5 W/m-K, DENSITY=1500
kg/m3, \
    TYPE=SOLID
MATERIAL LABEL=Limestone, CAPACITY=0.22 BTU/Lbm-R, CONDUCTIVITY=0.38 btu/ft-h-R, \
    DENSITY=160 lb/ft3, TYPE=SOLID
MATERIAL LABEL=Gas, CAPACITY=0.5 BTU/Lbm-R, CONDUCTIVITY=0.0164 btu/ft-h-R,
DENSITY=3.659634876 lb/ft3, \
    TYPE=SOLID
MATERIAL LABEL=Arena_fondo, CAPACITY=0.2999956 BTU/Lbm-R, CONDUCTIVITY=1.32894
btu/ft-h-R, \
    DENSITY=106.13066 lb/ft3, TYPE=SOLID
MATERIAL LABEL=Pintura-aislante, CAPACITY=1900 J/kg-C, CONDUCTIVITY=0.3 W/m-K, \
    DENSITY=900 kg/m3, TYPE=SOLID
MATERIAL LABEL=Thermoflo, CAPACITY=1710 J/kg-K, CONDUCTIVITY=0.1695 W/m-K,
DENSITY=805 kg/m3, \
    TYPE=SOLID
```

```
!
*****
!- WALL Definition
-----
! WALL Definition
WALL LABEL=Tubo-pintura, ELECTRICHEAT=OFF, MATERIAL=( Acero, Acero, Pintura-aislante
), \
    POWERCONTROL=OFF, THICKNESS=( 0.01143, 0.00762, 0.00381 ) m
WALL LABEL=Tubo-aislante, ELECTRICHEAT=OFF, MATERIAL=( Acero, Cemento, Cemento ), \
    POWERCONTROL=OFF, THICKNESS=( 0.01905, 0.0381, 0.0508 ) m
WALL LABEL=Esp-10-m, ELECTRICHEAT=OFF, MATERIAL=( Acero, Cemento, Cemento,
Arena_fondo, \
    Arena_fondo, Arena_fondo, Arena_fondo, Arena_fondo, Arena_fondo ),
POWERCONTROL=OFF, \
```

THICKNESS=(0.01905, 0.0254, 0.0254, 0.0508, 0.1016, 0.2032, 0.4064, 0.8128, \
0.7381) m
WALL LABEL=Esp-05-m-1-T, ELECTRICHEAT=OFF, MATERIAL=(Acero, Thermoflo, Cemento, \
Cemento, Arena_fondo, Arena_fondo, Arena_fondo, Arena_fondo, Arena_fondo), \
POWERCONTROL=OFF, THICKNESS=(0.01905, 0.0254, 0.0254, 0.0254, 0.0508, 0.1016, \
0.2032, 0.4064, 0.52) m

!*****

! GEOMETRY Definition

!*****

GEOMETRY LABEL=GEOM_1, XSTART=0 m, YSTART=0 m, ZSTART=0 m

PIPE LABEL=INLET, DIAMETER=0.362 m, ELEVATION=0 m, LENGTH=100 m, NSEGMENTS=2,
\

ROUGHNESS=3e-005 m, WALL=Tube-pintura

PIPE LABEL=INLET_B, DIAMETER=0.362 m, ELEVATION=-173 m, LENGTH=173 m,
NSEGMENTS=3, \
ROUGHNESS=3e-005 m

PIPE LABEL=PIPE_1A, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=0 m, LENGTH=151 m,
NSEGMENTS=2, \
ROUGHNESS=3e-005 m, WALL=Esp-05-m-1-T

PIPE LABEL=PIPE_1, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=-0.001 m, LENGTH=355.217 m,
NSEGMENTS=3, \
ROUGHNESS=3e-005 m

PIPE LABEL=PIPE_16, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=3.507 m, LENGTH=514.012 m,
NSEGMENTS=3, \
ROUGHNESS=3e-005 m

PIPE LABEL=PIPE_17, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=3.508 m, LENGTH=514.012 m,
NSEGMENTS=3, \
ROUGHNESS=3e-005 m

PIPE LABEL=PIPE_18, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=6.165 m, LENGTH=521.536 m,
NSEGMENTS=3, \
ROUGHNESS=3e-005 m

PIPE LABEL=PIPE_19, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=0 m, LENGTH=506.22 m,
NSEGMENTS=3, \
ROUGHNESS=3e-005 m

PIPE LABEL=PIPE_20, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=1.626 m, LENGTH=481.443 m,
NSEGMENTS=3, \
ROUGHNESS=3e-005 m

PIPE LABEL=PIPE_21, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=1.625 m, LENGTH=481.453 m,
NSEGMENTS=3, \
ROUGHNESS=3e-005 m

PIPE LABEL=PIPE_35, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=-1.932 m, LENGTH=486.504 m,
NSEGMENTS=3, \
ROUGHNESS=3e-005 m

PIPE LABEL=PIPE_36, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=0.473 m, LENGTH=408.1 m,
NSEGMENTS=3, \
ROUGHNESS=3e-005 m

PIPE LABEL=PIPE_38, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=0.658 m, LENGTH=230.301 m,
NSEGMENTS=3, \
ROUGHNESS=3e-005 m

PIPE LABEL=PIPE_39, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=-0.903 m, LENGTH=207.402 m,
NSEGMENTS=3, \
ROUGHNESS=3e-005 m

PIPE LABEL=PIPE_41, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=-0.903 m, LENGTH=207.402 m,
NSEGMENTS=3, \
ROUGHNESS=3e-005 m

```

ROUGHNESS=3e-005 m
PIPE LABEL=PIPE_42, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=2.14 m, LENGTH=174.513 m,
NSEGMENTS=3, \
ROUGHNESS=3e-005 m
PIPE LABEL=PIPE_43, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=-0.902 m, LENGTH=207.302 m,
NSEGMENTS=3, \
ROUGHNESS=3e-005 m
PIPE LABEL=PIPE_44, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=-0.902 m, LENGTH=207.302 m,
NSEGMENTS=3, \
ROUGHNESS=3e-005 m
PIPE LABEL=PIPE_47, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=-0.902 m, LENGTH=207.402 m,
NSEGMENTS=3, \
ROUGHNESS=3e-005 m
PIPE LABEL=PIPE_48, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=2.518 m, LENGTH=95.0334 m,
NSEGMENTS=2, \
ROUGHNESS=3e-005 m
PIPE LABEL=PIPE_50, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=1.67 m, LENGTH=231.006 m,
NSEGMENTS=3, \
ROUGHNESS=3e-005 m
PIPE LABEL=PIPE_51, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=1.67 m, LENGTH=231.006 m,
NSEGMENTS=3, \
ROUGHNESS=3e-005 m
PIPE LABEL=PIPE_52, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=2.14 m, LENGTH=174.513 m,
NSEGMENTS=3, \
ROUGHNESS=3e-005 m
PIPE LABEL=PIPE_56, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=-2.4 m, LENGTH=209.014 m,
NSEGMENTS=3, \
ROUGHNESS=3e-005 m
PIPE LABEL=PIPE_59, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=-0.902 m, LENGTH=308.6 m,
NSEGMENTS=4, \
ROUGHNESS=3e-005 m
PIPE LABEL=PIPE_61A, DIAMETER=0.3714 m, ELEVATION=0 m, LENGTH=235.4 m,
NSEGMENTS=5, \
ROUGHNESS=3e-005 m
PIPE LABEL=PIPE_61D, DIAMETER=0.362 m, ELEVATION=-1 m, LENGTH=82.8 m,
NSEGMENTS=2, \
ROUGHNESS=3e-005 m
PIPE LABEL=RISER, DIAMETER=0.362 m, ELEVATION=140 m, LENGTH=140 m,
NSEGMENTS=4, \
ROUGHNESS=3e-005 m, WALL=Tube-pintura
PIPE LABEL=TO-SEP, DIAMETER=0.362 m, ELEVATION=0 m, LENGTH=70 m,
NSEGMENTS=2, ROUGHNESS=3e-005 m

```

```

!
|*****

```

```

!- NODE Definition

```

```

-----
NODE LABEL=INLET, TYPE=TERMINAL, X=0 m, Y=0 m, Z=0 m
NODE LABEL=OUTLET, TYPE=TERMINAL, X=0 m, Y=0 m, Z=0 m

```

```

|*****
!

```

```

! BRANCH Definition

```

```

|*****
BRANCH LABEL=BRANCH-1, FLOAT=ON, FLUID="1", FROM=INLET, GEOMETRY=GEOM_1,
TO=OUTLET

```

```

!
|*****
|- BOUNDARY Definition
|-----
BOUNDARY NODE=INLET,TYPE=CLOSED
BOUNDARY GASFRACTION=2:1 -, NODE=OUTLET, PRESSURE=2:68.3 bara,
TEMPERATURE=2:20 C, \
    TIME=( 0, 1000000 ) s, TYPE=PRESSURE, WATERFRACTION=2:0 -
!
|*****
|- POSITION Definition
|-----
POSITION LABEL=INLET, BRANCH=1, PIPE=1, SECTION=1
POSITION LABEL=RISERBASE, BRANCH=1, PIPE=RISER, SECTION=1
POSITION LABEL=RISERTOP, BRANCH=1, PIPE=RISER, SECTION=4
POSITION LABEL=OUTLET, BRANCH=1, PIPE=TO-SEP, SECTION=2
!
|*****
! INITIALCONDITIONS Definition
|*****
INITIALCONDITIONS TEMPERATURE=( 90, 60 ) C
!
|*****
! HEATTRANSFER Definition
|*****
HEATTRANSFER BRANCH=BRANCH-1, HAMBIENT=10 W/m2-C, HMININNERWALL=0 W/m2-
C, HOUTEROPTION=HGIVEN, \
    PIPE=INLET, TAMBIENT=25 C, TIMESERIES=OFF
HEATTRANSFER BRANCH=BRANCH-1, HAMBIENT=1000 W/m2-C, HMININNERWALL=0
W/m2-C, HOUTEROPTION=HGIVEN, \
    INTAMBIENT=25 C, INTERPOLATION=VERTICAL, OUTTAMBIENT=16 C,
PIPE=INLET_B, \
    TIMESERIES=OFF
HEATTRANSFER BRANCH=BRANCH-1, HAMBIENT=1000 W/m2-C, HMININNERWALL=0
W/m2-C, HOUTEROPTION=HGIVEN, \
    PIPE=( PIPE_1A, PIPE_1, PIPE_16, PIPE_17, PIPE_18, PIPE_19, PIPE_20, \
        PIPE_21, PIPE_35, PIPE_36, PIPE_38, PIPE_39, PIPE_41, PIPE_42, PIPE_43, \
        PIPE_44, PIPE_47, PIPE_48, PIPE_50, PIPE_51, PIPE_52, PIPE_56, PIPE_59, \
        PIPE_61A, PIPE_61D ), TAMBIENT=16 C, TIMESERIES=OFF
HEATTRANSFER BRANCH=BRANCH-1, HAMBIENT=1000 W/m2-C, HMININNERWALL=0
W/m2-C, HOUTEROPTION=HGIVEN, \
    INTAMBIENT=16 C, INTERPOLATION=VERTICAL, OUTTAMBIENT=25 C, PIPE=RISER, \
    TIMESERIES=OFF
HEATTRANSFER BRANCH=BRANCH-1, HAMBIENT=10 W/m2-C, HMININNERWALL=0 W/m2-
C, HOUTEROPTION=HGIVEN, \
    PIPE=TO-SEP, TAMBIENT=25 C, TIMESERIES=OFF
!
|*****
|- SOURCE Definition
|-----
SOURCE LABEL=SOURCE-1, BRANCH=BRANCH-1, GASFRACTION=0.34 -, MASSFLOW=36
kg/s, \
    PIPE=INLET, SECTION=1, TEMPERATURE=92.2 C, TIME=0 s, WATERFRACTION=0.2 -

```

```

!
!*****
!- VALVE Definition
!-----
VALVE LABEL=VALVE-1, BRANCH=BRANCH-1, CRITFLOWMODEL=FROZEN, OPENING=1 ,
PHASE=LIQUID, \
    PIPE=TO-SEP, SECTIONBOUNDARY=2, TABLE=TABLE-1, TIME=0 s

!
!*****
!- PRINTINPUT Definition
!-----
PRINTINPUT KEYWORD=GEOMETRY

!
!*****
!- OUTPUT Definition
!-----
OUTPUT COLUMNS=4, DELETEPREVIOUS=OFF, DTOUT=3600 s
OUTPUT COLUMNS=4, DELETEPREVIOUS=OFF, VARIABLE=( GG, GLT, UG, UL, ID, HOL, PT,
\
    TM, BE, DPZ, VOL, DPT, LIQC, RMERR, NSLUG )

!
!*****
!- TREND Definition
!-----
TREND DELETEPREVIOUS=OFF, DTPLOT=1 s, TIME=0 s
TREND POSITION=INLET, TIME=0 s, VARIABLE=PT BARA
TREND POSITION=( RISERBASE, OUTLET ), TIME=0 s, VARIABLE=( HOLHL, HOLWT, HOL )
!TREND POSITION=( RISERBASE, OUTLET ), TIME=0 s, VARIABLE=( HOLHLEXP,
HOLWTEXP,
! \
    HOLEXP )
!TREND POSITION=( RISERBASE, OUTLET ), TIME=0 s, VARIABLE=( ULHLEXP, ULWTEXP )
!TREND POSITION=RISERTOP, TIME=0 s, VARIABLE=LSLEXP
TREND POSITION=( RISERBASE, OUTLET ), TIME=0 s, VARIABLE=( GG, GLT, GLTHL,
GLTWT, \
    ID, QLT )
TREND POSITION=OUTLET, TIME=0 s, VARIABLE=( ACCLIQ, ACCOIQ, ACCWAQ )
TREND BRANCH=BRANCH-1, TIME=0 s, VARIABLE=( LIQC, OILC, WATC )
TREND TIME=0 s, VARIABLE=( VOLGBL, NINTGR, HT )

!TREND TIME=0 s, VARIABLE=NSLUG
!
!*****
!- PROFILE Definition
!-----
PROFILE DELETEPREVIOUS=OFF, DTPLOT=600 s, VARIABLE=( GLTHL, GLTWT, PT, TM,
HOLHL, \
    HOLWT, ID, UL, UG, ULWT )

!
ENDCASE

```